

# **Energetyka konwencjonalna odnawialna i jądrowa**

**Wykład 12 - 8.I.2019**

**Zygmunt Szefliński**

Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów

[szef@fuw.edu.pl](mailto:szef@fuw.edu.pl)

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

# Typy i generacje reaktorów

Teoretycznie istnieje daleko idąca różnorodność możliwych kombinacji podstawowych elementów niezbędnych dla pracy reaktora

- paliwa,
- chłodziwa
- moderatorów.

Tylko **niektóre z tych kombinacji, zwane typami**, zestawiają te elementy w sposób kompatybilny, efektywny i nadający się do zastosowania przemysłowego.

W latach 50. i 60. ubiegłego stulecia zaprojektowano wiele modeli reaktorów, przy całkowitym braku standaryzacji

- każdy kolejny reaktor był prototypem w zasadzie jedynym w swoim rodzaju,
- moce wahały się w przedziale od 40 do 300 MWe.

**Reaktory te należą do tzw. pierwszej generacji reaktorów.** Obecnie pracuje już tylko kilka sztuk brytyjskich reaktorów typu MAGNOX

# Typy i generacje- druga generacja reaktorów

## Uwarunkowania techniczno-ekonomiczne

- sprawność termodynamiczna,
- wytwarzanie odpadów,
- wykorzystanie zasobów,
- stosowanych materiałów,
- dobór moderatora i chłodziwa,
- nakłady inwestycyjne,
- wymogi w zakresie bezpieczeństwa i wielkości zajętego miejsca,

Wymusiły ograniczenie liczby typów reaktorów nadających się do rozwoju na skalę przemysłową. Obecnie używa się już tylko kilku spośród nich. **Prawie wszystkie bazują na neutronach termicznych. W eksploatacji pozostają prawie wyłącznie reaktory wodne. Oparte są na eksploatowanych obecnie reaktorach tzw. drugiej generacji, wdrażanych począwszy od lat 70-tych XX wieku.**

