

Wydział Fizyki UW
Podstawy bezpieczeństwa energetyki
jądrowej, 2018

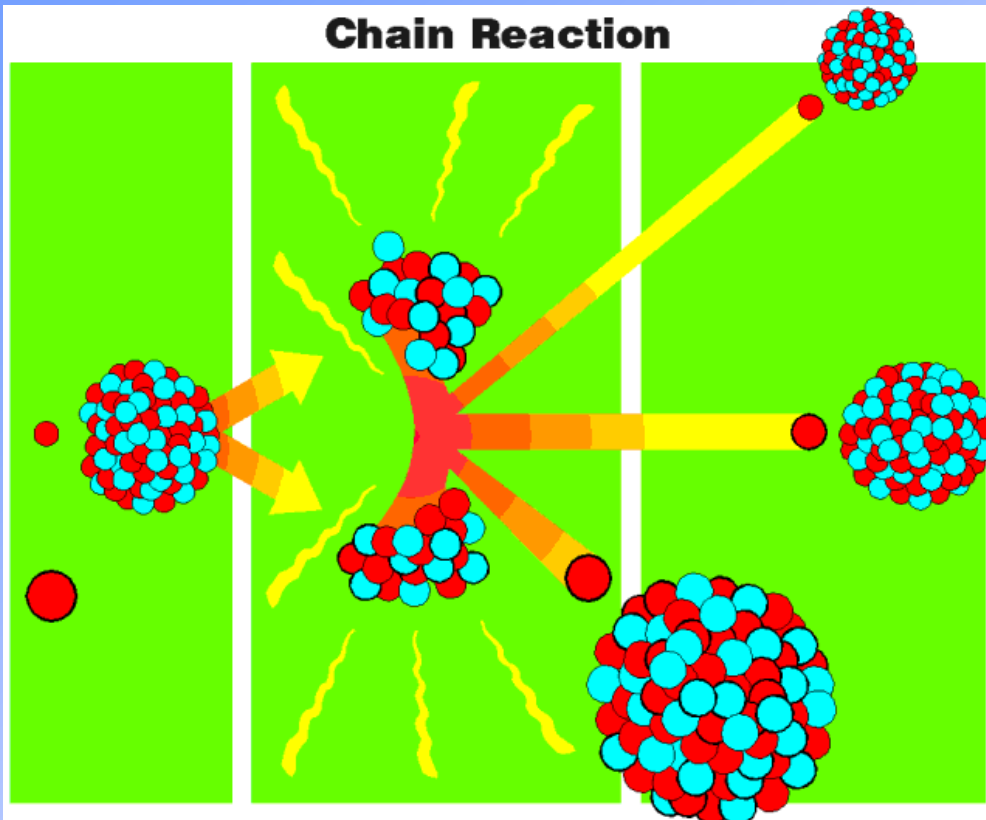
8. TYPY REAKTORÓW
JĄDROWYCH

Dr inż. A. Strupczewski, prof. NCBJ
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Cecha	Rodzaj reaktora
Energia neutronów wywołujących rozszczepienie	1. reaktor termiczny, tj. wykorzystujący neutrony termiczne, a w każdym razie o energiach poniżej ok. 100 eV 2. reaktor pracujący na neutronach prędkich o energiach głównie w zakresie 50 – 100 keV
Paliwo jądrowe (w postaci metalu, węglików lub tlenków, ceramik)	1. reaktor pracujący na uranie naturalnym 2. reaktor pracujący na uranie wzbogaconym 3. reaktor pracujący na ^{239}Pu 4. reaktor pracujący na ^{232}Th (ściślej – ^{233}U)
Rozmieszczenie paliwa jądrowego	1. reaktor jednorodny 2. reaktor niejednorodny
moderator	1. reaktor wodny 2. reaktor ciężkowodny 3. reaktor z moderatorem berylowym 4. reaktor grafitowy 5. reaktor bez moderatora (prędkie)
chłodziwo	1. reaktor chłodzony wodą lub inną cieczą 2. reaktor chłodzony gazem (powietrze, hel, CO_2 , gaz dysocjujący) 3. reaktor chłodzony ciekłym metalem (ciekły sód i jego stopy, potas, bizmut)

Zasada działania EJ

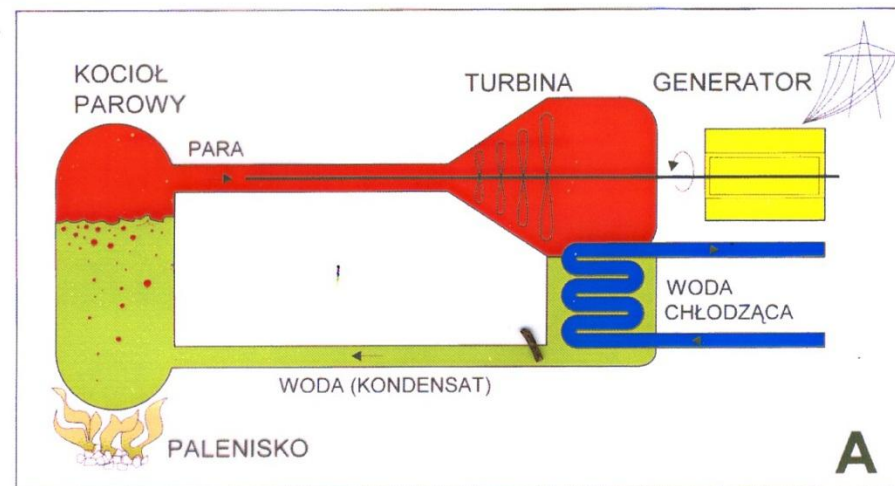
Chain Reaction



1 A neutron is about to hit the nucleus of a uranium atom.

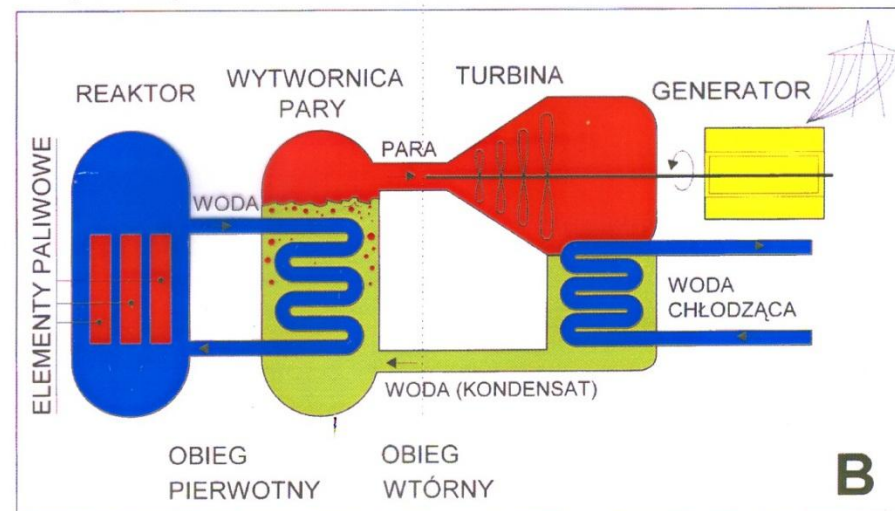
2 The uranium nucleus splits (fissions) into several smaller atoms, releasing heat and several more neutrons.

3 The chain reaction begins: those neutrons hit other nuclei, causing them to fission. And so on.



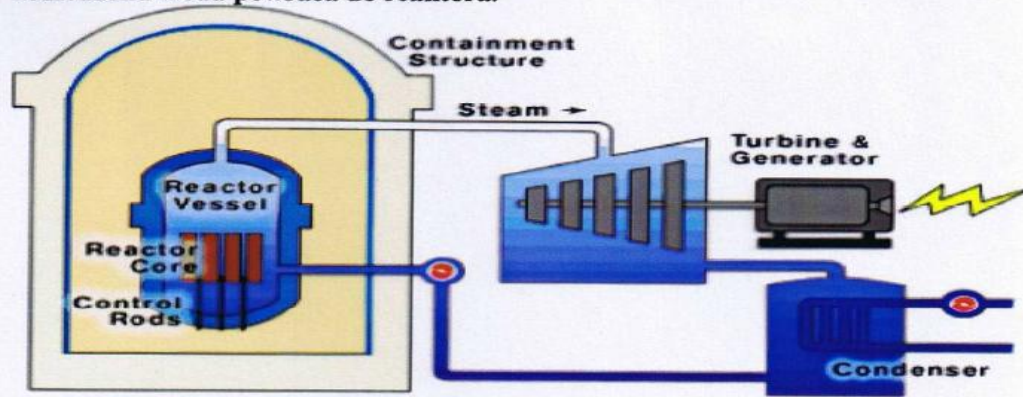
CZĘŚĆ JĄDROWA

CZĘŚĆ KONWENCJONALNA



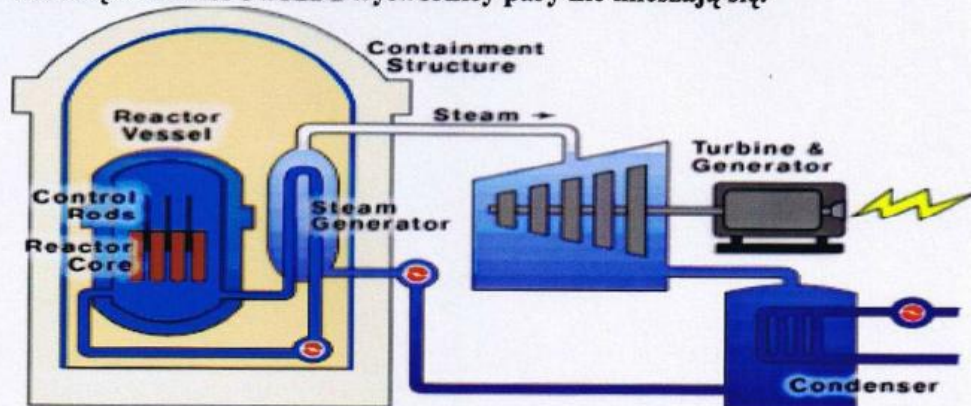
Reaktory BWR i PWR

Reaktor z wodą wrzącą (Boiling Water Reactor BWR): woda przejmująca ciepło od paliwa wrze i przemienia się w parę. Para napędza turbinę połączoną z generatorem elektrycznym. Z turbiny para płynie do skraplacza a następnie jako ochłodzona woda powraca do reaktora.



