

Energetyka konwencjonalna odnawialna i jądrowa

Wykład 11 - 18.XII.2018

Zygmunt Szefliński

Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów

szef@fuw.edu.pl

<http://www.fuw.edu.pl/~szef/>

Energetyka Jądrowa

Jak działa reaktor jądrowy?

Wszystkie pracujące obecnie na świecie reaktory jądrowe wykorzystują energię rozszczepienia jądrowego.

Aby produkować energię elektryczną, reaktor jądrowy musi:

- utrzymywać łańcuchową reakcję rozszczepienia
- odprowadzać ciepło powstające w tej reakcji, za pomocą płynu zwanego chłodziwem
- ciepło napędza turbinę połączoną z generatorem
- generator wytwarza energię elektryczną

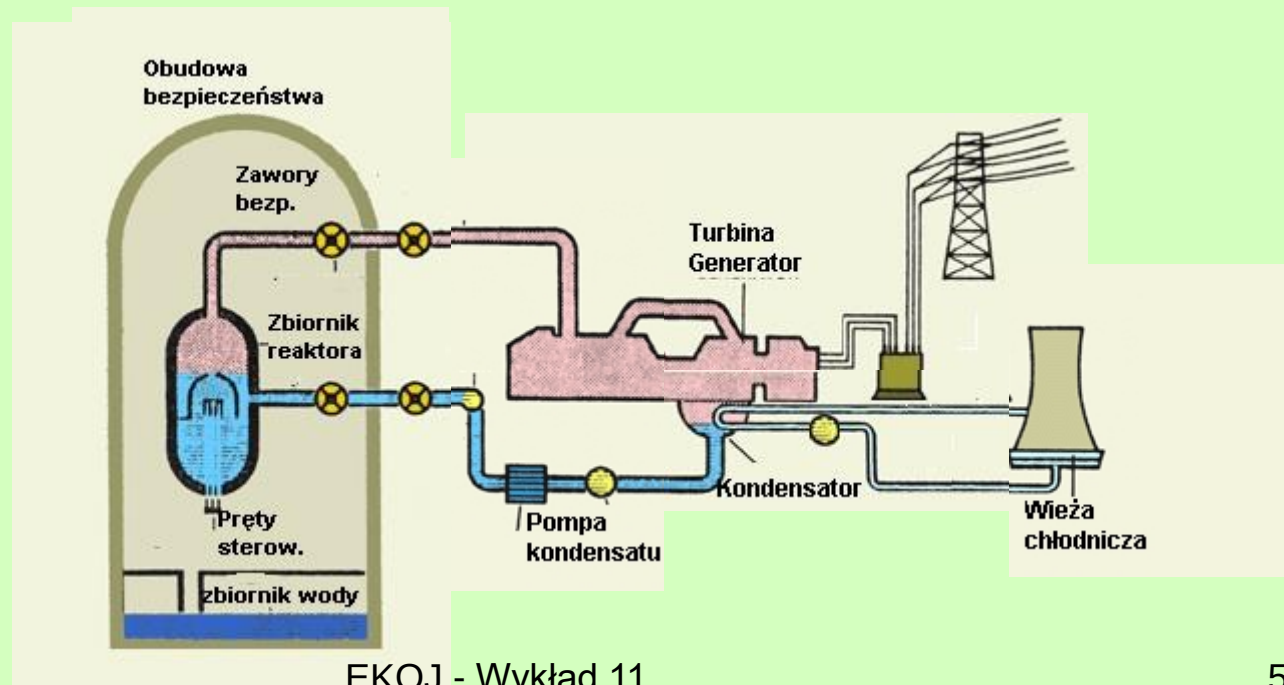
Jak napędzamy turbinę

Dwie możliwości:

1. Chłodziwo może bezpośrednio napędzać turbinę. Dotyczy to, między innymi, reaktorów z wrzącą wodą (**BWR**). Chłodziwem jest woda. Pod wpływem ciepła z rozszczepień jądrowych woda zamienia się w parę, która napędza turbinę;
2. Ciepło przenoszone przez chłodziwo można przekazywać innej cieczy w wymienniku ciepła, nazywanym wytwornicą pary. W praktyce, tą drugą cieczą zawsze jest woda. Woda ta, zamieniona w parę w wymienniku ciepła, napędza turbinę. Takie rozwiązanie przyjęto w ciśnieniowych reaktorach wodnych (**PWR**). Wszystkie reaktory energetyczne eksploatowane we Francji należą do tego typu.