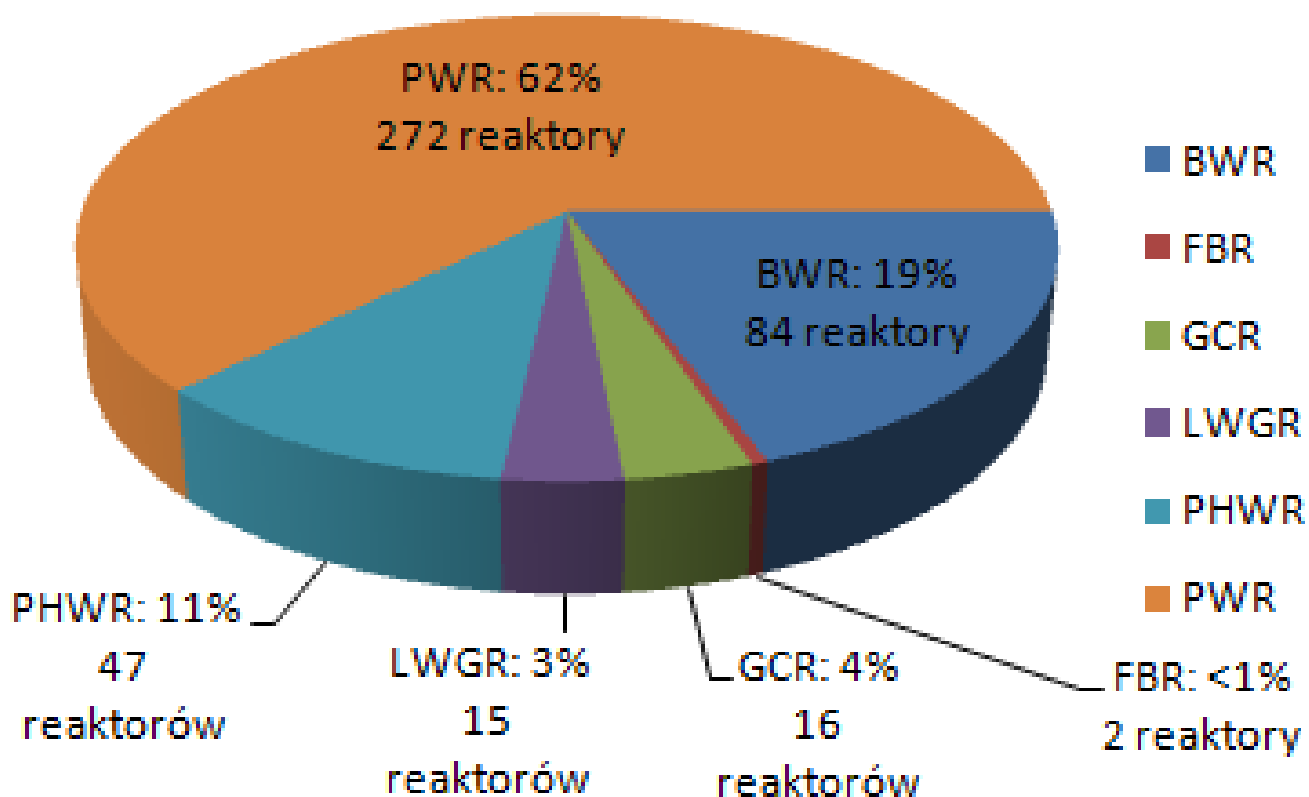
# Reaktory drugiej generacji

Reaktory drugiej generacji należą do następujących typów:

- reaktory lekkowodne (wodne ciśnieniowe: zachodnie PWR i rosyjskie WWER9; wodne wrzące BWR),
- reaktory ciężkowodne (CANDU),
- reaktory grafitowo-wodne (RBMK)
- reaktory grafitowo-gazowe

- 
1. WWER: Wodo-Wodianoj Energeticzeskij Reaktor / Водо-водяной энергетический реактор.
  2. CANDU: CANadian Deuterium Uranium.
  3. RBMK: Reaktor Bolszoj Mosnosti Kanalnyj / Реактор Большой Мощности Канальный.

