

Jądrowe reaktory energetyczne 1



dr inż. Mariusz Kopec

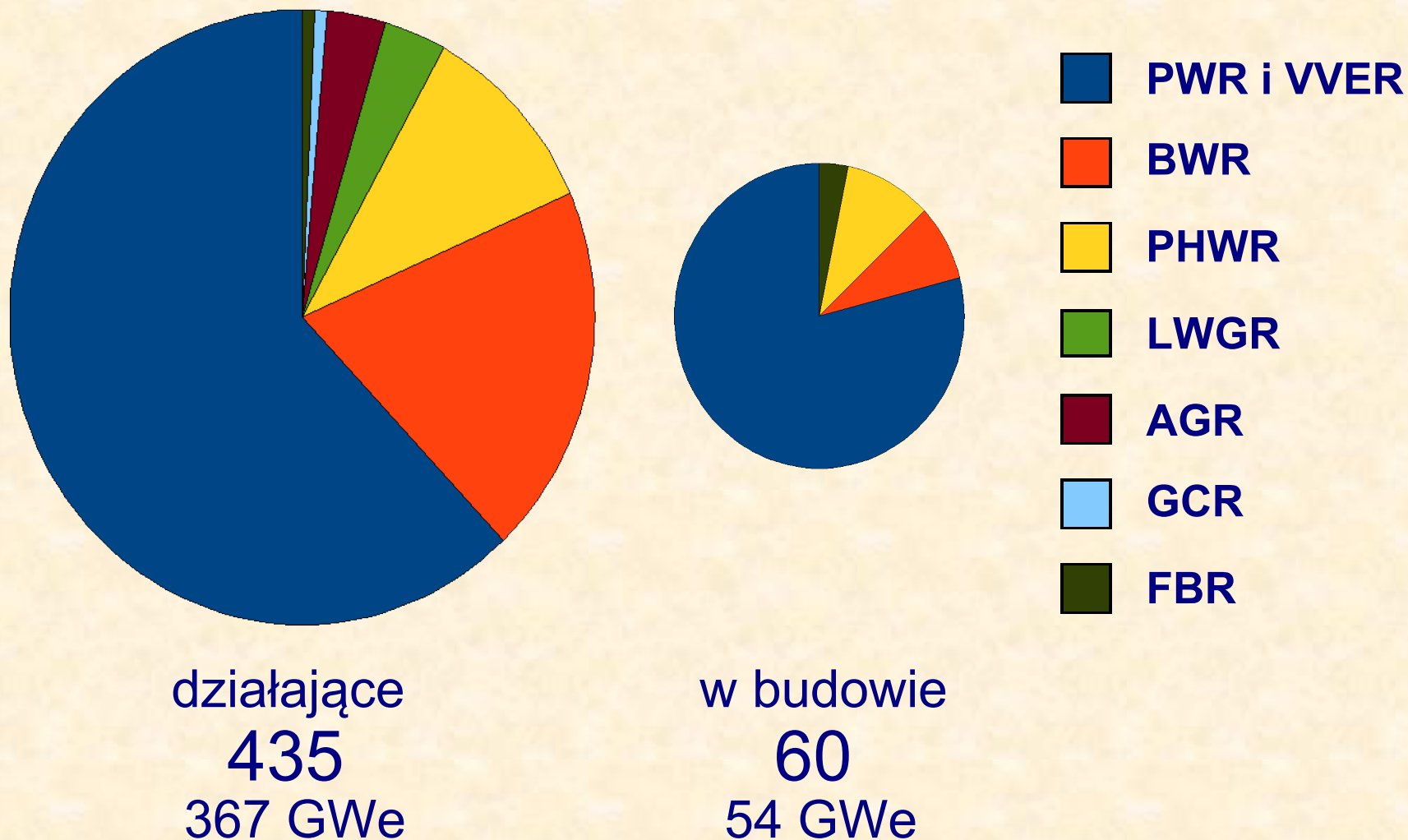
Katedra Energetyki Jądrowej
Wydział Energetyki i Paliw
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie



Zagadnienia

- Reaktory energetyczne na świecie
- Dominujące technologie
- Elementy reaktora PWR
- Wytwarzanie energii elektrycznej
- Chłodzenie reaktora
- Reaktor EPR
- Reaktor AP1000
- Reaktor ESBWR

Reaktory jądrowe na świecie





Reaktory jądrowe na świecie

- **PWR** (Pressurized Water Reactor) reaktor wodny ciśnieniowy, chłodzony i moderowany lekką wodą
- **BWR** (Boiling Water Reactor) reaktor wodny wrzący, chłodzony i moderowany lekką wodą
- **PHWR** (Pressurized Heavy Water Reactor) ciśnieniowy reaktor ciężkowodny, moderowany ciężką wodą
- **LWGR** (Light Water-cooled Graphite-moderated Reactor) reaktor chłodzony wodą z moderatorem grafitowym
- **GCR** (Gas Cooled Reactor) reaktor chłodzony gazem, chłodziwem jest He lub CO₂, moderatorem grafit, paliwem U nat
- **AGR** (Advanced Gas-cooled Reactor) udoskonalony reaktor chłodzony gazem, pracujący na lekko wzbogaconym U
- **FBR** (Fast Breeder Reactor) reaktor prędkie powielający, chłodzony ciekłym sodem

Elektrownie jądrowe w Europie



Reaktory jądrowe w Europie

Francja: 58-1-8

BELLEVILLE	■ ■	PWR
BLAYAIS	■ ■ ■ ■	PWR
BUGEY	▼ ■ ■ ■ ■	GCR PWR
CATTENOM	■ ■ ■ ■	PWR
CHINON A	▼ ▼ ▼	GCR
CHINON B	■ ■ ■ ■	PWR
CHOOZ A	■	PWR
CHOOZ B	■ ■	PWR
CIVAUX	■ ■	PWR
CRUAS	■ ■ ■ ■	PWR
CREYS-MALVILLE	*	FBR
DAMPIERRE	■ ■ ■ ■	PWR
FESSENHEIM	■ ■	PWR
FLAMANVILLE	■ ■ ■	PWR EPR
GOLFECH	■ ■	PWR
GRAVELINES	■ ■ ■ ■ ■ ■	PWR
NOGENT	■ ■	PWR
PALUEL	■ ■ ■ ■	PWR
PENLY	■ ■	PWR
PHENIX	*	FBR
SAINT-ALBAN	■ ■	PWR
SAINT-LAURENT A	▼ ▼	GCR
SAINT-LAURENT B	■ ■	PWR
TRICASTIN	■ ■ ■ ■	PWR

Niemcy: 17-0-15

BIBLIS	■ ■	PWR
BROKDORF	■	PWR
BRUNSBUETTE	●	BWR
EMSLAND	■	PWR
GRAFENRHEINFELD	■	PWR
GREIFSWALD	■ ■ ■ ■ ■ ■	PWR (VVER)
GROHNDE	■	PWR
GUNDREMMINGEN	●	BWR
GUNDREMMINGEN	● ●	BWR
ISAR	● ■	BWR, PWR
JUELICH	▼	HTGR
KRUEMMEL	●	BWR
MUEHLHEIM-KAERLICH	■	PWR
NECKARWESTHEIM	■ ■	PWR
OBRIGHEIM	■	PWR
PHILIPPSBURG	● ■	BWR, PWR
RHEINSBERG	■	PWR (VVER)
KALKAR	*	FBR
STADE	■	PWR
HAMM-UENTROP	▼	HTRG
UNTERWESER	■	PWR
VAK KAHL	●	BWR
WUERGASSEN	●	BWR



Energetyka jądrowa na świecie

Państwo	%EJ	Reaktory	Moc (GWe)
Francja	74,1	58	63,6
Słowacja	51,8	4	1,8
Belgia	51,2	7	5,9
Ukraina	48,1	15	13,2
Węgry	42,1	4	1,9
Armenia	39,4	1	0,4
Szwecja	38,1	10	9,4
Szwajcaria	38,0	5	3,3
Słowenia	37,3	1	0,7
Czechy	33,2	6	3,7
Bułgaria	33,1	2	1,9
Korea Pd	32,2	21	18,8
Japonia	29,2	51	44,6
Niemcy	28,4	9	12,0
Finlandia	28,4	4	1,9
Świat	13,8	435	367,0



Energetyka jądrowa na świecie

Państwo	%EJ	Reaktory	Moc (GWe)
USA	19,6	104	101,4
Francja	74,1	58	63,6
Japonia	29,2	51	44,6
Rosja	17,1	32	23,1
Korea Pd	32,2	21	18,8
Indie	2,9	20	4,4
Wlk. Brytania	15,7	18	10,7
Kanada	15,1	17	12,0
Ukraina	48,1	15	13,2
Chiny	1,8	14	11,3
Szwecja	38,1	10	9,4

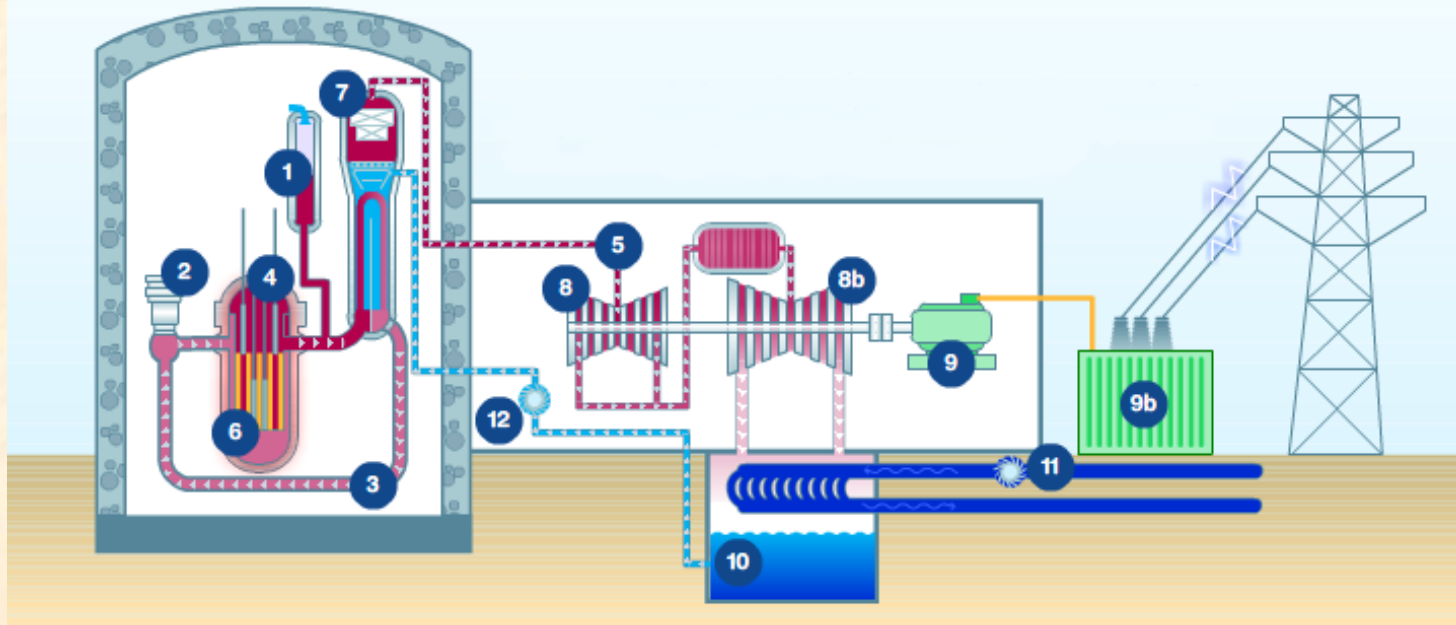
Ranking wg. ilości działających reaktorów

Energetyka jądrowa na świecie

Państwo	W budowie		Planowane	
	#	GWe	#	GWe
Chiny	27	28,9	51	59,8
Rosja	10	9,0	14	16,0
Indie	6	4,6	17	15,0
Korea Pd	5	5,8	6	8,4
Kanada	3	2,2	3	3,3
Japonia	2	2,8	10	13,8
Słowacja	2	0,9	0	0
USA	1	1,2	7	8,6
Francja	1	1,7	1	1,7
Finlandia	1	1,7	0	0
Argentyna	1	0,7	2	0,8
Brazylia	1	1,4	0	0
Pakistan	1	0,3	1	0,3
Polska	0	0	6	6,0

Reaktory w budowie i planowane

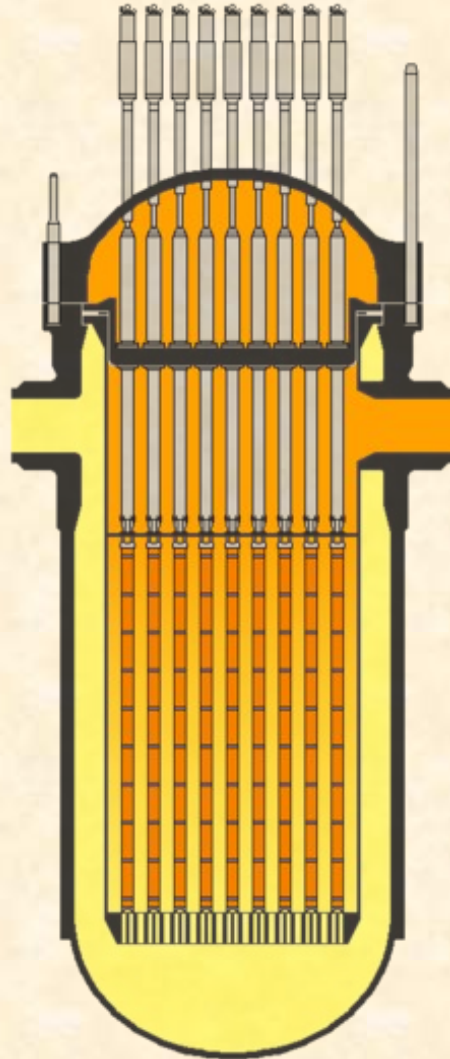
Reaktor PWR



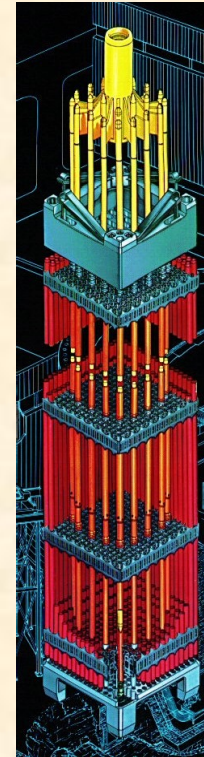
- 1 Stabilizator ciśnienia
- 2 Pompa obiegu pierwotnego
- 3 Cold leg
- 4 Pręty sterujące
- 5 Para
- 6 Rdzeń reaktora
- 7 Wytwornica pary

- 8 Turbina wysokiego ciśnienia
- 8b Turbiny niskiego ciśnienia
- 9 Generator
- 9b Transformator
- 10 Skraplacz
- 11 Chłodzenie skraplacza (np. woda morska)
- 12 Pompa obiegu wtórnego

