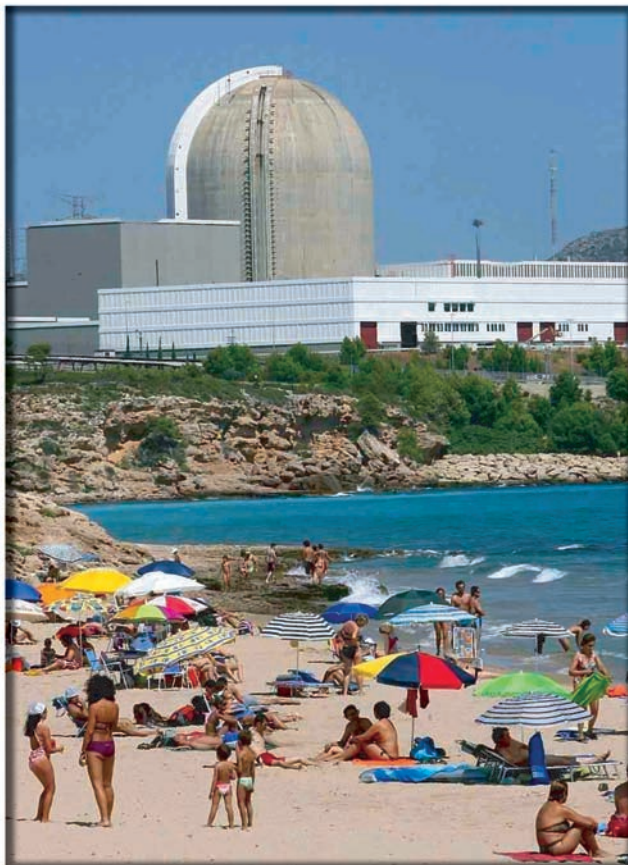


Nie bójmy się energetyki jądrowej!

Doc. dr inż. Andrzej Strupczewski



Stowarzyszenie Ekologów
na Rzecz Energii Nuklearnej SEREN


COSiW

WARSZAWA 2010

Nie bójmy się energetyki jądrowej!

Doc. dr inż. Andrzej Strupczewski

*Książkę tę dedykuję moim dzieciom i wnukom, by mogły
cieszyć się tanim prądem z czystego źródła energii*

Nie bójmy się energetyki jądrowej

Spis treści

1. Cemu potrzebujemy energetyki jądrowej w Polsce?	9
1.1. Co postanowił rząd polski w styczniu 2009 roku?	9
1.2. Na ile wystarczy nam węgla?	10
1.3. Renesans energetyki jądrowej na świecie	13
1.4. Korzyści z energetyki jądrowej	17
2. Czy zaszkodzi nam promieniowanie przy normalnej pracy elektrowni jądrowych?	22
2.1. Im wyżej tym promieniowanie większe – wielkość dawek od tła naturalnego	22
2.2. Gdzie poziom promieniowania jest większy – w Polsce czy w Finlandii?	25
2.3. Gdy powstawało życie promieniowanie było silniejsze	27
2.4. Hipoteza o liniowej zależności zagrożenia od dawki promieniowania	28
2.5. Jakie są dawki promieniowania, które uważamy za dopuszczalne?	29
2.6. Wpływ małych dawek promieniowania na duże grupy ludności	30
2.6.1. Badania w USA	30
2.6.2. Brak ujemnych efektów zdrowotnych podwyższonego promieniowania wśród dużej grupy mieszkańców Chin ...	34
2.6.3. Różnice poziomu promieniowania w Polsce	36
2.6.4. Senatorowie USA też nie boją się przebywać w Bibliotece i w Gmachu Kongresu.	37
2.6.5. Cemu nie mamy zmysłu wykrywającego promieniowanie?	37
2.7. Wpływ narażenia na promieniowanie powodowane przez człowieka	38
2.7.1. Badania pracowników przemysłu jądrowego	38
2.7.2. Badania brytyjskich radiologów	41
2.7.3. Klucz do bezpieczeństwa – rozłożenie dawek w czasie	42
2.7.4. Napromieniowanie rodziców małymi dawkami nie ma wpływu na potomstwo	43
2.7.5. Nowe osiągnięcia w badaniach procesów biologicznych po napromieniowaniu ludzi	44
2.8. Podsumowanie	49
2.9. Dawki wokoło elektrowni jądrowych też są bardzo małe – i nie szkodzą!	49

2.9.1.	Stanowisko energetyki jądrowej – redukujemy dawki ile tylko można!	49
2.9.2.	Małe i wciąż obniżane narażenie radiacyjne pracowników elektrowni.	51
2.9.3.	Stałe zmniejszanie emisji promieniowania z elektrowni jądrowych.	52
2.9.4.	Dawki wokoło elektrowni jądrowych – dopuszczalne i rzeczywiste.	54
2.9.5.	Wodę z elektrowni jądrowej można pić!	56
2.9.6.	Porównania ryzyka powodowanego bliskością elektrowni jądrowej	57
2.10.	Sprawa ognisk zwiększonej częstości występowania białaczki dziecięcej.	58
2.10.1.	Ogniska zwiększonej częstości występowania białaczki dziecięcej w Wielkiej Brytanii	58
2.10.2.	We Francji instalacje jądrowe również nie powodują zagrożenia	59
2.11.	Zarzuty Zielonych w Niemczech – i rzeczywistość	60
2.11.1.	Przypadki białaczki blisko EJ Krummel – długoletnie spory	60
2.11.2.	Wyjaśnienie zagadki – białaczka skutkiem produkcji materiałów wybuchowych	62
2.11.3.	Analizy zachorowalności wokoło elektrowni jądrowych w Niemczech wykazują że promieniowanie z EJ nie może być przyczyną chorób.	62
3.	Czy powinniśmy obawiać się odpadów radioaktywnych?	65
3.1.	Czym grożą nam odpady radioaktywne?	65
3.2.	Recykling paliwa – zamknięty cykl paliwowy (paliwo jądrowe jako surowiec wtórny)	67
3.3.	Co lepiej: czy odpady (radioaktywne lub nie, z elektrowni jądrowych czy z innych) wyrzucać do otoczenia, czy przechowywać pod kontrolą?	70
3.3.1.	System barier zatrzymujących produkty radioaktywne z dala od biosfery	71
3.3.2.	Jak długo system barier będzie skuteczny?	72
3.3.3.	Okręt wojenny Wasa – skutki działania wody przez 350 lat	73
3.3.4.	Odpady radioaktywne z reaktorów naturalnych w Oklo – co pozostało po 2 miliardach lat?	74
3.3.5.	Na jak długo musimy zabezpieczyć odpady radioaktywne?	76

4. Czy mamy bać się awarii jądrowych?	81
4.1. Jak nowoczesne elektrownie jądrowe zapobiegają awariom?	81
4.1.1. Źródła energii w elektrowni jądrowej	81
4.1.2. Układy odbioru ciepła w typowym reaktorze	82
4.1.3. Układy regulacji mocy reaktora	85
4.1.4. Źródła zagrożenia w elektrowni jądrowej	86
4.1.5. Bariery powstrzymujące uwalnianie substancji promieniotwórczych	87
4.2. Zasady bezpieczeństwa jądrowego	88
4.2.1. Zasady ogólne	89
4.2.2. Zasada głębokiej obrony.	89
4.3. Konstrukcja EJ zapewniająca bezpieczeństwo jądrowe	90
4.3.1. Naturalne sprzężenie zwrotne regulujące moc reaktora	90
4.3.2. Układ wyłączenia reaktora oparty na działaniu siły ciężenia	91
4.3.3. Zalanie rdzenia wodą chłodzącą w przypadku rozerwania obiegu pierwotnego	92
4.3.4. Różnorodność układów	93
4.3.5. Rozdzielenie przestrzenne układów	95
4.3.6. Odporność na pożar, zalanie wodą, wstrząsy sejsmiczne i warunki otoczenia	95
4.3.7. Obudowa bezpieczeństwa – najważniejsza bariera zatrzymująca radioaktywność	98
4.4. Elektrownie jądrowe III generacji – odporne nawet na najcięższe awarie	100
4.4.1. Reaktor EPR – odporny na wyciek stopionego rdzenia ze zbiornika reaktora	100
4.4.2. Reaktor AP 1000 – skuteczne chłodzenie rdzenia nawet przy zaniku zasilania elektrycznego	102
4.4.3. Obudowa bezpieczeństwa reaktora AP1000 – zapewnia ochronę nawet przy braku zasilania i bez działań operatora.	104
4.5. Działania i organizacja pracy zapewniające bezpieczeństwo jądrowe	106
4.6. Bezpieczeństwo EJ III generacji na tle innych gałęzi energetyki ..	109
4.6.1. Bilans „zdrowotny” reaktorów budowanych w XX wieku ...	109
4.6.2. Poziom bezpieczeństwa reaktorów III generacji	109
5. A co z Czarnobyłem?	112
5.1. Reaktor RBMK w Czarnobylu odmienny od reaktorów wodnych ...	112
5.1.1. Jakie różnice zadecydowały o tragicznych skutkach błędów operatorów?	112

5.1.2.	Główna wada reaktora RBMK – samoczynny wzrost mocy w pewnych sytuacjach awaryjnych.	115
5.1.3.	Błąd konstrukcyjny w układzie prętów bezpieczeństwa ..	116
5.1.4.	Możliwość odłączenia układu zabezpieczeń reaktora	118
5.1.5.	Przebieg samej awarii	119
5.2.	Skutki Czarnobyla – mity i fakty	120
5.3.	Czy jednak w polskiej elektrowni jądrowej może dojść do awarii takiej jak w Czarnobylu?	125
6.	Czy nas stać na budowę elektrowni jądrowej?	128
6.1.	Czemu energetyka jądrowa stała się tańsza od innych źródeł energii	128
6.1.1.	Osiągnięcia w eksploatacji elektrowni jądrowych – wysoka dyspozycyjność.	128
6.1.2.	Wzrost stopnia wypalenia paliwa	129
6.1.3.	Wprowadzenie możliwości regulacji mocy w funkcji obciążenia	130
6.1.4.	Ogólna ocena kosztów	130
6.2.	Korzyści ekonomiczne w cyklu paliwowym	131
6.2.1.	Koszty paliwa dla elektrowni jądrowej	131
6.2.2.	Koszty unieszkodliwiania odpadów	132
6.2.3.	Pozytywne doświadczenie z likwidacji i rozbiórki elektrowni po zakończeniu jej okresu pracy.	132
6.2.4.	Łączne koszty paliwa, unieszkodliwiania odpadów i likwidacji elektrowni.	133
6.2.5.	Koszty spalania węgla w elektrowni węglowej	134
6.3.	Nakłady inwestycyjne	134
6.3.1.	Standaryzacja elementów i skrócenie czasu budowy	134
6.3.2.	Nakłady inwestycyjne dla elektrowni jądrowych	135
6.3.3.	Porównanie nakładów inwestycyjnych dla EJ z nakładami na elektrownie węglowe	136
6.4.	Porównania kosztów energii z różnych źródeł	137
6.4.1.	Porównanie kosztu wytwarzania energii elektrycznej z różnych źródeł opracowane w MIT	137
6.4.2.	Porównanie nakładów inwestycyjnych na energetykę jądrową i wiatrową	138
6.5.	Pełne porównanie kosztów energii uzyskiwanej z różnych źródeł	141
6.5.1.	Ocena ekonomiczna opracowana w Finlandii.	141
6.5.2.	Analizy brytyjskie potwierdzają, że elektrownie jądrowe wytwarzają energię najtaniej	144
6.5.3.	Czy przykład trudności firmy British Energy nie przeczy pozytywnym ocenom kosztów elektrowni jądrowych? ...	145

6.6.	Warunek sukcesu: Terminowe uruchomienie elektrowni jądrowej	151
6.7.	A więc czy Polskę stać na budowę elektrowni jądrowej?	153
7.	Czemu ekologodzy popierają obecnie energetykę jądrową?	154
7.1.	Dawne stanowisko ekologów wobec rozwoju energetyki jądrowej	154
7.2.	Zmiana nastawienia ekologów wobec energii jądrowej	157
7.3.	Jak przebiega dyskusja o energetyce jądrowej	161
7.3.1	Tło historyczne – protesty przeciw nowym technologiom w przeszłości.	161
7.3.2	Zarzuty przeciwników energetyki jądrowej w XX wieku ..	164
7.3.3	Zarzuty stawiane w Polsce	167
7.3.4	Ataki na dr Gale’a – „lekarza Czarnobyli”	169
7.4.	Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej SEREN ...	170

1. Czemu potrzebujemy energetyki jądrowej w Polsce?

1.1. Co postanowił rząd polski w styczniu 2009 roku?

Budowy pierwszej elektrowni jądrowej w Polsce nad jeziorem Żarnowieckim zaniechano w r. 1990. Głównym powodem była nieufność społeczeństwa wobec tego reaktora, któremu zarzucano, że musi być zły, bo projektowano go w Związku Radzieckim. Był to okres zaraz po katastrofie w Czarnobylu i chociaż w Żarnowcu miał powstać reaktor zupełnie inny niż czarnobylski, obawy przed radziecką konstrukcją były silniejsze od argumentów rozumowych. Z perspektywy czasu widać, że decyzja ówczesna była błędna – elektrownie jądrowe wyposażone w reaktory tego samego typu są do dziś bezpiecznie i bardzo ekonomicznie eksploatowane w Finlandii, Czechach, na Węgrzech i w Słowacji¹.

Analizy, których wyniki podane są w rozdziale szóstym pokazują, że energetyka jądrowa jest obecnie konkurencyjna ekonomicznie i ekologicznie w stosunku do elektrowni na paliwa organiczne (węgiel, gaz i ropa naftowa). Jest ona niezbędna dla trwałego utrzymania obecnego poziomu cywilizacji świata i dalszego jej rozwoju. Unia Europejska zdaje sobie sprawę jak ważne jest to źródło energii – wskazuje na to wyrażenie uchwałą Parlamentu Europejskiego z 14 października 2007 r.² oraz wielokrotnie oświadczenia przedstawicieli Komisji Europejskiej (w tym przewodniczącego Jose Manuela Barroso) o konieczności uwzględnienia energetyki jądrowej w unijnej polityce energetycznej.

Przeciwnicy energetyki jądrowej często posługują się argumentem Czarnobyla, wyzyskując szok emocjonalny jaki w roku 1986 wzbudziła ta katastrofa w społeczeństwie świata. Dzisiaj wiemy, że ówczesne obawy były ogromnie przesadzone (patrz rozdz. 5). Wielokrotnie też sprawdzono, że w reaktorach budowanych zgodnie z europejskimi zasadami bezpieczeństwa awaria typu czarnobylskiego jest niemożliwa dzięki rygorystycznemu zastosowaniu zasady, że po awarii moc reaktora musi maleć, a nie rosnać, jak to było w Czarnobylu. Reaktory III generacji, które zapewne powstaną w Polsce, są tak bezpieczne, że gdyby nawet doszło do najcięższych awarii, to ich skutki nie mogłyby być odczuwalne dalej niż w odległości 1-3 km od reaktora.

¹ Słowacy, którzy w latach 80-tych ub. wieku budowali swoją elektrownię jądrową w Mochovcach – podobną do naszej w Żarnowcu – w latach 90-tych ukończyli i oddali do eksploatacji 2 bloki energetyczne, zaś w zeszłym roku wznowili budowę pozostałych dwóch bloków.

² Rezolucja Parlamentu Europejskiego (2007 / 2091 (INI) z 24 października 2007 roku o źródłach energii konwencjonalnej oraz technologiach energetycznych

Do wznowienia programu energetyki jądrowej skłaniają nas względy ekonomiczne. Elektrownie jądrowe są już obecnie ekonomicznie konkurencyjne, a wysokie opłaty za emisje CO₂ istotnie zwiększają tę konkurencyjność. Ponadto radykalnie zaostrzono normy emisji innych zanieczyszczeń. Obecnie planowanie przyszłości energetyki w oparciu o dalsze spalanie węgla prowadziłoby do ogromnych strat finansowych i odpływu przemysłu z naszego kraju do krajów z tańszą energią elektryczną. Nie bez znaczenia są też duże trudności i koszty (szacowane na ponad 50 mld zł) udostępnienia nowych złóż i pokładów węgla kamiennego i brunatnego, jako że aktualnie eksploatowane zasoby operatywne wyczerpią się w ciągu następnych 30-40 lat³. Z drugiej strony, same odnawialne źródła energii (OZE) nie zapewnią stabilnych i wystarczających dostaw energii elektrycznej, a poza tym energia z tych źródeł jest znacznie droższa od energii wytwarzanej w konwencjonalnych elektrowniach ciepłych i jądrowych i z tego powodu wymaga dużych dotacji obciążających każdego z nas, jako podatnika.

Z powyższych względów Rada Ministrów w dniu 13 stycznia 2009 r. postanowiła stworzyć program rozwoju energetyki jądrowej. W maju 2009 r. na stanowisko Pełnomocnika Rządu ds. Polskiej Energetyki Jądrowej została powołana pani Hanna Trojanowska w randze Podsekretarza Stanu. Pełnomocnik ma opracować program rozwoju energetyki jądrowej w Polsce, który w końcu 2010 r. zostanie przedstawiony parlamentowi do zatwierdzenia. Realizacja tego programu wymagać będzie pokonania wielu barier, ale oferuje krajowi wiele korzyści. Jakie – zobaczymy poniżej.

1.2. Na ile wystarczy nam węgiel?

Zasoby węgla w Polsce są duże, ale już w 2008 roku Polska stała się importem węgla netto, a w perspektywie 30 lat grozi nam jego brak. Jak pisze E. Sobczyk z Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN⁴, zasoby przemysłowe węgla kamiennego wg stanu na koniec 2006 roku wynosiły 5 miliardów ton. Zasoby operatywne są jednak mniejsze – są to zasoby przemysłowe pomniejszone o przewidywane straty. Wielkość zasobów operatywnych łącznie węgla energetycznego i koksowego w kopalniach czynnych na koniec 2006 r. wynosiła 3 miliardy ton. Oznacza to, że przy założeniu całkowitego wydobycia na poziomie 100 mln ton rocznie wystarczalność zasobów wynosi około 30 lat⁵.

³ Sobczyk E. Czy krajowej energetyce wystarczy polskiego węgla? Energetyka Ciepła i Zawodowa Raport 1/2009, str 113-117

⁴ tamże

⁵ Tamże s 114

Ale rzeczywistość jest jeszcze gorsza. Część zasobów węgla znajduje się w filarach ochronnych, których nie można naruszyć ze względu na groźbę zawalenia się chodnika i powstania szkód górniczych na terenach zabudowanych. Ponadto część zasobów znajduje się w pokładach cienkich, poniżej 1,5 m grubości, występują uskoki uniemożliwiające zaprojektowanie ścian o większych wybiegach, istnieją też zagrożenia naturalne. Z tych względów ocenia się, że co najmniej 20-30% zasobów zaliczanych do operatywnych nie zostanie wykorzystane. Dlatego rzeczywista żywotność kopalni będzie krótsza od tej, która wynika z obliczeń.

Z przeprowadzonych symulacji wystarczalności zasobów wynika, że po roku 2030 zostanie czynnych tylko 12 kopalń węgla kamiennego, w których pozostanie 390 mln ton zweryfikowanych zasobów operatywnych. Kopalnie te będą w stanie wydobyć maksymalnie 47 mln ton węgla rocznie. Nawet przy bardzo dużym zmniejszeniu zapotrzebowania rynku krajowego na węgiel kamienny będzie to wielkość niewystarczająca dla pokrycia wymagań odbiorców.

Złóża węgla brunatnego klasyfikowane jako pewne obejmują ponad 24 mld ton. Z węgla brunatnego uzyskuje się obecnie około 10 000 MW elektrycznych. Ale wydobyte w kopalniach obecnie czynnych spadnie w 2030 roku o ok. 20% a w 2050 całkowicie zaniknie. Jeśli nie zostaną wykorzystane złoża perspektywiczne, to moc bloków energetycznych zmaleje w roku 2030 do 7000 MW i do roku 2050 spadnie do zera⁶. Wydobyte węgla brunatnego może się zwiększyć, ale wymaga to otworzenia nowych złóż, przede wszystkim złoża „Gubin”, a w dalszej kolejności złoża „Legnica”. Przy uwzględnieniu odpowiednich dużych nakładów na budowę kopalni i założeniu, że zagospodarujemy te złoża mimo problemów ekologicznych, wydobyte węgla brunatnego zostanie utrzymane – ale wobec przewidywanego wzrostu zapotrzebowania na energię i zmniejszenia podaży węgla kamiennego i tak pozostanie luka w zaopatrzeniu polskiego systemu energetycznego⁷.

A przy tym węgiel, podobnie jak ropa naftowa i gaz ziemny, to cenny surowiec dla chemii. Spalanie go to grzech wobec naszych wnuków – skąd będą brać podstawowy materiał dla wszystkich procesów chemii organicznej? Węgiel jest częścią dziedzictwa, które otrzymaliśmy w spadku od poprzednich pokoleń i które powinniśmy pozostawić naszym prawnukom. Spalając węgiel, pozbawiamy ich możliwości wykorzystania go jako surowca chemicznego. Natomiast uran jest nieprzydatny do niczego poza rozszczepieniem i wytworzeniem w ten sposób

⁶ Kasztelewicz Z, O planach wobec węgla brunatnego, ? Energetyka Ciepła i Zawodowa Raport 1/2009, str 128-130

⁷ Duda M.: Prognoza zapotrzebowania na paliwa i energię do 2030 roku, Prezentacja dla Polskiego Komitetu Światowej Rady Energetycznej, Warszawa, 20 maja 2009 r.

energii. Wykorzystując go w reaktorach jądrowych robimy to samo, co zrobiliśmy z nim *nasze wnuki i prawnuki*. Mamy więc moralne prawo zużywać uran – zwłaszcza, że jego zasoby, przy efektywnym wykorzystaniu, wystarczą na o wiele dłużej niż paliwa kopalne – ale jest dylematem, czy mamy moralne prawo spalić cały nasz węgiel.

Dla naszego bezpieczeństwa energetycznego ważną sprawą jest też możliwość tworzenia zapasów paliwa. Zgromadzenie w kraju rocznego zapasu paliwa jądrowego jest technicznie łatwe, można też zgromadzić jego zapas na 10 lat a nawet i dłużej. Natomiast zgromadzenie zapasu jakichkolwiek innych paliw na 10 lat ani nawet na 1 rok nie jest wykonalne, ponieważ np. węgla potrzeba 75 000 razy więcej niż uranu. Do jednej elektrowni jądrowej roczny zapas paliwa (24-30 ton) przywozi jedna ciężarówka, do elektrowni węglowej do przywozu 3 mln ton potrzeba byłoby 100 000 takich pojazdów. W Polsce zapasy węgla zmagazynowane przy elektrowniach i elektrociepłowniach wystarczają na 35 dni, a gazu na 11 dni. To ogranicza naszą odporność na zagrożenia naturalne i naciski polityczne.

W każdej elektrowni jądrowej jest zapas paliwa na ponad rok, a nawet jeśli nie będziemy gromadzili zapasów uranu na wiele lat, to i tak energetyka jądrowa zapewnia bezpieczeństwo energetyczne, bo uran wydobywany jest w wielu krajach, w tym głównie w krajach rozwiniętych gospodarczo i w krajach o stabilnej sytuacji politycznej. Nie grozi nam uzależnienie od jego producentów w Australii, Namibii, USA, RPA czy w Kanadzie. Co więcej, złoża uranu występują także i w Polsce. Zasoby zidentyfikowane i prognozowane w Polsce wg OECD⁸ ocenia się na ponad 105 tysięcy ton o zawartości uranu w rudzie od 230 do 1100 ppm⁹. Doświadczenie światowe pokazuje, że można z zyskiem eksploatować rudę o zawartości uranu od 130 ppm w górę. Ponadto znaczące ilości uranu wyrzucane są jako odpad przy wydobyciu rudy miedzi (ponieważ uran często występuje razem z miedzią, a czwarta pod względem wielkości wydobycia uranu na świecie jest australijska kopalnia Olympic Dam, będąca przede wszystkim kopalnią miedzi). Obecnie ilość uranu zrzućana na hałdy w postaci odpadów o niskiej zawartości uranu to $\sim 1\,700$ t/rok¹⁰. Stanowi to rocznie ekwiwalent paliwa dla 10 elektrowni jądrowych o łącznej mocy 10 000 MW¹¹.

⁸ Prasser H.M. 2008, Are the sources of uranium big enough for the nuclear energy industry, Nuclear Energy In Poland - Opportunity or necessity? Oct. 20-21, 2008, Warszawa, Poland

⁹ Ppm – parts per million – części na milion. 100 ppm równe jest 0,01%, lub 0,1 grama na kg. t/rok czyli ton rocznie.

¹¹ Prasser H.M. 2008, Are the sources of uranium big enough for the nuclear energy industry, Nuclear Energy In Poland - Opportunity or necessity? Oct. 20 - 21, 2008, Warszawa, Poland

Paliwo uranowe na świecie jest tak tanie, że przez długi czas o wykorzystaniu polskich zasobów uranu nawet nie myślano. Obecnie powstają nowe możliwości – rozwój energetyki jądrowej w Polsce zaktywizuje również rozwój pozyskania uranu w naszym kraju.

1.3. Renesans energetyki jądrowej na świecie

Pierwszym krajem Unii Europejskiej, który po zastoju, spowodowanym syndromem czarnobylskim (tj. panicznym i nieuzasadnionym strachem przed energią atomową, wywołanym awarią w Czarnobylu w 1986 r., która będzie omówiona w rozdziale 5), wznowił budowę elektrowni jądrowych, była Finlandia. Obecnie trwa budowa reaktora w Olkiluoto, na północ od Helsinek. Jest to reaktor wodny ciśnieniowy EPR (skrót od European Pressurized Reactor), zapewniający podwyższone bezpieczeństwo i lepsze osiągi ekonomiczne, ale wymagający produkcji elementów większych niż w reaktorach poprzedniej generacji. W dodatku jest on budowany po wieloletniej przerwie w rozwoju energetyki jądrowej w Unii Europejskiej. Powoduje to trudności i opóźnienia, ale Finowie – zgodnie z zasadami bezpieczeństwa obowiązującymi w całej energetyce jądrowej – uważają, że bezpieczeństwo jest ważniejsze niż tempo budowy, bo elektrownia ma pracować niezawodnie i bezpiecznie przez 60 lat. Dlatego przestrzegają wszystkich wymagań jakości, nawet gdy powoduje to opóźnienia. Zresztą Finowie są pewni, że te kłopoty są typowe dla budowy boku prototypowego i nie powtórzą się one w następnych projektach. Dobitym dowodem na to jest fakt, że trzy różne firmy fińskie złożyły już wnioski o zezwolenie na budowę dalszych trzech elektrowni jądrowych.

Finlandia buduje nie tylko elektrownie jądrowe, ale także i składowisko wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych (a właściwie składowisko wypalonego paliwa, ponieważ w Finlandii nie praktykuje się jego przerobu). Budowa jest oparta na decyzji parlamentu fińskiego, który uznał budowę elektrowni jądrowych i składowiska odpadów za działania „dla dobra społeczeństwa fińskiego” i przy pełnym poparciu miejscowej ludności.

Wkrótce po Finlandii, rozpoczęto budowę nowej elektrowni jądrowej z reaktorem EPR we Francji we Flamanville. Następny reaktor we Francji będzie budowany w Penly począwszy od 2011 roku. Francja przoduje w wytwarzaniu energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych – ale konsekwentnie rozwija energetykę jądrową, która zaspakaja 80% jej potrzeb i zapewnia czystą, bezpieczną i taną energię elektryczną.

A w ślad za Finlandią i Francją idą inne kraje. W styczniu 2008 roku, po dwuletnich analizach ekonomicznych i wszechstronnej dyskusji

społecznej, rząd brytyjski wydał „Białą Księgę” uzasadniającą konieczność budowy nowych elektrowni jądrowych w Wielkiej Brytanii. Minister gospodarki podkreślił, że nie będzie się to wiązało z obciążeniem krajowego budżetu, bo koszty budowy elektrowni jądrowych, ich likwidacji i unieszkodliwiania odpadów radioaktywnych będą ponosiły w pełni przedsiębiorstwa energetyczne (czyli właściciele tych elektrowni).

Mimo protestów organizacji Greenpeace, programowo zwalczającej energetykę jądrową, decyzja ta została przyjęta z pełną aprobatą przez społeczeństwo brytyjskie. Poparcie jest tak mocne, że nawet minister gospodarki w opozycyjnym „gabiniecie cieni” oświadczył, iż opozycja uważa za swój obywatelski obowiązek odłożyć na bok spory polityczne i walkę o głosy wyborcze i współpracować z rządem dla dobra kraju na rzecz rozwoju energetyki jądrowej¹².

W lecie 2009 roku opublikowano raport przemysłu brytyjskiego¹³ opracowany na podstawie analiz firmy McKinsey, bardzo aktywnej w sprawach zmiany klimatu. Wbrew oczekiwaniom, że firma ta będzie wzywała do rozwoju odnawialnych źródeł energii (OZE) okazało się, że dla utrzymania konkurencyjności przemysłu brytyjskiego i uniknięcia ogromnego importu gazu konieczne jest zmniejszenie planowanego udziału OZE w 2020 roku z planowanych 32% do około 25% i zdecydowane zwiększenie udziału energetyki jądrowej. W przeciwnym razie wystąpi wzrost cen energii elektrycznej o około 30% i import gazu rzędu 90 mld m³ rocznie, z czego ponad połowę trzeba będzie uzyskać z gazu skroplonego LNG. Widać tu skutki rabunkowej gospodarki, która spowodowała wyczerpanie złóż gazu pod Morzem Północnym, o czym mówi rozdział omawiający przejściowe kłopoty firmy British Electric. Nawiasem mówiąc, Polska ma znacznie mniejsze zasoby gazu niż Wielka Brytania. Skoro Brytyjczycy boją się uzależnienia od importu gazu, czy nie powinniśmy się bać tego jeszcze bardziej?

Podobny raport opracowany na polecenie premiera Wielkiej Brytanii przedłożył były minister energetyki Malcolm Wick¹⁴. Wick stwierdził w swym raporcie, że planowany udział energii odnawialnej wynoszący 15% w 2020 roku jest już celem bardzo ambitnym i nie należy dążyć do wyższego udziału OZE, przeciwnie, należy wycofać się z dotychczasowych planów ekspansji OZE a podnieść udział energetyki jądrowej z 20% do 35-40% w 2030 roku.

Raport ten został przyjęty z aprobatą przez rząd i przemysł. Ale pomyślmy, jaki stąd wniosek dla Polski. W Wielkiej Brytanii średnie

¹² „To do what's right for our country.” Times Online, January 10, 2008

¹³ Confederation of British Industry "Decision Time" July 2009 www.cbi.org.uk

¹⁴ Wick M.: Energy Security: A national challenge in a changing world, August 2009

prędkości wiatru wynoszą około 8-10 m/s, a w Polsce – około 5 m/s. Moc wiatraka jest proporcjonalna do trzeciej potęgi prędkości wiatru. Skoro Wielka Brytania, dysponująca potencjałem energetyki wiatrowej dużo większym niż Polska uznaje, że 15% jest celem „bardzo ambitnym”, którego w perspektywie 2020 roku nie należy przekraczać, to i w Polsce należy uznać, że osiągnięcie 15% energii ze źródeł odnawialnych w 2020 roku będzie wielkim sukcesem. Wezwania fundacji Greenpeace do jeszcze szybszego rozwoju OZE nie są uzasadnione¹⁵.

We Włoszech, które po awarii w Czarnobylu wycofały się z energetyki jądrowej, przerwały budowę nowych reaktorów i zamknęły istniejące elektrownie jądrowe, na jesieni 2008 roku premier a potem minister gospodarki oświadczyli, że Włochy popełniły w ten sposób „straszliwą pomyłkę”, która kosztowała je 20 lat opóźnienia w rozwoju gospodarczym i ponad 50 miliardów euro strat¹⁶. Budowa pierwszej elektrowni jądrowej ma zacząć się w 2013 roku (a więc wcześniej niż w Polsce). Warto dodać, że zanim rząd włoski podjął decyzję o rozwoju energetyki jądrowej, energetycy włoscy już wcześniej zdali sobie sprawę z konkurencyjności ekonomicznej elektrowni jądrowych. Dlatego wykupili oni w Hiszpanii udziały w elektrowniach jądrowych (na łączną moc 2650 MW, prawie tyle co druga co do wielkości polska elektrownia – Kozienice) oraz kupili elektrownię jądrową Mochowce z blokami¹⁷ 1 i 2 na Słowacji, gdzie w 2008 rozpoczęli budowę dwóch dalszych bloków nr 3 i 4. Bloki te są oparte na tym samym projekcie co bloki 1 i 2, a więc jest to wznowienie budowy zatrzymanej na początku lat 90-tych, w tym samym czasie i z dokładnie tą samą technologią, co nasza elektrownia jądrowa w Żarnowcu – z tą różnicą, że Słowacy swojej nie porzucili.

Decyzja o budowie tych bloków ma dla Polaków szczególną wymowę – są to bloki z takimi samymi reaktorami i o konstrukcji podobnej do tych, które miały pracować w Żarnowcu. Autor tej książki został zaproszony jako ekspert ds. bezpieczeństwa reaktorowego przez rząd austriacki w grudniu 2008 roku na spotkanie austriacko-słowackie z udziałem Włochów, którzy pełnią rolę wiodącą w rozbudowie EJ Mochowce. Przedyskutowano tam problemy bezpieczeństwa tych bloków. Okazało

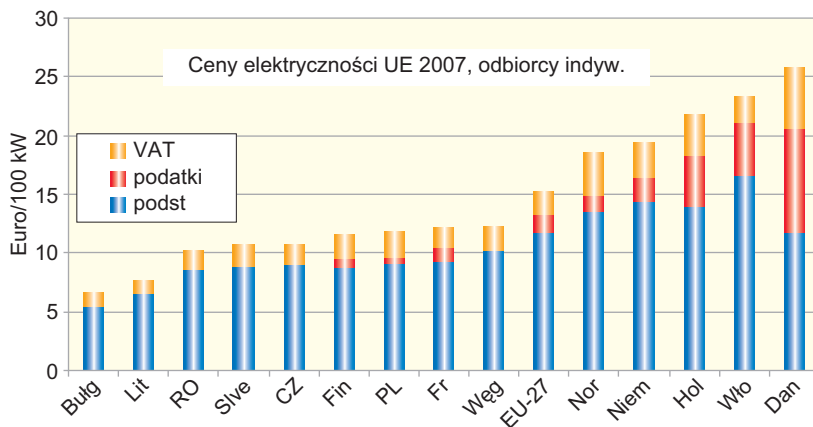
¹⁵ „do roku 2020 Polska może pokryć 26% , a do 2050 aż 80% zapotrzebowania na prąd z OZE” [R]ewolucja energetyczna dla Polski, Greenpeace www.greenpeace.org/raw/.../rewolucja-energetyczna-polska.pdf

¹⁶ http://www.world-nuclear-news.org/NP_Nuclear_phase_out_a_50_billion_mistake_2010081.html

¹⁷ Blok energetyczny – elektrownia składa się zwykle z dwóch lub więcej bloków, każdy z reaktorem energetycznym, układem wytwarzania pary, turbozespołem i generatorem elektrycznym.

się, że spełniają one wymogi współczesne i nie ma powodów, by sprzeciwiać się ich budowie¹⁸.

Włoska firma ENEL podpisała już porozumienie z francuską firmą EDF o współpracy w budowie elektrowni jądrowych we Włoszech¹⁹. Decyzja rządu włoskiego o wznowieniu programu rozwoju energetyki jądrowej we Włoszech przywróciła nadzieję na obniżenie kosztów energii elektrycznej, która we Włoszech jest bardzo wysoka – druga w Unii Europejskiej. Przy okazji warto wspomnieć, że po najwyższej cenie w UE energię elektryczną kupują odbiorcy prądu w Danii, która wyrzeka się energetyki jądrowej (rys. 1.1).



Rys. 1.1. Ceny energii elektrycznej dla odbiorców indywidualnych w Unii Europejskiej²⁰

Powrót do energetyki jądrowej ogłosiła również w lutym 2009 roku Szwecja, która po referendum w 1979r., zorganizowanym na fali dyskusji nt. bezpieczeństwa energetyki jądrowej jaka nastąpiła po awarii w amerykańskiej EJ Three Mile Island, podjęła decyzję o zaprzestaniu budowy elektrowni jądrowych i wycofaniu się z energetyki jądrowej. Obecnie rząd szwedzki oznajmia, że będą budowane reaktory o większej

¹⁸ „questions ...raised by the Austrian experts were answered to the satisfaction of the Austrian side”, 16th Bilateral Meeting under the Agreement between the Government of the Slovak Republic and Government of Austria on Issues of common interest in the field of nuclear safety and radiation protection, 1st and 2nd December 2008.

¹⁹ http://www.world-nuclear-news.org/C_Company_to_develop_Italian_nuclear_is_launched_0308091.html

²⁰ GOERTEN J. CLEMENT E., Electricity prices for EU households and industrial consumers on 1 January 2007, Statistics in focus, ENVIRONMENT AND ENERGY, 80/2007

mocy na miejsce starych, a ponad 62% Szwedów popiera rozbudowę energetyki jądrowej²¹.

Podobne decyzje podejmowane są w innych krajach Europy – w Holandii, w Czechach, na Słowacji, na Węgrzech, w Bułgarii, w Estonii, w Szwajcarii, Albanii, Chorwacji czy Białorusi. Rosja, Chiny, Korea Płd., Indie i Japonia mają wielkie plany rozbudowy energetyki jądrowej, a dalsze elektrownie powstają lub są projektowane w Turcji, Egipcie, Arabii Saudyjskiej, Zjednoczonych Emiratach Arabskich, w Indonezji, w RPA, Brazylii, Argentynie, krajach arabskich nad Morzem Śródziemnym (tzw. państwa Maghrebu) i w innych krajach. W USA złożono już wnioski o zezwolenie na budowę ponad 30 bloków jądrowych dużej mocy, a opinia publiczna zdecydowanie popiera rozwój energetyki jądrowej²².

Firmy reaktorowe podejmują zdecydowane kroki dla zwiększenia swego potencjału produkcyjnego. Firma AREVA zamierza zatrudnić 12 000 nowych pracowników w 2009 roku²³ i tworzy nowe zakłady produkcji ciężkich elementów EJ, a podobnie postępuje Westinghouse i inne wielkie firmy reaktorowe.

1.4. Korzyści z energetyki jądrowej

Głównym powodem renesansu energetyki jądrowej jest jej konkurencyjność ekonomiczna i ekologiczna. Opiera się ona na wysokim współczynniku wykorzystania mocy zainstalowanej²⁴ przekraczającym 90%, zerowej emisji CO₂ i na bardzo niskich i stabilnych kosztach paliwa. Dodatkowym bodźcem dla budowy elektrowni jądrowych jest wprowadzenie przez Unię Europejską opłat za emisję CO₂, które będą zakupowane w drodze licytacji na wolnym rynku. Celem tych opłat jest zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych. Spodziewane ceny to przynajmniej 40 euro/t CO₂, ale mogą one być znacznie wyższe. Wobec tego, że praca elektrowni jądrowej nie powoduje emisji CO₂, kraje mające elektrownie jądrowe będą cieszyły się znacznie niższymi cenami energii niż kraje spalające węgiel.

O tym, dlaczego energia z elektrowni jądrowych jest obecnie tańsza od energii z innych źródeł, mówi rozdział 6 – Czy stać nas na budowę elektrowni jądrowej?

²¹ WNP: Szwedzi chcą rozwoju energetyki jądrowej 13. Lutego 09

²² Record support for American nuclear, WNA, 23 March 2009

²³ http://www.world-nuclear-news.org/C-Areva_launches_international_recruitment_drive-1505094.html

²⁴ współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej to stosunek energii wytworzonej w ciągu roku do energii, którą można byłoby otrzymać, gdyby elektrownia pracowała na pełnej mocy projektowej przez cały czas.

Z punktu widzenia każdego z nas, najważniejsze jednak jest to, że energetyka jądrowa pozwala produkować energię elektryczną przy zachowaniu czystego powietrza, czystej gleby i wody. Nie powoduje ona emisji zanieczyszczeń powietrza związanych ze spalaniem węgla (SO_2 , NO_x i pyłów, metali ciężkich, między innymi rtęci), dla których normy dopuszczalnych wielkości emisji są coraz bardziej zaostrzane przez UE i które powodują realne straty zdrowia.

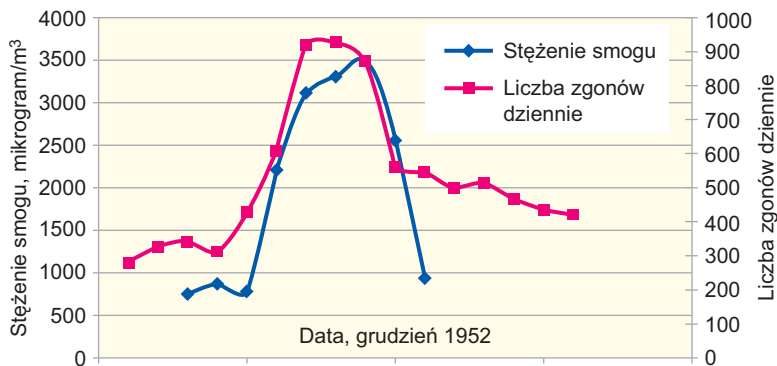
Badania przeprowadzone w USA, Europie Zachodniej a także w innych krajach wykazały, że zanieczyszczenie powietrza cząstkami pyłu pociąga za sobą wzrost zachorowalności i umieralności. Już przy poziomach stężeń pyłu obecnie występujących na wielu obszarach zurbanizowanych występuje pogorszenie funkcjonowania płuc, zwiększona częstość występowania chorób układu oddechowego i naczyniowo-sercowego, zwiększony zakres hospitalizacji oraz umieralności. Najgroźniejszą frakcją pyłu jest pył drobny o średnicy mniejszej od 2,5 mikrona ($\text{PM}_{2.5}$), przenikający przez naturalne filtry w układzie oddechowym i osadzający się głęboko w płucach. Powoduje on choroby narządu oddechowego i prawdopodobnie działa promocyjnie na rozwój nowotworów płuc. Niestety ten właśnie drobny pył najłatwiej przenika przez filtry instalowane w układach odlotowych spalin z elektrowni ciepłych. Wraz z pyłami emitowane są metale ciężkie, często o działaniu toksycznym. Substancje takie jak ołów i rtęć powodują trwałe szkody zdrowotne, a arsenik, beryl czy kadm są trujące i rakotwórcze.

Krótkotrwałe narażenie na SO_2 wywołuje nasilenie symptomów chorobowych, a przy długotrwałym narażeniu obserwowano systematycznie zwiększoną umieralność, wzrost przyjęć do szpitala i chroniczne choroby płuc. Stężenie w wysokości kilku ppm powoduje zaburzenie w fotosyntezie roślin. SO_2 jest obok tlenków azotu główną przyczyną powstawania kwaśnych deszczów, które powodują nie tylko niszczenie świata roślinnego, ale i przyspieszają korozję obiektów wykonanych z metalu, kamienia i betonu. Zakwaszanie tymi deszczami gleby powoduje rozpuszczanie soli metali ciężkich, co z kolei pogarsza jakość zdrowotną produktów żywnościowych otrzymywanych na tych glebach. W niskich temperaturach tlenki siarki w obecności wykroplonej wody skraplają się jako kwas siarkowy, który oddziałuje żrąco na błony śluzowe, a osadzając się na powierzchni metalowych i betonowych konstrukcji wywołuje ich korozję²⁵.

²⁵ Strupczewski A., Borysiewicz M., Tarkowski S., Radovic U. : Ocena wpływu wytwarzania energii elektrycznej na zdrowie człowieka i środowisko i analiza porównawcza dla różnych źródeł energii. Symp. Energia Jądrowa dla Polski, Warszawa, 2001

Dwutlenek azotu powoduje choroby układu oddechowego, a narażenie na jego wysokie stężenia może powodować bronchit u astmatyków i u osób zdrowych. Najbardziej narażone są dzieci i astmatycy. Badania epidemiologiczne wykazały zwiększone o 20% ryzyko chorób układu oddechowego u dzieci przy wzroście stężenia NO_2 o około $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w ciągu 2 tygodni²⁶. W małych ilościach NO_2 oddziałuje na rośliny jak nawóz, w ilościach większych hamuje jednak ich rozwój. W upalne dni i w kontakcie z węglowodorami wytwarza ozon (substancję szkodliwą), w kontakcie z rodnikami hydroksylowymi powstaje kwas azotowy, istotny składnik kwaśnych deszczów. Podtlenek azotu N_2O jest gazem wnoszącym wkład w efekt cieplarniany. Obecność N_2O w stratosferze prowadzi do jego reakcji z tlenem atomowym, który bierze udział w katalitycznym niszczeniu warstwy ozonu. Co najważniejsze jednak, tlenki azotu podobnie jak dwutlenek siarki przekształcają się w aerozole wtórne, o bardzo małych rozmiarach, i podobnie jak pył drobny emitowany z elektrowni oddziałują szkodliwie na płuca człowieka.

W krajach rozwiniętych mieszanina dymu z kominów domowych i z zakładów przemysłowych i energetycznych jeszcze niedawno powodowała wyraźny przyrost zgonów. Na przykład w 1952 roku wskutek przejściowego wzrostu skażeń powietrza nad Londynem zmarło ponad 4000 ludzi. Ilustruje to rys. 1.2, na którym widać, jak w tym okresie krzywa zgonów nadążała za krzywą stężenia zanieczyszczeń w powietrzu²⁷.



Rys. 1.2. Wzrost umieralności w Londynie w 1952 w czasie wzrostu stężenia smogu.²⁸

²⁶ WHO (2000) . Air Quality Guidelines for Europe, second edition. WHO Regional Publications, European Series No. 91

²⁷ Lipfert F.W. Air Pollution and community health, Van Nostrand N. York, 1994.

²⁸ Strupczewski A. et al. Ocena wpływu wytwarzania energii elektrycznej na zdrowie człowieka i środowisko i analiza porównawcza dla różnych źródeł energii, Symp. Energia Jądrowa dla Polski, Warszawa, 2001.

Podobne skutki obserwowano w innych latach w Londynie, a także w innych miastach jak Oslo, Osaka (Japonia), czy Nowy Jork. W Polsce szczególnie wyraźne skutki skażeń powietrza obserwowano na Śląsku, gdzie np. w końcu lat 70-tych w Wałbrzychu docierało na ziemię o 40% mniej światła słonecznego niż w innych rejonach Polski, a średni okres życia był tam o 6 lat krótszy od średniej krajowej²⁹.

Działania podjęte przez energetykę w celu zmniejszenia emisji zanieczyszczeń przyniosły istotną poprawę sytuacji. Dzisiaj katastrofalne skażenia powietrza nie zdarzają się, a nowoczesne techniki oczyszczania spalin obniżają emisje w ciągu normalnej pracy elektrowni. Niestety, nawet po znacznym zmniejszeniu emisji i wprowadzeniu wysokich kominów zapewniających lepsze rozpraszanie zanieczyszczeń, ilości szkodliwych dla człowieka tlenków siarki i azotu oraz pyłów emitowanych z elektrowni pozostają znaczące.

Spalanie węgla jest jednym z głównych źródeł drobnego pyłu w powietrzu miejskim³⁰. Spalanie węgla i ropy dla celów przemysłowych i ogrzewania mieszkań stanowi główne źródło PAH (wielocyklicznych węglowodorów aromatycznych), dwutlenku azotu, tlenku węgla i różnych związków organicznych i nieorganicznych. Związki PAH o pięciu lub więcej pierścieniach (np. B[a]P) występują głównie w postaci aerozoli, w połączeniu z drobnym pyłem o średnicy poniżej 2 mikronów³¹.

Wzrost liczby zachorowań i zgonów w okresach zwiększonego stężenia skażeń w powietrzu obserwowano w wielu krajach. Efekty zdrowotne narażenia na wdychanie dwutlenku siarki SO₂ łączono z efektami wdychania pyłów ze względu na ich bliską łączność w zakresie źródeł i stężeń, mianowicie spalanie węgla dla ogrzewania mieszkań i dla wytwarzania energii elektrycznej³².

Wielkie studium Unii Europejskiej nazwane EXTERNE mające na celu ocenić wpływ różnych źródeł energii elektrycznej na zdrowie człowieka wykazało, że obok hydroenergii i wiatru energia jądrowa jest najbardziej korzystna z punktu widzenia środowiska i zdrowia człowieka³³. W studium tym rozpatrywano całość oddziaływań zdrowotnych

²⁹ PAN: Ochrona i kształtowanie środowiska w makroregionie południowo-zachodnim, PAN, Urząd Wojewódzki w Legnicy, Komisja Planowania przy Radzie Ministrów, Legnica 1978

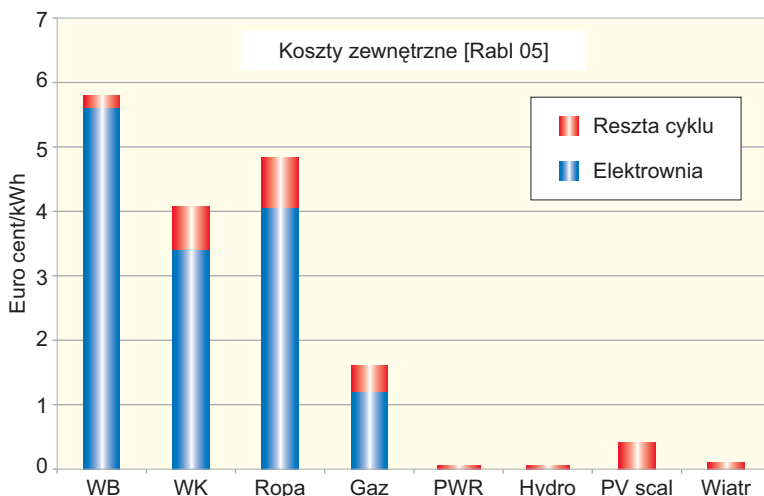
³⁰ SPENGLER J, WILLSON R, Emissions, dispersion and concentration of particles. In : Particles in Our Air; Concentrations and Health Effects. (Spengler J., Wilson R, eds) Boston, Harvard University Press, 1996; -62

³¹ ALLEN J.O, ET AL. (1996) Measurement of polycyclic aromatic hydrocarbons associated with size-segregated atmospheric aerosol in Massachusetts. Environ Sci Technol 30:1023-1031

³² WHO (2000) . Air Quality Guidelines for Europe, second edition. WHO Regional Publications, European Series No. 91

³³ EXTERNE-JOULE project, "Externalities of Energy, Methodology Report", European Commission DGXII, Science, Research and Development, (1999)

związanych z danym cyklem energetycznym, „od kulebki aż do grobu”, to jest od początku projektowania elektrowni poprzez wydobycie potrzebnych dla niej materiałów, produkcję urządzeń, wydobycie paliwa, eksploatację elektrowni aż do jej likwidacji i unieszkodliwienia odpadów. Wielkość oddziaływania na zdrowie człowieka i środowisko przeliczono na jednostki monetarne. Przykładowe wyniki, typowe dla krajów Europy Zachodniej, przedstawione są na rys. 1.3 opracowanym na podstawie pracy A. Rabla³⁴.



Rys. 1.3. Porównanie kosztów zewnętrznych dla różnych źródeł energii elektrycznej, dane z pracy A. Rabl et al. (WB – węgiel brunatny, WK – węgiel kamienny, PWR – reaktory wodne ciśnieniowe, PV scal – ogniwa fotoelektryczne efekty skąłkowane dla całego cyklu)

Zajmijmy się jednak tym, co najbardziej nas niepokoi: wpływem promieniowania na nasze zdrowie.

³⁴ Rabl A. et al.: Externalities of Energy: Extension of accounting framework and Policy Applications, Final report ExternE-Pol 1 Version 2, August 2005.

2. Czy zaszkodzi nam promieniowanie przy normalnej pracy elektrowni jądrowych?

2.1. Im wyżej tym promieniowanie większe – wielkość dawek od tła naturalnego

Promieniowanie jonizujące, dalej będziemy o nim krótko mówili „promieniowanie” (oznaczane symbolem tzw. koniczynki), jest normalnym elementem codziennego życia na Ziemi. Rozpad promieniotwórczy atomów powoduje emisję cząstek alfa, beta i gamma, a z kosmosu dochodzi do nas promieniowanie gamma, neutrony, protony i inne cząstki. Cząstki alfa to jądra helu, złożone z dwóch protonów i dwóch neutronów. Są one łatwo zatrzymywane przez materię – na przykład całkowicie przez kartkę papieru. Promieniowanie beta wydobywa się głównie z jąder atomowych wskutek przemian neutronów w protony. Przenika ono dalej niż cząstki alfa, ale wystarczy cienka blacha by je zatrzymać. Natomiast promieniowanie gamma to fotony o dużej energii, przenikające przez beton i żelazo nawet o znacznej grubości. Do osłabienia promieniowania gamma wysyłanego przez zużyte paliwo jądrowe do wartości nie powodującej zagrożenia potrzeba około 4 metry wody, lub ponad 2 metry ziemi.

Dawki promieniowania³⁵ w różnych rejonach świata są różne. Największy wkład do sumy dawek z różnych źródeł, jaką otrzymuje pojedynczy człowiek, daje radon, wydzielany z ziemi w postaci gazowej i wdychany z powietrzem do naszych płuc. Przy rozpadzie promieniotwórczym³⁶ radon emituje cząstki alfa i przemienia się w krótkożyciowe pierwiastki promieniotwórcze, również emitujące cząstki alfa. Są to z reguły pierwiastki ciężkich metali, które w przeciwieństwie do radonu nie mogą być wydychane. Jeśli atomy radonu lub produktów jego rozpadu rozpadają się w naszych płucach, to cząstki alfa uderzają w tkankę płuc i powodują uszkodzenia jej komórek. Dawka promieniowania beta i alfa z produktów rozpadu radonu przeliczona na całe ciało zależy silnie od składu gleby, ale średnio na Ziemi wynosi 1,27 mSv/rok³⁷. Radon wnosi około 50% średniej indywidualnej rocznej dawki naturalnej, nie licząc narażenia powodowanego przez procedury medyczne.

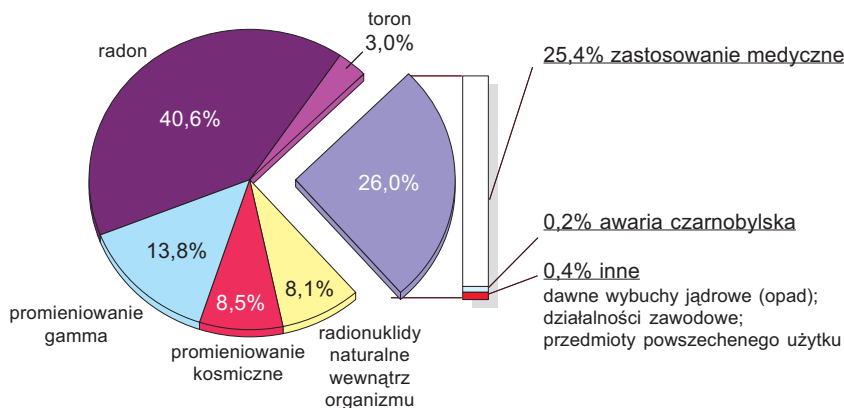
³⁵ Dawka promieniowania określona jest przez ilość energii promieniowania pochłoniętej w tkance naszego ciała. Do określania biologicznych skutków napromieniowania używa się tzw. dawki równoważnej mierzonej w siwertach (Sv).

³⁶ Rozpad promieniotwórczy to zjawisko spontanicznej przemiany jądra atomowego danego izotopu w inne jądro, przy której emitowane jest promieniowanie

³⁷ mSv to jedna tysięczna część Siverta, średnio na Ziemi człowiek otrzymuje około 2,4 mSv na rok ze źródeł naturalnych i 0,8 mSv /rok od zastosowań radiacji w medycynie.

Dalsze 40% dawki naturalnej pochodzi od promieniowania gamma powodowanego przez promieniowanie kosmiczne i promieniowania materiałów radioaktywnych znajdujących się w glebie i przenikających do naszego ciała. Promieniowanie było z nami od zarania dziejów, a gdy powstawało życie na Ziemi natężenie promieniowania było większe niż obecnie³⁸. Może dlatego promieniowanie jest niezbędne do życia – wiele doświadczeń potwierdziło, że w przypadku całkowitego odcięcia promieniowania rośliny i zwierzęta doświadczalne przestają się rozwijać i rozmnażać.

Zanim przejdziemy do dyskusji dawek wokoło EJ, przypomnijmy, że średnia globalna dawka naturalna wynosi 2,4 mSv/rok³⁹, a dawka powodowana przez człowieka (głównie przez medycynę) 0,86 mSv/rok⁴⁰. Energetyka jądrowa zwiększa dawkę średnią o minimalną wielkość, która nawet na granicy terenu elektrowni jest mniejsza od 0,01 mSv/rok.



Rys. 2.1. Udział różnych źródeł promieniowania jonizującego w średniej rocznej dawce skutecznej (3,35 mSv) otrzymanej przez statystycznego mieszkańca Polski⁴¹

³⁸ Karam A.P, Leslie S.A, Anbar A.: The effects of changing atmospheric oxygen concentrations and background radiation levels on radiogenic DNA damage rates. Health Physics, 2001, Vol. 81, No 3.p. 545-553

³⁹ Siwert (Sv) to jednostka stosowana w ochronie przed promieniowaniem, oznaczająca dawkę odpowiadającą pochłonięciu 1 dżula energii przez 1 kg masy ciała, skorygowana ze względu na rodzaj promieniowania i wywoływane przez nie skutki biologiczne. Ponieważ jest to duża jednostka, w energetyce jądrowej jesteśmy zainteresowani dawkami tysięcy razy mniejszymi, oznaczanymi skrótem mSv (milisieverty).

⁴⁰ Państwowa Agencja Atomistyki, Działalność prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2007 roku, Warszawa 2008

⁴¹ tamże

Przed promieniowaniem kosmicznym chroni nas tylko pole magnetyczne i warstwa powietrza wokół Ziemi. Im wyżej jesteśmy, tym cieńsza i mniej gęsta jest ta warstwa, a więc i promieniowanie silniejsze. Np. w Zakopanem dawka roczna od promieniowania kosmicznego jest o 50% większa niż w Gdańsku. Moc tej dawki na poziomie morza wynosi 0,28 mSv/rok.

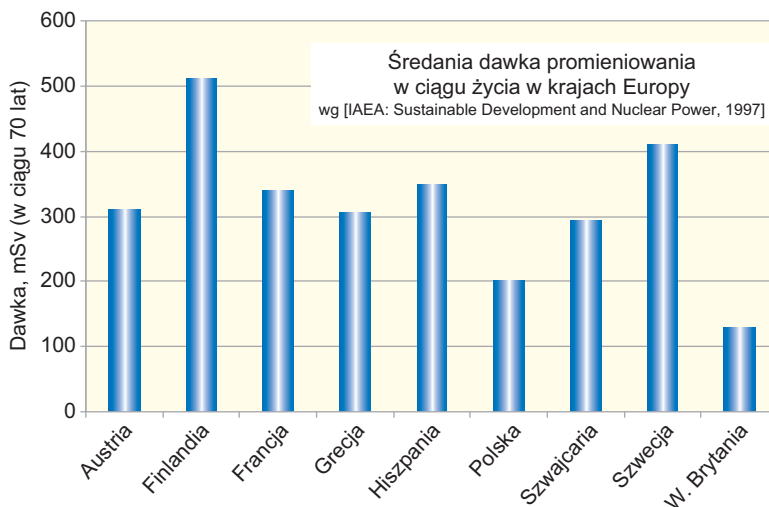
Izotopy promieniotwórcze znajdują się także i w samej Ziemi. Ich rozpad dostarcza ciepła, dzięki któremu Ziemia utrzymuje swą umiarkowaną temperaturę, tak bardzo nam potrzebną do życia. Prawdę mówiąc, wewnątrz Ziemi to jedno wielkie składowisko odpadów radioaktywnych. Promieniowanie gleby, w której znajdują się pierwiastki radioaktywne, rozpadające się powoli przez miliony lat, odkąd powstała Ziemia, daje średnio 0,36 mSv/rok. Wśród tych pierwiastków dominującą rolę pełni izotop potasu K-40, który podobnie jak i inne izotopy stanowi część naszego pożywienia. Aktywność samego potasu K-40 w ciele człowieka to 31 000 rozpadów na sekundę. I wchłaniamy tę radioaktywność z każdą kroplą mleka matki, lub mleka z butelki. Jeżeli w mleku nie ma potasu, to znaczy, że jest to woda, a nie mleko. Wskutek tego nasze własne ciała promieniają, a także promieniają inne osoby obok nas. Dawka z tych źródeł wewnętrznych w naszych organizmach wynosi 0,33 mSv/rok⁴².