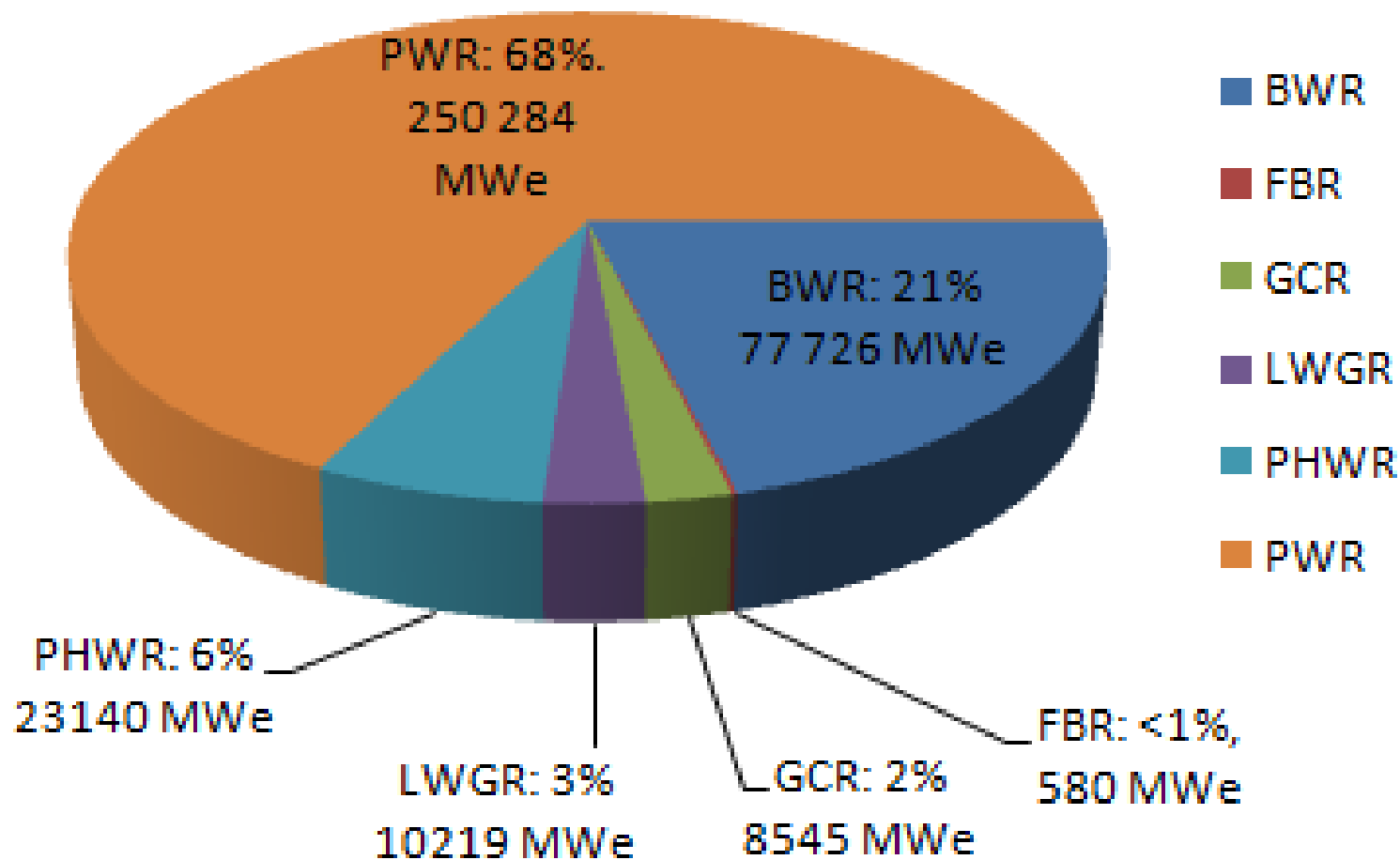
# Ilość reaktorów wg typu



# Ilość reaktorów wg typu

Ok. 81% to reaktory lekkowodne (PWR i BWR), 11% ciężkowodne (PHWR, głównie kanadyjskie CANDU i ich odpowiedniki w Indiach), 4% reaktory chłodzone gazem (Magnez i AGR, głównie w Wielkiej Brytanii), 3% reaktory chłodzone wodą i moderowane grafitem (LWGR, rosyjskie RBMK). Pracują też dwa reaktory energetyczny na neutronach prędkich (FBR).

# Zainstalowana moc w/g typu



# Reaktory lekkowodne

Technologia reaktorów lekkowodnych\* przeważa na świecie pod względem liczebności obecnie pracujących reaktorów. Reaktory tego typu, zbudowane przed awarią ze stopieniem rdzenia, do której doszło w 1979 roku w elektrowni Three Mile Island w USA (wykorzystującej technologię PWR), zostały zmodernizowane z uwzględnieniem wniosków płynących z tej awarii, między innymi poprzez udoskonalenia interfejsu człowiek-maszyna;

---

\*wodne ciśnieniowe: zachodnie PWR i rosyjskie WWER; wodne wrzące BWR

# Reaktory ciężkowodne

Reaktory ciężkowodne (CANDU), to reaktory konstrukcji kanadyjskiej są jedynymi, które utrzymują się w swojej niszy technologicznej, obok reaktorów lekkowodnych. Ciężka woda jest moderatorem, a przeważnie także chłodziwem. Cechą szczególną tych reaktorów jest fakt, że mogą pracować z bezpośrednim wykorzystaniem uranu naturalnego, bez konieczności jego wzbogacenia. Mogą mieć średnie moce, od około 300 do 900 MWe. Wymagają natomiast specjalnych instalacji wytwarzania ciężkiej wody. Ze względu na niewielki zapas reaktywności, wymuszony przez wybór uranu naturalnego jako paliwa, załadunek i rozładunek paliwa odbywają się w trakcie pracy reaktora;

# Reaktory grafitowo-wodne

## Reaktory grafitowo-wodne (RBMK)

Awaria w Czarnobylu spowodowała, że zachodnie społeczeństwa dowiedziały się o istnieniu tego typu reaktorów, których nigdy nie eksportowano poza ZSRR. Stabilność tych reaktorów jest wątpliwa. Nie są one wyposażone w obudowy bezpieczeństwa porównywalne z reaktorami zachodnimi. Moderatorem jest grafit, a chłodziwem zwykła woda wrząca. Podobnie jak w reaktorach CANDU, załadunek i rozładunek odbywają się w trakcie pracy reaktora. **Ten rodzaj reaktora posłużył też do wyprodukowania plutonu, stosowanego w radzieckim arsenale jądrowym. Dlatego reaktorów RBMK nigdy nie wyeksportowano poza były ZSRR**

# Reaktory grafitowo-gazowe

Pozostało ich tylko kilka sztuk, w szczególności w Wielkiej Brytanii (typu AGR).

- Moderatorem jest grafit, a chłodziwem dwutlenek węgla.
- Załadunek i rozładunek paliwa w takim rodzaju reaktora odbywają się w sposób ciągły, w trakcie pracy reaktora.