Elementy jądrowego bloku energetycznego (LWR)

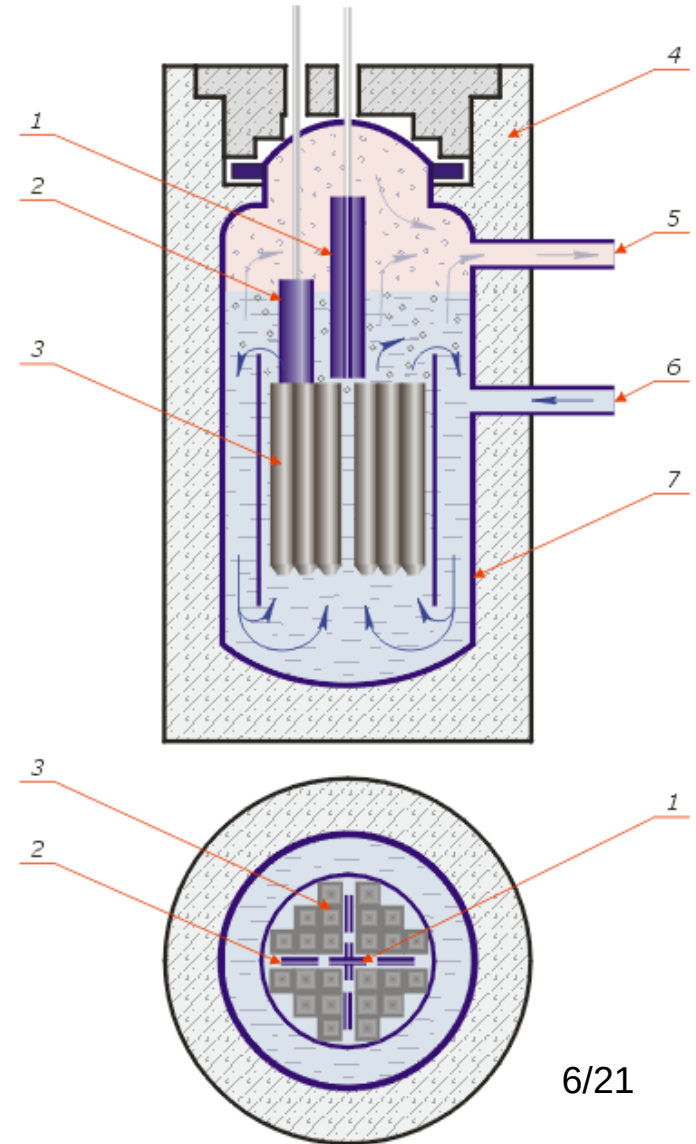
- Turbina parowa i generator;
- Kondensator i układ chłodzenia obiegu wtórnego (skraplacz) ;
- Układ zasilania kondensatem;
- Jądrowy układ wytwarzania pary - reaktor PWR;
- Jądrowy układ wytwarzania pary - reaktor BWR



Reaktor typu BWR

Reaktor wodny wrzący, w skrócie BWR (ang. Boiling Water Reactor) reaktor moderowany i chłodzony wodą cyrkulującą w jednym obiegu pod ciśnieniem 7,6 Mpa (75 atm). Temperatura wrzenia 285°C. Lekka woda pełni jednocześnie funkcje moderatora i czynnika roboczego; wytworzona w reaktorze para jest kierowana do turbiny, a po ochłodzeniu w skraplaczu ponownie do reaktora.