Promieniowanie przenika do naszych organizmów i powoduje uszkodzenia w komórkach naszego ciała. Nie jest to bynajmniej jedyny powód takich uszkodzeń – prawdę mówiąc uszkodzenia powodowane przez promieniowanie są minimalną częścią sumy uszkodzeń z różnych przyczyn, głównie z powodu naturalnych procesów zachodzących w naszym organizmie, takich jak procesy utleniania. Ale promieniowanie było z nami przecież także wtedy, gdy życie rodziło się na Ziemi. Co więcej, promieniowane było wtedy silniejsze. I nasze organizmy rozwinęły się i wykształciły reakcje obronne, które chronią nas przed skutkami tych uszkodzeń. Te reakcje obronne aktywują się pod wpływem promieniowania i pomagają w usuwaniu nie tylko komórek uszkodzonych przez promieniowanie z kosmosu, ale także uszkodzonych wskutek wielu innych przyczyn. Wielu uczonych twierdzi, że wpływ na nasze organizmy małych dawek promieniowania, takich jakie pochodzą ze źródeł naturalnych, jest pomijalnie mały. Inni utrzymują, że dla bezpieczeństwa należy przyjąć, że każda dawka promieniowania może być szkodliwa. W tym rozdziale zapoznamy się z wieloma obserwacjami, które pokażą, jakie są skutki promieniowania w różnych rejonach Ziemi i w różnych sytuacjach.

⁴² Człowiek i promieniowanie jonizujące, Praca zbiorowa pod redakcją A. Hryniewiczza, PWN, Warszawa 2001

2.2. Gdzie poziom promieniowania jest większy – w Polsce czy w Finlandii?

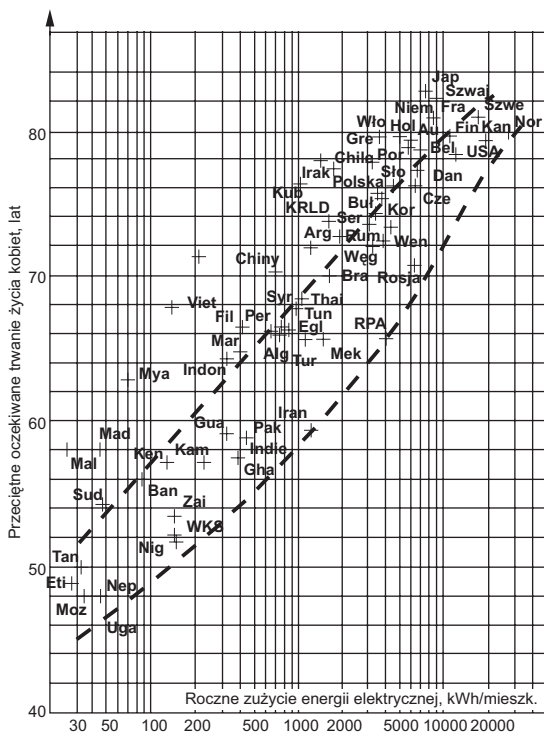
Wahania tła, powodowane głównie różnicami w zawartości radonu w glebie, są bardzo duże, typowo od 2 do 10 mSv/rok, ale są okolice, gdzie moce dawki są znacznie większe, do kilkudziesięciu mSv rocznie. Poziom promieniowania naturalnego w Szwecji jest dwukrotnie większy niż w Polsce, a w Finlandii ponad 2,5 razy większy, jak widać na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Średnie dawki otrzymywane przez statystyczną osobę przez 70 lat w różnych krajach Europy⁴³

W pewnych rejonach Brazylii, Indii, czy Iranu moce dawki są znacznie większe i dochodzą do 35 mSv/rok (Kerala w Indiach lub Guarapari w Brazylii), a nawet do 260 mSv/rok (Ramsar, Iran). Ale wahania mocy promieniowania w granicach tła naturalnego nie mają wpływu na zdrowie i długość życia. Ilustruje to Rys. 2.3, pokazujący średnią oczekiwaną długość życia (czyli przewidywaną długość życia aż do naturalnej śmierci) kobiet w różnych krajach świata w zależności od zużycia energii elektrycznej.

⁴³ IAEA: Sustainable development and Nuclear Power, 1997, Vienna



Rys. 2.3. Średnia oczekiwana długość życia kobiet w różnych krajach w zależności od zużycia energii elektrycznej⁴⁴. (kobiety nie prowadzą wojen – dlatego ich długość życia jest uznana za bardziej reprezentatywną)

A czy promieniowanie szkodzi zdrowiu? Naukowcy prowadzą od wielu lat badania starając się wykryć ujemny wpływ zwiększonych dawek promieniowania tła naturalnego na zdrowie człowieka. Bez skutku. Nawet w rejonach o najwyższych dawkach częstość zachorowań na nowotwory nie jest większa niż przeciętna, a przeciwnie – co wydaje się na pierwszy rzut oka zaskakujące – jest ona często nieco niższa od przeciętnej.

W Finlandii, gdzie zużycie energii elektrycznej jest wysokie, ludzie żyją znacznie dłużej niż w Polsce, pomimo że w Finlandii tło promieniowania jest jednym z najwyższych na świecie. Jak widać wysokie tło promieniowania nie powoduje skrócenia życia ani pogorszenia zdrowia. Poziom promieniowania naturalnego może się zmieniać nawet dziesiątki razy i nie wpływa to, według naszej obecnej wiedzy, na długowieczność ludzi.

⁴⁴ Strupczewski A. „Analiza korzyści i zagrożeń związanych z różnymi źródłami energii elektrycznej” Polskie Towarzystwo Nukleoniczne, Report PTN -3/1999, Warszawa (1999),

2.3. Gdy powstawało życie promieniowanie było silniejsze

Czemu nasze organizmy tak skutecznie bronią się przed ujemnymi skutkami promieniowania? Pomyślmy, jakie było promieniowanie na Ziemi, gdy rozwijało się życie. Skoro promieniowanie powstaje, gdy atomy uranu, toru, czy potasu ulegają rozpadowi, to po wyemitowaniu promieniowania już tych radioaktywnych atomów nie ma, przechodzimy do następnego ogniwa w łańcuchu rozpadów radioaktywnych, a na koniec do pierwiastków stabilnych jak ołów, które już nie emitują żadnego promieniowania. Z każdą emisją promieniowania łączna energia pozostałych w łańcuchu izotopów promieniotwórczych jest mniejsza.

Procesy radioaktywnych rozpadów trwają na Ziemi od jej powstania, a więc od 4,6 miliardów lat. Przed 4 miliardami lat promieniowanie beta i gamma pochodzące od pokładów geologicznych i emiterów wewnętrznych wynosiło około 6 mGy/rok i malało od tego czasu. Obecnie średnia moc dawki pochodzącej z promieniowania beta i gamma wynosi 0,95 mGy/rok⁴⁵. Łączna moc dawki otrzymywanej przez nasze organizmy jest dwukrotnie mniejsza niż była w czasie, gdy powstawało życie.⁴⁶

Uczeni sądzą, że nasze mechanizmy obronne zwalczające choroby nowotworowe są przystosowane do najskuteczniejszego działania wtedy, gdy pole promieniowania jest wyższe niż występuje obecnie. W wielu doświadczeniach wykazano, że napromieniowanie organizmów małymi dawkami zwiększa ich odporność na nowotwory⁴⁷, a Komitet Naukowy ONZ do Badania Skutków Promieniowania (UNSCEAR) z inicjatywy polskiej delegacji uznał znaczenie promieniowania dla podnoszenia odporności organizmów i wydał specjalny raport z zaleceniem dalszych badań pozytywnej roli promieniowania⁴⁸.

Przykładów pozytywnej roli promieniowania są setki – kilka z nich przedstawię poniżej. Wobec trudności w określeniu wielkości ujemnych skutków promieniowania – przy małych dawkach są one niezauważalnie małe – trzeba było przyjąć jakąś podstawę do ocen i porównań. Sformułowano ją w czasach, gdy naukowcy starali się powstrzymać wyścig zbrojeń.

⁴⁵ Karam A.P, Leslie S.A: Calculation of background beta-.gamma radiation dose through geological time, Health Physics, 77 No 6 (1999), p. 662-667.

⁴⁶ Karam A.P, Leslie S.A, Anbar A.: The effects of changing atmospheric oxygen concentrations and background radiation levels on radiogenic DNA damage rates. Health Physics, Nov. 2001, Vol. 81, No 3.p. 545-553

⁴⁷ JAWOROWSKI Z. Radiation risk and ethics, Physics Today (1999) 52(9) 24-29

⁴⁸ UNSCEAR Report to the General Assembly, Annex B: Adaptive Response, United Nations, New York, 1994

2.4. Hipoteza o liniowej zależności zagrożenia od dawki promieniowania

Wobec braku wykrywalnych efektów małych dawek promieniowania, a dążąc do maksymalnie ostrożnego postępowania z substancjami radioaktywnymi i starając się doprowadzić do przerwania prób broni jądrowej, w 1959 r. Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (ICRP) wprowadziła hipotezę, zwaną modelem liniowym bezprogowym LNT (*Linear No Threshold*). Wg LNT, jeśli od pewnej dawki promieniowania umiera 100% napromieniowanych osób, od 2 razy mniejszej 50% osób, to od 10 razy mniejszej umrze 10% osób, a dla milion razy mniejszej powinno umrzeć 0,0001%, ale nikt nie jest w stanie zmierzyć, czy tak jest faktycznie. Model ten zakłada, że zarówno zachorowania na nowotwory jak i skutki genetyczne małych dawek promieniowania są wynikiem mutacji powodowanych bezpośrednio przez promieniowanie jonizujące. Przy niskich dawkach brak jest bezpośrednich danych o skutkach zagrożenia. Arbitralnie postanowiono więc stosować dla małych dawek i małych mocy dawki (czyli dawki na jednostkę czasu) ekstrapolację skutków dużych dawek promieniowania oraz wielkich mocy dawek po gwałtownym (w ciągu około jednej sekundy) napromieniowaniu ludności Hiroszimy i Nagasaki zaatakowanej bronią jądrową. Jest wątpliwe czy taka ekstrapolacja ma sens, skoro w ataku jądrowym ludność napromieniono mocą dawki tryliony razy wyższą od mocy występujących wokół elektrowni jądrowych, w okolicy Czarnobyla, czy na jaką są ekspozowani pracownicy zakładów jądrowych w ciągu dziesiątków lat pracy⁴⁹.

Hipotezę LNT przyjęto jako oficjalną podstawę ochrony radiologicznej. Na niej oparto zasadę ograniczania dawek tak bardzo, jak tylko jest to rozsądnie możliwe i wprowadzono bardzo kosztowny system barier chroniących przed rozprzestrzenianiem promieniowania z elektrowni jądrowych.

Ale wśród naukowców trwa dyskusja, w której wymienia się zarówno obserwacje potwierdzające hipotezę LNT jak i wiele nowszych obserwacji, które sugerują, że **ekstrapolacja wg modelu liniowego bezprogowego LNT jest przesadnie pesymistyczna**. Badania powstawania nowotworów wskazują, że jest to proces wieloetapowy, a takie procesy mają w przyrodzie charakter nie liniowy, lecz krzywoliniowy z progiem.

Wiemy, że wiele substancji i zjawisk jest korzystnych dla życia przy małych dawkach, chociaż są one szkodliwe przy dużych. Przykładów jest mnóstwo – aspiryna, dobroczynna przy spożywaniu jednej pigułki dziennie, chociaż szkodliwa przy jednorazowej dawce kilkuset pastylek, wita-

⁴⁹ Jaworowski, Z. (1999). „Radiation risk and ethics.” *Physics Today*. 52(9), pp. 24-29.

miny (zbyt duże ilości powodują hiperwitaminozę, a zbyt małe lub ich brak – awitaminozę) – i mikroelementy niezbędne w małych ilościach a szkodliwe w dużych, światło słoneczne, a nawet temperatura, sprzyjająca człowiekowi, gdy wynosi 20-25°C, a zabójcza, gdy przekracza 50°C.

Podobnie promieniowanie jest niezbędne do życia w małych ilościach, takich, jakie otrzymujemy codziennie od otoczenia. Doświadczenia, w których otaczano organizmy żywe osłonami nieprzepuszczającymi promieniowania wykazały, że organizmy te chorowały i umierały, podczas gdy niewielki wzrost promieniowania pomagał ich rozwojowi⁵⁰.

Ponadto, duże znaczenie ma też rozkład czasowy pochłoniętej dawki promieniowania. Skutki takich samych dawek promieniowania pochłoniętego przez organizm jednorazowo, czy w krótkim czasie, są bowiem z reguły bardziej szkodliwe niż wówczas, gdy to napromieniowanie rozłożone jest na dłuższy okres. Rzecz w tym, że – ujmując to w dużym uproszczeniu – przy mniejszej intensywności napromieniowania (czyli mocy dawki) organizm jest w stanie nadążyć z naprawami uszkodzeń materiału DNA⁵¹ lub eliminacją uszkodzonych komórek. Dowodzą tego wyniki badań opisane poniżej w pkt 2.7.3 i 2.7.5.

Tym niemniej, eksperci zajmujący się ochroną przed promieniowaniem przyjęli hipotezę liniową bezprogową jako narzędzie mające zapewnić, że promieniowanie powodowane przez działalność człowieka będzie minimalne. Zasada redukcji dawek promieniowania jest obowiązująca w całej energetyce jądrowej (tzw zasada ALARA – *As Low As Reasonably Achievable* – „tak mało jak to rozsądnie możliwe”, która zostanie wyjaśniona dokładniej w następnych rozdziałach). Zasada ta, jak i sama hipoteza LNT, zostały przyjęte dla uproszczenia ochrony radiologicznej i ułatwienia jej administracji, natomiast nigdy nie zostały udowodnione naukowo. Jest ona uzasadniana twierdzeniem, że dopóki nie wiemy, czy małe dawki nie powodują pewnych ujemnych skutków, zasada przezorności wymaga, by unikać napromieniowania ludzi, o ile nie jest to równoważone odnoszonymi korzyściami.

2.5. Jakie są dawki promieniowania, które uważamy za dopuszczalne?

Dla zrozumienia sytuacji w zakresie obecnych przepisów ochrony radiologicznej, dobrze jest wiedzieć, jak mierzone jest promieniowanie.

⁵⁰ Duport Ph.: Low-Dose Radiation and Risk: A Perspective, Centre for Low-Dose Radiation Research, Institute of the Environment, University of Ottawa, January 2002

⁵¹ Chrapak G., Garwin R. L.: Błędne ogniki i grzyby atomowe. WNT, Warszawa 1999. (str. 158-161).

Radioaktywność opisuje intensywność źródła promieniowania. W układzie SI jednostką aktywności jest 1 Bq (bekerel) = 1 rozpad atomu na sekundę. Agencja Ochrony Środowiska USA (EPA – *Environmental Protection Agency*) zaproponowała limit radioaktywności dla wody pitnej równy 0,18 Bq na litr. Radioaktywność wody usuwanej z EJ (Elektrowni Jądrowej) jest ograniczona wg przepisów do 0,36 Bq na litr. Na pierwszy rzut oka wydaje się to rozsądne.

Ale litr normalnej wody morskiej, w której pływamy przy okazji pobytu na jakiegokolwiek plaży, ma aktywność średnio 12 Bq. Innymi słowy, normalna woda morska jest 33 razy bardziej radioaktywna niż woda usuwana z EJ w procesie chłodzenia elektrowni. Mleko ma aktywność średnio 47 Bq na litr, w tym średnia aktywność naturalnego izotopu promieniotwórczego potasu (K-40) w mleku wynosi ok. 43 Bq/dm³. Oliwa do sałatek ma pełne 170 Bq na litr, co oznacza, że oliwa sałatkowa jest 1000 razy bardziej radioaktywna niż woda z kranu. A jednak nikt nie twierdzi, że woda morska, mleko i oliwa sałatkowa stanowią obecnie zagrożenie radiacyjne dla społeczeństwa.

Przepisy ograniczają dawki powodowane przez działania człowieka do wartości tak małych, że są one wielokrotnie mniejsze niż różnice tła promieniowania naturalnego między Polską a Finlandią, a nawet między miejscowościami w Polsce, np między Wrocławiem a Krakowem. Tak ostre ograniczenia są świadectwem ostrożności specjalistów w zakresie ochrony przed promieniowaniem. Trzeba jednak zdawać sobie sprawę, że promieniowanie było, jest i będzie naturalnym elementem naszego świata i wcale nie jest pewne, czy rola jego jest negatywna, czy też może przeciwnie – pomocna i niezbędna dla życia.

Teoretyczne zależności powinny odzwierciedlać rzeczywisty stan obserwowany w naturze. Zajmijmy się więc przeglądem istniejących wyników badawczych dla różnych grup ludzi napromieniowanych małymi dawkami. Pozwoli to nam przekonać się, czy rację mają zwolennicy hipotezy, że każda, nawet bliska zerowej, dawka promieniowania jest szkodliwa, czy też naukowcy twierdzący, że małe dawki promieniowania pobudzają siły obronne i prowadzą do polepszenia zdrowia człowieka.

2.6. Wpływ małych dawek promieniowania na duże grupy ludności

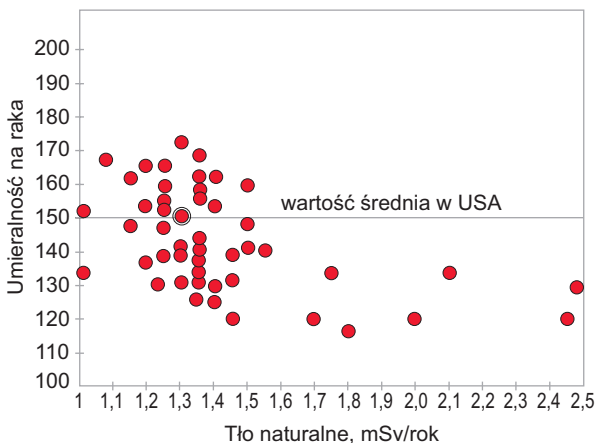
2.6.1. Badania w USA

W USA badania korelacji między tłem promieniowania a umieralnością na nowotwory prowadzono wielokrotnie. Największe zainteresowanie budziły one na początku, gdy przeciwnicy energii jądrowej oczekiwali, że zachorowania na nowotwory będą najczęstsze w rejonach o najwyż-

szym tle promieniowania. Spodziewano się tysięcy „dodatkowych” zgonów powodowanych przez zwiększone promieniowanie. Ale rzeczywistość zdecydowanie zaprzeczyła tym oczekiwaniom.

Okazało się, że we wszystkich stanach o podwyższonym tle promieniowania umieralność na nowotwory jest mniejsza od przeciętnej. Wyniki te otrzymywali badacze zupełnie nie związani z energetyką jądrową, ludzie o nieposzlakowanej uczciwości, tacy jak Frigerio i Stowe (kwa krzy), którzy badali umieralność na nowotwory złośliwe w 50 stanach USA w funkcji tła promieniowania⁵². Przed przeprowadzeniem badań oczekiwano, że umieralność na nowotwory będzie rosła o około 350 zgonów na 100 000 mieszkańców na każdy 1 mSv/rok⁵³. Wyniki nie wykazały takich tendencji, raczej przeciwnie. Autorzy studium opisują *„jak zaczęliśmy od założenia, że promieniowanie tła powoduje nowotwory i jak fakty zmusiły nas do stwierdzenia, że tak nie jest”*.

Jak widać na rys. 2.4, z pośród 14 stanów o tle promieniowania powyżej 1,4 mSv/rok (140 mrem/rok) w **12 stanach umieralność na nowotwory była bardzo wyraźnie PONIŻEJ średniej** dla USA, w jednym nieco niższa, i tylko w jednym nieco wyższa.



Rys. 2.4. Umieralność na nowotwory w funkcji tła naturalnego w różnych stanach USA mierzona na 100 000 mieszkańców. Linia pozioma i puste kółko oznaczają średnią umieralność i tło promieniowania w USA⁵⁴

⁵² FRIGERIO, N.A., STOWE, R.S., „Carcinogenic and genetic hazards from background radiation”, in: Proc. of a Symp. on Biological Effects of Low-Level Radiation Pertinent to Protection of Man and His Environment, (Chicago 3-7 Nov. 1975), IAEA, Vienna (1976)

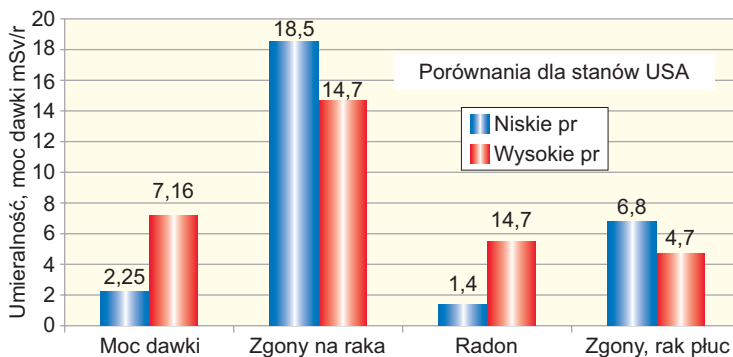
⁵³ Według pesymistycznej hipotezy LNT, że każda dawka jest szkodliwa, przy użyciu współczynnika przyjętego przez ICRP, otrzymujemy $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ Sv/rok} \times 70 \text{ lat} \times 0,05 \text{ zgonu/osobo-Sv} \times 100 \text{ 000 osób} = 350 \text{ dodatkowych zgonów}$.

⁵⁴ FRIGERIO, N.A., STOWE, R.S., j.w.

W 1981 badania epidemiologiczne w 39 regionach metropolitalnych i 4 tradycyjnych regionach gospodarczych USA wykazały, że umieralność na **nowotwory dróg oddechowych jest niższa w regionach o wyższym poziomie promieniowania**⁵⁵.

W USA prowadzono największe na świecie badania wpływu stężenia radonu w domach na umieralność na nowotwory płuc⁵⁶, wpływu tła promieniowania na umieralność na nowotwory w trzech stanach USA o **najwyższym i najniższym** tle promieniowania częstości zachorowania na nowotwory płuc, w stanach USA o najwyższym tle promieniowania (Connecticut, Massachusetts, Nevada, Dakota Południowa, Utah, Wyoming) i w stanach o najniższym tle promieniowania (Indiana, Oregon, Waszyngton)⁵⁷. Wszystkie te badania wykazały, że wśród populacji narażonych na zwiększone tło promieniowania nie występują żadne obserwowalne ujemne skutki zdrowotne. Przeciwnie, w regionach o wysokim promieniowaniu występuje mała umieralność na nowotwory.

Analizy wpływu tła promieniowania na umieralność na nowotwory w USA przedstawił Jagger⁵⁹. Do porównania wybrał on trzy stany o nis-



Rys. 2.5. Umieralność na nowotwory w stanach USA mierzona na 100 000 mieszkańców, dane z pracy Jaggera⁵⁸

⁵⁵ HICKEY, R.J. et al. Low level ionizing radiation and human mortality: multi-regional epidemiological studies, Health Physics, Vol. 40, (May 1981) 625-641

⁵⁶ Cohen BL. 1995. Test of the linear-no threshold theory of radiation carcinogenesis for inhaled radon decay products. Health Phys 68: 157-174

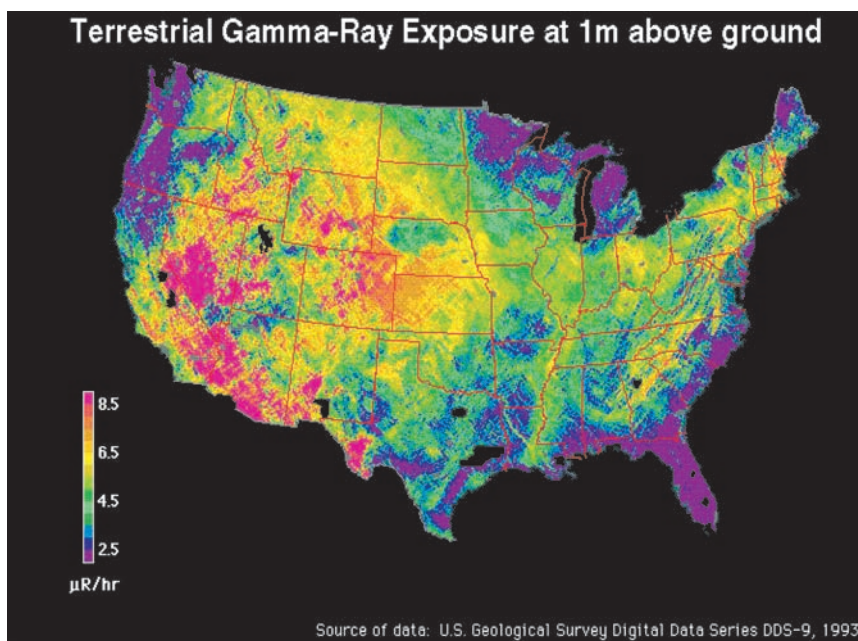
⁵⁷ SANDQUIST G.M. et al., Assessing Latent Health Effects from U.S. Background Radiation, Proc. of ANS Meeting, Nov. 1997

⁵⁸ JAGGER J. Natural Background Radiation and Cancer Death in Rocky Mountain States and Gulf Coast States, Health Physics, October 1998, Vol. 75, No 4, 428-430

⁵⁹ tamże

kim tle promieniowania (Luizjana, Misissipi i Alabama) i trzy stany o wysokim tle promieniowania (Idaho, Colorado, Nowy Meksyk). Średnie moce dawki promieniowania wynoszą w nich odpowiednio 2,25 i 7,16 mSv/rok, a stosunek stężenia radonu wynosi 3,9 na otwartej przestrzeni i 5,2 w domach. Według hipotezy LNT można byłoby oczekiwać większej umieralności na nowotwory w regionach o wysokim tle promieniowania i stężeniu radonu, tymczasem jest przeciwnie, jak widać na rys. 2.5.

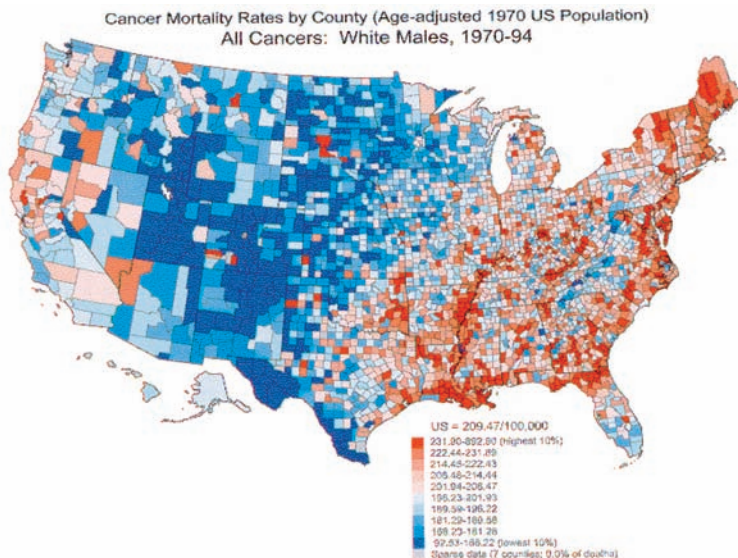
Podobne wnioski wynikają z porównania pokazanego na rys. 2.6, zaczerpniętym z pracy Duporta⁶⁰, na którym przedstawiono obok siebie mapy tła promieniowania naturalnego (a) i umieralności na nowotwory w USA (b).



Rys. 2.6a. Narażenie na ziemskie promieniowanie gamma na wysokości 1 m nad ziemią w USA⁶¹

⁶⁰ DUPORT P. Low Dose Radiation and Risk, Ottawa University, Institute of Environment, Intern. Centre for Low Dose Radiation Research, January 2002

⁶¹ <http://energy.cr.usgs.gov/radon/usagamma.gif>, rysunek zaczerpnięty z pracy Duporta



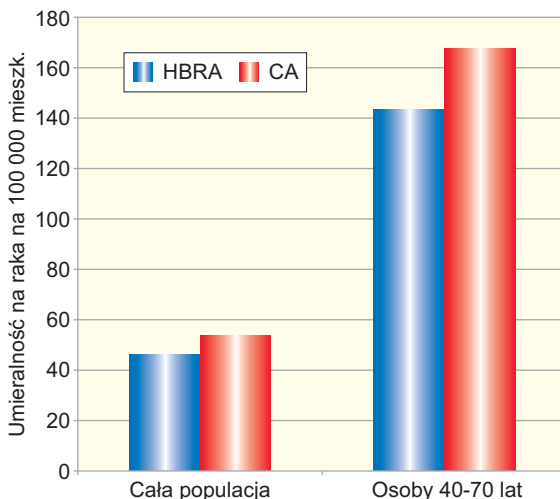
Rys. 2.6b. Umieralność na nowotwory w USA, rysunek zaczerpnięty z pracy Duporta

2.6.2. Brak ujemnych efektów zdrowotnych podwyższonego promieniowania wśród dużej grupy mieszkańców Chin

Badania obszaru o wysokim tle promieniowania (high radiation background area – HBRA) w rejonie Yangjiang w Chinach trwają od 1972 roku. Obejmują one dwa sąsiadujące ze sobą obszary, łącznie 500 km², gdzie zwiększone tło promieniowania powodowane jest przez piaski monazytowe o dużej zawartości toru. W sąsiedztwie znajduje się rejon o niskim tle promieniowania, który wybrano jako rejon kontrolny (control area – CA).

Oba tereny są zamieszkałe przez rolników (93% i 94%), a struktura ludności jest podobna. Wszystkie parametry środowiskowe są podobne (np. procent palaczy w HBRA 37,9%, w CA 37,6%). W rejonie kontrolnym średnia dawka roczna promieniowania gamma ze źródeł zewnętrznych wynosi 2 mSv, a dawki w rejonie HBRA od 4,8 do 6,2 mSv. Łączne dawki otrzymane rosną z każdym rokiem życia, tak że osoby 50 letnie w HBRA otrzymały średnio dawkę skumulowaną od naturalnego promieniowania gamma wynoszącą około 274 mSv.

Po uwzględnieniu dawek pokarmowych otrzymano średnie dawki roczne w terenie HBRA równe 6,4 mSv, a w terenie kontrolnym 2,4 mSv.



Rys. 2.7. Umieralność powodowana przez choroby nowotworowe w rejonie Yangjiang o wysokim promieniowaniu (HBRA) i o niskim (CA).

Badania objęły 100 000 mieszkańców z rejonu HBRA i podobną liczbę mieszkańców rejonu kontrolnego CA⁶². Wyniki ich pokazano na rys. 2.7.

W rejonie o wyższym promieniowaniu nie zaobserwowano żadnego wzrostu zachorowań. Dalsze badania potwierdziły poprzednie wyniki umacniając wniosek, że umieralność na nowotwory jest w HBRA niższa niż w obszarze kontrolnym. Uczeni chińscy i japońscy prowadzący badania stwierdzają, że „*badania w Chinach systematycznie dają wyniki sugerujące dobroczynne działanie promieniowania jonizującego na organizm człowieka*”⁶³.

Podobne są wyniki badań w innych krajach, np w nadmorskim rejonie Kerala w Indiach⁶⁴, w uzdrowisku Misasa w Japonii⁶⁵, na plażach Guarapari w Brazylii, w górskim miasteczku Ramsar w Iranie itd. Zdrowi są też mieszkańcy Finlandii, Szwecji, Masywu Centralnego we Francji – i wielu innych rejonów na świecie, gdzie dawki są wyższe od średniej.

⁶² WEI, L., „Health effects on populations exposed to low level radiation in China in: Radiation and Public Perception, Benefits and Risks”, in: Advances in Chemistry Series 243, American Chemical Society, Washington DC (1995).

⁶³ SUN Q, et al.: Excess Relative Risk of Solid Cancer Mortality after Prolonged Exposure to Naturally Occurring High-Background Radiation in Yangjiang, China, Radiation Res. (Tokyo) 41, (2000) Suppl 433-52

⁶⁴ NAIR MK, et al., Population study in the high natural background radiation area of Kerala, India. Radiat Res. 152, 145-148S, 1999

⁶⁵ MIFUNE M, et al. Cancer mortality survey in a Spa area (Misasa, Japan) with a high radon background. Jpn. J. Cancer Res. (1992) ; 83: 1-5.

2.6.3. Różnice poziomu promieniowania w Polsce

Nie sięgając jednak daleko, nawet między miastami w samej Polsce są znaczne różnice w poziomie promieniowania. Wartości średniej mocy dawki gamma w powietrzu, uwzględniające promieniowanie kosmiczne oraz ziemskie (pochodzące od izotopów promieniotwórczych zawartych w glebie), pokazane są w tabeli zaczerpniętej z raportu Państwowej Agencji Atomistyki (PAA)⁶⁶.

Tabela 2.1. Wartości średniej mocy dawki gamma w powietrzu w miastach Polski

Miejscowość (lokalizacja)	Średnia roczna [mSv/rok]	Różnica dawki rocznej w odniesieniu do Wrocławia, mSv/rok
Wrocław	0,517	0
Łódź	0,596	0,079
Białystok	0,613	0,096
IEA Swierk,	0,613	0,096
Zielona Góra	0,640	0,113
Włodawa	0,666	0,149
Koszalin	0,675	0,158
Szczecin	0,683	0,166
Toruń	0,745	0,228
Warszawa	0,753	0,236
Mikołajki	0,797	0,280
Świnoujście	0,797	0,280
Olsztyn	0,806	0,289
Sanok	0,806	0,289
Lublin	0,858	0,341
Gdynia	0,867	0,350
Gorzów	0,867	0,350
Kraków	0,885	0,368
Legnica	0,955	0,438
Lesko	0,998	0,481
Zakopane	1,042	0,525

Oczywiście poza tymi dawkami każdy z nas dostaje dawki z innych źródeł, np. z pożywienia (spożycie banana lub wypicie mleka powoduje otrzymanie dawki potasu K-40), od innych osób znajdujących się w danym

⁶⁶ PAA; Działalność prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2007 roku, Warszawa, maj 2008 r., str. 40

pomieszczeniu lub przytulonych do nas w przystępie żywych uczuć itd. I nikt nie myśli wtedy o zagrożeniach radiologicznych. Nie myślimy też, że np. przewodniczka z jednego miasta do innego może spowodować wzrost dawki. Abyśmy jednak mogli w dalszym tekście ocenić znaczenie dawek od elektrowni jądrowych, ostatnia kolumna w tabeli 2.1 podaje wielkość dawki rocznej, jaką dodatkowo otrzymamy przenosząc się z Wrocławia do innego miasta i mieszkając w tym mieście przez rok.

Czy powiesz, że to śmieszne, że o tym nikt nie myśli, że to bez znaczenia? Tak, to prawda – pamiętaj tylko, że takie jest Twoje zdanie, gdy będziemy rozważać skutki awarii w Czarnobylu, rzekomo tak groźnej dla całego świata.

2.6.4. Senatorowie USA też nie boją się przebywać w Bibliotece i w Gmachu Kongresu.

Jeśli nie boisz się jechać do Krakowa – gdzie promieniowanie daje dawkę gamma o 0,368 mSv/rok większą niż we Wrocławiu – to masz rację. Senatorowie USA też nie boją się wejść do Biblioteki Kongresu, chociaż zbudowano ją z granitu i marmuru, materiałów zawierających większe niż przeciętna ilości izotopów promieniotwórczych, powodujących dawki gamma większe nie tylko niż w Krakowie, ale nawet i w Zakopanem, bo wynoszące 2,6 mSv/rok⁶⁷. Taka moc dawki jest dużo większa, niż średnia dawka powodowana przez sąsiedztwo elektrowni jądrowej. Mimo to senatorowie USA nie boją się obradować i studiować dokumenty w bibliotece Kongresu!

2.6.5. Czemu nie mamy zmysłu wykrywającego promieniowanie?

Jeśli ktoś z nas ma ogródek, to może być ciekaw, ile też pierwiastków radioaktywnych w nim się znajduje. Lord Marshall, były prezes brytyjskiego Zarządu Grupy Energetycznej (Central Electricity Generating Board), a jednocześnie zamiłowany ogrodnik wykonał takie obliczenie. Okazało się, że w typowym ogródku brytyjskim o wymiarach 20 m x 20 m na głębokości 1 m znajduje się średnio 2 kg uranu, 6 kg toru i 0.8 kg potasu K-40⁶⁸. I nikt się tym nie przejmuje!

Inni eksperci zmierzili, ile uranu zawierają różne pokarmy – okazało się, że stosunkowo mało uranu jest w ziemniakach – 2,6 nanograma na gram, więcej w marchwi – 7,7 ng/g, a najwięcej w soli kuchennej –

⁶⁷ Milloy S.J., Gough M.: Radiation Sources at the U.S. Capitol and Library of Congress Buildings, JunkScience.com. <http://www.mitosyfraudes.org/Nuclear.html>

⁶⁸ The Lord Marshall of Goring: Your Radioactive Garden – Nuclear Waste in Perspective, Central Electricity Generating Board-lecture, 1990

40 ng/g⁶⁹. Ale czy z tego powodu mamy przestać jeść marchew lub solić potrawy?

Gdy myślimy o małych dawkach promieniowania, takich jak pochodzące ze źródeł naturalnych lub z elektrowni jądrowych, warto pamiętać odpowiedź, jaką Lord Marshall dał na pytanie, czemu człowiek nie ma dodatkowego zmysłu wykrywającego promieniowanie. Powiedział on: *„Bo promieniowanie nie jest ważne dla zdrowia, po prostu – nie jest ważne...”*

I my w codziennym życiu też wiemy, że promieniowanie naturalne nie jest ważne. Nie dajmy sobie wmawiać, że małe dawki promieniowania z elektrowni jądrowych mają inne efekty niż te same dawki powodowane przez mleko, marchew czy sól kuchenną!

2.7. Wpływ narażenia na promieniowanie powodowane przez człowieka

2.7.1. Badania pracowników przemysłu jądrowego

Wyniki badań 95 000 pracowników przemysłu jądrowego USA, Kanady i W. Brytanii opracowane przez Międzynarodową Agencję Badań Nowotworów (IARC) wskazują, że w zakresie małych dawek promieniowania zachorowalność na nowotwory nie rośnie, lecz maleje ze wzrostem otrzymanej dawki w proporcji – 7%/Sv. Względna umieralność na nowotwory i białaczkę w funkcji dawki skumulowanej w ciągu życia otrzymanej przez pracowników narażonych na promieniowanie jonizujące pokazana jest na rys. 2.8, opracowanym przez autora na podstawie danych liczbowych z pracy IARC⁷⁰.

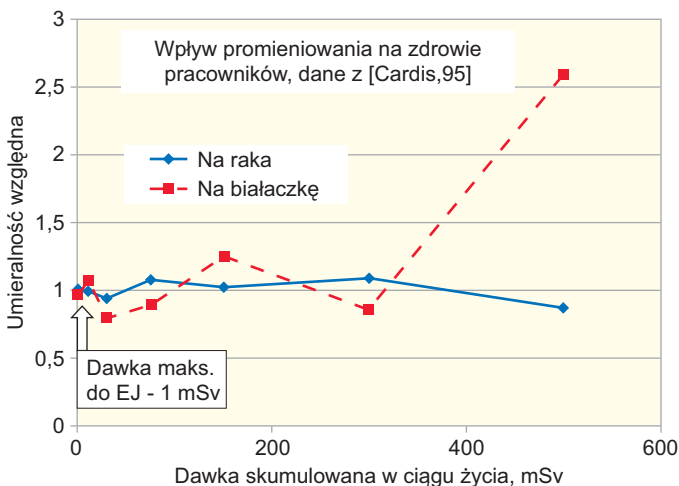
Wzrost umieralności wśród pracowników narażonych zawodowo wystąpił tylko w przypadku dużych dawek i tylko w odniesieniu do białaczki. Dla porównania – średnia dawka otrzymywana od promieniowania naturalnego i z procedur medycznych przez mieszkańca Polski w ciągu 70 lat to 230 mSv, średnia dawka otrzymana dodatkowo w ciągu 70 lat przez osobę mieszkającą przy płocie elektrowni jądrowej wskutek pracy EJ to 0,7 mSv, a dawki jednorazowe przy prześwietleniu kręgosłupa wynoszą około 4,3 mSv⁷¹. Do wpływu mocy dawki – czy jest ona otrzymana w krótkim czasie, gdy organizm nie ma czasu by się skutecznie bronić, czy też w długim czasie, w postaci małych dawek rozłożonych

⁶⁹ Wg Leikin J.B., McFee R. Nuclear Biological and Chemical Agent Exposure, CRC Press New York 2007

⁷⁰ CARDIS E. et al., „Combined analysis of cancer mortality among nuclear industry workers in Canada, UK and the USA”, IARC Techn. Report No. 25, Lyon, (1995).

⁷¹ Państwowa Agencja Atomistyki; Działalność prezesa PAA i ocena stanu bezpieczeństwa i ochrony radiologicznej w Polsce w 2007 roku, Warszawa, maj 2008 str. 68

na wiele dodających się ekspozycji – powrócimy jeszcze poniżej omawiając narażenie pracowników stoczni w Shippingport (stocznia remontowa okrętów z napędem jądrowym) poddanych działaniu małych dawek (rys. 2.9) i osób poddawanych napromieniowaniu w celach medycznych (rys. 2.10) (jodoterapia i diagnostyka). Wykresy na rys. 2.8 i na następnych rys. 2.9 i 2.10 stanowią dobrą ilustrację różnicy jakościowej w działaniu małych i dużych dawek. Przy wysokich dawkach wzrost zachorowań jest wyraźny. Natomiast dawki takie jak od elektrowni jądrowej – a więc rzędu 1 mSv łącznie przez całe życie – nie wiążą się z żadnym zagrożeniem, a przebiegi krzywych sugerują, że w tym zakresie dawek występuje obniżona umieralność na choroby nowotworowe.

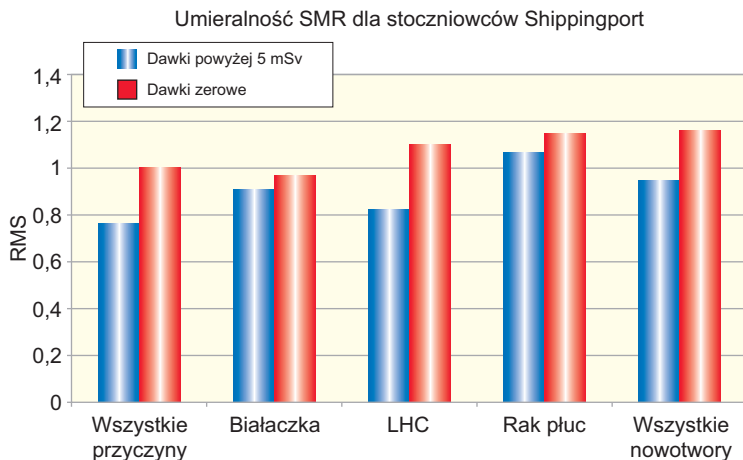


Rys. 2.8. Względne ryzyko zgonu na raka lub białaczkę w zależności od dodatkowej dawki, otrzymanej wskutek pracy ze źródłami promieniowania, skumulowanej w ciągu życia, dane z pracy IARC (poziom „1” odpowiada średniej umieralności pracowników nienapromieniowanych).

Dla pełnego obrazu trzeba dodać, że autorka pracy, p. dr Cardis, w kilka lat później opublikowała wyniki dalszych studiów, które wg jej oświadczenia wskazują na wzrost zagrożenia zgodnie z hipotezą, że każda dawka promieniowania może być szkodliwa, proporcjonalnie do jej wielkości⁷². Jednakże dane liczbowe z tej nowej pracy nie zostały ujawnione. Komitety ICRP (International Commission on Radiation Protection –

⁷² Cardis E. et al. Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries, BMJ, doi:10.1136/bmj.38499.599861.E0 (published 29 June 2005)

Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej) i UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation – Komitet ONZ ds Skutków Promieniowania Atomowego) przyjęły tę pracę pozytywnie, natomiast szereg niezależnych naukowców przeciwnych hipotezie LNT podjął krytykę tej pracy^{73,74}.



Rys. 2.9. Umieralność⁷⁵ wśród stoczników z Shippingport
(SMR – standardized mortality ratio, znormalizowana umieralność względna, LHC – nowotwory układu krwiotwórczego)

W innym studium zbadano wpływ promieniowania na dużą grupę 28 000 pracowników stoczni Shippingport, w której remontowano okręty o napędzie jądrowym. Stwierdzono, że umieralność na nowotwory wśród osób napromieniowanych niskimi dawkami (powyżej 5 mSv) była o 24% mniejsza niż w grupie kontrolnej złożonej z pracowników tej samej stoczni, którzy nie byli napromieniowani⁷⁶ (patrz rys. 2.9).

Dobór grupy kontrolnej z pracowników tej samej stoczni jest o tyle ważny, że często ignorowano wyniki badań wskazujących na zmniejszoną umieralność na nowotwory wśród osób napromieniowanych twierdząc, że są one wynikiem „efektu zdrowego pracownika”, tzn. lepszego

⁷³ Fornalski, K. W. and Dobrzyński, L., Ionizing radiation and health of nuclear industry workers, Int. J. of Low Radiation, vol. 6, no 1, 2009, pp. 57-78 oraz Lagarde F.: Tiny excess relative risks hard to pin down, 5 August 2005, BMJ, <http://www.bmj.com/cgi/eletters/bmj.38499.599861.E0v1#114265>

⁷⁴ Feinendegen and Neumann: Physics must join with biology in better assessing risk from low-dose irradiation *Radiat Prot Dosimetry*. 2005; 117: 346-356.

⁷⁵ Umieralność – liczba zgonów w populacji wskutek danej choroby na 100 000 osób

⁷⁶ MATANOSKI, G.M., „Health effects of low-level radiation in shipyard workers- final report”, DOE DE-AC02-79 EV 10095, US Dept. of Energy, (1991).

zdrowia osób pracujących niż ogółu ludności. To twierdzenie jest silnie krytykowane.⁷⁷ Przeciw hipotezie, że efekt zdrowego pracownika jest powodem lepszego stanu zdrowia osób napromieniowanych przemawia to, że ani przy przyjmowaniu pracowników do nuklearnych stoczni, ani do wszystkich innych zakładów atomowych, nie są prowadzone badania genetyczne wykrywające podatność na nowotwory, ani badania przesiewowe mające wykryć już istniejące nowotwory. W przypadku stoczni Shippingport takie tłumaczenie jest niemożliwe, bo nie ma powodu, dla którego pracownicy tej samej stoczni mieliby być „zdrowymi pracownikami” w grupie pracującej na okrętach z napędem jądrowym, a „niezdrowymi” w grupie pozostałych stoczników.

Również studium wykonane w Japonii, obejmujące badania 115 tysięcy pracowników poddanych małym dawkom promieniowania wykazało, że zarówno liczba zachorowań na nowotwory jak i ogólna umieralność w tej populacji są mniejsze niż przeciętne dane dla odpowiedniej grupy mężczyzn w Japonii⁷⁸. Przy średniej dawce skumulowanej 13,9 mSv/osobę, standaryzowany współczynnik umieralności⁷⁹ dla całej populacji napromieniowanej wyniósł SMR = 0,83 dla wszystkich przyczyn, SMR = 0,89 dla chorób nowotworowych. A więc i w Japonii umieralność na nowotwory wśród pracowników napromieniowanych była mniejsza od średniej w populacji ogólnej.

2.7.2. Badania brytyjskich radiologów

W Wielkiej Brytanii przeprowadzono obszerne badania umieralności na nowotwory wśród lekarzy radiologów. Stadium to objęło okres 100 lat (1897-1997), w ciągu którego lekarze otrzymywali bardzo zróżnicowane dawki promieniowania⁸⁰. W wyniku studium określono standaryzowany współczynnik umieralności SMR dla zgonów radiologów ze wszystkich powodów, zgonów na nowotwory i wszystkich zgonów nie wynikających z chorób nowotworowych, po czym porównano te wielkości z wartościami SMR dla trzech grup:

- (i) wszystkich mężczyzn w Anglii i Walii,
- (ii) wszystkich mężczyzn w klasie społecznej I (do której należą lekarze)
- (iii) wszystkich lekarzy płci męskiej.

⁷⁷ Fornalski K.W., Dobrzyński L. The healthy worker effect and nuclear industry workers, Dose-Response, w druku

⁷⁸ HOSODA, Y. et al., First analysis of mortality of nuclear industry workers in Japan, 1986-1992, J. of Health Physics, Vol. 32 No. 2, (1997) 173-184.

⁷⁹ Wskaźnik umieralności standaryzowany względem wieku, obliczany w odniesieniu do 100 000 osób.

⁸⁰ BERRINGTON A, Darby SC, Weiss HA, Doll R. 100 years of observation on British radiologists: mortality from cancer and other causes 1897-1997. Br J Radiol 2001;74:507, 19

Jako grupa, radiolodzy zarejestrowani w latach 1921-1979 nie wykazują znaczącej różnicy w SMR na nowotwory w porównaniu z innymi lekarzami. Natomiast radiolodzy mają znacznie niższy SMR na nowotwory niż inni mężczyźni ($SMR=0.63$) lub mężczyźni z klasy społecznej I ($SMR=0.82$). Radiolodzy, którzy zarejestrowali się po 1920 r., to jest po wprowadzeniu przepisów ochrony radiologicznej, mają niższy SMR dla zgonów ze wszystkich przyczyn niż inni lekarze mężczyźni ($SMR=0.91$), mężczyźni z klasy społecznej I ($SMR=0.91$) lub wszyscy mężczyźni ($SMR=0.72$).

Ponadto u radiologów zarejestrowanych po 1955 r. SMR na nowotwory był o 29% niższy niż dla innych lekarzy. Również współczynnik umieralności radiologów ze wszystkich przyczyn był znacznie niższy niż dla innych lekarzy. Czemu radiolodzy mieliby być zdrowsi niż inni lekarze? Część uczonych stawia hipotezę, że odporność radiologów na choroby wynika ze stymulacji układu immunologicznego przez promieniowanie.

2.7.3. Klucz do bezpieczeństwa – rozłożenie dawek w czasie

Diagnostyka medyczna wiąże się często z napromieniowaniem małymi dawkami. Obszerne studia prowadzone na pacjentach dorosłych, poddanych napromieniowaniu w celach diagnostycznych nie wykazały wzrostu zachorowań. Np. analiza danych 34 000 pacjentów w Szwecji, którym podawano I-131 w celach leczniczych wykazała, że przy średniej dawce łącznej 1100 mSv zachorowalność na raka tarczycy w grupie 23319 osób, które przed badaniami nie były podejrzane o nowotwory (w tym 8% osób w wieku poniżej 20 lat) wystąpił 25-procentowy deficyt raków tarczycy w porównaniu z ogółem ludności⁸¹.

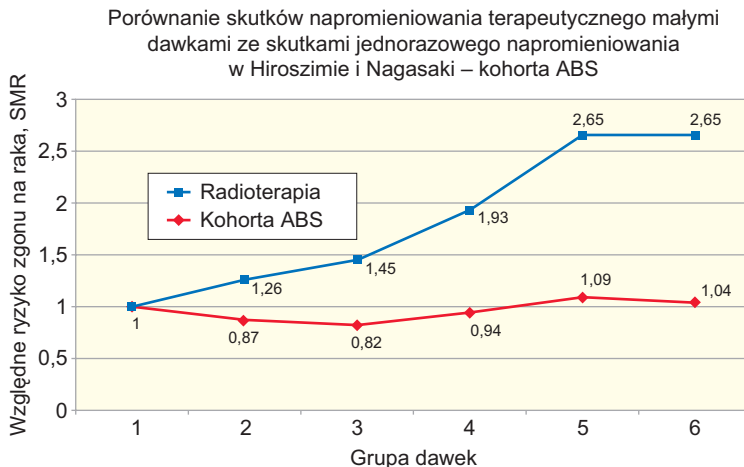
W Kanadzie badano 64172 pacjentów poddanych wielokrotnemu napromieniowaniu małymi dawkami. Łącznie sięgały one od kilkunastu mSv do kilku Sv ale były otrzymywane przy średniej mocy dawki (0,6 mSv/s)⁸². Autor studium stwierdził, że „nie ma żadnego związku między ryzykiem zgonu na nowotwory a dawką”⁸³. Porównanie z umieralnością na nowotwory wśród Japończyków z tzw. kohorty ABS (Atomic Bomb Survivors), którzy przeżyli atak na Hiroszimę i Nagasaki, a więc otrzymali dawki jednorazowe przy wysokiej mocy dawki wykazało, że ryzyko

⁸¹ HALL, P., et al., Thyroid cancer after diagnostic administration of Iodine 131, Radiation Research, 145 (1996) 86-92

⁸² Mała moc dawki to 0,05 do 0,1 mGy/min, większe moce kwalifikuje się jako „średnie”

⁸³ HOWE G.R., 'Lung cancer mortality between 1950 and 1987 after exposure to fractionated moderate dose rate ionizing radiation in the Canadian fluoroscopy cohort study and a comparison with lung cancer mortality in the atomic bomb survivors study', Radiation Research, 142, p295-304, 1995

przy małych mocach dawki ma zdecydowanie inny charakter. Na rysunku 2.10 pokazano umieralność dla grup, które otrzymały łączne dawki promieniowania zawarte w przedziale: Grupa 1 – 0,01-0,49 Sv, grupa 2 – 0,50-0,99 Sv, grupa 3 – 1,0-1,99 Sv, grupa 4 – 2,00-2,99 Sv i grupa 5 i 6 – powyżej 3 Sv.



Rys. 2.10. Wyniki badań skutków napromieniowania medycznego małymi dawkami ze skutkami napromieniowania w Hiroszynie i Nagasaki. Dane z pracy Howe 1995⁸⁴

W przypadku kohorty ABS ryzyko wyraźnie rośnie z dawką. Natomiast w przypadku kohorty poddanej napromieniowaniu o małych mocach dawki, mimo że łączna dawka otrzymana przez pacjenta była taka jak w kohorcie ABS, przy małych dawkach widać obniżenie umieralności na nowotwory. Dopiero przy wysokich dawkach całkowitych ryzyko nieco wzrasta powyżej średniej dla osób nienapromieniowanych, ale i tak jest bliskie jedności, dużo niższe niż dla kohorty ABS.

2.7.4. Napromieniowanie rodziców małymi dawkami nie ma wpływu na potomstwo

Badania dzieci z Hiroszimy i Nagasaki, które przeżyły wybuch bomb atomowych jako płody i otrzymały dawki powyżej 0,01 Sv (średnia dawka 0,309 Sv), **nie wykazały wzrostu zachorowań na nowotwory, a żadne z nich nie zmarło na białaczkę**. Tym bardziej nie

⁸⁴ tamże

ma zagrożenia dla dzieci w sąsiedztwie elektrowni jądrowych, gdzie roczne dawki na płocie elektrowni wynoszą około 0,00001 Sv.

Po zbadaniu 36 000 dzieci w ciągu 30 lat i analizie danych 120 000 pracowników narażonych na promieniowanie Urząd Ochrony Radiologicznej Wielkiej Brytanii (NRPB) oznajmił w listopadzie 1999 roku, że: *„Wyniki nowego wielkiego studium epidemiologicznego nie zgadzają się z tezą, że narażenie rodziców na promieniowanie przed poczęciem dziecka jest przyczyną białaczki i chłoniaka (non-Hodgkin lymphoma) u dzieci”*.

Nie wykryto też związku między napromieniowaniem przed poczęciem dziecka a innymi kategoriami nowotworów u dzieci⁸⁵. Raporty brytyjskiego komitetu ds. Aspektów Medycznych Promieniowania w Środowisku COMARE, zarówno raport sprzed 15 lat (z 1994 r⁸⁶) jak i najnowszy raport⁸⁷, w którym użyto najbardziej czułych metod statystycznych i matematycznych, potwierdziły, że *„nic nie wskazuje na zwiększenie zachorowalności na jakiegokolwiek dziecięce choroby nowotworowe w promieniu 25 km od elektrowni jądrowych”*.

Nie ma też zagrożenia związanego z przerobem wypalonego paliwa jądrowego. Badania przeprowadzone wśród 17 000 osób mieszkających w jednej z miejscowości graniczących z terenem zakładów przerobu materiałów jądrowych w Pensylwanii potwierdziły, że *„nie można wiązać żadnego ryzyka wzrostu zachorowań na nowotwory z zamieszkiwaniem w pobliżu tych zakładów”*⁸⁸, a obszernie studia prowadzone na zlecenie francuskiego ministerstwa zdrowia i ochrony środowiska wykazały, że zakłady przerobu paliwa wypalonego w La Hague też nie powodują zagrożenia radiacyjnego⁸⁹.

2.7.5. Nowe osiągnięcia w badaniach procesów biologicznych po napromieniowaniu ludzi

Analizy procesów zachodzących w organizmie ssaków wykazują, że normalny metabolizm powoduje powstawanie dziennie w każdej ko-

⁸⁵ NRPB, NATIONAL RADIOLOGICAL PROTECTION BOARD, „Cancer in the offspring of radiation workers: a record linkage study”, NRPB-R298, Nov. 1997

⁸⁶ COMARE, Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment, „Fourth Report, The incidence of cancer and leukaemia in young people in the vicinity of Sellafield site” (1994)

⁸⁷ COMARE, Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment, „Tenth Report, The incidence of childhood cancer around nuclear installations in Great Britain (2005) www.comare.org.uk

⁸⁸ Boice D.J. et al.: Cancer Incidence in Municipalities near Two Former Nuclear Materials Processing Facilities in Pennsylvania, Health Physics, Vol. 85, No c6, pp. 691-699, 2003

⁸⁹ GROUPE RADIOECOLOGIE NORD CONTENTIN „Estimation des niveaux d'exposition aux rayonnements ionisants et des risques de leucémies associées de populations du Nord-Contentin, Synthèse”, (July 1999)

mórcie około miliarda uszkodzeń DNA. Metabolizm powoduje setki milionów razy więcej uszkodzeń DNA (naprawianych i nienaprawianych) niż promieniowanie naturalne⁹⁰.

Aby organizm przeżył, musi posiadać bardzo skuteczne metody usuwania wolnych rodników oraz naprawy i eliminowania uszkodzeń DNA. Te same układy, które chronią go przed skutkami metabolizmu tlenu, działają obronnie również w przypadku promieniowania jonizującego.

Ostatnie dziesięciolecie przyniosło ogromny postęp w zrozumieniu procesów biologicznych, które zapewniają obronę komórek i organizmu człowieka przed zagrożeniem radiacyjnym. Okazało się, że charakter procesów obronnych jest zróżnicowany i zależny od wielkości dawki. Poprzednio twierdzono, że zarówno małe jak i duże dawki powodują podobne uszkodzenia DNA, a procesy naprawcze mogą czasami prowadzić do błędów i zapoczątkowywać procesy rakotwórcze. Obecnie Francuska Akademia Nauk i Francuska Akademia Medycyny podkreślają, że chociaż uszkodzenia DNA w komórce przebiegają jednakowo niezależnie od mocy dawki, to charakter procesów obronnych na poziomie komórki, tkanki i całego organizmu jest odmienny w zależności od mocy i wielkości dawki.

W szczególności przy małych dawkach (rzędu kilku mSv) aktywacja procesów obronnych przez promieniowanie powoduje zwiększenie odporności organizmu na inne zagrożenia, występujące w normalnych procesach metabolicznych. Rośnie na przykład skuteczność usuwania toksyn, takich jak aktywne utleniacze, co chroni DNA przed uszkodzeniem. Podczas gdy liczba uszkodzeń DNA wskutek procesów metabolicznych sięga miliarda dziennie w każdej komórce, liczba uszkodzeń radiacyjnych w komórce przy małych mocach dawki promieniowania, np. 1 mSv/rok, wynosi około 0,005 na dzień⁹¹. Podobnie jak uszkodzenia powodowane metabolizmem, uszkodzenia radiacyjne są usuwane lub naprawiane, tak że liczba mutacji pozostających po procesach naprawy biologicznej zredukowana jest do około jednej na dziesięć milionów na komórkę na dzień, a więc jest tryliony razy mniejsza niż z powodu procesów metabolicznych.

Promieniowanie jonizujące częściej powoduje uszkodzenia polegające na zerwaniu obu nici DNA, co zwiększa niebezpieczeństwo błędnej naprawy i zainicjowania procesów rakotwórczych. Występują także

⁹⁰ POLLYCOVE M, FEINENDEGEN LE. Radiation-induced versus endogenous DNA damage: possible effects of inducible protective responses in mitigating endogenous damage. Human Exp Toxicol 2003, 22, 290-306.