# Generacja II



**PWR, BWR < 1400 MWe  
(1970 - 1988)**

**N4, KONVOI 1300-1500 MWe  
(1988 - 2010)**



# III Generacja

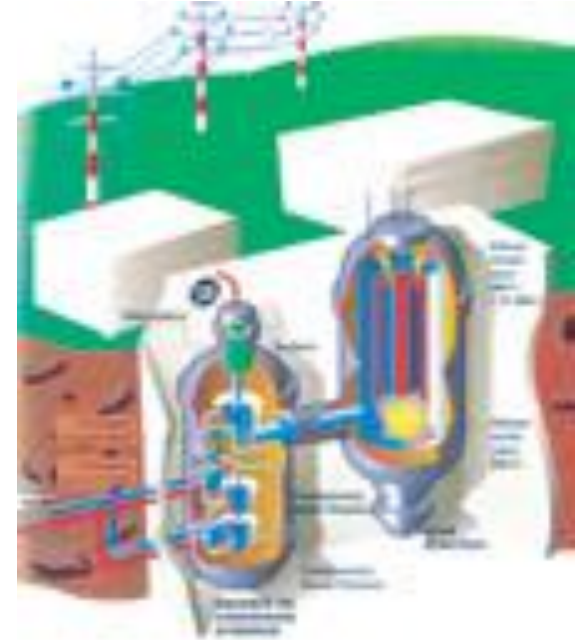
Postępy w konstrukcji reaktorów drugiej generacji skłoniły producentów do zaoferowania reaktorów tzw. trzeciej generacji.

Uwzględniono wnioski płynące z awarii w elektrowni Three Mile Island, a także wnioski z awarii w elektrowni w Czarnobylu na Ukrainie w 1986 roku.

Konstrukcyjnie ograniczono możliwość emisji promieniotwórczych poza elektrownię, nawet w razie całkowitego stopienia się rdzenia. W porównaniu do generacji III, generacja III+ obejmuje reaktory, które są gotowe do wdrożenia od 2010 roku począwszy, a których konstrukcja została jeszcze udoskonalona pod względem bezpieczeństwa i ekonomiki.

# IV Generacja

Reaktory czwartej generacji znajdują się w fazie koncepcyjnej i są przedmiotem prac badawczo-rozwojowych, prowadzonych w ramach współpracy międzynarodowej. Konstrukcyjnie jeszcze bardziej innowacyjne niż reaktory trzeciej generacji; ich wdrożenia można się spodziewać w dalszej perspektywie, około 2040 roku.