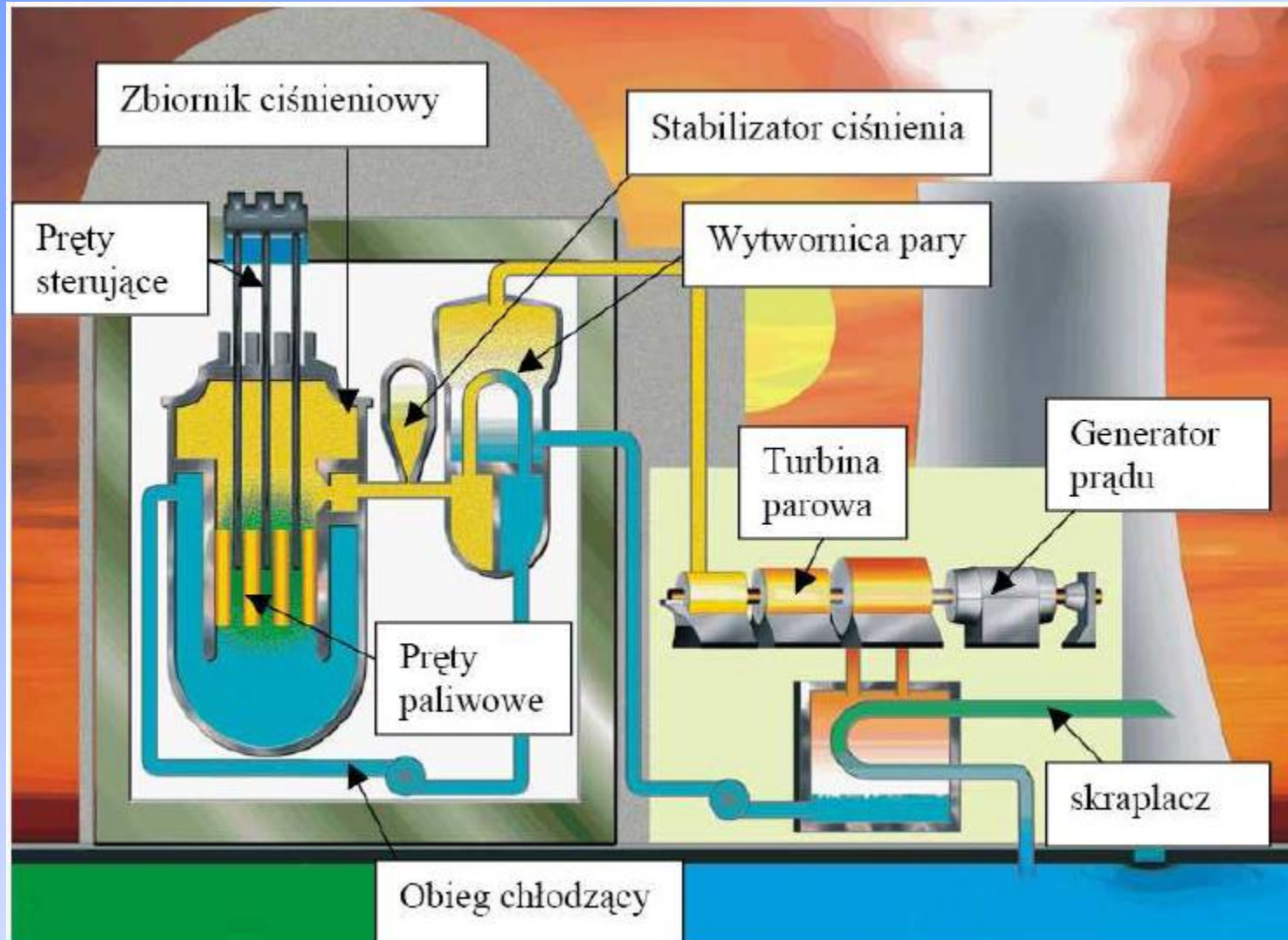
BWR : Ciśnienie 7 MPa, obieg parowy radioaktywny, nieco większe uwolnienia produktów rozszczepienia do otoczenia

Reaktor wodą pod ciśnieniem (Pressurized Water Reactor PWR): ciśnienie wody jest tak wysokie, że woda nie wrze, mimo że przejmuje ciepło od paliwa. Woda chłodząca reaktor i woda z wytwornicy pary nie mieszają się.



PWR: Ciśnienie 16 MPa, obieg pierwotny radioaktywny, obieg parowy nie aktywny, minimalne uwolnienia produktów rozszczepienia do otoczenia

Reaktor z wodą pod ciśnieniem PWR (Pressurised Water Reactor)



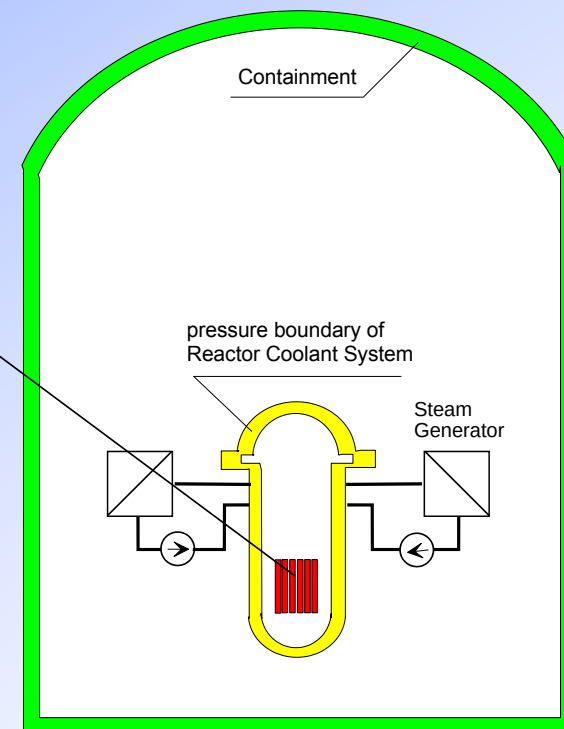
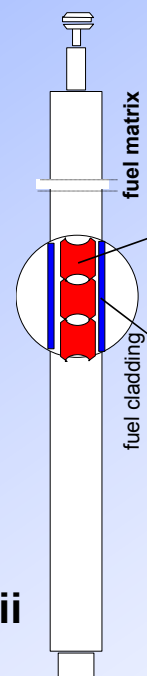
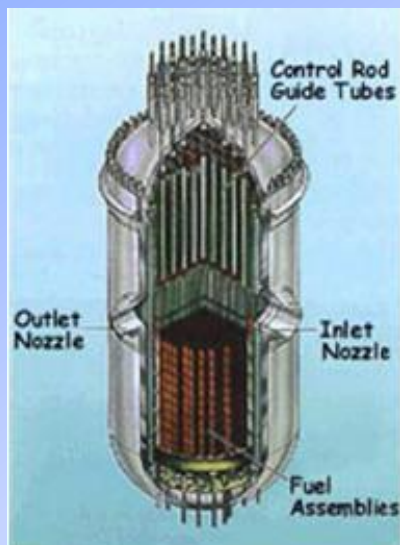
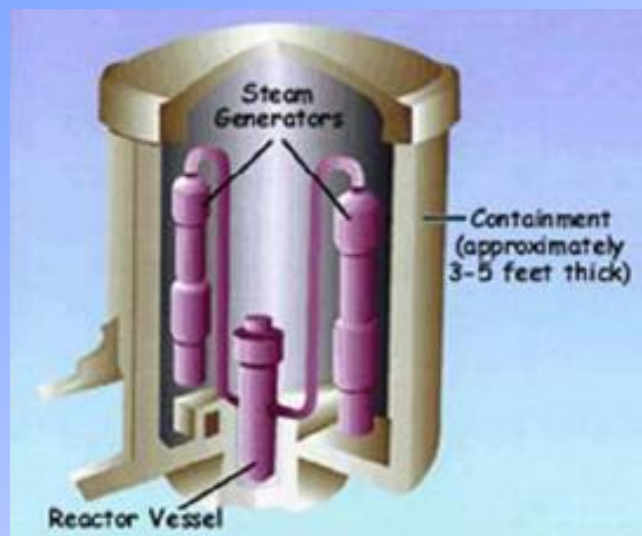
Obieg pierwotny reaktora PWR

- Reaktor typu zbiornikowego, rdzeń wewnątrz zbiornika ciśnieniowego z basenem wodnym.
- Woda - chłodziwo i moderator.
- Aby maksymalnie zwiększyć sprawność turbiny parowej, dąży się do wytworzenia pary o możliwie wysokiej temperaturze i ciśnieniu.
- 15 MPa i 280 °C. Na wyjściu z rdzenia 330°C.
- Stabilizator ciśnienia: jeśli ciśnienie wody w obiegu spada, woda w stabilizatorze jest podgrzewana, powstaje więc w nim więcej pary, która zwiększa ciśnienie w obiegu wody. Na odwrót, jeśli ciśnienie w tym obiegu jest zbyt duże, otwiera się w stabilizatorze ciśnienia zawór, którym wypuszcza się nadmiar pary. Ta przechodzi do zbiornika zrzutowego zamieniając się po drodze w wodę.
- Prędkość przepływu wody. 4 - 4,5 m/s, 20 000 kg wody na sekundę.