⁹¹ POLLYCOVE M, FEINENDEGEN LE. Radiation-induced versus endogenous DNA damage: possible effects of inducible protective responses in mitigating endogenous damage. Human Exp Toxicol 2003, 22, 290-306

kompleksy uszkodzeń, które są typowe dla promieniowania jonizującego a znacznie mniej dla procesów metabolicznych. Pomimo to, prawdopodobieństwo uszkodzenia podwójnego powodowanego przez promieniowanie o małej mocy jest tysiąc razy mniejsze niż wskutek procesów metabolicznych. Ponadto, napromieniowanie małymi dawkami pobudza w organizmie biologiczne mechanizmy obronne, które chronią nas zarówno przed uszkodzeniami komórek wskutek promieniowania, jak i wskutek procesów metabolicznych. Ma to skutki wielokrotnie przewyższające minimalny wzrost liczby uszkodzeń DNA przez małe dawki promieniowania.

Przy bardzo małych mocach dawki nie dostrzega się żadnych ujemnych skutków napromieniowania tkanki, ponieważ uszkodzone komórki nie są naprawiane, lecz eliminowane drogą apoptozy, czyli zaprogramowanej śmierci tych komórek, w których występują nienaprawione uszkodzenia DNA. Z punktu widzenia organizmu (przy bardzo małej frakcji uszkodzonych komórek) jest to najbezpieczniejsze rozwiązanie. Wg raportu obu akademii francuskich, *„Eliminacja tych uszkodzonych komórek zabezpiecza organizm przed potencjalnymi złośliwymi nowotworami”*⁹². Tak więc małe dawki promieniowania nie dają znaczącego wkładu w procesy nowotworowe, a raczej odwrotnie, prowadzą do ich hamowania.

Przy dawkach powyżej kilku mSv, ale poniżej około 100 mSv, aktywowane są mechanizmy obronne, tak że komórki uszkodzone wskutek wszystkich przyczyn są eliminowane lub naprawiane przez procesy o wysokiej efektywności^{93,94}. Procesy te rozwinęły się wraz z powstaniem życia na Ziemi, a przede wszystkim wraz z powstaniem atmosfery tlenowej, największej katastrofy ekologicznej w historii planety, która wyeliminowała większość dominujących przez miliard lat organizmów beztlenowych. Gdyby nie powstały mechanizmy obrony przeciwnowotworowej, żaden organizm nie przetrzymałby milionów uszkodzeń DNA zachodzących codziennie w każdej komórce naszego ciała. Skuteczność pobudzania tych procesów obronnych rośnie z dawką, tak że w zakresie kilkunastu i kilkudziesięciu mSv może występować efekt hormezy⁹⁵ – zmniejszanie liczby uszkodzeń komórki wywołanych procesami me-

⁹² Académie Nationale de Médecine, Institut De France, Académie Des Sciences -: Dose-effect relationships and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation, March 30, 2005

⁹³ JAWOROWSKI Z. Radiation risk and ethics, Physics Today (1999) 52(9) 24-29.

⁹⁴ UNSCEAR Report to the General Assembly, Annex B: Adaptive Response, United Nations, New York, 1994

⁹⁵ **Hormeza** zjawisko polegające na tym, że czynnik występujący w przyrodzie, szkodliwy dla organizmu w większych dawkach, w małych dawkach działa nań korzystnie. Już w XVI wieku szwajcarski lekarz Paracelsus stwierdził, że to dawka (a nie substancja) czyni truciznę. **Hormeza radiacyjna** – hipotetyczny korzystny wpływ małych dawek promieniowania jonizującego na żywe organizmy, polegający m.in. na zmniejszeniu prawdopodobieństwa zachorowania na nowotwory złośliwe i inne choroby o podłożu genetycznym.

tabolicznymi gra znacznie większą rolę niż możliwe niedoskonałości w procesach naprawczych. Faktem jest, że wskutek promieniowania powstaje większa frakcja uszkodzeń podwójnych nici DNA niż przy procesach metabolicznych, co utrudnia naprawę nici DNA. Jednak według opinii akademii francuskich liczba uszkodzeń wskutek procesów metabolicznych jest tak ogromna, że zwiększenie skuteczności ich napraw wskutek promieniowania przy małych dawkach może w sumie wpływać pozytywnie na zdrowie pomimo owej większej frakcji uszkodzeń podwójnych.

Przy większych dawkach, w przedziale 100-200 mSv, koncentracja uszkodzeń w komórkach rośnie i procesy naprawcze DNA mogą przebiegać z błędami, których prawdopodobieństwo rośnie z mocą dawki. Błędy w naprawie DNA mogą prowadzić do utrwalenia mutacji i zapoczątkowania procesu nowotworowego.

Powyżej 500 mSv tempo rozmnażania komórek rośnie, by zrekomensować utratę komórek uszkodzonych przez promieniowanie. Szybkie dzielenie komórek przeszkadza w procesach naprawczych i rośnie prawdopodobieństwo błędnej naprawy i rozwoju nowotworu.

Te różnice w procesach naprawczych tłumaczą, czemu przy małych dawkach wpływ promieniowania może być pozytywny dla zdrowia, chociaż przy dużych dawkach jest on negatywny. Badania i oceny procesów naprawy biologicznej są bardzo trudne i wciąż nie znamy w pełni ich uwarunkowań. Dlatego ICRP i UNSCEAR nadal podtrzymują hipotezę LNT i stanowi ona podstawę przepisów o ochronie przed promieniowaniem a także analiz porównawczych, chociaż według zgodnej opinii Francuskiej Akademii Nauk i Francuskiej Akademii Medycyny obecny stan wiedzy wskazuje, że bardzo małe dawki nie są groźne.

Francuska Akademia Medycyny podkreśla, że najnowsze dane biologiczne wskazują na złożoność i różnorodność procesów molekularnych i komórkowych decydujących o przeżyciu lub mutagenezie komórki w zależności od wielkości i mocy dawki. Zarówno Akademia Medycyny jak i Akademia Nauk Francji, podobnie jak wielu uczonych – np. w Polsce prof. Z. Jaworowski, wieloletni przewodniczący Rady Naukowej Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej i były przewodniczący UNSCEAR – uważają, że do opisu procesów zachodzących po napromieniowaniu ludzi małymi dawkami należy stosować model uwzględniający zjawisko hormezy. W ciągu ubiegłych kilkudziesięciu lat opublikowano około 6000 prac potwierdzających istnienie zjawiska hormezy zarówno w przypadku promieniowania jonizującego jak i wielu innych czynników fizycznych i chemicznych, które w dużych dawkach są szkodliwe, a w małych dobroczynne. Jest to zjawisko występujące powszechnie w świecie biologicznym i badane intensywnie w wielu

d dziedzinach nauki. Doprowadziło to ostatnio do konieczności ujednolice-
nia terminologii i definicji używanych w hadaniach hormezy.⁹⁶

Jak pisał prof. Hryniewicz w książce „Człowiek i promieniowanie jonizujące” wydanej w 2001 r. przez PWN, *„powszechne uznanie hipotezy hormezy radiacyjnej będzie miało poważne konsekwencje społeczne i ekonomiczne... nakłady finansowe związane z zabezpieczaniem ludności przed najmniejszymi nawet dawkami będą mogły być użyte w innych dziedzinach zdrowia społeczeństwa ... a informacje o dawkach kolektywnych będą miały jedynie ... orientacyjne znaczenie.”*⁹⁷

Obecnie trwają w różnych krajach prace zmierzające do zastąpienia hipotezy liniowej bezprogowej modelem, który uwzględniałby pobudzanie układu immunologicznego przez promieniowanie. Francuska Akademia Nauk i Francuska Akademia Medycyny przyjęły w maju 2005 roku jednogłośnie uchwałę stwierdzającą, że hipoteza liniowa bezpro-
gowa nie ma podstaw naukowych i że w analizach porównawczych należy uwzględniać możliwy dobroczynny wpływ promieniowania. Oznacza to zdecydowane zmniejszenie szacowanych zagrożeń ze strony małych dawek działających przez wiele pokoleń.

Dotychczas we wszelkich analizach porównawczych stosowano model liniowy bezprogowy (LNT) i uwzględniano dawki kolektywne powodowane przez bardzo małe zagrożenia. Przeciw temu modelowi oraz używaniu dawki kolektywnej (pochodnej LNT) wypowiedziało się amerykańskie Towarzystwo Fizyki Medycznej w oświadczeniu stwierdzającym, że brak jest podstaw do przyjęcia, że ryzyko radiacyjne występuje poniżej mocy dawki 50 mSv/rok lub 100 mSv w ciągu całego życia⁹⁸.

W 2001 r. ICRP zgodziła się z twierdzeniami uczonych przedstawianymi w różnych pracach⁹⁹, że liczenie dawki kolektywnej przez wiele pokoleń jest niewłaściwe i prowadzi do mylących wniosków. Zdaniem ICRP należy tylko zapewnić, że przyszłe pokolenia będą równie bezpieczne jak pokolenie obecne, a nie obliczać wątpliwe nawet matematycznie straty zdrowia wynikające z mnożenia zaniedbywalnie małych dawek przez ogromne liczby ludności na ziemi i ogromne przedziały czasu. Wobec tego, że nawet przy uwzględnianiu owych hipote-

⁹⁶ Calabrese I inni: 2007. Biological stress response terminology: Integrating the concepts of adaptive response and preconditioning stress within a hormetic dose-response framework. Toxicology and Applied Pharmacology 222: 122-128

⁹⁷ Człowiek i promieniowanie jonizujące, Praca zbiorowa pod redakcją A. Hryniewicza, PWN, Warszawa 2001

⁹⁸ Mossman KL, Goldman M, Masse F, Mills WA, Schaiger KJ, and Vetter RL. 1996. Radiation Risk in Perspective – Health Physics Society Position Statement, March, 1996. <http://www.physics.isu.edu/radinf/hprisk.htm>.

⁹⁹ JAWOROWSKI Z. Radiation risk and ethics, Physics Today (1999) 52(9) 24-29.

tycznych ujemnych skutków promieniowania przez bardzo długie okresy czasu wyniki porównań przemawiały zdecydowanie na korzyść energii jądrowej, obecnie proponowane podejście da jeszcze wyraźniejszą przewagę energii jądrowej.

2.8. Podsumowanie

Długoletnie badania w wielu rejonach świata i wśród różnych populacji wykazały dobitnie, że działanie małych dawek promieniowania, porównywalnych z wielkością tła naturalnego, nie spowodowało żadnych negatywnych skutków zdrowotnych ani wśród populacji dorosłej, ani wśród dzieci lub potomstwa osób narażonych na promieniowanie.

Tym niemniej, w analizach porównawczych przyjmowano dotychczas, że każda dawka promieniowania wiąże się z ryzykiem proporcjonalnie do wielkości dawki. Jak dotąd, takie podejście – przy którym zakłada się możliwie najbardziej pesymistycznie skutki zagrożenia ze strony energii jądrowej – nadal formalnie obowiązuje.

UNSCEAR i ICRP podtrzymują stosowanie hipotezy LNT. Przytaczają one wyniki wielu prac wykazujących wzrost zachorowań przy **średnich dawkach**, co zdaniem zwolenników hipotezy LNT daje podstawy, by wnioskować o możliwych ujemnych skutkach działania **małych dawek**. Jednakże przytoczone wyżej wyniki badań w populacjach narażonych na działanie promieniowania o wielkościach zbliżonych do tła naturalnego wykazują, że negatywnych skutków działania małych dawek nie widać, natomiast widać pozytywne. Tak więc nie ma powodu obawiać się małych dawek promieniowania, porównywalnych z wielkością promieniowania naturalnego.

Czy dawki powodowane przez elektrownie jądrowe są naprawdę małe, przedyskutujemy w następnym rozdziale.

2.9. Dawki wokoło elektrowni jądrowych też są bardzo małe – i nie szkodzą!

2.9.1. Stanowisko energetyki jądrowej – redukujemy dawki ile tylko można!

Elektrownie jądrowe wytwarzają obecnie około 17% energii elektrycznej zużywanej na świecie, a liczba bloków z reaktorami energetycznymi przekroczyła 440 w 32 krajach świata. Mimo to wkład elektrowni jądrowych w ogólny poziom promieniowania jest pomijalnie mały – 0,001 mSv/rok wobec średnio 2,4 mSv/rok jakie otrzymuje człowiek wskutek promieniowania tła naturalnego i dodatkowo 0,86 mSv/rok z zabiegów medycznych.

Wraz z rozwojem energetyki jądrowej podnoszono stale bezpieczeństwo jądrowe i obniżano dawki promieniowania. Obecne uwolnienia produktów radioaktywnych z elektrowni jądrowych (EJ) są pomijalnie małe, a także w przeszłości uwolnienia podczas normalnej eksploatacji EJ nie powodowały wykrywalnych efektów zdrowotnych. Ale dyskusja trwa. Skutki katastrofy w Czarnobylu, chociaż była ona tylko jednym odosobnionym wypadkiem, bynajmniej nie reprezentatywnym dla energetyki jądrowej, rzucają cień wątpliwości na dobre wyniki wszystkich innych elektrowni. Z drugiej strony wiemy, że inne elektrownie poza Czarnobyliem z uwagi na całkowicie odmienną konstrukcję nie mogą spowodować podobnego skażenia otoczenia. Ponadto przeciwnicy energetyki jądrowej donoszą wciąż o zachorowaniach na białaczkę, rzekomo powodowanych przez instalacje jądrowe. Jaka jest prawda? Zaczniemy od faktów.

Uwolnienia radioaktywne z EJ i z zakładów przerobu paliwa wypalonego są stale kontrolowane. Wyniki pomiarów podlegają kontroli urzędów dozoru jądrowego w krajach prowadzących eksploatację EJ, a w skali globalnej są zbierane i publikowane przez Komitet Naukowy ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR). UNSCEAR publikuje także inne dane dotyczące promieniowania, między innymi wielkości uwolnień substancji radioaktywnych z elektrowni opalanych paliwem organicznym – które wbrew oczekiwaniom porównywalne są z uwolnieniami z EJ.

Systematyczne wysiłki energetyki jądrowej zmierzające do redukcji emisji substancji radioaktywnych (czyli ich emisji do otoczenia) i utrzymania narażenia pracowników i ludności na promieniowanie na poziomie tak niskim jak to możliwe w rozsądnych granicach (as low as reasonably achievable – ALARA)¹⁰⁰ doprowadziły do imponujących sukcesów. Nikt ani z personelu, ani z ludności wokoło elektrowni nie otrzymał dawek, które spowodowałyby utratę zdrowia lub życia, nikt – poza ofiarami Czarnobyla, który nie jest typowy dla reaktorów energetycznych i zasługuje na osobną dyskusję. Energetyka jądrowa z natury rzeczy nie wydziela gazów powodujących efekt cieplarniany¹⁰¹, ani nie powoduje zanieczyszczeń atmosfery związkami siarki, azotu i pyłami tak jak energetyka węglowa. Dzięki temu zaś, że od pierwszych lat

¹⁰⁰ Zasada wprowadzona w okresie prób z bronią jądrową, stanowiąca logiczne uzupełnienie hipotezy LNT twierdzącej, że nie ma progu, poniżej którego promieniowanie przestaje być zagrożeniem.

¹⁰¹ Nie wnikać w problem zmian klimatycznych i ewentualnego wpływu człowieka na ocieplanie klimatu, zostawiając to specjalistom z tej dziedziny, natomiast podkreślam, że praca elektrowni jądrowych nie powoduje emisji CO₂. Fakt ten skłonił wielu ekologów do popierania energetyki jądrowej.

jej rozwoju przywiązywano ogromną wagę do redukowania emisji substancji radioaktywnych i narażenia radiacyjnego personelu, energetyka jądrowa osiągnęła wyniki, które mogą być wzorem dla innych gałęzi przemysłu. Dotyczy to zarówno działań zmierzających do zmniejszania zagrożeń społeczeństwa jak i pracowników.

2.9.2. Małe i wciąż obniżane narażenie radiacyjne pracowników elektrowni.

Ludźmi najbardziej narażonymi na promieniowanie z EJ są jej własni pracownicy. Dlatego kierownictwo elektrowni przykładą dużą wagę do redukcji dawek, jakie pracownicy otrzymują w czasie normalnej pracy i remontów urządzeń. Nie wystarcza przy tym chronić najbardziej narażonych pracowników kosztem dawek otrzymywanych przez innych pracowników. Celem jest zmniejszenie dawki kolektywnej¹⁰², czyli sumy wszystkich dawek otrzymywanych przez wszystkich pracowników elektrowni i personel czasowo zatrudniony przy pracach naprawczych.

Dbałość o zmniejszanie narażenia radiacyjnego nie powoduje bynajmniej obniżenia efektywności pracy elektrowni, wręcz przeciwnie, ich współczynniki wykorzystania mocy zainstalowanej rosną, chociaż dawki pracowników maleją. Dane zbierane przez urzędy dozoru jądrowego w różnych krajach i przez Światowe Stowarzyszenie Operatorów EJ – WANO (World Association of Nuclear Operators) wykazują, że w elektrowniach o najwyższych współczynnikach wykorzystania mocy zainstalowanej dawki kolektywne są najniższe¹⁰³.

Na Rys. 2.11 widać krzywe oparte na danych WANO przedstawiające wzrost średniego współczynnika wykorzystania mocy zainstalowanej we wszystkich EJ na świecie¹⁰⁴, oraz dawki kolektywne w EJ z reaktorami PWR (Pressurized Water Reactor – reaktor wodny ciśnieniowy)¹⁰⁵, a więc takimi, jakie prawdopodobnie będą budowane w Polsce (nie przesądzając oczywiście wyników przyszłych przetargów na dostawę technologii,

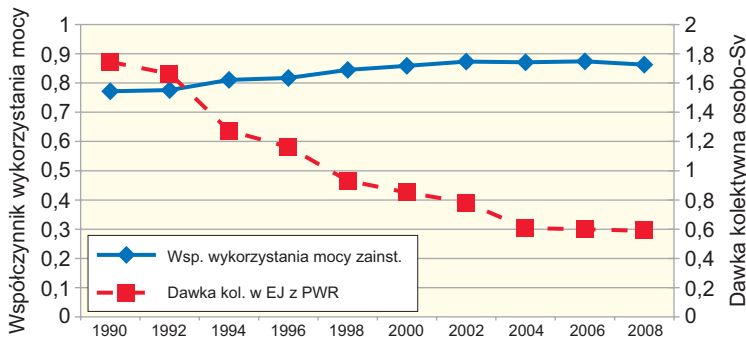
¹⁰² Dawka kolektywna (mierzona w osobo-siwertach) to suma dawek indywidualnych otrzymanych przez wszystkich pracowników wykonujących daną pracę (np. wymianę urządzeń w EJ) lub narażonych na promieniowanie z danego źródła (np. mieszkających w pobliżu elektrowni jądrowej). Jej wadą jest brak biologicznego znaczenia oraz likwidacja informacji o narażeniu indywidualnym, najbardziej istotnym dla oceny skutków narażenia na promieniowanie. Jest użyteczna dla formalnego porównywania różnych technik, natomiast nie powinna być używana dla oceny medycznych skutków narażenia.

¹⁰³ Szczegółowe informacje znajdują się na stronie internetowej WANO – www.wano.info

¹⁰⁴ WANO 2008 plant indicators, http://www.wano.info/PerformanceIndicators/PI_Trifold/PI_2008_TriFold.pdf

¹⁰⁵ Opisy reaktorów różnych typów są w książce Strupczewski A., Celiński Z.: Podstawy energetyki jądrowej, WNT, Warszawa, 1984

które są już kwestią biznesową). Dawki te, otrzymywane łącznie przez wszystkich pracowników elektrowni jądrowych, włączając w to zespoły remontowe spoza elektrowni, systematycznie maleją.



Rys. 2.11. Wzrost średniego współczynnika wykorzystania mocy zainstalowanej w EJ na świecie i obniżanie średniej dawki koletywnej na rok pracy bloku z reaktorem PWR. Dane z raportu WANO¹⁰⁶

W przemyśle jądrowym przyjęto zasadę „Bezpieczeństwo jest sprawą wspólną” i elektrownie jądrowe prowadzą stałą wymianę doświadczeń, tak że metody pracy opracowane w jednej elektrowni są udostępniane innym elektrowniom. Pomaga to bardzo w podnoszeniu niezawodności i obniżaniu narażenia radiacyjnego.

2.9.3. Stałe zmniejszanie emisji promieniowania z elektrowni jądrowych.

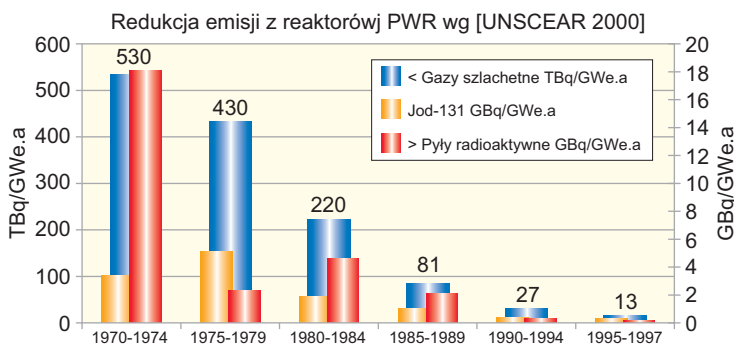
Gdy rozważamy rozwój energetyki jądrowej w Polsce, pytamy przede wszystkim, czy bezpieczne jest sąsiedztwo elektrowni jądrowych.

Według zasad przyjętych przez Komisję Energii Atomowej USA w połowie XX wieku, a więc na samym początku rozwoju energetyki jądrowej, żadna osoba nie może być narażona na znaczące dodatkowe zagrożenie wskutek pracy elektrowni jądrowej, a społeczne ryzyko wynikające z pracy EJ powinno być porównywalne z ryzykiem powodowanym przez inne formy wytwarzania energii i nie może powodować znaczącego zwiększenia całkowitego zagrożenia społecznego. Dla osiągnięcia tego celu ustalono, że dawki wokoło EJ należy ograniczyć tak, by powodowane przez nie średnie ryzyko zgonu na choroby nowotwo-

¹⁰⁶ WANO 2008 plant indicators, http://www.wano.info/PerformanceIndicators/PI_Trifold/PI_2008_TriFold.pdf

rowe (zgodnie z hipotezą LNT) wśród populacji mieszkającej w promieniu 16 km nie przekraczało 0.1% sumy zgonów na choroby nowotworowe wynikających ze wszystkich innych przyczyn¹⁰⁷.

W owym czasie średnia umieralność na nowotwory wynosiła w USA około 2 zgonów na 1000 mieszkańców na rok, tak że określona liczbowo wartość zagrożenia dopuszczalnego ze strony elektrowni jądrowych dla krytycznej grupy ludności¹⁰⁸ wynosiła 2 zgony na milion osób na rok. Od tej pory uwolnienia produktów roszczepienia z reaktorów jądrowych do otoczenia elektrowni stale malały. Na rys. 2.12 pokazano spadek uwolnień jodu, gazów szlachetnych i pyłów radioaktywnych do atmosfery z elektrowni jądrowych z reaktorami PWR.



Rys. 2.12. Redukcja emisji z reaktorów PWR, dane liczbowe z UNSCEAR¹⁰⁹ (emisje określone w TBq lub GBq na energię elektryczną wyprodukowaną w ciągu roku przy ciągłej mocy 1 GW)

Jak widać, starania energetyki jądrowej by zredukować narażenie radiacyjne dają wyniki. Najbardziej reprezentatywne są elektrownie francuskie, ponieważ Francja jest europejskim liderem w rozwoju energetyki jądrowej. Łączna moc tych elektrowni wynosi 63,26 GW, a więc jest około dwukrotnie większa od całej mocy wszystkich elektrowni w Polsce. Średnie uwolnienia jodu i aerozoli z elektrowni francuskich wynosiły w 2000 r. około 0,4% dopuszczalnych uwolnień w skali rocznej¹¹⁰. Uwolnienia ciekłych odpadów radioaktywnych wynosiły około 0,5% wielkości

¹⁰⁷ US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, US NRC Policy Statement on Nuclear Power Plant Safety Goals, Atomic Energy Clearing House, 32(26); (23 June 1986).

¹⁰⁸ Krytyczna grupa ludności – grupa najbardziej zagrożona, np. w przypadku ludności wokół EJ jest to zwykle grupa niemowląt, lub dzieci w wieku 2-7 lat, zamieszkających w rejonie wokół EJ.

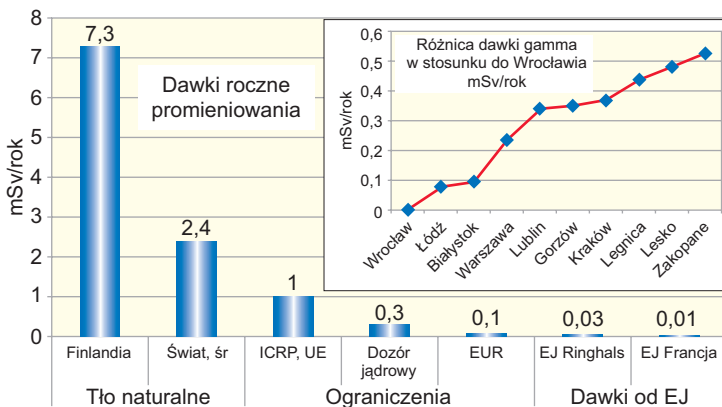
¹⁰⁹ UNSCEAR Report 2000: Sources and Effects of Ionizing Radiation.

¹¹⁰ FRANCE 3rd French National Report on Implementation of the obligations of the Convention on Nuclear Safety issued for the 2005 Peer Review Meeting, July 2004

dopuszczalnych. Im nowsze reaktory, tym wydzielania są mniejsze. W innych krajach emisje są również systematycznie redukowane.

2.9.4. Dawki wokoło elektrowni jądrowych – dopuszczalne i rzeczywiste.

Wielkość rekomendowanej dawki dopuszczalnej dla ludności powodowanej przez instalacje jądrowe określiła Międzynarodowa Komisja Ochrony Przed Promieniowaniem (ICRP) jako 1 mSv/rok. Wielkość tę przyjęto jako obowiązującą w krajach Unii Europejskiej. Jak widać z rys. 2.13, jest ona znacznie mniejsza od różnic dawek promieniowania naturalnego między różnymi krajami w Europie, np. między Finlandią a Polską. Ponadto, graniczne wielkości uwolnień ustalane przez dozór jądrowy¹¹¹ są mniejsze od dawek określonych przez ICRP, a elektrownie starają się utrzymać emisje na poziomie jak najmniejszym zgodnie z zasadą ALARA. W efekcie rzeczywiste dawki wokoło EJ są znacznie mniejsze od dozwolonych.



Rys. 2.13. Porównanie dawek promieniowania od EJ z tłem naturalnym i dawkami dozwalonymi

Gdyby mieszkaniec Wrocławia przeprowadził się do Krakowa, to jego dawka roczna od naturalnego promieniowania gamma wzrosłaby o 0,36 mSv. Gdyby zaś koło jego mieszkania we Wrocławiu wybudowano nowoczesną elektrownię jądrową z typowym francuskim reaktorem PWR, to dodatkowa dawka promieniowania wyniosłaby (na płocie tej elektrowni!) tylko 0,01 mSv/rok, a więc ponad 30 razy MNIEJ!

¹¹¹ Dozór jądrowy czuwa nad bezpieczeństwem reaktorów i innych instalacji jądrowych, podobnie jak dozór techniczny czuwa nad bezpieczeństwem naczyń ciśnieniowych i innych układów technicznych. W Polsce rolę dozoru jądrowego pełni Państwowa Agencja Atomistyki, patrz www.paa.gov.pl

Nic dziwnego, że elektrownie jądrowe są dobrymi sąsiadami i nie powodują zagrożeń radiologicznego. Przy tak małych dawkach niemożliwe jest, by powodowały one jakiegokolwiek zagrożenie dla zdrowia. Potwierdziły to prowadzone na wielką skalę badania we Francji, w Wielkiej Brytanii i w USA¹¹² Czyste niebo nad elektrowniami jądrowymi pozostaje osiągnięciem, do którego mogą tylko dążyć inne gałęzie przemysłu.

Polski czytelnik nie powinien sądzić, że wyniki Szwajcarów, Niemców czy Amerykanów są dla nas nieosiągalne ze względu na różnice w kulturze technicznej i uwarunkowania społeczne. W sąsiadującej z nami Słowacji w końcu lat 80-tych budowano EJ z dwoma reaktorami typu WWER-440 (rosyjski odpowiednik zachodnich reaktorów PWR), podobnymi do budowanych wówczas w Polsce reaktorów w EJ Żarnowiec. Po zmianie ustroju na Słowacji zatrzymano budowę EJ Mochovce na kilka lat, ale nie porzucono jej i po wprowadzeniu szeregu ulepszeń uruchomiono jednak oba te reaktory (a dziś trwa budowa kolejnych dwóch, takich samych). Reaktory te dostarczają obecnie energię elektryczną dwukrotnie taniej niż elektrownie konwencjonalne i spełniają wszystkie wymagania bezpieczeństwa obowiązujące w UE.

Pomiary radiologiczne wykazały, że moce dawek w ich otoczeniu są tak małe, że nie daje się ich mierzyć. Gdy dokonano obliczeń, okazało się, że w ciągu 6 lat od chwili uruchomienia EJ Mochovce roczne dawki dodatkowe powodowane przez tę elektrownię nigdy nie przekroczyły jednej MILIONOWEJ siwerta (wahały się od 0,1 do 0,7 mikroSv)¹¹³. Podobnie na Węgrzech roczne dawki efektywne w odległości **3 km** od EJ Paks z 4 reaktorami WWER-440 wynoszą od 0,1 do 0,5 mikrosiwerta¹¹⁴. Jeśli takie wyniki mogą osiągać rok po roku Słowacy czy Węgrzy w elektrowniach z reaktorami zaprojektowanymi przed 30 laty, które odrzuciliśmy jako niedostatecznie dobre dla Polski, to chyba będziemy potrafili dorównać im mając EJ z najnowszymi reaktorami, dostarczonymi przez najlepsze firmy reaktorowe w XXI wieku!

W tej chwili możemy już stwierdzić, że w praktyce redukcje uwolnień radioaktywnych dyktowane przez zasadę ALARA wykraczają daleko poza wymagania urzędów dozoru jądrowego. Dzięki temu wpływ elektrowni jądrowych na poziom promieniowania i dawki w okolicy elektrowni jest tak mały, że najczęściej nie daje się go wykryć bezpośrednio i wyniki szacuje się na podstawie obliczeń, w których przyjmujemy założenia niekorzystne dla elektrowni jądrowej.

¹¹² JABLON, S., et al., „Cancer in populations living near nuclear facilities”, National Cancer Institute, NIH Publication No 90-874, US Dept. of Health and Human Services, (July 1990)

¹¹³ SLOVAK REPUBLIC National report compiled in terms of the Convention on Nuclear Safety, Sept. 2004

¹¹⁴ REPUBLIC OF HUNGARY, National Report, Convention on Nuclear Safety, Third Report, 2004

2.9.5. Wodę z elektrowni jądrowej można pić!

Przez wiele lat wiedziałem, że wokoło elektrowni jądrowej poziom promieniowania jest mały, ale nie byłem całkiem pewien, czy woda wypływająca z elektrowni jest radioaktywna – czy nie. Moje wątpliwości rozstrzygnąłem w czasie wizyty w elektrowni jądrowej Loviisa w Finlandii, którą zorganizowałem dla przeciwników energetyki jądrowej i dziennikarzy w 1991 roku.

W elektrowni jądrowej cała radioaktywność skupia się w elementach paliwowych¹¹⁵. Do pierwotnego obiegu chłodzenia¹¹⁶ przenika zaledwie ułamek procenta tej aktywności, obieg wtórny jest już czysty, a trzeci obieg (wody chłodzącej) – którego wody wypływają poza elektrownię – nie zawiera żadnych produktów radioaktywnych. Gdy zdałem sobie z tego sprawę, chciałem to udokumentować. Przy ciągłym ujęciu kamery TV wziąłem szklanę wody wypływającej z elektrowni Loviisa, podstawiałem ją pod licznik Geigera-Mullera który wykazał, że nie jest radioaktywna, a następnie wypilem. Filmował to wydarzenie znany specjalista od telewizyjnych programów naukowych, pan redaktor Wiktor Niedzicki. Czy jest to dowód, że woda wypływająca jest nieszkodliwa? Sądzę, że jest to przynajmniej dowód, że ja jestem o tym przekonany- i że licznik promieniowania potwierdza to moje przekonanie.



Rys. 2.14. Elektrownia jądrowa Loviisa w Finlandii. Wodę z elektrowni jądrowej można pić! (fot. Fortum Generation)

¹¹⁵ Pręty z dwutlenku uranu, tworzące rdzeń reaktora, w których zachodzi reakcja rozszczepienia, a więc uran znika lub jak się mówi żargonowo „spala się”. Oczywiście proces spalania tam nie zachodzi, jest to skutek rozszczepień jąder uranu, ale przez analogię z elektrowniami węglowymi mówimy o „paliwie” i o „procesie spalania”. Patrz Strupczewski A., Celiński Z.: Podstawy energetyki jądrowej, WNT, Warszawa, 1984

¹¹⁶ Obieg omywający elementy paliwowe i odbierający od nich ciepło, by oddać je do obiegu parowego zwanego obiegiem wtórnym.

2.9.6. Porównania ryzyka powodowanego bliskością elektrowni jądrowej

Zgodnie z Encyklopedią Energii z 2004 roku, następujące czynności powodują ten sam wzrost ryzyka, równy prawdopodobieństwu zgonu 1 na milion w ciągu 1 roku:

- Wypalenie 1,4 papierosa
- Jazda 16 km na rowerze
- Wypicie 30 puszek dietetycznego napoju gazowanego zawierającego sacharynę
- Mieszkanie przez 50 lat w odległości 8 km od reaktora jądrowego¹¹⁷.
- mieszkanie przez 2 dni w Nowym Jorku¹¹⁸

Porównanie wielkości dawek występujących typowo wokoło elektrowni jądrowych z dawkami z innych źródeł pokazane w tabeli 2.2 obrazuje jak znikome jest zagrożenie ze strony EJ.

Tabela 2.2. Dawki otrzymywane od źródeł naturalnych lub wskutek działań człowieka, mSv

420	Dawka roczna kosmonauty na orbicie
300	Dawka roczna od promieniowania naturalnego w Ramsar (Iran)
20	Dawka roczna w niewietrżonym domu na podłożu granitowym
3,6	Dawka roczna od promieniowania naturalnego na wysokości 1500 m npm.
2,4	Dawka roczna średnia na ziemi od źródeł naturalnych
0,7	Dawka otrzymywana przy prześwietleniu rentgenowskim płuc
0,06	Dawka od promieniowania kosmicznego podczas lotu Warszawa-New York-Warszawa
<0,01	Dawka otrzymywana podczas tygodniowego pobytu na nartach w górach
<0,01	Dawka roczna w najbliższym sąsiedztwie elektrowni jądrowej

Dodatkowa moc dawki poniżej 0,01 mSv/rok powodowana przez EJ jest niezauważalnym przyrostem na tle wahań promieniowania tła naturalnego.

¹¹⁷ INHABER H.: Risk Analysis Applied to Energy Systems, Encyclopedia of Energy, Volume 5. Elsevier, 2004.
¹¹⁸ Wilson R. 1979. Analyzing the daily risks of life. Technology Review 81: 41-46

2.10. Sprawa ognisk zwiększonej częstości występowania białaczki dziecięcej.

2.10.1. Ogniska zwiększonej częstości występowania białaczki dziecięcej w Wielkiej Brytanii

Ognisko zwiększonej częstości występowania białaczki dziecięcej wykryto w Seascale w pobliżu zakładów przerobu paliwa wypalonego w Sellafield. Szereg studiów wykazał, że nie są one skutkiem emisji substancji radioaktywnych z zakładów w Sellafield, a podobne ogniska istnieją w różnych rejonach świata. Gdy w latach 1990-1992 wysunęto hipotezę, że wzrost zachorowań na białaczkę może być skutkiem mutacji komórek rozrodczych u ojców narażonych zawodowo na promieniowanie, podjęto badania kontrolne w wielkiej skali by sprawdzić tę hipotezę. Studium objęło 35 949 dzieci z chorobami nowotworowymi i ponad 120 000 pracowników zarejestrowanych w brytyjskim rejestrze osób narażonych zawodowo na promieniowanie.

Wyniki wykazały, że nie ma związku przyczynowego między dawkami promieniowania otrzymywanymi przez rodziców, a białaczką i chłoniakiem nieziarniczym u dzieci¹¹⁹. W szczególności, nie wykryto dowodów na wzrost ryzyka wśród ojców, którzy otrzymali skumulowane dawki przed poczęciem dziecka przekraczające 100 mSv, ani wśród tych, którzy otrzymali 10 mSv lub więcej w okresie 6 miesięcy przed poczęciem dziecka. Występowanie skupisk białaczki może wynikać ze spadku odporności i wzrostu narażenia na infekcję wskutek przemieszczeń i mieszania ludności¹²⁰. Hipotezę tę poparł brytyjski Urząd Ochrony przed Promieniowaniem NRPB.

Wzrost częstości występowania białaczki dziecięcej i chłoniaka nieziarniczego w rejonach o dużym mieszanu ludności zaobserwował także wybitny lekarz i epidemiolog brytyjski, sir Richard Doll¹²¹. Stwierdził on, że w powstających w dawnych rejonach wiejskich nowych miasteczkach, w populacjach gdzie rodzice musieli dojeżdżać do pracy opuszczając swe dotychczasowe miejsce zamieszkania, w nowych miasteczkach i miastach powstających na wybrzeżu Morza Północnego, gdzie powstawał przemysł naftowy i zaplecze wydobywania gazu ziemnego, podobnie jak wokół nowego centrum zamieszkania koło Sellafield częstość występowania białaczki wśród dzieci w wieku od 0 do 14 lat

¹¹⁹ COMARE, Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment, „Tenth Report, The incidence of childhood cancer around nuclear installations in Great Britain (2005) www.comare.org.uk

¹²⁰ Kinlen L. Epidemiological Evidence for an Infective Basis in Childhood Leukaemia: in „The Royal Society of Edinburgh's Symposium 'Leukaemia Clusters' 7 Dec. 1994.

¹²¹ Doll R. The Seascale cluster: a probable explanation. Br J Cancer 1999; 81:1-3 [Medline]

była wyższa od średniej krajowej. Stosunek liczby przypadków zaobserwowanych do liczby przypadków oczekiwanych w danej populacji (oczekiwanej na podstawie znajomości średniej krajowej) wynosił średnio od 1,4 do 1,6, a w osiedlach o najwyższym ryzyku dochodził do 14. Dla porównania, w promieniu 10 km od Sellafield wartość średnia wynosiła 1.5, a wartość maksymalna 11,5. Profesor Doll potwierdził hipotezę Kinlena o wpływie mieszania się ludności na obniżenie odporności na poszczególne rodzaje białaczki. Przeciwnicy energetyki jądrowej zaatakowali te obserwacje twierdząc, że np. na wybrzeżu Morza Północnego powodem wzrostu zachorowań dzieci było narażenie rodziców na napromieniowanie podczas operacji sprawdzania spawów przy pomocy radiografii. Jednak to rozpaczliwe poszukiwanie radiacyjnych korzeni wzrostu białaczki w skupiskach mieszanej populacji ostatecznie odrzucono, gdy okazało się, że częstość białaczki dziecięcej wzrosła także o około 50% podczas II wojny światowej w rejonach wiejskich, do których przybywały znaczne ilości osób ewakuowanych z miast wskutek bombardowań¹²². Nie ma wątpliwości, że w czasie II wojny światowej nie było w Anglii elektrowni jądrowych, ani nie stosowano radiografii do kontroli szczelności baraków dla uchodźców.

2.10.2. We Francji instalacje jądrowe również nie powodują zagrożenia

We Francji zarzuty pod adresem zakładów przerobu paliwa wypalonego COGEMA w La Hague wysunął prof. Viel twierdząc, że wykrył wzrost zachorowań na białaczkę wśród młodzieży poniżej 25 lat mieszkającej w odległości do 35 km od zakładów. Opublikował on hipotezę, głoszącą że ten wzrost zachorowań jest skutkiem promieniowania emitowanego przez odpady radioaktywne z zakładów w La Hague. Wykryty wzrost zachorowań był minimalny. Łączna liczba przypadków stwierdzonych w populacji obserwowanej w okresie 1979-96 wyniosła 4, podczas gdy liczba oczekiwana na podstawie średniej częstości we Francji wynosiła 2. Różnica nie jest znacząca statystycznie. ale wobec tego, że zarzut dotyczył energii jądrowej spowodowało to wielkie zaniepokojenie. W odpowiedzi minister ochrony środowiska i sekretarz stanu do spraw zdrowia we Francji utworzyli komitet naukowy mający zbadać ten problem.

Komitet stwierdził, że łączna liczba zachorowań na białaczkę, jaką teoretycznie (w oparciu o hipotezę, że każda dawka jest szkodliwa – LNT) mogłyby spowodować ciekłe odpady radioaktywne normalnie wydzielane z zakładów przerobu wypalonego paliwa jądrowego wynosi

¹²² Leukemia clusters, Occasional papers No 1, Leukemia Research Fund, the Royal Society of Edinburgh, 1994, page 8

0,0009 przypadku wśród całej zagrożonej ludności i przez wszystkie lata działania zakładów. Ponadto, w okresie od 1979 do 1996 roku wystąpiły uwolnienia awaryjne, które mogły spowodować 0,0001 przypadku oraz pożar w silosie, który mógł spowodować 0,0004 przypadku. Łączny wkład uwolnień rutynowych i awaryjnych z zakładów przerobu paliwa wypalonego mógł spowodować 0,0014 przypadku białaczki. Wyniki prac Komitetu wykazały, że uwolnienia radioaktywne z zakładów w La Hague nie były powodem wzrostu zachorowań na białaczkę u dzieci w okolicy zakładów¹²³.

2.11. Zarzuty Zielonych w Niemczech – i rzeczywistość.

Ale chociaż na całym świecie wyniki bezstronnych badań różnych komisji powoływanych przez ministerstwa ochrony środowiska i ministerstwa zdrowia w takich krajach jak USA, Wielka Brytania czy Francja potwierdzały, że elektrownie jądrowe są nieszkodliwe, przeciwnicy energetyki jądrowej w Niemczech, twardo walczący o głosy wyborców i władzę, twierdzili uparczywie, że elektrownie jądrowe jednak szkodzą. Wykorzystywali oni przypadki białaczki w pobliżu EJ Krummel oraz wyniki studiów zachorowalności na nowotwory w sąsiedztwie wybranych instalacji jądrowych. Warto poznać fakty, by wiedzieć, co kryje się za twierdzeniami przeciwników energetyki jądrowej.

2.11.1. Przypadki białaczki blisko EJ Krummel – długoletnie spory

W latach 1990/91 w bezpośrednim sąsiedztwie EJ Krummel zachorowało na białaczkę 5 dzieci, potem w dwóch falach jeszcze 9 dzieci, łącznie 14 w ciągu 15 lat. Powstało podejrzenie, że białaczki spowodowało promieniowanie z EJ. Powołano kolejno 4 komisje, które przez 16 lat prowadziły intensywne analizy sytuacji, przede wszystkim sprawdzając czy z EJ Krummel mogło wydzielić się promieniowanie powodujące owe białaczki. W komisjach uczestniczyli zarówno zwolennicy jak i przeciwnicy energetyki jądrowej i jak oświadczył Erich Wichmann, kierownik Instytutu Epidemiologii w Ośrodku Badawczym w Monachium, przewodniczący jednej z tych komisji i członek innej, *„W tych komisjach następowało zderzenie dwóch różnych światów, spory były ostre i często personalne”*¹²⁴. Zdaniem takich autorytetów jak prof. Blettner,

¹²³ GROUPE RADIOECOLOGIE NORD CONTENTIN „Estimation des niveaux d'exposition aux rayonnements ionisants et des risques de leucémies associées de populations du Nord-Contentin, Synthèse”, July 1999

¹²⁴ D. Röhrlich Die Leukämiekinder von Krümmel, <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/wib/406152/>

(kierownik Niemieckiego Rejestru Zachorowań Dzieci na Nowotwory), dr Kaatsch (rzecznik Komisji ds. Białaczki), prof. Wichmann (przewodniczący komisji ds. Wskaźników obciążenia czynnikami powodującymi białaczkę) i prof. Greiser, oraz według Instytutu Ekologicznego Oeko-Institut z Darmstadt, promieniowanie z EJ było tak małe, że nie mogło być przyczyną wzrostu białaczki w okolicach Krummel¹²⁵.

W końcu 2004 roku minister ochrony środowiska prowincji, w której rządu sprawowała antynuklearna koalicja „zielono-czerwona” (Zieloni-SPD), sam członek partii Zielonych, zamknął sprawę dochodzeń oświadczeniem, że wysoka częstość białaczek wokoło Krummel nie jest spowodowana przez pracę elektrowni jądrowej. Nawet ci członkowie komisji, którzy twierdzą, że białaczkę może powodować niskie promieniowanie przyznają, że *„normalna praca EJ nie może spowodować uwolnienia radioaktywności, która mogłaby być powodem białaczki”*.

Sprawdzenie czy nie doszło do niedozwolonych uwolnień powierzono Instytutowi Ekologicznemu w Darmstadt, który bynajmniej nie jest przyjazny wobec energetyki jądrowej. Jak oświadczył Michael Sailer, Koordynator Wydziału Bezpieczeństwa Instalacji Jądrowych w Öko-institut i członek Komisji Ochrony przed Promieniowaniem Niemiec:

„Wykonaliśmy ogromną pracę i chociaż sami nie mogliśmy początkowo w to uwierzyć, eksperci naszego Instytutu Ekologicznego stwierdzili, że EJ Krummel nie ponosi winy”.

Nie znaleziono także żadnych wskazań, które mogłyby prowadzić do wniosku, że w jakimkolwiek czasie wystąpiły uwolnienia radioaktywności z EJ Krummel, które mogły prowadzić do wystąpienia białaczki. *„Po prostu – nie było żadnych podstaw do takiego twierdzenia”*¹²⁶.

Badania uszkodzeń chromosomów¹²⁷ wykazały, że liczba ich jest podwyższona w miejscowości Elbmarsch w okolicy EJ Krummel, ale dalsze badania porównawcze wykazały, że jeszcze większe ilości uszkodzeń występują w miejscowości Plöm, leżącej dalej od elektrowni¹²⁸.

Spowodowało to debatę co do możliwości sfałszowania wyników. *„Czy nie zamieniono próbek? Czy lekarze uczciwie pobierali próbki krwi? Czy laboratoria, które pracowały z anonimowymi próbkami, rzeczywiście nie знаły ich pochodzenia?”* Kłótnia zataczała coraz dalsze kręgi, ale ostatecznie uzgodniono wynik dochodzeń: *„żadnych nieuczciwych manipulacji nie było”*.

¹²⁵ tamże

¹²⁶ tamże

¹²⁷ Chromosom – forma organizacji materiału genetycznego wewnątrz komórki.

¹²⁸ Bruske-Hohfeld I et al. A cluster of childhood leukaemias near two neighbouring nuclear installations in Northern Germany: prevalence of chromosomal aberrations in peripheral blood lymphocytes *International Journal of Radiation Biology* 77:111-116, 2001

2.11.2. Możliwe wyjaśnienie zagadki – białaczka skutkiem produkcji materiałów wybuchowych

Sprawa pozostawała zagadką przez wiele lat. Skoro promieniowanie z instalacji jądrowych nie mogło być przyczyną białaczki dziecięcej, a mimo to białaczki występowały, to co było ich przyczyną? Działacze antynuklearni twierdzili, że nie ma sensu wierzyć w zaprzeczenia lekarzy i komisji, skoro dzieci chorują. Ich zdaniem, winna była energetyka jądrowa.

Dopiero niedawno okazało się, że przyczyną zachorowań mogą być pozostałości po działającej w okolicy w latach 1865-1945 fabryce materiałów wybuchowych założonej przez Alfreda Nobla. W pobranych próbkach gruntu nie wykryto zwiększonej radioaktywności, ale jest wiele toksycznych metali ciężkich – ołów, arsen, cynk, nikiel, chrom i inne, o których wiadomo, że mogą wywoływać białaczkę¹²⁹. Ponieważ na terenie dawnej fabryki działa ośrodek naukowy eksploatujący badawczy reaktor jądrowy, przeciwnicy energetyki jądrowej twierdzili, że winę ponosi ośrodek. Jego pracownicy mieli rzekomo ukrywać fakt, że 12 września 1986 doszło tam do wycieku. Zarzuty te nie potwierdziły się – natomiast są skażenia ziemi metalami ciężkimi. Wątpiący mogą zobaczyć zdjęcie lotnicze fabryki materiałów wybuchowych wykonane 7 kwietnia 1945, na kilka dni przed zniszczeniem fabryki przez alianckie lotnictwo bombowe (fot. dostępna w serwisie flickr.com)¹³⁰: To bombardowanie i skażenia – to fakty. Ale o tym już Zieloni milczą...

2.11.3. Analizy zachorowalności wokoło elektrowni jądrowych w Niemczech wykazują że promieniowanie z EJ nie może być przyczyną chorób.

Poza analizą okolicy Krummel, w Niemczech przeprowadzono trzy duże studia zachorowalności na nowotwory wokoło elektrowni jądrowych. Dwa badania dotyczące porównania częstości zachorowań wokoło EJ przeprowadził zgodnie z regułami sztuki Niemiecki Rejestr Dziecięcych Chorób Nowotworowych. Pierwsze studium uwzględniło częstość wszystkich zachorowań diagnozowanych od 1980 do 1990 r. dla osób mieszkających w promieniu 15 km od dowolnej z 20-tu EJ w Niemczech w porównaniu z równoważnymi i podobnymi demograficznie rejonami. Głównym celem było zbadanie częstości zachorowań dzieci w wieku od 0 do 14 lat. Nie znaleziono podwyższonego ryzyka.

Drugie stadium objęło dane z lat 1991-1995. Cel był ten sam. Wyniki z pierwszego studium dotyczące białaczki u dzieci poniżej 5 lat

¹²⁹ <http://www.thelocal.de/national/20090707-20427.html>

¹³⁰ <http://www.flickr.com/photos/24302898@N08/3218986034/>

mieszkających w promieniu 5 km zostały sprawdzone, częstości zachorowań okazały się nieco niższe niż w pierwszym studium i statystycznie nieznaczące¹³¹. Wydawało się, że sprawa została rozstrzygnięta na korzyść elektrowni jądrowych.

Ale w końcu XX wieku władzę w Niemczech objęła koalicja antynuklearna i postanowiła przeprowadzić badania tak, by udowodnić, że elektrownie jądrowe są szkodliwe. Przeprowadzono trzecie studium, na wstępie którego grupa ekspertów rządowych wykluczyła z analizy część instalacji, mianowicie reaktory badawcze w Kahl, Jülich i Karlsruhe, reaktor wysokotemperaturowy w Hamm i EJ Mühlheim-Kärlich. Ponadto zamiast testu dwustronnego – w którym rozpatruje się zarówno wyniki wyższe jak i niższe od średniej – przyjęto test jednostronny, w którym wszystkie wyniki niższe od średniej traktuje się jako przypadkowe błędy i odrzuca. Wyniki porównywano ze średnią dla całej populacji w Niemczech.

Podobnie jak w poprzednich badaniach, rozważenie wszystkich zachorowań nowotworowych u dzieci poniżej 5 lat mieszkających w promieniu 5 km przy teście dwustronnym nie wskazało na podwyższone ryzyko, bo wyniki nie były statystycznie istotne. Natomiast przy użyciu testu jednostronnego dla okrojonej, jak podaliśmy powyżej, populacji wybranych instalacji udało się wykazać wzrost ryzyka.

Należy dodać, że jak stwierdza G. Dallal, Kierownik Zespołu Biostatystycznego w Tufts University w Bostonie, *„Cechą, która powoduje, że większość ekspertów w zakresie statystyki odrzuca test jednostronny, jest przyjęcie w takim teście założenie, że wszystkie różnice w nieprze widzianą stronę – duże i małe – muszą być traktowane jako po prostu nieistotne. Nigdy nie widziałem sytuacji – pisze dr Dallal – w której badacze zgodziliby się na to w praktyce... Zadziwiające jest, gdy widzi się testy jednostronne w użyciu w XXI wieku.”*¹³²

Cóż, dr Dallal nie ma nic wspólnego z energetyką jądrową, ani z metodami jej zwalczania stosowanymi przez motywowane politycznie partie, jest tylko wybitnym specjalistą w zakresie badań epidemiologicznych. Aby nie być posądzonym o przekłamania w tłumaczeniu jego sformułowań, podaję je w przypisie w oryginale¹³³. Można je też

¹³¹ Peter Kaatsch et al.: Epidemiologische Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK Studie) UMWilforschungsplan des Bundesumweltministerium (UFOPLAN)N Reaktorsicherheit und Strahlenschutz Vorhaben Stsch 4334 2007 Bundesamt für Strahlenschutz

¹³² G. E. Dallal, One Sided Tests <http://www.tufts.edu/~gdallal/onesided.htm>, in The Little Handbook of Statistical Practice.

¹³³ „What damns one-tailed tests in the eyes of most statisticians is the demand that all differences in the unexpected direction--large and small--be treated as simply nonsignificant. I have never seen a situation where researchers were willing to do this in practice.It is surprising to see one-sided tests still being used in the 21-st century,...”

znaleźć w jego książce o metodach statystycznych, dostępnej w Internecie.¹³⁴

Ponadto specjaliści zwracają uwagę, że w omawianym studium wyniki dla otoczenia EJ były porównywane ze średnią dla ludności, a nie ze średnią dla podobnych miejscowości¹³⁵. Otóż elektrownie jądrowe są zwykle lokowane w sąsiedztwie ośrodków przemysłowych, zawierających wiele fabryk, zakładów, rafinerii itp. Nie są to najbogatsze części kraju, ani nie oferują czystego wiejskiego powietrza. Tak więc mieszkanie obok elektrowni jądrowej w Niemczech oznacza mieszkanie w sąsiedztwie centrum przemysłowego, w sąsiedztwie wysokich kominów emitujących wszystkie zanieczyszczenia. Nic dziwnego, że porównanie stanu zdrowia ludzi w takich miejscach z przeciętną dla Niemiec wypadnie niekorzystnie dla tych ośrodków.

Tak więc niemiecka komisja potwierdziła, że dla rejonów celowo wybranych przez ekspertów pracujących na zlecenie rządu antynuklearnego i przy stosowaniu metody testu jednostronnego obserwuje się niewielki wzrost zachorowań. Ta sama komisja stwierdziła jednak, że promieniowanie z elektrowni jądrowych nie może być przyczyną tego wzrostu¹³⁶.

Warto to powtórzyć: Komisja NIE STWIERDZIŁA, że elektrownie jądrowe są przyczyną białaczki, co więcej, specjalnie oświadczyła, że promieniowanie NIE MOŻE być jej przyczyną. Nawet antynuklearny minister Sigmar Gabriel (znany z ostrych ataków na niemieckie elektrownie jądrowe) musiał to przyznać¹³⁷. Ponadto komisja przypominała w podsumowaniu wyniki poprzednich dwóch studiów, prowadzonych dla **wszystkich EJ** w Niemczech metodą testu dwustronnego, które **nie wykazały wzrostu zachorowań**. Komisja nie rozpatrywała też wpływu zjawiska migracji ludności, które jak stwierdzono poprzednio w innych krajach (W. Brytania, USA, Francja) powoduje wzrost częstości zachorowań.

W tej sytuacji – aby nie wydawać sądu o metodach zwalczania EJ w Niemczech – proponuję ograniczyć się do powtórzenia wniosku samej komisji niemieckiej – *„według obecnego stanu wiedzy, promieniowanie z normalnie działającej EJ nie może być traktowane jako przyczyna wzrostu zachorowań na białaczkę”*.

¹³⁴ G. E. Dallal, Ph.D: The Little Handbook of Statistical Practice, www.tufts.edu/~gdallal/LHSP.HTM

¹³⁵ German Study finds Nuclear Energy Causes Leukemia... or maybe not...January 13th, 2008, <http://depletedcranium.com/?p=339>

¹³⁶ Peter Kaatsch et al.: Epidemiologische Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK Studie) UMWltforschungsplan des BundesuMWltministerium (UFOPLAN)N Reaktorsicherheit und Strahlenschutz Vorhaben Stsch 4334 2007 Bundesamt fur Strahlenschutz

¹³⁷ <http://www.dw-world.de/dw/article/0,2144,2994904,00.html>

3. Czy powinniśmy obawiać się odpadów radioaktywnych?

3.1. Czym grożą nam odpady radioaktywne?

Zanim przystąpimy do oceny zagrożenia ze strony odpadów promieniotwórczych, trzeba sobie zdać sprawę, że cała Ziemia pełna jest pierwiastków ulegających rozpadowi radioaktywnemu¹³⁸, i to wcale nie wskutek awarii w Czarnobylu. Kilkadziesiąt izotopów promieniotwórczych¹³⁹ rozpada się w naszym środowisku naturalnym, na przykład potas K-40, stanowiący nieodłączną część mleka, które tyłu ludzi pije – i które jest tak zdrowe, gdy niemowlę ssa je z piersi matki. Jedyna możliwość by zmniejszyć radioaktywność mleka to dodać do niego wody, ale nawet i w zwykłej wodzie są rozpuszczone pierwiastki emitujące promieniowanie. We wnętrzu Ziemi nieustannie wytwarzane są ogromne ilości ciepła właśnie wskutek rozpadu izotopów promieniotwórczych, dlatego mimo oddawania ciepła w przestrzeń kosmiczną Ziemia nadal jest ciepła. Wszyscy żyjemy stale i żyliśmy od zarania dziejów w środowisku radioaktywnym, a nasze organizmy są do niego przystosowane. Dlatego w dyskusji o odpadach promieniotwórczych patrzmy na proporcje skutków działań człowieka i przyrody – i na tej podstawie dokonujmy ocen naszego postępowania.



Rys. 3.1. Typowy odpad promieniotwórczy – igła radiowa ze szpitala w pojemniku ochronnym

¹³⁸ Rozpad radioaktywny to przekształcenie atomu pewnego izotopu w inny, zwykle przez emisję cząstki alfa lub beta.

¹³⁹ O właściwościach chemicznych pierwiastka decyduje liczba znajdujących się w jego jądrze protonów równa krążącej wokół jądra liczbie elektronów. Liczba protonów w jądrze danego pierwiastka jest stała, np. dla uranu wynosi ona 92, natomiast liczba neutronów w jądrze może być większa lub mniejsza, np. jądro uranu może zawierać łącznie 238, 235 lub 233 neutrony i protony. Takie odmiany danego pierwiastka różniące się liczbą neutronów nazywamy izotopami. Ich właściwości chemiczne są takie same, natomiast różnią się ich własności fizyczne, np. U-238 ma okres połowicznego rozpadu 4,5 miliarda lat, a U-235 0,7 mld lat.

Promieniowanie odpadów radioaktywnych ma małą energię¹⁴⁰ i najczęściej wystarcza niewielka grubość materiału osłonowego by je zatrzymać. Pojemniki, w których przewozi się odpady radioaktywne, są wyposażone w warstwy osłonowe z żelaza lub ołowiu, które zapewniają pełną ochronę otoczenia przed promieniowaniem. Zasadniczym potencjalnym zagrożeniem jest rozsypanie odpadów promieniotwórczych po powierzchni ziemi, przeniknięcie ich do wody pitnej i wchłonięcie przez istoty żywe, w których promieniowanie może oddziaływać bezpośrednio na komórki i procesy zachodzące w organizmie.

Dlatego w gospodarce odpadami radioaktywnymi stosujemy system barier, które zapewniają skuteczne zatrzymywanie izotopów radioaktywnych daleko od otoczenia człowieka. Pojęcie odpadów radioaktywnych obejmuje szeroką gamę przedmiotów i materiałów, począwszy od izotopów stosowanych w medycynie i przemyśle, wymagających czasem grubych osłon (jak widać na rys. 3.1), rękawiczek gumowych i pokrowców ochronnych na obuwiu (są to tzw. odpady niskoaktywne), poprzez przetworzone ścieki z obiegów chłodzenia elektrowni (odpady średnioaktywne) aż do odpadów z procesu przerobu wypalonego paliwa jądrowego (stanowiących odpady wysokoaktywne¹⁴¹).

Musimy wyraźnie powiedzieć, że odpady promieniotwórcze będą nam towarzyszyć niezależnie od tego czy będziemy mieć elektrownie jądrowe czy też nie. Do składowiska w Różanie trafiają jako odpady promieniotwórcze przedmioty codziennego użytku, jak choćby powszechnie stosowane czujniki dymu, które zawierają promieniotwórczy izotop Am-241. Trafiają tam również odpady pochodzące ze szpitali i klinik, głównie z zakładów medycyny nuklearnej i radioterapii. Również przemysł i nauka generują pewne ilości odpadów radioaktywnych.