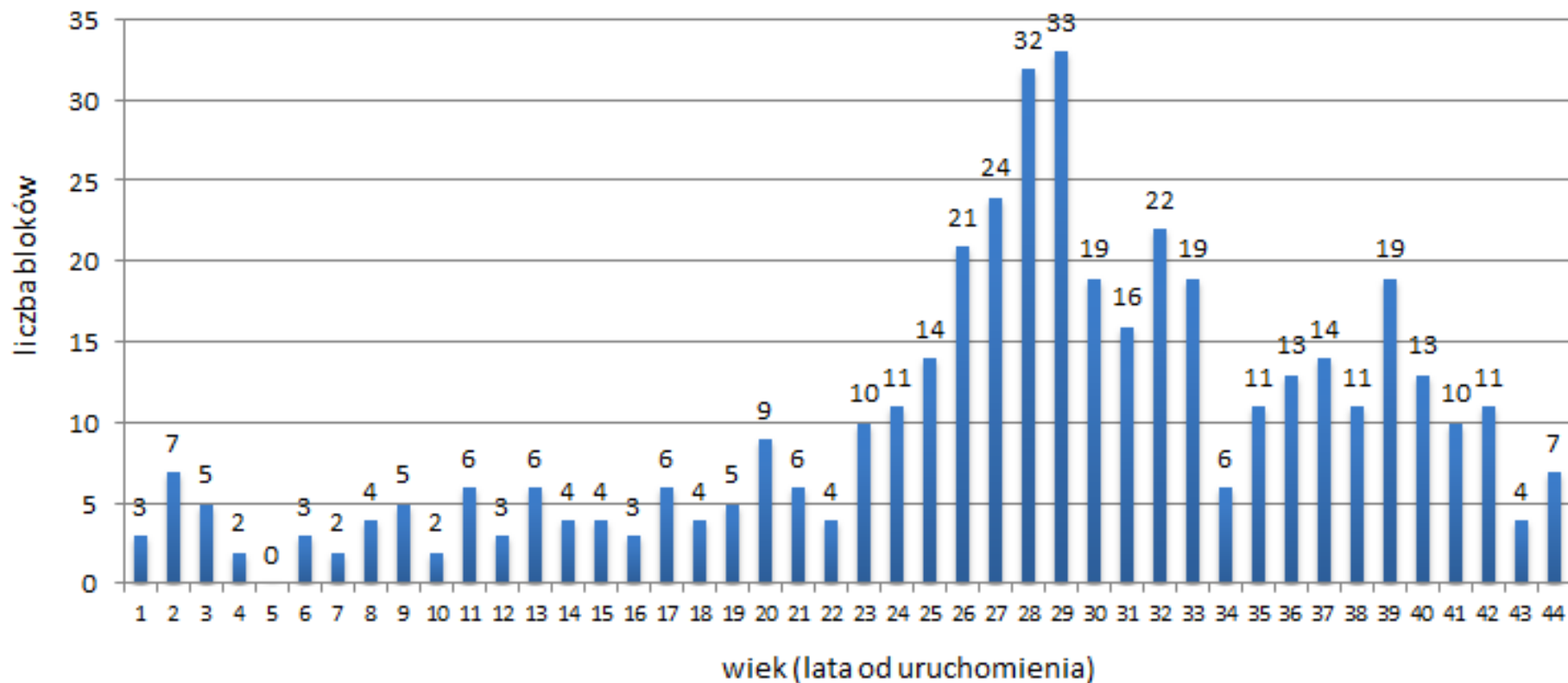
# Czasokres eksploatacji reaktorów

We Francji Agencja Bezpieczeństwa Jądrowego udziela zezwoleń na eksploatację reaktora na kolejne okresy dziesięcioletnie, pod warunkiem pomyślnego przejścia badań w zakresie bezpieczeństwa. Po każdym kolejnych dziesięciu latach pracy, reaktor jest poddawany pogłębionemu badaniu, zwanemu przeglądem dziesięcioletnim, którego wykonanie może trwać około 2 miesiące.

Szczególną uwagę poświęca się starzeniu się urządzeń niewymienialnych, takich jak zbiornik reaktora (którego kruchość wzrasta, w zależności od stopnia napromieniowania podczas pracy reaktora).

# Struktura wiekowa bloków jądrowych

Struktura wiekowa bloków jądrowych



Dane: IAEA PRIS [2013-12-26]

# Struktura wiekowa bloków jądrowych

Pod koniec 2005 roku 50 reaktorów na świecie miało powyżej 30 lat pracy, w tym 12 reaktorów ponad 38 lat i 5 reaktorów ponad 40. Średnia wieku reaktorów na świecie wynosi 20 lat.

Baza wytwórcza we Francji jest nieco młodsza. Średnia na koniec 2005 roku wynosi 17 lat, w tym 21 reaktorów powyżej 20 lat i 2 reaktory powyżej 25 lat.

# Historia rozwoju EJ

W historii było kilka okresów intensywnego budowania elektrowni jądrowych. Po dynamicznym rozpoczęciu rozwoju energetyki jądrowej w Stanach Zjednoczonych w latach 60. XX wieku, światowy kryzys gospodarczy, związany z dwoma kolejnymi wstrząsami naftowymi lat 70., spowodował anulowanie zamówień na elektrownie jądrowe. Uświadomiono sobie rozmiary uzależnienia energetycznego od ropy naftowej.

Skłoniło to dwa kraje, Francję i Japonię, do rozwinięcia własnego przemysłu jądrowego i podjęcia szeroko zakrojonych programów budowy reaktorów.