Układ reaktora PWR

- Typowa średnica rdzenia reaktora, którego moc cieplna wynosi ok. 3500 MW, to 3-4 m, wysokość zaś, to 2,5-3,5 m. Zbiornik ciśnieniowy reaktora, wykonany z grubej (20-30 cm) stali ma średnicę 4-5 m i wysokość 12-15 m. Od wewnątrz zbiornik wyłożony jest stalą nierdzewną.
- Paliwo do tego typu reaktora jest z reguły wykonane w postaci pastylek z dwutlenku uranu, zamkniętych w koszulce z cyrkonu (stopu o nazwie Zircaloy) lub stali nierdzewnej. Aby zapewnić maksymalną powierzchnię prętów, gwarantującą dobre warunki chłodzenia, pręty paliwowe mają niewielką średnicę ok. 10 mm. W podanych wyżej warunkach chłodzenia wewnątrz rdzenia wydziela się ciepło o gęstości mocy rzędu 100 kW/dm^3 .
- W typowych rozwiązaniach reaktorów PWR wytwornice pary są zamknięte w zbiornikach pionowych. W radzieckim analogu reaktorów PWR, których skrótem jest WWER (od ros. Wodno-Wodjannyj Energeticzeskij Reaktor) zbiorniki wytwornic pary są ułożone poziomo.

Układ barier w reaktorze PWR

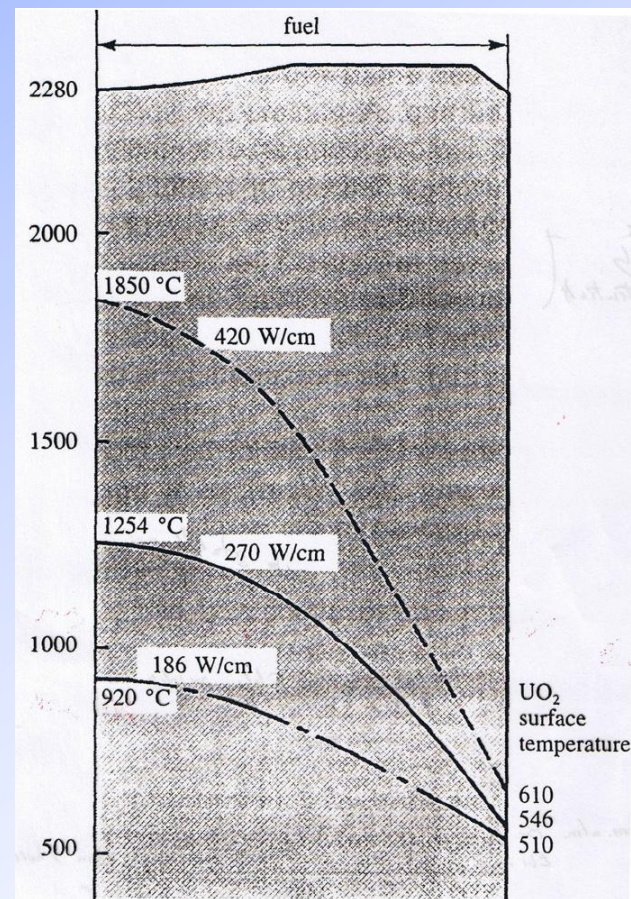
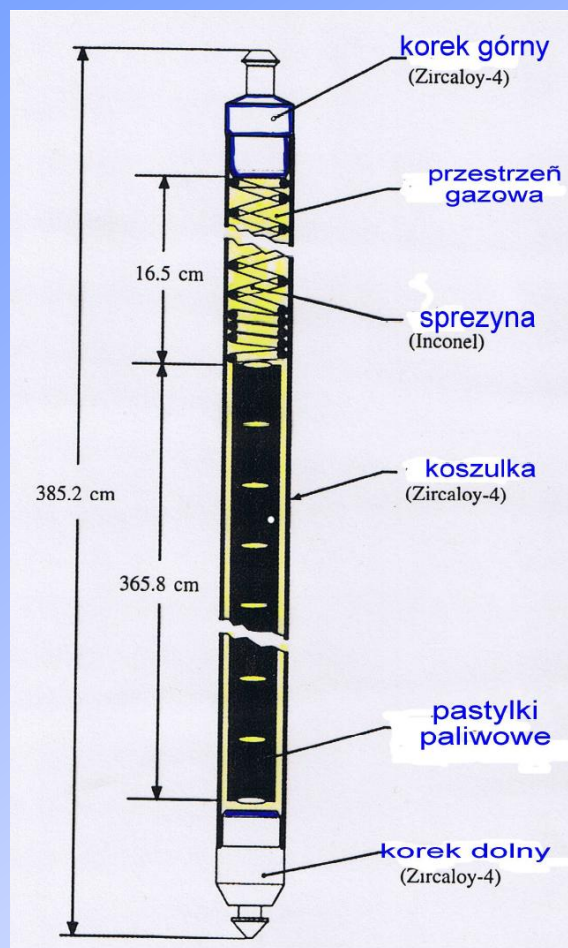


W razie maksymalnej awarii
projektowej LOCA
Uwolnienia Kr, Xe z paliwa- 0,05
Nieszczelności koszulki – 1
Przecieki z obiegu pierwotnego 1

Przecieki na zewnątrz przez
obudowę 0,002

Razem: 0,0001 dla Kr, Xe, ale dużo mniej dla jodu i Cs.

Pręt paliwowy reaktora PWR 900

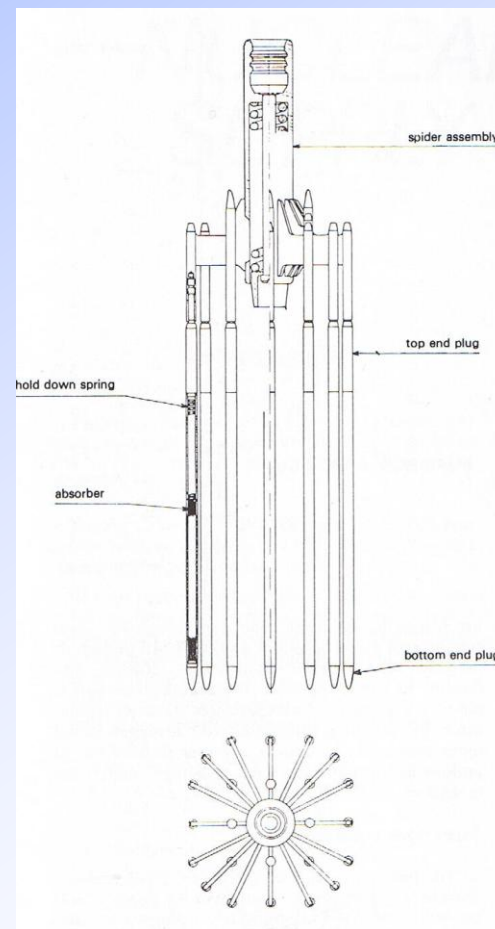


Zestawy prętów paliwowych i regulacyjnych w reaktorze PWR

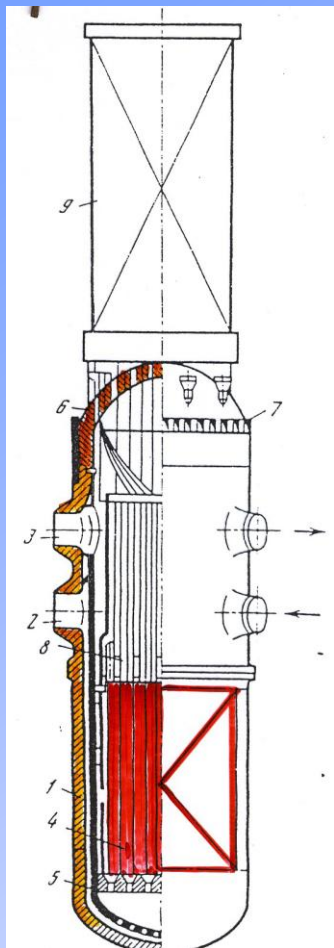


Zestaw paliwowy MOX – z mieszaniny tlenków uranu i plutonu

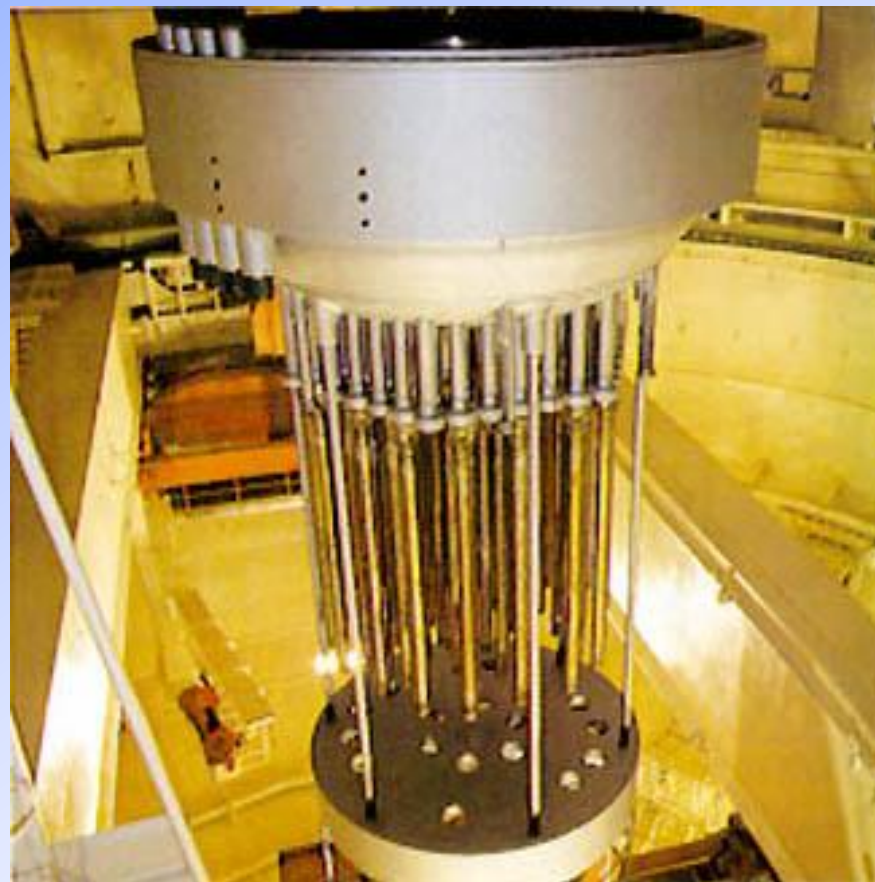
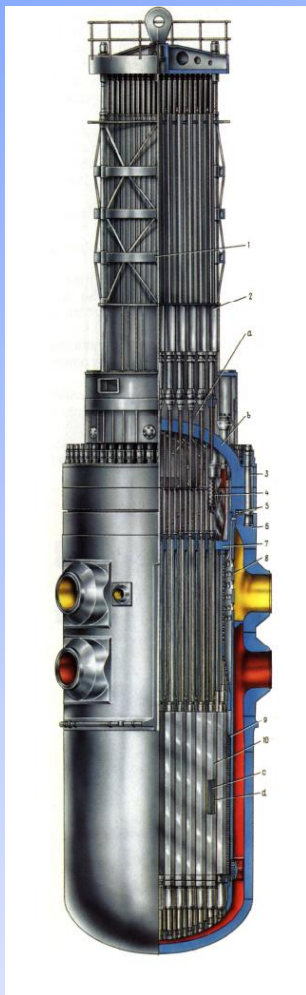
- Wiazka prętów regulacyjnych w reaktorze PWR 1300 MWe