W Polsce mamy już blisko pół wieku doświadczenia z odpadami o niskiej i średniej aktywności, i wiemy dobrze, że Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych (KSOP) w Różanie pracujące od 1960 roku nie spowodowało żadnego zagrożenia dla zdrowia okolicznej ludności i pracowników¹⁴² – wręcz przeciwnie, gmina i miasto Różan należą do okolic o NAJNIŻSZEJ w Polsce zachorowalności na nowotwory¹⁴³.

¹⁴⁰ Za wyjątkiem wypalonego paliwa jądrowego i odpadów wysokoaktywnych powstających przy przerobie wypalonego paliwa.

¹⁴¹ Odpady dzielą się na niskoaktywne, średnioaktywne i wysokoaktywne. Np. dla cieczy odpady niskoaktywne to takie substancje, które przy spożyciu 1 litra powodują otrzymanie od 0,00001 do 0,1 rocznej dawki dopuszczalnej (RDD), średnioaktywne – od 0,1 do 100 RDD, a wysokoaktywne – powyżej 100 RDD

¹⁴² Iwanowska J., Tyczynski J.: Analiza zagrożenia nowotworami złośliwymi ludności w mieście i gminie Różan w aspekcie ewentualnego skażenia radioaktywnego środowiska, Centrum Onkologii, Instytut im M. Skłodowskiej-Curie, Warszawa, 1989

¹⁴³ Iwanowska J. Prawda o Różanie, Wiedza i Życie, maj 1990, str. 43.

Podobnie pozytywne doświadczenia z pracy składowisk odpadów o średniej i niskiej aktywności zebrano w wielu innych krajach. Zazwyczaj składowiska te są akceptowane przez miejscową ludność, bo zapewniają one dobre miejsca pracy (dobrze płatnej, czystej i zdrowej), a radioaktywność po kilkunastu lub kilkudziesięciu latach zanika¹⁴⁴ i przestaje być problemem. Natomiast głównym przedmiotem ataku organizacji antynuklearnych są składowiska odpadów o wysokiej aktywności, powstających po przerobie paliwa, lub zawierających paliwo, którego nie poddano przerobowi.

3.2. Recykling paliwa – zamknięty cykl paliwowy (paliwo jądrowe jako surowiec wtórny)

Po wydobyciu rudy uranowej z ziemi, oczyszczeniu jej i wzbogaceniu¹⁴⁵ uranu następuje produkcja paliwa, wypalenie paliwa w reaktorze i wstępne studzenie wypalonego paliwa. Ilości tego paliwa są bardzo małe – jak widać na rys. 3.2 paliwo wystarczające by dostarczyć człowiekowi całą potrzebną mu w ciągu życia energię można zmieścić w dłoni. Dlatego przemysł jądrowy może zapewnić bezpieczne składowanie i usuwanie odpadów radioaktywnych powstających w elektrowniach jądrowych przy rozszczepieniu uranu zawartego w paliwie. Po kilkunastu latach, gdy aktywność paliwa zmaleje, a generacja ciepła stanie się tak mała, że można je odprowadzić bez chłodzenia wodą, następuje moment decyzji: albo paliwo w całości usuwamy do ostatecznego składowania pod ziemią, albo też postanawiamy odzyskać zawarty w nim jeszcze uran (około 1% U-235 i niemal cały U-238) i nagromadzony w toku pracy w reaktorze pluton¹⁴⁶, a do składowiska odesłać tylko odpady o wysokiej aktywności, ulegające znacznie szybszemu rozpadowi niż pluton.

Jest to tzw. zamknięty cykl paliwowy, z przerobem lub *recyklizacją* paliwa. Cykl zamknięty można uważać za postępowanie najbardziej zgodne ze strategią ludzkości przyjętą w końcu XX wieku, polegającą na rozdzielaniu różnych materiałów odpadowych i odzyskiwaniu materiałów użytecznych (tzw. surowców wtórnych), a usuwaniu tylko tych, które do niczego się nie nadają. W przypadku wypalonego paliwa ją-

¹⁴⁴ Każdy rozpad radioaktywny oznacza, że jakieś jądro wysłało promieniowanie i przestało być radioaktywne. Dlatego aktywność odpadów jądrowych maleje z każdym dniem, miesiącem i rokiem, i odpady wymagające dzisiaj osłon stają się nieszkodliwe po upływie 10 czy 50 lat.

¹⁴⁵ Wzbogacanie to zwiększenie frakcji rozszczepialnego izotopu U-235 z około 0,71% (tyle jest w uranie naturalnym) do około 3-4% (tyle jest w paliwie reaktorów PWR i BWR).

¹⁴⁶ pierwiastek powstający w wyniku reakcji jądrowych w reaktorze, nadający się do rozszczepiania tak jak uran, a więc będący dobrym materiałem na paliwo jądrowe

drowego, w którym nadal pozostaje około 95% energii potencjalnie możliwej do wykorzystania, usuwanie go do składowania ostatecznego byłoby rażącym marnotrawstwem. Co więcej, stężenie plutonu w wypalonym paliwie jest na tyle duże, że można z niego wytwarzać nowe paliwo bez wzbogacania uranu. Wariant ten pokazany jest na rys. 3.3. W praktyce takie nowe paliwo wykonuje się z mieszaniny tlenków uranu wzbogaconego¹⁴⁷ lub zubożonego i plutonu. Takie paliwo zwane MOX (*mixed oxide – mieszanina tlenków*) pracuje w wielu elektrowniach jądrowych w Europie, Rosji i Japonii. Ilości odpadów wysokoaktywnych w takim procesie są małe, np. w elektrowniach francuskich przypada około 3 m³ odpadów wysokoaktywnych na roczną pracę reaktora o mocy 1000 MW, a więc około 3 m³ na gigawato-rok wyprodukowanej energii elektrycznej (m³/GWe-rok)¹⁴⁸.

Zarządzanie wypalonym paliwem jądrowym pozostaje poważnym zadaniem dla przemysłu jądrowego. Ilość wypalonego paliwa usuwanego rocznie z elektrowni jądrowych na całym świecie to około 8 000 ton, co w porównaniu z 25 miliardami ton dwutlenku węgla emitowanych bezpośrednio do atmosfery przez spalanie paliw organicznych wydaje się ilością małą. Przy ciężarze właściwym około 10 t/m³ daje to 800 m³/rok, czyli prostopadłościan o boku 20 m x 10m i o wysokości 4 m. Jest to objętość jednej dużej sali balowej! W przypadku przerobu paliwa wypalonego do składowania trafia tylko 4% wagi pierwotnego paliwa, a pozostałe 96% złożone z uranu i plutonu będą ponownie wykorzystywane do wykonania nowych elementów paliwowych. Dzięki temu, że odpadów promieniotwórczych jest tak mało, można je gromadzić, zamykać w szczelne pojemniki i utrzymywać z dala od biosfery dopóki ich aktywność nie zmniejszy się tak bardzo, że przestaną one stanowić zagrożenie.

Tabela 3.1. Ilości odpadów z EJ z reaktorem PWR¹⁴⁹

Aktywność odpadów	Objętość m ³ /GWe-rok
Wysoka	3
Średnia	22
Niska	155

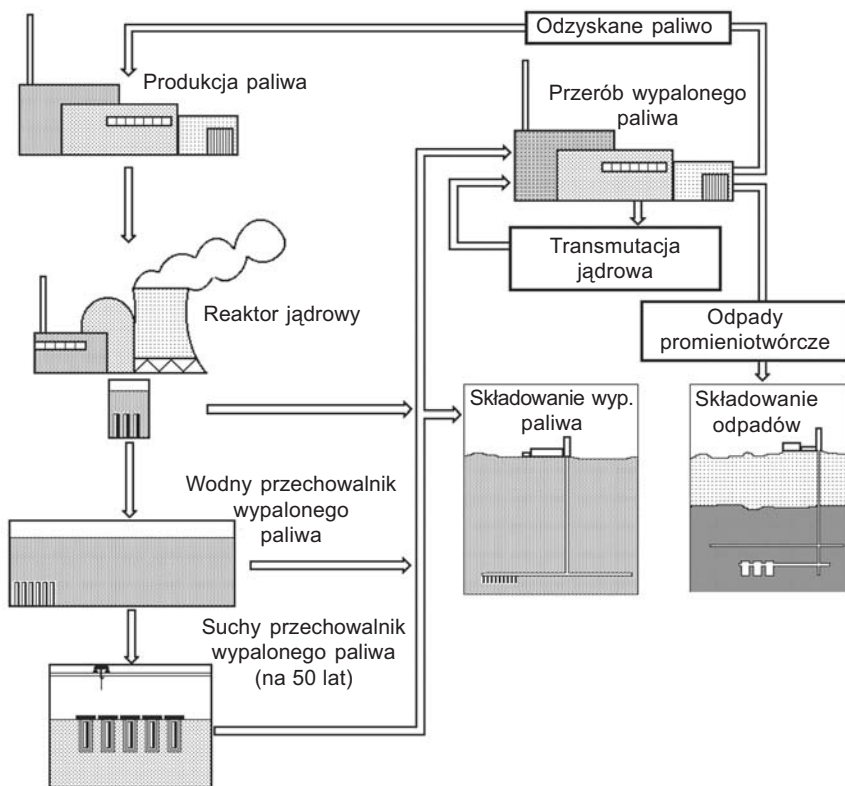
¹⁴⁷ Uran zubożony jest odpadem powstającym w procesie wzbogacania uranu. Frakcja uranu rozszczepialnego U-235 jest w nim mniejsza niż w uranie naturalnym, stąd nazwa „zubożony”.

¹⁴⁸ EXTERNE 1995: Externalities of Energy, Vol. 1-7, published by European Commission, Directorate General XII, Science Research and Development, EUR 16522, Luxembourg, 1995

¹⁴⁹ EXTERNE 1995: Externalities of Energy, Vol. 1-7, published by European Commission, Directorate General XII, Science Research and Development, EUR 16522, Luxembourg, 1995



Rys. 3.2. Objętość odpadów radioaktywnych (zszklwionych), jakie przypadałyby na jedną osobę otrzymującą energię w ciągu całego życia tylko z energii jądrowej. Rysunek zaczerpnięty z pracy J. Włodarskiego¹⁵⁰ za zgodą autora.



Rys. 3.3. Schemat postępowania z wypalonym paliwem: Z wodnego lub suchego przechowalnika przewożone jest ono albo 1) do ostatecznego składowania pod ziemią, albo 2) do zakładu przerobu paliwa wypalonego, z którego wraca do elektrowni jądrowej do ponownego wypalenia. W tym drugim przypadku pod ziemię usuwane są tylko odpady wysokoaktywne, bez plutonu i uranu.

¹⁵⁰ Włodarski J.: Składowanie odpadów promieniotwórczych, referat na sympozjum: Czysta i bezpieczna? Elektrownia jądrowa w Polsce, Polskie Towarzystwo Badań Radiacyjnych, Polskie Towarzystwo Nukleoniczne Państwowy Zakład Higieny Warszawa, 11 marca 2005 r.

Natomiast ilości odpadów produkowane rocznie przez nowoczesne elektrownie węglowe są ogromne. Dane dla elektrowni niemieckich podajemy wg studium Komisji Europejskiej w tabl. 3.2. Dane dla elektrowni polskich są podobne.

Tabela 3.2. Ilości odpadów z elektrowni opalanej węglem kamiennym (WK) lub brunatnym (WB)¹⁵¹

Elektrownia	Lauffen, węgiel kamienny	Grevenbroich, węgiel brunatny
	ton/GWe-rok	ton/GWe-rok
Popiół	310 000	557 000
Gips	147 000	67 000
Ścieki wodne	131 000	2 230 000

Dzięki temu, że ilości odpadów promieniotwórczych są małe, możliwe jest stosowanie w gospodarce odpadami jądrowymi innej strategii niż w energetyce węglowej.

Tabela 3.3. Różnice w strategii postępowania z odpadami w cyklu jądrowym i węglowym.

Energetyka jądrowa	Spalanie węgla
Odpady radioaktywne są zamykane szczelnie i trwale oddzielane od otoczenia człowieka	Żużel i popiół są oddzielane od wody na kilkadziesiąt lat
Radioaktywność odpadów maleje z czasem do zera	Żużel i popiół pozostają toksyczne na zawsze

Skutki tych różnic w podejściu do gospodarki odpadami omówimy poniżej.

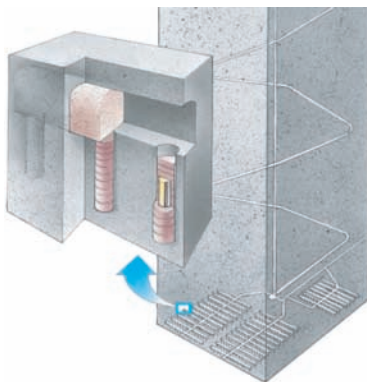
3.3. Co lepiej : czy odpady (radioaktywne lub nie, z elektrowni jądrowych czy z innych) wyrzucać do otoczenia, czy przechowywać pod kontrolą?

Odpady radioaktywne są zagęszczane, zamykane w pojemnikach i składowane w magazynach pod kontrolą, podczas gdy odpady z elektrowni z paliwem organicznym są rozpraszane w otoczeniu.

¹⁵² tamże

3.3.1. System barier zatrzymujących produkty radioaktywne z dala od biosfery

System zamykania odpadów radioaktywnych i ich składowania wybiera się stosownie do aktywności odpadów i długości czasu, w ciągu którego odpady stanowią potencjalne zagrożenie dla człowieka i środowiska. Zeszlone odpady wysokoaktywne zawierające praktycznie wszystkie izotopy długożyciowe¹⁵², są zwykle zamykane w systemie wielu barier i umieszczane głęboko pod ziemią – stąd często stosowana nazwa składowiska głębinowego. W systemie tym stosuje się materiały naturalne, tak by układ składowiska geologicznego był maksymalnie podobny do środowiska naturalnego. Układ wielu kolejnych barier gwarantuje bezpieczeństwo – nawet, jeśli jedna z nich zawiedzie, pozostałe powstrzymają skutecznie rozchodzenie się materiałów radioaktywnych.



Rys. 3.4. Składowisko paliwa wypalonego KBS w Szwecji¹⁵³

Na początek odpady wysokoaktywne są witrafikowane¹⁵⁴ w postaci cylindrów szklanych o bardzo wysokiej odporności na wymywanie przez wodę. Odporność tę potwierdziło wiele doświadczeń, w których wykazano, że przez tysiąc lat zaledwie mały ułamek procenta odpadów przenika do wody, nawet jeśli zeszlone odpady są omywane wodą. W rzeczywistości nie dopuszczamy do tego, bo zeszlone odpady są zamykane w pojemniki z miedzi lub stali nierdzewnej, nie dopuszczające

¹⁵² W zależności od szybkości rozpadu promieniotwórczego, radioizotopy dzielimy na krótko życiowe (aktywność ich maleje dwukrotnie w ciągu sekund lub godzin), średnio życiowe – miesiące lub lata i długo życiowe – setki, miliony a nawet miliardy lat.

¹⁵³ SKB; Deep repository for spent nuclear fuel, 2008

¹⁵⁴ Zatapianie odpadów w szkło. Produktem tego procesu są bardzo trwałe i łatwe do przechowywania cylindry o strukturze szklawa.

do kontaktu wody ze szkłem. Jak długo pojemnik miedziany jest szczelny, żadne radioizotopy nie mogą wydostać się na zewnątrz. Główne zagrożenie stanowi korozja (powodowana przez tlen i związki siarki rozpuszczone w wodach podziemnych) i ruchy górotworu, które mogą spowodować pęknięcie pojemnika.

Miedź jest materiałem bardzo odpornym na działanie agresywnych substancji w wodzie podziemnej. Wkładka stalowa lub żeliwna pozwala pojemnikowi znieść ogromne obciążenia mechaniczne bez uszkodzenia.

Pojemnik jest otoczony warstwą gliny bentonitowej, zwanej buforową, która zabezpiecza pojemnik przed małymi ruchami skały i utrzymuje go na miejscu. Ta warstwa buforowa spełnia dwie dodatkowe funkcje. Bentonit puchnie w zetknięciu z wodą, co zabezpiecza znakomicie przed przeniknięciem wody do wnętrza pojemnika. Jednocześnie glina bentonitowa działa jako filtr. Radionuklidy przylegają do powierzchni cząstek gliny. W mało prawdopodobnym przypadku pęknięcia pojemnika, ogromna większość radionuklidów pozostanie wewnątrz pojemnika. Większość z tych, które wydostaną się z pojemnika, zostanie schwytana przez cząstki gliny bentonitowej. Transport radionuklidów na powierzchnię będzie w ten sposób skutecznie opóźniony, co zapewni dalszy rozpad radioaktywny i zmniejszenie aktywności odpadów zanim wydostaną się na powierzchnię.

Również skała opóźnia transport radionuklidów. Główną jej funkcją jest jednak zabezpieczenie pojemnika i warstwy buforowej przed uszkodzeniem mechanicznym i zapewnienie stabilnego środowiska chemicznego. Dla całości pojemnika ważne jest, by wody podziemne nie zawierały rozpuszczonych tlenków. Niska prędkość przesączania wody przez skałę jest wielką zaletą wspomagającą utrzymanie systemu barier. Taki system barier przyjęto w Szwecji do przechowywania wypalonego paliwa¹⁵⁵, a podobne układy barier stosowane są w przechowalniach paliwa zaprojektowanych w innych krajach np. w Finlandii, USA, Japonii czy w Korei Płd.

3.3.2. Jak długo system barier będzie skuteczny?

Czemu wciąż podkreślamy sprawę wymywania i systemu barier? Dlatego, że odpady wysokoaktywne umieszczane są głęboko pod ziemią, na głębokości 500-900 m. i dopóki tam pozostają, ich promieniowanie nie ma żadnego znaczenia, bo już kilka metrów gruntu wystarcza, by stało się ono niewykrywalnie małe. Zagrożenie może powstać jedynie wtedy, gdy woda spowoduje skorodowanie pojemników, następnie wymyje odpady ze szkła, w którym zostały one zatopione, a na koniec

¹⁵⁵ Deep repository for spent nuclear fuel, Svensk Kärnbränslehantering AB, www.skb.se

uniesie rozpuszczone odpady w kierunku powierzchni ziemi, do źródeł wody pitnej. Dopiero, gdy odpady zostaną wypite przez człowieka, mogą stanowić zagrożenie. Ale na przykład pokłady solne zostałyby dawno rozpuszczone, gdyby przenikała do nich woda. Sól rozpuszcza się znacznie szybciej, niż szkło!

Gdy umieszczamy pojemniki z odpadami w pokładach soli, mamy pewność, że woda do nich nie przeniknie. Jak długo? Na pewno dłużej, niż odpady będą niebezpieczne. Życie człowieka trwa krótko w stosunku do okresu połowicznego rozpadu niektórych radioizotopów, ale przemiany geologiczne następują bardzo wolno. Szybkość wymywania zeszlonych odpadów będzie minimalna, bo metody zamykania odpadów stosowane przez przemysł jądrowy są bardzo skuteczne. Odpady będą więc odseparowane od biosfery przez bardzo długi czas, a nawet w razie ich wymycia z pojemników tempo przesączania będzie bardzo małe. Ale ponadto, samo przechowywanie paliwa w pojemnikach szczelnych zapewnia ich separację od otoczenia nie przez setki, ale przez tysiące lat¹⁵⁶! Nie jest to technicznie trudne – przemysł jądrowy już buduje takie składowiska odpadów promieniotwórczych w różnych krajach, i to za własne pieniądze.

3.3.3. Okręt wojenny Wasa – skutki działania wody przez 350 lat

Słyszałem nieraz powątpiewania, czy potrafimy utrzymać produkty rozszczepienia tak długo w jednym miejscu. Dwa przykłady, każdy z zupełnie innej epoki, mogą pomóc nam zrozumieć, że procesy naturalne przebiegają znacznie wolniej niż działania człowieka. Pierwszy przykład to historia okrętu wojennego Wasa, zbudowanego w czasach wojen szwedzkich, a więc przed 400 laty. Warto poświęcić jej chwilę uwagi, nie tylko z powodu odpadów radioaktywnych.

Otóż ówczesny król szwedzki, chcąc mieć najpotężniejszy okręt wojenny na Bałtyku, kazał wyposażać go w dodatkowy pokład armatni, co oczywiście znacznie przesunęło w górę środek ciężkości okrętu. Okręt był niestabilny, ale nikt nie śmiał tego powiedzieć, bo w owym czasie król szwedzki był w Szwecji z definicji uważany za najlepszego znawcę sztuki budowy okrętów.

Według ówczesnych reguł, stabilność okrętu sprawdzano tak, że załoga biegała od jednej burty okrętu do drugiej i z powrotem, w sumie czterdzieści razy. Jednakże już przy drugim biegu przechylenie okrętu było tak silne, że kapitan rozkazał przerwać próbę przed jej ukończeniem.

¹⁵⁶ Juhani Vira: Disposal Of High-Level Radioactive Waste In Finland Posiva Oy, Fin-00100 Helsinki, Finland , Chapter 9

Cóż miał robić? Król walczył w tym czasie na Pomorzu i czekał na potężny okręt – więc kapitan rozkazał postawić żagle i wypłynąć. Podróż była krótka – po pierwszym silnym podmuchu wiatru najpotężniejszy na Bałtyku okręt wojenny Wasa przechylił się – i przewrócił. Załoga poszła na dno, wraz ze wszystkimi rzeczami, które znajdowały się na statku.

Czemu mówimy o tym? Nie tylko dlatego, że w energetyce jądrowej przechowujemy starannie w pamięci wszelkie przykłady wykazujące, że nie wolno łamać zasad bezpieczeństwa. W odniesieniu do składowania odpadów istotne jest również to, że gdy po 350 latach okręt Wasa wydobyto z dna morza okazało się, że okręt i wiele przedmiotów pozostało niezniszczonych mimo ciągłego działania słonej wody, podmorskich prądów i burz. Co więcej, gdy wydobyto z okrętu beczki z piwem, okazało się, że nadal jest w nich piwo! A więc zwykłe beczki wykonane przez bednarzy szwedzkich pozostały szczelne przez 350 lat.

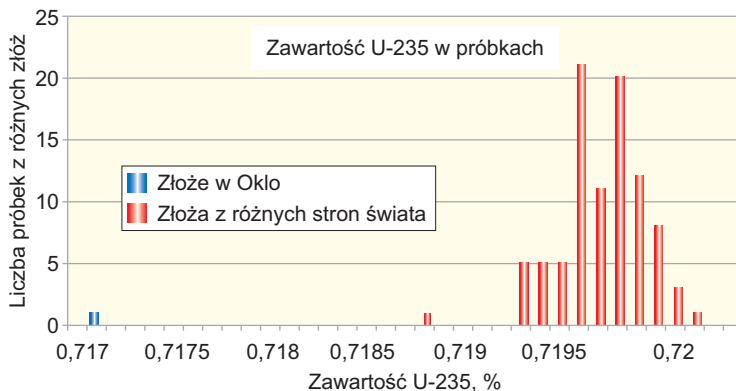
Jeśli przedmioty z drewna bez żadnej osłony pozostały nienaruszone po kilkuset latach w wodzie, czy naprawdę mamy wątpić w techniczne możliwości wykonania w XXI wieku pojemników, które zapewnią trwałe przechowywanie zeszlonych odpadów umieszczonych w najstarszej jak można wybranych, stabilnych i suchych pokładach skalnych?

3.3.4. Odpady radioaktywne z reaktorów naturalnych w Oklo – co pozostało po 2 miliardach lat?

Drugi przykład pochodzi z zupełnie innej epoki, bo sprzed niemal 2 miliardów lat. W owym czasie frakcja uranu U-235 w uranie naturalnym była znacznie większa niż obecnie i wynosiła około 3% (bo U-235 ulega rozpadowi naturalnemu z okresem połowicznego rozpadu około 700 milionów lat, podczas gdy dla U-238 okres ten wynosi ponad 4,5 miliarda lat). Stwarzało to możliwość wystąpienia łańcuchowej reakcji rozszczepienia, jeśli bogata ruda uranowa była w kontakcie z wodą. Taka sytuacja powstała w miejscowości Oklo w Gabonie (Afryka równikowa), co spowodowało ukształtowanie kilku naturalnych reaktorów jądrowych, pracujących z przerwami przez kilkaset tysięcy lat. A jak to stwierdzono?

Oto pracownicy zatrudnieni w przedsiębiorstwie eksploatującym rudę uranową zauważyli, że w rudzie tej jest „za mało” uranu rozszczepialnego U-235. Było go tylko około 0,717 %, zamiast około 0,72% jak zwykle we wszystkich próbkach rudy uranowej z różnych miejsc na kuli ziemskiej. Była to różnica mała, co oznaczało, że reaktory naturalne pracowały na małej mocy, i wypalały poniżej 1% uranu U-235, ale dalsze pomiary wykazały, że w Oklo występują również fragmenty rudy o frakcji U-235 obniżonej do 0,621%, a w jednej z próbek frakcja

U-235 wyniosła tylko 0,440%. Oznaczało to, że w ciągu kilkuset tysięcy lat pracy tych reaktorów frakcja wypalonego uranu wyniosła ponad 30%! Niezły wynik jak na reaktor naturalny – wypalenie osiągnięte w nowoczesnych reaktorach dochodzi do 50-60%.



Rys. 3.5. Zawartość uranu U-235 w próbkach pobranych z różnych źródeł na świecie. Dane liczbowe z pracy Menshika¹⁵⁷.

Co więcej, w minerałach z Oklo znaleziono produkty rozszczepienia takie jak neodym, a nawet ksenon – gaz, który uwięziony w ziarnach fosforanów glinu pod obszarem grzędawisk wodnych przetrwał przez blisko dwa miliardy lat!¹⁵⁸ Produkty rozszczepienia z reaktorów naturalnych w Oklo nie były przechowywane w złożach skalnych, nie były zamykane w pojemniki ani nie ulegały zeszkleniu – oddziaływała na nie woda (której obecność była niezbędna, by reaktory mogły zacząć pracę), znajdowały się tuż pod powierzchnią gruntu, narażone na wszelkie procesy mogące sprzyjać ich migracji – a mimo to pozostały na miejscu, dopóki nie uległy naturalnemu rozpadowi. Tylko te najtrwalsze – o bardzo, bardzo długich okresach rozpadu i odpowiednio bardzo, bardzo małej aktywności – świadczą dziś o tym, że reaktory naturalne działały naprawdę i że nie spowodowały skażeń radioaktywnych w okolicy.

Dziś geologowie piszą, że procesy wymywania odpadów są bardzo powolne, i nawet gdyby odpady były pozbawione pojemników i wityryfikacji, to i tak nie wydostałyby się z głębokości 500 m na powierzchnię

¹⁵⁷ Menshik A.: The workings of an ancient nuclear reactor Scientific American November 2005, a także w Świat nauki, grudzień 2005

¹⁵⁸ tamże

ziemi wcześniej niż za 20-100 tysięcy lat. Patrząc na próbki gazu wciąż tkwiące w minerałach w Oklo myślę, że można w to uwierzyć!

Trzeba zaś pamiętać, że odpady z elektrowni węglowych nie są zamykane ani izolowane trwale od otoczenia. Część z nich ulatnia się w postaci popiołu lotnego, który spada w otoczeniu elektrowni – nieraz sięgając na duże odległości od punktu emisji – przedostaje się do gleby i rozpuszcza się w wodzie pitnej, a część pozostaje na filtrach elektrostatycznych i jest usuwana razem z popiołem i żużlem na okoliczne pola i hałdy. Oddzielanie odpadów ciekłych od otoczenia wykonuje się tak, by przegrody wystarczyły na kilkadziesiąt lat – i społeczeństwo godzi się z tym, nie zdając sobie sprawy, że chociaż odpady radioaktywne mogą rozpadać się wolno, to jednak z czasem aktywność ich zanika do zera, natomiast toksyczność arsenu, kadmu, rtęci czy ołowiu pozostaje zawsze taka sama, przez tysiące i miliony lat.

Elektrownie węglowe emitują także odpady radioaktywne, które zawarte są w popiele węglowym (pozostałość po spalonym węglu). Odpady te nie są tak zabezpieczane jak odpady z elektrowni jądrowych. Promieniotwórczy popiół zwykle trafia na hałdy. Obecnie w Polsce pracuje kilkanaście elektrowni spalających węgiel – do tej pory chyba nikt nie żądał ich zlikwidowania z powodu „problemu odpadów radioaktywnych”. Dlaczego więc mielibyśmy obawiać się elektrowni jądrowych, które biorą pełną odpowiedzialność za swoje odpady, unieszkodliwiają je, zabezpieczają i trwale oddzielają od biosfery?

3.3.5. Na jak długo musimy zabezpieczyć odpady radioaktywne?

Aktywność odpadów radioaktywnych maleje z czasem, bo każdy rozpad radioaktywny oznacza, że pozostaje mniej o jeden atom substancji radioaktywnej.

Dominującym źródłem zagrożenia radiologicznego są odpady wysokoaktywne. Aby uzyskać punkt odniesienia do oceny zagrożenia warto sobie uzmysłowić, że do wytworzenia paliwa jądrowego potrzeba rudy uranowej, a owa ruda uranowa zawiera nie tylko uran naturalny ulegający powolnemu rozpadowi, ale i wszystkie izotopy pochodne, włącznie z radonem czy polonem, które też promieniają i oddziałują na organizm człowieka.

Aktywność odpadów maleje i z czasem potencjalne zagrożenie od nich jest mniejsze niż zagrożenie od pierwotnie wydobytej rudy uranowej. Tymczasem ruda jest wszędzie, również w miejscach wyłukiwanych przez wodę, którą pijemy, podczas gdy odpady są skutecznie odizolowane od człowieka. W rzeczywistości można oczekiwać, że odpady pozostaną izolowane na miejscu składowania na zawsze, tak jak pozostały na miejscu produkty rozszczepienia z naturalnych reaktorów w Oklo.

Promieniowanie z paliwa wypalonego emitowane jest przez produkty rozszczepienia jak cez czy stront, o średnim czasie rozpadu i dużym początkowym natężeniu promieniowania, przez pluton powstały w toku wypalania paliwa i przez aktynowce, takie jak ameryk (Am) lub kiur (Cm). Początkowo wielkość zagrożenia w cyklu jądrowym jest określona przez aktywność produktów rozszczepienia zarówno dla cyklu z przerobem paliwa (cyklu zamkniętego) jak i dla cyklu bez przerobu (cyklu otwartego). Jednakże aktywność produktów rozszczepienia spada szybciej niż aktywność aktynowców i po pewnym czasie aktynowce stają się dominującym źródłem promieniowania.

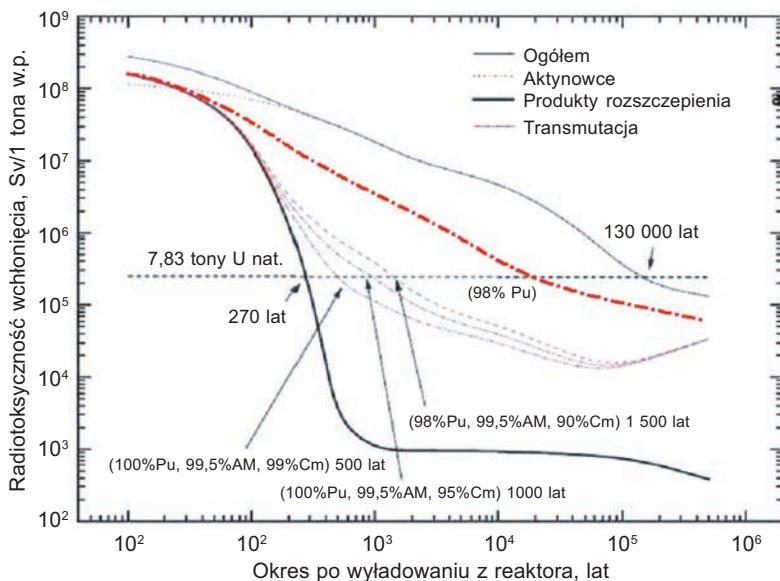
Krzywą zagrożenia radiacyjnego dla odpadów o wysokiej aktywności w cyklu zamkniętym (w którym uran i pluton są odzyskiwane dla powtórnego użycia w reaktorze) określono przyjmując pesymistycznie, że oddzielenie plutonu od odpadów nie będzie całkowite, lecz pewien procent plutonu i aktynowców pozostanie w odpadach. Okazuje się, że w zależności od efektywności procesu przerobu paliwa aktywność pozostałych odpadów spada poniżej aktywności rudy uranowej w czasie od 270 do 1500 lat po wypaleniu paliwa. Jeśli nie prowadzimy recyklicacji paliwa, lecz składujemy je razem z odpadami radioaktywnymi, to spadek zagrożenia jest dużo wolniejszy. Dlatego przerób paliwa jest opcją preferowaną przez energetykę jądrową zarówno z punktu widzenia wykorzystania energii uranu jak i ułatwienia zabezpieczania odpadów radioaktywnych. Jest to również zgodne z zasadą zrównoważonego rozwoju (sustainable development)¹⁵⁹.

Warto pamiętać o tych krzywych rozważając minimalny czas trwałości pojemnika dla odpadów wysokoaktywnych, przyjmowany jako równy 1000 lat. Oznacza to, że w ciągu pierwszego tysiąca lat nie ma przecieków z pojemnika na zewnątrz, tak że zagrożenie względne należy porównywać tylko dla czasów dłuższych niż 1000 lat. Nawet potem, jeżeli pojemnik ulegnie rozszczelnieniu, możliwe wycieki substancji radioaktywnych do wód podziemnych będą powolne, a ruch tych wód także jest bardzo wolny. Minie dalsze 20 000 – 100 000 lat zanim pierwsze przecieki substancji radioaktywnych rozpuszczonych w wodzie dotrą do wody pitnej¹⁶⁰.

Tak więc, nawet zakładając pełne rozpuszczenie odpadów promieniotwórczych w wodzie podziemnej, w chwili gdy owa woda z rozpuszczonymi w niej odpadami dotrze na powierzchnię ziemi, związane

¹⁵⁹ Rozwój zrównoważony, to jest taki rozwój, w którym potrzeby obecnego pokolenia mogą być zaspokojone bez umniejszania szans przyszłych pokoleń na ich zaspokojenie

¹⁶⁰ EXTERNE 1995: Externalities of Energy, Vol. 1-7, published by European Commission, Directorate General XII, Science Research and Development, EUR 16522, Luxembourg, 1995



Rys. 3.6. Wskaźnik radiotoksyczności przy wchłonięciu odpadów powstających przy wytworzeniu energii elektrycznej 1 GW-rok. (rysunek zaczerpnięty z pracy S. Chwaszczewskiego¹⁶¹ ze zgodą autora).

z tym zagrożenie będzie mniejsze niż zagrożenie związane z rudą uranową pierwotnie znajdującą się w ziemi. A przecież odpady radioaktywne są starannie składowane, tak że pozostają odseparowane od biosfery nie przez 270 lat, ale przez 20 000 lat i dłużej.

Nawet gdyby minimalne dawki promieniowania stwarzały zagrożenie nowotworowe – co bardzo wątpliwe – praca EJ nie powodowałaby wzrostu ogólnego zagrożenia radiacyjnego na Ziemi. Już w chwili, gdy wskaźnik zagrożenia dla odpadów wysoko aktywnych zmaleje do poziomu wskaźnika zagrożenia dla rudy, zagrożenie radiologiczne jest zmniejszone, ponieważ ruda jest rozproszona w otwartych obszarach, często w styku z wodami podziemnymi, podczas gdy odpady wysoko aktywne są składowane w stabilnych formacjach geologicznych i odseparowane od środowiska. W dalszych latach wskaźnik zagrożenia radiacyjnego dla odpadów jest mniejszy niż pierwotny wskaźnik zagrożenia dla rudy i w miarę upływu lat różnica między nimi stale rośnie.

Tak więc – wbrew popularnym opiniom – gdy rozpatrujemy skutki pracy elektrowni jądrowych w naprawdę długim okresie czasu okazuje

¹⁶¹ Chwaszczewski S.: Problem odpadów z elektrowni jądrowych – fakty i mity. Energetyka jądrowa w Polsce. Warszawa, 20.10.2008.

się, że praca EJ przyczynia się do zmniejszenia ogólnego tła promieniowania na Ziemi. Nie jest wcale pewne, czy powinniśmy do tego dążyć, bo wiele doświadczeń wykazało, że istniejące tło promieniowania jest niezbędne do życia organizmów żywych, ale przynajmniej można z całą pewnością stwierdzić, że praca EJ i składowanie odpadów promieniotwórczych NIE zwiększa średniego zagrożenia radiologicznego dla naszych prawnuków.

A dla pojedynczego człowieka, mieszkającego nad samym składowiskiem odpadów radioaktywnych? Jakie jest jego narażenie?

Można odpowiedzieć, że jest **pomijalnie małe**. Ale krytycy zarzucają nam, że lekceważymy to zagrożenie i życie ludzkie, że na przestrzeni tysięcy lat odpady spowodują jednak wiele zgonów. Czy to prawda?

Znamy na to odpowiedź, bo dociekliwi naukowcy prześledzili drogi uwalniania się produktów radioaktywnych i przebieg ich rozpadu. Okazuje się, że w perspektywie od zera do pół miliona lat (chyba dość długo?) największe dawki spowoduje wydzielanie Tc-99 i wchłanianie go z wodą pitną. Maksymalne moce dawki wystąpią po 300 000 lat i wyniosą 0,012 mikroSv/rok¹⁶². Z czym takie dawki można porównać?

Moc dawki rośnie ze wzrostem wysokości nad poziomem morza. Przyrost ten wynosi średnio 0,1 mikroSv/m/rok. Można argumentować, że na ogół człowiek nie boi się wejść na wzgórze, czy mieszkać na pierwszym piętrze, zamiast na parterze, ale może przykład dotyczący absolutnie każdego z nas – nawet mieszkającego jak najbliżej poziomu morza – będzie lepszą ilustracją „Problemu Zagrożenia Radiacyjnego od Małych Dawek”.

Czytelniku, czy śpisz na łóżku? Porównajmy spanie na łóżku, które ma średnio wysokość 40 cm. ze spaniem na materacu o wysokości np. 20 cm. Śpiąc na materacu zamiast na łóżku jest się niżej, więc moc dawki promieniowania jest mniejsza o 0,02 mikroSv/rok niż na łóżku. Jest to dwa razy więcej niż maksymalny przyrost dawki dla kogokolwiek powodowany przez odpady wysokoaktywne. A więc – bądźmy konsekwentni – skoro „zieloni” aktywiści grożą nam małymi dawkami promieniowania i zabraniają nam stosowania energii jądrowej „ze względów moralnych” to trzeba ze względów moralnych potępiać producentów łóżek znacznie bardziej niż inżynierów jądrowych!

A wózki dziecięce? Dzieci mogłyby chodzić na czworakach i spać leżąc wyłącznie na ziemi, a my je kładziemy do wózków! To przecież powoduje zwiększenie mocy dawki, i to na istoty najbardziej narażone, na nasze dzieci, bezbronne dzieci! Czy i w tym przypadku „zieloni”

¹⁶² patrz 160



Rys. 3.7. Czy spanie na łóżku jest też zagrożeniem radiacyjnym?

aktywiści zaatakują „praktykę powodującą wzrost mocy dawki promieniowania”?

Czy producenci łóżek i wózków dziecięcych są przestępcami, powodującymi setki zgonów w ciągu wieków? Czy też może powinniśmy nareszcie spojrzeć z właściwej perspektywy na minimalne wzrosty mocy dawki w różnych sytuacjach życiowych i uspokoić ludzi, by nie bali się składowania pod ziemią odpadów wysokoaktywnych? Tych odpadów na pewno nie boją się mieszkańcy kilkunastu gmin w Finlandii i Szwecji, które rywalizowały o zbudowanie składowiska wypalonego paliwa jądrowego na swoim terenie. Ostatecznie wygrały w obu państwach tylko pojedyncze gminy (bo planowane było tylko jedno składowisko na kraj) ale pokazuje to, że ludzie zaznajomieni z tematyką bezpieczeństwa odpadów nie boją się składowania ich u siebie, a nawet widzą w tym wielką szansę na rozwój lokalnej społeczności (firma zarządzająca takim składowiskiem odprowadza znaczne sumy do budżetu gminy z tytułu różnych podatków).

Faktem jest, że energetyka jądrowa jest gałęzią przemysłu, która bierze pełną odpowiedzialność za swoje odpady, składowuje je i zabezpiecza starannie na tysiąclecia. Zaczęliśmy nasze rozważania od koronnego zarzutu przeciwników energii jądrowej – od rzekomo nierozwiązywalnej sprawy odpadów radioaktywnych. Okazuje się, że przemysł jądrowy nie musi obawiać się tego pytania. Co więcej, jak wykazaliśmy powyżej, właśnie energetyka jądrowa daje przykład, jak troszczyć się o czystość środowiska i brać pełną odpowiedzialność za produkowane odpady. Można tylko życzyć sobie, by i inne gałęzie przemysłu podejmowały takie wysiłki i gwarantowały rozwiązanie techniczne równie bezpieczne dla środowiska.

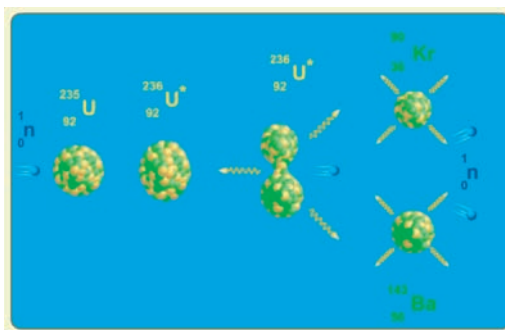
4. Czy mamy bać się awarii jądrowych?

Elektrownie jądrowe są „dobrymi sąsiadami”, zapewniają tanią energię elektryczną przy utrzymaniu czystego powietrza, wody i gleby – i oczywiście nie emitują CO_2 . Przez pół wieku pracy elektrowni jądrowych budowanych dla celów wyłącznie cywilnych – a więc z wyłączeniem Czarobyla – nie zdarzyła się w nich awaria radiacyjna, która spowodowałaby utratę życia albo zdrowia kogoś z personelu lub ludności. Więc chyba elektrownie jądrowe są bezpieczne? Udowodniły to przez prawie 13 000 reaktoro-lat¹⁶³ eksploatacji w 30 krajach... Ale przeciwnicy energetyki jądrowej straszą nas wciąż widmem wielkiej awarii. Jak jest naprawdę?

4.1. Jak nowoczesne elektrownie jądrowe zapobiegają awariom?

4.1.1. Źródła energii w elektrowni jądrowej

Energia, którą otrzymujemy z elektrowni jądrowej ma swe źródło w rozszczepieniu jądra uranu. W momencie rozszczepienia emitowane są dwa jądra lżejszych pierwiastków, zwanych produktami rozszczepienia – na przykład ksenonu i strontu, a także dwa lub trzy neutrony i promieniowanie gamma. Łączna energia wydzielana przy rozszczepieniu wynosi około 200 milionów elektronowoltów (200 MeV)¹⁶⁴. Jak możemy wykorzystać tę energię?



Rys. 4.1. Schemat reakcji rozszczepienia uranu U-235 Rysunek zaczerpnięty z wykładu prof. L. Dobrzyńskiego za zgodą autora¹⁶⁵

¹⁶³ reaktoro-rok to rok eksploatacji jednego reaktora. Jeśli 400 reaktorów pracuje przez 10 lat każdy, to łącznie daje to doświadczenie równe 4000 reaktoro-lat.

¹⁶⁴ Elektronowolt to energia potrzebna do przesunięcia 1 elektronu w polu elektrycznym o różnicę napięcia równą 1 Volt.

¹⁶⁵ Dobrzyński L.: Podstawowe rodzaje reaktorów jądrowych, w cyklu wykładów Energia jądrowa i jej wykorzystanie, L. Dobrzyński, A. Strupczewski, Uniw. Im. Kardynała S. Wyszyńskiego, 2006/2007.

Jądra produktów rozszczepienia oddalają się od siebie z ogromną prędkością, a energia ich wynosi łącznie około 160 MeV. Uderzają one o jądra innych pierwiastków znajdujących się w paliwie jądrowym i oddają im swoją energię kinetyczną, pobudzając je do ruchu, czyli powodując grzanie materiału paliwowego. Przy dużych gęstościach rozszczepień typowych dla reaktorów jądrowych w nowoczesnych EJ grzanie to jest bardzo intensywne i wynosi od 300 do 500 W na każdy centymetr długości pręta paliwowego.

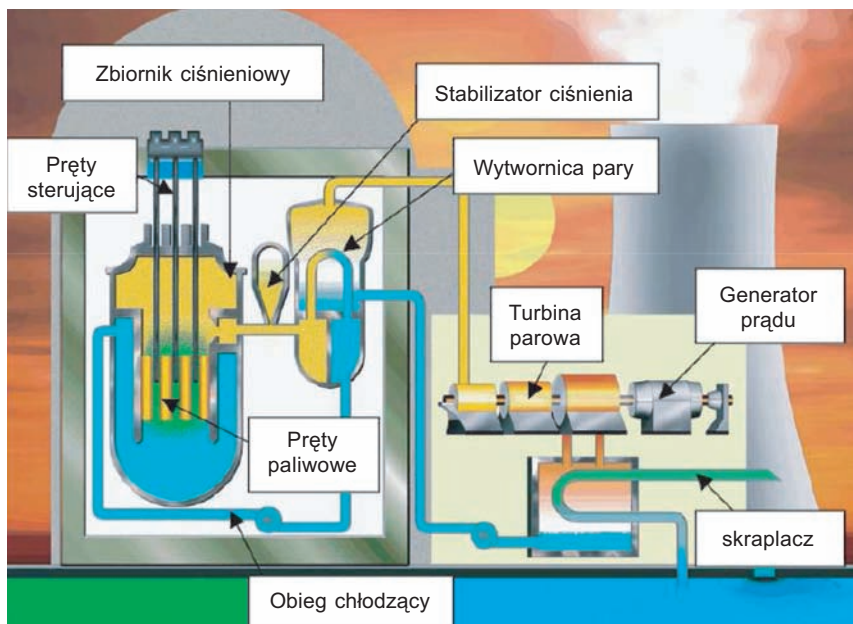
Wydzielone przy tym ciepło przewodzone jest przez paliwo, uformowane w pastylki paliwowe, do otaczającej je osłony (koszulki) mającej postać rury. Stamtąd odbiera je woda chłodząca.

Neutrony uwolnione wskutek rozszczepienia jądra uranu mogą następnie rozszczepiać kolejne jądra uranu. Taki proces nazywamy reakcją łańcuchową, ponieważ jedno rozszczepienie powoduje kolejne. W reaktorze proces ten jest kontrolowany za pomocą prętów z materiałami silnie pochłaniającymi neutrony – utrzymuje się „w ruchu” tylko taką liczbę neutronów, która umożliwi podtrzymanie reakcji łańcuchowej ale jednocześnie jest za mała by spowodować rozszczepienia w tempie lawinowym (a ten z kolei proces wykorzystuje się w broni jądrowej). Dlatego reaktor nie może wybuchnąć jak bomba jądrowa – jest to fizycznie niemożliwe.

Trzeba wspomnieć o jeszcze jednym elemencie, bez którego nie moglibyśmy rozszczepiać jąder uranu – moderatorze. Moderator w reaktorze to substancja, która mocno wyhamowuje neutrony (które po emisji przy rozszczepieniu jądra uranu pędzą z ogromną prędkością). Zbyt szybko pędzący neutron nie mógłby rozszczepić jądra uranu – po prostu przeleciałby przez nie „*nawet się nie oglądając*” (jak stwierdził jeden ze znanych fizyków). Jeśli go spowolnimy za pomocą moderatora, to będzie dłużej oddziaływał na jądro przebywając w nim w czasie „przelotu” a to już wystarczy do rozszczepienia jądra. Moderatorem w większości reaktorów stosowanych w elektrowniach jądrowych jest zwykła woda destylowana (jest ona jednocześnie chłodziwem).

4.1.2. Układy odbioru ciepła w typowym reaktorze

Zestawy prętów paliwowych tworzą łącznie rdzeń reaktora, którego moc dla dużych elektrowni sięga 3500 MW cieplnych a w jednym z reaktorów najnowszej generacji – EPR, moc cieplna przekracza nawet 4500 MW. Podgrzana w rdzeniu reaktora woda przepływa do wytwornic pary, gdzie oddaje ciepło wodzie obiegu wtórnego, utrzymywanej pod niższym ciśnieniem niż woda w obiegu pierwotnym. Woda obiegu wtórnego zamienia się w parę, która płynie do turbiny, napędzającej wał generatora (działa to na takiej samej zasadzie jak dynamo w rowerze,



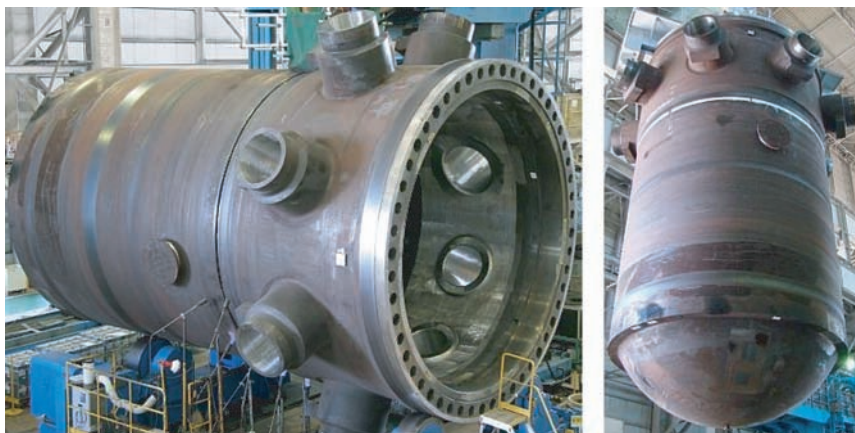
Rys. 4.2. Schemat elektrowni jądrowej z reaktorem z wodą pod ciśnieniem (zaczerpnięty z wykładu prof. L. Dobrzyńskiego¹⁶⁶)

z tą różnicą że tu w energię elektryczną zamieniana jest energia ruchu obrotowego turbiny a w rowerze energia ruchu koła). W ten sposób energia odrzutu produktów rozszczepienia zostaje wykorzystana do wytwarzania prądu elektrycznego.

Na rys. 4.2 pokazano jak zbudowana jest elektrownia jądrowa z reaktorem z wodą pod ciśnieniem, zwanym w skrócie reaktorem PWR od angielskiej nazwy *pressurized water reactor*. Charakterystyczną cechą reaktorów PWR jest to, że woda odbierająca ciepło z rdzenia jest zamknięta w tzw. obiegu pierwotnym (czyli systemie rur tworzących zamkniętą pętlę), wykonanym z wielkimi zapasami bezpieczeństwa i najwyższą starannością, którego stan sprawdza się w ciągu całego okresu życia elektrowni by zapewnić, że nie będzie zeń żadnych przecieków. Cały ten obieg znajduje się wewnątrz potężnej żelbetonowej obudowy bezpieczeństwa (w kształcie kuli lub cylindra), chroniącej przed wydostaniem się na zewnątrz jakichkolwiek substancji radioaktywnych.

¹⁶⁶ Dobrzyński L.: Podstawowe rodzaje reaktorów jądrowych, w cyklu wykładów *Energia jądrowa i jej wykorzystanie*, L. Dobrzyński, A. Strupczewski, Uniw. Im. Kardynała S. Wyszyńskiego, 2006/2007.

Aby maksymalnie zwiększyć sprawność turbiny parowej, w obiegu wtórnym bloku energetycznego z reaktorem PWR dążymy do uzyskania możliwie wysokiej temperatury i ciśnienia. Wobec tego, że przejmuje on ciepło od obiegu pierwotnego, parametry obiegu pierwotnego muszą być odpowiednio wyższe. Na wyjściu z rdzenia reaktora temperatura wody dochodzi do 330°C. Aby przy tej temperaturze woda nie wrzała (przypomnijmy, że temperatura wrzenia wody przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym to 100°C), trzeba utrzymać w obiegu pierwotnym odpowiednio duże ciśnienie – rzędu 15-16 MPa (czyli 150-160 razy większe niż ciśnienie atmosferyczne). Takie ciśnienie i temperaturę musi wytrzymać cały obieg pierwotny – w tym i zbiornik ciśnieniowy reaktora¹⁶⁷.



Rys. 4.3. Zbiornik ciśnieniowy reaktora EPR tuż po wyprodukowaniu (widoczny bez pokrywy). (fot. Areva, źródło: www.tvo.fi)

Do regulacji ciśnienia w obiegu pierwotnym służy stabilizator ciśnienia.¹⁶⁸ Dolną część jego objętości wypełnia woda, górną – para. Jeśli ciśnienie wody w obiegu spada, włączamy grzałki elektryczne, które podgrzewają wodę w stabilizatorze. Powstaje więc w nim więcej pary, która zwiększa ciśnienie w obiegu wody. Na odwrót, jeśli ciśnienie w tym obiegu jest zbyt duże, to wtryskuje się do stabilizatora chłodniejszą wodę, która skraplając parę w jego górnej części obniża ciśnienie.

¹⁶⁷ Zbiornik, w którym znajduje się rdzeń reaktora i przez który przepływa woda chłodząca pod ciśnieniem.

¹⁶⁸ Zbiornik wypełniony wodą i parą wodną, służący do utrzymania stałego ciśnienia w obiegu. Sposób działania opisano w tekście.

Jeśli jednak to nie wystarczy i ciśnienie dalej rośnie, wówczas otwiera się w stabilizatorze ciśnienia zawór, którym wypuszcza się nadmiar pary. Ta przyływa do zbiornika zrzutowego¹⁶⁹ zamieniając się po drodze w wodę.

Typowa średnica rdzenia reaktora, którego moc cieplna wynosi ok. 3500 MW, to 4 m, wysokość zaś to około 3,5 m. Zbiornik ciśnieniowy reaktora, wykonany z grubej (około 30 cm) stali, ma średnicę 4,5-5 m i wysokość 12-15 m.

Paliwo reaktora PWR jest z reguły wykonane w postaci pastylek z dwutlenku uranu (UO_2), zamkniętych w koszulce ze stopu cyrkonu, materiału o wysokiej wytrzymałości i małym pochłanianiu neutronów. Aby zapewnić dobre warunki chłodzenia, pręty paliwowe mają niewielką średnicę ok. 10 mm. Wewnątrz rdzenia wydzielą się energia o gęstości rzędu 100 kW/dm³.

4.1.3. Układy regulacji mocy reaktora

Do sterowania mocą reaktora służą pręty regulacyjne i układ regulacji borowej. Pręty regulacyjne to pręty wykonane z dodatkiem materiału silnie pochłaniającego neutrony, takiego jak kadm czy bor. Po wsunięciu tych prętów do rdzenia wychwytyują one neutrony, wskutek czego mniej neutronów trafia do paliwa, gęstość rozszczepień maleje i moc reaktora spada. Gdy chcemy podnieść moc reaktora, wyciągamy pręty pochłaniające w górę, pochłanianie neutronów maleje, więcej ich trafia do paliwa i gęstość rozszczepień rośnie.

Układ regulacji borowej to układ do kompensacji (wyrównywania) długoterminowych zmian w rdzeniu. Oto gdy zachodzą reakcje rozszczepienia jądra uranu znikają, a na ich miejsce pojawiają się produkty rozszczepienia (czyli lżejsze pierwiastki np. wspomniane wcześniej ksenon i stront), a niektóre z nich powodują znaczne pochłanianie neutronów. Nazywamy je truciznami reaktorowymi. Aby utrzymać reaktor w ruchu (tj. podtrzymać reakcję łańcuchową) należałoby doładowywać paliwo i usuwać trucizny. Ale przestoje reaktora powodują jego gorsze wykorzystanie, chcemy więc by pracował on jak najdłużej bez wymiany paliwa.

Dlatego w początkowym okresie ładujemy do rdzenia więcej paliwa, niż byłoby potrzeba do utrzymania go w ruchu. Nadmiar neutronów można usunąć przez wprowadzenie prętów regulacyjnych do rdzenia, ale wymagałoby to bardzo wielu prętów. Wygodniej jest usuwać neutrony przez wprowadzenie materiału pochłaniającego rozpuszczonego w wodzie chłodzącej reaktor.

¹⁶⁹ Zbiornik do którego wypływa skroplona para, jeśli dla zmniejszenia ciśnienia usuniemy część pary ze stabilizatora.

W reaktorach wodno-ciśnieniowych problem nadmiaru neutronów rozwiązano przez wprowadzenie do chłodziwa reaktora kwasu borowego. Pochłania on skutecznie neutrony, a jego stężenie możemy regulować. W miarę wypalania paliwa (czyli zmniejszania się w nim ilości uranu na skutek kolejnych rozszczepień) zmniejszamy stężenie kwasu borowego i na końcu kampanii paliwowej (czyli okresu pracy reaktora między kolejnymi wymianami paliwa, zwykle trwa on 12-18 miesięcy) stężenie tego kwasu jest bliskie zeru.

Poza umożliwieniem długotrwałej pracy reaktora, taki układ z ciekłym pochłaniaczem (nadmiaru) neutronów ma jeszcze dodatkową zaletę z punktu widzenia bezpieczeństwa. Oto w razie awarii, gdy chcemy szybko wyłączyć reaktor, dysponujemy dwoma niezależnymi układami do tego celu: Jeden to układ prętów pochłaniających, zwanych prętami bezpieczeństwa, które można szybko wrzucić do rdzenia, drugi to właśnie ten układ z ciekłym pochłaniaczem borowym.

4.1.4. Źródła zagrożenia w elektrowni jądrowej

Jądra produktów rozszczepienia mają dużą energię kinetyczną i, jak pisałem powyżej, są głównym źródłem ciepła wykorzystywanego w reaktorze. Jednakże nawet po zahamowaniu ich ruchu i oddaniu tego ciepła, w dalszym ciągu emitują one energię wskutek rozpadów promieniotwórczych, przy których wydzielają się promieniowanie alfa, beta i gamma. Jest to przyczyną tzw. grzania powyłączeniowego, które trwa nadal w paliwie nawet, gdy reaktor zostanie wyłączony i ustanie łańcuchowa reakcja rozszczepienia. Grzanie powyłączeniowe jest dużo mniejsze niż grzanie wskutek energii rozszczepienia, ale nawet ta energia rozpadu musi być odbierana od paliwa, jeśli ma ono być chronione przed przegrzaniem i stopieniem.

Wobec tego, że awarie łączą się zwykle z zakłóceniami w przepływie wody chłodzącej, a więc ze zmniejszonym odbiorem ciepła od paliwa, w razie awarii trzeba przede wszystkim przerwać reakcję rozszczepienia, by zmniejszyć intensywność wydzielania energii i ułatwić odbiór ciepła od rdzenia. Zadanie to spełnia układ prętów silnie pochłaniających neutrony, to jest wspomnianych powyżej prętów regulacyjnych, a w razie gdy chcemy wyłączyć reaktor bardzo szybko, do rdzenia wprowadzamy dodatkowe pręty pochłaniające zwane prętami bezpieczeństwa. Wychwytyują one neutrony, zapobiegając w ten sposób ich zderzeniom z jądrami uranu i wygaszając reakcję łańcuchową. W reaktorach z moderatorem wodnym istnieje ponadto sprzężenie zwrotne (czyli wzajemna zależność, omówimy ją w dalszych rozdziałach), zapewniające obniżenie mocy reaktora, gdy tylko wystąpi podgrzew wody. Sprzężenia tego nie ma w reaktorach RBMK, które pracowały w kilku

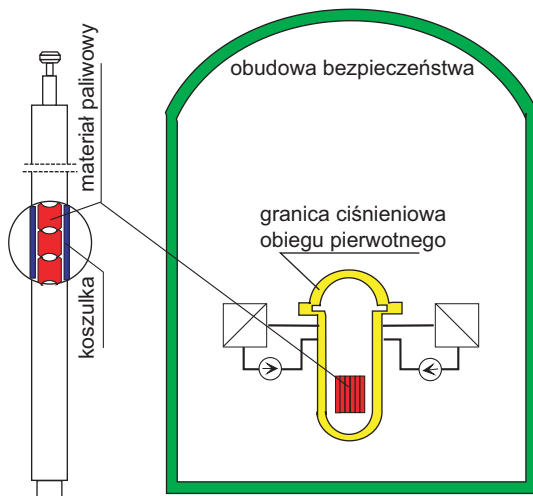
elektrowniach jądrowych w dawnym ZSRR, w tym także i w Czarnobylu. Było to zasadniczą przyczyną awarii czarnobylskiej, którą będziemy szczegółowo omawiać w następnym rozdziale. Tymczasem ograniczymy się do stwierdzenia, że w elektrowniach jądrowych (EJ) z reaktorami wodnymi stosunkowo łatwo można spełnić wymaganie wyłączenia reaktora w razie awarii. Natomiast problemem w reaktorach wszystkich typów jest zapewnienie niezawodnego odbioru ciepła od rdzenia już po wyłączeniu reaktora. Niezawodnego - bo układy bezpieczeństwa reaktora muszą zapewnić, że rdzeń będzie zalany wodą i chłodzony pomimo wszelkich możliwych awarii, np. mimo braku zasilania elektrycznego z zewnątrz, uszkodzeń pomp, a nawet mimo możliwego rozerwania obiegu pierwotnego i utraty wody chłodzącej z reaktora.