Reaktor PWR



EPR



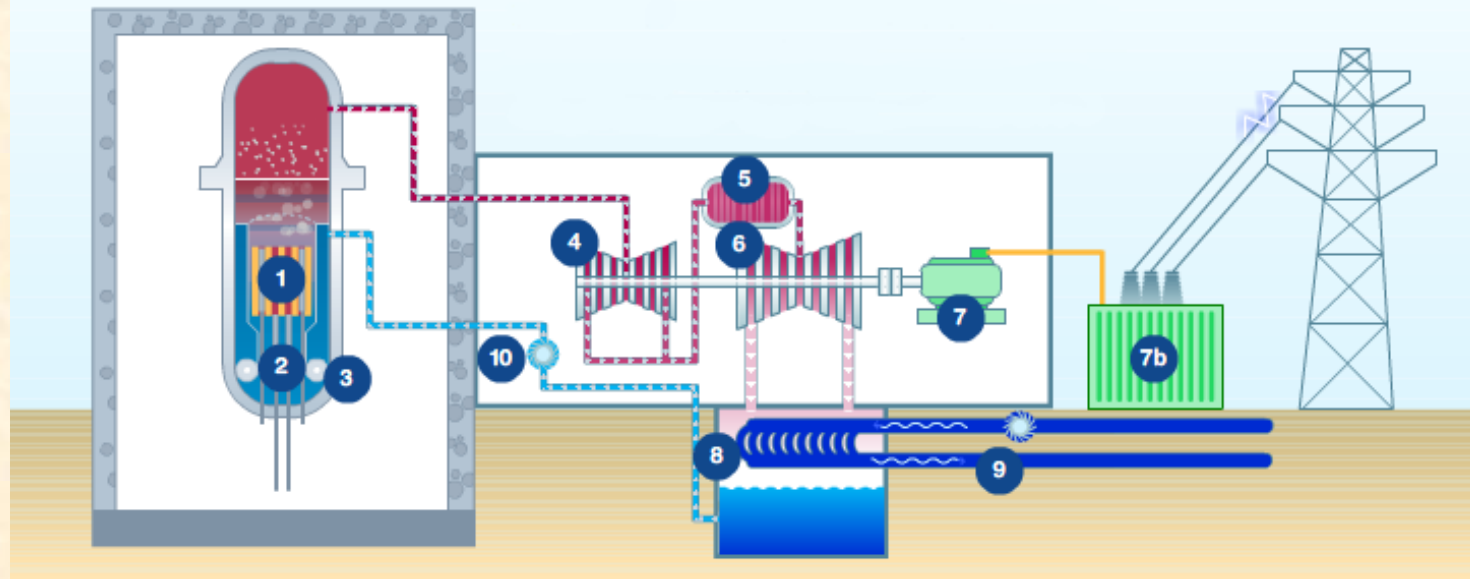
Kaseta paliwowa PWR
(fuel assembly)



PWR - podstawowe dane

- Podstawowe dane
 - moderator - woda
 - chłodziwo - woda (tylko faza ciekła)
 - paliwo UO_2 wzbogacenie 3.5-4.0% ew. MOX
- Parametry pracy
 - ciśnienie - ok. 15 MPa
 - temperatura - 300-325°C
 - sprawność 33-35%
- Podstawowe elementy systemu
 - zbiornik ciśnieniowy reaktora
 - sterowanie: pręty sterujące, bor
 - 2-4 pętle chłodzenie z (pompy+wytwornice pary)
 - stabilizator ciśnienia
 - wytrzymały budynek reaktora

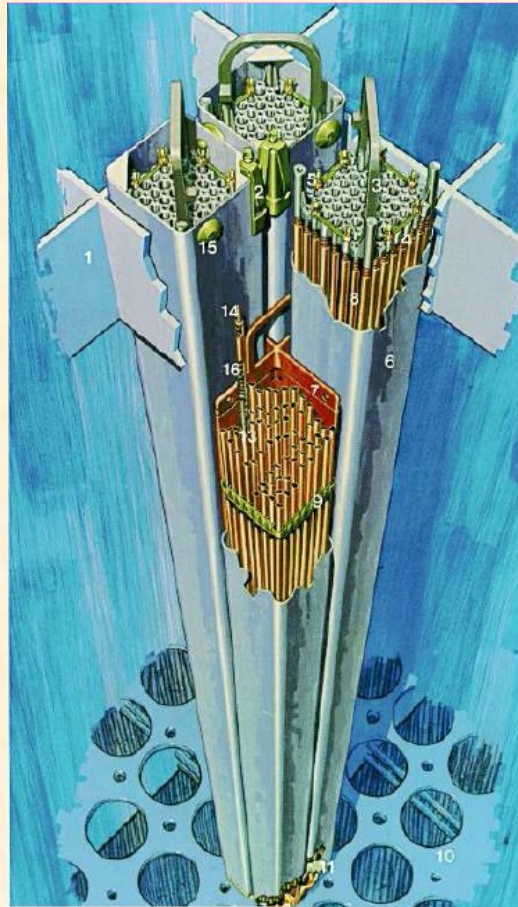
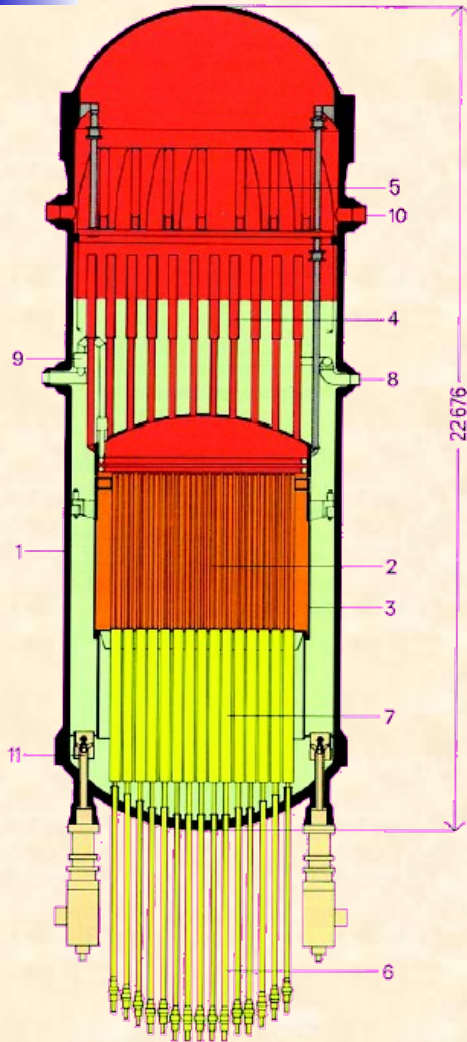
Reaktor BWR



- 1 Rdzeń
- 2 Pręty sterujące
- 3 Pompy recykulacyjne
- 4 Turbina wysokiego ciśnienia
- 5 Przegrzewacz międzystopniowy
- 6 Turbina niskiego ciśnienia

- 7 Generator
- 7b Transformator
- 8 Skraplacz
- 9 Chłodzenie skraplacza (np. woda morska)
- 10 Pompa obiegu wtórnego

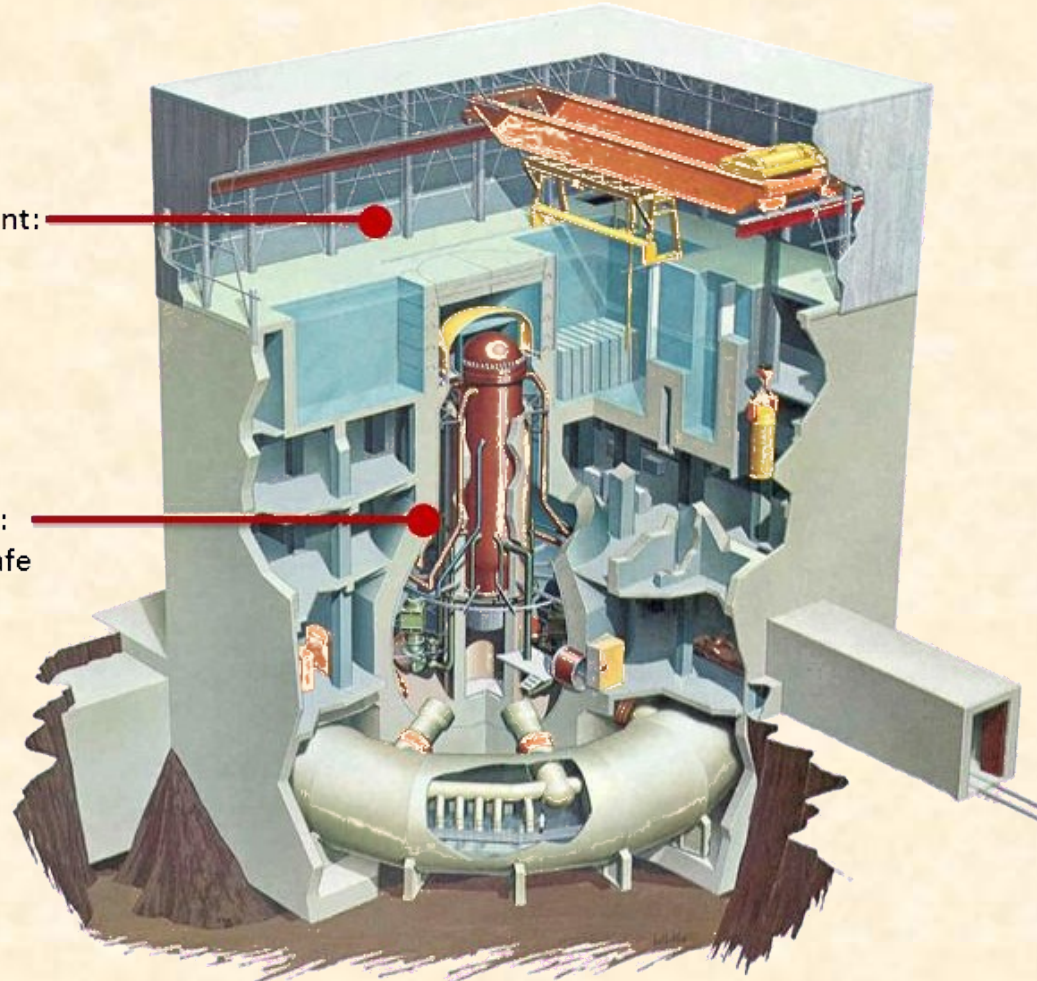
Reaktor BWR



Reaktor BWR

Secondary containment:
Area of explosion at
Fukushima Daiichi 1

Primary containment:
Remains intact and safe



Boiling Water Reactor Design



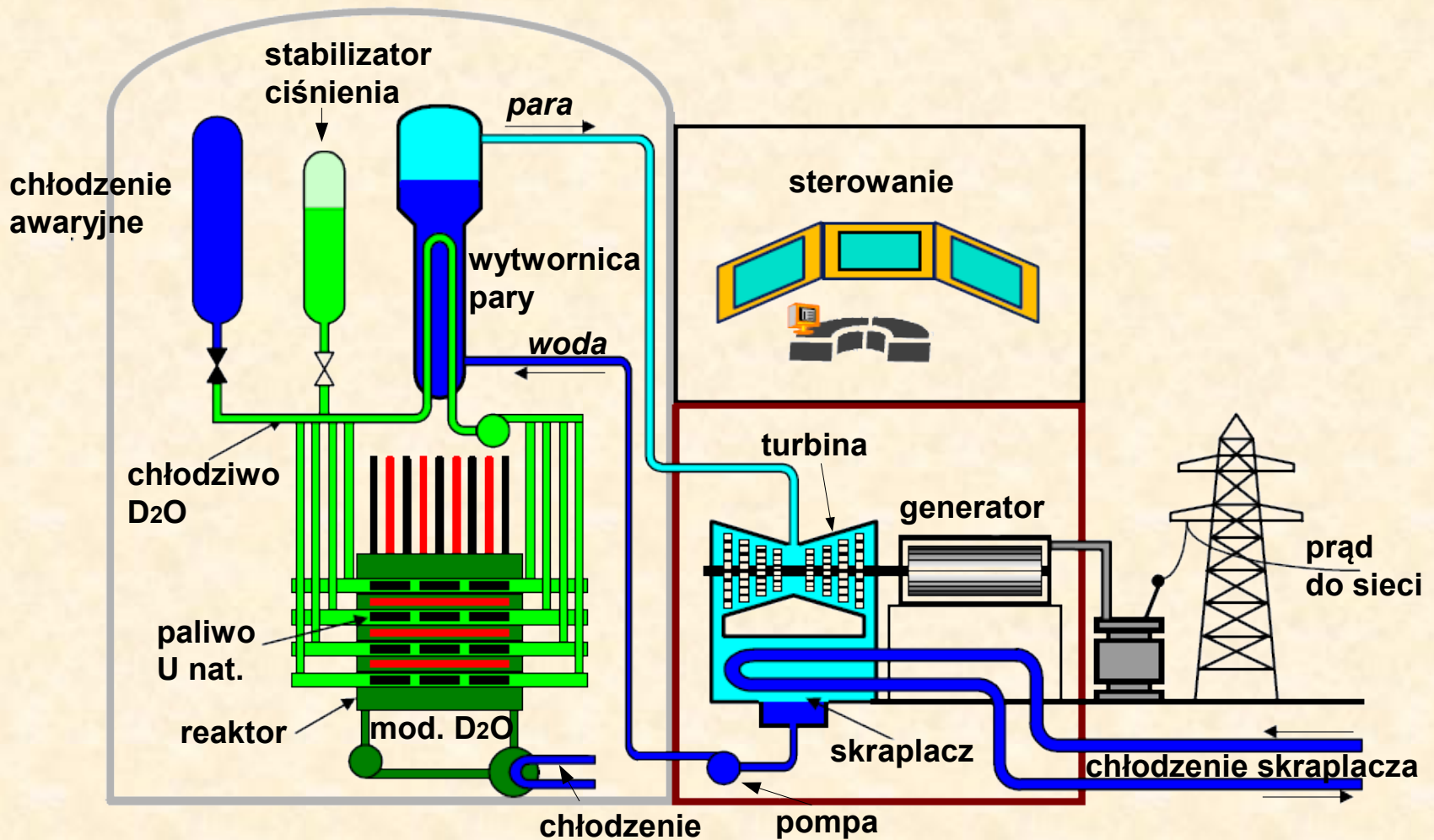
BWR - podstawowe dane

- **Podstawowe dane**
 - moderator - woda
 - chłodziwo - woda (para wodna powyżej rdzenia)
 - paliwo UO_2 wzbogacenie 3.0-3.5% ew. MOX
- **Parametry pracy**
 - ciśnienie - ok. 6.2-7.0 MPa
 - temperatura - 275-300°C
 - sprawność 33-37%
- **Podstawowe elementy systemu**
 - zbiornik reaktora (pełniący rolę wytwornicy pary)
 - sterowanie: pręty sterujące, recyrkulacja
 - obudowa reaktora
 - budynek (niekoniecznie tak wytrzymały jak dla PWR)

PWR - BWR

	BWR	PWR
NSSS	Only one very big component: the RPV	Several big components : RPV, SG, Pressurizer
In Service Inspection	RPV Internals Bottom penetrations	SG tubes RPV connecting tubes
Turbo-generator Condenser	Radioactivity in steam => shielding and specific care during maintenance	Non radioactive
Fuel	Complex FA: pin active lengths, enrichments	Higher burnup, but higher enrichment for same burnup
Core Physics	Strong coupling neutronics/thermalhydraulics Possible instability during transients	Weak coupling Stability through temperature coefficient
Containment Building	Pressure suppression Inerting	HP Dimensioning
Dose to Personal	Higher in Japan-US BWRs Same in Germany .	