# Historia rozwoju EJ -cd.

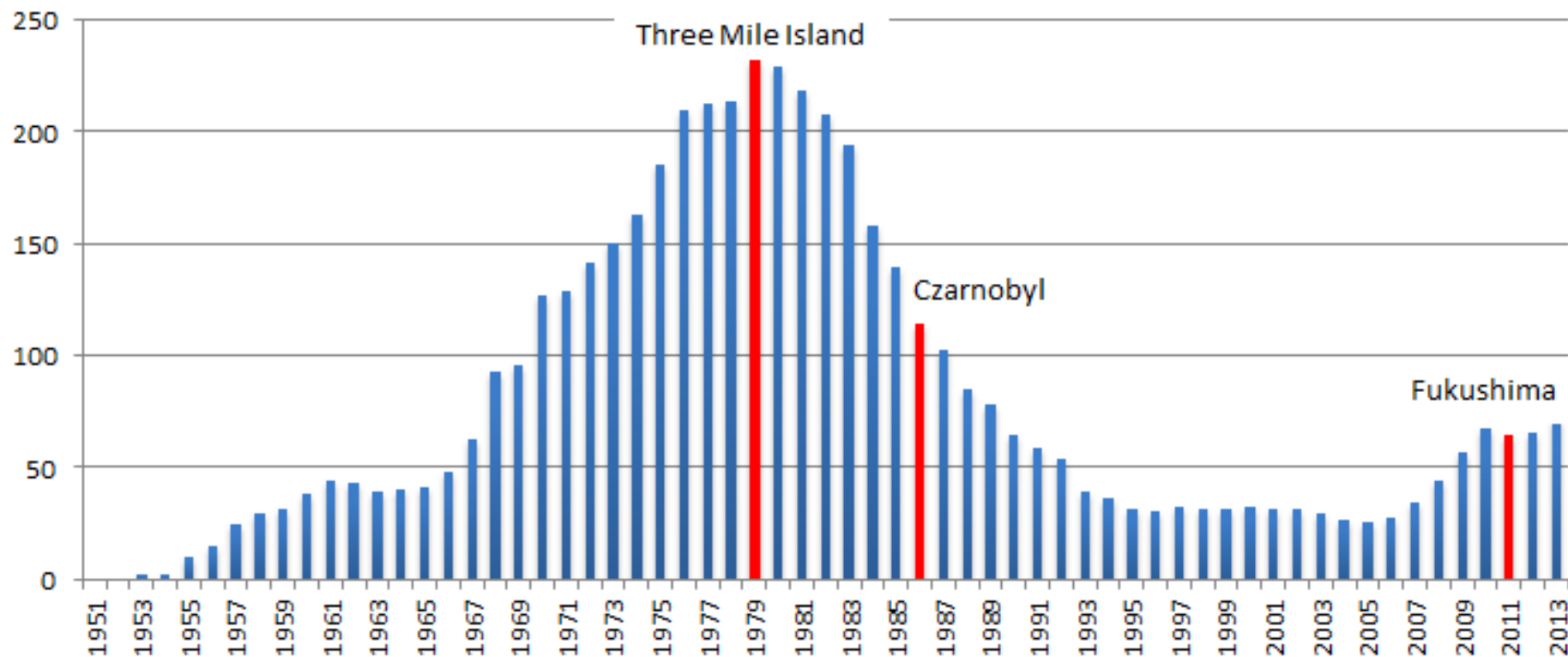
Po awarii reaktora w Czarnobylu w 1986 roku, programy budowy elektrowni jądrowych w Europie uległy spowolnieniu, a w niektórych krajach nawet przerwaniu.

W latach 90. ubiegłego stulecia, dynamika budowy elektrowni jądrowych na świecie utrzymała się przede wszystkim w krajach azjatyckich (Korea Południowa, Japonia, Tajwan, Chiny, Indie).

Jednak od 2000 roku doszło do gwałtownej zmiany koniunktury. Świadomość zmiany klimatu rozpowszechniła się stopniowo na państwa i społeczeństwa, podczas gdy skokowe wahania światowych cen ropy naftowej i gazu spotęgowały poczucie braku bezpieczeństwa energetycznego.

# Bloki w budowie

Liczba bloków jądrowych w budowie w poszczególnych latach



Dane: IAEA PRIS [2013-12-25].

# Postępy w budowie bloków EJ

Po awarii w elektrowni w Czarnobylu w 1986 r. w wielu państwach wstrzymano budowę nowych bloków jądrowych a w niektórych doszło nawet do ich wyłączenia ze względów politycznych – głównie pod naciskiem partii ekologicznych. Mimo to lata 90-te nie są okresem straconym dla energetyki jądrowej – wręcz przeciwnie, dokonano postępu w zakresie wydajności produkcji (średnia globalna dyspozycyjność zwiększyła się z 72,3% do 83,2%), podniesiono (i tak już wysoki) poziom bezpieczeństwa i obniżono koszty eksploatacji. Postęp technologiczny w tym okresie był znaczący. W roku 2004 roczna produkcja energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych była większa o ok. 40% (714 TWh) niż w roku 1990.