Para wodna I obiegu napędza turbinę!



Reaktor PWR

Reaktor wodny ciśnieniowy, w skrócie PWR (ang. *Pressurized Water Reactor*) – reaktor, w którym moderatorem jest zwykła (lekka) woda pod ciśnieniem ok. 15 Mpa (150 atm). Woda pod tym ciśnieniem nie wrze nawet przy temperaturach powyżej 300°C i spełnia jednocześnie funkcję czynnika chłodzącego i spowalniacza.

Reaktor PWR produkuje gorącą wodę pod dużym ciśnieniem, która następnie trafia do wytwornicy pary. Tam oddaje ciepło wodzie pod niższym ciśnieniem, która zmienia się w parę mokrą (zazwyczaj 275°C i 6 MPa). Ta para po osuszeniu napędza turbinę. **Dwa obiegi czynnika roboczego (wody)!!! Para wodna wtórnego obiegu napędza turbinę!**

Rozpowszechnienie reaktorów

Technologia reaktorów lekkowodnych (LWR), obejmująca reaktory wodne ciśnieniowe (PWR albo WWER (Wodno Wodnyj Energetyczny Reaktor) oraz reaktory wodne wrzące (BWR), jest zdecydowanie najbardziej rozpowszechniona na świecie wśród obecnie pracujących reaktorów.

Pozostałe reaktory zajmują tylko określone, specyficzne nisze technologiczne.

PWR przeważają ilościowo (49 % wszystkich reaktorów na świecie w 2005 roku),

60 % reaktorów to reaktory lekkowodne - LWR).

Elementy potrzebne do pracy reaktora

- paliwo
- chłodziwo
- pochłaniacze neutronów
- moderator
- obiegi przenoszące ciepło z rozszczepień
- źródło neutronów

Paliwo

Paliwo, czyli mieszanka materiałów rozszczepialnych i paliworodnych. Paliwem jądrowym może być:

- **uran,**
- **pluton**
- **tor** (jednak tor musi być połączony z materiałem rozszczepialnym).

Materiały te można stosować w postaci tlenków, metali, węglików albo azotków. **Większość eksploatowanych obecnie na świecie reaktorów używa uranu.** Niektóre pracują z mieszanką tlenku uranu i plutonu. Toru nie stosuje się na skalę przemysłową.

Uran naturalny

0,71 % - U-235, $T_{1/2}=0,72$ mld lat

99,29 % - U-238, $T_{1/2}=4,5$ mld lat

0,0055% - U-234 produkt rozpadu U-238

W reaktorze PWR paliwem jest przede wszystkim uran w postaci tlenku, wzbogacony w izotop rozszczepialny U 235 do poziomu 3-5 %. Paliwo umieszczone w zbiorniku reaktora tworzy jego rdzeń.

Chłodziwo

Chłodziwo, które może być gazem (hel, dwutlenek węgla, para wodna), cieczą (woda pod ciśnieniem) albo ciekłym metalem (stopiony sód).

Chłodziwo musi mieć:

- **wysoką pojemność cieplną,**
- **nie powinno nadmiernie wychwytywać neutronów.**

Chłodziwo omywa pręty paliwowe, z którymi się styka i od których odbiera ciepło wydzielane przez reakcje rozszczepienia, zachodzące wewnątrz każdego z nich;

Pochłaniacze neutronów

Pochłaniacze neutronów w każdej chwili pozwalają kontrolować łańcuchową reakcję rozszczepienia oraz moc wytwarzaną przez tę reakcję.

W zależności od potrzeb, wprowadza się do rdzenia reaktora albo usuwa się z niego pierwiastki, których jądra atomowe pochłaniają neutrony.