Zbiornik reaktora PWR i WWER



Zbiornik WWER 1000

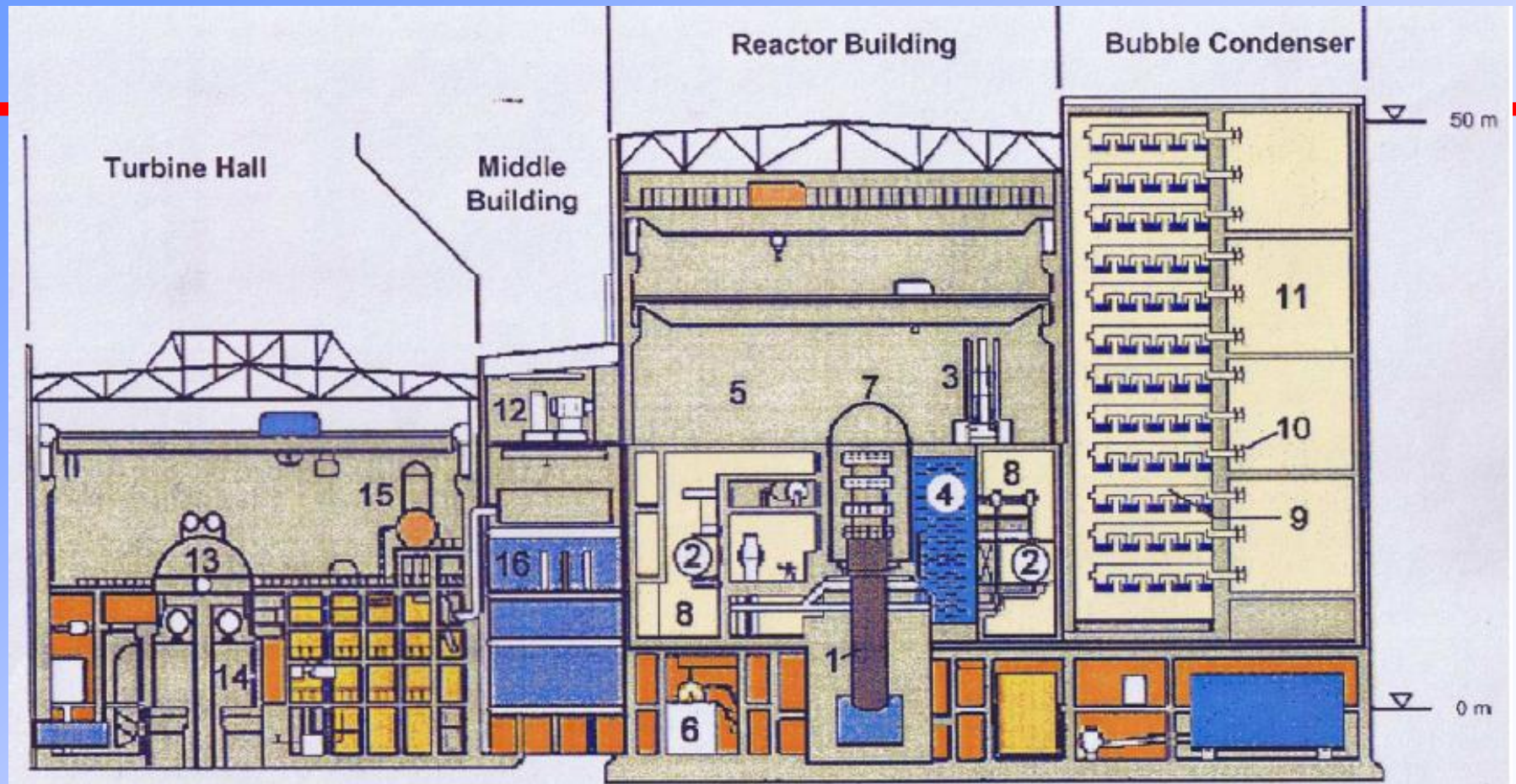


Górny blok reaktora z osłonami prętów regulacyjnych w EJ Balakovo

Układy reaktora PWR

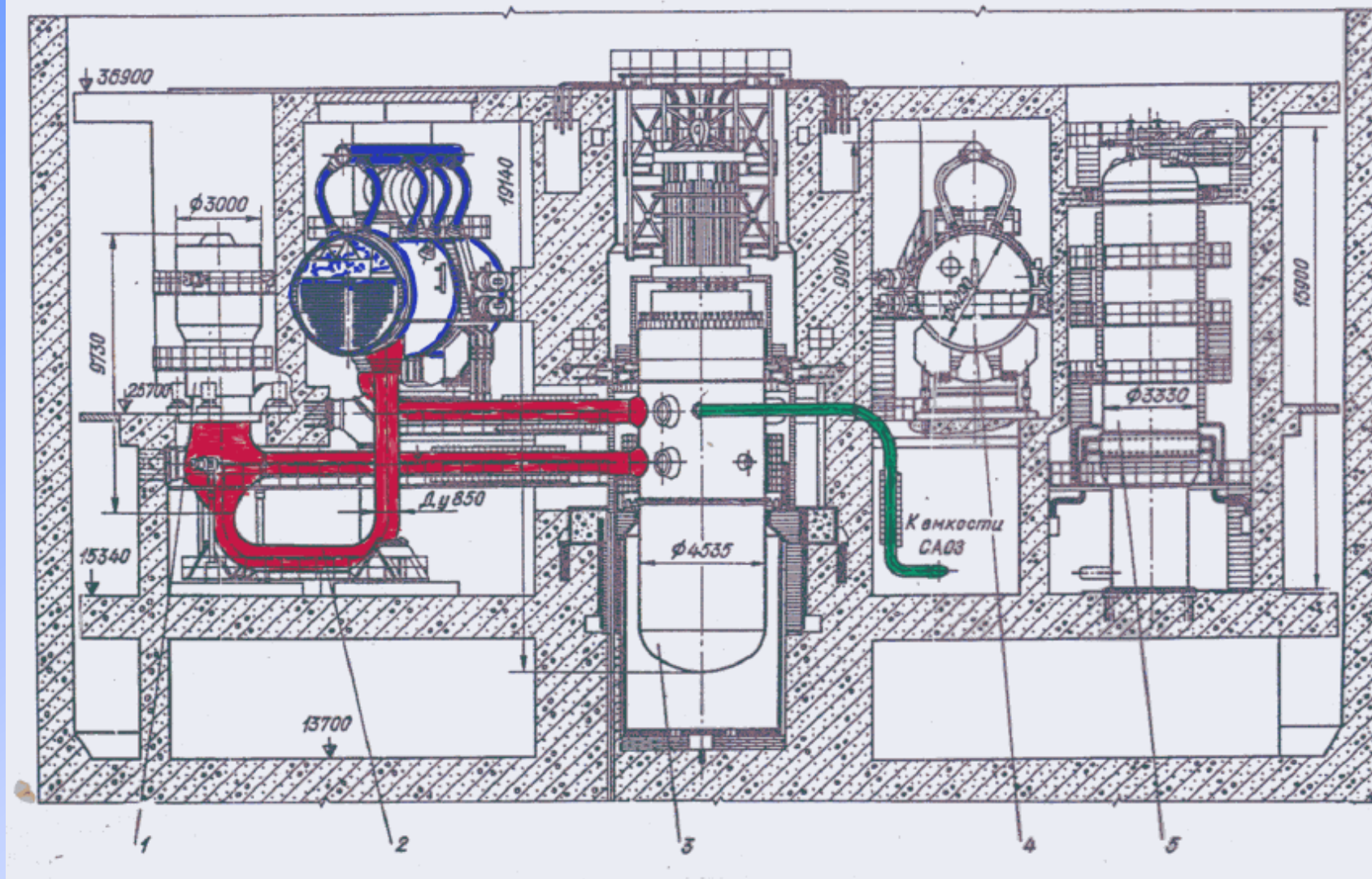
- Podstawowa awaria reaktora - przegrzanie rdzenia, wzrost ciśnienia, wypływ produktów rozszczepienia poza obieg pierwotny.
- Obudowa bezpieczeństwa – w Żarnowcu była to wieża lokalizacji awarii, Wieża ta składała się z wielu pięter ze zbiornikami wodnymi (rodzajem kuwet), przez które miała przechodzić para. Podczas przechodzenia para skraplała się, co powodowało szybki spadek jej ciśnienia.
- Sterowanie długofalowe: układ gospodarki borem i wodorem. Bor. materiał o bardzo wysokiej wartości przekroju czynnego na pochłanianie neutronów termicznych ma dwie funkcje
 - Kompensacja wypalania reaktora
 - Szybkie wyłączenie awaryjne i utrzymanie reaktora w stanie wyłączenia.