Reaktor CANDU



RPV - zbiornik reaktora



Odkuwanie: Japan Steel Works (Muroran)

Obróbka: Mitsubishi Heavy Industries (Kobe)

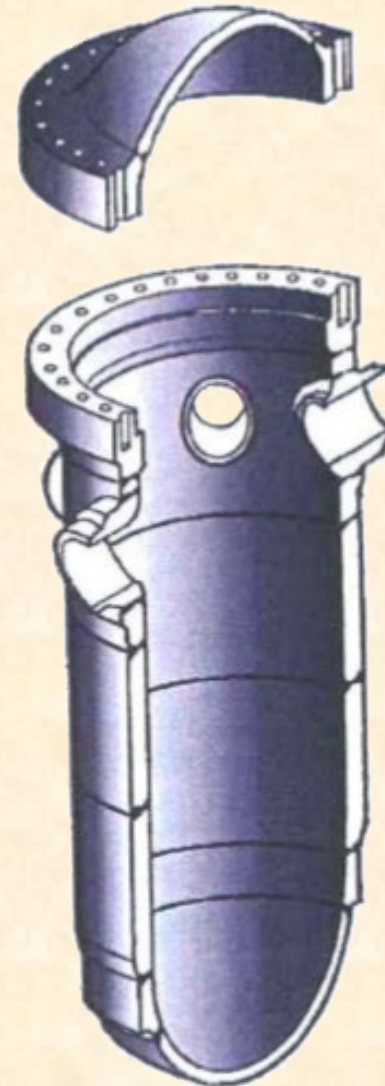
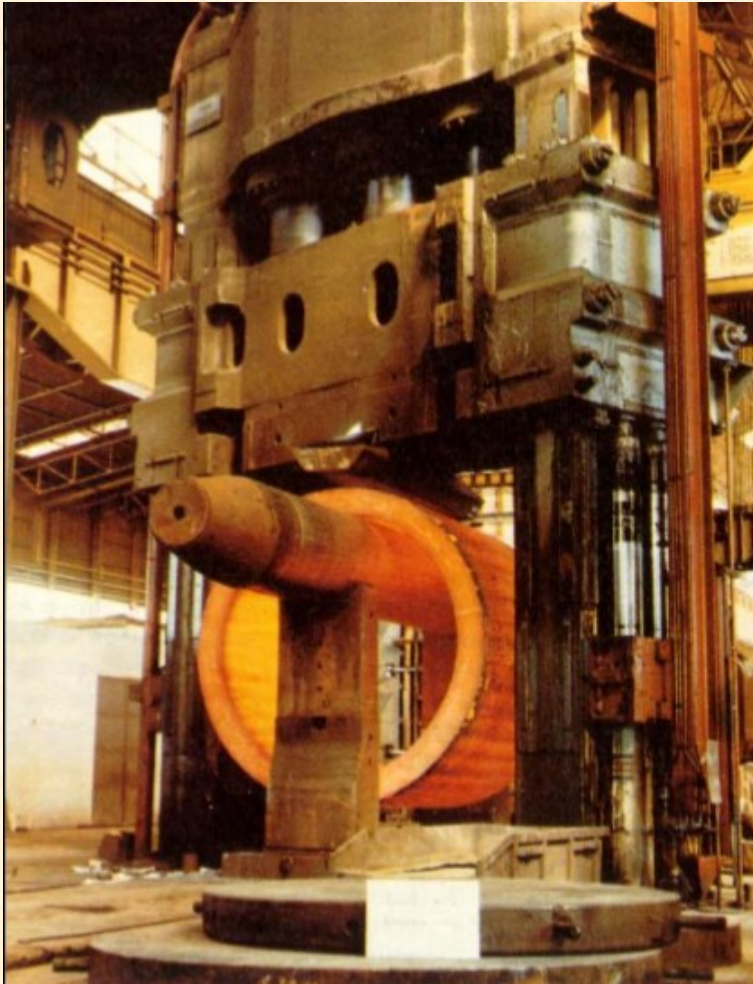
Musi być odporny na:

- ciśnienia i temperatury
- przerwanie pętli chłodzenia
- trzęsienia ziemi
- uszkodzenia radiacyjne

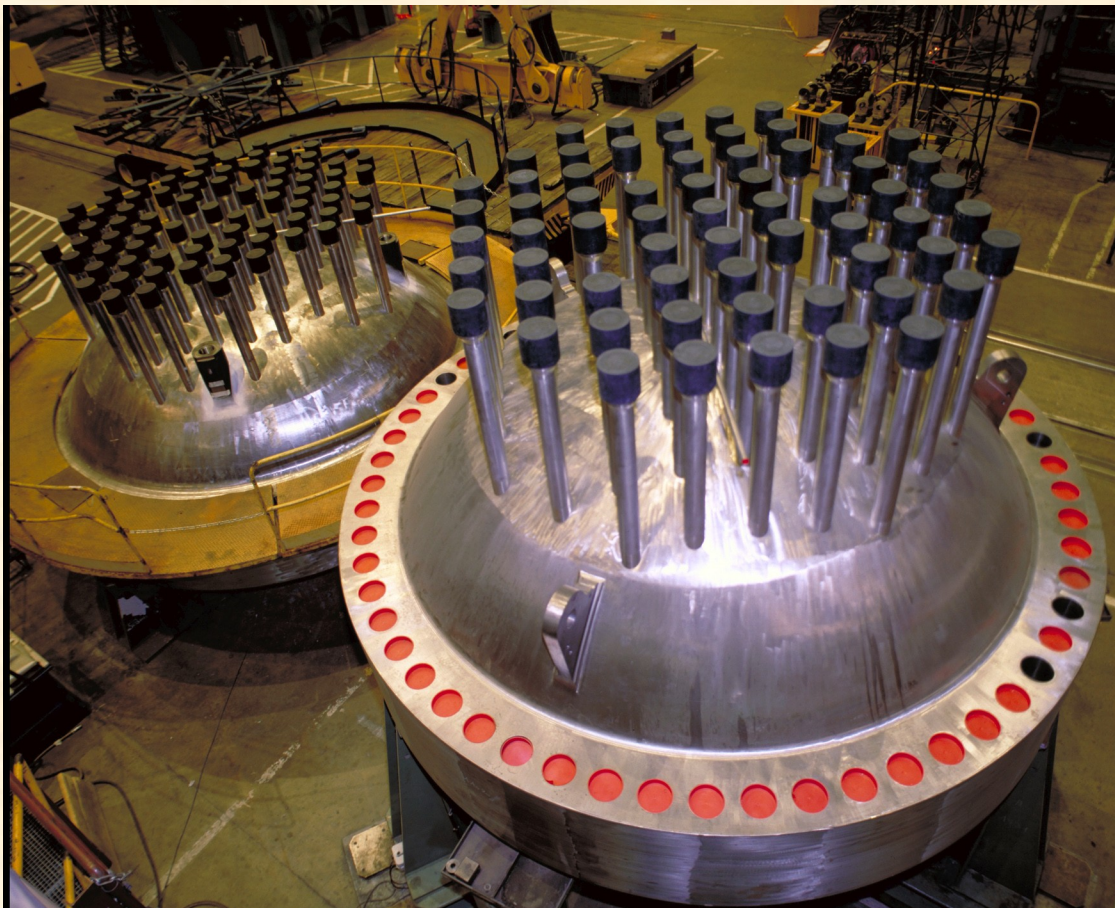
Łączony z pierścieni: brak szwów pionowych

RPV determinuje czas życia elektrowni - tego się nie wymienia!

RPV - zbiornik reaktora



Pokrywa zbiornika reaktora



Pokrywa górna:

55 otworów na brzegu na sworznie mocujące do zbiornika reaktora

77 wspawanych rur z inconelu:

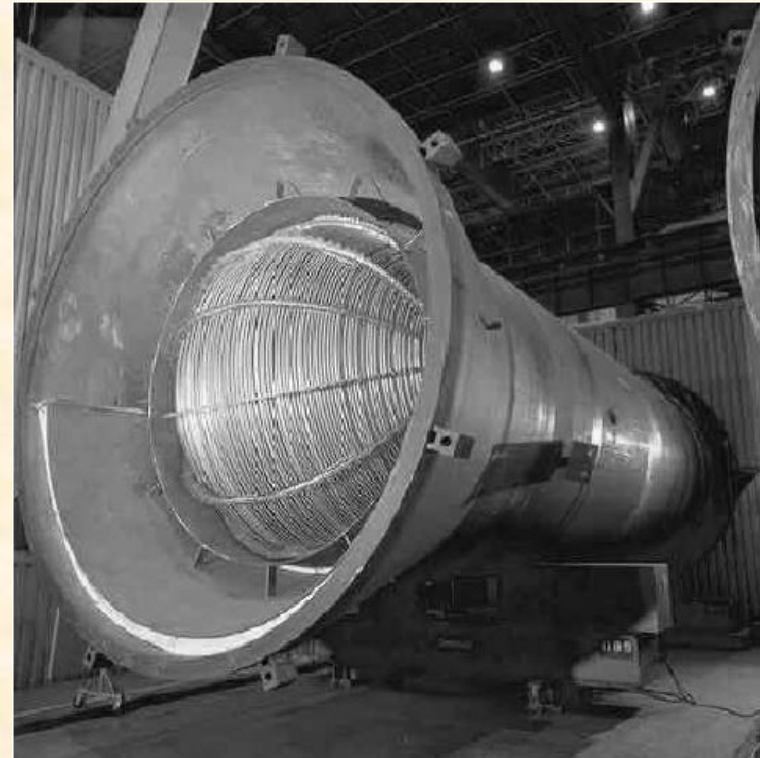
- 73 - pręty sterujące
- 4 - termopary

Pokrywa dolna:

58 wspawanych rur z inconelu prowadzących detektory strumienia neutronów

Niebezpieczeństwo uszkodzeń w miejscach spawów

SG - wytwornica pary



- Ilość SG zależy od ilości pętli chłodzenia (2-4)
- Zwykle ustawiane pionowo, w reaktorach rosyjskich poziomo
- Mogą być wymieniane (zwykle 1 raz w czasie życia reaktora)

Pompy obiegu pierwotnego



Parametry zależą od reaktorów

Reaktor (MWe)	Przepływ (m ³ /h)	Moc pompy (MW)
900	21250	5,40
1300	23325	5,91
1450	24500	6,60

- Pompy znajdują się między wytwornicami pary a reaktorem
- Jest ich tyle, ile pętli chłodzenia (2-4)
- Kompensują straty ciśnienia chłodziwa w rdzeniu i SG
- Są także wykorzystywane przy rozruchu reaktora

Stabilizator ciśnienia



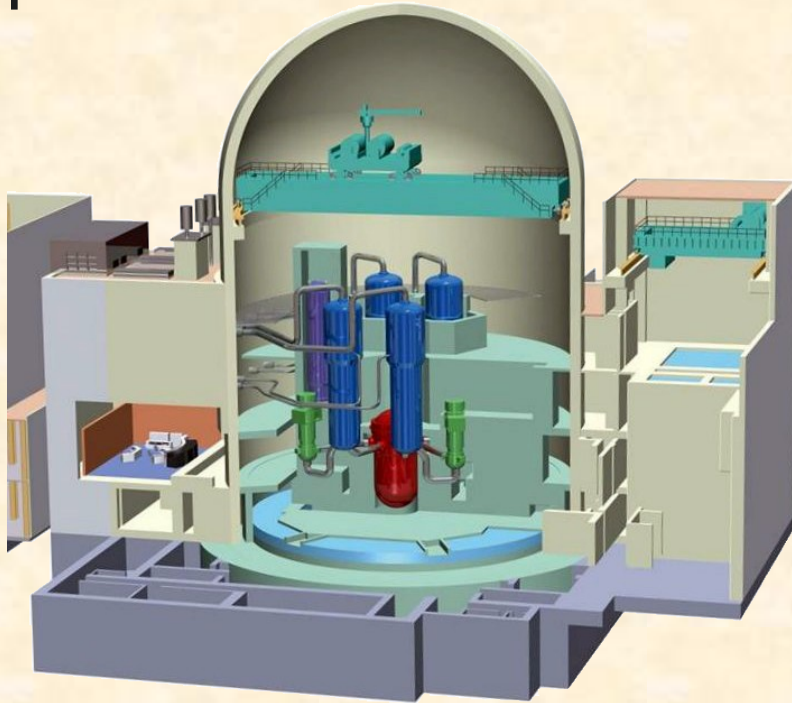
Stabilizacja ciśnienia

Obniżenie ciśnienia przez skraplacze znajdujące się w górnej części

Podwyższenie ciśnienia przez grzałki elektryczne zamontowane pionowo w dolnej części, odparowujące część wody

- Stabilizuje ciśnienie 15.5 MPa w obiegu pierwotnym
- Pełni jednocześnie funkcję zbiornika wyrównawczego
- Jest jeden - podłączony do jednej z pętli (hot leg)
- Utrzymuje równowagę między wodą a parą nasyconą (345°C)