Co stanie się przy braku chłodzenia? Czy nastąpi wybuch jak w bombie atomowej? Nie, jak wspomniałem wcześniej do wybuchu jądrowego dojść nie może, ale w razie braku odbioru ciepła paliwo może ulec przegrzaniu i uszkodzeniu, a zawarte w nim produkty rozszczepienia wydzielą się poza koszulki paliwowe do chłodziwa.

4.1.5. Bariery powstrzymujące uwalnianie substancji promieniotwórczych

W EJ istnieje układ kolejnych barier – materiał pastylek paliwowych, koszulki paliwowe, granica ciśnieniowa obiegu pierwotnego, obudowa bezpieczeństwa – powstrzymujących wydzielanie produktów rozszczepienia z rdzenia do środowiska. Awarie powodujące tylko przegrzanie paliwa bez uszkodzenia obiegu pierwotnego – np. na skutek utraty przepływu chłodziwa - powodują zniszczenie pierwszych dwóch barier, ale bariera trzecia i czwarta pozostają nienaruszone.

Najgroźniejsze są awarie z rozerwaniem obiegu pierwotnego, bo oznaczają one natychmiastową utratę trzeciej bariery i gwałtowny wypływ wody z obiegu. Woda pod ciśnieniem 15 MPa i o temperaturze około 330°C po rozszczelnieniu obiegu gwałtownie rozpręży się do ciśnienia atmosferycznego i ulega odparowaniu. Prowadzi to do szybkiego opróżnienia obiegu pierwotnego a w szczególności do osuszenia rdzenia reaktora, w którym proces odparowywania wody jest najbardziej intensywny. Jeśli nie dostarczymy wody do rdzenia, nastąpi stopienie paliwa i otaczającej je koszulki, a więc utrata dwóch pierwszych barier. Jedyną ochroną pozostaje wówczas obudowa bezpieczeństwa. Dlatego projektanci reaktorów zapewniają wysokie zapasy bezpieczeństwa w projekcie obiegu pierwotnego i wykluczają wszelkie przewidywalne przyczyny jego uszkodzenia, a operatorzy kontrolują, czy nie uległ on osłabieniu w toku eksploatacji. Jednocześnie wyposaża się EJ w układy bezpieczeństwa mające z najwyższą niezawodnością zapewnić dostar-



Rys. 4.4. Układ czterech kolejnych barier powstrzymujących ucieczkę produktów rozszczepienia z elektrowni jądrowej

czenie wody do rdzenia nawet w mało prawdopodobnym przypadku rozerwania obiegu pierwotnego.

Wymagana niezawodność jest bardzo wysoka – uszkodzenie rdzenia powinno zdarzać się nie częściej niż raz na 100 tysięcy lat pracy reaktora (nowoczesne reaktory pracują 60 lat). Jednego reaktora – a przy jednoczesnej pracy 5000 reaktorów raz na 200 lat. Dwa wieki historii – pomyślimy ile w tym czasie zdarzyło się wojen, zniszczeń miast i wsi, trzęsień ziemi, huraganów, epidemii... A reaktory projektowane są tak, by uszkodzenie rdzenia wcale nie powodowało zgonów ludzi.

4.2. Zasady bezpieczeństwa jądrowego

Już od samego początku istnienia elektrowni jądrowych zdawano sobie sprawę z potencjalnych zagrożeń i podejmowano działania dla ochrony personelu i społeczeństwa przed skutkami możliwych awarii. Jako podstawowe założenie przyjęto, że ryzyko związane z energetyką jądrową powinno być mniejsze niż ryzyko związane z innymi metodami wytwarzania energii elektrycznej. Odstępstwo od tej zasady zdarzyło się, gdy w Związku Radzieckim zbudowano elektrownie jądrowe typu RBMK, bazowane na reaktorach przeznaczonych do celów wojskowych i charakteryzujące się wrodzonymi dodatkami sprzężeniami zwrotnymi, prowadzącymi do wzrostu ich mocy w sytuacjach awaryjnych (czyli moc reaktora gwałtownie rosła w sytuacji, kiedy zaczynała brakować wody).

Twórcy tych elektrowni przerzucili na operatora odpowiedzialność za ich bezpieczeństwo, ale awaria w Czarnobylu udowodniła, że rozwiązanie takie jest nie do przyjęcia. Jedyną możliwą drogą dalszego rozwoju elektrowni jądrowych jest przyjęcie zasad filozofii bezpieczeństwa jądrowego, zapoczątkowanej w USA przed 50 laty i stale doskonalonej w krajach zachodnich budujących energetykę jądrową.

4.2.1. Zasady ogólne

Zasady bezpieczeństwa dla elektrowni jądrowych w części dotyczącej projektowania i budowy można podsumować następująco:

- Projekt ma zapewnić, że instalacja jądrowa nadaje się do niezawodnej, stałej i łatwej eksploatacji, przy czym **nadrzędnym celem jest zapobieganie wypadkom**. Wcieleniem tej zasady jest reguła wpajana wszystkim pracownikom, mówiąca że *bezpieczeństwo jest ważniejsze niż produkcja* (energii elektrycznej).
- W projekcie trzeba stosować **zasadę głębokiej obrony** (omówimy ją w dalszej części tekstu), z szeregiem poziomów obrony i z wielokrotnymi barierami zabezpieczającymi przed uwalnianiem materiałów radioaktywnych. Trzeba też tak projektować instalację, by prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzeń lub kombinacji uszkodzeń mogących prowadzić do poważnych konsekwencji było bardzo małe.
- Rozwiązania techniczne stosowane w projekcie winny być uprzednio **sprawdzone w pracy** innych obiektów **lub poprzez doświadczenia**.
- Na wszystkich etapach projektowania i przygotowania eksploatacji trzeba **uwzględniać problemy współpracy człowieka z maszyną i możliwość błędu człowieka**.
- Projekt musi zapewnić, że **narażenie na promieniowanie** personelu instalacji i możliwość uwolnienia materiałów radioaktywnych do otoczenia są **tak małe jak jest to rozsądnie osiągalne**.
- Zanim właściciel elektrowni złoży wniosek o dopuszczenie do budowy instalacji, należy **przeprowadzić pełną analizę bezpieczeństwa elektrowni i jej niezależną weryfikację** by upewnić się, że projekt instalacji spełni wymagania bezpieczeństwa.

4.2.2. Zasada głębokiej obrony.

Zasadą głębokiej obrony jest zapewnienie kompensacji możliwych awarii urządzeń i błędów ludzkich. Przy tworzeniu systemu głębokiej obrony uznaje się, że nie można w pełni ufać żadnemu pojedynczemu elementowi wynikającemu z projektu, konserwacji lub eksploatacji elektrowni jądrowej (czyli na przykład nie możemy w pełni polegać na pompach, licząc na ich bezawaryjną pracę w każdym momencie – przyjmujemy,

że mogą one ulec awarii akurat wtedy, gdy będą nam najbardziej potrzebne). Głęboka obrona zapewnia rezerwowanie układów z „aktywnymi” systemami bezpieczeństwa (czyli działającymi z pomocą zewnętrznego zasilania lub na polecenie operatorów), tak by w razie uszkodzenia jednego podukładu istniały inne, mogące go zastąpić.

Naturalne cechy bezpieczeństwa EJ i ich układy bezpieczeństwa przeznaczone do powstrzymania rozwoju awarii są stale doskonalone i reaktory budowane w kolejnych dziesięcioleciach były coraz bezpieczniejsze. Obecnie duży nacisk kładzie się na takie projektowanie reaktorów, by miały one wbudowane cechy bezpieczeństwa oparte na działaniu zjawisk naturalnych, takich jak siła ciężkości czy prawa konwekcji naturalnej. Przykłady takich środków bezpieczeństwa przedstawione są poniżej.

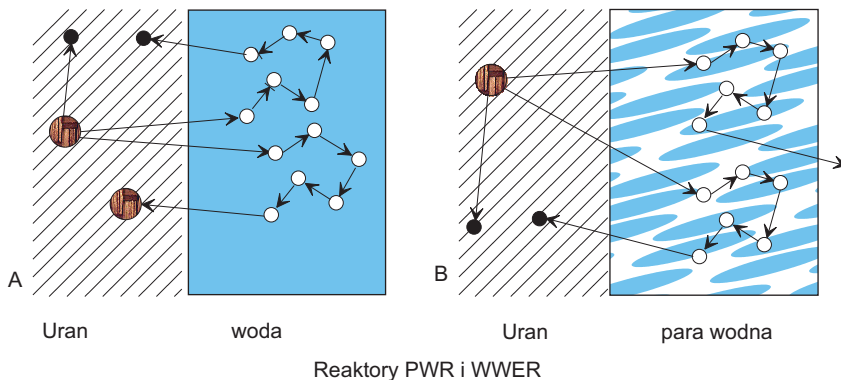
4.3. Konstrukcja EJ zapewniająca bezpieczeństwo jądrowe

4.3.1. Naturalne sprzężenie zwrotne regulujące moc reaktora

Projekt elektrowni jądrowej obejmuje szereg cech i układów opartych na wykorzystaniu praw natury, takich jak siła ciężkości, które spełniają swe funkcje samorzutnie, bez doprowadzenia energii z zewnątrz (tzw. układy pasywne). Najważniejszą z nich jest stabilność wewnętrzna reaktorów chłodzonych i moderowanych wodą, dominujących obecnie w energetyce jądrowej na całym świecie. Stabilność tę zawdzięczamy temu, że powstające po rozszczepieniu neutrony poruszają się z ogromnymi prędkościami (neutrony prędkie), a do wydajnego rozszczepienia uranu potrzebne są neutrony poruszające się powoli, tzw. neutrony termiczne (o czym wspominałem nieco wcześniej, przy okazji omawiania reakcji rozszczepienia).

Do spowolnienia neutronów wykorzystujemy w tego typu reaktorach wodę, która w technice reaktorowej nazywana jest „moderatorem”. Zderzając się z jądrami wodoru neutrony prędkie tracą swą energię kinetyczną i po wielu zderzeniach stają się neutronami termicznymi. Im więcej jest wody, tym szybciej neutrony spowalniają się i stają się zdolne do wywołania rozszczepienia jąder uranu. Jednakże z drugiej strony pewna mała część neutronów przy zderzeniu z wodorem ulega pochłanianiu, więc wody w reaktorze nie może być za dużo.

Dlatego ilości wody i paliwa są starannie obliczane i dobierane tak, by przy normalnej temperaturze pracy zapewniały one najbardziej skuteczne spowalnianie neutronów i najwyższą wydajność reakcji rozszczepienia. Gdy skutek podgrzania wody lub jej odparowania ilość wody w rdzeniu zmaleje, neutrony będą gorzej spowalniane i zamiast uderzać w jądra uranu, będą wydostawały się poza rdzeń ulegając pochłanianiu

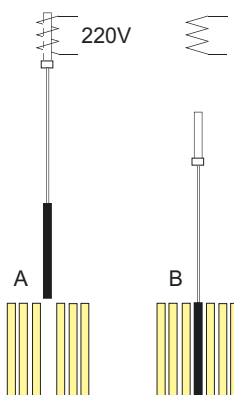


Rys. 4.5. Zmiany w spowalnianiu neutronów po częściowym odparowaniu wody w reaktorze PWR

w otaczających go materiałach konstrukcyjnych, jak pokazano na rys. 4.5. Spowoduje to zmniejszenie liczby rozszczepień w rdzeniu i samorzutne wygaszenie reakcji łańcuchowej rozszczepienia. Jest to bardzo ważna cecha zapewniająca stabilność pracy reaktorów PWR. Tej stabilności brakowało reaktorowi w Czarnobylu.

4.3.2. Układ wyłączenia reaktora oparty na działaniu siły ciężenia

Następnym elementem opartym na działaniu sił przyrody jest układ wyłączania reaktora. Jego elementami wykonawczymi są pręty pochłaniające neutrony.



Rys. 4.6. Przykład wykorzystania sił naturalnych – układ wyłączania awaryjnego reaktora. A – normalne położenie prętów nad rdzeniem podczas pracy reaktora, B – awaryjny zanik napięcia na cewce elektromagnesu – pręty bezpieczeństwa spadają do rdzenia i gaszą reakcję łańcuchową.

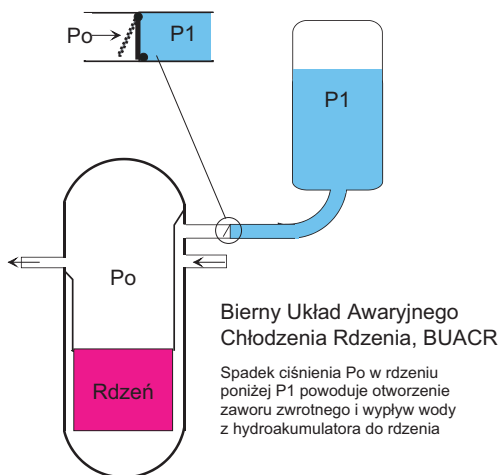
W czasie normalnej pracy reaktora wiszą one nad rdzeniem i są utrzymywane w górnym położeniu przez elektromagnesy (rys. 4.6). Gdy tylko wystąpi zanik zasilania elektrycznego, lub układ zabezpieczeń przekaże sygnał awarii, napięcie w elektromagnesach zniknie i pręty samoczynnie spadną do rdzenia pod działaniem siły ciężkości, wyłączając reaktor.

4.3.3. Zalanie rdzenia wodą chłodzącą w przypadku rozerwania obiegu pierwotnego

W razie awarii rozerwania obiegu pierwotnego woda chłodząca wypływa z rur obiegu i nie trafia do rdzenia reaktora, co powoduje jego osuszenie. Gdyby pręty paliwowe pozostały bez chłodzenia, temperatura paliwa wzrosłaby i paliwo uległoby stopieniu. Dlatego po wyłączeniu reaktora pierwszym zadaniem układów bezpieczeństwa jest wtrysknięcie do reaktora wody chłodzącej tak, by rdzeń pozostał pod powierzchnią wody.

W obecnie pracujących reaktorach standardowo znajdują się aktywne i pasywne (czyli bierne, nie wymagające ingerencji człowieka i działające samoczynnie bez zewnętrznych źródeł zasilania) układy awaryjnego chłodzenia rdzenia (UACR).

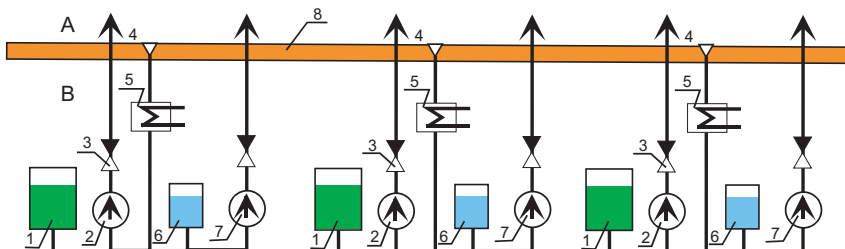
Przykład układu pasywnego z hydroakumulatorami pokazany jest na rys. 4.6



Rys. 4.7. Układ zalewania rdzenia wykorzystujący różnice ciśnień.

Działanie oparte na naturalnych prawach fizyki. Zbiorniki hydroakumulatorów pod ciśnieniem P_1 są odcięte od rdzenia zaworem zwrotnym, który jest zamknięty tak długo, jak długo ciśnienie w obiegu pierwotnym P_o jest wyższe od ciśnienia P_1 . Gdy wskutek awarii ciśnienie w obiegu pierwotnym spadnie, zawory zwrotne otworzą się i woda z hydroakumulatorów popłynie do rdzenia. Zalanie rdzenia wodą z hydroakumulatorów nie wymaga żadnych dodatkowych źródeł energii, dlatego układ ten nazywa się pasywnym układem bezpieczeństwa.

Układy aktywne zawierają trzy lub cztery równoległe podukłady ze zbiornikami chłodziwa, pompami i zaworami, zaprojektowane tak by tylko jeden z kilku równoległe pracujących podukładów wystarczał do zalania rdzenia wodą i skutecznego chłodzenia.



Rys. 4.8. Ilustracja rezerwowania z nadmiarem układów bezpieczeństwa, pokazana na przykładzie aktywnego układu awaryjnego chłodzenia rdzenia (UACR).

A – obszar wewnątrz obudowy bezpieczeństwa, B – obszar poza obudową bezpieczeństwa, 1 – zbiornik UACR, 2 – pompa niskociśnieniowa UACR, 3 – zawór zwrotny, 4 – miska ściekowa, 5 – wymiennik ciepła, w którym ciepło powyłłączeniowe przejmowane przez UACR jest przekazywane do układu wody technicznej, 6 – zbiornik UACR o wysokim stężeniu kwasu borowego, 7 – pompa wysokociśnieniowa UACR, 8 – ściana obudowy bezpieczeństwa.

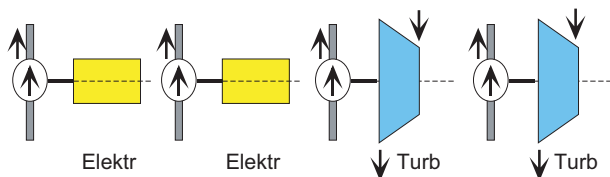
Na rys. 4.8 przedstawiono układ awaryjnego chłodzenia rdzenia (UACR) w EJ z reaktorem z wodą pod ciśnieniem. Są w nim równoległe trzy podsystemy, podczas gdy jeden z nich wystarcza do wypełnienia wszystkich zadań systemu. Pozostałe dwa podsystemy stanowią rezerwę. W nowoczesnych reaktorach z czterema podsystemami równoległymi można w czasie pracy reaktora prowadzić prace remontowe w jednym z podukładów, a z pozostałych trzech jeden wystarcza do zapewnienia bezpieczeństwa reaktora.

Dla zwiększenia niezawodności, układy bezpieczeństwa projektuje się w miarę możliwości tak, aby w razie awarii przyjmowały położenie bezpieczne (np. utrata zasilania elektrycznego powoduje zrzut prętów pochłaniających neutrony do rdzenia reaktora).

4.3.4. Różnorodność układów

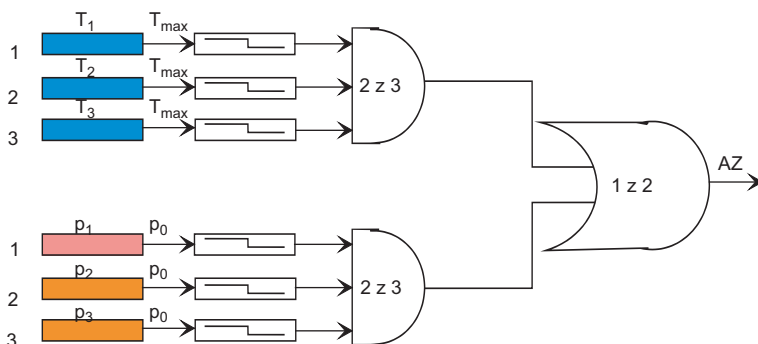
Istnienie dwóch lub więcej elementów zapewniających wzajemne rezerwowanie zabezpiecza przed pojedynczą awarią jednego z tych elementów, ale nie daje gwarancji, że cały układ nie zawiedzie z powodu wspólnej przyczyny, nieznannej w chwili projektowania reaktora albo uznanej za nieprawdopodobną. Aby uchronić się przed utratą funkcji bezpieczeństwa z powodu wspólnej przyczyny, wzajemnie się rezerwu-

jące podukłady systemów bezpieczeństwa są, o ile to możliwe, wykonywane z różnych elementów, tak by jedna przyczyna awarii nie spowodowała jednoczesnej utraty wszystkich podsystemów bezpieczeństwa. Przykład takiego układu służącego do napędu pomp wody zasilającej wytwornice pary po stronie obiegu wtórnego pokazany jest na rys. 4.9.



Rys. 4.9. Przykład różnorodnego napędu pomp awaryjnego układu zasilania wytwornic pary. Dwie pompy są napędzane silnikami elektrycznymi, a dwie turbinami parowymi

Innym przykładem jest układ zabezpieczeń reaktora, pokazany na rys. 4.10. Wyłączenie reaktora następuje, gdy temperatura w obiegu pierwotnym przekroczy wartość dopuszczalną $T_{\max}$. Aby nie powodować wyłączenia reaktora przy każdym uszkodzeniu miernika temperatury przyjęto, że mierzy się sygnały z trzech mierników i gdy dwa z nich pokażą przekroczenie, układ zabezpieczeń przekazuje sygnał wyłączenia reaktora. Jest to tzw. zasada „dwa z trzech” lub w skrócie „głosowanie 2/3”. Aby jednak chronić się przed możliwością błędu wskazań temperatury, powodowanego jakąś nieznaną w chwili pro-



Rys 4.10. Układ zabezpieczeń reaktora jest zbudowany na zasadzie redundancji i głosowania 2/3, oraz różnorodności polegającej na tym, że zarówno sygnały ciśnienia P jak i temperatury T powodują wytworzenie sygnału awaryjnego wyłączenia reaktora.

T_1, T_2, T_3 – temperatury chłodziwa, p_1, p_2, p_3 – ciśnienie w stabilizatorze, $T_{\max}, p_0$ wartości progowe, AZ – sygnał awaryjnego wyłączenia reaktora

jektowania przyczyną, równolegle podłączony jest układ pomiarów ciśnienia, również działający na zasadzie „dwa z trzech”. Wskazania przekroczenia temperatury lub ciśnienia wystarczają do wyłączenia reaktora. W ten sposób zapewniona jest różnorodność w układzie. Nawet, jeśli skutek jakiejś przyczyny wszystkie pomiary temperatury zawiodą, przyczyna ta nie może spowodować jednocześnie błędnych wskazań ciśnienia, opartych na zupełnie innej zasadzie pomiarowej. Zabezpiecza to przed uszkodzeniem kilku układów naraz spowodowanym wspólną przyczyną.

Dzięki zasadzie różnorodności operatorzy mają bardzo dużą pewność, że sygnały, które do nich docierają z urządzeń pomiarowych, odzwierciedlają rzeczywistość, a nie są pomyłką czy błędem aparatury.

4.3.5. Rozdzielenie przestrzenne układów

Układy bezpieczeństwa są rozdzielone przestrzennie (np. umieszczone w różnych, oddalonych od siebie miejscach) i fizycznie, tak by np. pożar nie spowodował jednoczesnej utraty dwóch lub więcej podsystemów. W nowoczesnych EJ każdy z czterech podsystemów układów bezpieczeństwa znajduje się w innej części budynku reaktora, oddzielonej przestrzennie od pozostałych. W tej sytuacji nawet uderzenie samolotu nie może spowodować utraty więcej niż jednego podsystemu bezpieczeństwa. Kable sterowania i kable energetyczne układów bezpieczeństwa prowadzone są oddzielnie od kabli układów nie spełniających funkcji bezpieczeństwa, a ponadto kable sterowania są umieszczone w kanałach oddzielonych od kanałów kabli energetycznych.

4.3.6. Odporność na pożar, zalanie wodą, wstrząsy sejsmiczne i warunki otoczenia

Jednakże ani rezerwowanie ani różnorodność elementów ważnych dla bezpieczeństwa nie wystarczyłyby, gdyby elementy te nie były odporne na wstrząsy sejsmiczne i przewidywane w czasie ich pracy warunki temperatury, ciśnienia i wilgotności. Szczególne zagrożenie stanowią pożary, mogące spowodować utratę wielu elementów bezpieczeństwa znajdujących się w zasięgu ognia. Dlatego przy projektowaniu układów ważnych dla bezpieczeństwa EJ analizuje się możliwość wystąpienia pożaru w pomieszczeniach, gdzie znajdują się te układy i wprowadza się zabezpieczenia wykluczające lub zmniejszające możliwość pożaru, takie jak np. zastąpienie smarowania łożysk pomp olejem przez smarowanie wodą. W przypadkach, gdy ogień jest jednak możliwy, analizuje się jego zasięg i czas trwania oraz zapewnia środki przeciwdziałające rozprzestrzenianiu pożaru, układy wykrywania i gaszenia ognia. W EJ obowiązuje wykonanie systematycznej analizy pożarowej dla wszystkich

pomieszczeń i wprowadzenie wszelkich potrzebnych zabezpieczeń z modyfikacjami budowlanymi projektu włącznie.

Podobne prace wykonuje się dla zagrożenia zalania wodą (np. w czasie powodzi). Jeśli możliwość zalania urządzeń ważnych dla bezpieczeństwa istnieje, wówczas urządzenia te muszą być wykonane w postaci wodoodpornej. Urządzenia znajdujące się wewnątrz obudowy bezpieczeństwa, gdzie dla obniżania ciśnienia pary po możliwej awarii rozerwania obiegu pierwotnego stosuje się układ zraszania wodą, muszą być odporne na działanie pary i wody pod ciśnieniem odpowiadającym maksymalnym ciśnieniom występującym podczas awarii.

Wszystkie układy ważne dla bezpieczeństwa muszą być odporne na maksymalne wstrząsy sejsmiczne, jakie mogą wystąpić w lokalizacji danej elektrowni. Dla określenia intensywności tych wstrząsów wyszukuje się dane o najsilniejszym trzęsieniu ziemi, jakie historycznie zaobserwowano w danej okolicy, przyjmuje się, że jego epicentrum może znaleźć się pod samą elektrownią, a następnie powiększa się jego wartość o ustalony współczynnik by zapewnić odpowiedni margines bezpieczeństwa. Tak określone trzęsienie ziemi, przy którym musi być zapewniona praca wszystkich układów bezpieczeństwa potrzebnych do wyłączenia reaktora i jego bezpiecznego ochłodzenia, odpowiada w przybliżeniu intensywności wstrząsów sejsmicznych występujących raz na 10 000 lat. Dobrym przykładem jest Japonia, w której pracuje obecnie ok. 50 reaktorów w elektrowniach jądrowych (plus kilkadziesiąt mniejszych reaktorów badawczych i eksperymentalnych), a która jest krajem znanym z codziennych trzęsień ziemi. Trzęsienia ziemi o sile przekraczającej 7 stopni w skali Richtera zdarzają się tam często, a mimo to nie stanowią one zagrożenia dla bezpieczeństwa japońskich elektrowni jądrowych. Obiekty te projektuje się tak, by wytrzymały ruchy sejsmiczne o tak dużej sile a nawet większej.

W lipcu 2007 r. trzęsienie ziemi o sile ponad 7 stopni w skali Richtera (siła zarejestrowana na terenie elektrowni miała wartość 6,8 stopnia) nawiedziło okolice japońskiej elektrowni jądrowej Kashiwazaki-Kariwa, największej na świecie. Elektrownia samoczynnie bezpiecznie się wyłączyła i nie zaistniało żadne zagrożenie dla ludności, nie ucierpiało też nikt z personelu. Trzęsienie ziemi spowodowało oczywiście pewne uszkodzenia w infrastrukturze i niektórych budynkach (przy takiej sile w ziemi tworzą się kilkunastometrowe dziury i rozpadliny, wałęsają się mosty i kominy a nawet budynki, które nie zostały zaprojektowane z uwzględnieniem zagrożeń sejsmicznych) ale układy bezpieczeństwa i same reaktory pozostały nietknięte. W chwili pisania tej książki



Rys. 4.11. Elektrownia Jądrowa Kashiwazaki-Kariwa w Japonii, która bezpiecznie przetrwała trzęsienie ziemi o sile prawie 7 stopni w skali Richtera. Nie było żadnego zagrożenia ani dla ludności ani dla personelu. (fot. Tokyo Electric Power Co., źródło: <http://www.world-nuclear-news.org/uploadedImages/wnn/Images/Kashiwazaki-Kariwa.jpg>)

elektrownia po naprawieniu szkód wznawia pracę (otrzymawszy uprzednio zgodę japońskiego dozoru jądrowego, który wydaje zezwolenia na eksploatację tylko wtedy, gdy operator elektrowni udowodni, że jest to bezpieczne).

Urządzenia układów ważnych dla bezpieczeństwa muszą być także odporne na wszelkie inne zagrożenia mogące zaistnieć w czasie ich pracy, np. napędy zaworów znajdujących się wewnątrz obudowy bezpieczeństwa muszą być odporne na działanie strumienia pary z rozerwanego rurociągu, o ile taki rurociąg znajduje się w ich sąsiedztwie. Przed zainstalowaniem w EJ urządzeń ważnych dla bezpieczeństwa sprawdza się szczegółowo ich odporność na obciążenia (np. na wstrząsy sejsmiczne) i na parametry otoczenia odpowiadające warunkom awaryjnym, przy czym bada się także wpływ starzenia się urządzeń w toku eksploatacji, z symulacją występujących w toku eksploatacji drgań, zmian temperatury, działania promieniowania i czynników chemicznych itd. Jest to proces tzw. kwalifikacji urządzeń na warunki awaryjne, kosztowny (płaci oczywiście właściciel elektrowni), czasochłonny, ale konieczny by mieć pewność, że układy bezpieczeństwa wypełnią swe funkcje w przypadku awarii.

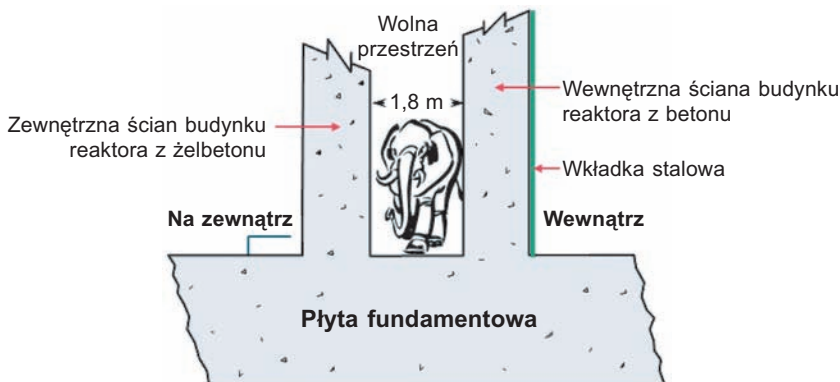
4.3.7. Obudowa bezpieczeństwa – najważniejsza bariera zatrzymująca radioaktywność

Analizy odporności obudowy bezpieczeństwa w nowoczesnych EJ potwierdziły, że z jednej strony mogą one wytrzymać uderzenie samolotu bez utraty szczelności, a z drugiej strony, nawet w razie poważnej awarii ze stopieniem rdzenia, powstrzymują skutecznie uwolnienia produktów rozszczepienia.



Rys. 4.12. Obudowy bezpieczeństwa (w kształcie kopuły) w elektrowni jądrowej Ohi w Japonii. (fot. Kansai Electric Power Co., źródło: IAEA)

W najnowszej EJ z reaktorem EPR (European Pressurized Water Reactor) zaprojektowanym wspólnie przez ekspertów francuskich i niemieckich, obudowa wykonana jest w postaci dwóch powłok pierścieniowych z betonu zbrojonego o grubości 1,3 m i 1,8 m. Wytrzymują one ciśnienie 5,1 MPa, to jest ciśnienie większe niż maksymalne ciśnienie występujące po najcięższych awariach reaktora EPR. Przecieki gazów przez tę obudowę przy maksymalnym nadciśnieniu wynoszą 0,5% objętości obudowy na dobę, co zapewnia redukcję uwolnień do wartości tak małych, że nie powodują one konieczności podejmowania działań interwencyjnych poza terenem elektrowni.



Rys. 4.13. Obudowa bezpieczeństwa reaktora EPR wytrzymała nawet uderzenie samolotu Boeing 737¹⁷⁰. Rysunek przedstawia przekrój obudowy.

Pełną odporność na awarie projektowe i hipotetyczne ciężkie awarie ze stopieniem rdzenia zapewnia także obudowa bezpieczeństwa reaktora AP1000 firmy Westinghouse (USA). Jest ona wyposażona w pasywny system odbioru ciepła, zapewniający chłodzenie przez dowolnie długi czas po awarii bez potrzeby dostarczania energii elektrycznej z zewnątrz.

Obudowy bezpieczeństwa w dawniej budowanych EJ są mniej odporne, ale też wystarczają do ochrony otoczenia przed skutkami awarii, nawet ciężkich awarii ze stopieniem rdzenia. Udowodniły to nie tylko analizy wykonywane przez ekspertów jądrowych i sprawdzane przez urzędy dozoru jądrowego, ale i doświadczenie praktyczne z jedynej awarii ze stopieniem rdzenia, jaka zdarzyła się w reaktorze PWR, mianowicie z awarii w EJ Three Mile Island (TMI) w Harrisburgu (USA) w 1979 roku.

W czasie tej awarii wskutek błędu operatorów, którzy omyłkowo wyłączyli awaryjny układ chłodzenia rdzenia, doszło do odparowania wody z reaktora, wypełnienia rdzenia parą i stopienia paliwa. Duże ilości produktów rozszczepienia wydzielili się ze stopionego paliwa do wnętrza obudowy bezpieczeństwa, ale obudowa wytrzymała wszystkie obciążenia podczas awarii włącznie ze wzrostem ciśnienia po niekontrolowanym spalaniu wodoru. Na zewnątrz elektrowni wydzielili się tylko nieznaczne ilości radionuklidów, np. frakcja jodu uwolniona poza

¹⁷⁰ Saltarelli G, AREVA Experience Overview, Materials from the Meeting of AREVA with PGE, Paris, 10.04.2008

obudowę bezpieczeństwa wyniosła poniżej jednej milionowej jodu zawartego w rdzeniu, a wydzielenia innych produktów rozszczepienia były także bardzo małe. Dzięki temu, chociaż rdzeń reaktora został wskutek awarii całkowicie zniszczony i reaktor nigdy nie wznowił pracy, średnia dawka skuteczna dla krytycznej grupy ludności wyniosła tylko 0,015 mSv, a więc w przybliżeniu tyle, o ile rośnie nasze normalne napromieniowanie podczas dwutygodniowych wczasów narciarskich w górach. Odpowiednie ryzyko zachorowania na nowotwory było mniejsze niż jedna milionowa w ciągu całego życia, a więc mniejsze niż ryzyko powodowane przez normalne roczne emisje z elektrowni węglowej w owym czasie. Mimo wielokrotnych badań, w okolicy TMI nie wykryto żadnych skutków zdrowotnych tamtej awarii.

4.4. Elektrownie jądrowe III generacji – odporne nawet na najcięższe awarie

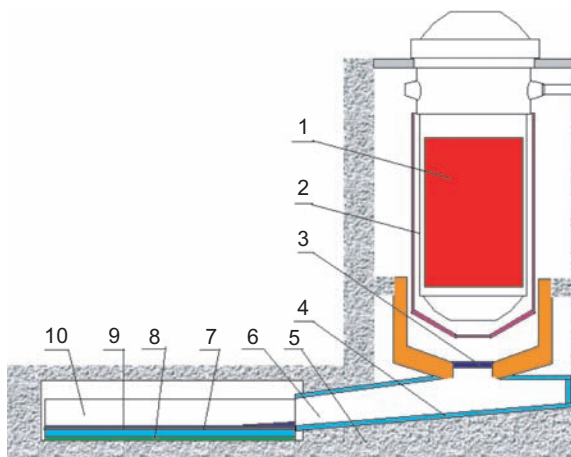
4.4.1. Reaktor EPR – odporny na wyciek stopionego rdzenia ze zbiornika reaktora

W ciągu ubiegłych 50 lat projektowania reaktorów uważano, że wprowadzone środki bezpieczeństwa są tak skuteczne, że do stopienia rdzenia reaktora nie dojdzie, lub będzie ono zdarzać się tak rzadko, że można tego nie uwzględniać. Ale stopienie rdzenia w czasie awarii w Three Mile Island pokazało, że błędy ludzkie są możliwe, a w warunkach awaryjnych szybkie zrozumienie zachodzących procesów awaryjnych i zorientowanie się w sytuacji może być trudne. Błędy zaś mogą prowadzić do fatalnych w skutkach decyzji. Rozpoczęto więc tworzenie procedur postępowania chroniących operatora przed popełnianiem błędów. Jednocześnie do projektowanych, a także do istniejących reaktorów wprowadzano dodatkowe zabezpieczenia by utrzymać uwolnienia radioaktywności pod kontrolą nawet przy najcięższych możliwych awariach hipotetycznych.

Prace te trwały przez wiele lat i odporność EJ na awarie poza projektowe stopniowo rosła. W końcu XX wieku w praktyce krajów Unii Europejskiej przyjęto, że cechy i układy bezpieczeństwa EJ powinny wystarczać do opanowania nie tylko awarii projektowych, ale także pozaprojektowych, by uniknąć dużych uwolnień materiałów radioaktywnych poza obudowę bezpieczeństwa. Obecnie projektowane reaktory (tzw reaktory III generacji) zapewniają bezpieczeństwo okolicznej ludności nawet w razie ciężkich awarii ze stopieniem rdzenia.¹⁷¹

¹⁷¹ European Utility Requirements for LWR Nuclear power Plants, Volume 1 &2, Rev. C April 2001

Jednym z rozwiązań jest układ z tzw. chwytaczem stopionego rdzenia, który w reaktorze EPR służy do wychłodzenia i zatrzymania stopionego rdzenia tak by obudowa bezpieczeństwa nie utraciła szczelności. Schemat pomieszczeń służących do ukierunkowania przepływu stopionego rdzenia i wychłodzenia go pokazano na rys. 4.14.



Rys. 4.14. Układ chwytacza stopionego rdzenia w EJ z reaktorem EPR.

1) rdzeń reaktora, 2) zbiornik ciśnieniowy reaktora, 3) pokrywa przetwarzana przez rdzeń, 4) dno tunelu przelewowego, 5) beton fundamentów obudowy bezpieczeństwa, 6) tunel przelewowy, 7) materiał ogniotrwały ZrO_2 , 8) chłodzenie wodne chwytacza, 9) warstwa powierzchniowa przeznaczona na wytopienie, 10) chwytacz rdzenia – basen dla stopionego rdzenia.

W razie nieprawdopodobnej awarii stopienia rdzenia i zniszczenia zbiornika reaktora, wycieknie on do specjalnie do tego przeznaczonego pomieszczenia na dnie studni reaktora, zwanego chwytaczem rdzenia. Ściany i podłóżę tego pomieszczenia są pokryte grubą warstwą betonu. Konstrukcja chłodząca umożliwia odprowadzenie ciepła zakumulowanego, schłodzenie oraz szybkie zestalenie się materiału rdzenia. Dzięki temu nie występuje erozja konstrukcyjnego betonu podłoża. Innymi słowy, stopiony rdzeń nie zniszczy betonowego podłoża i ścian „chwytacza rdzenia”. Pasywnie działający układ zaworów umożliwia pokrycie warstwy gorącego stopionego materiału wodą z wewnętrznego zbiornika zapasowego. W następnej fazie, po dwunastu godzinach jest uruchamiany system odprowadzania ciepła z obudowy bezpieczeństwa, który schładza obszar wycieku.

Podobne układy schładzania stopionego rdzenia zastosowano w innych typach reaktorów III generacji.

4.4.2. Reaktor AP 1000 – skuteczne chłodzenie rdzenia nawet przy zaniku zasilania elektrycznego

Rozwiązanie amerykańskiego reaktora AP1000 opiera się na zastosowaniu wypróbowanej technologii, z położeniem nacisku na cechy bezpieczeństwa oparte na zjawiskach naturalnych, jak siła ciężkości, przepływ w obiegu konwekcji naturalnej, ciśnienie sprężonych gazów i konwekcja naturalna. Układy bezpieczeństwa zapewniają odbiór ciepła od rdzenia i chłodzenie obudowy bezpieczeństwa przez długi czas bez zasilania prądem zmiennym i nie wymagają działania operatora przez 3 doby.

Nie ma w nich elementów czynnych (jak pompy, wentylatory lub generatory z silnikami Diesla), a działanie tych systemów nie wymaga systemów pomocniczych zakwalifikowanych do systemów bezpieczeństwa (takich jak zasilanie prądem zmiennym, chłodzenie elementów systemów bezpieczeństwa, wentylacja i klimatyzacja). Dzięki temu wyeliminowano zaliczone do układów bezpieczeństwa awaryjne generatory z silnikami Diesla i cały kompleks potrzebnych dla nich podsystemów, jak sprężone powietrze potrzebne do ich uruchomienia, zbiorniki paliwa i pompy, a także system poboru powietrza i usuwania spalin.

Pasywne systemy bezpieczeństwa obejmują układ pasywnego wtrysku chłodziwa do reaktora, pasywny układ odbioru ciepła powyłączeniowego (czyli ciepła, które jest wytwarzane po wyłączeniu reaktora) i pasywny układ chłodzenia obudowy bezpieczeństwa. Ten ostatni układ jest specyficznym rozwiązaniem charakterystycznym dla reaktorów AP600 i AP1000, i opisany jest poniżej.

Liczba i złożoność działań operatora potrzebnych do sterowania i kontroli systemów bezpieczeństwa są zredukowane do minimum. Większość układów działa samoczynnie, bez potrzeby zewnętrznego zasilania i uruchamia się bez polecenia operatora. Ogólna strategia polega raczej na eliminowaniu akcji operatora, a nie na ich automatyzacji. Dzięki temu zmniejsza się ryzyko popełnienia przez operatorów ewentualnych błędów i pogorszenia sytuacji.

Ważnym elementem bezpieczeństwa reaktora AP1000 jest **układ automatycznej redukcji ciśnienia** w obiegu pierwotnym, który w przypadku hipotetycznych awarii poza projektowych zapewnia szybkie i niezawodne obniżenie ciśnienia w rdzeniu, aby umożliwić zalanie rdzenia wodą z układów niskociśnieniowych.¹⁷² Wykluczenie niebezpieczeństwa rozerwania zbiornika reaktora pod wysokim ciśnieniem zapewnia możliwość wykorzystania dodatkowych źródeł wody i chroni obudowę przed

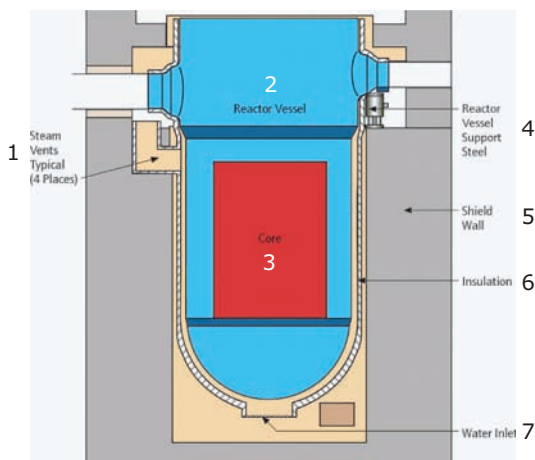
¹⁷² o ciśnieniu niższym niż 2 MPa

¹⁷³ obieg pierwotny to obieg odbierający ciepło od elementów paliwowych w rdzeniu.

rozerwaniem. Układ ten składa się z czterech sekcji. Pierwsze trzy podłączone są do kopuły stabilizatora ciśnienia i obejmują w sumie 6 zaworów zrzutowych o wymiarach dobranych tak, by obniżyć ciśnienie w obiegu pierwotnym dostatecznie dla skutecznego wtrysku z zbiorników wody pod ciśnieniem i pozwolić na przejście do czwartego etapu redukcji ciśnienia. W czwartym etapie otwierają się 4 stacje redukcji ciśnienia połączone z gorącymi gałęziami obiegu pierwotnego¹⁷³, mające obniżyć ciśnienie tak, by możliwy był wtrysk wody ze zbiornika zapasu wody chłodzącej i z miski ściekowej obudowy bezpieczeństwa w fazie długoterminowego chłodzenia rdzenia po awarii.

Aby mieć pewność, że niezależnie od typu awarii będzie dość wody, by zalać rdzeń i zbiornik reaktora, zbiornik z wodą umieszczony jest bezpośrednio wewnątrz obudowy, powyżej rdzenia, i w razie awarii woda wycieka zeń pod działaniem siły ciężkości. Jest jej dostatecznie dużo, by wypełniła dolną część obudowy, gdzie znajduje się zbiornik. Tak więc, zalanie rdzenia wodą w reaktorze AP1000 może nastąpić zawsze, nawet przy zupełnym braku zasilania energią elektryczną.

Co więcej, zbiornik reaktora zostaje od zewnątrz zalany wodą tak, że nawet jeśli dojdzie do stopienia rdzenia, to ciepło wydzielane w paliwie będzie odbierane przez wodę z całej zewnętrznej powierzchni zbiornika reaktora (rys. 4.15)



Rys. 4.15. Zalanie reaktora wodą w razie ciężkiej awarii w reaktorze AP1000

1. Wyloty pary, cztery kanały, 2. Zbiornik reaktora, 3. Rdzeń, 4. Stalowa podpora zbiornika reaktora, 5. Ściana osłonowa, 6. Izolacja cieplna, 7. Wlot wody

Tak więc bezpieczeństwo reaktora AP 1000 konsekwentnie opiera się na wykorzystaniu naturalnych sił przyrody, takich jak siła ciężkości.

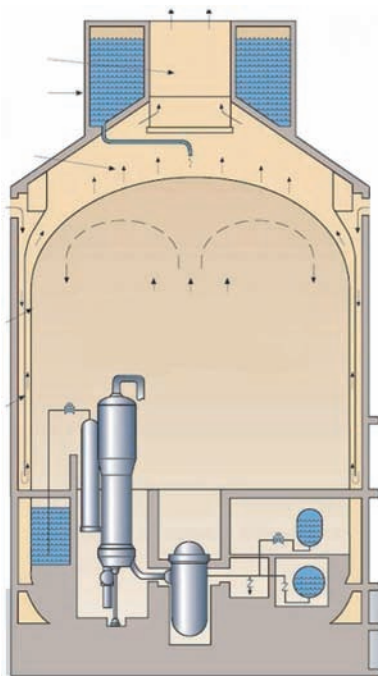
4.4.3. Obudowa bezpieczeństwa reaktora AP1000 – zapewnia ochronę nawet przy braku zasilania i bez działań operatora.

Zalanie szybu reaktora wodą zabezpiecza przed przegrzaniem zbiornika i paliwa. Ciepło wydzielane w rdzeniu nie powoduje już stopienia paliwa, a tylko wrzenie i odparowanie wody. Ale para wodna wypełnia obudowę bezpieczeństwa i w miarę upływu czasu musi przejmować ciepło z rdzenia.

W przypadku awarii w elektrowni jądrowej dysponujemy zwykle zasilaniem elektrycznym, zapewnionym przez wiele układów zasilania, zarówno przeznaczonych do normalnej pracy jak i do warunków awaryjnych. Ale w razie ciężkiej awarii przyjmujemy jako założenie, że wszystkie te układy przestają pracować. Jak więc odebrać ciepło od obudowy bezpieczeństwa? Gdyby brak było odbioru ciepła, to po kilku dniach ciągłego braku zasilania energią elektryczną (bardzo mało prawdopodobne – ale teoretycznie możliwe...) temperatura gazów wewnątrz obudowy wzrosła by tak bardzo, że ich ciśnienie spowodowałoby rozerwanie obudowy. W wielu elektrowniach jako dodatkowe zabezpieczenie na wypadek ciężkiej awarii stosuje się specjalną linię zasilania łączącą EJ z pobliską hydroelektrownią, wydzieloną poza normalne zasilanie sieciowe. W innych zapewnia się dodatkowe przevożne generatory Diesla. W AP1000 przyjęto rozwiązanie bardziej eleganckie, uniezależniające EJ od jakichkolwiek zewnętrznych źródeł zasilania elektrycznego.

Obudowa bezpieczeństwa reaktora AP1000 (rys. 4.16) składa się z dwóch warstw: wewnętrznej powłoki stalowej zapewniającej szczelność i zewnętrznej grubej powłoki betonowej, zatrzymującej promieniowanie bezpośrednie i chroniącej obudowę przed przebicciem z zewnątrz.

Zasadniczym elementem pasywnego układu chłodzenia obudowy bezpieczeństwa jest zbiornik wody chłodzącej (pokazany strzałką poziomą), posadowiony na szczycie obudowy bezpieczeństwa jak widać na rys. 4.15. Po sygnale o wystąpieniu wysokiego ciśnienia wewnątrz obudowy zawory pod tym zbiornikiem otwierają się i woda chłodząca zaczyna spływać po zewnętrznej powierzchni stalowej powłoki obudowy bezpieczeństwa. Wystarcza to do odbioru ciepła powyłączeniowego z reaktora. Para generowana w rdzeniu skrapla się na wewnętrznej powierzchni powłoki stalowej i skropliny powracają do miski ściekowej obudowy bezpieczeństwa, skąd pompowane są ponownie do rdzenia.



Rys. 4.16. Obudowa bezpieczeństwa reaktora AP1000 z pasywnym układem odbioru ciepła¹⁷⁴.

Ciepło przewodzone przez powłokę stalową odbierane jest przez odparowanie wody spływającej po zewnętrznej powierzchni powłoki, co zapewnia utrzymanie ciśnienia wewnątrz obudowy w przedziale ciśnień projektowych.

Szczelina między warstwą zewnętrzną i wewnętrzną tworzy pierścieniową drogę przepływu powietrza, które napływa przez otwory wentylacyjne w pobliżu szczytu obudowy i spływa ku dołowi wzdłuż przegrody między powłoką żelbetonową a powłoką stalową. W pobliżu podstawy obudowy kierunek przepływu powietrza zmienia się o 180° i powietrze wpływa do mniejszego pierścienia między przegrodą a powłoką stalową. Powietrze płynie ku górze, grzane przez stalową obudowę i wypływa przez komin na szczycie obudowy bezpieczeństwa. Połączenie odparowania ściekającej wody i chłodzenia przez powietrze płynące

¹⁷⁴ Wright R.F. AP1000 Containment Design and Safety Assessment, ICON 9516, Proc. Of ICON 9, 9th International Conference on Nuclear Engineering, April 8-12, 2001, Nice, France

w układzie konwekcji naturalnej zapewnia skuteczny odbiór ciepła z zewnętrznej powierzchni powłoki stalowej.

Dzięki tym rozwiązaniom, rdzeń reaktora pozostaje zawsze pod wodą, zbiornik zalany wodą od zewnątrz jest chroniony przed przegrzaniem, a samoczynne chłodzenie obudowy bezpieczeństwa zapewnia, że reaktor AP1000 nie spowoduje uwolnień znaczących ilości produktów rozszczepienia i zagrożenia okolicy nawet w razie ciężkiej awarii z długotrwałą utratą zasilania w energię elektryczną ze wszystkich źródeł.

Te ulepszenia w dziedzinie bezpieczeństwa dały wyniki w postaci znacznego zmniejszenia prawdopodobieństwa awarii z uszkodzeniem rdzenia. Według wymagań amerykańskiego dozoru jądrowego US NRC (*Nuclear Regulatory Commission*) powinno ono być mniejsze niż raz na 10 000 lat. Obecnie pracujące EJ osiągają wskaźnik około 5 na 100 tysięcy lat, wg wymagań firm energetycznych¹⁷⁵ prawdopodobieństwo uszkodzenia rdzenia powinno być niższe niż 1 na 100 tysięcy lat, a konstrukcja reaktora AP1000 zapewnia, że nie przekroczy ono 2,5 na 10 milionów lat, a więc jest 400 razy mniejsze niż wymaga NRC.

4.5. Działania i organizacja pracy zapewniające bezpieczeństwo jądrowe

Poza wbudowanymi cechami bezpieczeństwa i technicznymi systemami bezpieczeństwa w energetyce jądrowej realizuje się cały system działań różnego typu zapewniających eliminację zagrożeń poprzez odpowiednie działania zapobiegawcze, lub – jeśli mimo wszystko zagrożenia wystąpią – zmniejszanie ich skutków dla człowieka i środowiska. W skład tych przedsięwzięć wchodzi tzw. kultura bezpieczeństwa, ocena i weryfikacja bezpieczeństwa EJ, działania dozoru jądrowego jako organizacji w pełni niezależnej od operatora elektrowni i mającej uprawnienia do wydawania obowiązujących zaleceń i nakładania kar, aż do wstrzymania eksploatacji EJ włącznie, szkolenie personelu w warunkach symulujących warunki normalnej eksploatacji i warunki awaryjne, badania doświadczalne i analizy bezpieczeństwa EJ oraz współpraca międzynarodowa zapewniająca przekazywanie dobrych doświadczeń i eliminowanie błędów.

Kultura bezpieczeństwa w obiektach jądrowych rządzi działaniami wszystkich osób i organizacji podejmujących pracę dla potrzeb

¹⁷⁵ firmy posiadające EJ utworzyły organizacje, które zajmują się ustalaniem wymagań bezpieczeństwa, z reguły jeszcze ostrzejszych niż wymagania dozorów jądrowych - jest to robione w imię dobra wspólnego jakim jest bezpieczeństwo

energetyki jądrowej. Problemom bezpieczeństwa poświęca się pełną uwagę, na jaką zasługują, w szczególności stosuje się zasadę, że bezpieczeństwo jest ważniejsze od wytwarzania energii elektrycznej. Odpowiedzialność za bezpieczeństwo jest jednoznacznie określona a kierownictwo elektrowni i personel są przeszkoleni tak, by zdawali sobie sprawę z wagi zagadnień bezpieczeństwa.

Personel jest zachęcany do uczenia się na własnych błędach i wyciągania wniosków z błędów popełnionych przez innych, a operatorzy elektrowni intensywnie współpracują, np. poprzez wymianę raportów z awarii, misje bezpieczeństwa MAEA, światowej organizacji operatorów elektrowni jądrowych WANO (czyli dobrowolne kontrole elektrowni przez niezależnych ekspertów z całego świata i inżynierów z innych elektrowni) itp. Dobrym przykładem promowania właściwych postaw personelu wobec bezpieczeństwa jest Japonia, gdzie pracownicy EJ są motywowani do wyszukiwania słabych punktów w systemach bezpieczeństwa elektrowni poprzez różnego rodzaju premie (finansowe, socjalne a nawet awans zawodowy). Na koniec roku dyrekcja elektrowni ogłasza zwycięzców konkursu na znalezienie jak największej liczby słabych punktów (premiowane są również pomysły zmian mających podnieść poziom bezpieczeństwa), którzy są sownie nagradzani. Przez cały rok prowadzony jest aktualizowany na bieżąco ranking. To bardzo motywuje personel.

Dozór jądrowy to organizacja w pełni niezależna od operatora elektrowni i mająca uprawnienia do wydawania obowiązujących zaleceń i nakładania kar. Dozór jądrowy analizuje dokumenty przedkładane przez inwestora występującego o lokalizację elektrowni, ocenia poprawność i kompletność raportu bezpieczeństwa, nadzoruje proces budowy i eksploatacji, a potem likwidacji elektrowni i wydaje odpowiednie zezwolenia na każdy etap pracy. Analizy prowadzone przez dozór odznaczają się dużą wnikliwością i dlatego zwykle trwają długo, np. na ocenę raportu bezpieczeństwa potrzeba około 2-3 lat.

Dozór wydaje rozporządzenia i wytyczne w zakresie bezpieczeństwa jądrowego, obowiązujące dla EJ, a także wydaje zezwolenia na wszelkie zmiany i prace w EJ mające wpływ na bezpieczeństwo jądrowe. W razie niewykonania poleceń dozoru lub łamania zasad bezpieczeństwa jądrowego dozór nakłada na EJ odpowiednie kary, aż do wstrzymania eksploatacji EJ włącznie. Niezależność dozoru jądrowego jest ważnym czynnikiem podnoszącym bezpieczeństwo energetyki jądrowej. Obecne wymogi międzynarodowe (Konwencja Bezpieczeństwa Jądrowego, standardy Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej i inne powszechnie obowiązujące dokumenty) stanowią, że urząd dozoru jądrowego musi być oddzielony od organów i urzędów

państwowych zajmujących się promowaniem energii jądrowej, powinien mieć również zapewnione odpowiednie środki finansowe i dostętną bazę kadrową by móc swobodnie realizować powierzone mu zadania. W ramach misji IRRS (*Integrated Regulatory Review Service*) przeprowadzanych przez MAEA, sprawdza się niezależność i efektywność działania urzędów dozoru jądrowego w różnych państwach.

Personel eksploatacyjny i remontowy EJ szkolony jest do pracy w warunkach normalnej eksploatacji i stanów awaryjnych. Szkolenie jest szczególnie intensywne w przypadku operatorów i obejmuje wykorzystanie symulatorów sterowni elektrowni jądrowej, to jest układów komputerowych zainstalowanych w makiecie sterowni i symulujących procesy zachodzące w EJ w stanach przejściowych i awaryjnych. Pozwala to operatorowi opanować umiejętność reagowania na awarie w czasie rzeczywistym. Personel eksploatacyjny jest licencjonowany przez dozór jądrowy na podstawie egzaminów i testów, z testami awarii na symulatorach EJ włącznie.

Naukowcy i inżynierowie wysokiej klasy prowadzą badania zmierzające do znalezienia możliwych zagrożeń i środków zaradczych. Wbrew podejrzeniom organizacji antynuklearnych, nie mają oni żadnych powodów, by ukrywać zagrożenia, przeciwnie, mają oni powody by wykryć i ujawnić wszelkie niedociągnięcia mogące spowodować zagrożenia. Od tego zależy uzyskanie finansowania ich prac, a co więcej, ich osobisty awans naukowy i zawodowy. Podobne bodźce do pracy mają instytuty badawcze i organy dozoru jądrowego. Wszystko to przyczynia się do rozwoju badań, które w przypadku energetyki jądrowej osiągnęły skalę bez precedensu w dziejach ludzkości.

Wynikiem tego jest ciągła **wymiana informacji** dotyczących wszystkich problemów bezpieczeństwa, intensywne badania w dziedzinie bezpieczeństwa, w których zainteresowane są firmy przemysłowe, urzędy dozoru jądrowego, organizacje społeczne i instytuty badawcze i **krytyczna analiza** wszystkich nowych rozwiązań, która daje gwarancję, że **żaden z istotnych problemów bezpieczeństwa nie pozostanie niedostrzeżony**. Wymiana informacji odbywa się również podczas wzajemnych wizyt inżynierów z różnych elektrowni (np. misje OSART – Operational Safety Analysis Review Team, prowadzone przez MAEA) i spotkań technicznych. Organizacje takie jak MAEA i WANO promują rozpowszechnianie przykładów tzw. dobrej praktyki (good practice), czyli innowacyjnych sposobów pracy, korzystania z najnowszych zdobyczy techniki itp., które początkowo są unikalnym „wynalazkiem” pracowników jednej elektrowni, lecz szybko są rozpowszechniane na inne elektrownie i z biegiem czasu stają się nieformalnym standardem na całym świecie.

4.6. Bezpieczeństwo EJ III generacji na tle innych gałęzi energetyki

4.6.1. Bilans „zdrowotny” reaktorów budowanych w XX wieku

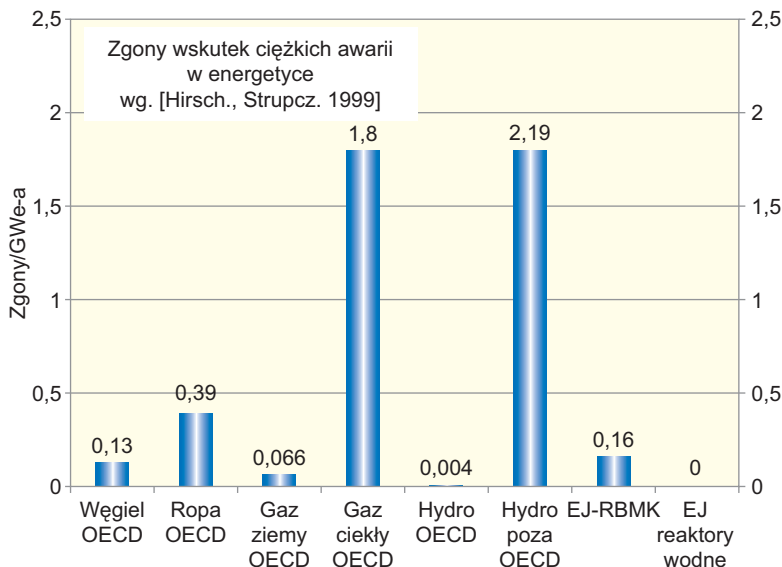
System barier stosowany w reaktorach wodnych zgodnie z zaleceniami dozoru jądrowego USA, a potem innych krajów i Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej zdał egzamin w praktyce. W szczególności, w krajach stosujących powyższe zasady, obudowa bezpieczeństwa nigdy nie została naruszona, mimo że elektrownie jądrowe pracują już ponad pół wieku i nagromadziły prawie 13 000 reaktoro-lat doświadczenia. Nawet podczas ciężkiej awarii reaktora PWR w EJ Three Mile Island, obecność dużej ilości wody w układach reaktora i obudowa bezpieczeństwa zapewniły bardzo skuteczne zatrzymywanie produktów roszczepienia. Wydzielenia jodu były wielokrotnie mniejsze niż oczekiwane w razie stopienia rdzenia. Dlatego podczas awarii w TMI obawiano się wciąż, że rdzeń ulegnie zniszczeniu, nie wiedząc, że to zniszczenie już nastąpiło – i nie spowodowało żadnego zagrożenia poza obudową bezpieczeństwa.