EJ Bohunice V2 z reaktorem WWER 440

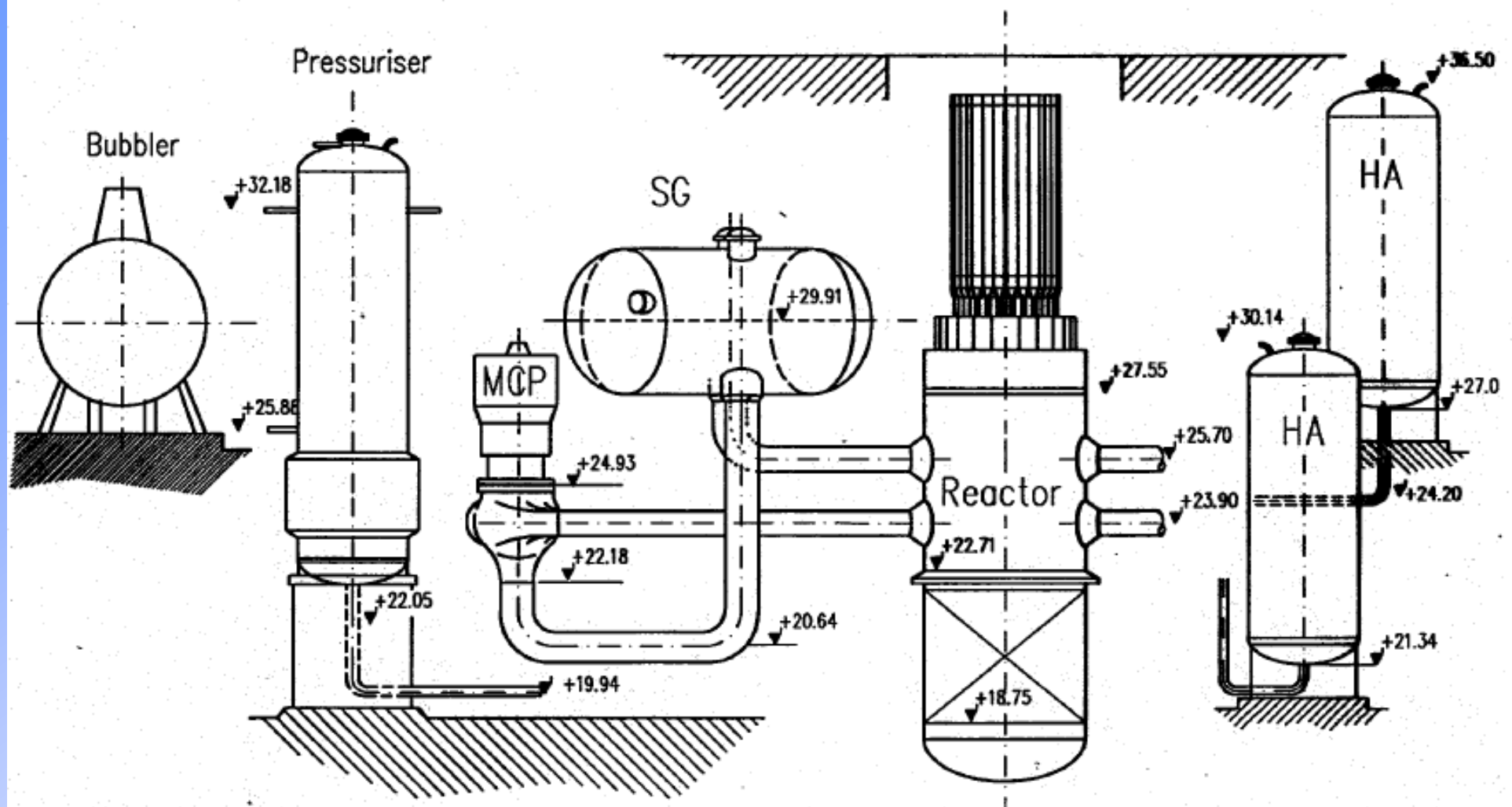


1. Zbiornik ciśnieniowy reaktora, 2. Wytwornica pary, 3. Maszyna przeładunkowa, 4. Basen paliwa wypalonego, 5. Hala reaktorowa, 6. System wody uzupełniającej obiegu pierwotnego, 7. Pokrywa ochronna, 8. System lokalizacji awarii, 9. Półki kondensatora wodnego, 10. Zawory zwrotne, 11. Pułapki powietrzne, 12. Wlot powietrza, 13. Turbina, 14. Skraplacz, 15. Zbiornik wody uzupełniającej z odgazowywaczem, 16. Pomieszczenia pomiarów i sterowania

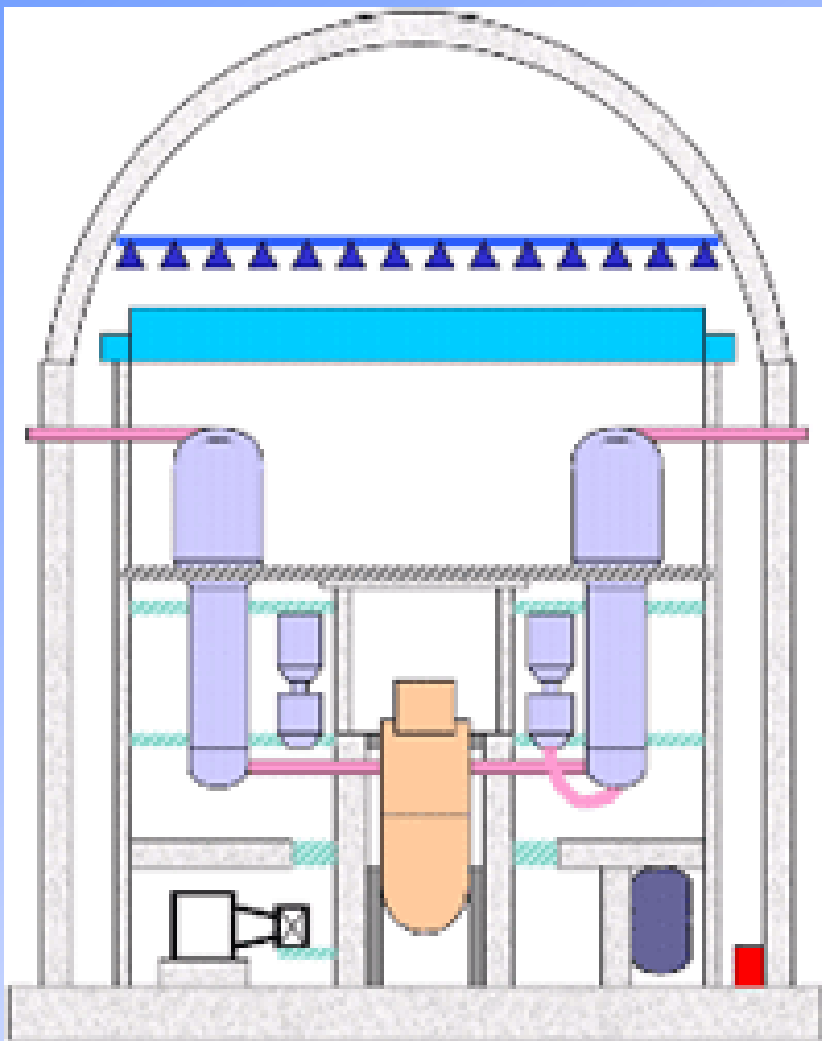
Układ reaktora WWER 1000



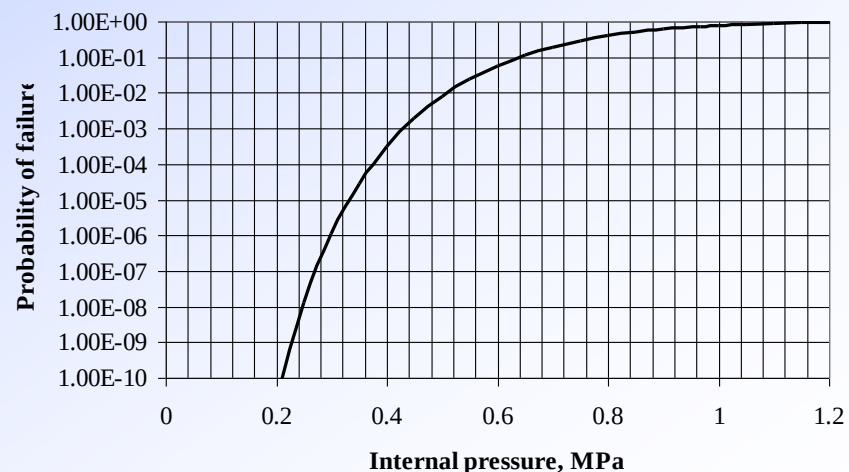
Rozmieszczenie przestrzenne elementów obiegu pierwotnego WWER 1000.