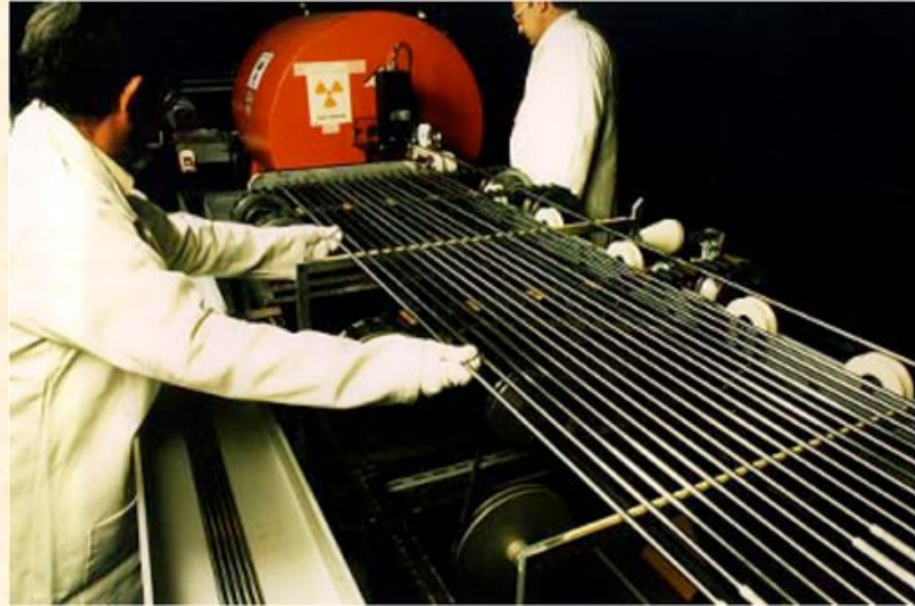
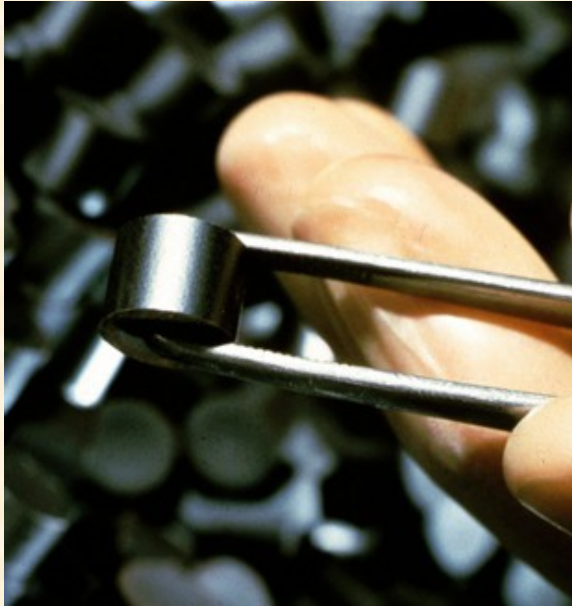
Budynek reaktora



Próba zniszczeniowa w SNL

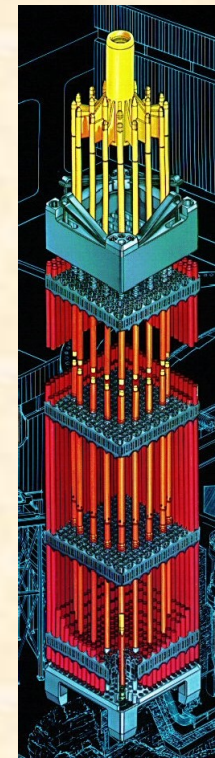
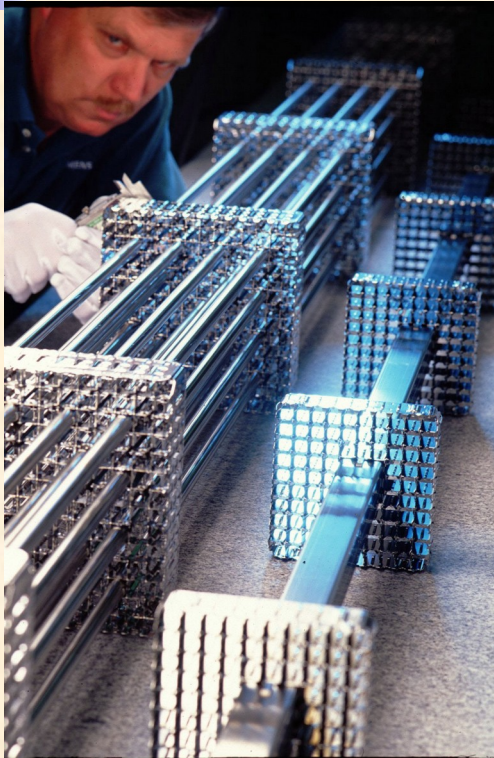
- Zawiera reaktor, pętle chłodzenia i stabilizator ciśnienia
- Stanowi ostatnią „granice obrony” w przypadku awarii
- Wykonany ze sprężonego betonu
- Po 11 IX projektowany tak, by wytrzymał uderzenie samolotu lub pocisku raketowego

Paliwo- pellety i pręty



- Paliwem jest UO_2 o wzbogaceniu 3.5-4.0% (może być też MOX)
- UO_2 formowany jest w cylindryczne pellety ($H=13.5\text{mm}$ x $R=4\text{mm}$)
- Stos 265 pelletów w koszulce z zircaloyu-4 tworzy pręt paliwowy reaktora 900 MWe o aktywnej długości 3,66m (4,27m dla 1300)
- Dla poprawy przewodzenia ciepła pręty wypełnione są helem o ciśnieniu 2.5-3.0 MPa

Paliwo - kasety paliwowe



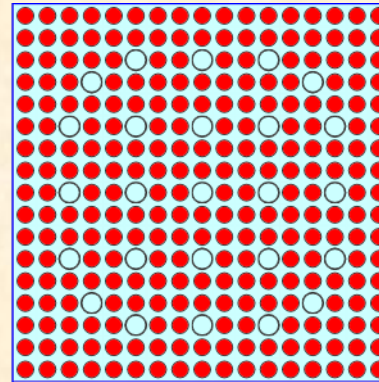
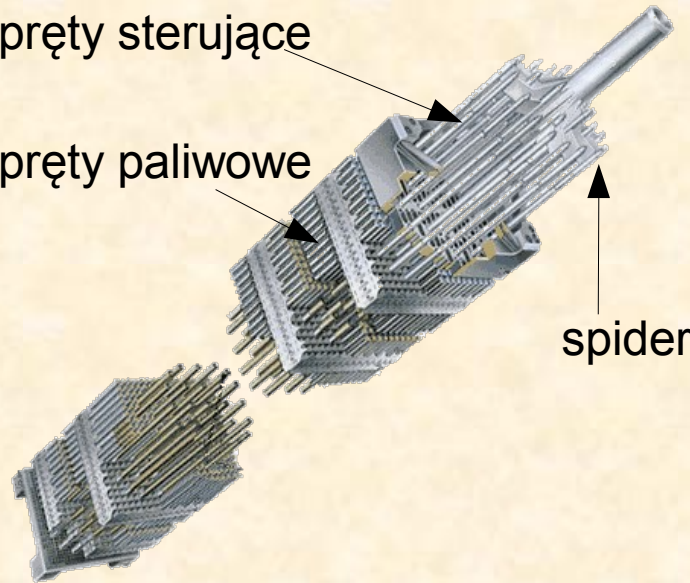
- Pręty paliwowe łącznie z prętami sterującymi tworzą kasetę paliwową
- Kasety reaktorów francuskich: 17x17 prętów (264 pręty paliwowe)
- Reaktor 900 MWe długość: 4.06m, masa UO₂ 461 kg, 157 kaset
- Reaktor 1300 MWe długość: 4.80m, masa UO₂ 538 kg, 193 kasety

Kasety paliwowe

pręty sterujące

pręty paliwowe

spider



pręty
sterujące



pręty
paliwowe

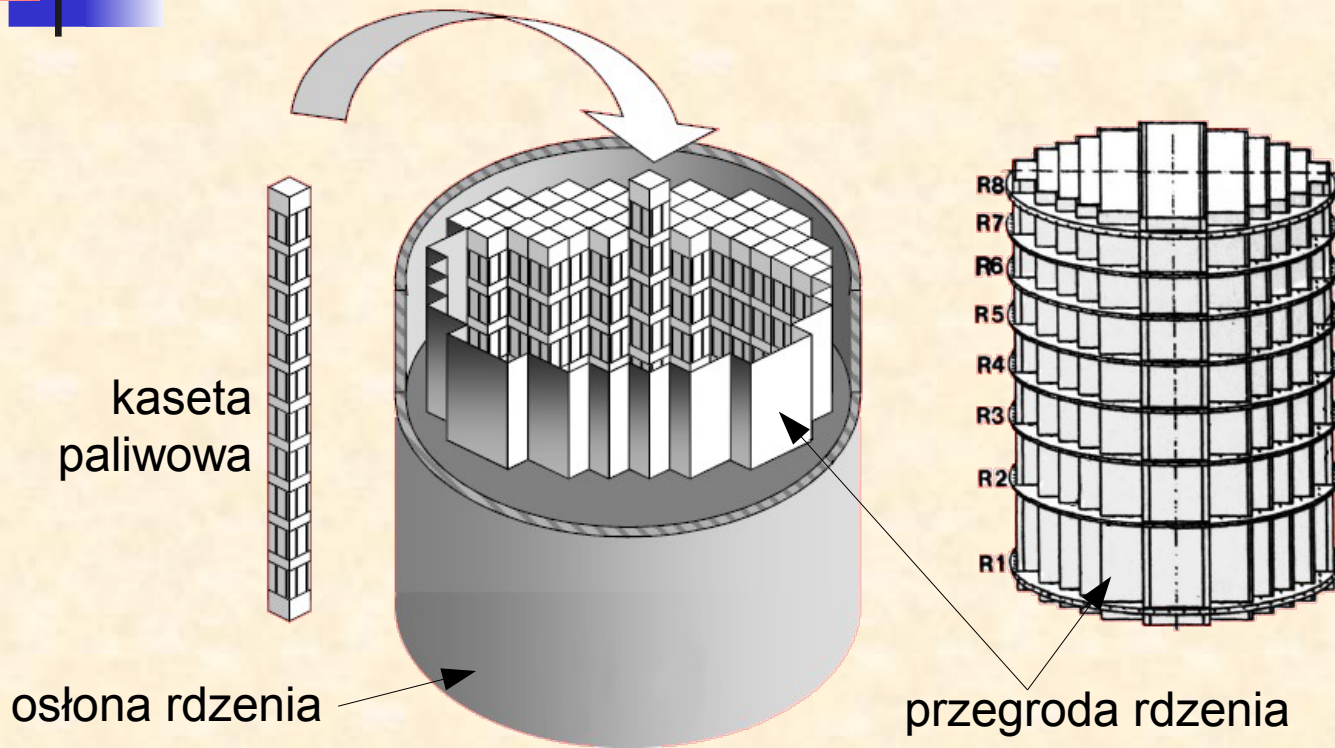
B₄C

AIC



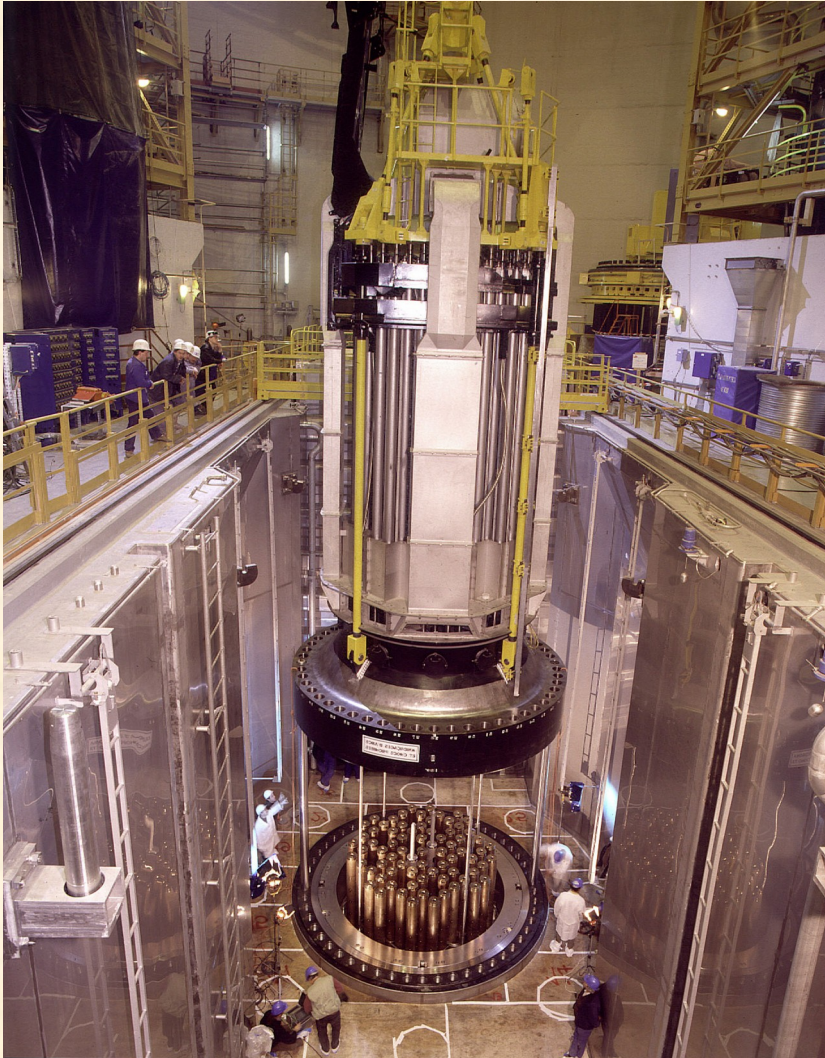
- Pręty sterujące - absorbery neutronów (B₄C lub AIC - Ag+In+Cd)
- Kasety mogą nie mieć prętów sterujących (puste przewodnice)
- Kasety „black” - 24 pręty AIC/B₄C
- Kasety „gray” - 8-12 prętów AIC + 16-12 prętów ze stali