Awaria w TMI skończyła się szczęśliwie – nikt nie stracił ani życia, ani zdrowia – jednak przemysł jądrowy podjął energiczne działania, by zapobiec powtórzeniu się takiej awarii w jakimkolwiek reaktorze energetycznym w krajach OECD. Niestety, w Związku Radzieckim, który rozwijał reaktory RBMK oparte na rozwiązaniach stosowanych do produkcji militarnego plutonu, nie wdrażano zasad bezpieczeństwa podobnych jak na Zachodzie i zlekceważono doświadczenia amerykańskie. Trzeba było awarii reaktora w Czarnobylu i rozpadu ZSRR, by bezpieczeństwo reaktorów zyskało właściwą rangę i zostało uznane również w krajach dawnego ZSRR za sprawę najważniejszą, ważniejszą od produkcji energii elektrycznej i względów politycznych.

Poziom bezpieczeństwa już osiągnięty przez energetykę jądrową z reaktorami I i II generacji ilustruje Rys. 4.17, oparty na danych historycznych. Pokazuje on liczbę zgonów powodowanych przez poważne awarie przy wytwarzaniu energii z różnych źródeł. Jak widać, dla wszystkich reaktorów, poza reaktorami RBMK, bilans utraty zdrowia i życia personelu i społeczeństwa wynosi – **ZERO**.

4.6.2. Poziom bezpieczeństwa reaktorów III generacji

Energetyka jądrowa nie poprzestaje na tym – doskonalenie środków technicznych, którymi może obecnie dysponować, pozwoliło wprowadzić nowe układy i przyrządy, chroniące człowieka przed coraz cięższymi awariami, mogącymi zdarzać się tak rzadko, że dawniej pomijano je całkowicie w rozważaniach. Najnowsze elektrownie jądrowe



Rys. 4.17. Porównanie zagrożeń wskutek ciężkich awarii dla różnych źródeł energii¹⁷⁶. Uwaga – dane w dziale „Hydro poza OECD” nie obejmują awarii hydroelektrowni Banqiao w Chinach, w której w r. 1975 zginęło 260 000 ludzi¹⁷⁷

III generacji zapewniają poziom bezpieczeństwa, o jakim nie można było marzyć w połowie XX wieku, gdy zaczynał się rozwój elektrowni jądrowych. Do systemu obrony „w głąb”, jaki stosowano poprzednio w reaktorach I i II generacji, dołączono dodatkowy poziom, mianowicie zapobieganie ciężkim awariom i ograniczanie ich skutków, jeśli mimo wszystko do takich awarii dojdzie.

Elektrownia wyposażona jest w układy specjalne do opanowania takich procesów, tak by nie spowodowały one uszkodzenia obudowy bezpieczeństwa. Oznacza to, że nawet po ciężkiej awarii ludność wokoło EJ pozostaje bezpieczna. Wg. wymagań energetyki europejskiej EUR¹⁷⁸, projekt EJ musi zapewnić, że uszkodzenie rdzenia zdarzy się nie częściej niż raz na 100 000 lat, że przekroczenia kryteriów ograniczonego

¹⁷⁶ Hirschberg S., Strupczewski A.: Comparison Of Accident Risks In Different Energy Systems – IAEA Bulletin, 1/1999

¹⁷⁷ Yi S. The World's Most Catastrophic Dam Failures. The August 1975 collapse of the Banqiao and Shimantan dams. In: D. Qing, J. Thiboleau, and P. B. Williams (ed) The River Dragon Has Come! The Three Gorges Dam and the Fate of China's Yangtze River and its People, pp pp. 240. M.E. Sharpe, 1998.

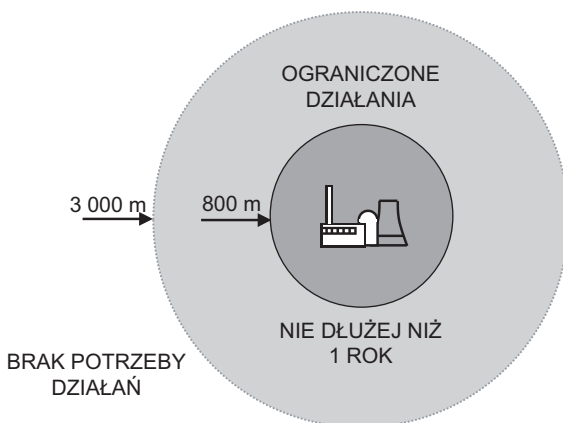
¹⁷⁸ European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants, a Document produced by DTN, Electricite de France, ENEL SpA, KEMA Nederland BV, Nuclear Electric, Tractebel and Vereinigung Deutscher Elektrizitaetswerke, Revision C, 2001

wpływu na środowisko będą występować rzadziej niż raz na milion lat, a bardzo duże uwolnienia muszą być ograniczone do częstości poniżej jednego na 10 milionów lat pracy reaktora.

Nowoczesne reaktory III generacji muszą być zaprojektowane wg wymagań EUR w taki sposób, by nawet w razie ciężkiej awarii nie było potrzeby:

- Podejmowania wczesnych działań poawaryjnych¹⁷⁹ w odległości większej niż 800 m od reaktora,
- Podejmowania akcji średnioterminowych¹⁸⁰ w odległości większej niż 3 km od reaktora,
- Akcji długoterminowych¹⁸¹ w odległości większej niż 800 m od reaktora.

Pewne ograniczone środki zapobiegawcze, np. podawanie pastylek jodowych, mogą być stosowane. Nie są one uwzględniane w formułowaniu powyższych wymagań.



Rys. 4.18. Minimalna strefa zagrożenia wokół reaktora III generacji
Rysunek zaczerpnięty z wykładu prof. S. Chwaszczewskiego¹⁸² za zgodą autora

¹⁷⁹ Działania ochronne w sytuacjach wyjątkowych (*Emergency Protection Actions*) – działania obejmujące ewakuację w oparciu o prognozę dawki do 7 dni, które można wdrożyć w fazie nagłego stan zagrożenia, to jest podczas trwania wydzieleń radioaktywności. Okres ten jest z reguły krótszy niż 7 dni.

¹⁸⁰ Działania średnioterminowe (*Delayed Actions*) – działania obejmujące przemieszczenie mieszkańców w oparciu o prognozę dawek oczekiwanych w ciągu 30 dni po awarii, powodowanych promieniowaniem gruntu i wchłanianiem zawiesiny aerozoli, które można wdrożyć po praktycznym zakończeniu fazy wydzielania produktów rozszczepienia.

¹⁸¹ Działania długoterminowe (*Long Term Actions*) – działania obejmujące trwałe przesiedlenie ludności w oparciu o przewidywane dawki w ciągu 50 lat powodowane przez promieniowanie gruntu i powtórne tworzenie zawiesiny aerozoli. Dawki otrzymywane drogą pokarmową nie są przy tym uwzględniane.

¹⁸² Chwaszczewski S: Elektrownie jądrowe XXI wieku. Festiwal nauki, 20.09.2008

5. A co z Czarnobyłem?

5.1. Reaktor RBMK w Czarnobyliu odmienny od reaktorów wodnych

5.1.1. Jakie różnice zadecydowały o tragicznych skutkach błędów operatorów?

Awaria, która wystąpiła w Czarnobyliu jest całkowicie wykluczona w reaktorze, jaki będzie budowany w Polsce i to niezależnie od ewentualnych błędów operatora. Istnieją fundamentalne różnice pomiędzy reaktorem RBMK (np. w Czarnobyliu) i pozostałymi typami reaktorów np. PWR lub BWR (na całym świecie). Odmienny skład materiałowy rdzenia i zupełnie inna konstrukcja reaktorów RBMK oraz PWR powodują, że te pierwsze są z natury obarczone ryzykiem eksploatacyjnym, podczas gdy te drugie są z natury stabilne.¹⁸³

Projekt reaktora RBMK pracującego w Czarnobyliu oparty był na projektach reaktorów wojskowych, produkujących pluton do celów militarnych i miał tę wyjątkową cechę, że w razie awarii układu chłodzenia jego moc rosła, zamiast maleć jak w reaktorach z wodą pod ciśnieniem (PWR) lub z wodą wrzącą (BWR), stanowiących obecnie podstawę rozwoju energetyki jądrowej na świecie. Różnica ta, opisana szerzej poniżej, wynika z istoty procesów fizycznych zachodzących w tych reaktorach i nie zależy od działania operatora. Dlatego reaktory PWR i BWR są reaktorami przyjaznymi człowiekowi, „wybaczącymi błędy”, to znaczy same korygują możliwe błędne zachowania operatorów. W razie pogorszenia warunków chłodzenia paliwa następuje w nich samoczynne obniżenie mocy reaktora. Operator nie musi podejmować natychmiastowych działań, reaktor dokonuje regulacji mocy sam, a w razie dalszego rozwoju warunków awaryjnych wyłącza się. Natomiast w reaktorze RBMK moc w warunkach awaryjnych rośnie. Z tego powodu w chwili awarii w Czarnobyliu moc reaktora była **setki razy** wyższa od mocy nominalnej i reaktor RBMK został zniszczony.

Dodatkowo sytuację w Czarnobyliu pogorszył błąd konstrukcyjny w układzie prętów bezpieczeństwa reaktora. W chwili wprowadzania prętów bezpieczeństwa do rdzenia reaktor wszedł w stan niestabilny. Był to skutek uprzedniej pracy na obniżonej mocy, w szczególnych warunkach, do których nigdy przedtem nie doprowadzono żadnego z reaktorów tego „poronionego” typu. Wskutek tego błędu, zamiast wyłączenia reaktora nastąpił przejściowy wzrost mocy. Operator nie zdawał sobie sprawy z tego błędu konstrukcyjnego i ze zdumieniem

¹⁸³ www.ipj.gov.pl/pl/szkolenia/matedu/czernobyl20.htm

przekonał się, że po uruchomieniu przycisku powodującego zrzut prętów bezpieczeństwa moc reaktora zamiast zmaleć zaczęła rosnąć jeszcze szybciej! To tak jakby strażakowi w czasie gaszenia pożaru podłączono do węża benzynę zamiast wody, nie informując go o tym.

To, że taki błąd nie został wcześniej wykryty było skutkiem utrzymywania projektu reaktora RBMK w ścisłej tajemnicy. Obecne podejście do spraw bezpieczeństwa jądrowego oparte na pełnej jawności wyklucza taką sytuację – plany projektowe są publicznie dostępne i analizowane również przez przeciwników energetyki jądrowej, szukających „haków” na EJ. Konstruktorzy radzieccy pytani o rozwiązania w reaktorze RBMK odpowiadali, że jest to tajemnica. Natomiast dziś, gdy cztery czołowe firmy reaktorowe zgłosiły oferty w przetargu na elektrownię jądrową w Wielkiej Brytanii, to obszernie i dokładne opisy proponowanych reaktorów znalazły się w Internecie, dostępne dla wszystkich zainteresowanych.¹⁸⁴ Urząd dozoru jądrowego w Wielkiej Brytanii zachęcał wszystkich do zgłaszania uwag krytycznych. Tak sam proces realizowano w czasie publicznej dyskusji nt. budowy nowego reaktora EPR we Francji, przeprowadzonej w latach 2006-2007.

Dzięki tej otwartości, każdy projekt reaktora jest przeglądany i krytykowany przez specjalistów wysokiej klasy z różnych krajów i różnych organizacji. Każdy z tych krytyków stara się znaleźć jakiś błąd, bo takie spostrzeżenie podniesie jego status zawodowy, stworzy mu możliwości awansu i zapewni uznanie. I tak kilkanaście tysięcy specjalistów na całym świecie analizuje każdy nowy projekt i stara się znaleźć jego usterki. Tego nie było niestety w przypadku reaktora RBMK zbudowanego w Czarnobylu. Gdyby nie panująca permanentnie w Związku Radzieckim atmosfera tajności, przyczyny awarii czarnobylskiej zostałyby zapewne zidentyfikowane i usunięte, zanim doszłoby do awarii.

Reaktor RBMK nie miał mocnej bariery ciśnieniowej pierwotnego obiegu chłodzenia, w szczególności nie miał zbiornika ciśnieniowego otaczającego cały rdzeń. Konstrukcja oddzielająca rdzeń od hali górnej była słaba. Gwałtowne wydzielenie pary wodnej w rdzeniu podczas awarii spowodowało wyrzucenie fragmentów pokrywy górnej reaktora i otwarcie drogi swobodnego przepływu powietrza do rdzenia, a materiałów z płonącego grafitu i produktów rozszczepienia – w górę, nad reaktor.

Co więcej, reaktor RBMK nie miał pełnej obudowy bezpieczeństwa, co umożliwiło uwolnienia produktów radioaktywnych po awarii bezpośrednio do atmosfery. Obudowy bezpieczeństwa wprowadzono jako

¹⁸⁴ Np dokumentacja reaktora EPR jest dostępna pod adresem: <http://www.epr-reactor.co.uk>

obowiązkowy element reaktorowych systemów bezpieczeństwa już pół wieku temu w USA, a potem w innych krajach. Ale Związek Radziecki rozwijał swoją energetykę jądrową w odosobnieniu. Konstruktorzy reaktora RBMK oparli się na rozwiązaniach radzieckich reaktorów wojskowych. Uznali oni, że mogą nie budować pełnej obudowy bezpieczeństwa, a zadowolić się obudową częściową, obejmującą tylko część obiegu pierwotnego, bez włączenia w tę obudowę rdzenia i rurociągów wychodzących z rdzenia. Awaria zaszła jednak w rdzeniu – a ten nie był objęty obudową...

Skład materiałowy rdzenia reaktora RBMK był kolejnym czynnikiem pogarszającym sytuację. W reaktorach PWR i BWR w warunkach awaryjnych rdzeń i obudowa bezpieczeństwa zalewane są wodą, która zatrzymuje bardzo skutecznie promieniotwórcze izotopy jodu i wiele innych promieniotwórczych produktów rozszczepienia. Natomiast w reaktorze RBMK nie było wody (stosunkowo niewielka jej ilość wyparowała w momencie awarii), był natomiast rozżarzony grafit, który – po rozszczelnieniu się osłony i kontakcie z powietrzem – palił się, powodując dodatkowo unoszenie wysoko w powietrze słupa dymu nasyconego produktami rozszczepienia. Przez to właśnie skażenia po Czarnobylu niemal natychmiast sięgnęły do górnych warstw troposfery i dolnej stratosfery, co też wykazały polskie pomiary samolotowe¹⁸⁵. Dlatego skażenie czarnobylskie objęło obie półkule, docierając nawet do Bieguna Południowego^{186,187}.

Dozór jądrowy w Związku Radzieckim, który powinien był wykryć błędy projektowe reaktora RBMK, był słaby i nie spełniał swych zadań. Świadczy o tym nie tylko dopuszczenie do przeprowadzenia niebezpiecznego doświadczenia z reaktorem RBMK (bez opinii i nadzoru fizyków reaktorowych) – w toku którego doszło do awarii – ale i wcześniejsze zaniedbania w analizie raportu bezpieczeństwa. Skoro operatorzy nie zdawali sobie sprawy z grożącego im niebezpieczeństwa, to analizy bezpieczeństwa przedstawione dozorowi musiały być niekompletne, lub też ze względów politycznych dozór uznał błędnie, że operatorzy nie muszą znać ich wyników. Obecnie od kilku już lat organizacje Unii Europejskiej intensywnie współpracują z dozorem rosyjskim i ukraińskim by przekazać im doświadczenie zgromadzone w krajach zachodnich i wzmocnić ich pozycję.

¹⁸⁵ Jaworowski Z and Kownacka L. 1994. Nuclear weapon and Chernobyl debris in the troposphere and lower stratosphere. *The Science of the Total Environment* 144: 201-215

¹⁸⁶ Dibb JE, Mayewski PA, Buck CS, and Drumev SM-. 1990. Beta radiation from snow. *Nature* 345: 25

¹⁸⁷ Philippot JC. 1990. Fallout in snow. *Nature* 348: 21

Uszkodzenia, jakie mogą się zdarzyć w reaktorach PWR i BWR, mogą prowadzić do wyłączenia reaktora i konieczności jego naprawy, ale nie mogą spowodować zagrożenia wymagającego podejmowania wczesnych działań dla ochrony ludności poza strefą wyłączenia reaktora (800 metrów), ani nie mogą doprowadzić do konieczności ewakuacji ludności.

I ostatni czynnik – decyzje administracyjne o ewakuacji na dużym obszarze wokoło Czarnobyla były niepotrzebne i błędne. Gdyby stosowano dzisiejsze zalecenia międzynarodowe, przyjęte zresztą jako obowiązujące przepisy w Polsce, to trwałej ewakuacji po Czarnobylu by nie było, a ludzie, którzy opuścili swe domy, mogliby do nich wrócić.

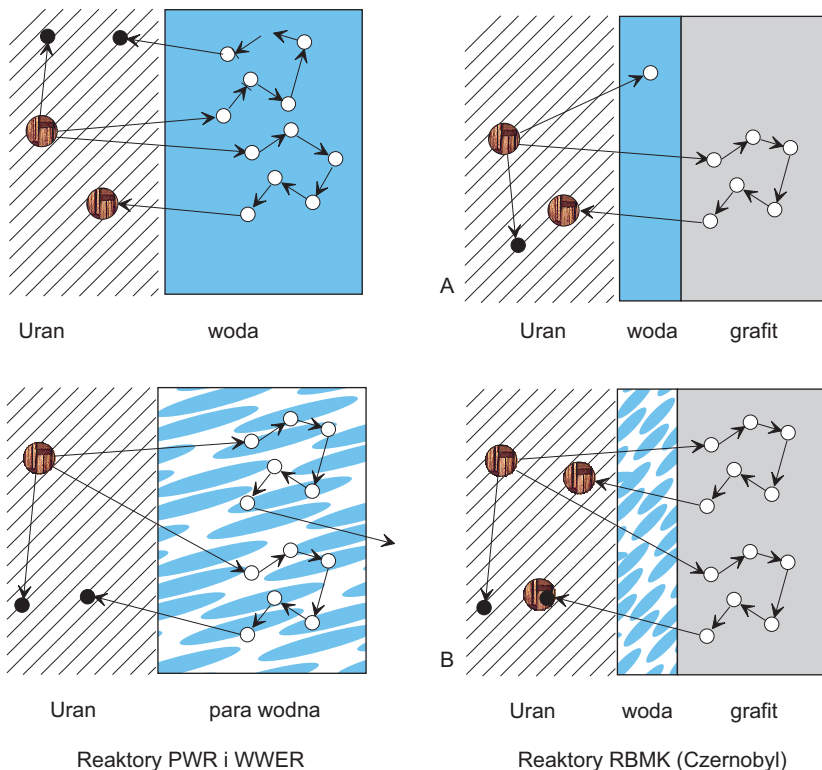
Dwa z wyżej wymienionych punktów zasługują na bliższą dyskusję.

5.1.2. Główna wada reaktora RBMK – samoczynny wzrost mocy w pewnych sytuacjach awaryjnych.

Neutrony, które powstają w wyniku rozszczepienia jądra uranu, mają ogromne prędkości, odpowiadające energii milionów elektronowoltów. Tak prędkie neutrony przeszywają materiał paliwowy „nie widząc” jąder uranu i nie powodując ich rozszczepień. Do tego, by rozszczepienia uranu mogły nastąpić, neutrony muszą zostać spowolnione do energii rzędu setnych części elektronowolta, a więc dziesiątki milionów razy. W reaktorach PWR i BWR spowalnianie neutronów następuje w wodzie, której ilość dobiera się bardzo starannie. Jeśli jest jej za mało – neutrony nie zostaną dostatecznie spowolnione, przenikną przez wodę i paliwo, i wydostaną się na zewnątrz rdzenia, nie powodując rozszczepień. Jeśli wody będzie za dużo, to będzie ona zbyt silnie pochłaniać neutrony, pogarszając bilans neutronów i prowadząc do wygaśnięcia reakcji rozszczepienia.

Natomiast w reaktorze RBMK rolę spowalniacza neutronów pełni grafit, a woda między prętami paliwowymi służy głównie do przenoszenia ciepła, do spowalniania nie jest niezbędna. Co więcej, wobec tego, że pewna część neutronów ulega pochłanianiu w wodzie, zmniejszenie gęstości wody wskutek podgrzania, a tym bardziej wskutek jej częściowego odparowania, powoduje zmniejszenie liczby tych pochłonieć. Idzie za tym wzrost liczby neutronów, które wracają jako spowolnione do paliwa i powodują nowe rozszczepienie (Rys. 5.1).

Dlatego w reaktorze RBMK spadek przepływu chłodziwa prowadzi do podgrzania wody, wzrostu gęstości rozszczepień, wzrostu mocy reaktora, dalszego podgrzewu wody i dalszego wzrostu mocy. To dodatnie sprzężenie zwrotne powoduje gwałtowny wzrost mocy reaktora, o ile nie zatrzyma go wprowadzenie do rdzenia prętów bezpieczeństwa.



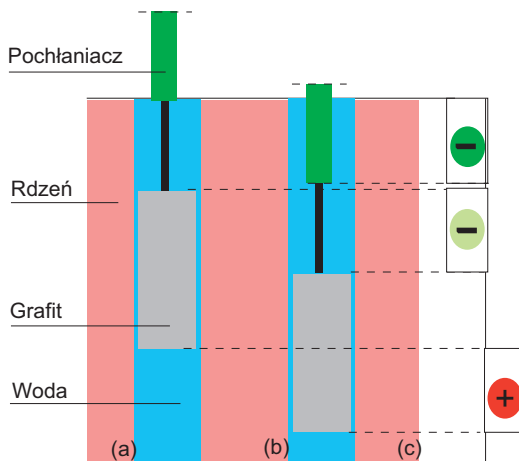
Rys. 5.1. Zmiany gęstości rozszczepień po odparowaniu części wody.

A – normalna praca, B – spadek przepływu wody, część wody odparowuje.

W reaktorze PWR lub WWER moc maleje, w reaktorze RBMK moc rośnie.

5.1.3. Błąd konstrukcyjny w układzie prętów bezpieczeństwa

Niestety, w Czarnobylu występowało dodatkowe niebezpieczeństwo, z którego nie zdawano sobie sprawy aż do czasu awarii, mianowicie wprowadzenie prętów bezpieczeństwa nie zawsze powodowało od razu wyłączenie reaktora. Pręty bezpieczeństwa w reaktorze RBMK są wprowadzane z góry, z wyjątkiem 24 skróconych prętów wprowadzanych z dołu i służących do wyrównania rozkładu generacji mocy w rdzeniu. Na końcu pręta bezpieczeństwa umocowany jest wkład grafitowy zwany wypełniaczem, który zabezpiecza przed napływem wody do obszaru, z którego wyciągnięto pręt bezpieczeństwa. Zwiększa to skuteczność pochłaniania neutronów, gdy opuszczamy pręt i na miejsce grafitu wsuwamy pochłaniacz neutronów. W czasie awarii czarnobylskiej wypełniacze grafitowe we wszystkich reaktorach RBMK były połączone



Rys. 5.2. Błąd w konstrukcji prętów bezpieczeństwa w EJ Czarnobyl.

Wprowadzanie przedłużacza grafitowego powoduje wzrost mocy w dolnej części rdzenia, a spadek mocy w części górnej (znaki + i - w kolumnie „c”).

z prętem pochłaniającym przy pomocy tzw. teleskopu, tj. konstrukcji mechanicznej o długości 1,25 m wypełnionej wodą.

Wymiary pręta i wypełniacza grafitowego były dobrane tak, że gdy pręt bezpieczeństwa był w pełni wyciągnięty z rdzenia, wypełniacz umieszczony był centralnie w rdzeniu, mając 1,25 m wody nad i pod sobą. Gdy sygnał awaryjny powodował spadek w pełni wyciągniętego pręta bezpieczeństwa do rdzenia, wypychanie wody z dolnej części kanału przy ruchu wypełniacza w dół powodowało miejscowy wzrost mocy w dolnej części rdzenia. Wielkość tego przejściowego efektu dodatniego zależała od przestrzennego rozkładu mocy reaktora i jego parametrów.

Wskutek długotrwałej pracy reaktora na małej mocy z podniesionymi prętami regulacyjnymi, moc w dolnej części rdzenia była dużo większa niż w górnej. W związku z tym lokalne zwiększanie mocy w dolnej części rdzenia dawało dużo większy efekt niż zmniejszanie mocy w górnej części rdzenia. Tak więc, w chwili zrzucania do rdzenia pręta wiszącego nad rdzeniem, zmiana położenia wypełniacza spowodowała przejściowy wzrost mocy reaktora. Wobec wielkich rozmiarów rdzenia RBMK czas potrzebny na pełne wprowadzenie pręta bezpieczeństwa do rdzenia wynosił 18 sekund. Stan, w którym lokalnie reaktywność w dolnej części rdzenia była znacznie zwiększona, trwał kilka sekund.

W analizach bezpieczeństwa zakładano, że duża część prętów bezpieczeństwa powinna być częściowo zanurzona w rdzeniu, tak by nie występowało jednoczesne wypieranie wody z wielu kanałów w dolnej

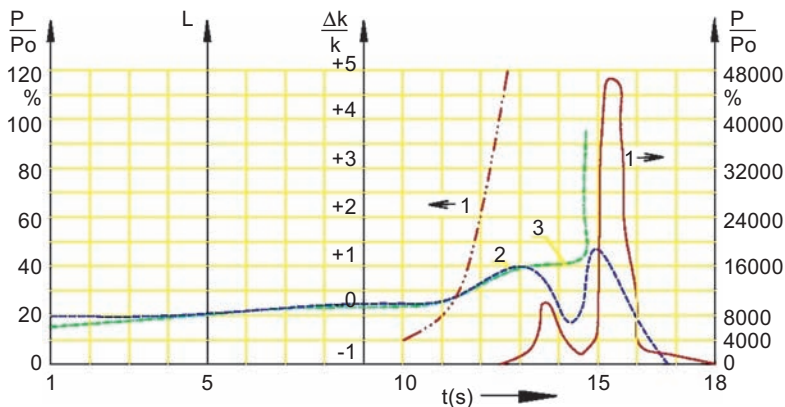
części rdzenia przy opuszczaniu prętów. Według oświadczenia konstruktorów reaktora po awarii, dla zapewnienia bezpiecznego sterowania reaktorem przynajmniej 30 prętów bezpieczeństwa powinno być stale zanurzonych w rdzeniu. Ale operatorzy nie zdawali sobie z tego sprawy. Z pewnością nie było to postawione jako warunek kategoryczny, na przykład: „jeśli doprowadzisz do stanu gdzie w rdzeniu będzie mniej niż 30 prętów, to nastąpi awaria”. W dążeniu do uzyskania sukcesu operatorzy zlekceważyli zalecenia – jeśli nawet były one sformułowane – i w chwili tuż przed awarią niemal wszystkie pręty bezpieczeństwa były całkowicie wyciągnięte ponad rdzeń... – bo operatorzy starali się w ten sposób utrzymać reaktor w ruchu.

To spowodowało tragiczne skutki w czasie awarii.

5.1.4. Możliwość odłączenia układu zabezpieczeń reaktora

Reaktor RBMK miał i inne niebezpieczne cechy konstrukcyjne. Układ awaryjnego chłodzenia rdzenia włączał się po otrzymaniu sygnału, w której części rdzenia wystąpił przeciek. Stwarzało to możliwość odłączenia układu – i operatorzy właśnie to zrobili...

Sygnały układu zabezpieczeń reaktora w Czarnobylu powinny były wyłączyć reaktor długo przed awarią, gdy jeszcze dużo prętów bezpieczeństwa znajdowało się w rdzeniu, co wykluczało przejściowy wzrost mocy. Ale sygnały te można było odłączyć – i operatorzy też to zrobili...



Rys. 5.3. Wzrost mocy reaktora w Czarnobylu podczas awarii.¹⁸⁸

1. Moc reaktora, (w czasie od 10 do 13 sekund wielkość mocy pokazuje skala na lewo, od 0 do 120 % mocy nominalnej, po 13 sekundach skala na prawo, od 0 do 48 000 % mocy nominalnej), 2. Reaktywność, 3. Objętościowa zawartość pary.

¹⁸⁸ INSAG Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident, Safety series, No 75-INSAG-1, IAEA, Vienna 1986

5.1.5. Przebieg samej awarii

Gdy wskutek błędów popełnionych przez operatorów ilość wody w rdzeniu reaktora zmalała, reaktor znalazł się w stanie niestabilnym, moc jego zaczęła rosnąć. Spowodowało to nagrzewanie wody i jej odparowanie, a więc dalszy ubytek wody z rdzenia. W reaktorze PWR lub BWR przy ubytku wody nastąpiłby samoczynny spadek mocy (gdyż woda jest tu spowalniaczem neutronów) i wyłączenie reaktora. Natomiast w reaktorze RBMK moc rosła, bo neutrony mimo ubytku wody były nadal dobrze spowalniane w graficie. Wzrost mocy przebiegał coraz szybciej, aż operator spostrzegł to i uruchomił zrzut prętów bezpieczeństwa. Wtedy wyszedł na jaw błąd w ich konstrukcji – po ich zrzuconiu moc reaktora rosła jeszcze szybciej, w sumie w ciągu 13 sekund wzrosła 1000 razy. Takiej mocy nie można było odebrać z paliwa, więc uran przegrzał się, stopił, a następnie odparował i wytrysnął do wody. Nastąpiło gwałtowne odparowanie reszty wody w rdzeniu, a wytworzona para wyrzuciła w górę posadzkę nad rdzeniem, rozerwała dach i otworzyła drogę produktom rozszczepienia z rdzenia, które zaczęły ulatywać do atmosfery.

Obecność grafitu i niedobór wody. W rdzeniu reaktora znajdowało się wiele ton grafitu o bardzo wysokiej temperaturze. W normalnych warunkach eksploatacyjnych znajdował się on w otoczeniu gazu obojętnego (czyli niepalnego i nie reagującego z innymi substancjami), ale po rozerwaniu rdzenia mógł do niego dostać się tlen powodując pożar – i nastąpiło to w Czarnobylu...

Ilość wody w reaktorze RBMK była stosunkowo mała, ograniczona przez konstruktorów by nie powiększać i tak bardzo dużych rozmiarów elektrowni (łączna długość hali czterech reaktorów w Czarnobylu wynosiła ponad kilometr!). W reaktorach PWR i BWR w razie awarii woda zalewa rdzeń i obudowę bezpieczeństwa reaktora, rozpuszczając i zatrzymując radioaktywny jod, cez i inne produkty rozszczepienia. Dlatego po awarii w TMI w dniu 28 marca, 1979¹⁸⁹, gdzie zniszczeniu uległ rdzeń reaktora PWR, frakcja jodu, która wydostała się poza obudowę, była mniejsza od jednej milionowej aktywności jodu zawartego w rdzeniu. W reaktorze RBMK brak wody uniemożliwił zatrzymanie cezu i jodu po awarii. Frakcja jodu wyrzucona w powietrze wynosiła około 20% aktywności jodu zawartego w rdzeniu, a cezu około 13% aktywności w rdzeniu.

¹⁸⁹ TMI – Three Mile Island – nazwa elektrowni w USA, gdzie doszło do jedynej w reaktorach PWR awarii ze stopieniem rdzenia. Nie spowodowała ona żadnych szkodliwych skutków zdrowotnych ani wśród załogi ani wśród ludności. Ta awaria ogromnie przyczyniła się do poprawy warunków bezpieczeństwa reaktorów energetycznych na świecie, ale spowodowała również zahamowanie programu rozwoju energetyki jądrowej w USA od r. 1980.

5.2. Skutki Czarnobyla – mity i fakty

Awaria w Czarnobylu wywarła ogromny wpływ na rozwój energetyki jądrowej na całym świecie, a jej skutki (zdrowotne, polityczne, ekonomiczne i inne) – bardzo różnie oceniane – do dnia dzisiejszego budzą emocje. Problem w tym, że żarliwi antagoniści – dokumentując stawiane przez siebie, często bardzo przeciwstawne tezy – przywołują często te same zjawiska i fakty opisując je zupełnie odmiennymi liczbami, z których część musi być fałszywa. Jednak dla przeciętnego obserwatora takich dyskusji ocena, które z nich są prawdziwe, jest niezwykle trudna.

Przy ocenie liczby ofiar Czarnobyla nie ma większych dyskusji odnośnie liczby zgonów wczesnych, jakie wystąpiły po awarii. Dwie osoby zmarły podczas samej awarii: jedna zabita przez wybuch, druga wskutek ataku serca. Trzecia osoba zmarła następnego ranka wskutek oparzeń termicznych (poparzenia parą wodną).

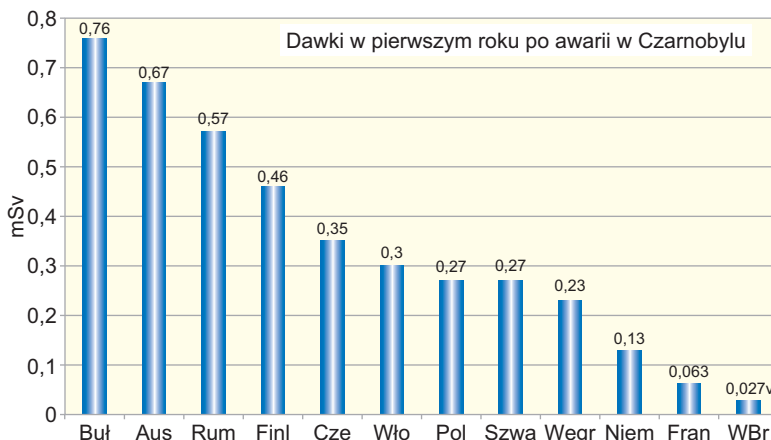
W czasie awarii, 134 pracowników EJ Czarnobyl i strażaków otrzymało w krótkim czasie dawki promieniowania na całe ciało od 0,8 do 16 Sv. U 75% dawki wyniosły od 6,5 do 16 Sv. Z tego powodu 28 zmarło w ciągu pierwszych 4 miesięcy po awarii wskutek ostrej choroby popromiennej. Stąd liczba wczesnych zgonów spowodowanych przez awarię w Czarnobylu wynosi 31.

Pozostałych 106 ludzi, którzy otrzymali dawki od 1300 do 5300 mSv znajduje się pod ciągłym nadzorem lekarskim. W grupie tej zarejestrowano 19 zgonów, (na ogół bez związku z napromieniowaniem) w okresie od 1987 do 2006 roku.¹⁹⁰ Wprawdzie tylko w trzech przypadkach zgony mogły być związane z napromieniowaniem, ale w raportach wlicza się je wszystkie (raczej bezpodstawnie) do grupy ofiar Czarnobyla¹⁹¹.

Średnie dawki otrzymane przez mieszkańców najbliższych położonych krajów europejskich po awarii w Czarnobylu były małe, nie przekraczały 0,3% dawki normalnie otrzymywanej w ciągu życia ze źródeł naturalnych i nie spowodowały żadnych skutków zdrowotnych. Oczywiście organizacje antynuklearne twierdzą inaczej. Wielkość dawek promieniowania w pierwszym roku po awarii w różnych krajach pokazana jest na Rys. 5.4.

¹⁹⁰ UNSCEAR draft 2008, Health Effects Due To Radiation From The Chernobyl Accident, R673, 3 June 2008.

¹⁹¹ V. IVANOV, L. ILYIN, A. GORSKI, A. TUKOV and R. NAUMENKO, Radiation and Epidemiological Analysis for Solid Cancer Incidence among Nuclear Workers Who Participated in Recovery Operations Following the Accident at the Chernobyl NPP, Journal of Radiation Research, Vol. 45 (2004), No. 1 41-44



Rys. 5.4. Dawki otrzymane w krajach europejskich w ciągu pierwszego roku po awarii w Czarnobylu¹⁹²

Zasadniczy spór dotyczy skutków zdrowotnych wśród osób, które znajdowały się w trakcie awarii w promieniu kilku do kilkudziesięciu kilometrów od elektrowni, otrzymały małe dawki i zostały ewakuowane bądź nadal mieszkają na terenach wokoło Czarnobyla. Organizacje antynuklearne twierdzą, że liczba ofiar śmiertelnych w tej populacji jest ogromna, od 10 tysięcy poprzez 100 tysięcy aż do kilku milionów. Informacje te są przez te organizacje od lat rozpowszechniane, pomimo braku jakiegokolwiek udokumentowania.

Już od pierwszych chwil wokół katastrofy w Czarnobylu zaczęły narastać przerażające mity: donoszono o setkach tysięcy ofiar, masowej epidemii nowotworów i straszliwych zmianach genetycznych. Amerykański tabloid *National Inquirer* już kilka dni po awarii zamieścił rysunek dwumetrowej wielkości kurczaka rzekomo złapanego koło Czarnobyla przez radzieckich myśliwych. *The New York Post* już 30 kwietnia 1986 roku, w cztery dni po awarii, podawał na pierwszej stronie: „*Masowy grób: 15 000 ciał spychanych buldożerami do nuklearnych dołów*”. Czarnobylskie zgony mnożyły się w mediach jak grzyby po deszczu, a na zdjęciach i filmach jako ofiary napromieniowania pokazywano dzieci chore na białaczkę albo dotknięte ciężkimi zaburzeniami rozwojowymi.

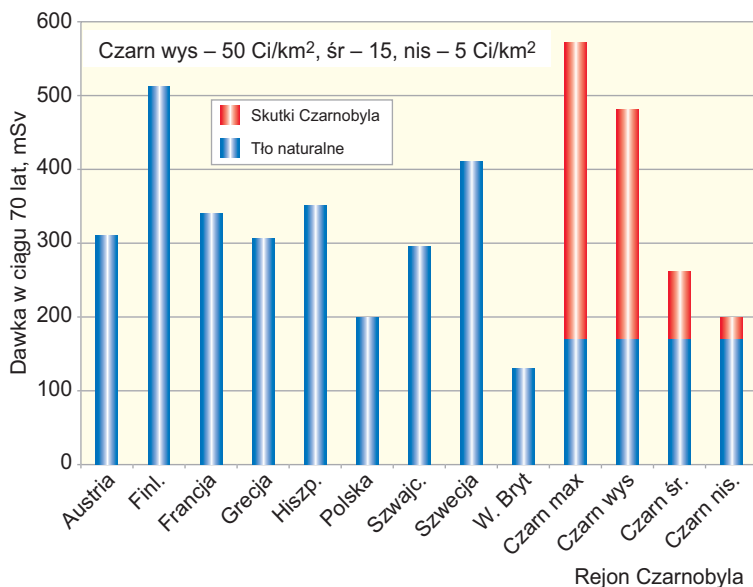
Tymczasem badania organizacji międzynarodowych takich jak Komitet Naukowy ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego

¹⁹² UNSCEAR, Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly, United Nations; 2000 ANNEX J, Exposures and effects of the Chernobyl accident

(UNSCEAR), Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) czy Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA) wykazywały systematycznie, że promieniowanie na terenach ewakuowanych jest mniejsze niż promieniowanie naturalne w wielu rejonach Europy i świata, gdzie od wieków mieszkają i będą mieszkać ludzie. Wg danych UNSCEAR, w 1986 roku, gdy natężenie promieniowania po awarii było największe, średnia dawka na Białorusi dla ponad 10 milionów ludzi z tych terenów wyniosła 0,87 mSv. W roku 1986 mieszkańcy Białorusi otrzymali więc 25% całej dodatkowej dawki spowodowanej przez awarię, jaka jest oczekiwana w ciągu ich życia, to jest w ciągu 70 lat (średnia dawka życiowa na Białorusi spowodowana przez awarię w Czarnobylu wynosi 3,5 mSv).

Największą dawkę, 39 mSv, w 1986 r. otrzymało 13 900 osób. W ciągu 70 lat życia tj. do 2056 r., otrzymają oni łączną dawkę 156 mSv. Jest to dawka mniejsza od różnicy dawek otrzymywanych w ciągu życia przez mieszkańca Finlandii (gdzie naturalne promieniowanie powoduje dawkę 510 mSv) i Polski (gdzie naturalne promieniowanie powoduje życiową dawkę około 170 mSv).

Podobne i mniejsze dawki otrzymali mieszkańcy skażonych terenów Ukrainy i Rosji.



Rys. 5.5. Porównanie dawek ze źródeł naturalnych otrzymywanych w ciągu życia w różnych krajach Europy i dawek powodowanych przez awarię w Czarnobylu, które otrzymali mieszkańcy terenów skażonych lub których uniknęły osoby ewakuowane.

Raport międzynarodowego Forum Czarnobyla (w skład Forum weszły m.in. rządy Ukrainy, Białorusi i Rosji) opublikowany w 2006 roku¹⁹³ potwierdza wyniki otrzymane przez UNSCEAR, WHO i MAEA. Na terenach sąsiadujących z EJ Czarnobyl występują nieliczne i niewielkie (o powierzchni kilku kilometrów kwadratowych) obszary o wysokim skażeniu, reszta terytorium nadaje się do zamieszkania. Na tych terenach łączna moc dawki od tła naturalnego i od skażenia terenu wskutek awarii jest mniejsza niż np. średnia moc dawki od tła naturalnego w Finlandii, w wielu rejonach Szwecji, w Masywie Centralnym we Francji itd. Mimo bardzo licznych badań nie wykryto wzrostu zachorowań na białaczkę ani na nowotwory łite wśród ludności lub likwidatorów awarii. Nie ma wzrostu obciążeń dziedzicznych, a liczba komplikacji porodowych w miejscowościach o wyższym poziomie promieniowania jest mniejsza niż wśród ogółu populacji. Natomiast zarejestrowano w toku badań przesiewowych od 1991 do 2005 roku 6400 przypadków niemego raka tarczycy u osób, które w 1986 roku miały poniżej 18 lat¹⁹⁴. Wśród nich wystąpiło tylko 15 przypadków śmiertelnych. Jest to jak dotąd – a minęło już od awarii ponad 23 lata – **jedyny** znaczący statystycznie efekt zdrowotny.

Niemcy rak tarczycy jest na szczęście dość łatwo uleczalny, a zwykle nie jest w ogóle zauważalny i wykrywa się go tylko przy prowadzeniu specjalnych badań¹⁹⁵. Przed awarią czarnobylską takich badań na Ukrainie i Białorusi nie prowadzono, nie ma więc punktu odniesienia dla obecnie rejestrowanej liczby przypadków (czyli nie wiadomo czy awaria mogła w ogóle mieć jakiś wpływ na liczbę zachorowań). Wiadomo jednak, że częstość niemego raka tarczycy w innych krajach jest znacząca i procentowo liczba stwierdzonych przypadków na Ukrainie i Białorusi jest mniejsza niż np. w Finlandii.

Łączna liczba zgonów, które można przypisać efektom awarii w Czarnobylu została oceniona przez Forum Czarnobyla, a także przez UNSCEAR, na mniej niż 60.

W tym samym czasie organizacje antynuklearne oceniają liczbę zgonów wśród ludności zamieszkującej w sąsiedztwie Czarnobyla na dziesiątki tysięcy i więcej¹⁹⁶. Nie są to jednak dane udokumentowane, a cytowane prace nie były poddane obiektywnej ocenie i weryfikacji.

¹⁹³ The Chernobyl Forum (Belarus, the Russian Federation, Ukraine, FAO, IAEA, UNDP, UNEP, UNSCEAR, UN-OCHA, WHO, WORLD BANK GROUP), -: Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine, Vienna 2005

¹⁹⁴ Patrz pozycja 188

¹⁹⁵ Jaworowski Z. 2006. Chernobyl: the fear of the unknown. International Journal of Low Radiation 3: 319-324

¹⁹⁶ Greenpeace The Chernobyl Catastrophe – Consequences on Human Health, 2006

Wbrew wygłaszanym przez organizacje antynuklearne opiniom awaria w Czarnobylu spowodowała zagrożenie radiacyjne wielokrotnie MNIEJSZE niż wybuchy bomb w Hiroszynie i Nagasaki. Przy wybuchach ludność otrzymała bardzo duże dawki jednorazowo, w ciągu bardzo krótkiego czasu. Organizm człowieka nigdy przedtem nie był poddany tak wielkim obciążeniom radiacyjnym. Natomiast po awarii czarnobylskiej dawki są małe, mniejsze niż w wielu rejonach Ziemi. Dlatego w Hiroszynie i Nagasaki ludzie umierali¹⁹⁷ – a w okolicach Czarnobyla kolejne badania wykazują brak skutków zdrowotnych promieniowania.

Warto też dodać, że w przypadku tych Japończyków, którzy po wybuchach bomb otrzymali dawki poniżej 100 mSv, pomimo wieloletnich badań nie można do dzisiaj stwierdzić, czy dawki te wpłynęły ujemnie na ich zdrowie. Ich umieralność na nowotwory nie różni się znacząco od umieralności reszty społeczeństwa. Dziś Hiroszyna i Nagasaki są dużymi, dobrze rozwiniętymi miastami, tętniącymi życiem i nie różniącymi się niczym od innych miast japońskich. Wiadomo też, że pacjenci, którzy otrzymywali od diagnostyki medycznej dawki do 100-200 mSv w ciągu roku, nie wykazywali zwiększonej zachorowalności na nowotwory. Podobnie brak znaczących statystycznie wzrostów zachorowań w okolicach Czarnobyla.

Decyzja o ewakuacji rozległych terenów była niepotrzebna i błędna. Gdyby w 1986 r. w ZSRR stosowano obecne zalecenia międzynarodowe, to ewakuacji by nie było. Raporty organizacji międzynarodowych tak bezstronnych jak UNSCEAR i WHO wzywają do zezwolenia ludziom na ponowne zasiedlenia terenów wokół Czarnobyla. Utrzymywanie ich w postaci „strefy zamkniętej” nie jest uzasadnione. Prezydent Juszczenko zapowiedział ponowne zasiedlenie Prypeci¹⁹⁸.

Również zaliczenie do ofiar Czarnobyla kilku milionów ludzi, którzy otrzymują dawki promieniowania rzędu 1 mSv rocznie, jest błędem i nie ma żadnego uzasadnienia. UNSCEAR podkreśla, że większe dawki otrzymują mieszkańcy wielu regionów na świecie, gdzie ludzie żyją zdrowo i dostatnio, np w Finlandii. Podtrzymywanie nadmiernych obaw przed skutkami promieniowania (radiofobia) spowodowało poważne skutki zdrowotne, takie jak zaburzenia układu nerwowego, trawienne-

¹⁹⁷ Trzeba jednak pamiętać, że na skutek promieniowania po wybuchu tych bomb zmarło tylko 10% wszystkich ofiar, reszta zginęła z powodu działania fali cieplnej i gwałtownego podmuchu powietrza, które są głównymi czynnikami rażenia w broni jądrowej. Promieniowanie jonizujące jest czynnikiem drugorzędym. Z tego powodu porównywanie całkowitej liczby ofiar bombardowań Hiroszyny i Nagasaki z jakimikolwiek liczbami rzeczywistych i rzekomych ofiar awarii w Czarnobylu jest zupełnie bezpodstawne.

¹⁹⁸ <http://www.huliq.com/19652/yushchenko-region-around-chernobyl-nuclear-plant-must-be-put-to-use-again>

go, odpornościowego i innych. Należy dążyć do jak najszybszego przywrócenia normalnych warunków życia i zasiedlenia rejonu obecnie utrzymwanego jako obszar wyłączony.¹⁹⁹

5.3. Czy jednak w polskiej elektrowni jądrowej może dojść do awarii takiej jak w Czarnobylu?

Gdy mówimy o awarii „*takiej jak w Czarnobylu*” mamy na myśli najczęściej pomyłki ludzkie, które, jak twierdzono zaraz po katastrofie, były głównym powodem nieszczęścia²⁰⁰. Władze radzieckie zrzuciły całą winę na zespół operatorów, bo było to politycznie wygodniejsze od przyznania się, że reaktor RBMK, prezentowany wówczas jako przykład osiągnięć techniki radzieckiej, był w rzeczywistości źle skonstruowany. Błędy operatorów były rzeczywiście poważne i tragiczne w skutkach, ale w reaktorze z moderatorem wodnym jak PWR lub BWR, a także w budowanych wówczas w ZSRR reaktorach WWER (które są odpowiednikami zachodnich reaktorów PWR), nie doprowadziłyby one do ciężkiej awarii.

Przeciwnicy energetyki jądrowej wysuwają często w dyskusjach zarzut, że błędy ludzkie zawsze mogą się zdarzyć, nie tylko w Czarnobylu, ale i w elektrowniach jądrowych innych typów. Twierdzą również, że pomimo szkolenia ludzi i doskonalenia nadzoru może dojść do nowej awarii spowodowanej przez człowieka, a wtedy skutki jej będą tragiczne, jeszcze gorsze niż skutki Czarnobyla, bo dojdzie do niej w gęsto zaludnionej Unii Europejskiej, a nie na rzadko zaludnionych terenach dawnego Związku Radzieckiego²⁰¹.

Rzeczywiście, błędy ludzkie są zawsze możliwe i energetyka jądrowa musi brać pod uwagę zawodność człowieka. W czasie awarii operator działać będzie w warunkach dużego stresu i niepełnej informacji, obserwując szereg sygnałów alarmowych i podejmując decyzje brzemiennie w skutki. Dlatego w energetyce jądrowej przyjęto zasadę, że niezależnie od szkolenia operatora, bezpieczeństwo jądrowe musi być zapewnione przez odpowiednio bezpieczny projekt elektrowni jądrowej. Projekt ten opracowywany jest przez wiele lat, podlega wielo-

¹⁹⁹ Chernobyl Report-Final-240102, The Human Consequences of the Chernobyl Nuclear Accident, A Strategy for Recovery, A Report Commissioned by UNDP and UNICEF with the support of UN-OCHA and WHO 25 January 2002

²⁰⁰ 75 INSAG-1, Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident, IAEA, Vienna, 1986

²⁰¹ HOCHMEYER, O., „Latest results of the international discussion on the social costs of energy - how does wind compare today?” Proc. of European Community Wind Energy Conf., 10-14 Sept. 1990, Madrid, Spain, (1990).

krotnym analizom i sprawdzeniom przez projektantów, konsultantów, eksperymentatorów, a na końcu przez dozór jądrowy, jest jawny i dostępny dla krytyki. Można w nim wykryć wszelkie usterki i poprawić je w warunkach spokojnej i planowej pracy. Całą elektrownię projektuje się tak, by nawet najbardziej nieprawdopodobne pomyłki operatorów nie mogły spowodować awarii stwarzającej zagrożenie dla ludności poza elektrownią.

W projekcie uwzględnia się pół wieku doświadczeń, jakie zebrała już energetyka jądrowa, co odpowiada prawie 13 tysiącom lat pracy różnych typów reaktorów w wielu krajach. Na tej podstawie i po analizie zaobserwowanych odchyłeń, usterek i awarii, Komisja Dozoru Jądrowego USA (US NRC) wydaje systematycznie zalecenia obowiązujące projektantów i eksploataatorów elektrowni jądrowych, a podobne zalecenia – korzystając z międzynarodowych, wzajemnie wymienianych doświadczeń – wydają urzędy dozoru jądrowego w innych krajach. Mają one na celu zapewnienie, że błędy, które wystąpiły w przeszłości, nie powtórzą się już w nowych reaktorach jądrowych, a także zostaną wyeliminowane z pracujących obecnie bloków.

Równolegle z pracą dozoru jądrowego przebiega praca samego przemysłu jądrowego, który – zgodnie z zasadami filozofii bezpieczeństwa w energetyce jądrowej – doskonali konstrukcje reaktorów tak, by reagowały one na uszkodzenia swych elementów i na błędy operatora w sposób zapewniający bezpieczeństwo ludzi i środowiska. Zasady obowiązujące zgodnie z wymaganiami XXI wieku omówiliśmy w rozdziale 4. Są one realizowane we wszystkich nowych elektrowniach jądrowych III generacji i będą realizowane w przyszłych polskich elektrowniach jądrowych.

Oczywiście, w reaktorze PWR awarie są też możliwe, i oczywiście błędne działania personelu mogą prowadzić do pogorszenia ich następstw. Przykładem takich błędnych działań była awaria w TMI-2 (EJ Three Mile Island, reaktor nr 2), w której wskutek błędnych decyzji operatorów wyłączono układ chłodzenia awaryjnego rdzenia i doprowadzono do całkowitego zniszczenia rdzenia. Ale nawet przy tej awarii skutki radiacyjne poza elektrownią były pomijalnie małe (bez znaczenia dla bezpieczeństwa ludności).

W następstwie awarii w TMI-2 przemysł jądrowy wprowadził nowe podejście do działań operatora w warunkach awaryjnych. Użytkownicy reaktorów PWR firmy Westinghouse opracowali system procedur postępowania awaryjnego opartych na symptomach, które można obserwować na przyrządach pomiarowych w sterowni reaktora, takich jak wzrost temperatury czy ciśnienia. Te parametry są przedstawiane na specjalnych panelach w sposób ułatwiający zrozumienie oraz ocenę

zachodzących zjawisk i stan bezpieczeństwa reaktora. Nowy system jest wprowadzony na miejsce poprzednio stosowanego systemu, w którym operator musiał odgadywać, jaka awaria wystąpiła i na podstawie tego przypuszczenia podejmować działania zaradcze. Ten nowy system radykalnie obniżył prawdopodobieństwo popełnienia błędu przez operatora.

Jednak pewne prawdopodobieństwo błędu pozostaje – dlatego konstrukcja reaktora musi być taka, by te ewentualne błędy nie powodowały zagrożenia poza obiektem. To wymaganie jest spełnione przez nowoczesne reaktory jądrowe.

6. Czy nas stać na budowę elektrowni jądrowej?

W ostatnich latach widać wyraźny renesans energetyki jądrowej. Nie tylko kraje ubogie w zasoby energetyczne – jak Japonia – ale i kraje mające wielkie złoża ropy naftowej i gazu – takie jak Arabia Saudyjska czy Rosja – budują elektrownie jądrowe. Budują je też małe kraje, takie jak Finlandia czy Słowacja. Powód jest prosty – elektrownie jądrowe wytwarzają prąd bez zanieczyszczenia powietrza, wody i gleby, a co najważniejsze dla firm przemysłowych – taniej niż inne źródła energii.

Elektrownie jądrowe osiągnęły bardzo wysoką niezawodność. Nie emitują one tlenków siarki, azotu, pyłów, metali ciężkich – zanieczyszczeń szkodliwych dla człowieka, a typowych dla spalania paliw organicznych takich jak węgiel kamienny i brunatny. Wyniki programu porównawczego prowadzonego przez Unię Europejską wykazały, że EJ należą do źródeł energii najbardziej przyjaznych dla zdrowia człowieka i środowiska. Oczywiście elektrownie jądrowe nie emitują CO₂ – nie muszą więc płacić opłat za emisje, wprowadzonych przez Komisję Europejską dla zmniejszenia globalnej emisji dwutlenku węgla. Bezpieczeństwo EJ znacznie wzrosło – a przy tym nakłady inwestycyjne udało się utrzymać na umiarkowanym poziomie.

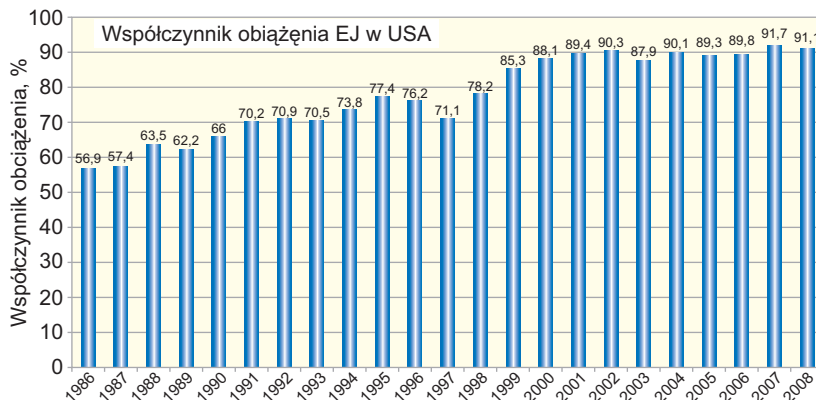
Ale przeciwnicy straszą nas ogromnymi kosztami budowy elektrowni jądrowych. Popatrzmy więc na całość kosztów, łącznie z kosztami paliwa, unieszkodliwiania odpadów i likwidacji elektrowni.

6.1. Czemu energetyka jądrowa stała się tańsza od innych źródeł energii.

6.1.1. Osiągnięcia w eksploatacji elektrowni jądrowych – wysoka dyspozycyjność.

W ciągu pół wieku projektowania, budowy i eksploatacji elektrowni jądrowych energetyka jądrowa osiągnęła ogromny wzrost niezawodności i wykorzystania mocy, zilustrowany na rys. 6.1. Współczynniki wykorzystania mocy zainstalowanej dla wszystkich 104 jądrowych bloków energetycznych w USA przekraczają obecnie 91%, a więc – w porównaniu ze współczynnikami sprzed 20 lat – wzrosły prawie o połowę.

Oznacza to jednocześnie zwiększenie o połowę ilości energii elektrycznej produkowanej w elektrowniach jądrowych, mimo że ich moc pozostała bez zmiany. W skali całego świata – łącznie z krajami rozwijającymi się, jak Indie czy Pakistan (które mają wyniki o wiele słabsze niż kraje wysoko rozwinięte) – średni współczynnik wykorzystania mocy wynosi obecnie 86%.



Rys. 6.1. Wzrost średniego współczynnika wykorzystania mocy dla wszystkich 104 elektrowni jądrowych w USA²⁰²

Równolegle występuje proces przedłużania okresu eksploatacji elektrowni. Pierwotnie projektowane na pracę przez 30 lub 40 lat, obecnie elektrownie jądrowe uzyskują zezwolenia dozoru na przedłużenie okresu eksploatacji do lat 50 i 60, np. w USA 59 reaktorów uzyskało już zezwolenie na pracę przez 60 lat, a dalsze 12 wniosków jest w toku rozpatrywania.

Reaktory III generacji projektuje się od początku tak, by mogły pracować przez 60 lat przy współczynniku dyspozycyjności powyżej 90%.

6.1.2. Wzrost stopnia wypalenia paliwa

Energetyka jądrowa prowadzi konsekwentnie intensywne prace dla zwiększenia stopnia wypalenia paliwa. W pracujących obecnie reaktorach II generacji wypalenie przekroczyło już 45 MWd/kg²⁰³. Dozór jądrowy w USA zezwolił na maksymalne wypalenie 62 MWd/kg²⁰⁴, co odpowiada średniemu wypaleniu około 50-52 MWd/kg. Oznacza to zmniejszenie ilości paliwa usuwanego rocznie z rdzenia i obniżenie jego kosztu (a więc paliwo jest wykorzystywane efektywniej i oszczędniej). Przy wypaleniu 45 MWd/kg do uzyskania z reaktora energii 8 TWh przy sprawności cieplnej 0,33 (w reaktorach II generacji) potrzeba 22,5 tony paliwa, natomiast w reaktorach takich jak EPR o sprawności cieplnej 0,37 i wypaleniu średnim 50 MWd/kg będzie go potrzeba tylko 18 ton. Możliwe

²⁰² www.nei.org/resourcesandstats/nuclear_statistics/usnuclearpowerplants/

²⁰³ MWd/kg – ilość energii mierzona w megawato-dniach jaką uzyskuje się z 1 kilograma paliwa

²⁰⁴ Boston Consulting Group: Economic Assessment of Used Nuclear Fuel Management in the United States, 2006

jest stosowanie w rdzeniu paliwa wykonanego z mieszaniny tlenków uranu i plutonu (MOX)

Dzięki temu maleje ilość odpadów radioaktywnych powstających w całym cyklu paliwowym.

6.1.3. Wprowadzenie możliwości regulacji mocy w funkcji obciążenia

EPR jest zaprojektowany tak, aby zapewnić duże możliwości zmiany mocy w zależności od potrzeb systemu energetycznego. Posiada zdolność do ciągłej pracy na poziomie od 20 do 100% swojej nominalnej mocy w trybie całkowicie automatycznym, w układzie pierwotnej i wtórnej regulacji mocy i częstotliwości.

Reaktor EPR może pracować na 25% mocy znamionowej i zwiększać swą moc z szybkością 2,5% mocy nominalnej na minutę do poziomu 60%, a następnie 5% mocy nominalnej na minutę, aż do pełnej mocy. Oznacza to, że blok może zwiększyć swą moc z 25% do 100% w czasie poniżej 30 minut, chociaż odbywa się to kosztem pewnego zużycia elementów elektrowni.