Pochłaniacze neutronów (przeważnie **węglik boru**, tlenek gadolinu, hafn, erb względnie **stop srebra, indu i kadmu**) wkłada się do ruchomych prętów, z których złożone są **zestawy regulacyjne** rdzenia reaktora.

Pochłaniaczami neutronów mogą także być substancje rozpuszczone w chłodziwie, których stężeniem się steruje (na przykład kwas borowy), albo materiał zawarty w samym paliwie (pastylki zawierające tlenek gadolinu);

Moderator

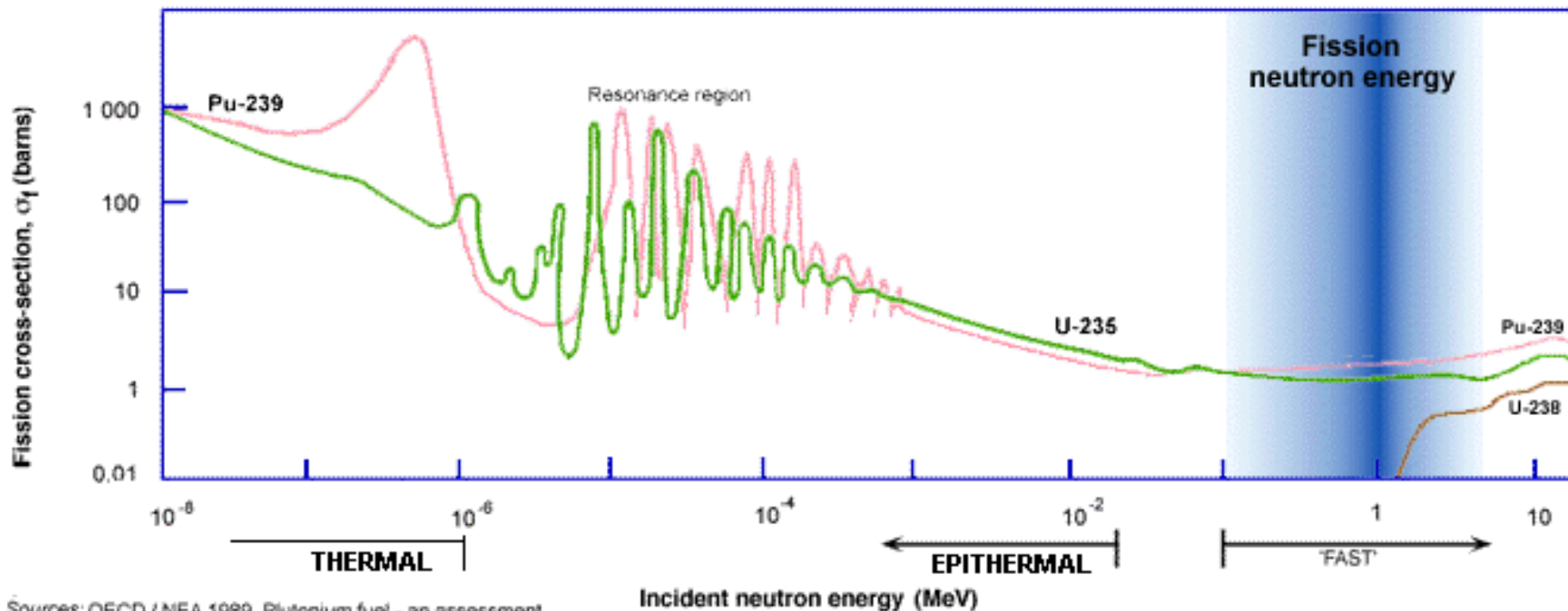
W zależności od średniej prędkości ruchu neutronów w rdzeniu reaktora, rozróżnia się dwie rodziny reaktorów:

- **reaktory prężkie** (FNR),
- **reaktory termiczne**, reaktory na neutrony powolne (na przykład typy PWR czy BWR).