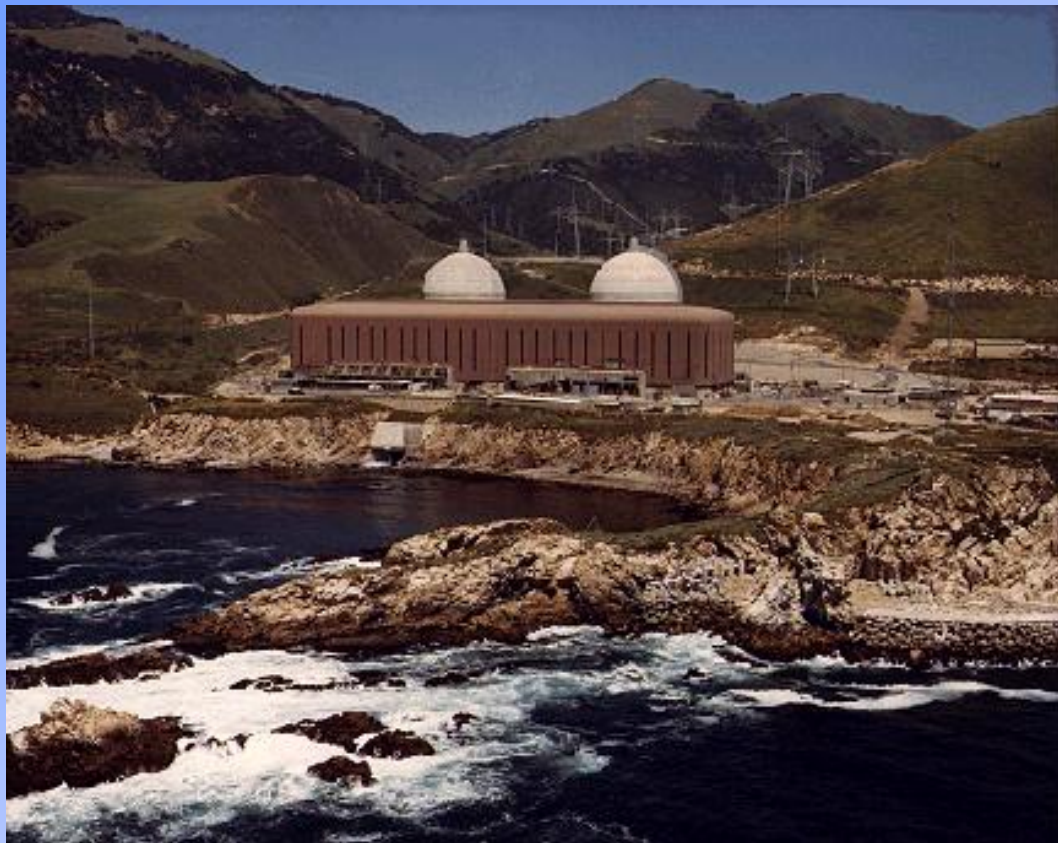
Typowy reaktor PWR z cylindryczną obudową bezpieczeństwa



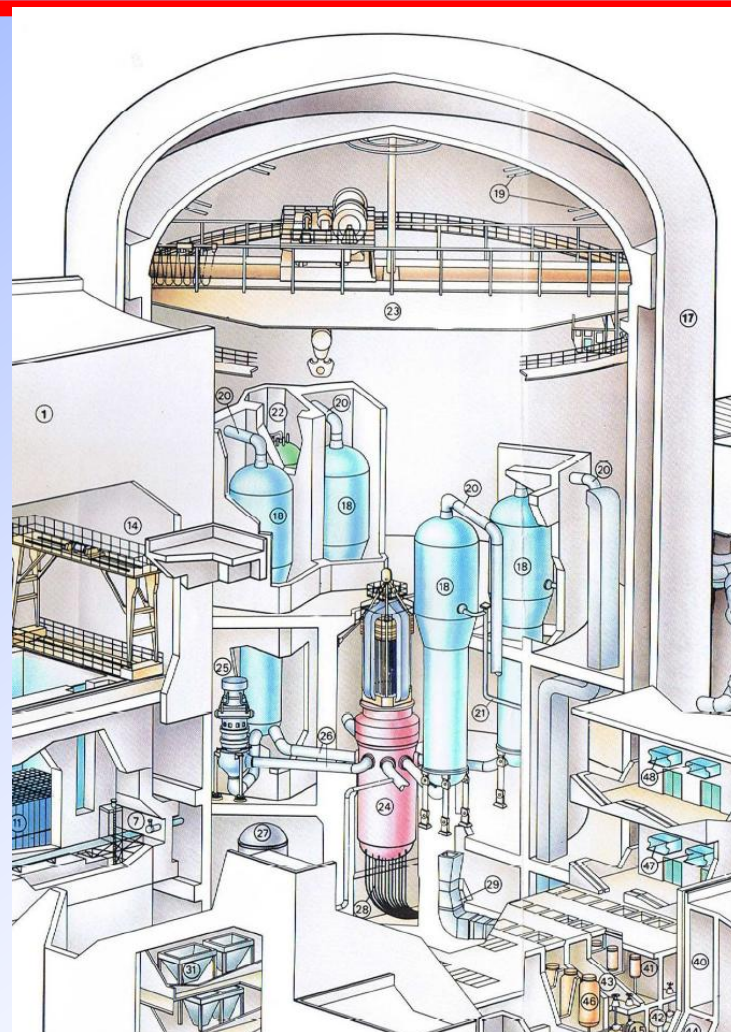
Obudowa bezpieczeństwa po awarii w reaktorze nadal wydziela się ciepło - moc powyłączeniowa. Trzeba ją odebrać. Wytrzymałość obudowy zapewnia duży margines bezpieczeństwa.