EPR jest dobrze przystosowany do okresowych lub niezapowiedzianych zmian zapotrzebowania sieci na moc, do zarządzania perturbacjami w sieci elektroenergetycznej oraz do łagodzenia skutków awarii sieciowych.

6.1.4 Ogólna ocena kosztów

Niskie ceny paliwa jądrowego dają kolejne duże zyski. Dla wyprodukowania 8 terawatogodzin energii elektrycznej rocznie potrzeba w przypadku elektrowni węglowej 3 miliony ton węgla za cenę 156 mln euro, a w przypadku elektrowni jądrowej wystarczają 24 tony paliwa jądrowego za cenę 56 mln euro, wliczając w to już koszty unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych. W przypadku ustalenia kosztu emisji CO₂ na poziomie 40 euro/t CO₂, spalanie węgla będzie oznaczało dodatkowy wydatek 250 mln euro, czyli razem 406 mln euro. Korzyści, które daje tanie paliwo jądrowe, są więc dla bloku 1000 MW na poziomie 350 mln euro rocznie (to znaczy tyle można zaoszczędzić wytwarzając energię elektryczną w elektrowni jądrowej zamiast w węglowej).

Koszty inwestycyjne (czyli koszty wybudowania) są wyższe dla elektrowni jądrowej niż węglowej, ale różnicę tę dość szybko niwelują znacznie niższe koszty paliwa. Podczas gdy nakłady inwestycyjne bezpośrednie (*overnight* w terminologii angielskiej) obejmujące prace konstrukcyjno-projektowe, dostawy materiałów i urządzeń oraz koszty budowy dla bloku węglowego o mocy 1000 MW wynoszą około 1,8 miliarda euro, to dla elektrowni jądrowej o tej samej mocy wynoszą one od 2,5 do 3,2

mln euro. Do tego dochodzą wydatki inwestora – np. na działkę lub budowę linii przesyłowej – oraz odsetki od kredytu w trakcie budowy (*IDC – interest during construction*) zależne od okresu budowy i warunków uzyskania kredytu. Ale te wydatki trzeba ponieść także w przypadku budowy elektrowni węglowej. A zyski z taniego paliwa nie znikają po 3-4 latach – dostajemy je rok po roku przez 60 lat eksploatacji elektrowni jądrowej!.

Biorąc to wszystko pod uwagę, bez uwzględnienia kosztów emisji CO₂, elektrownie jądrowe w większości krajów dostarczają prąd nieco taniej niż nowe elektrownie węglowe (te nie posiadające kosztownych instalacji wychwytywania i magazynowania CO₂). Natomiast po uwzględnieniu opłat za emisję CO₂ koszty wytwarzania czystej energii z elektrowni jądrowej są zdecydowanie najniższe. Elementy tego bilansu kosztów będą rozpatrzone poniżej.

6.2. Korzyści ekonomiczne w cyklu paliwowym

6.2.1. Koszty paliwa dla elektrowni jądrowej

Koszty paliwa dla elektrowni jądrowych są – w porównaniu z elektrowniami opalаныmi paliwami organicznymi – małe. Oceńmy ile kosztuje paliwo uranowe dla EJ o mocy 1000 MW (produkcja roczna 8 TWh).

Na koszt 1 kg paliwa reaktorowego z uranu wzbogaconego w postaci UO₂ składają się następujące pozycje:

- Uran naturalny (cena – maj 2009)
w ilości 8,9 kg U₃O₈ x 92 USD/kg 819 USD
- Konwersja U3O8 na UF6 (cena niezmienniona
od 2007 r.) 7,5 kg U x 12 USD/kg 90 USD
- Wzbogacanie uranu w postaci UF6
(cena niezmienniona od 2007 r.) 985 USD
- Produkcja paliwa (cena niezmienniona od 2007 r.) 240 USD/kg
- **Suma za kg gotowego paliwa reaktorowego²⁰⁵ 2134 USD/kg**

Więcej informacji o jądrowym cyklu paliwowym można znaleźć w książce „Podstawy energetyki jądrowej”²⁰⁶.

Jak widzieliśmy powyżej, przy sprawności cieplnej 37% i wypaleniu 45 MWd/kg, dla EJ o mocy 1000 MW produkującej 8 TWh energii elektrycznej rocznie potrzeba 22,5 tony paliwa rocznie, co oznacza koszt paliwa równy 6 USD/2008/MWh, czyli 4,4 euro/MWh. W rzeczywistości w obecnych elektrowniach jądrowych osiąga się większe wypalenie,

²⁰⁵ WNA, The Economics of Nuclear Power, January 2009

²⁰⁶ Celiński Z., Strupczewski A., Podstawy energetyki jądrowej, WNT Warszawa, 1984

a nowe elektrownie III generacji projektowane są na wypalenie 60 000 MWd/t i koszty paliwowe są jeszcze niższe. Przyjmijmy jednak 45 000 MWd/t jako wielkość nie ulegającą dyskusji – stąd roczny koszt samego paliwa wyniesie $8 \text{ mln MWh} \times 4,4 \text{ euro/MWh} = 35 \text{ mln euro}$.

6.2.2. Koszty unieszkodliwiania odpadów

Koszty unieszkodliwiania odpadów zależą od tego, czy wypalone paliwo będzie umieszczane bezpośrednio pod ziemią, czy też będziemy stosować przerób paliwa wypalonego, odzysk materiałów rozszczepialnych i ponowne użycie ich w postaci paliwa z mieszaniny tlenków plutonu i uranu (MOX) – czyli recykling paliwa. W przypadku bezpośredniego składowania opłaty wnoszone przez operatora elektrowni wynoszą 1 USD/MWh. W przypadku przerobu koszty są nieco wyższe, ale przerób paliwa wypalonego jest wariantem preferowanym ze względu na szereg zalet, przede wszystkim:

- Radykalną zmianę wymagań wobec składowania odpadów promieniotwórczych, które przy przerobie obejmują mały procent (około 4%) pierwotnej masy paliwa i wymagają czasu składowania liczonego w setkach, a nie w dziesiątkach tysięcy lat.
- Odzysk materiałów rozszczepialnych – uranu i plutonu – który zabezpieczy potrzeby paliwowe energetyki jądrowej przez tysiące lat i zapewni stabilizację cen paliwa.

Koszty przerobu paliwa wypalonego oceniono w studium BCG²⁰⁷ na 520 USD'2006/kg. U przy przyjęciu oceny, że wartość odzyskanego paliwa oceniamy na podstawie kosztu uranu naturalnego. Koszt ten wynosił wtedy 66 USD'2006/kg. Od tej pory koszt ten wzrósł, co oznacza większe zyski z odzyskanego uranu i plutonu i odpowiednio mniejszy koszt przerobu. Pomijając ten wzrost zysków można przyjąć bezpiecznie, że koszty przerobu paliwa dla reaktora o mocy 1000 MW produkującego 8 TWh rocznie wyniosą 11,7 mln USD z 2006 roku, a więc 1,46 USD 2006/MWh.

6.2.3. Pozytywne doświadczenie z likwidacji i rozbiórki elektrowni po zakończeniu jej okresu pracy.

Reaktory starszych typów, w szczególności reaktory typu Magnox²⁰⁸ i AGR²⁰⁹ (grafitowo-gazowe) w Wielkiej Brytanii, nie były przystosowane do demontażu i likwidacji. Koszty tych operacji są bardzo duże. Natomiast reaktory PWR i BWR²¹⁰ dają się łatwo demontować i likwidować.

²⁰⁷ Boston Consulting Group: Economic Assessment of Used Nuclear fuel Management in the United States, 2006

²⁰⁸ Magnox – reaktory z koszulkami paliwowymi z tlenku magnezu – magnesium oxide

²⁰⁹ AGR – *advanced graphite reactor* – udoskonalony reaktor grafitowo-gazowy

wać, a energetyka jądrowa nagromadziła już sporo doświadczeń z wykonywania tych operacji.²¹¹

Koszt likwidacji elektrowni wg danych OECD z 2003 roku wycenionych w USD/2001 wynosi dla reaktorów PWR od 200 do 500 USD/ kW, dla reaktorów WWER²¹² około 330 USD/ kW, dla BWR 300-550 USD/kW, dla CANDU 270-430 USD/ kW, natomiast dla reaktorów typu Magnox aż 2600 USD/ kW. Elektrownie jądrowe z reaktorami III generacji są od początku projektowane z myślą o ich przyszłej likwidacji. Wobec tego, że w ciągu 60 lat pracy elektrownia wyprodukuje 480 TWh, można przeliczyć, ile powinny wynieść dopłaty do każdej jednostki wyprodukowanej energii elektrycznej, by pokryć przyszłe koszty likwidacji elektrowni.

Okazuje się, że wystarcza, gdy opłaty na likwidację wynoszą 1 USD/MWh. By mieć gwarancję, że nie zostaną one wykorzystane do innych celów, opłaty te umieszczane są na oprocentowanym rachunku bankowym kontrolowanym przez zespół powierniczy, a nie przez operatora elektrowni²¹³. Bez oprocentowania daje to fundusz w wysokości 480 mln USD. Przy uwzględnieniu oprocentowania otrzymujemy po 60 latach sumę kilkakrotnie większą. Np. po umieszczeniu w banku 1000 USD na 60 lat na 2 % otrzymujemy 3280 USD. W rzeczywistości odnosi się oprocentowanie do wielkości inflacji, a uzyskanie 2% ponad poziom inflacji można uznać za standardowe. Tak więc po zakończeniu pracy elektrowni jądrowej otrzymamy sumę znacznie większą niż będzie potrzebna na jej likwidację.

6.2.4. Łączne koszty paliwa, unieszkodliwiania odpadów i likwidacji elektrowni.

Razem koszty paliwa, składki na likwidację EJ i przerobu paliwa wypalonego dla reaktora np. EPR jako jednego z reaktorów III generacji wyniosą 8,5-9 USD/MWh, lub po przeliczeniu na euro przyjmujemy z zapasem 7 euro/MWh. Wielkość ta podawana jest jako pesymizacja przez World Nuclear Association²¹⁴, a także w lutym 2009 była podana przez OECD²¹⁵ w ramach założeń do obliczeń porównawczych publikowanych co 2 lata dla elektrowni różnego typu. Rocznie trzeba więc wydać dla EJ o mocy 1000 MW co najwyżej 7 euro/MWh x 8 TWh = 56 mln euro/rok.

²¹⁰ BWR-*Boiling water reactor* – reaktor z wodą wrzącą

²¹¹ NEA Decommissioning of nuclear power facilities, NEA 5728, 2006

²¹² WWER – *wodo-wodianoj energetycznej reaktor* – reaktor wodny ciśnieniowy produkcji radzieckiej.

²¹³ Jak w poz. 200

²¹⁴ World Nuclear Association: The economics of nuclear power, June 2009

²¹⁵ WEO Power Generating Cost Assumptions 2008, OECD Feb. 2009 Initial Data

Porównajmy to z kosztem spalania węgla w elektrowni węglowej.

6.2.5. Koszty spalania węgla w elektrowni węglowej

Średni koszt węgla w 2008 r. wyniósł 223 PLN/t, a w lutym 2009 roku 72 USD/tonę co odpowiadało 230 PLN/t. (Wg ocen NYMEXu z maja 2009, cena węgla oczekiwana na rynku futures wynosi 76 USD/t).

Pomijając koszt transportu przyjmijmy cenę węgla 55 euro/t. Dla elektrowni węglowej (EW) na parametry nadkrytyczne o sprawności 43% spalającej 3 mln ton na 8 TWh da to koszt paliwa 165 mln euro/rok.

Ponadto opłaty za emisję przy stawce 39 euro/tonę CO₂ wyniosą, przy produkcji 8 TWh/rok, około 248 mln euro/rok. Razem koszt węgla i emisji CO₂ wyniesie 413 mln euro/rok. Różnica kosztów paliwowych to 359 mln euro/rok na korzyść EJ.

Tabela 6.1. Zestawienie kosztów paliwa jądrowego i spalania węgla dla elektrowni o mocy 1000 MW, produkującej 8 TWh/rok

Material/Proces	Rocznie
Koszty paliwa, 2134 USD2006/kg x 22 500 kg	35 mln euro
Odpady 12 mln USD2006/rok	10 mln euro
Likwidacja EJ 1 USD2006/MWh	6 mln euro
Razem dla EJ	51 mln euro
Wielkość przyjęta z zapasem przez OECD	56 mln euro/rok
Koszt węgla, 3 mln ton x 55 euro/t	165 mln euro
Opłaty za emisję CO ₂ , przy stawce 39 euro/t CO ₂	248 mln euro
Razem dla spalania węgla	413 mln euro
Różnica między EW i EJ	357 mln euro

6.3. Nakłady inwestycyjne

6.3.1. Standaryzacja elementów i skrócenie czasu budowy

W reaktorach III generacji stosuje się standaryzację elementów, co pozwala obniżyć koszty budowy i skrócić jej czas. Na przykład w reaktorze AP1000 stanowiącym najdalej idący przykład standaryzacji i stosowania biernych układów bezpieczeństwa udało się obniżyć ilości elementów spełniających wymagania klas bezpieczeństwa jądrowego.

Duża część elementów jest prefabrykowana, co umożliwia skrócenie czasu budowy. Elektrownia składana jest z kilkuset modułów, niemal jak z klocków Lego. Dla reaktora AP 1000 planowany czas budowy od początku wylewania płyty fundamentowej do zakończenia rozruchu reaktora wynosi 48 miesięcy.

Zbudowano już w Japonii reaktory ABWR należące także do III generacji i czas ich budowy wyniósł rzeczywiście 48 miesięcy²¹⁶.

Budowa EJ Flamanville-3 z reaktorem EPR przebiega bez opóźnień i zgodnie z planowanym budżetem. Można się o tym przekonać w internecie²¹⁷, czytając co miesiąc informacje o zaawansowaniu budowy, śledząc raporty dozoru jądrowego lub wręcz patrząc na aktualne zdjęcia z placu budowy.

Natomiast w pierwszej elektrowni z reaktorem EPR budowanej w Finlandii w Olkiluoto wystąpiły znaczne opóźnienia i koszty inwestycyjne wzrosły (wynika to z faktu, że jest to konstrukcja prototypowa i podczas budowy ujawniło się wiele trudności, których wcześniej nie dało się przewidzieć, ale które już zostały rozwiązane w kolejnych budowach bloków EPR). Finowie zdają sobie sprawę, że jest to efekt uruchamiania produkcji dla EJ po bardzo długiej przerwie i w następnych EJ takie opóźnienia i podwyżki kosztów nie wystąpią. Świadczy o tym złożenie trzech dalszych wniosków przez trzy różne firmy o zezwolenie na budowę trzech kolejnych reaktorów w Finlandii. Jednakże spory, jakie wyniknęły przy budowie Olkiluoto 3 z racji opóźnień i trudności w realizacji bloku, potwierdzają słuszność przyjętej w Polsce filozofii zgodnie z którą chcemy kupić reaktor sprawdzony, pozytywnie oceniony po doświadczeniach z budowy w innych krajach.

6.3.2. Nakłady inwestycyjne dla elektrowni jądrowych

Nakłady inwestycyjne na EJ są wyższe niż na elektrownie węglowe. Dla EJ Flamanville o mocy 1650 MWe wyniosą one łącznie 4 mld euro²¹⁸, co daje na jednostkę mocy koszty 2450 euro²⁰⁰⁸/kW. W EJ Olkiluoto 3 koszty ocenia się obecnie na 3000 euro/kW, a mogą okazać się wyższe.

W USA w ciągu ubiegłego półtora roku zawarto szereg kontraktów i złożono wnioski o zezwolenie na budowę ponad 30 bloków jądrowych dużej mocy. Wielkość bezpośrednich kosztów inwestycyjnych (prace inżynierskie, dostawy i budowa elektrowni) wahała się w granicach od 2800 do 3200 euro/kW. W założeniach do studium ekonomicznego OECD 2009 przyjęto jednostkowe nakłady inwestycyjne dla EJ w Europie 2450 euro²⁰⁰⁸/kW²¹⁹ a w USA 2750 euro²⁰⁰⁸/kW²²⁰.

²¹⁶ WNA: Advanced Nuclear Power Reactors, July 2009, <http://www.world-nuclear.org/info/inf08.html>

²¹⁷ <http://energy.edf.com/edf-fr-accueil/edf-and-power-generation/nuclear-power/the-future-of-nuclear-power/epr-y-flamanville-3/technical-news-108256.html>

²¹⁸ www.world-nuclear-news.org/C-EdF_plans_for_future_nuclear_growth-0412084.html

²¹⁹ euro²⁰⁰⁸ to euro o wartości z 2007 roku

²²⁰ WEO Power Generating Cost Assumptions 2008, OECD Feb. 2009 Initial Data

Podobną wartość średnią dla USA równą 3900 USD'2008/kW (2800 euro'2008/kW) podaje raport przygotowany przez Wydział Badań Kongresu USA w końcu 2008 roku²²¹. W sierpniu 2009 roku dyrektor firmy Areva dostarczającej reaktory EPR podał, że przybliżony koszt elektrowni z reaktorem EPR wyniesie 5-6 mld euro, co w przeliczeniu na 1000 MW daje 3030-3600 mln euro.

Dla drugiej z kolei i dalszych EJ w Polsce można uwzględnić pozytywny wpływ jaki zbieranie doświadczenia w budowie nowych elektrowni jądrowych będzie miało na obniżkę kosztów. Przykładem tego jest sprawna budowa drugiego reaktora EPR instalowanego w EJ Flamanville we Francji, w której owocuje doświadczenie z budowy prototypowego reaktora EPR w Olkiluoto 3 w Finlandii związanej z szeregiem problemów technicznych. Dlatego można byłoby przyjąć, że nakłady inwestycyjne na drugą i dalsze elektrownie jądrowe w Polsce będą niższe niż obecnie, ale przyjmijmy pesymistycznie że będą one równe średnim nakładom podanym przez firmę Areva, czyli 3300 euro/kW.

Jest to dużo – ale by zorientować się w tym co się opłaca w energetyce, porównajmy te nakłady z nakładami na elektrownie węglowe – a potem z nakładami na elektrownie wiatrowe.

6.3.3. Porównanie nakładów inwestycyjnych dla EJ z nakładami na elektrownie węglowe

Dla elektrowni węglowej (EW) w Polsce ceny w 2008 r. wynosiły od 1800 euro/ kW do 2000 euro/ kW. Przyjmijmy koszt 1875 euro/ kW jak dla projektowanej elektrowni węglowej w dawnej kopalni Czeczot²²².

Różnica nakładów inwestycyjnych wynosi więc dla drugiej i dalszych EJ w Polsce 1425 euro'2009/ kW. Jest to równowartość różnicy kosztów paliwowych i opłat za emisję CO₂, jakie trzeba byłoby ponieść w razie spalania importowanego węgla²²³ zamiast paliwa jądrowego w ciągu około 4 lat.

Do kosztów bezpośrednich (ang. overnight) obejmujących prace inżynieryjne, dostawy i budowę EJ trzeba jeszcze doliczyć koszty inwestora – np. na zakup działki i budowę linii przesyłowych – oraz koszty kapitału do chwili zakończenia budowy, zależne od czasu budowy i warunków finansowania. Ale koszty te wystąpią także przy budowie elektrowni węglowej lub wiatrowej. W każdym razie porównanie z węglem

²²¹ Kaplan S.: Power Plants: Costs and Characteristics, Nov. 13, 2008, Congressional Research Service, USA

²²² WNP: RWE i KW parafowały umowę zawiązania spółki, która wybuduje elektrownię za 1,5 mld euro, wnp.pl 15-04-2009

²²³ Wobec tego, że Polska już obecnie jest importerem węgla netto należy oczekiwać, że energetyka jądrowa zastąpi przyszły import węgla do naszego kraju.

wskazuje, że dzięki małym kosztom paliwa jądrowego mimo wysokich nakładów inwestycyjnych energetyka jądrowa jest opłacalna.

Aby przekonać się, czy tak jest naprawdę, trzeba wykonać pełne studium ekonomiczne. Póki nie będzie ono opracowane i opublikowane dla warunków polskich, możemy korzystać z wyników studiów wykonywanych przez obiektywne ośrodki uniwersyteckie i rządowe w innych krajach.

Przyjrzyjmy się więc wynikom dwóch takich studiów wykonanych przez ośrodki uniwersyteckie w USA i w Finlandii, niezależne od przemysłu jądrowego i wysoko cenione za swą kompetencję w sprawach energetyki i ogólny poziom naukowy.

6.4. Porównania kosztów energii z różnych źródeł

6.4.1. Porównanie kosztu wytwarzania energii elektrycznej z różnych źródeł opracowane w MIT

Koszty energii elektrycznej z elektrowni jądrowej zależą w dużym stopniu od oprocentowania kapitału. Potwierdzają to wyniki najnowszego pełnego studium ekonomicznego wykonanego przez cieszący się najwyższym uznaniem amerykański ośrodek uniwersytecki Massachusetts Institute of Technology (MIT)²²⁴. W studium tym przyjęto jako założenia, że czas pracy wszystkich elektrowni – jądrowej (EJ), węglowej (EW) i gazowej (EG) wynosi 40 lat, a współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej 0,85. Są to założenia niekorzystne dla EJ, bo już obecnie połowa elektrowni jądrowych w USA ma zezwolenie na pracę przez 60 lat, a EJ z reaktorami III generacji projektuje się z założeniami na 60 lat przy współczynniku wykorzystania mocy nie mniejszym niż 90%. Sprawność cieplną przyjęto dla EJ równą 0,33 (choć reaktor EPR ma sprawność 0,37), dla EW 0,385, a dla EG 0,50. Czas budowy przyjęto dla EJ równy 5 lat, dla EW 4 lata i dla EG 2 lata.

Bezpośrednie nakłady inwestycyjne dla EJ przyjęto równe 4 mld USD/2007/1000 MW. Dla oceny kosztów kredytu założono, że dla wszystkich elektrowni udział kapitału z pożyczki bankowej wyniesie 60% a z kapitału własnego 40%, z oprocentowaniem pożyczek 8% i oprocentowaniem kapitału własnego 12%.

Koszt uranu naturalnego przyjęto jako równy 80 USD/kg U (wszystkie ceny w USD z 2007 roku), koszt wzbogacania 160 USD/SWU²²⁵, koszt konwersji z U_3O_8 na UF_6 6 USD/kg U oraz koszt produkcji paliwa

²²⁴ Deutch J.M. et al.: Update of the MIT 2003 Future of Nuclear Power Study, June 2009

²²⁵ SWU (separation work unit) – jednostka pracy rozdzielczej, dla uzyskania 1 kg uranu wzbogaconego do 4% potrzeba około 7 SWU.

z uranu wzbogaconego 250 USD/kg U. Autorzy studium MIT stwierdzili, że dla wzbogacenia początkowego wsadu uranowego 9,08 kgU do 4% potrzeba pracy rozdzielczej 6,99 SWU. Stopień wypalenia paliwa reaktorowego przyjęto 50 MWd/kgU. Wzrost realny kosztu paliwa uranowego przyjęto w wysokości 0,5% na rok plus inflacja, co daje średnią cenę w ciągu 40 lat równą 0,76 USD/GJ lub 2,74 USD/MWh.

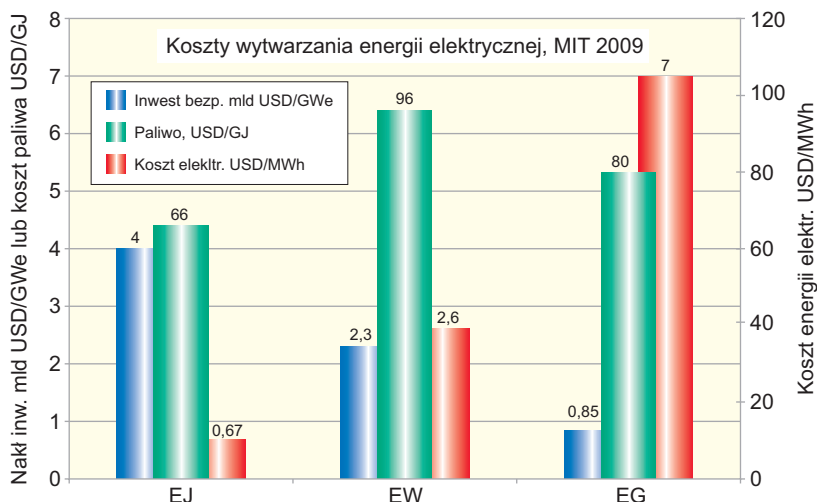
Okazało się, że koszt energii elektrycznej z elektrowni jądrowej wyniesie 66 USD'2007/MWh, czyli 47 euro'2007/MWh. Natomiast gdy w studium MIT założono udział kapitału własnego równy 50%, a stopę zwrotu z kapitału 15%, to koszt wytwarzania energii elektrycznej wzrósł do 84 USD'2007/MWh, czyli 63 euro'2007/MWh. W tym kontekście warto podkreślić, że wg cytowanego powyżej Raportu Kongresu USA oprocentowanie pożyczek bankowych zależy od wiarygodności inwestora i waha się od 5% dla inwestorów państwowych do 7% dla dużych firm energetycznych i 10% dla niezależnych wytwórców energii, nie mających wydzielonych obszarów działania i ustalających ceny niezależnie od komisji stanowych w oparciu o potrzeby rynku. W razie udzielenia przez państwo gwarancji, oprocentowanie pożyczki może być bardzo małe, rzędu 5%.

Dla porównań z węglem i gazem w studium MIT przyjęto koszt węgla niższy niż obecnie obserwowany na rynku, mianowicie 65 USD/t, a eskalację ceny 0,5% rocznie, stąd średni jednostkowy koszt ciepła wytwarzanego z węgla przez 40 lat wynosi 2,94 USD/GJ, a średnia cena węgla 73,4 USD/t. Dla gazu przyjęto to samo tempo eskalacji otrzymując średni koszt energii cieplnej z gazu przez 40 lat 7,9 USD/GJ. Opłaty za emisję dwutlenku węgla przyjmowano w różnej wysokości. W przypadku opłat emisyjnych wynoszących 40 USD/t CO₂ otrzymano wyniki pokazane na rysunku 6.2.

Jak widać, energia jądrowa jest zdecydowanie tańsza od energii uzyskiwanej ze spalania węgla i gazu.

6.4.2. Porównanie nakładów inwestycyjnych na energetykę jądrową i wiatrową

Energetyka jądrowa jest też wyraźnie tańsza od energii odnawialnej. W szczególności koszty wiatraków są duże ze względu na wysokie nakłady inwestycyjne i niski współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej. Dla przykładu, w opracowaniu przemysłu brytyjskiego CBI (Confederation of British Industry) z czerwca 2009 przyjęto, że nakłady inwestycyjne bezpośrednie na elektrownię jądrową 1000 MW wyniosą 2,85 mld euro'2007 z dodatkowym kosztem 570 mln euro'2007 na likwidację elektrowni, podczas gdy farma wiatrowa na morzu pracująca ze współczynnikiem wykorzystania mocy 0,34



Rys. 6.2. Koszty wytwarzania energii elektrycznej wg studium MIT z 2009 r. (nakłady inwestycyjne podano jako bezpośrednie (typu overnight) bez oprocentowania kapitału, (oprac. własne przy założeniu opłat za emisję w wysokości 40 USD/t CO₂)

i wytwarzająca rocznie taką samą ilość energii kosztowałaby 7,4 mld euro. Ponadto, ze względu na konieczność dostarczania mocy do sieci, gdy siła wiatru jest mała, potrzeba dobudować linie przesyłowe za 1,4 mld euro i rezerwowe elektrownie opalane gazem za dalsze setki milionów euro²²⁶.

Wysokie koszty inwestycyjne dla wiatraków mogą wzbudzić zdziwienie w czytelniku przywykłym do sloganu, że energia z wiatraków jest za darmo, a wiatraki są małe, smukłe i tanie. W rzeczywistości wymagają one znacznie więcej betonu i stali na jednostkę mocy niż elektrownia jądrowa²²⁷.

Wieża wiatraka o wysokości 100 m z turbiną o wielkości autobusu i trzema 50-metrowymi łopatom wirnika tnącymi powietrze z prędkością ponad 150 km/h wymagają dużych i solidnych fundamentów. Wg danych z USA, dla wiatraka o mocy 1,5 MW waga turbiny wynosi ponad 56 ton, zestaw łopatek wirnika waży ponad 35 ton, a cała wieża waży ponad 160 ton. Podstawę każdej 100 metrowej wieży tworzy ośmiokąt

²²⁶ CBI: Decision time, July 2009, www.cbi.org.uk

²²⁷ J. Elias, A. Biwan: Analiza porównawcza siłowni jądrowej z siłownią wiatrową – przykład praktycznego zastosowania. „Energetyka 2006” – Politechnika Wrocławska; 8-10 listopada 2006r.

o średnicy 13 m, który wypełnia 12 ton stali zbrojeniowej i 180 m³ betonu. A pamiętajmy, że produkcja cementu jest jednym z poważnych źródeł emisji CO₂²²⁸. Wg danych firmy VESTAS budujących wiatraki w Europie – w tym i w Polsce – waga turbiny o mocy szczytowej 2 MW to 70 ton, łopatek dalsze 34 tony, cała wieża to 140 ton stali, a fundamenty to 860 ton betonu²²⁹.

Aby farmy wiatrowe w Polsce – gdzie średni współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej (szczytowej) wynosi 0,2 – wytwarzały energię w ilości porównywalnej z produkcją elektrowni jądrowej lub cieplnej konwencjonalnej o mocy 1000 MW, potrzeba 2500 wiatraków o mocy szczytowej 2 MW. Oznacza to 2500 x 860 = 2 150 000 ton betonu – dwieście piętnaście tysięcy ton oraz 240 x 2500 = 60 tysięcy ton stali, które po upływie 20 lat trzeba usunąć na składowisko.

W analizie wykonanej przez Politechnikę Szczecińską, gdzie jako wielkość odniesienia przyjęto **całkowitą ilość energii wytworzonej** w ciągu życia elektrowni, ocenianego na 40 lat dla elektrowni jądrowej i 20 lat dla elektrowni wiatrowej (założenia na niekorzyść EJ), okazało się, że charakterystyczne wskaźniki dla obu typów elektrowni przedstawiają się następująco²³⁰.

- **Zapotrzebowanie na powierzchnię** jest ponad 28 razy większe dla elektrowni wiatrowej.
- **Emisja CO₂**, przy uwzględnieniu całego cyklu budowy i likwidacji elektrowni, jest dwukrotnie większa dla energii wiatrowej.
- **Zapotrzebowanie materiałowe** odniesione do całkowitej ilości energii wytworzonej w trakcie cyklu życia w elektrowni jest ponad dwukrotnie większe dla elektrowni wiatrowej.
- Stosunek energii potrzebnej do produkcji elementów i budowy do **całkowitej ilości energii wytworzonej** w ciągu całego cyklu życia elektrowni jest 4,5 razy WIEKSZY dla elektrowni wiatrowej niż dla jądrowej. Twierdzenia działaczy fundacji Greenpeace jakoby elektrownie wiatrowe dawały 2 razy więcej energii elektrycznej na jednostkę nakładów inwestycyjnych są więc sprzeczne z bezstronnymi ocenami polskiej politechniki, a także niemieckiego instytutu na Uniwersytecie w Stuttgarcie, wyspecjalizowanego w analizach porównawczych w dziedzinie energetyki²³¹.

²²⁸ Eric Rosenbloom: A Problem With Wind Power, September 5, 2006 www.aweo.org/

²²⁹ General Specification, V80 – 2.0 MW, OptiSpeedTM – Wind Turbine, VESTAS

²³⁰ tamże

²³¹ T. Marheineke, W. Krewitt, J. Neubarth, R. Friedrich, A. Voß: Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken, Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung Band 74, August 2000.

W Polsce ceny elektrowni wiatrowych są jeszcze wyższe niż w Wielkiej Brytanii, bo warunki wiatrowe są u nas gorsze. Koszt elektrowni wiatrowej na Bałtyku wynosi 3 mld euro/1000 MW²³². Przyjmując współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej równy 0,35 widzimy, że do wyprodukowania energii takiej jak z elektrowni jądrowej o mocy 1000 MW potrzeba byłoby nakładów inwestycyjnych około 9 mld euro.

W sumie są to więc nakłady dużo większe, niż nakłady na elektrownie jądrowe. Co więcej, wiatraki pracują przez 20 lat. Dla elektrowni jądrowych II generacji przyjmuje się czas eksploatacji 40 lat, ale dla elektrowni III generacji to już 60 lat. W ciągu 60 lat trzeba wiatraki zbudować trzykrotnie – co oznacza odpowiednio większe nakłady inwestycyjne. Odpowiednio do tak wysokich nakładów inwestycyjnych kształtują się koszty elektryczności uzyskiwanej z wiatraków. W Polsce wynoszą one obecnie sumę kosztu energii elektrycznej z elektrowni systemowej – około 168 zł/MWh – i kosztu tzw. zielonego certyfikatu²³³ wynoszącego ponad 240 zł/MWh, razem około 406 zł/MWh. Wprowadzanie odnawialnych źródeł energii (OZE) jako głównego źródła energii elektrycznej oznacza więc duży wzrost kosztu energii, natomiast elektrownie jądrowe III generacji, dostarczające „czysty” prąd taniej niż węglowe, stanowią szansę powstrzymania podwyżek cen energii elektrycznej w kraju, a w dalszej perspektywie nawet ich obniżenia.

Rozwój energetyki jądrowej stanowi też ważną szansę dla przemysłu polskiego. W czasie budowy elektrowni jądrowej w Żarnowcu przemysł polski był zdolny produkować i dostarczać dla elektrowni jądrowych prawie wszystkie elementy z wyjątkiem paliwa, zbiornika reaktora i niektórych urządzeń części reaktorowej elektrowni. Oznaczało to spełnianie najwyższych wówczas na świecie wymagań zapewnienia jakości. W razie podjęcia budowy elektrowni jądrowych w Polsce możemy dojść do podobnego poziomu zaangażowania, jeżeli nie dla pierwszej to dla drugiej i następnych elektrowni. Nakłady inwestycyjne i związane z nimi miejsca pracy pozostaną w Polsce.

6.5. Pełne porównanie kosztów energii uzyskiwanej z różnych źródeł.

6.5.1. Ocena ekonomiczna opracowana w Finlandii.

Studium fińskie, oparte na szczegółowych analizach ekonomicznych uwzględniających aktualne współczynniki wykorzystania mocy i inne

²³² <http://www.wnp.pl/wiadomosci/84798.html>

²³³ Zielony certyfikat to świadectwo, że energia została wytworzona w elektrowni wykorzystującej odnawialne źródła energii (OZE).

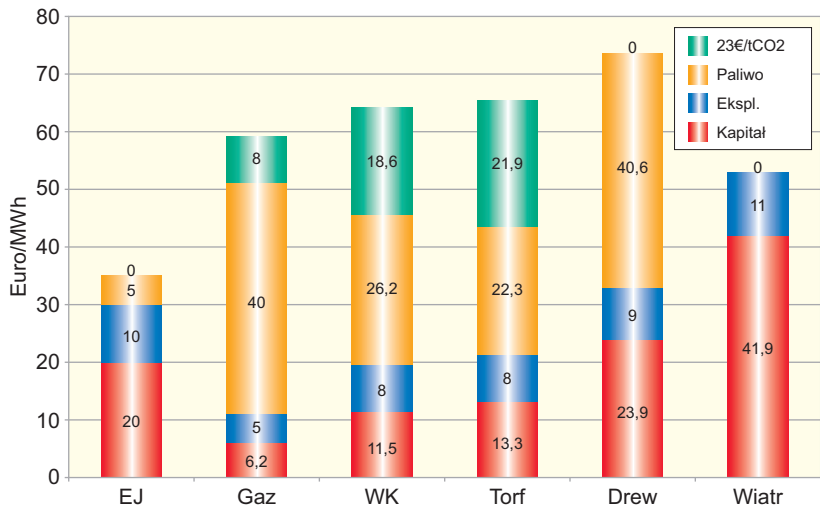
parametry elektrowni jądrowych na świecie i w Finlandii²³⁴ przedstawia porównanie sześciu możliwych źródeł energii, mianowicie energii jądrowej (EJ), elektrowni węglowej kondensacyjnej (WK), elektrowni gazowej z obiegiem kombinowanym gazowo-parowym (Gaz), elektrowni opalanej torfem (Torf) lub drewnem (Drew) i elektrowni wiatrowej (Wiatr).

Jako elektrownię odniesienia w cyklu węglowym przyjęto pracującą w Finlandii elektrownię Meri-Pori o mocy 560 MW opalaną pyłem węglowym, a w przypadku torfu rozpatrywano spalanie w złożu fluidalnym. Dane dla elektrowni gazowej przyjęto zgodnie z najnowszymi osiągnięciami technicznymi w praktyce międzynarodowej. Moce elektrowni węglowej i gazowej wybrano dostatecznie duże by zrealizować korzyści efektu skali. Elektrownia węglowa byłaby zlokalizowana na wybrzeżu morskim. Wielkość elektrowni torfowej ograniczono do 150 MW, ponieważ przy większej mocy transport paliwa stałby się zbyt dużym obciążeniem. Dla elektrowni wiatrowej nie uwzględniano subsydiów, ale założono, że system odbierze energię wiatru zawsze, kiedy tylko zostanie ona wytworzona i nie uwzględniano kosztów elektrowni rezerwowych. Innymi słowy, pominięto wszelkie koszty wynikające z dorywczej i nieprzewidywalnej pracy wiatraków.

Przy ocenie kosztów produkcji energii elektrycznej przyjęto stopę procentową 5% rocznie i ustalony poziom cen ze stycznia 2008 roku. Czas budowy elektrowni jądrowej przyjęto jako równy 5 lat. Wszystkie wydatki na gospodarkę odpadami radioaktywnymi (łącznie z paliwem wypalonym) i likwidację elektrowni są ujęte w zmiennych kosztach eksploatacji i utrzymania poprzez coroczne wpłaty do funduszu odpadów jądrowych.

Koszty wytwarzania energii elektrycznej przy rocznej pracy przez 8000 godzin na pełnej mocy (co odpowiada współczynnikowi wykorzystania mocy 91%) pokazano na Rys. 6.3. Koszt energii elektrycznej wytwarzanej w elektrowni jądrowej wyniósł 35 euro/MWh, w elektrowni węglowej 64,4 euro/MWh, w elektrowni gazowej 59,2 euro/MWh, opalanej torfem 65,5 euro/MWh, a drewnem 73,6 euro/MWh (drewno nie jest obciążone podatkiem od CO₂ pomimo że spalanie drewna emituje CO₂). Elektrownie wiatrowe dostarczać mogą energię elektryczną po cenie 52,9 euro/MWh przy założeniu, że pracują na pełnej mocy przez 2200 godzin w roku i nie ponoszą żadnych kosztów z powodu pracy nieciągłej. Nie uwzględniano też kosztów demontażu dla wiatraków – chociaż uwzględniano je dla elektrowni jądrowych.

²³⁴ R. Tarjanne, A. Kivistö, Comparison of Electricity Generation Costs, Research Report, Lappeenranta University of Technology, 11 February 2008.



Rys. 6.3. Koszty wytwarzania energii elektrycznej przy pracy przez 8000 godzin /rok przy realnej stopie procentowej 5% wg studium fińskiego²³⁵

Dominującą składową kosztów w przypadku elektrowni jądrowej są nakłady inwestycyjne, natomiast koszt paliwa jądrowego jest niski. W przypadku innych źródeł energii dominującą składową stanowi koszt paliwa, za wyjątkiem elektrowni wiatrowych, dla których jednostkowe nakłady inwestycyjne są ponad dwukrotnie wyższe niż dla elektrowni jądrowych. Wyniki studium fińskiego należy rozpatrywać w kontekście cen z początku 2008 roku – w końcu 2009 roku ceny są już wyższe, jak pokazano na poprzednim rysunku z wynikami studium MIT. Jednakże stosunek kosztów energii jądrowej do innych źródeł energii niewiele się zmieni. Koszty energii ze spalania węgla wzrosną, bo autorzy fińscy zakładali cenę emisji 23 euro/t CO₂, a cena przewidywana przez Komisję Europejską to 39 euro/t CO₂ – lub więcej.

Podobnie wzrosną koszty energii wiatrowej wobec jądrowej, bo nakłady inwestycyjne na wiatr są znacznie większe niż na energię jądrową. W razie podwyższenia stóp procentowych energia wiatrowa odczuje to najbardziej. Ceny gazu już wzrosły – a właśnie ceny paliwa są kluczowym elementem w porównaniach energii jądrowej i elektrowni węglowych i gazowych. Tak więc nic dziwnego, że mimo wzrostu kosztów inwestycyjnych elektrowni jądrowych firmy fińskie nadal wierzą

²³⁵ Tarjanne Risto, Kivistö Aija: Comparison of electricity generation costs, Lappeenranta University of Technology Research report EN A-56, February 2008

w to, że jest to energia najtańsza – i składają do rządu wnioski o zezwolenie na budowę kolejnych elektrowni jądrowych. Obecnie (połowa 2009 roku) ceny są wyższe dla wszystkich źródeł energii, ale energia jądrowa pozostaje nadal najtańsza. Według oceny przedstawionej przez Biuro Ocen Kongresu USA²³⁶ całkowite uśrednione koszty wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych wyniosą 83,2 USD/2007/MWh (a więc w przeliczeniu 59 euro/2007/MWh), a według ocen francuskich energia elektryczna z nowej elektrowni we Flammanville-3 będzie kosztować 56 euro/2008/MWh.

6.5.2. Analizy brytyjskie potwierdzają, że elektrownie jądrowe wytwarzają energię najtaniej.

Przez wiele lat rząd brytyjski prowadził politykę silnego poparcia dla energii wiatrowej, uważając że dzięki bardzo silnym wiatrom znad Atlantyku wiatraki zapewnią energię elektryczną w brytyjskim systemie energetycznym. Jeszcze w 2003 roku rząd przewidywał intensywny rozwój energetyki wiatrowej i nakładał na energetykę jądrową podatek od produkowanej energii elektrycznej zwany „podatkiem od emisji CO₂” – chociaż oczywiście elektrownie jądrowe nie emitują CO₂ – przeznaczony na finansowanie rozwoju wiatraków. Ale okazało się, że polityka ta nie zdała egzaminu. W okresie trzech lat od 2003 do 2005 roku cena energii elektrycznej wzrosła o 170%²³⁷, wobec niepewnej i przerywanej pracy wiatraków wystąpiła perspektywa braków prądu w sieci, a emisje CO₂ wzrosły zamiast zmaleć. W 2004 r. Królewska Akademia Inżynierii opracowała studium porównawcze²³⁸, w którym oceniła koszty związane z potrzebą zapewnienia mocy rezerwowych dla wiatraków. Chociaż w tym czasie Wielka Brytania dysponowała jeszcze gazem ziemnym ze złóż pod Morzem Północnym, koszty mocy rezerwowej okazały się znaczne. Porównanie wykazało, że najkorzystniejsza ekonomicznie jest energia jądrowa. Późniejsze analizy prowadzone przez agencje rządowe dały podobne wyniki, i w styczniu 2008 roku rząd brytyjski ogłosił, że rozwój energetyki jądrowej jest konieczny²³⁹.

Jak wspominaliśmy powyżej, w opracowaniu Federacji przemysłu brytyjskiego CBI²⁴⁰ z czerwca 2009 r. przeprowadzono porównanie kosz-

²³⁶ Stan Kaplan Power Plants: Characteristics and Costs, November 13, 2008, Congressional Research Reports <http://openncrs.com/document/RL34746> dostęp 25.07.2009

²³⁷ Ham A., Hall R.: A way forward for nuclear power, Energy Review Submission, 20 February 2006, www.berr.gov.uk/files/file28276.pdf

²³⁸ The Royal Academy of Engineering. The Costs of Generating Electricity, March 2004

²³⁹ Department for Business, Enterprise & Regulatory Reform, Meeting the Energy Challenge, A White Paper on Nuclear Power, January 2008 <http://www.berr.gov.uk/energy/nuclear-whitepaper/footnotes/page43277.html>

²⁴⁰ Confederation of British Industry (CBI): Decision time, July 2009, www.cbi.org.uk

tów energii elektrycznej dostarczanej przez wiatraki i przez elektrownie jądrowe. Przyjęto, że nakłady inwestycyjne bezpośrednie na elektrownię jądrową 1000 MWe wyniosą 2,85 mld euro/2007 z dodatkowym kosztem 570 mln euro/2007 na likwidację elektrowni, podczas gdy farma wiatrowa na morzu pracująca ze współczynnikiem wykorzystania mocy 0,34 i wytwarzająca rocznie taką samą ilość energii kosztowałaby 7,4 mld euro. Ponadto, ze względu na konieczność dostarczania mocy do sieci, gdy siła wiatru jest mała, dla rezerwowania wiatraków potrzeba dobudować linie przesyłowe za 1,4 mld euro i rezerwowe elektrownie opalane gazem za dalsze setki milionów euro. Dodatkowym czynnikiem na korzyść energetyki jądrowej jest czas życia elektrowni, równy 60 lat dla elektrowni jądrowej, a 20 lat dla wiatraków.

Dlatego CBI wezwało rząd do zmniejszenia programu budowy wiatraków i rozszerzenia programu budowy elektrowni jądrowych. W miesiąc później takie samo wezwanie ogłosił Malcolm Wicks, były minister energetyki W. Brytanii, który przygotował raport o stanie energetyki na specjalne zlecenie premiera brytyjskiego. Raport ten zasługuje na uwagę, bo mimo dużo lepszych niż w Polsce warunków wiatrowych wzywa W. Brytanię do ograniczenia udziału OZE w 2020 roku do 15%, określając to jako cel „bardzo ambitny” i do zredukowania planów rozwoju OZE do połowy stulecia, a rozszerzenia programu budowy elektrowni jądrowych tak by po 2030 roku wytwarzały one 35-40% energii elektrycznej potrzebnej Wielkiej Brytanii.²⁴¹

Jak widać, zarówno przemysł brytyjski jak i rząd nie mają wątpliwości, że budowa elektrowni jądrowych jest najlepszą drogą do taniego prądu i niezawodnego zasilania odbiorców.

6.5.3. Czy przykład trudności firmy British Energy nie przeczy pozytywnym ocenom kosztów elektrowni jądrowych?

Przeciwnicy energetyki jądrowej twierdzą, że nie jest ona opłacalna, a na dowód przytaczają rzekome bankructwo firmy British Energy. Mało kto z Polaków zna historię tej sprawy, a argument o „bankructwie” brzmi groźnie. Warto więc poświęcić 5 minut by dowiedzieć się, co zdarzyło się naprawdę.

Początki brytyjskiego programu jądrowego sięgają politycznej decyzji podjętej w 1955 roku, kiedy to rząd brytyjski postanowił budować reaktory jądrowe mające dostarczyć pluton, niezbędny dla brytyjskiej

²⁴¹ Energy Security: A national challenge in a changing world http://www.world-nuclear-news.org/EE-UK_needs_30_to_40_percent_nuclear_government_told-0608097.html

broni jądrowej, a jednocześnie produkować energię elektryczną. Typ reaktorów wybrano pod kątem ich zastosowań militarnych, a nie pod kątem konkurencyjności w produkcji energii elektrycznej. Reaktory te były reaktorami z moderatorem grafitowym, zdecydowanie droższe niż reaktory z wodą pod ciśnieniem, które wkrótce zawładnęły rynkiem i w USA i w Europie. Ponadto charakteryzowały się one wielkimi rozmiarami, co powodowało wysokie koszty likwidacji i rozbiórki elektrowni po zakończeniu okresu jej eksploatacji. W sąsiedniej Francji początkowo również budowano reaktory z moderatorem grafitowym, ale w czasie kryzysu naftowego w 1975 Francja podjęła decyzję o przejściu na reaktory z wodą pod ciśnieniem i wykazała, że są one konkurencyjne ekonomicznie i łatwe do demontażu. W tym czasie Wielka Brytania trwała przy reaktorach grafitowych, które mimo wysokich nakładów inwestycyjnych produkowały energię elektryczną po cenach konkurencyjnych i przynosiły zyski dla państwa. Na koniec w latach 90-tych Wielka Brytania zbudowała swój pierwszy reaktor z wodą pod ciśnieniem w EJ Sizewell B.²⁴²

Na początku lat 90-tych w ramach prywatyzacji rząd brytyjski podzielił brytyjskie elektrownie jądrowe na dwie grupy, oddając starsze reaktory państwowej firmie British Nuclear Fuels Ltd (BNFL) i zatrzymując odpowiedzialność za likwidację elektrowni przy końcu ich użytkowej eksploatacji. Nowsze reaktory AGR i EJ Sizewell B utworzyły majątek firmy British Energy, która została sprzedana za sumę 1,5 miliarda funtów w 1996 r. Do tego czasu podatnik brytyjski mógł być w pełni zadowolony.

Jednakże rząd nadal ponosił odpowiedzialność za likwidację starych elektrowni. W czasie eksploatacji elektrowni jądrowej jej właściciel jest zobowiązany do odkładania pewnej sumy pieniędzy na przyszłą likwidację elektrowni, a także na unieszkodliwienie odpadów radioaktywnych. We Francji opłata ta wynosi 0,14 ceuro/kWh za odpady i 0,14 ceuro/kWh na likwidację elektrowni, w USA jest to około 0,1-0,2 c /kWh. Stanowi to około 5% kosztu energii elektrycznej. Łączny fundusz nagromadzony we Francji przez EdF (operatora i właściciela francuskich elektrowni jądrowych) na cel likwidacji elektrowni wynosił 25 miliardów euro w 2006 roku i Francja oświadcza, że w 2010 r. zgromadzona będzie pełna kwota potrzebna na likwidację wszystkich elektrowni jądrowych w tym kraju (35 miliardów euro)²⁴³. Natomiast sytuacja w Wielkiej Brytanii była na przełomie stulecia inna.

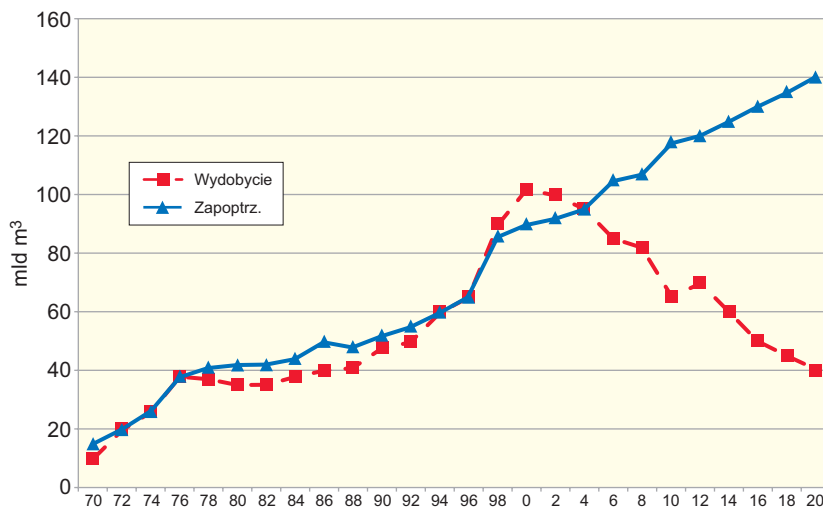
²⁴² Dostawcą technologii była amerykańska firma Westinghouse.

²⁴³ Nuclear Power in France, Briefing Paper 28 , April 2007

W Wielkiej Brytanii przez dziesiątki lat właścicielem elektrowni jądrowych był rząd, który miał obowiązek zapewnić niezbędne finanse na likwidację starych reaktorów i dokonać częściowych wpłat na likwidację 15 reaktorów, które stały się własnością British Energy (BE). Dalsze wpłaty na likwidację tych 15 reaktorów, które przejęła BE, były już obowiązkiem tej firmy i rzeczywiście od czasu przejęcia reaktorów firma BE dokonywała regularnie wpłat zgodnie ze swymi zobowiązaniami.

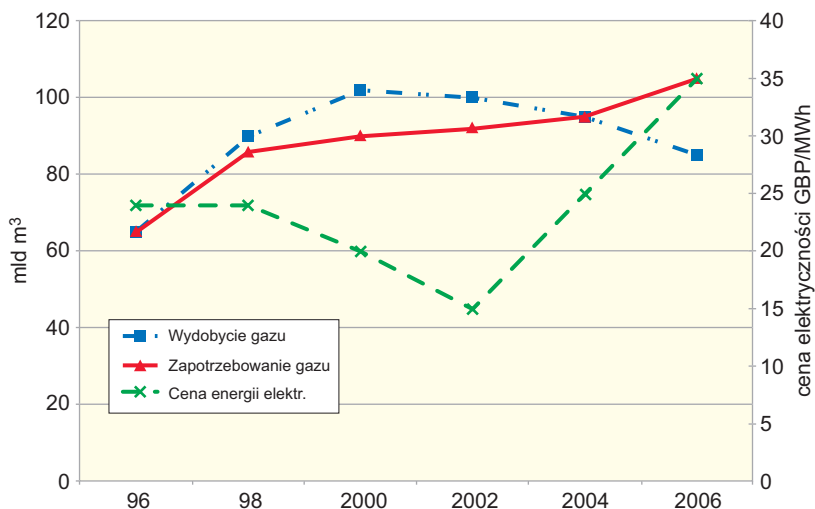
Jednakże w rezultacie odkrycia gazu pod Morzem Północnym ceny energii elektrycznej w Wielkiej Brytanii zdecydowanie spadły. Wydobycie gazu rosło, osiągając wartość maksymalną w 1999 roku (rys. 6.5), a ceny elektryczności malały.

Prywatyzacja i liberalizacja rynku w latach 90-tych zachęcały do budowy tanich elektrowni opalanych gazem. Było to korzystne dla odbiorców i producentów, a nikt nie zwracał uwagi na wyczerpywanie zasobów gazu. Ceny hurtowe energii elektrycznej od roku 1998 do 2002 spadły o 40%. Widząc możliwość dużych krótkoterminowych zysków, brytyjskie firmy prywatne masowo budowały elektrownie opalone gazem, co spowodowało nadmiar mocy produkcyjnej – była ona o 20-25% większa niż wymagana do zaspokojenia potrzeb w czasie przeciętnej brytyjskiej zimy.



Rys. 6.5. Relacja między zapotrzebowaniem a wydobyciem gazu ziemnego w Wielkiej Brytanii.

Gwałtowny wzrost wydobycia gazu ziemnego z Morza Północnego w końcu XX wieku zachwiał równowagą rynkową. W sumie spowodowało to obniżenie cen elektryczności dostarczanej do sieci poniżej kosztów jej wytwarzania jak widać na rys. 6.6.²⁴⁴



Rys. 6.6. Ceny energii elektrycznej w stosunku do zapotrzebowania i wydobycia gazu ziemnego w Wielkiej Brytanii w latach 1996-2006.²⁴⁵

Tymczasem cena płacona przez odbiorców była niemal stała. Firmy, które produkowały energię i jednocześnie dostarczały ją do odbiorców, uzyskiwały wielkie korzyści. Natomiast elektrownie węglowe i jądrowe, które tylko produkowały energię elektryczną i oddawały ją do sieci, w konkurencji z tanim gazem ponosiły straty.

Firma British Energy nie miała sieci własnych odbiorców, oddawała energię do systemu energetycznego i była zmuszona do sprzedaży tej energii zgodnie z aktualną najniższą taryfą, ustalaną przez tanie elektrownie gazowe. Wytwarzała ona energię elektryczną po kosztach około 19 GBP/MWh, a przy cenie 16 GBP/MWh płaconej na rynku w 2002 roku ponosiła straty 3 GBP/MWh. W dodatku BE była zmuszona przepisami rządowymi do płacenia podatku „za emisję CO₂”, chociaż

²⁴⁴ www.wsws.org/articles/2002/oct2002/powe-o23_prn.shtml

²⁴⁵ Risk Management: The Nuclear Liabilities of British Energy plc, REPORT BY THE CONTROLLER AND AUDITOR GENERAL HC 264 Session 2003-2004: National Audit Office 6 February 2004

elektrownie jądrowe nie emitowały i nie emitują CO₂. Podatek ten naliczano jednak nie od emisji CO₂, ale od ilości wyprodukowanej energii elektrycznej i płaćli go zarówno elektrownie węglowe jak i jądrowe, by dostarczyć funduszy na rozwój energetyki odnawialnej, którą rząd brytyjski bardzo popierał i nadal popiera (choć już w mniejszym stopniu).

W 2002 roku BE musiała zapłacić 80 milionów GBP rocznie za emisję CO₂, których nie było. Firma British Energy starała się o zwolnienie z tego nieuzasadnionego obciążenia, ale na próżno.

Wobec spadku cen energii elektrycznej poniżej kosztów wytwarzania firma British Energy poniosła w 2002 roku straty wynoszące 4,3 miliarda GBP. Podobne straty poniosły też inne firmy energetyczne, bo tani gaz oznaczał deficyt dla całej energetyki brytyjskiej z wyjątkiem elektrowni gazowych. I tak np. Powergen, należąca do firmy E.On. z Niemiec, musiała wyłączyć jedną czwartą swej mocy produkcyjnej. Firma UK Coal przerwała dostawy węgla do elektrowni Drax, jej głównego odbiorcy, ponieważ Drax nie mogła zapłacić zaległych rachunków (Elektrownia Drax jest największą elektrownią węglową w Wielkiej Brytanii). W październiku 2002 roku stała u progu bankructwa, a jej ponad 5 milionów odbiorców mogło utracić zasilanie energią elektryczną. Wiele firm energetycznych, w tym AES Drax i TXU Europe, utraciło zaufanie rynków i ich akcje silnie spadły.

Aby umożliwić firmie British Energy dalszą działalność, rząd brytyjski dał jej pożyczkę w wysokości 650 mln GBP. Wywołało to interwencję ze strony Komisji Europejskiej, która jednak doszła do wniosku, że pożyczka nie była sprzeczna z ustawami o wolnej konkurencji. W zamian za pożyczkę rząd brytyjski przejął 65% akcji uzyskując prawo do 65% dochodów z zysków firmy British Energy.

W październiku 2003 wierzyciele zgodzili się na zamianę ich należności na akcje o wartości 425 mln GBP i udział w zyskach firmy²⁴⁶. Okazało się, że był to dla nich dobry interes, bo od 2005 roku wartość British Energy stale rośnie. Cena gazu ziemnego wzrosła już z 2-2,5 USD do 7-8 USD za milion BtU. Koszty produkcji energii elektrycznej w elektrowniach opalanych gazem wzrosły odpowiednio wysoko, cena energii elektrycznej na rynku hurtowym także wzrosła i energia jądrowa ponownie stała się w pełni konkurencyjna.

Ostatecznie firma British Energy przeżyła ten najcięższy okres i jest obecnie największym producentem energii elektrycznej w Wielkiej Brytanii. Roczne przychody na dzień 31 marca 2000 roku wyniosły 2999

²⁴⁶ Conway E: Deal keeps lights on at British Energy 2 October 2003 <http://www.telegraph.co.uk/money/main.jhtml?xml=/money/2003/10/02/cnben02.xml>

milionów funtów, z zyskiem przed opodatkowaniem równym 796 milionów funtów, a cena akcji wzrosła z 2,6 pensa w 2005 roku do 48 pensów w 2007 r.²⁴⁷

Z drugiej strony eksploatacja złóż gazu pod Morzem Północnym jest obecnie silnie krytykowana jako pośpieszne i nieekonomiczne wykorzystanie zasobów tego surowca. O ile przez 10 lat gaz spod Morza Północnego wystarczał do zaspokojenia 100% potrzeb brytyjskich, to obecnie pokrywa on tylko 48%, a według oceny ministerstwa handlu i gospodarki zostanie praktycznie wyczerpany do 2020 roku. Jak oświadczył Jonathan Stern z Instytutu Studiów Energetyki w Oksfordzie „wielkim błędem modelu rynkowego gospodarki w Wielkiej Brytanii było niedocenianie wartości tych zasobów”²⁴⁸. Dyskutując możliwość importu gazu z Norwegii, prezes firmy ASPO Kjell Aleklett oświadczył że „w nadchodzących latach może istnieć możliwość importu z Norwegii, ale to oznacza, że Norwegia powinna znacznie zwiększyć wydobywanie. Wtedy jej zasoby wyczerpią się dużo szybciej i wkrótce znajdzie się w takiej sytuacji, w jakiej jest dzisiaj Wielka Brytania”.

Wniosek

Sytuacja w Wielkiej Brytanii nie jest wcale argumentem przeciwko energetyce jądrowej. Odwrotnie, jest to silny argument za energetyką jądrową.