# Obecne tendencje w budowie reaktorów

Obecnie w Azji występuje silne zapotrzebowanie na nowe elektrownie (spowodowane rozwojem niektórych krajów, w tym Indii, Chin i Azji Południowo-Wschodniej), podczas gdy w Europie i w Stanach Zjednoczonych odczuwalna staje się konieczność wymiany albo odnowienia przestarzałych instalacji.

W kilku krajach na świecie mamy do czynienia z prawdziwym nowym początkiem dla programów jądrowych. Inne kraje, nie posiadające dotychczas energetyki jądrowej, wyrażają zamiar zbudowania takich elektrowni na swoim terytorium.

# EPR wg Wikipedii

Europejski Reaktor Ciśnieniowy, w skrócie EPR (ang. *European Pressurized Reactor*) – [reaktor wodno-ciśnieniowy](#) (PWR) trzeciej generacji. Zaprojektowany i rozwijany głównie przez koncerny Framatome (obecnie [Areva](#)) i [Électricité de France](#) (EDF) we [Francji](#) oraz [Siemens AG](#) w [Niemczech](#). Obecnie w fazie budowy znajdują się 4 reaktory EPR. Konstrukcja dwóch pierwszych, w [Finlandii](#) i Francji jest opóźniona z powodu kosztów. W 2009 i 2010 r. rozpoczęła się budowa dwóch dodatkowych reaktorów w [Chinach](#).

W lipcu 2008 r. francuski prezydent zapowiedział, że z powodu wysokich cen ropy i gazu we Francji zostanie zbudowany drugi reaktor EPR. W 2009 jako lokalizację wybrano [Penly](#), a budowa powinna rozpoczęła się w 2012 r

# Oczekiwania rynku wobec reaktorów III generacji i generacji III+

Reaktor **EPR**, oferowany przez firmę AREVA, przedstawia najbardziej zaawansowane stadium rozwoju pracujących obecnie reaktorów wodnych ciśnieniowych (PWR). **EPR** jest reaktorem o mocy rzędu 1 600 MWe, typu PWR, którego konstrukcja jest wynikiem ponad 50 lat prac rozwojowych i doświadczeń eksploatacyjnych reaktorów tego typu (w tym reaktorów PWR serii N4 we Francji i serii KONVOI w Niemczech).

Z lepszą konkurencyjnością i zwiększonym bezpieczeństwem reaktor EPR stanowi krok naprzód na drodze zrównoważonego rozwoju. Całkowicie spełnia on wymogi stawiane nowym elektrowniom jądrowym przez firmy elektroenergetyczne i urzędy dozoru jądrowego.

# Czym jest EPR?

W porównaniu ze specyfikacją reaktorów trzeciej generacji, EPR jest przedstawicielem bardziej rozwiniętej generacji III, tzw. generacji III+, gdyż posiada jeszcze bardziej zaawansowane rozwiązania w zakresie ekonomiki, ograniczania ilości odpadów i bezpieczeństwa. Zapewnia on szczególnie wysoki poziom bezpieczeństwa, między innymi dzięki poczwórnie rezerwowanym układom zabezpieczeń, oraz możliwości utrzymania stopionego rdzenia w zamknięciu.

Ponadto, EPR jest nadzwyczajnie odporny na zdarzenia zewnętrzne, takie jak uderzenie ciężkiego samolotu pasażerskiego.

# Reaktor EPR



# Systemy zabezpieczeń reaktora EPR

W budowie reaktora EPR zastosowano kilka aktywnych i pasywnych środków zabezpieczających przed ewentualnymi wypadkami:

- cztery niezależne awaryjne systemy chłodzące, każdy zdolny do schłodzenia reaktora po wyłączeniu zasilania (tzn. 300% redundancja [1]).
- szczelna obudowa bezpieczeństwa wokół reaktora.
- dodatkowy zbiornik i strefa chłodzenia na wypadek wydostania się płynnego rdzenia z reaktora.
- dwuwarstwowy mur betonowy o całkowitej grubości 2,6 metra, zaprojektowany tak, by wytrzymał uderzenie samolotu czy gwałtowny wzrost ciśnienia wewnątrz reaktora.

[1] nadmiar zbytek