Rdzeń reaktora



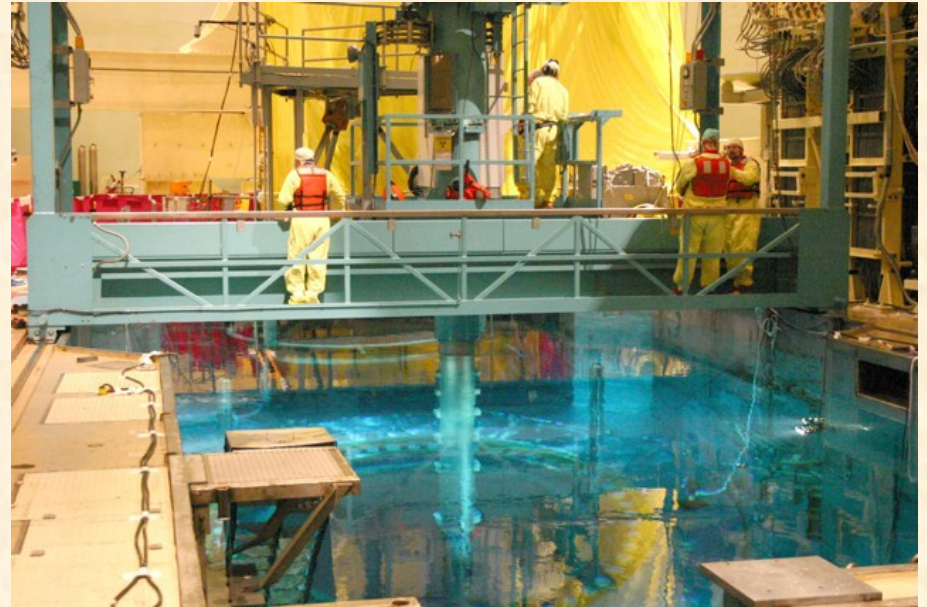
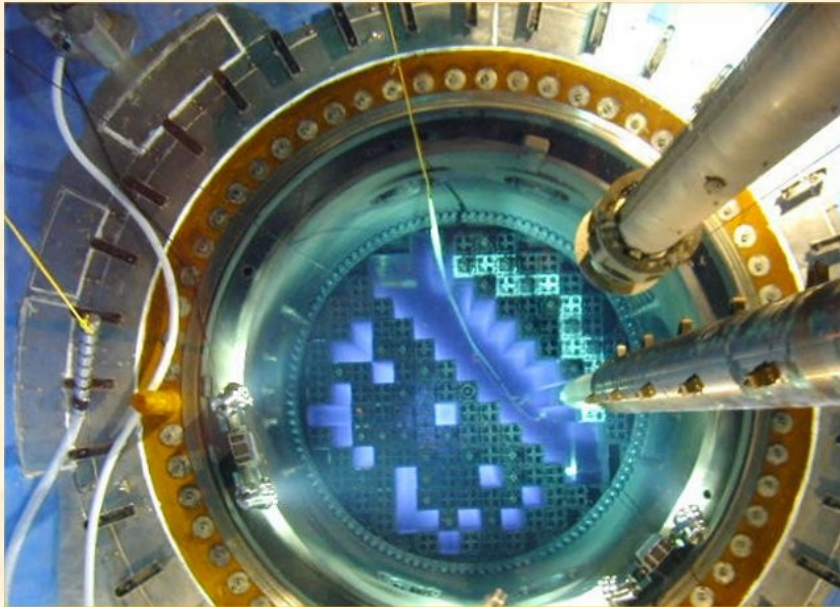
- Rdzeń mierzony po osłonie jest regularnym cylindrem
- Kasety umieszczone są wewnątrz przegrody
- Między przegrodą a osłoną jest woda (N4) albo stalowy reflektor (EPR) poprawiający ekonomikę neutronów i zmniejszający uszkodzenia radiacyjne zbiornika ciśnieniowego

Szyb reaktora



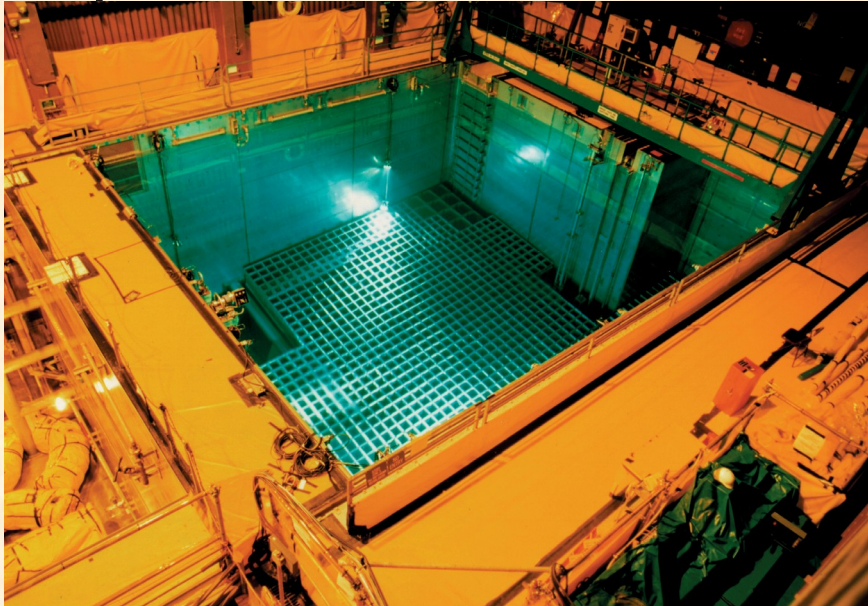
- Na głowicy reaktora widoczne są mechanizmy wykonawcze prętów sterujących
- Pusta przestrzeń, w której są teraz ludzie to szyb reaktora (reactor cavity). W trakcie operacji przeładunku paliwa lub innego wyłączenia reaktora jest wypełniony wodą z borem
- Nad szybem reaktora porusza się maszyna przeładowcza
- W trakcie normalnej pracy reaktora ludzi tu nie ma

Przeładunek paliwa



- Podczas operacji przeładunku paliwa cała przestrzeń reaktora jest zalana wodą z borem (również w czasie wyłączenia reaktora)
- Kasety paliwowe są przenoszone specjalną maszyną i cały czas znajdują się pod wodą
- Kasety są wyjmowane w pozycji pionowej, a przenoszone w poziomej
- Aktualny stan załadunku rdzenia pokazywany jest na specjalnej tablicy

Paliwo wypalone



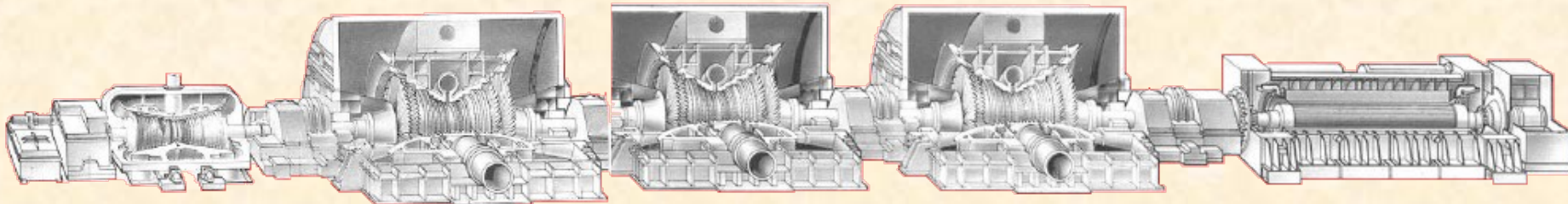
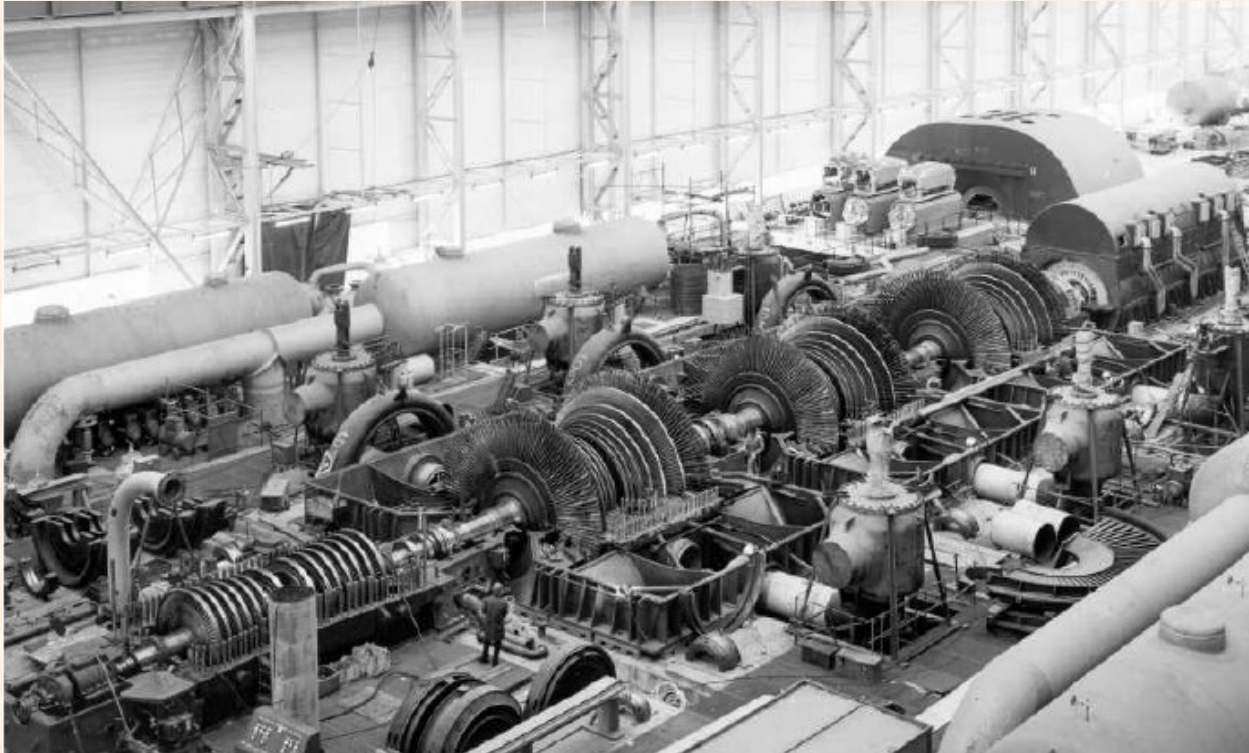
- Wypalone paliwo przechowywane jest w basenie znajdującym się w pobliżu reaktora (fuel building)
- Basen wypalonego paliwa połączony jest z szybem reaktora służą umożliwiającą transport kaset pod wodą
- Głębokość basenu jest wystarczająca, by poziom promieniowania nad wodą był minimalny

Turbiny

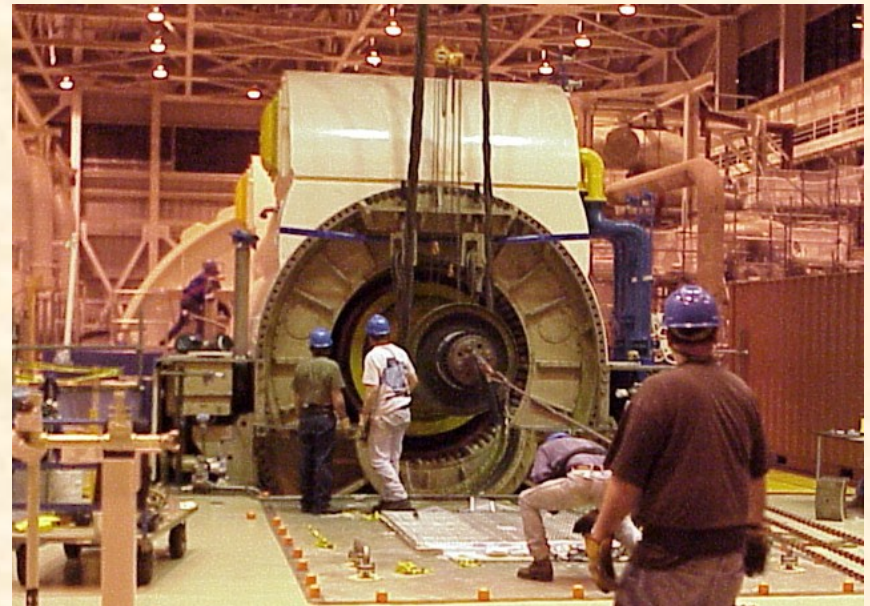
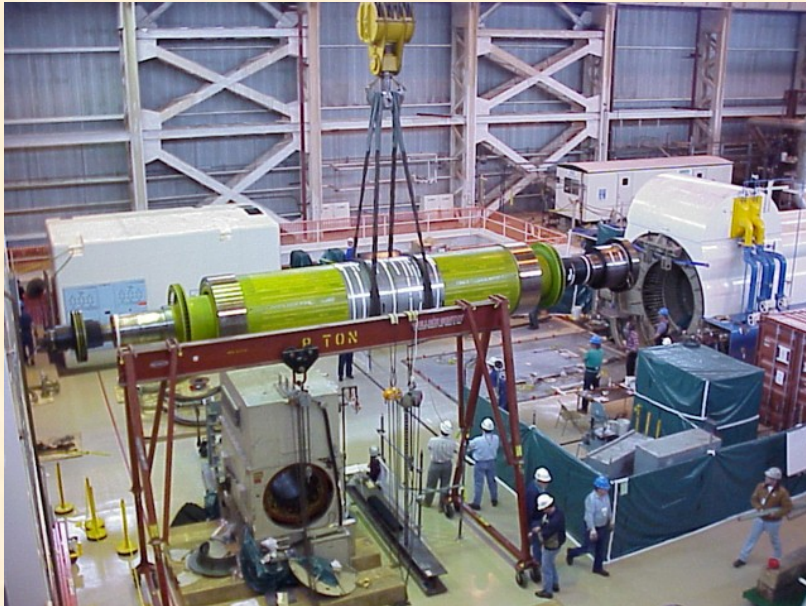


- Para z wytwornic jest kierowana na turbiny
- Zwykle jest jedna turbina wysokiego ciśnienia (HP) i trzy podwójne turbiny niskiego ciśnienia (LP), zamontowane współosiowo
- Pomiędzy turbinami HP i LP stosowany jest przegrzewacz pary
- Para z turbin LP kondensowana jest w skraplaczu

Turbogenerator

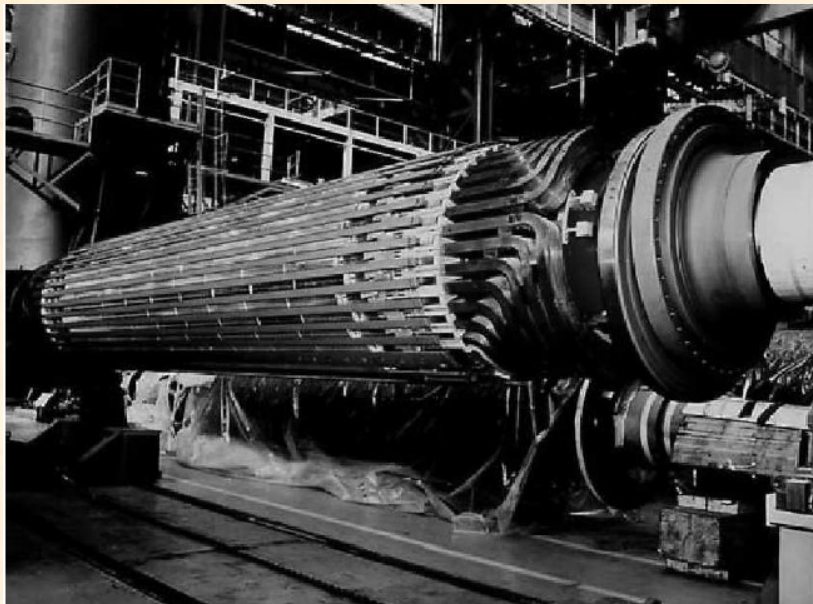


Generator

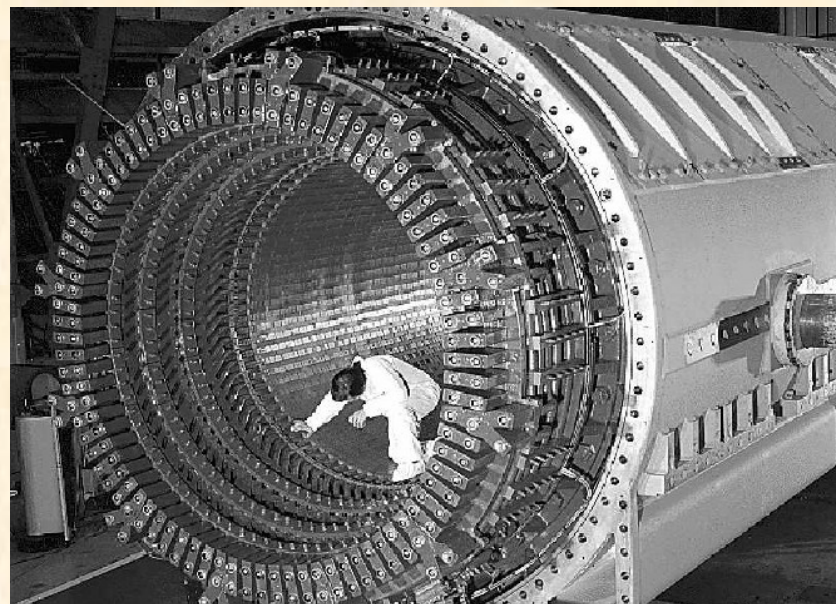


- Generator jest umieszczony współosiowo z turbinami
- Składa się z nieruchomego stojana i wirnika
- Prąd wzbudający generowany jest przez wzbudnicę
- Ze względu na duże siły odśrodkowe wirniki mają małe średnice (do 1.3 m) a za to są długie (do 13 m)