Wobec tego, że elektrownie jądrowe wytwarzają energię elektryczną po stałej cenie, nie mogą one konkurować z krótkotrwałymi źródłami energii opierającymi się na rabunkowej gospodarce pod hasłem – „spalmy co mamy przez 10-15 lat”. Takimi konkurentami były w Wielkiej Brytanii elektrownie oparte na pośpiesznym spalaniu gazu z odkrytych złóż, prowadzonym bez uwzględnienia, że gazu może przez to zabraknąć. Doprowadziło to British Energy na skraj bankructwa, ale obfitość gazu nie trwała długo. Już obecnie widać, że na dłuższą metę cena gazu będzie znacznie wyższa niż była w Wielkiej Brytanii w latach 2001-2003.

Już dzisiaj, zaledwie kilka lat od chwili, gdy British Energy stała w obliczu bankructwa, energia jądrowa jest znów najlepszym źródłem energii w Wielkiej Brytanii. Na szczęście British Energy przetrwała ciężki okres i jest dziś cennym elementem energetyki brytyjskiej. Według szeregu studiów opublikowanych w Wielkiej Brytanii^{249,250} energetyka

²⁴⁷ <http://investing.thisismoney.co.uk/cgi-bin/digitalcorporate/thisismoney/security.cgi?ticker=BGY>

²⁴⁸ <http://news.bbc.co.uk/1/hi/programmes/panorama/6113218.stm>

²⁴⁹ The Royal Academy of Engineering The Costs of Generating Electricity, March 2004

²⁵⁰ Energy Review Report, The Energy Challenge, UK, London, July 2006

jądrowa jest konkurencyjna i rząd brytyjski stwierdził w Białej Księdze²⁵¹ opublikowanej w styczniu 2008 r., że po wielu analizach *„jesteśmy przekonani o słuszności naszego sądu, że ekonomika energetyki jądrowej jest atrakcyjna, zarówno z punktu widzenia potencjalnego inwestora jak i gospodarki w całości”*.

Epizod obfitości gazu w Wielkiej Brytanii wydaje mi się symbolem szerszego zjawiska – wykorzystania surowców węglowodorowych jako paliw na całej Ziemi. Jeżeli zaniedbamy rozwój energetyki jądrowej, to wkrótce znajdziemy się w sytuacji, w jakiej jest dzisiaj Wielka Brytania, żałując że spaliliśmy to, co powinno nam służyć jako cenny surowiec przez długie wieki.

Po to, byśmy nie musieli słuchać takich gorzkich słów, jakie dziś wypowiadają ekonomiści i ekolodzy w aspekcie wyczerpania złóż gazu pod Morzem Północnym, należy popierać energetykę jądrową. A fakt, że elektrownie jądrowe wytwarzają prąd taniej niż inne – na przykład we Francji energia jądrowa była i jest konkurencyjna cały czas – jest tylko jednym z wielu mocnych argumentów na korzyść tej energii. Najważniejsze dla społeczeństwa to czyste powietrze, czysta woda i czysta gleba - a to wszystko zapewnia energetyka jądrowa.

6.6. Warunek sukcesu: Terminowe uruchomienie elektrowni jądrowej

Aby utrzymać nakłady inwestycyjne na przewidzianym poziomie trzeba uruchomić elektrownię jądrową bez opóźnień, w przeciwnym razie narastające odsetki od zamrożonego na czas budowy kapitału mogą znacznie zwiększyć koszty i przekreślić wszelkie rachuby ekonomiczne. Wiele elektrowni jądrowych uruchamiano zgodnie z planem, np. we Francji, Japonii, Korei i wielu innych krajach. Ale zdarzają się i opóźnienia, podawane przez przeciwników jako dowód, że energetyka jądrowa jest nieopłacalna. Jakie są ich powody?

Opóźnienia mogą wynikać z powodów technicznych, takich jak niedostateczne przygotowanie procesu inwestycyjnego, brak pełnej dokumentacji w chwili rozpoczęcia budowy, złe przygotowanie wykonawców lub prototypowy charakter budowy. Przykładem tych braków jest budowa trzeciego bloku elektrowni jądrowej Olkiluoto.

Reaktor EPR ma moc większą od poprzednio budowanych i wymaga rozwiązania nowych problemów technologicznych, a firmy pracujące przy budowie elektrowni nie mają doświadczenia, bo w ciągu ostat-

²⁵¹ HM Government, BERR: Meeting the Energy Challenge, A White Paper on Nuclear Power, January 24, 2008

nich lat budowano niewiele nowych elektrowni jądrowych w Unii Europejskiej. EJ Sizewell B uruchomiono w 1995 r., a bloki N4 w Civaux i Chooz w latach 1996-2000, a chociaż EPR ma bardzo wiele cech wspólnych z N4, zwiększenie jego mocy oznacza większe rozmiary elementów, np. znaczny wzrost rozmiarów rurociągów obiegu pierwotnego lub płyty fundamentowej. Spowodowało to błędy, wykryte przez inwestora i zgłoszone do dozoru jądrowego. I tak np. beton płyty fundamentowej wykonano stosując zbyt dużą frakcję wody, wykładzinę obudowy bezpieczeństwa spawano przy użyciu przestarzałych metod, rury obiegu pierwotnego wykonano tak, że rozmiary ziarna były zbyt duże, co mogłoby utrudniać w przyszłości kontrolę ultradźwiękową stanu rurociągów.

Wszystkie te błędy zostały przeanalizowane i dozór jądrowy Finlandii podjął decyzje co do zakresu i rodzaju napraw. Nieprawidłowości wykonawstwa rurociągów obiegu pierwotnego trzeba było poprawić i wykonać rury na nowo, błędy wykładziny częściowo wymagały napraw, a częściowo zostały uznane za nieistotne, wytrzymałość betonu płyty fundamentowej starannie zbadano i dozór uznał, że jest ona wystarczająca (projekt zawsze zakłada duży margines bezpieczeństwa, w tym przypadku margines ten nie został przekroczony więc dozór fiński zezwolił na kontynuowanie prac). W sumie badania i wstrzymywanie budowy do czasu podjęcia decyzji przez dozór spowodowały znaczne opóźnienia, tak że termin przewidywanego zakończenia budowy przedłużono o półtora roku, a koszty odpowiednio wzrosły (ale te dodatkowe koszty w całości pokrywa konsorcjum budujące elektrownię, a nie właściciel/zleceniodawca).

Dla budowy elektrowni w Polsce płynie stąd wniosek, że należy budować u nas elektrownię już wcześniej zbudowaną w innym kraju. Trzeba także dopilnować skompletowania dokumentacji wykonawczej przed rozpoczęciem budowy. Pożądane jest też, by z polskim inwestorem współpracował - jako partner - inwestor zagraniczny, mający dobre doświadczenia z budowy własnych elektrowni jądrowych.

Inne przyczyny opóźnień to działania przeciwników energetyki jądrowej, organizujących alcje protestacyjne i blokady dróg, oraz powodujących wieloletnie procesy sądowe. Takie sytuacje zdarzały się w większości elektrowni budowanych w USA w końcu XX wieku. Aby się przed tym uchronić, trzeba przeprowadzić dyskusję społeczną PRZED rozpoczęciem budowy, przeanalizować bezpieczeństwo proponowanego reaktora i określić ściśle wymagania, których inwestor musi dotrzymać. Dyskusje mogą być ostre i długie, a wymagania surowe – ale inwestor musi mieć pewność, że gdy już zbuduje elektrownię zgodnie z tymi wymaganiami, będzie mógł ją uruchomić bez przeszkód i opóźnień.

Jest to możliwe – tak działa prawo w krajach Unii Europejskiej, a i w USA przepisy zmieniono, by uchronić inwestora a w konsekwencji i odbiorców energii elektrycznej przed marnowaniem czasu i pieniędzy na niepotrzebne procesy sądowe i płacenie odsetek od kapitału zamrożonego w gotowej elektrowni, czekającej na zezwolenie rozpoczęcia pracy. Podobne przepisy prawne będą wprowadzone w Polsce.

Przykład krajów Unii Europejskiej, Japonii i Korei Płd. pokazuje, że sprawna budowa elektrowni i ich terminowe uruchamianie jest możliwe.

6.7. A więc czy Polskę stać na budowę elektrowni jądrowej?

Jeśli zdobędziemy się na wysiłek i zbudujemy elektrownie jądrowe, to przez ponad pół wieku my i nasze dzieci będziemy mieli tanią energię elektryczną. Jeśli nie – to skazani będziemy na coraz droższe paliwa organiczne, w tym coraz więcej importowanych. Trzeba więc raczej zapytać, czy nas i nasze dzieci będzie stać by NIE mieć elektrowni jądrowych.

Dla mnie odpowiedź jest jasna, podobnie jak dla ekologów, którzy utworzyli Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej SEREN. A co o tym myślą inni – przekonamy się w następnym rozdziale.

7. Czemu ekolodzy popierają obecnie energetykę jądrową?

7.1. Dawne stanowisko ekologów wobec rozwoju energetyki jądrowej

Ekolodzy to w większości romantycy – są z zasady przeciwni wszystkiemu, co jest obce naturze, czy to zakłady przemysłowe, miasta, czy elektrownie. Jako romantycy chcą widzieć przyrodę taką, jaka była przed opanowaniem Ziemi przez człowieka. Prekursorem ekologów był Maurice Thoreau – amerykański filozof i pisarz z końca XVIII wieku, twórca utopijnej teorii powrotu człowieka do natury, który w swojej książce „*Walden*” pisał, że gdy widzi dym z komina chaty sąsiada, to znaczy, że mieszkają za blisko siebie. Do takich romantyków należą też wielcy działacze ruchu ekologicznego, np. Patrick Moore, jeden z założycieli organizacji Greenpeace, James Lovelock, twórca teorii zwaną skrótowo Ziemia-Gaia, mówiącej, że całe życie na Ziemi tworzy łącznie jeden organizm, czy Stewart Brand, wybitny przyrodnik i twórca katalogu „Cała Ziemia” obejmującego wszystkie organizmy i zasoby naszej planety. Ci wielcy ekolodzy sprzeciwiali się początkowo energetyce jądrowej, widząc w niej przejaw dominacji techniki nad człowiekiem i porównując związane z nią zagrożenia ze skutkami wybuchów bomb nad Hiroszimą i Nagasaki. Potrafili oni jednak zmienić zdanie, zrozumieć, że energetyka jądrowa jest potrzebna ludzkości i dostrzec jej zalety – czyste powietrze i wodę, brak emisji CO₂, godziwe warunki pracy i obfitość energii produkowanej bez zniszczenia bogactw naturalnych Ziemi.

Są w ruchu ekologicznym i dalej idący działacze, którzy potępiają cywilizację XXI wieku uważając, że człowiek niszczy przyrodę, i im bardziej jest cywilizowany, tym jest groźniejszy dla Ziemi. Ci ludzie uważają, że jedynym winnym za ciemne strony dzisiejszego życia są biali ludzie z krajów wysoko rozwiniętych. Gdy populacja słoni staje się zbyt duża w stosunku do zanikających lasów, wypalanych przez murzyńską ludność na opał, i słonie ogryzają korę z ostatnich drzew – nie budzi to protestów tej grupy ekologów, gdy Murzyni mordują się nawzajem i dopuszczają się ludobójstwa sięgającego milionów ofiar – ekolodzy milczą, ale gdy biały człowiek przegania nietoperze ze zbudowanych przez tegoż białego człowieka budowli – o, wtedy stają do boju i wołają, że jest to niszczenie przyrody. Wielu działaczy organizacji określających siebie mianem „ekologicznych” często dopuszcza się łamania prawa i pospolitych aktów wandalizmu. W imię „idei” niszczona jest cudza własność i efekt ciężkiej pracy wielu ludzi. Do publicystyki wpro-

wadzano nawet pojęcie „ekoterroryzmu”, które dobrze charakteryzuje sposoby działania niektórych organizacji „ekologicznych”.

W tej grupie są też działacze polityczni, żądni władzy i pieniędzy, którzy wietrzą dobry interes w straszeniu ludności i nie cofają się przed roztaczaniem fałszywych obrazów, byle tylko zyskać głosy wyborców i wsparcie finansowe sponsorów. W tej grupie widzimy organizacje takie jak Greenpeace i działacze takich jak Amory Lovins, gotowych odmówić jednej trzeciej ludzkości prawa do energii elektrycznej – a więc do czystej wody, zdrowej żywności, opieki lekarskiej i oświaty – byle nie dopuścić do wprowadzenia energetyki jądrowej, mogącej zapewnić ludziom dostateczną ilość energii. Nie wierzą oni, że cywilizacja przyniosła ludzkości poprawę bytu, że oczyszczamy nasze rzeki z zanieczyszczeń, że mamy coraz bardziej czyste powietrze, że usuwamy hałdy odpadów z kopalni, hut i elektrowni. Ta grupa ekologów woli straszyć społeczeństwo rzekomymi zagrożeniami wynikającymi z wykorzystania wyrobów chemicznych czy wprowadzania energetyki jądrowej, zapewniającej ludziom dostęp do energii elektrycznej.

Organizacje zwalczające energetykę jądrową czynią to zgodnie z filozofią głoszącą, że *„Skomplikowana technologia jakiegokolwiek rodzaju stanowi obelgę dla godności człowieka”*. Tak pisze Amory Lovins, czołowy ekowojownik, uznawany przez Greenpeace za ich przywódcę duchowego. Jednocześnie Greenpeace szeroko wykorzystuje zaawansowane technologie w swojej działalności (począwszy od silników Diesla napędzających łodzie i statki organizacji, poprzez sprzęt biurowy, komputery i Internet, a skończywszy na drogich i zaawansowanych technologicznie projektorach multimedialnych oraz wielu innych skomplikowanych i drogich urządzeniach). I dalej *„Byłoby niemal katastrofą, gdybyśmy odkryli źródło czystej, taniej i obfitej energii ze względu na to, co człowiek mógłby z nią zrobić.”* A dalej w swojej publikacji *„The road not taken”*²⁵² Lovins napisał *„choćby energia jądrowa była czysta, bezpieczna, tania i nie powodowała powstawania odpadów promieniotwórczych, i tak będę jej przeciwny”*. Swoje stanowisko Lovins uzasadnia tym, że energia jądrowa jest źródłem niewyczerpanych zasobów energii, a człowiek może te zasoby wykorzystać do tego by zniszczyć Ziemię. Stanowisko dobre dla człowieka mieszkającego w willi na słonecznych zboczach Gór Skalistych w USA – ale trudne do przyjęcia dla Hindusa, który nie ma czystej wody i gotuje swe potrawy na garstce łajna krowiego, bo elektryczność w jakiegokolwiek formie jest dla niego nieosiągalnym luksusem.

²⁵² Lovins A. : The road not taken, *Foreign Affairs* for October, 1976.

Ale wojownicy ekologiczni spod znaku pana Lovinsa nie zabiegają o poparcie przymierających głodem Hindusów czy Abisyńczyków, oni działają wśród bogatych społeczeństw Zachodu i starają się tak prowadzić swą politykę, by zebrać głosy potrzebne na wejście do parlamentu. Wtedy partia Zielonych zdobywa znaczenie stając się tzw. języczkiem u wagi – mając niewiele głosów w parlamencie może jednocześnie dyktować warunki swoim koalicjantom, bo te 5, 10 czy 20 głosów (które ma partia Zielonych) jest potrzebne do osiągnięcia parlamentarnej większości, stworzenia rządu i uchwalania ustaw. Do takiej sytuacji doszło w Niemczech, co pozwoliło partii Zielonych opanować ministerstwo ochrony środowiska i z wielkim rozgłosem prowadzić akcję zwalczania energetyki jądrowej.

I jest trzecia grupa – ludzi rozsądnych, którzy stawiają wysoko dobro przyrody, ale nie chcą człowieka traktować jak wroga. Chcą oczyścić powietrze ze spalin, dwutlenku siarki i pyłu, oczyszczać ścieki, rekultywować kopalnie węgla brunatnego, zadrzewiać hałdy górnicze i hutnicze. Widzą też jednak, że setkom milionów ludzi należy się energia elektryczna, niezbędna dla zapewniania im czystej wody, oświetlenia, przechowywania żywności, dla umożliwienia opieki lekarskiej i godziwego życia. Szukają więc dróg do polepszenia sytuacji – i nie zgadzają się z twierdzeniami, że ludzie żyją dziś gorzej niż przed stu czy pięciuset laty. Znany ekolog duński Lomborg sprzeciwiając się propagandzie strachu i beznadziejności uprawianej przez Greenpeace przypomina, że ludzie żyją dzisiaj średnio ok. 80 lat – podczas gdy w średniowieczu czas życia wynosił przeciętnie lat 35, w 1800 roku lat 45 a w 1900 roku – 55 lat.

Dzięki osiągnięciom naszej cywilizacji mamy dziś czyste rzeki – w Renie można się kąpać, chociaż przed 50 laty groziło to ciężkim zakażeniem skóry. Parlament brytyjski może obradować przy otwartych oknach, chociaż przed stu laty musiały być szczelnie zamknięte by do Sali obrad nie wpadało zanieczyszczone powietrze znad Tamizy, ba, nawet odbywają się znów konkursy wędkarskie z mostów londyńskich, choć przed pół wiekiem wszystkie ryby w Tamizie wymarły z powodu zanieczyszczenia jej wody.

Podobnie w Polsce mamy dziś w Wałbrzychu czy Łodzi dzieci zdrowe, chociaż w latach 70-tych czas życia w Wałbrzychu był o 7 lat krótszy od średniego w Polsce z powodu zanieczyszczeń powietrza, a w dzielnicach Łodzi, gdzie stężenie pyłu i dwutlenku siarki przekraczało 140 mikrogramów na m³, ponad 70% dzieci cierpiało na chroniczne choroby górnych dróg oddechowych.

Niestety, najwięcej rozgłosu w życiu politycznym zdobywają te grupy ekologów, które są najbardziej radykalne. A korzystając z rozgłosu

starają się o zdobycie choćby części władzy, i przekonują się, że skuteczną drogą do zdobywania zwolenników jest straszenie ludzi, by móc potem występować w roli obrońców społeczeństwa przed współczesną cywilizacją. Ale czasy się zmieniają, i protesty przeciwko energetyce jądrowej zmieniają się coraz częściej w głosy poparcia.

Przed 20 laty ekolodzy byli przeciw energetyce jądrowej, demonstracje przeciw EJ Diablo Canyon we wrześniu 1981 roku przyciągnęły 20 000 ludzi, niemieccy aktywiści rozkręcali złącza na liniach wysokiego napięcia prowadzących od elektrowni jądrowych do miast (nie bacząc, że elektrownia zasila takie obiekty jak szpitale, domy dziecka, ujęcia wody, oczyszczalnie ścieków i inne) a na trasie przejazdu pociągów z odpadami radioaktywnymi przykuwali się do torów. Dzisiaj nastawienie ekologów wobec energetyki jądrowej uległo zmianie. Wielu ekologów oddanych ideałom ochrony środowiska sugeruje, że w świecie zagrożonym zmianą klimatu rozszczerzenie atomu może być lepsze niż spalanie węgla. Co więcej, coraz nowi czołowi ekolodzy twierdzą, że energia jądrowa jest naprawdę zielona.

7.2 Zmiana nastawienia ekologów wobec energii jądrowej

James Lovelock, twórca teorii zwanej skrótowo Ziemia-Gaia, mówiącej, że całe życie na Ziemi tworzy łącznie jeden organizm, który dokonuje samoregulacji by podtrzymywać życie, napisał w lipcu 2004: *„Zastosowanie energii jądrowej na dużą skalę jest jedyną drogą... OZE nie wystarczą.... Opozycja wobec EJ oparta jest na irracjonalnym strachu karmionym fikcjami w stylu Hollywood, tworzonymi przez lobby Zielonych i przez środki masowego przekazu. Obawy te są nieuzasadnione, a energia jądrowa od jej powstania w 1952 roku okazała się najbezpieczniejszym ze wszystkich źródeł energii”*.²⁵³ Oświadczenia Lovelocka uzyskały szeroki rozgłos, szczególnie w Wielkiej Brytanii. Echa wypowiedzi Lovelocka rozbrzmiały na całym świecie, gdy dziennikarze zacytowali jego zdanie, że energetyka jądrowa jest niesłusznie oczerniana.

W USA, Patrick Moore (współzałożyciel Greenpeace) i Christine Todd Whitman, była szefowa Agencji Ochrony Środowiska (EPA), stanęli na czele amerykańskiej Clean and Safe Energy Coalition. Szczególnie wpływowy jest Patrick Moore. Opisując swe dawne lata, gdy podżegał tłumy przeciw energetyce jądrowej, Moore przedstawia swą zmianę

²⁵³ Nuclear Energy Can Avoid Global Warming, Ecologist Says, Atomic Energy Insight 07_04, July 2004

stanowiska w stylu nawrócenia św. Pawła w drodze do Damaszku: „*Tak, byłem przeciwnikiem energetyki jądrowej przez wszystkie lata gdy kierowałem Greenpeace*” – mówi Moore.. „*Ale gdy zaczynam liczyć, jasne się staje, że OZE nie wystarczą i energia jądrowa musi być częścią naszego systemu energetycznego.. . . . Jako ekolog, wybieram energię jądrową jako rozwiązanie*”.²⁵⁴

Kierownictwo organizacji ekologicznych walczących z energetyką jądrową, takich jak Greenpeace, Global czy Friends of the Earth stara się przykleić Partickowi Moore etykietkę Judasza ekologicznego. Moore odpowiada, że nikt nie ma prawa określać, kto jest ekologiem, a kto nim nie jest. Historia osiągnięć Moore’a, sięgająca legendarnych czynów na statku Rainbow Warrior zapewnia, że ma on status bez porównania wyższy niż krytykujący go urzędnicy fundacji Greenpeace.

Dzięki oświadczeniom Moore’a, zmienił się punkt ciężkości w debacie. 25 lat temu hasłami były bezpieczeństwo i odpady – dziś są nimi węgiel i dwutlenek węgla. Tak widzi to np. Stewart Brand, twórca Katalogu Całej Ziemi. „*Niektórzy działacze mówią, że jest to walka energii jądrowej z odnawialną, albo z oszczędnością energii. Ale to nieprawda*” – oświadcza Brand. „*Mówimy o zaspokojeniu zapotrzebowania na elektryczność, a więc o wyborze energii jądrowej lub węgla. A przy porównaniu odpadów z energetyki jądrowej i z węglowej energia jądrowa okazuje się sto lub tysiąc razy bezpieczniejsza.*”

Innym ekologiem, który zmienił zdanie był Hugh Montefiore²⁵⁵, biskup anglikański i wieloletni działacz organizacji Friends of the Earth, który pisząc w brytyjskim czasopiśmie The Tablet popełnił „najwyższą zdradę” antyjądrowego ruchu ekologicznego oświadczając „*Doszedłem do wniosku, że rozwiązaniem (problemu energii) jest zwiększone wykorzystanie energii jądrowej*”²⁵⁶.

W lutym 2009 roku nastąpił kolejny epizod w historii zmian postaw ekologów wobec energetyki jądrowej. W artykule zamieszczonym w lewicowym czasopiśmie Independent, dotychczasowy kierownik Greenpeace UK, aktywista Partii Zielonych, Prezes Agencji Środowiska i czołowy dziennikarz ruchu ekologicznego zamieścili swe wyznania „nawrócenia” i wezwali do poparcia energetyki jądrowej.²⁵⁷ Stephen Tindale kierował brytyjską sekcją Greenpeace od 2000 do 2005 roku. Oświadczył

²⁵⁴ Dr. Patrick Moore Scare tactics, disinformation go too far www.greenspiritstrategies.com, Jan. 30, 2005

²⁵⁵ A. G. Little: Green vs. Green: The environmental movement, once staunchly antinuclear, is facing resistance from within. http://wired-vig.wired.com/wired/archive/13.02/nuclear.html?pg=5&topic=nuclear&topic_set=

²⁵⁶ Hugh Montefiore Why the planet needs nuclear energy 23/10/2004 <http://www.theta-blet.co.uk/cgi-bin/register.cgi/tablet-00946257>

²⁵⁷ World Nuclear News wnn@newsdesk.world-nuclear-news.org 23 February 2009

on na piśmie: *„To jest jak rodzaj nawrócenia religijnego. Przez długi czas postawa antynuklearna była istotą naszej postawy ekologicznej.”* Teraz twierdzi on, że *„obecnie szeroko rozpowszechniony jest pogląd, że energetyka jądrowa nie jest idealna, ale jest lepsza niż zmiana klimatu”*.

Ale odwrót wielu prawdziwych ekologów od oficjalnej twardej linii partyjnej niepokoi przywódców partii Zielonych. Widać to w artykule Mycle Schneider „Dawka realiów dla tych zielonych, którzy przechodzą na stronę nuklearną”²⁵⁸. Pisząc ze wstrętem o artykule Schwartza i Resiusa, którzy stwierdzili, że „jest tylko jedno rozsądne, praktyczne rozwiązanie – **energetyka jądrowa**”²⁵⁹, M. Schneider stwierdza dumnie, że w 2003 roku światowa energetyka wiatrowa wytworzyła („generated”) ponad 8,000 megawatów (MW) co spowodowało obroty („turnover”) wynoszące 8 miliardów euro. Ten argument kryje w jednym zdaniu aż dwa błędy: Zbudowanie wiatraków o mocy szczytowej 8000 MW nie oznacza wytworzenia energii, tylko zainstalowanie mocy szczytowej, którą można wykorzystać gdy wieje wiatr. Ale wiatr nie wieje stale – w Niemczech średni współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej w wiatrakach wynosi 17% rocznie. Tak więc dumne 8000 MW turbin wiatrowych to równowartość $8000 \times 0.17 = 1360$ MW mocy średniej w ciągu roku. Schneider pomylił też jednostkę mocy z jednostką wytworzonej energii elektrycznej – MW z MWh.

Ponadto, koszty 8 miliardów euro są atrakcyjne dla biznesu – na pewno tak, bo tyle społeczeństwo płaci, by mieć wiatraki.

Ale wcale nie jest to powód do radości dla odbiorców energii elektrycznej – przecież te 8 miliardów euro, zarabianych rocznie przez biznes wiatrowy, pochodzi z naszych własnych kieszeni! Proste przeliczenie wykazuje, że koszt inwestycyjny jednego megawata mocy średniej rocznie wynosi $8 \text{ mld euro} / 1360 \text{ MW} = 5,9$ miliona Euro/MW. Dla najnowszej elektrowni jądrowej z reaktorem EPR, pracującym przez 60 lat ze współczynnikiem wykorzystania mocy zainstalowanej 0,92 jednostkowe nakłady inwestycyjne wynoszą 3 miliony euro/MW. Więc koszty inwestycyjne na wiatr są 2 razy wyższe niż na najlepsze elektrownie jądrowe, a za to czas pracy elektrowni wiatrowej – oceniany optymistycznie na 20 lat – jest 3 razy krótszy niż czas pracy elektrowni jądrowej...

Czy zatem M. Schneider ma powód do dumy? Społeczeństwo płaci na wiatraki, bo wiemy, że trzeba to zrobić dla dobra ludzkości i przyszłych

²⁵⁸ Mycle Schneider <http://www.utne.com/2005-04-01/ADoseofRealityforThoseGreensGoingNuclear.aspx>

²⁵⁹ Peter Schwartz, Spencer Reiss 'Nuclear Now! How clean, green atomic energy can stop global warming', February 2005. http://wired-vig.wired.com/wired/archive/13.02/nuclear.html?pg=2&topic=nuclear&topic_set=

pokoleń, ale nie oszukujmy się, interes jest w tym dla niektórych działaczy „ekologicznych” i producentów wiatraków, bynajmniej nie dla odbiorców.

A społeczeństwo wcale nie chce aprobować wiatraków. Na rys. 7.1 widzimy fragment demonstracji przeciwko budowie wiatraków w zatoce Nantucket Bay w USA, z długowłosymi gitarzystami i transparentem *Wiatr Stop!* W Polsce jest szereg gmin, które nie zgadzają się na budowę wiatraków, bojąc się dudniącego przenikliwego hałasu wywoływanego rotacją śmigieł, migotania światła i zabijania ptaków przez śmigła, których krawędzie zewnętrzne tną powietrze z prędkością 240 km/h.



Rys. 7.1. Wiatr Stop! – demonstracja w zatoce Nantucket w USA przeciwko wiatrakom na morzu.

Ale o protestach przeciwko wiatrakom Greenpeace milczy, a zamiast przeliczać pełne koszty woli hasło, że wiatr jest za darmo. Podobnie M. Schneider pisze, że przez oszczędzanie energii można zaspokoić zapotrzebowanie 4 do 7 razy taniej niż przez wytwarzanie prądu w elektrowniach jądrowych, a dyskusja o energetyce jądrowej jest czysto akademicka, bo i tak ich moc będzie malała a nie rosła. Powołując się na przykład ostatniej uruchomionej w USA elektrowni jądrowej, której budowa trwała 23 lata, Schneider ocenia, że niemożliwe jest budowanie elektrowni w wystarczającej liczbie, by udało się choćby utrzymać ich łączną moc, a co dopiero mówić o jej wzroście!

Jest to nowy śliski argument, pozornie rozsądny i żerujący na nieświadomości słuchacza. Prawda jest taka, że – wbrew zdaniu Schneidera – elektrownie jądrowe buduje się w ciągu 5-6 lat, a ostatnio, np. w Japonii, w ciągu 4-4,6 lat. Natomiast, gdy uruchomienie elektrowni można wstrzymać prowadząc przeciwko niej bez końca procesy sądowe, to czas jej „budowy” może być dowolnie długi. Okres 23 lat jest „osiągnięciem” organizacji antynuklearnych, a nie wynikiem wolnej pracy

przemysłu jądrowego. Podobnie nieprawdą jest, że przemysł jądrowy nie potrafi oddawać do eksploatacji kilkunastu reaktorów rocznie. W samej Francji w okresie lat 1980-90 dochodziło do uruchamiania po 5 reaktorów dużej mocy rocznie – a przecież Francja to tylko jeden z wielu krajów podejmujących rozwój energetyki jądrowej. W chwili obecnej w USA jest zgłoszonych 30 projektów budowy nowych EJ, a na świecie jest łącznie 350 projektów w różnych stadiach zaawansowania. I przemysł jądrowy w przeciwieństwie do Odnawialnych Źródeł Energii nie wymaga subsydiów – chce tylko, by nie groziły mu procesy sądowe o przysłowiową „pietruszkę” i bezsensowne wieloletnie przestoje, podczas których trzeba płacić odsetki od zainwestowanego kapitału, a prądu wytwarzać nie można.

Unia Europejska popiera energetykę jądrową i stwierdza, że jest ona niezbędna. Już dzisiaj jest ona głównym źródłem energii elektrycznej w krajach Unii. Pierwsze reaktory III generacji zaczną pracę w latach 2012-13. W połowie XXI wieku możemy jeździć samochodami z napędem elektrycznym lub paliwem wodorowym wytwarzanym w elektrowniach jądrowych. Możemy, jeżeli pozbedziemy się niepotrzebnego lęku przed energią jądrową.

7.3 Jak przebiega dyskusja o energetyce jądrowej

7.3.1 Tło historyczne – protesty przeciw nowym technologiom w przeszłości.

Wprowadzanie nowych technik zawsze wywoływało protesty części społeczeństwa. Zne są opory przeciw budowie kolei, gdy w XIX wieku alarmowano, że ruch kolei spowoduje straszliwe żniwo ofiar, poczynszy od dzieci a skończywszy na ptakach, które będą umierały przelatując nad parowozami.

Wzywano „*lud, by powstał w majestacie swej potęgi i zabronił tej zniewagi*” ludzkości. Dużo wcześniej, bo w XIV wieku, w Anglii gwałtownie sprzeciwiano się wprowadzaniu węgla zamiast drewna na opał. Dopiero, gdy większość lasów wyrabano, gdy za kradzież drewna na opał zaczęto odcinać ręce, a ludzie masowo marli z zimna – dopiero wtedy wreszcie uznano, że węgiel jest niezbędnym środkiem opałowym.

Obawy przed innowacyjnymi technologiami były nieobce również nad Wisłą. Kiedy Jean Pierre Blanchard, po starcie z parku przy Foksal, po raz pierwszy przelatował balonem nad Warszawą w maju 1789 roku, przechodnie uciekali do domów w strachu przed latającym diabłem. Po otrzymaniu informacji o próbach pierwszych samochodów w Anglii na początku lat siedemdziesiątych dziewiętnastego wieku ówczesny prezydent Warszawy, Kalikst Witkowski, nie dał wiary w istnienie pojazdu



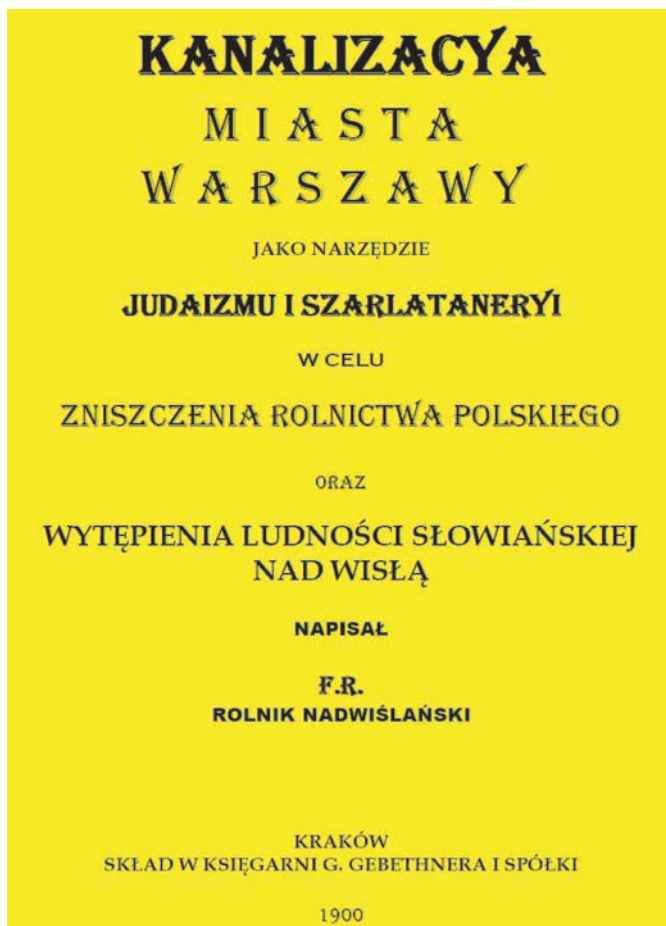
Rys. 7.2. Plakat wzywający do oporu wobec kolei

bez napędu końskiego, kwitując informację o sukcesach wynalazców i konstruktorów stwierdzeniem: „*To niemożliwe. Policja nigdy by na to nie pozwoliła*”. Po tym, jak ruszył pierwszy tramwaj elektryczny w Warszawie w 1907 roku, po mieście krążył gorzki limeryk o następującej treści: *Sposób tracenia ludzi coraz bardziej estetyczny. Dawniej topór, gilotyna, a dziś tramwaj elektryczny.*

Protestowano nawet przeciw tak dziś oczywistemu osiągnięciu technicznemu jak kanalizacja Warszawy. W 1900 roku szanowana oficyna wydawnicza Gebethner i S-ka wydała książkę pod zdecydowanym tytułem: **„Kanalizacja Miasta Warszawy jako Narzędzie Judaizmu i Szarlataneryi w Celu Zniszczenia Rolnictwa Polskiego oraz (nie lękajmy się mocnych słów, ekowojownicy XXI wielu wyrażają się podobnie) Wytępienia Ludności Słowiańskiej nad Wisłą**.”²⁶⁰

Napisał tę książeczkę „Rolnik Nadwiślański”, a w tekście aż roi się od argumentów zalecających wstrzymanie się od kanalizacji, co miało być **„jedyną rękojmą trwałego dobrobytu ludzkości”**. „System kanalizacyjny potępili jednogłośnie najwięksi myśliciele, mężowie stanu, ekonomiści i badacze natury” pisze nasz Rolnik Nadwiślański. „Dowo-

²⁶⁰ F.R. Rolnik Nadwiślański: *Kanalizacja Miasta Warszawy jako narzędzie Judaizmu i Szarlataneryi w celu Zniszczenia Rolnictwa Polskiego oraz Wytępienia Ludności Słowiańskiej nad Wisłą*, Kraków, Skład w Księgarni G. Gebethnera i spółki, 1900



Rys. 7.3. Okładka książki protestującej przeciw kanalizacji Warszawy

*dzić szkodliwości nawozów organicznych dla zdrowia ludzkiego lub nie-ekonomiczności dla kraju strzech słomianych, prowokować zniszczenie odpadków miejskich za pomocą kanalizacji, **znaczyłoby sprzeciwić się odwiecznym prawom natury i zdobyczom nauki, pokuszać się na obalenie kultury rolniczej i postępu ludzkości***" woła dalej, strasząc że:

„...zmieniłoby to ostatecznie pola orne w chude pastwiska, a nawet w piaski lotne i zgotowało rolnikom nędzę, a ostatecznie głód, choroby i przyspieszyłyby emigrację ludności wiejskiej z siedzib ojczystych...

a w końcu atakuje inż. Lindley'a, na którego cześć nazwano plac obok systemu filtrów wody pitnej w Warszawie pisząc

*„Kanały warszawskie ... zubożyły ludność wiejską i miejską, **napełniły krzywdą społeczeństwa kieszenie kulturnika ... Lindleja i jego szajki...** dzisiaj z powodzeniem operujących po miastach sarmackich pod firmą dobrze opłacanych **inżynierów kanalizacyjno-wodociągowych**”*

Historia przyznała rację inżynierowi Lindley'owi. Dziś nie możemy sobie wyobrazić Warszawy bez kanalizacji i filtrów, które on zbudował. A jak będzie w przypadku energetyki jądrowej?

7.3.2 Zarzuty przeciwników energetyki jądrowej w XX wieku

Energetyka jądrowa była atakowana jeszcze mocniej niż koleje czy kanalizacja. Ulubionym kierunkiem ataku było twierdzenie, że elektrownie jądrowe powodują zachorowania na nowotwory. Przeciwnicy wykorzystywali przy tym zasadę „zmniejszać dawki tak bardzo jak to tylko możliwe” wprowadzoną w całej energetyce jądrowej i twierdzili, że skoro elektrownie jądrowe emitują choćby najmniejsze promieniowanie, to są narzędziami śmierci. W rozdziale 2 widzieliśmy, że jest to nieprawda – elektrownie jądrowe powodują wzrost promieniowania wielokrotnie mniejszy niż naturalne różnice promieniowania między Finlandią a Polską, ba, nawet między Wrocławiem a Krakowem! (przypominam rys. 2.13) Nigdzie na świecie nie znaleziono wzrostu zachorowań na nowotwory powodowanego tak małymi dawkami – raczej przeciwnie. Wszystkie studia dużych grup ludności wskazują, że małe dawki nie powodują zagrożeń.

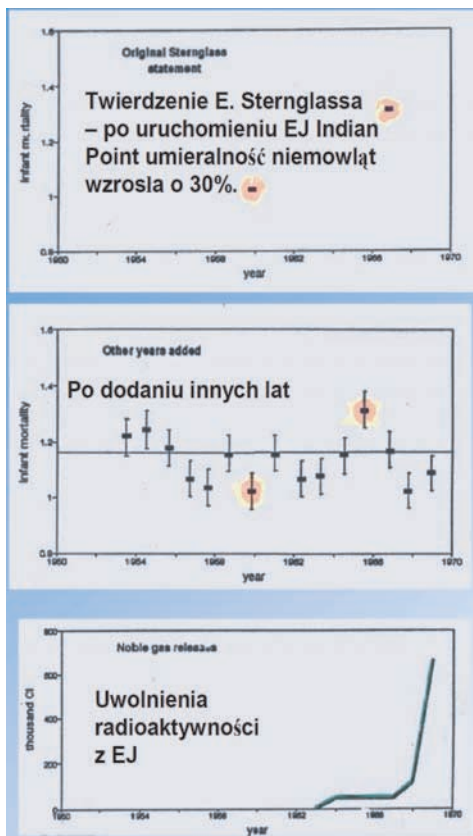
Przeciwnicy jednak bardzo chcieli znaleźć argumenty, nawet za cenę manipulacji danymi, uważając słusznie, że przeciętny człowiek nie zdoła od razu wychwycić ich fałszerstw. Przykładem może być twierdzenie dr. E. Sternglassa o rzekomym wzroście zgonów noworodków wokół elektrowni jądrowych, zilustrowane na rys. 7.4.

Dla udowodnienia, że eksploatacja Elektrowni Jądrowej (EJ) Indian Point spowodowała rzekomo wzrost umieralności niemowląt, Sternglass wybrał spośród wielu wyników tylko dwa, wcześniejszy bardzo niski, późniejszy bardzo wysoki, i przypisał różnicę pracy EJ²⁶¹.

Gdy uwzględniono inne lata, punkty te straciły swe znaczenie, bo okazały się tylko punktami z pośród wielu innych rozrzuconych przypadkowo wokół wartości średniej. Co więcej, znaczące emisje radioaktywności z EJ Indian Point zaczęły się dopiero po późniejszym z cytowanych przez Sternglassa pomiarów, a dalsze oceny umieralności niemowląt wykazały, że była ona mniejsza, a nie większa niż przed uruchomieniem elektrowni²⁶².

²⁶¹ Sternglass, E.J. Can the infants survive? Bull. Atmos. Sci. 25:29; June 1969

²⁶² SHIHAB-ELDIN, et al., Is there a large risk of Radiation? A critical review of pessimistic claims, Environment Intern. Vol. 18, (1992) 117-151



Rys. 7.4. Twierdzenie Sternglassa o umieralności niemowląt

1. Punkty pokazane przez Sternglassa pokazują umieralność niemowląt przed i po uruchomieniu elektrowni. Po uruchomieniu elektrowni umieralność jest większa! Gdy patrzymy na punkty – ogarnia nas przerażenie. Czyżby EJ Indian Point naprawdę powodowała wzrost zgonów?
2. NIE! Wybrane przez Sternglassa punkty wcale nie reprezentują trendu – są tylko wartościami min i max.
Gdy dodamy punkty z innych lat, okazuje się, że żadnego wzrostu nie ma, jest tylko rozrzut danych statystycznych.
3. Co więcej, skoro zdrowie noworodków mamy łączyć z radiacją, to trzeba popatrzeć jakie były wydzielania substancji radioaktywnych z elektrowni. Krzywa tych wydzielen pokazana jest na rysunku obok. Porównanie rysunku 2 i 3 pokazuje, że gdy w roku 1969 EJ naprawdę zaczęła pracę na pełnej mocy i uwolnienia wzrosły – umieralność spadła poniżej średniej...

Publikacje Sternglassa były ostro krytykowane ze względu na popełniane błędy metodyczne, przede wszystkim pomijanie wpływu czynników ubocznych i świadomy dobór tylko niektórych punktów spośród wielu danych. Wielu specjalistów analizowało jego publikacje i odrzucało zarówno jego metodologię jak i wnioski. Twierdzenia Sternglassa zostały obalone przez liczne prace naukowe i techniczne, między innymi opracowane przez Agencję Ochrony Środowiska USA (US EPA), Narodowy Instytut Badań nad Rakim USA, Narodową Akademię Nauk USA i wielu uczonych niezależnych, w tym także przeciwników energetyki jądrowej.

Tym niemniej Sternglass w dalszym ciągu publikował po kilka raportów rocznie twierdząc, że energia jądrowa szkodzi zdrowiu. Doprowadziło to do bezprecedensowego oświadczenia Towarzystwa Fizyki Medycznej (Health Physics Society – HPS) podpisanego przez wszystkich

żyjących byłych prezesów HPS, którzy stwierdzili, że „*nie zgadzają się z twierdzeniem dr. Sternglassa jakoby wykazał on, że narażenie na promieniowanie z EJ powoduje wzrost umieralności noworodków*”²⁶³. Analizy naukowe publikacji podobnych do artykułów Sternglassa wielokrotnie wykazały, że nie ma potwierdzenia zwiększonej umieralności na choroby nowotworowe wskutek promieniowania jonizującego emitowanego przez EJ. Niestety prawda ta nie jest spektakularna, a zatem również niezbyt często obecna w środkach masowego przekazu.

Obszerne studium na temat chorób nowotworowych u ludności mieszkającej w sąsiedztwie EJ²⁶⁴ opracowane przez US National Cancer Institute i opublikowane przez Narodowe Instytuty Zdrowia USA wykazało, że nie ma faktów świadczących o wzroście częstości zachorowań na nowotwory w pobliżu EJ. Co więcej, ryzyko zachorowania na białaczkę i na raka po uruchomieniu reaktora było nieco mniejsze niż poprzednio.

Komitet, który dokonał oceny tego studium stwierdził, że statystyczne operacje i interpretacja danych były w pełni poprawne. Wobec tego, że materiał statystyczny w okręgach z EJ obejmował ponad 900 000 zgonów na nowotwory, a w okręgach kontrolnych dodatkowo 1 800 000 zgonów, statystyczna waga wniosków jest wysoka. Do mocnych stron studium należą: duża liczba badanych elektrowni jądrowych, staranny dobór okręgów kontrolnych do celów porównawczych, ocena ryzyka przed i po uruchomieniu reaktora i uzyskanie danych przez okres 35 lat dla każdego badanego okręgu. Zastosowana metoda (analizy korelacyjne danych o umieralności w każdym z okręgów) była uprzednio stosowana z powodzeniem dla wykrycia zagrożeń nowotworowych powodowanych przez zanieczyszczenia arsenem przy wytopie metali i wdychaniem azbestu przez pracowników stoczniowych. Jako przykład stwierdzenia o małym względnym SPADKU zagrożenia chorobami nowotworowymi może służyć białaczka dziecięca, dla której względne ryzyko przy porównaniu okręgów z EJ z okręgami kontrolnymi wyniosło przed uruchomieniem EJ 1,08, a po uruchomieniu spadło do 1,03. W przypadku białaczki, dla wszystkich grup wiekowych, względne ryzyko odniesione do okręgów kontrolnych wynosiło 1,02 przed i 0,98 po uruchomieniu EJ.

Oczywiście nie jest to dowodem, że praca EJ zmniejsza ryzyko zachorowania na nowotwory. Ale widać, że na podstawie wyników tej analizy nie można mówić o szkodliwości promieniowania z EJ

²⁶³ Statement by the President and past Presidents of the Health Physics Society with regard to presentation by Dr. Ernest J. Sternglass, July 14, 1971 Radiology. 1971 Dec;101(3):703-4

²⁶⁴ JABLON, S., et al., „Cancer in populations living near nuclear facilities”, National Cancer Institute, NIH Publication No 90-874, US Dept. of Health and Human Services, (July 1990

7.3.3. Zarzuty stawiane w Polsce

W krajach rozpoczynających budowę energetyki jądrowej twierdzenia przeciwników EJ są często kompletnie oderwane od wszelkiej wiedzy i ukierunkowane wyłącznie na wywołanie maksymalnego przerażenia wśród ufnych słuchaczy. I tak w czasie publicznej dyskusji na temat budowy pierwszej polskiej EJ w Żarnowcu J. Jaśkowski wykorzystywał zaufanie ludzi do reprezentowanego przez niego zawodu lekarza by głosić takie twierdzenia jak to, że „*promieniowanie emitowane rocznie podczas normalnej pracy EJ Żarnowiec będzie 100 razy większe niż promieniowanie spowodowane przez bombę atomową w Hiroszimie*”.²⁶⁵

To i wiele innych podobnie bzdurnych twierdzeń było skwapliwie rozgłaszanych w środkach masowego przekazu, gotowych publikować sensacyjne informacje bez względu na ich prawdziwość. Zresztą, skoro doktor Jaśkowski twierdził, że promieniowanie z elektrowni jądrowej jest szkodliwe, to czemu dziennikarz - który przecież nie jest lekarzem - miałby mu nie uwierzyć? Tym bardziej, że w nagłówku artykułu takie twierdzenie przyciąga uwagę czytelników i zwiększa nakład gazety...

Ilość radionuklidów uwalnianych podczas bezawaryjnej pracy elektrowni jądrowej w ciągu jednego roku stanowi wartość porównywalną z 100 bombami atomowymi zrzuconymi na Hiroszimę. Należy także zdecydowanie odrzucić twierdzenie, że głównie są to gazy szlachetne, które nie ulegają metabolizmowi w organizmie człowieka. Pierwiastki te posiadają określoną energię, dużo wyższą niż energia wiązań chemicznych, trudno więc zaprzeczyć jej działaniu na komórki. Pierwiastki te powodują także wzrost jonizacji powietrza ze wszelkimi jego negatywnymi następstwami. Oprócz gazów szlachetnych stwierdza się także występowanie trytu, który ulega metabolizmowi, jak również obecność węgla radioaktywnego.

Rys. 7.5. Reprodukacja twierdzeń J. Jaśkowskiego

Eksperti nuklearni i wybitni lekarze – np. prof. dr hab. Julian Liniecki, kierownik Zakładu Medycyny Nuklearnej Akademii Medycznej w Łodzi i przewodniczący jednego z komitetów Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej (ICRP) – odpierali kłamstwa pana Jaśkowskiego, ale bezskutecznie – prasa wołała sensacje niż prawdę. Na koniec Zarząd Polskiego Towarzystwa Fizyki Medycznej opublikował oświadczenie potępiające błędy J. Jaśkowskiego i stosowane przezeń metody straszenia ludzi²⁶⁶. Wielkości błędów sięgały od 10 milionów razy do całkowitej zmiany wartości dodatnich i ujemnych, np. J. Jaśkowski podawał, że po Czarnobylu nastąpił wzrost liczby martwych urodzeń o około 30 000,

²⁶⁵ Jaskowski J.: Mity i Fakty – o energii jądrowej, „Orientacje” w miesięczniku „W drodze” nr 12 (172) 1988

²⁶⁶ POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYKI MEDYCZNEJ, Oświadczenie Zarządu Głównego PTFM z dn. 24.4.1990

podczas gdy w rzeczywistości nastąpił ich spadek, a łączna liczba wszystkich martwych urodzeń w Polsce była 9 razy mniejsza od wyimaginowanego przez J. Jaśkowskiego „wzrostu”. Niestety oświadczenie lekarzy Polskiego Towarzystwa Fizyki Medycznej nie powstrzymało ani Jaśkowskiego, ani jego wydawców od dalszego propagowania takich fałszywych twierdzeń.

Skutki twierdzeń takich jak powyższe są trudne do usunięcia. Łatwiej jest wzbudzić strach niż go rozproszyć.

Jest wiele innych twierdzeń, formułowanych dawniej i podtrzymywanych obecnie. Np. po Czarnobylu witryny antynuklearne w Internecie podawały informację o zgonie dzieci w Polsce, które zjadły grzyby skażone opadem radioaktywnym.²⁶⁷ Wiadomość smutna, bo dzieci zmarły naprawdę, ale oczywiście nie od radioaktywnych grzybów, ale po zjedzeniu grzybów trujących. Redaktor antynuklearnych wiadomości powinien widzieć, że żadna porcja radioaktywnych grzybów nie może spowodować zgonu w ciągu kilku godzin. Ale mimo sprostowań w polskich mediach, wiadomość na witrynie WISE pozostała i wisiała do chwili pisania tych słów w sierpniu 2009 roku.

POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYKI MEDYCZNEJ

Zarząd Główny – Executive Board

Warszawa, 24.04.1990

Oświadczenie Zarządu Głównego PTFM

...Rozpowszechnianie **fałszywych i tendencyjnych** informacji ...stwarza warunki dla szerzenia nieuzasadnionej psychozy strachu, irracjonalnych i szkodliwych zachowań jednostkowych...

Załącznik...zawiera 10 najbardziej charakterystycznych poglądów dr Jaśkowskiego ..stanowią one **dowód braku kompetencji i rzetelności** naukowej ich autora.

Zarząd Główny PTFM oświadcza, że **całkowicie dystansuje się** od poglądów głoszonych przez dr . J. Jaśkowskiego

1. „Ilość radionuklidów, uwalnianych podczas bezawaryjnej pracy elektrowni jądrowej w ciągu jednego roku stanowi wartość porównywalną z 100 bombami, zrzuconymi na Hiroszimę” (J. Jaśkowski, „Orientacje” 1988, s 85)

Są to wartości zafałszowane in plus ok. 100-1000 milionów razy

5. „W 1987 roku nastąpił w całym kraju wzrost liczby martwych urodzeń o około 30 000” („Polityka” nr. 11/89, wartości te podawał również dr Jaśkowski za pośrednictwem TV)

W roku 1986 liczba martwych urodzeń wyniosła 3703 a w roku 1987-3475.

Nastąpił zatem spadek o 228 a całkowite liczby martwych urodzeń były w obu latach o rząd niższe niż rzekomy, podany przez dr Jaśkowskiego wzrost.

Rys. 7.6. Oświadczenie lekarzy polskich dementujące kłamstwa J. Jaśkowskiego

²⁶⁷ Radioactive mushrooms kill 7 children in Warsaw. published by WISE News Communique on December 7, 1990 <http://www10.antenna.nl/wise/343/brief.html>

7.3.4 Ataki na dr Gale'a – „lekarza Czarnobyla”

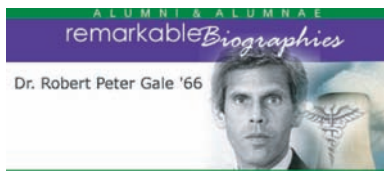
Występowanie przeciw twierdzeniom wojowników antynuklearnych nie jest wcale łatwe, a ich metody zwalczania uczciwych lekarzy ilustruje przypadek dr. Roberta Gale'a, „lekarza Czarnobyla”.

Dr Gale, ekspert w leczeniu białaczki i zaburzeń szpiku kostnego, był pierwszym lekarzem z krajów zachodnich, który na wieść o awarii w Czarnobylu przybył do Kijowa, by nieść pomoc chorym po ostrym napromieniowaniu w czasie akcji ratunkowej i gaszenia pożaru w Czarnobylu. Przyjechał on wraz z żoną i dwoma córeczkami, budząc zdumienie Kijowian, którzy widzieli jak władze partyjne uciekają byle dalej od Ukrainy. Dr Gale pracował niezmordowanie, ratując życie chorym i zdobywając ogromny szacunek wśród ludności. Został uznany przez opinię światową za „lekarza Czarnobyla”. Gdy nakręcono później film o ofiarach katastrofy w Czarnobylu, dr Gale był jego bohaterem, a jego chorzy zostali w nim pokazani zgodnie z prawdą. Podczas pierwszego pokazu filmu jeden z widzów – który po awarii jako strażak był chory na ostrą chorobę popromienną i został wyleczony przez dr Gale'a – rzucił mu się na szyję i płacząc i śmiejąc się na zmianę dziękował za wyleczenie. Takie były początki.

Gdy w latach 1999-2000 MAEA zorganizowała międzynarodową misję dla oceny radiacyjnych następstw Czarnobyla, dr Gale wziął w niej także udział. Ale gdy przedstawiał wyniki misji, znacznie odbiegające od okropności wymyślonych przez ekowojowników, jego przyjęcie było zupełnie inne. Siedzący na sali ludzie, dla których Czarnobyl był świetnym hasłem by starać się o wpływy i fundusze, nie chcieli słyszeć, że ewakuacja jest niepotrzebna, a narażenie radiacyjne już się dawno skończyło. Rozległy się krzyki protestu, a jeden z siedzących obok podium cisnął w dr. Gale'a butem.

Butem w doktora Gale'a !

Po tym incydencie Vladimir Gubarev napisał w książce „Czarnobyl”²⁶⁸ wydanej przez Akademickie Towarzystwo Opieki nad Ofiarami Katastrofy „Wybacz nam Robercie i zachowaj w sercu tak jak to było w dniach, kiedy ratowałeś nas po katastrofie!”



Rys. 7.7. Dr Robert Gale, lekarz Czarnobyla

²⁶⁸ Gubarev V: Chernobyl, Academic Society for the Social and Ecological Protection of Catastrophe Victims, Leader Invest Inc., Moscow, London 1996

But i oszczerstwo to koronne argumenty tych, którzy odmawiają dyskusji, a chcą tylko straszyć ludzi i podburzać tłum. I chociaż na czele misji MAEA stał Itsuzo Shigemitsu, dyrektor Fundacji Badania Skutków Radiacyjnych Hiroshimy, a brali w niej udział najwybitniejsi specjaliści nie związani w żaden sposób z energetyką jądrową, przeciwnicy ogłosili, że zostali oni przekupieni by zminimalizować skutki Czarnobyla. Podobnie odrzucane były kolejne raporty UNSCEAR²⁶⁹, WHO²⁷⁰ i ostatnio Forum Czarnobyla²⁷¹.

Dyskusje trwały też w Polsce. Jak widzieliśmy w ramce powyżej, kłamstwa o wzroście liczby martwych urodzeń (gdy w rzeczywistości nastąpił ich spadek) głoszone przez J. Jaśkowskiego były zdemaskowane przez lekarzy z Polskiego Towarzystwa Fizyki Medycznej. Ale ataki trwają. Gdy prof. Jaworowski, wybitny specjalista w dziedzinie ochrony radiologicznej, wieloletni przewodniczący polskiej delegacji w UNSCEAR i przewodniczący całego komitetu UNSCEAR w pierwszej połowie lat 90-tych, nie związany żadnymi interesami z energetyką jądrową, potwierdził, że małe dawki promieniowania nie są szkodliwe dla człowieka, a następstwa Czarnobyla w Polsce były niezauważalne, zaatakowali go ludzie nie mający pojęcia o ochronie radiologicznej, nie szczędząc z anteny TV wyzwisk stanowiących godny odpowiednik buta rzuconego w dr Roberta Gale. Czy naprawdę mamy hołdować zasadzie, że im mocniejsze wyzwiska tym lepiej, bo to ludzi interesuje, bo rozgłośnią zyskuje na oglądalności?

7.4 Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej SEREN

Ekolodzy, którzy wierzą, że ludziom potrzebna jest energia elektryczna, że każdy ma prawo do godnego życia, że możemy mieć czyste niebo, glebę i wodę, założyli Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej SEREN. W skali międzynarodowej Stowarzyszenie to (*Environmentalists for Nuclear Energy*) liczy kilkanaście tysięcy członków, wśród nich tak wybitnych ekologów jak James Lovelock i Patrick Moore. Artykuły i wystąpienia SERENU są przedstawiane na witrynie internetowej SERENU (<http://seren.org.pl/>) i na witrynie www.atom.edu.pl

²⁶⁹ UNSCEAR Report 2000: Sources and Effects of Ionizing Radiation, ANNEX J, Exposures and effects of the Chernobyl accident.

²⁷⁰ UNDP, UNICEF, UN-OCHA, WHO: The Human Consequences of the Chernobyl Nuclear Accident, A Strategy for Recovery, 25 January 2002

²⁷¹ The Chernobyl Forum (Belarus, the Russian Federation, Ukraine, FAO, IAEA, UNDP, UNEP, UNSCEAR, UN-OCHA, WHO, WORLD BANK GROUP), -: Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine, Vienna 2005

Tymczasem fakty przemawiają za energią jądrową. Niezawodna praca EJ udowadnia ich zalety dla społeczeństwa zarówno z punktu widzenia ekonomii jak i zdrowia. Dlatego nie tylko prawdziwi ekolodzy i lekarze, ale coraz szersze kręgi społeczeństwa popierają energetykę jądrową. W Internecie można znaleźć studium²⁷² opracowane przez Wyższą Szkołę Ekologii i Zarządzania, Wydział Ekologii – Kierunek Ochrona Środowiska pt. „Postawy ekologów i ekologii jako nauki wobec energetyki jądrowej” w którym czytamy



„... patrząc z perspektywy zdrowia i dobrobytu społeczeństwa energia jądrowa obok energii odnawialnych wydaje się najbardziej pożądanym źródłem energii.”

„...ze względu na zdrowie człowieka i ochronę środowiska energia jądrowa powinna być preferowanym źródłem energii przez następne kilkadziesiąt lat.”

Twórca hipotezy „Ziemia – Gaja” James Lovelock z Wielkiej Brytanii gorąco popiera EJ jako jedyną realną drogę do zaspokojenia potrzeb człowieka bez szkody dla środowiska. *„Cywilizacja ludzka jest w niebezpieczeństwie i musi używać EJ – jedyne źródła bezpiecznej i dostępnej energii”* – pisze Lovelock²⁷³. Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej w Polsce i wiele innych organizacji wzywają Radę Unii Europejskiej oraz ONZ do aktywnego poparcia dla energii jądrowej.

Jak widać z aktualnych wypowiedzi przedstawicieli Unii Europejskiej oraz organizacji ONZ konieczność rozwoju energetyki jądrowej jest dzisiaj powszechnie uznawana, a zdecydowane dążenie firm przemysłowych i energetycznych do budowy elektrowni jądrowych świadczy, że nie tylko zalety ekologiczne, ale i ekonomiczne przemawiają za energetyką jądrową.

²⁷² Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania w Warszawie, Wydział Ekologii, Kierunek Ochrona Środowiska (2004) Postawy ekologów i ekologii jako nauki wobec energetyki jądrowej, <http://www.nuclear.pl>

²⁷³ Lovelock J.: Nuclear power is the only green solution. The Independent - 24 May 2004