W reaktorach prężkich moderator nie jest potrzebny. Neutronów uwolnionych przez rozszczepienia nie spowalnia się i powodują one kolejne rozszczepienia. Uruchamianie takich reaktorów wymaga dużych ilości materiałów rozszczepialnych, gdyż neutrony są tak szybkie (kilkadziesiąt tysięcy kilometrów na sekundę), że zachodzi niewiele oddziaływań wzajemnych z materią i prawdopodobieństwo zapoczątkowania rozszczepienia jest niskie.

Dlaczego moderator?

NEUTRON CROSS-SECTIONS FOR FISSION OF URANIUM AND PLUTONIUM



Sources: OECD / NEA 1989, Plutonium fuel - an assessment.

Taube 1974, Plutonium - a general survey.

1 barn = 10⁻²⁸ m², 1 MeV = 1.6 x 10⁻¹³ J

Jakie jądra - spowalniacze?

Woda	- H_2O	(pochłanianie na H)
Ciężka woda	- D_2O	(O.K. - koszty)
Grafit	- C	(ciężki, tani)
Beryl	- Be	(drogi)

Uran naturalny

0,71 % - U-235, $T_{1/2}=0,72$ mld lat

99,29 % - U-238, $T_{1/2}=4,5$ mld lat

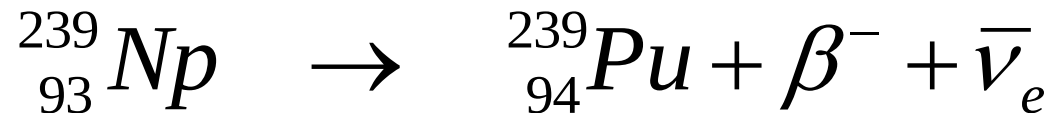
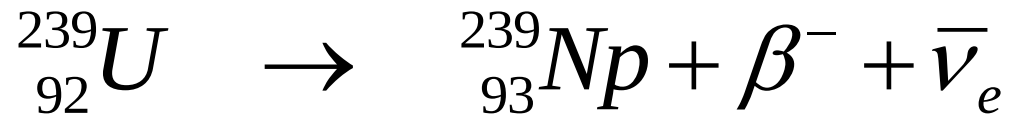
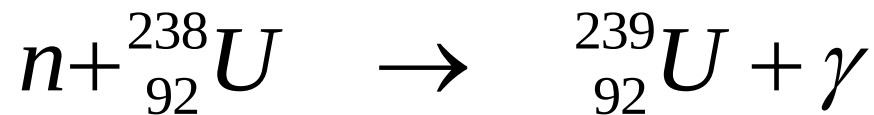
0,0055% - U-234 produkt rozpadu U-238

Moderator - reaktory termiczne

W reaktorach termicznych dążymy do zwiększenia prawdopodobieństwa zajścia rozszczepienia, spowalniając neutrony przy pomocy moderatora. Moderator składa się z atomów z jądrami „lekkimi”, od których neutrony się „odbijają” i na skutek kolejnych uderzeń wytracają początkową prędkość, aż do osiągnięcia odpowiedniej wartości (średnio kilka kilometrów na sekundę). **Moderatorem może być zwykła woda, ciężka woda albo grafit.** Uruchamianie reaktorów termicznych wymaga dużo mniej materiałów rozszczepialnych niż potrzeba w reaktorach prędkich, gdyż prawdopodobieństwo rozszczepienia atomów jest znacznie wyższe z neutronami termicznymi niż z neutronami prędkimi;

Produkcja plutonu

Rozszczepialne jądra uranu 235 ulegają zniszczeniu w toku łańcuchowej reakcji rozszczepienia, niektóre neutrony są wychwytywane przez jądra paliworodnego uranu 238, na skutek czego powstaje nowy pierwiastek, zwany plutonem, którego izotop 239 jest rozszczepialny. Oto niezwykła właściwość reakcji rozszczepienia jądrowego, dzięki której, w pewnym sensie, paliwo jest jednocześnie zużywane i produkowane.