Reaktory PWR, obudowa obejmuje wszystkie układy zawierające radioaktywność

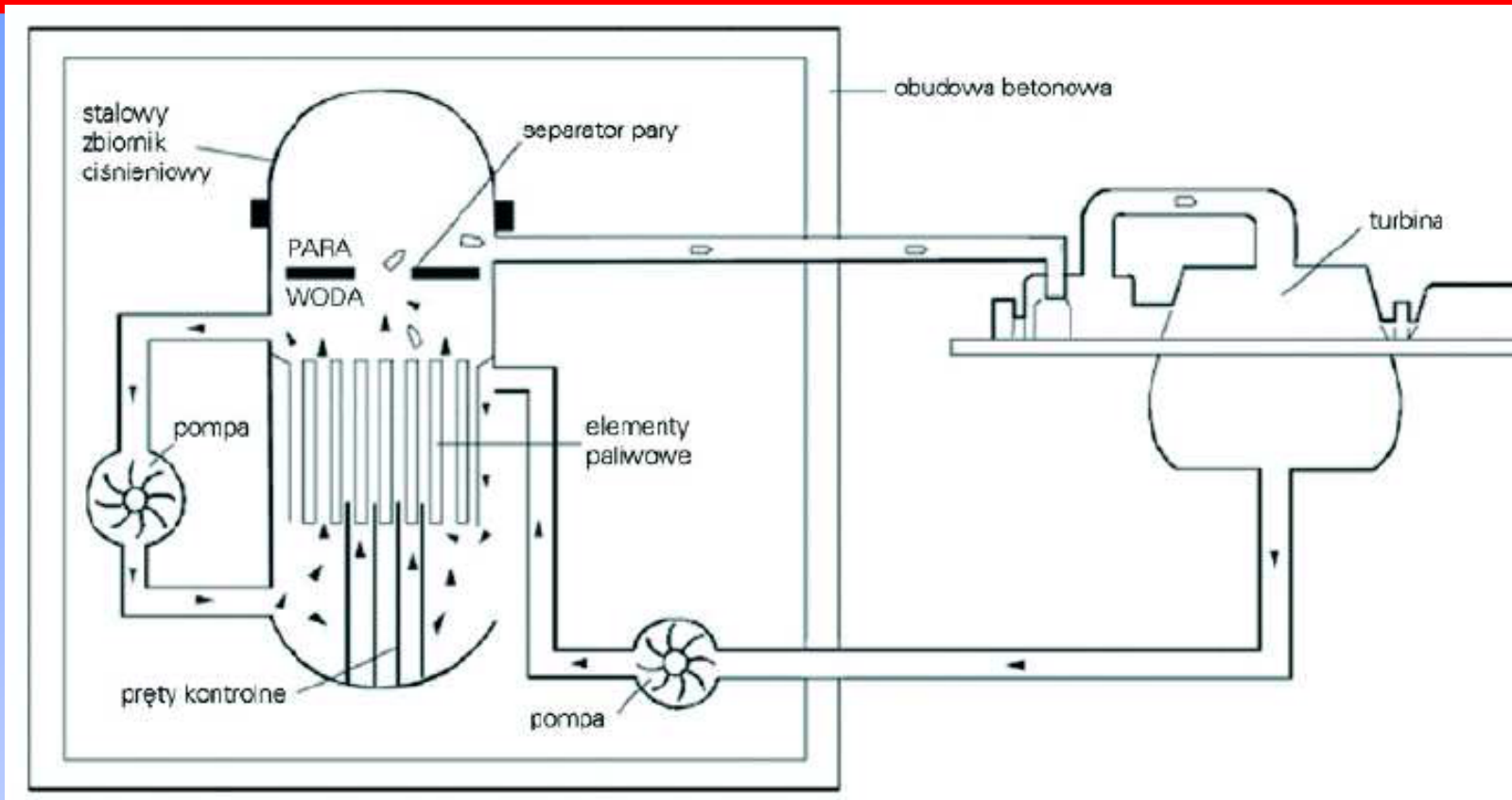


Diablo Canyon, PWR. USA



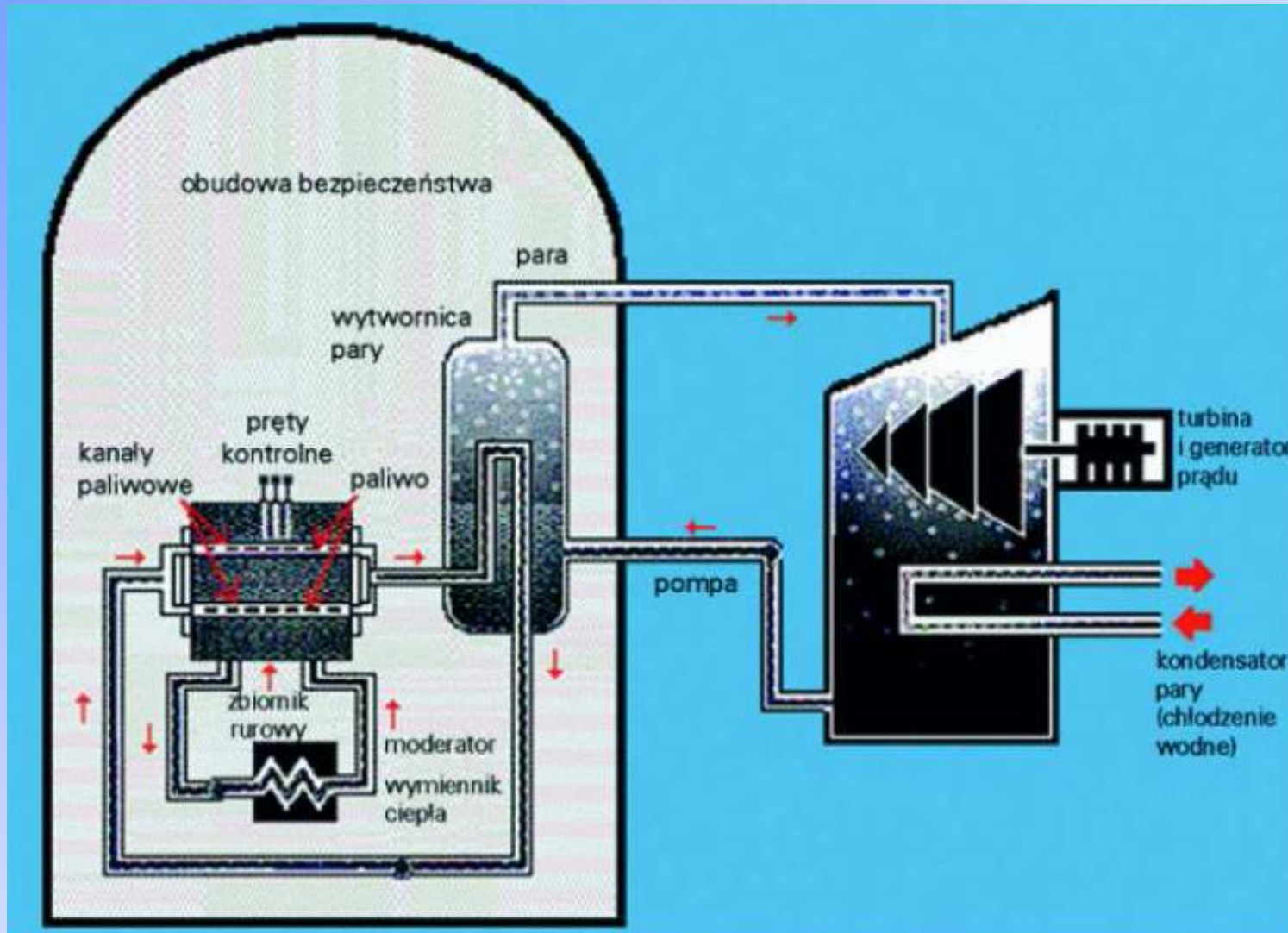
PWR 1300 MWe, Francja

Reaktor z wodą wrzącą BWR Boiling Water Reactor



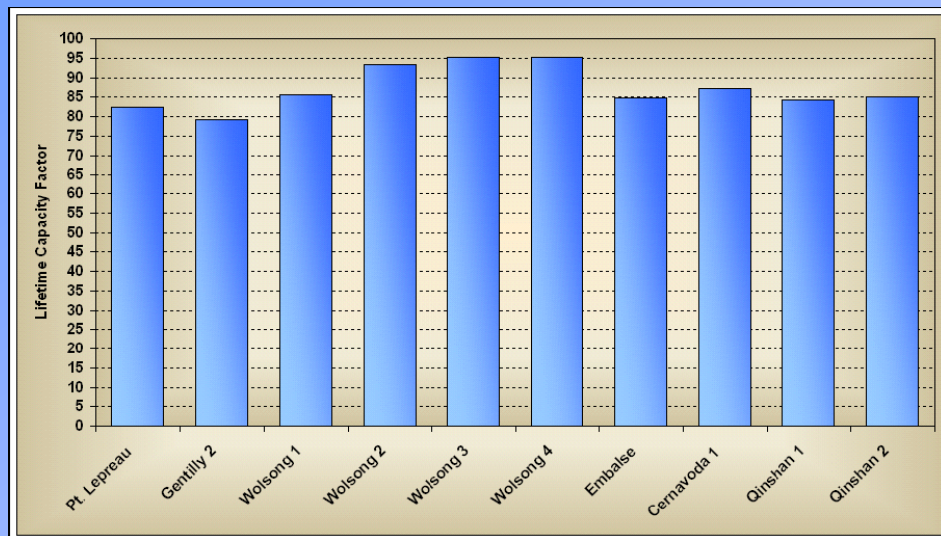
Elementy paliwowe - większe średnice niż w PWR. To pociąga zmniejszenie się gęstości mocy wewnątrz reaktora, konieczność zwiększania rozmiaru rdzenia. Ciśnienie w obiegach wodnych wynosi tu ok. 7 MPa

Reaktor ciężkowodny CANDU Canadian Deuterium Reactor



Reaktor ACR 1000 – udoskonalona wersja reaktora CANDU 6

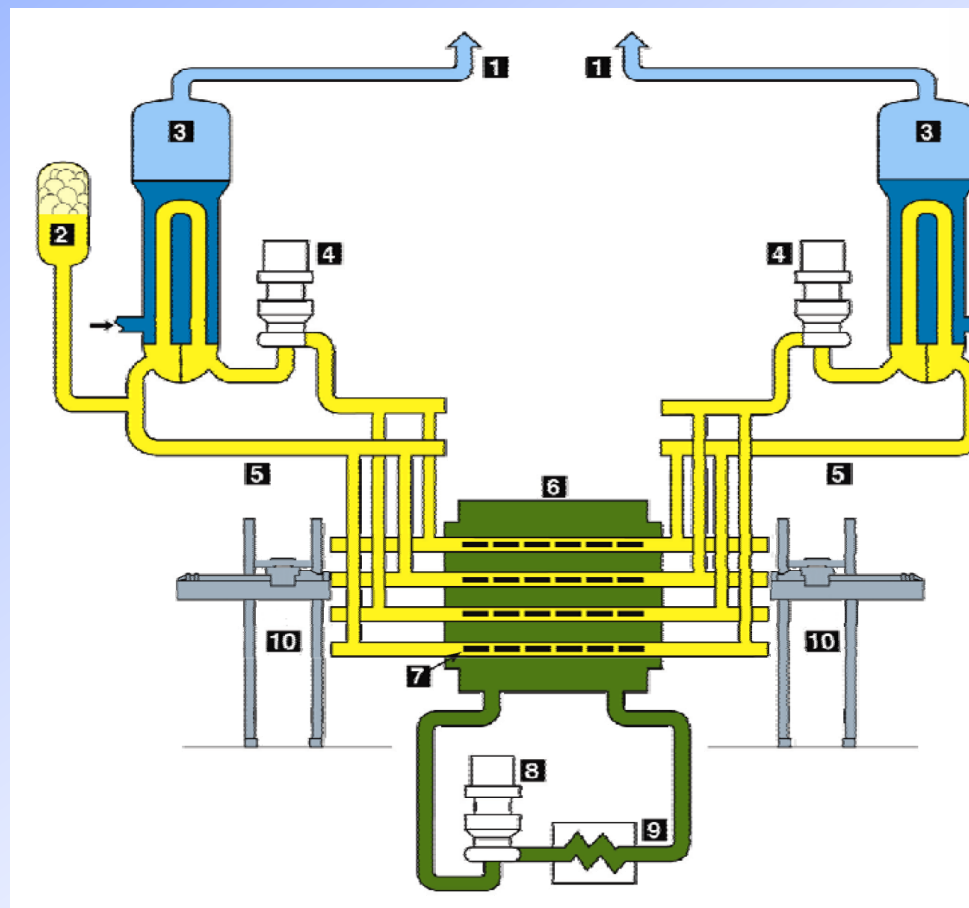
Najnowsza EJ CANDU 6 - 740 MWe - w Qinshan, Chiny, w 2002 r.



Reaktory CANDU 6 osiągają bardzo wysokie współczynniki obciążenia

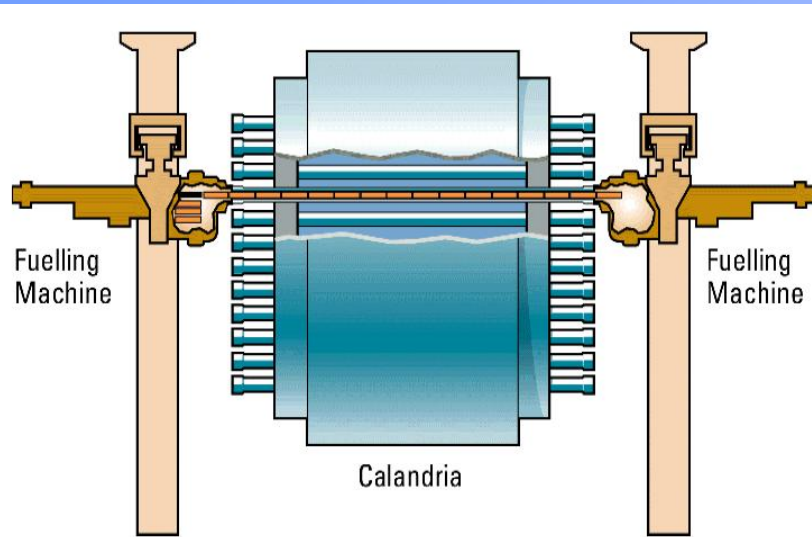
Układów obiegów w reaktorze ACR 1000

1 Kolektory parowe, 2 Stabilizator ciśnienia
3 Wytwornice pary, 4 Pompy obiegowe
5 Kolektory, 6 Kalandria, 7 Paliwo, 8 Pompy moderatora, 9 Wymienniki ciepła moderatora, 10 Maszyny przeładunku paliwa