Generator



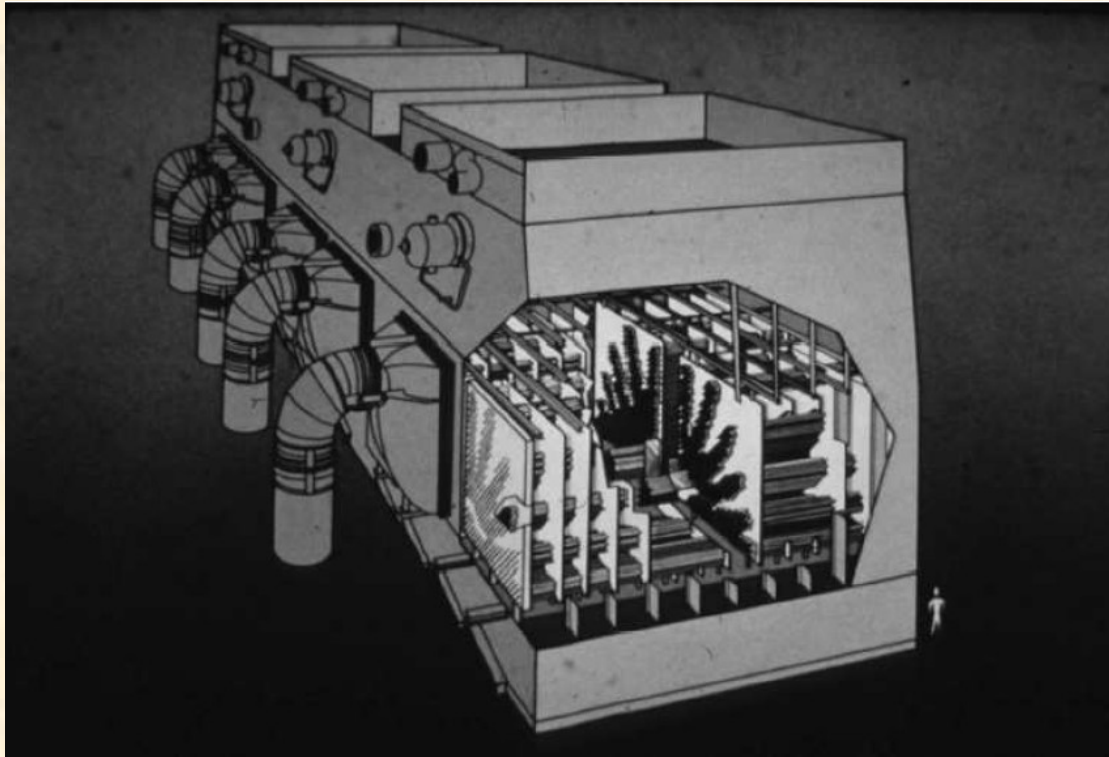
wirnik



stojan

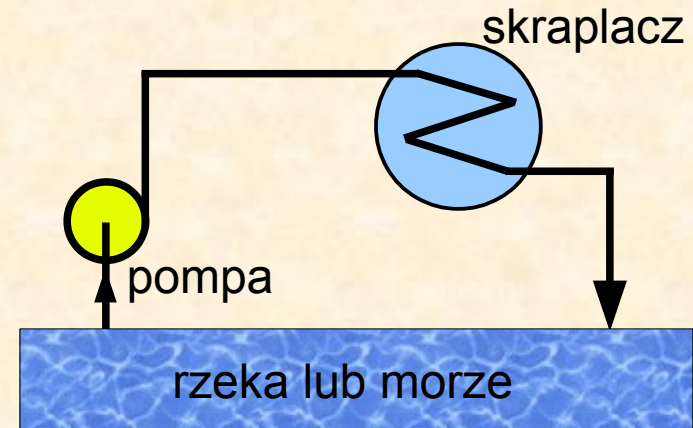
- Generator 2-biegunowy - 3000 rpm
- Generator 4-biegunowy - 1500 rpm
- Napięcie pracy 24 kV
- Napięcie przesyłowe (400 kV) powstaje na transformatorze

Skraplacz



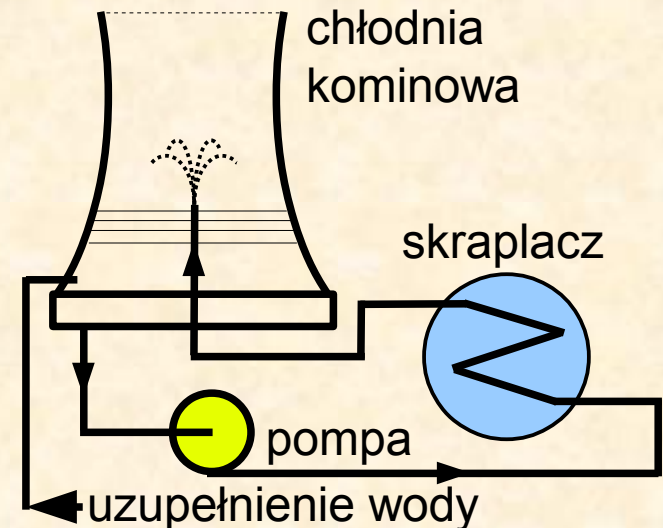
- Kondensacja pary z turbin turbogenerators (oraz z pomp turbinowych) następuje w skraplaczu
- W reaktorach PWR jest to III tzw. obieg chłodzenia
- Woda zasilająca podgrzewana jest o ok. 10°C
- Stosowane są otwarte lub zamknięte obiegi chłodzenia

Obieg otwarty



- Woda do chłodzenia skraplacza pobierana jest bezpośrednio z rzeki lub morza i tam też jest odprowadzana
- Co widać - nie ma chłodni kominowych
- Duże zapotrzebowanie na wodę: $45 \text{ m}^3/\text{s}$ (P4) - $60 \text{ m}^3/\text{s}$ (EPR)

Obieg zamknięty



- Woda wychodząca ze skraplacza jest kierowana do zraszalnika w chłodni kominowej; ciepło jest odbierane przez powietrze
- Chłodnie kominowe - charakterystyczny widok
- Małe zapotrzebowanie na wodę: $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ na chłodnię
- Zwykle jedna chłodnia na reaktor

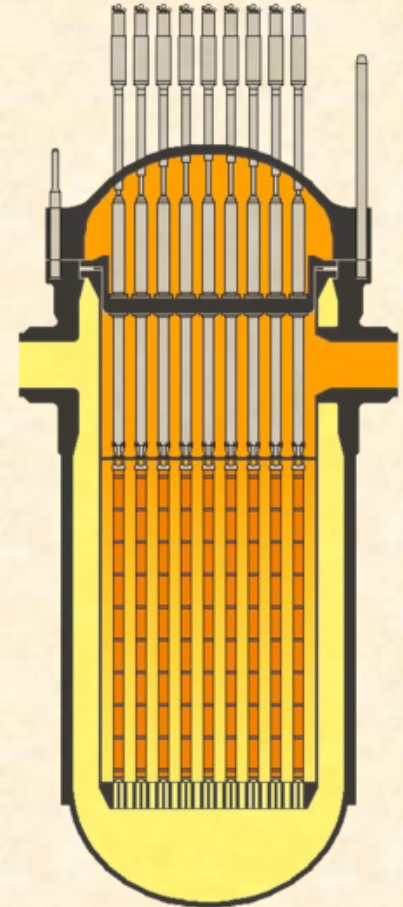
Obieg zamknięty



Chłodnie wentylatorowe nad Jeziorem Michigan

EPR - Evolutionary Power Reactor

Rozwinięcie koncepcji reaktorów N4 i KONVOI





EPR - Evolutionary Power Reactor

Parametry techniczne

- 4 pętle chłodzenia
- moc 1650 MWe, 4500 MWth
- paliwo: ENU (do 5%), ERU, MOX (enriched natural/reprocessed U)
- sprawność 36.6%
- burnup do 48 GWd/tHM
- cykle paliwowe 12-24 miesięcy
- praca nadążna: normalna 60%-100%, specjalna 25%-60%
- współczynnik nieplanowanej niedostępności < 5 dni/rok
- krótsze czasy przerw na wymianę paliwa i obsługę
- zakładany czas pracy 60 lat

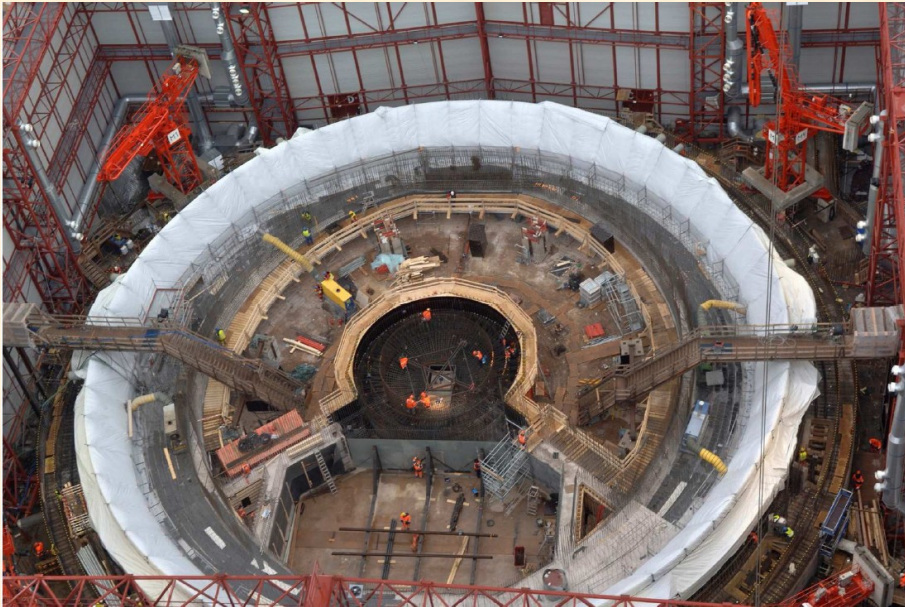


EPR - Evolutionary Power Reactor

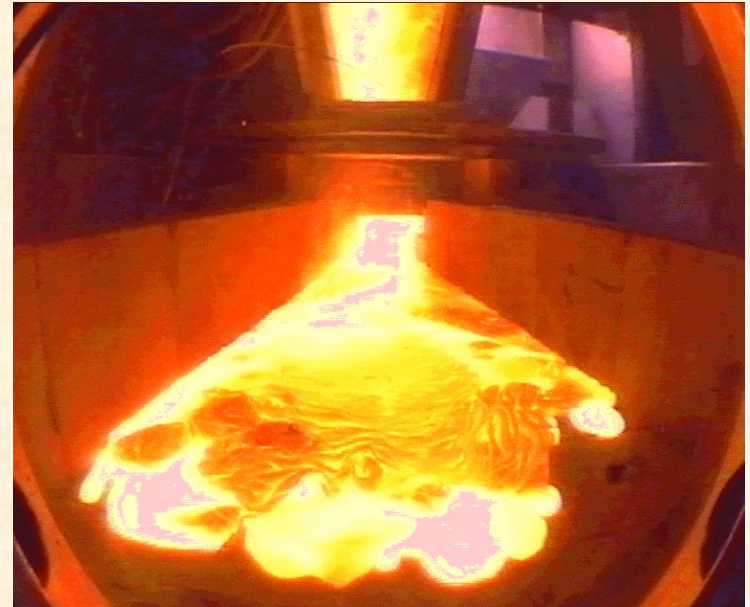
Elementy bezpieczeństwa

- Podwójny budynek reaktora: ściany 120 cm (wewn.) i 55 cm (zewn.)
 - odporny na uderzenie samolotu lub pocisku raketowego
 - odporny na wybuch zgromadzonego wodoru
- 10-krotnie mniejsze prawdopodobieństwo uszkodzenia rdzenia
- Pasywne systemy bezpieczeństwa: „core catcher”, wewnętrzny zbiornik wody chłodzącej
- Aktywne systemy bezpieczeństwa: zraszacze wewnątrz budynku, zewnętrzny wymiennik ciepła recyrkulacji
- Autokatalityczna rekombinacja wodoru eliminuje prawdopodobieństwo eksplozji w szerokim zakresie stężeń
- Zwielokrotnione systemy bezpieczeństwa (poczwórne)
- Zbiornik reaktora nie ma otworów na dole