Paliwo zużywa się

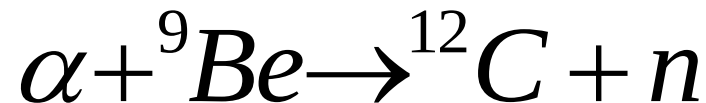
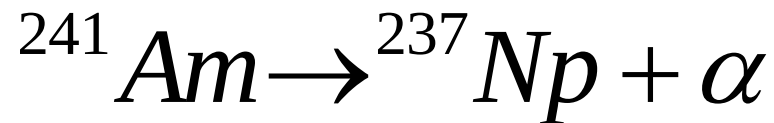
- O paliwie mówi się, że zużywa się, w miarę jak **jądra rozszczepialne zanikają**, na skutek czego stopniowo maleje zdolność paliwa jądrowego do podtrzymywania reakcji łańcuchowej.
- Paliwo zużywa się ponadto (mówi się czasem, że się zatrzuwa) z powodu **nagromadzania się produktów rozszczepienia, które wychwytyją neutrony**.
- Istnieje możliwość kompensacji tego zużycia poprzez stopniowe usuwanie pochłaniaczy neutronów, które wprowadzono do rdzenia reaktora podczas uruchamiania reakcji łańcuchowej.

Wymiana paliwa

- Aby nie doszło do uszkodzenia zestawów paliwowych (w tym głowic i stopek, przewodnic prętów regulacyjnych...) ani koszulek prętów paliwowych, ostatecznie zużyte paliwo należy wymienić na paliwo nowe, co wymaga odstawienia (zatrzymania) reaktora.
- Załadunek paliwa do rdzenia reaktora odbywa się partiami, czyli podczas jednej takiej operacji wymienia się tylko pewną partię paliwa (na przykład $\frac{1}{3}$ lub $\frac{1}{4}$). Odstawienie na przeładowanie paliwa może trwać od 12 dni do jednego miesiąca, w zależności od praktyk różnych firm.

Źródło neutronów

Źródło neutronów ma zapoczątkować łańcuchową reakcję rozszczepienia: źródło wprowadza się do rdzenia reaktora, przez przewodnice rurowe, wbudowane w zestawy paliwowe. Źródłem może być na przykład kaliforn (Cf 252) albo połączenie ameryku (Am 241) z berylem (Be 9) lub polonem (Po 210).



Zbiornik reaktora



**Montaż zbiornika reaktora nr 1 w elektrowni jądrowej w Civaux (Francja).
Copyright AREVA / L. Godart.**

Obiegi przenoszące ciepło z rozszczepień

Większość reaktorów posiada co najmniej **dwa obiegi** (obieg pierwotny i obieg chłodzący, jak w przypadku BWR), inne mają **trzy obiegi** (obieg pierwotny, obieg wtórny i obieg chłodzący, jak w przypadku PWR), a **czasem nawet cztery obiegi** (jak w przypadku reaktorów prędkich wykorzystujących sól w charakterze chłodziwa, w których obieg pierwotny dzieli się na dwa niezależne obiegi sodu). **Wszystkie te niezależne obiegi wymieniają między sobą wyłącznie ciepło.** Zawarta w nich woda jest wprowadzana w wymuszoną cyrkulację przez układy pomp i zaworów;

Obiegi wodne

Reaktory PWR posiadają trzy niezależne obiegi wodne w układzie szeregowym. Obieg pierwotny jest obiegiem zamkniętym. Woda, przepływająca przez rdzeń, służy jednocześnie jako chłodziwo i jako moderator. Omywa pręty paliwowe i odbiera ciepło wydzielane przez rozszczepienia. Mimo temperatury około 300 °C, woda jest utrzymywana w stanie ciekłym przez bardzo wysokie ciśnienie (rzędu 155 barów). **Temperatura paliwa wewnątrz prętów paliwowych może się wahać w przedziale od 700 do 1850 °C**, w zależności od miejsca pomiaru temperatury, czy to na obrzeżu, czy w środku pastylek.