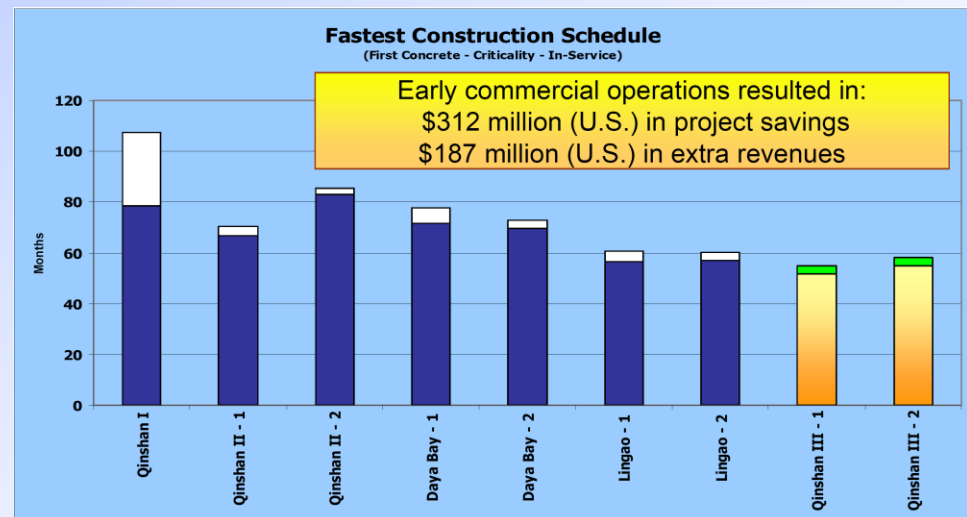


Czas budowy ACR –700: 36 miesięcy

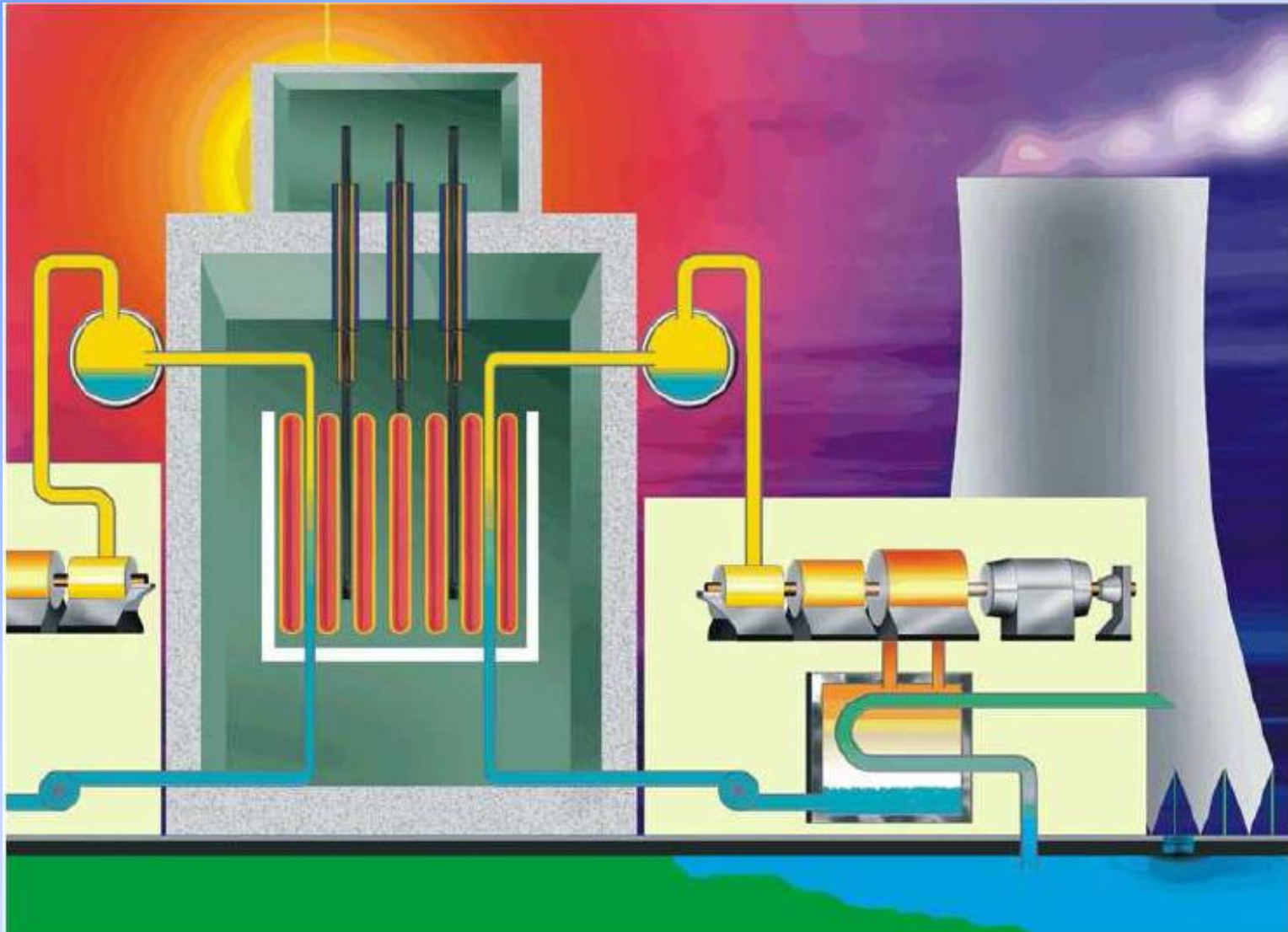
od wylania pierwszej partii betonu do załadunku paliwa dla reaktorów budowanych seryjnie.



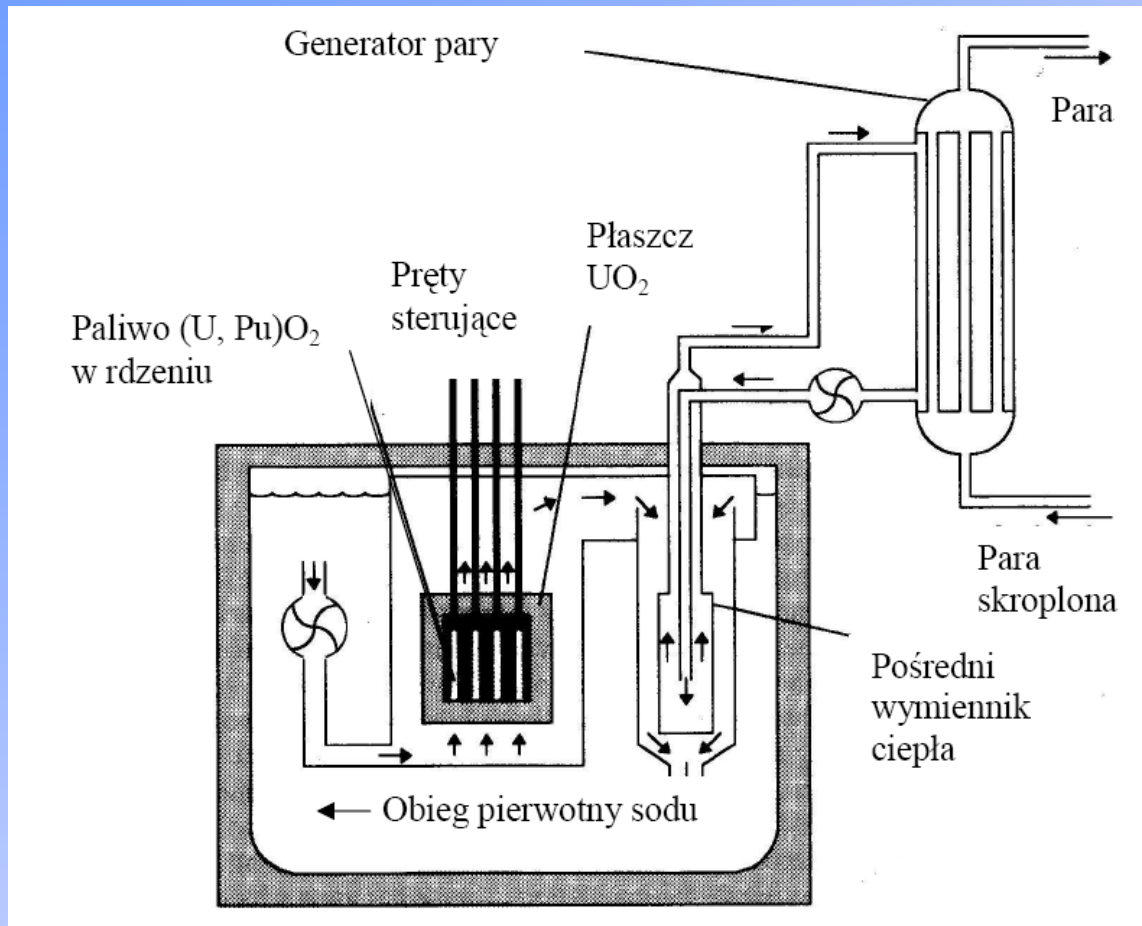
Wielka zaleta CANDU - system wymiany paliwa podczas pracy reaktora. Pozwala to utrzymywać stały profil mocy w rdzeniu, zrównoważone wypalenie paliwa, stałą efektywność systemu wyłączania reaktora, umożliwia wymianę paliwa uszkodzonego podczas pracy. Zapewnia to utrzymanie niskich skażeń radioaktywnych w obiegu pierwotnym i obniżenie dawek otrzymywanych przez pracowników.



Reaktor RBMK (Reaktor Bolszoj Moszcznosti, Kanalnyj)

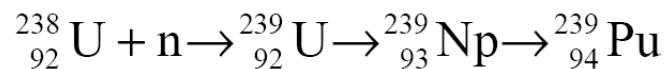


Prędkie reaktory powielające



Chłodziwo :
sód + sód
Super Phenix,
Enrico Fermi
Monju
Biełojarsk BN 600

W budowie nowe
prędkie reaktory
powielające w Rosji
BN-800, Biełojarsk
i w Indiach (cykl
torowy)



Gdy w Europie zapalają się światła, co czwarte z nich (26%) korzysta z prądu z EJ



W latach 2015-2016 : 7+3 reaktorów
zamkniętych **3863+1405 MW_e**

10+10 reaktorów uruchomionych

9377+9479 MW_e Chiny 13, Korea Płd 2, Rosja
2, Indie, Pakistan, USA

Uruchomiono 4× większą moc niż zamknięto

7+3 rozpoczętych budów **7345+3014 Mw_e**

Chiny 8, Pakistan, Emiraty Arabskie

60 reaktorów w budowie

449 reaktorów działających **392 GW_e**

Budowy i przygotowanie nowych
reaktorów:

Finlandia, Francja, Wielka Brytania

+18GW_e, Czechy, Holandia, Węgry, Polska