EPR - Evolutionary Power Reactor



Core catcher



Corium

EPR - Evolutionary Power Reactor

Large Commercial Jet

&

Military Aircraft

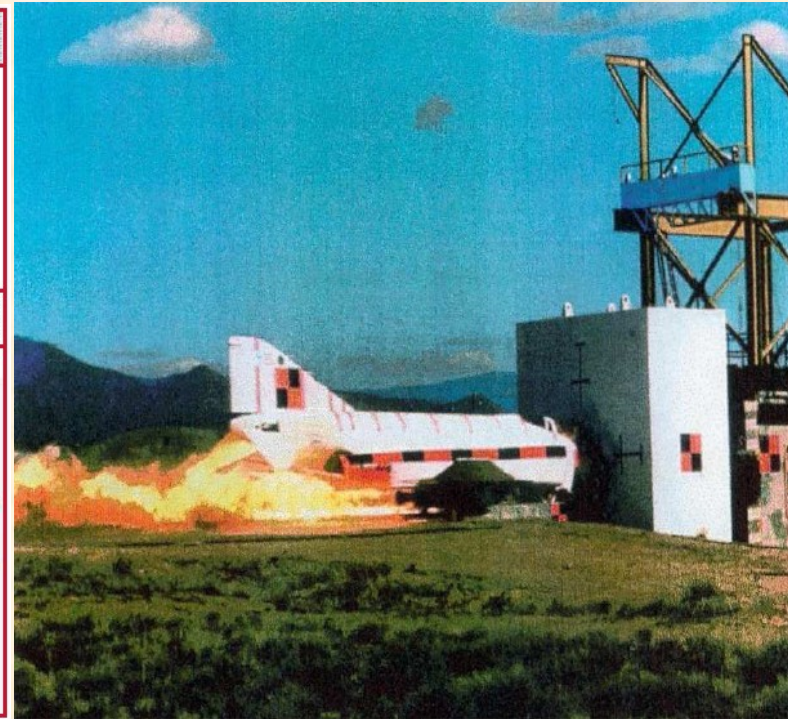
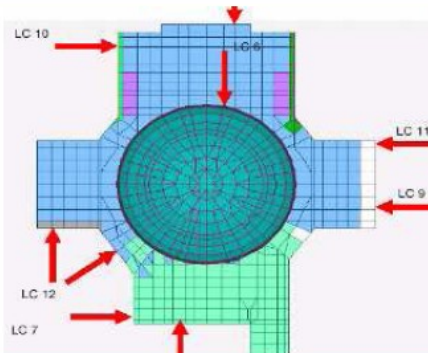
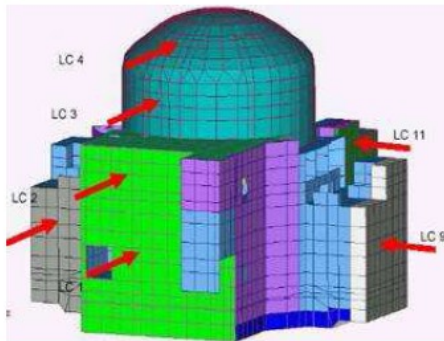


At various Elevations



&

From different Sides



Symulacja uderzenia
samolotu

Test

EPR - Evolutionary Power Reactor



Flamanville (wizualizacja)

EPR - Evolutionary Power Reactor



Olkiluoto 3 (wizualizacja)

EPR - Evolutionary Power Reactor



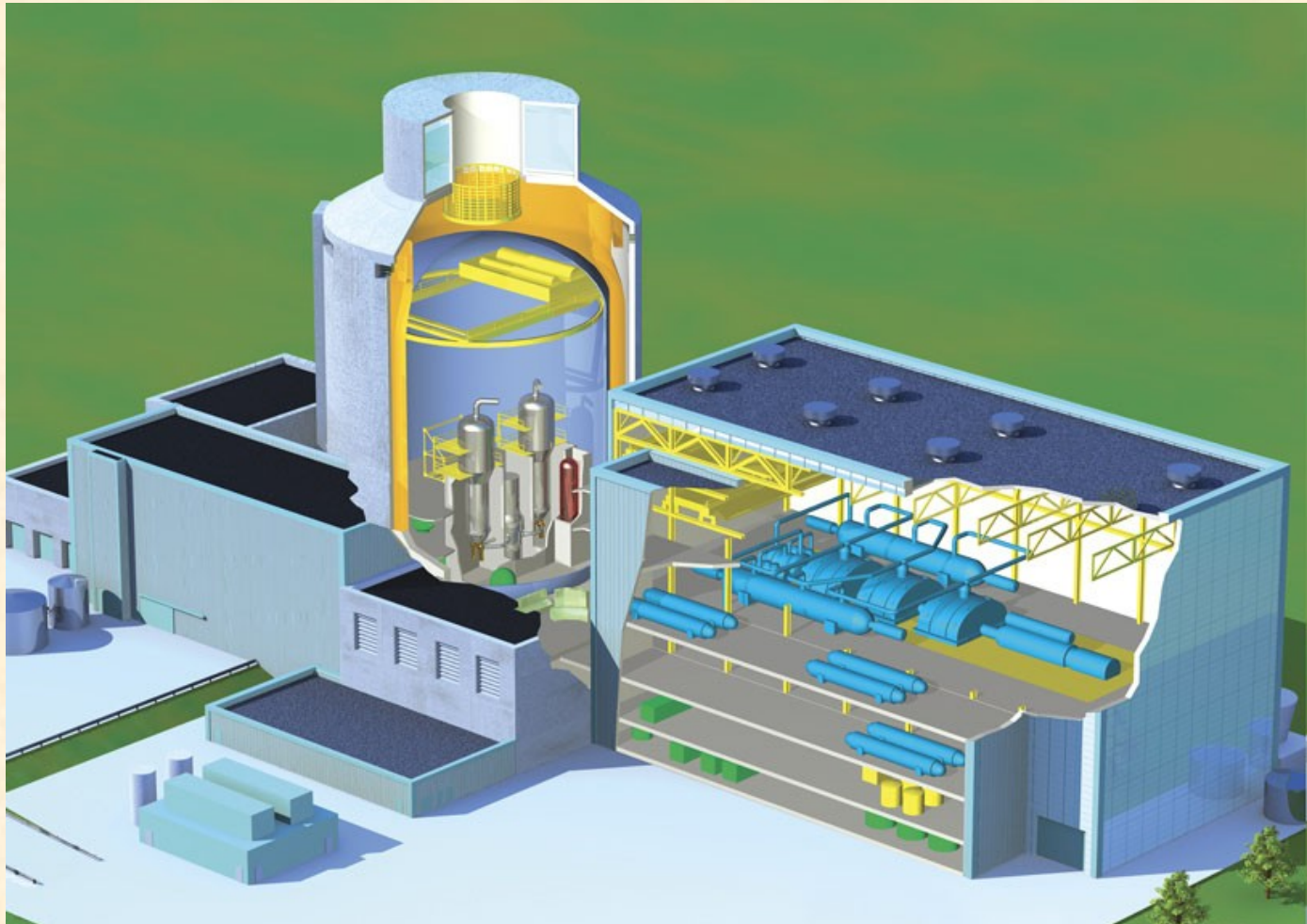
Olkiluoto 2010

EPR - Evolutionary Power Reactor



Olkiluoto IX 2014

AP1000 - Westinghouse



Reaktor AP1000



AP1000

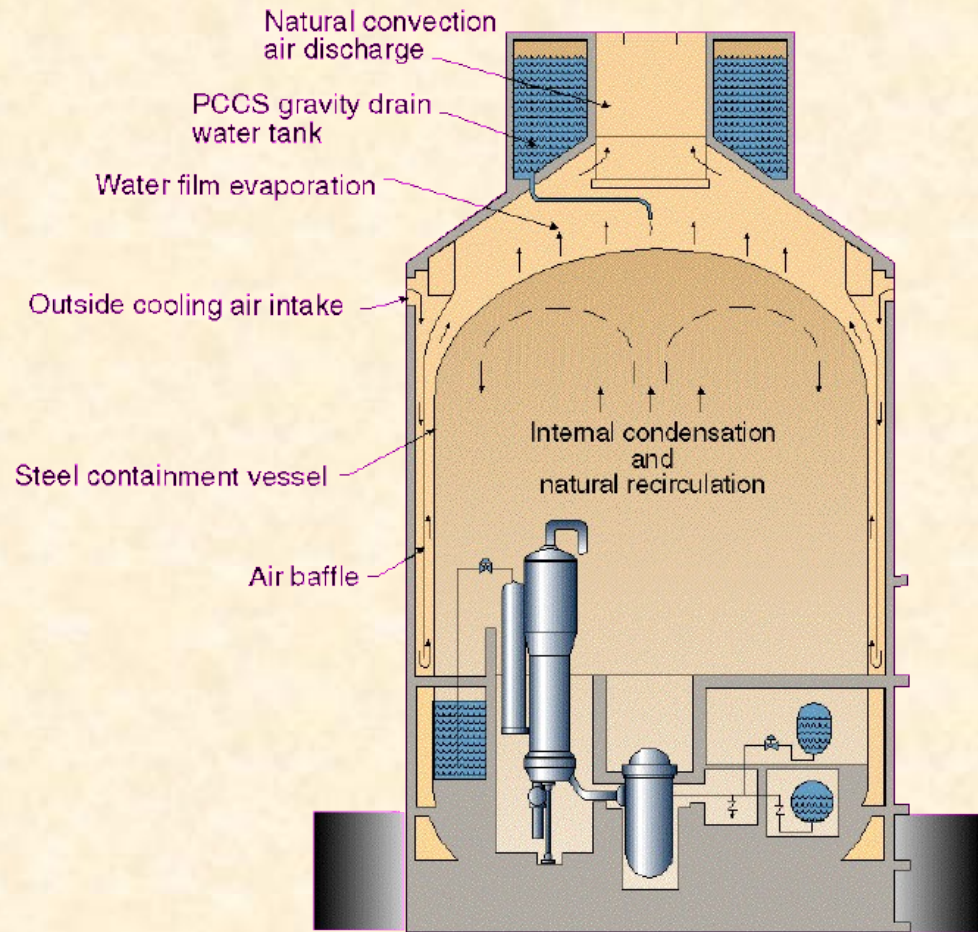
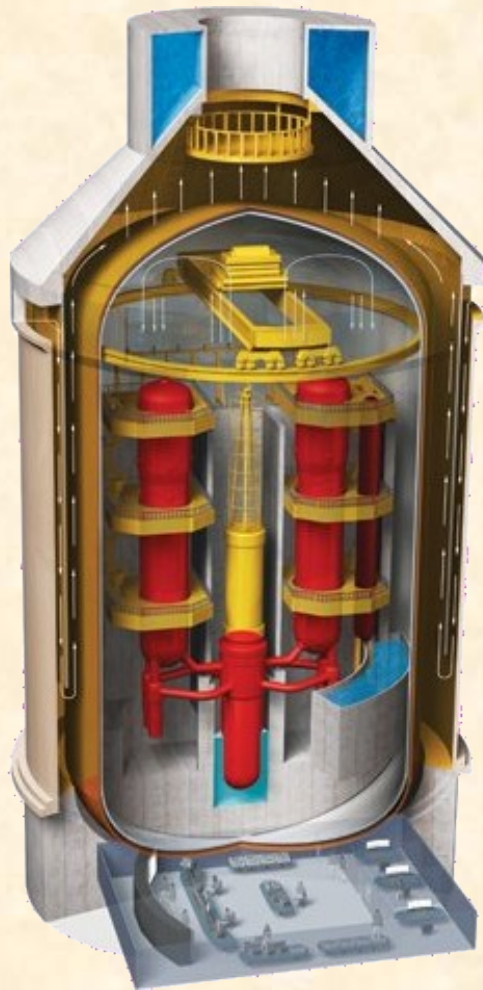
Parametry techniczne

- 2/4 pętle chłodzenia (2 hot legs/4 cold legs)
- moc 1117 MWe, 3415 MWth
- paliwo: ENU (do 4.8%)
- sprawność 33%
- burnup do 60 GWd/tHM
- cykle paliwowe 18 miesięcy
- nieplanowane wyłączenia < 1 raz na rok
- współczynnik dostępności 93%
- krótsze czasy przerw na wymianę paliwa i obsługę
- zakładany czas pracy 60 lat

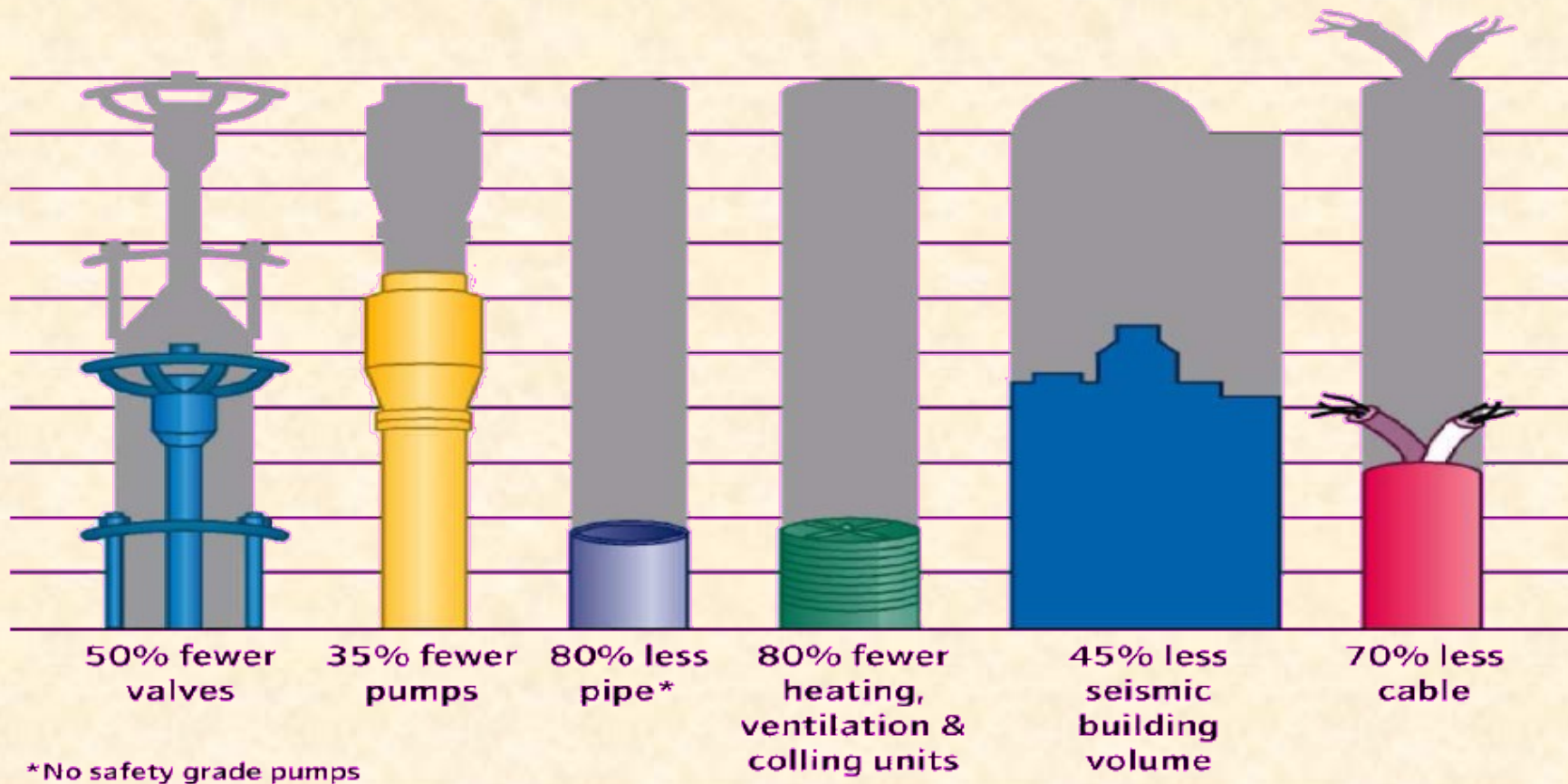
Elementy bezpieczeństwa

- Pasywny system chłodzenia rdzenia
- System chłodzenia awaryjnego wytrzymuje uszkodzenia przewodów do 20 cm
- Zapas wody (z borem) do chłodzenia zgromadzony w budynku reaktora wystarcza na 30 dni pracy
- Pasywny system chłodzenia pomieszczenia reaktora
- Stopień rdzenia nie prowadzi do penetracji zbiornika
- System zabezpieczenia warunków pracy sterowni
- Poprawiona izolacja pomieszczenie reaktora
- Zbiornik reaktora nie ma otworów poniżej góry rdzenia
- Czas na reakcję operatora przy wyłączeniu awaryjnym 72 godziny