Bariery bezpieczeństwa

Obieg pierwotny stanowi drugą barierę bezpieczeństwa, powstrzymującą rozprzestrzenianie materiałów promieniotwórczych i zatrzymującą promieniowanie.

Pierwszą barierę tworzą koszulki prętów paliwowych.

Pętla obiegu pierwotnego

Pętla obiegu pierwotnego, to zbiornik reaktora, agregat pompy obiegu pierwotnego, wytwornica pary oraz rurociągi, którymi te urządzenia są połączone.

Woda, wprowadzana w ruch przez **pompę cyrkulacyjną** napędzaną silnikiem elektrycznym, krąży w pętli obiegu pierwotnego, poczynając od rdzenia reaktora, w którym ogrzewa się pod wpływem rozszczepień paliwa umieszczonego w zbiorniku. Ciśnienie i temperatura w pracującym reaktorze są tak dobrane, że woda nie wrze (nie ulega odparowaniu); pozostaje w stanie ciekłym, w którym ma najlepsze właściwości pod względem odbierania ciepła i spowalniania neutronów.

Wytwornica pary



**Transport wytwornicy pary dla reaktora nr 2 elektrowni Ling Ao. Port w Szanghaju (Chiny).
Copyright AREVA.**

Obieg wtórny reaktora PWR

Obieg wtórny także jest zamkniętym obiegiem wodnym, który za pośrednictwem wytwornic pary odbiera ciepło transportowane przez wodę obiegu pierwotnego. Ten obieg umożliwia wytwarzanie energii elektrycznej przy pomocy turbiny i generatora.

Za turbiną, para trafia do skraplacza, w którym jest chłodzona i powraca do stanu ciekłego. Obieg chłodzący może być tu otwarty albo zamknięty.

W obiegu otwartym, woda zimna, ujmowana na zewnątrz elektrowni (w morzu albo w rzece), jest zasysana i filtrowana w pompowni, przepływa przez rurki skraplacza, a następnie jest odprowadzana ze zwiększoną temperaturą.

Chłodnie kominowe

Kiedy obieg chłodzący jest zamknięty, elektrownię wyposaża się w chłodnię kominową (wielką betonową wieżę w kształcie hiperboli, o wysokości około 165 m). Zadaniem chłodni kominowej jest wytworzenie wznoszącego prądu powietrza, który część wody rozprasza w postaci pióropusza pary, a resztę wody, rozpylonej na drobne kropelki, odbiera się w sposób przeciwaprądowy i zawraca do obiegu.

Chłodnie kominowe

Woda przeznaczona do ochłodzenia jest pompowana na szczyt zraszalnika i tam rozdeszczowana w jego wnętrzu po powierzchni. Opadając oddaje ciepło do powietrza przepływającego od dołu do góry (w przeciwnym kierunku). Ruch powietrza wymuszony jest przez ciąg kominowy powstający w kominie nadbudowanym nad zraszalnikiem.



Znaczna część ciepła jest odbierana wodzie w wyniku parowania (odparowaniu ulega około 1,5% wody). Pozwala to na ochłodzenie wody do temperatury, przeważnie niższej niż temperatura powietrza zewnętrznego. Często chłodnie kominowe i para wodna wydostająca się z nich pokazywane są mylnie jako główne źródło skażenia środowiska.

Budowa reaktora



**Budowa reaktora EPR w Olkiluoto (Finlandia). Marzec 2007 roku.
Copyright AREVA / P. Bourdon.**

Budowa reaktora



**Budowa reaktora EPR w Olkiluoto (Finlandia). Styczeń 2008 roku.
Copyright AREVA / P. Bourdon.**

Budowa reaktora



**Budowa reaktora EPR w Olkiluoto (Finlandia). Marzec 2008 roku.
Copyright AREVA / P. Bourdon.**