AP1000



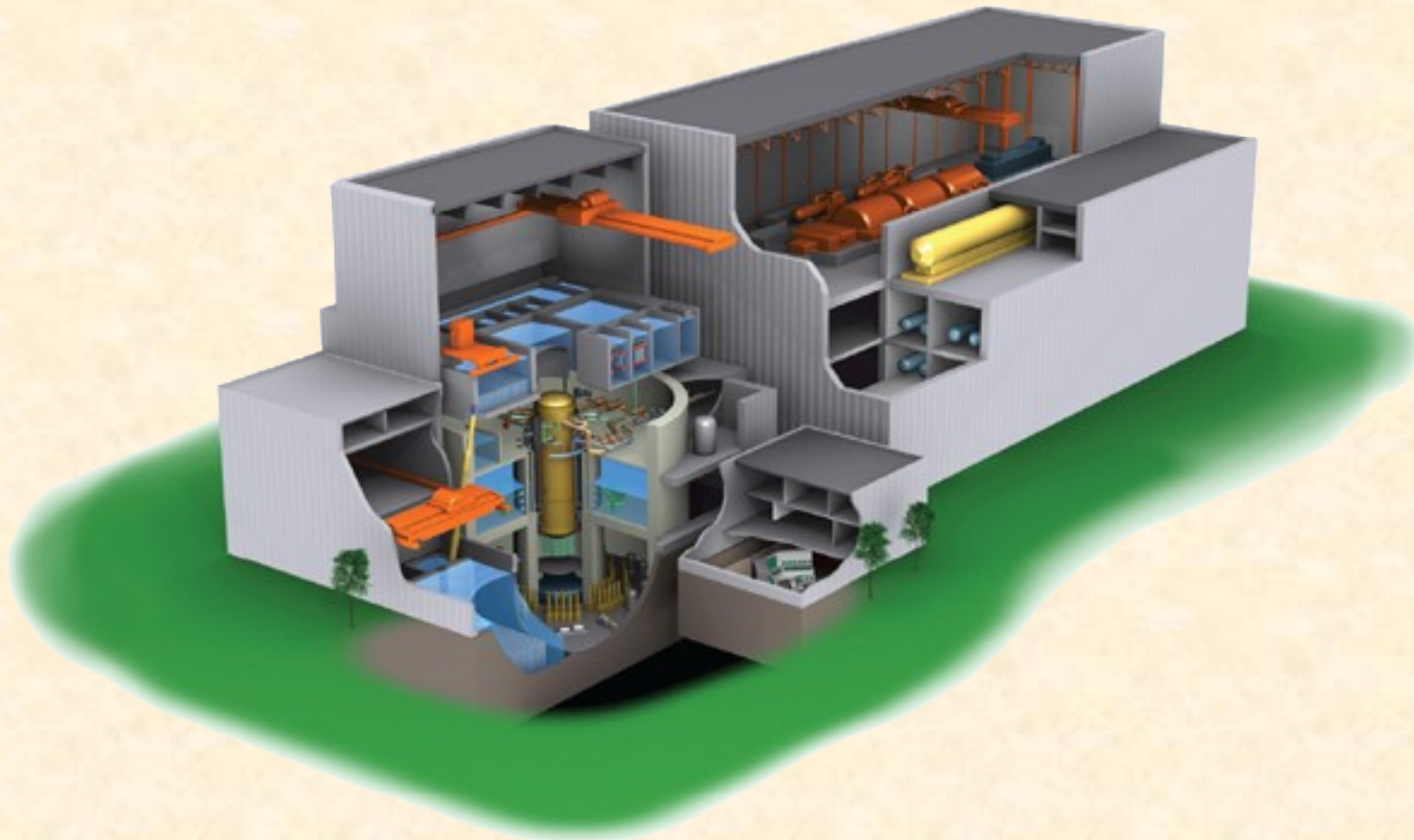
AP1000



Uproszczona budowa



ESBWR - GE-Hitachi



Reaktor ESBWR

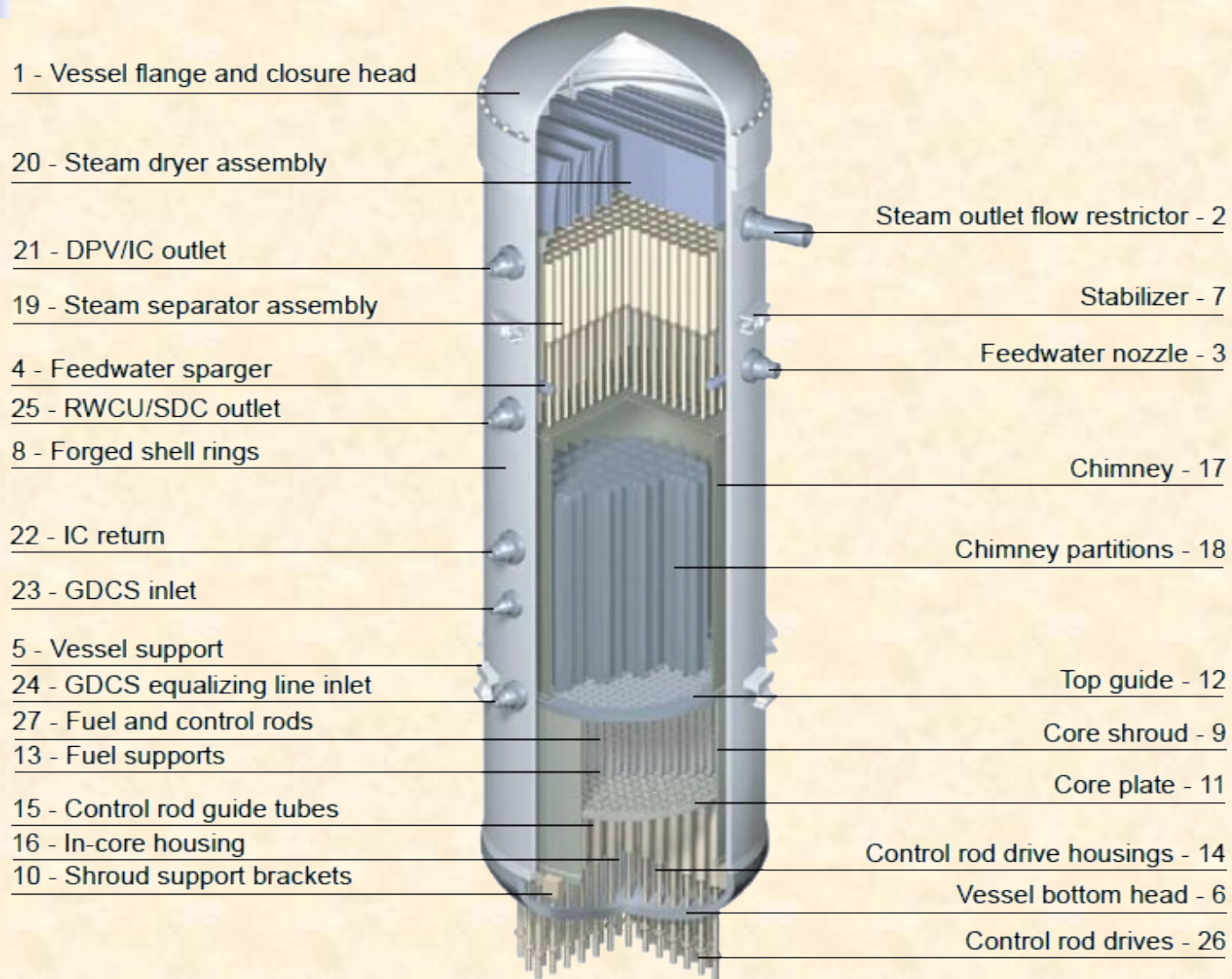
Parametry techniczne

- reaktor BWR z pasywnymi elementami sterowania i bezpieczeństwa
- moc 1535 MWe, 4500 MWth
- paliwo: ENU (do 4.2%)
- sprawność 34%
- burnup do 50 GWd/tHM
- cykle paliwowe 12-24 miesięcy
- nieplanowane wyłączenia < 1 raz na rok
- współczynnik dostępności 95%
- krótsze czasy przerw na wymianę paliwa (14 dni) i obsługę
- zakładany czas pracy 60 lat

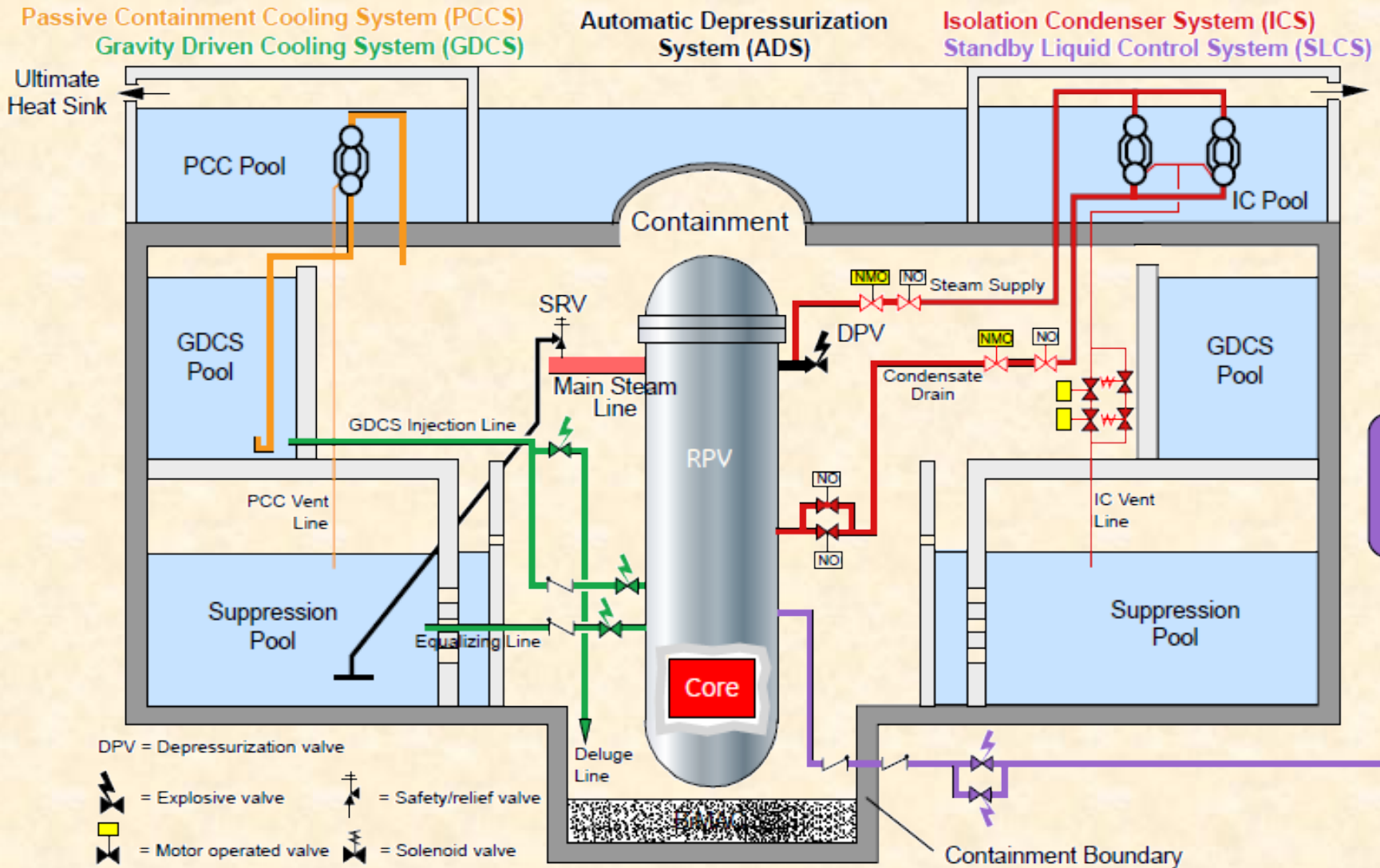
Elementy bezpieczeństwa

- Grawitacyjny system chłodzenia rdzenia
- Automatyczny system obniżania ciśnienia z zaworami sterowanymi pirotechnicznie
- Skraplacze izolujące (4 niezależne pętle) odprowadzają pasywnie ciepło powyłączeniowe we wszystkich sytuacjach poza M i LB LOCA
- Pasywne chłodzenie obudowy bezpieczeństwa (4 niezależne pętle) odprowadza ciepło powyłączeniowe w awariach M i LB LOCA
- Zbiorniki wody w budynku reaktora pozwalają na utrzymanie zakrytego rdzenia w każdej sytuacji awaryjnej do 72 godzin
- Stosowany jest funkcjonalny chwytacz rdzenia
- Odporność na brak dostaw wody i energii elektrycznej do 72 godzin
- Czas na reakcję operatora przy wyłączeniu awaryjnym 72 godziny

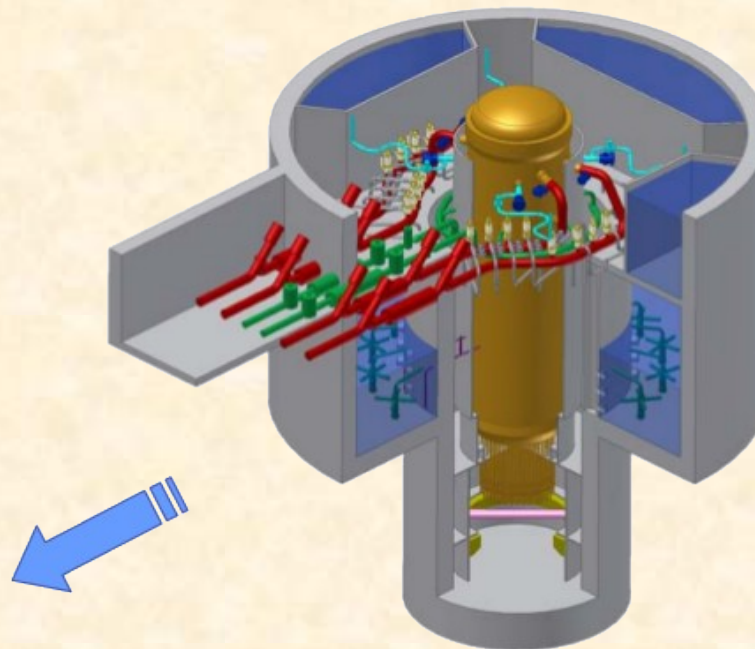
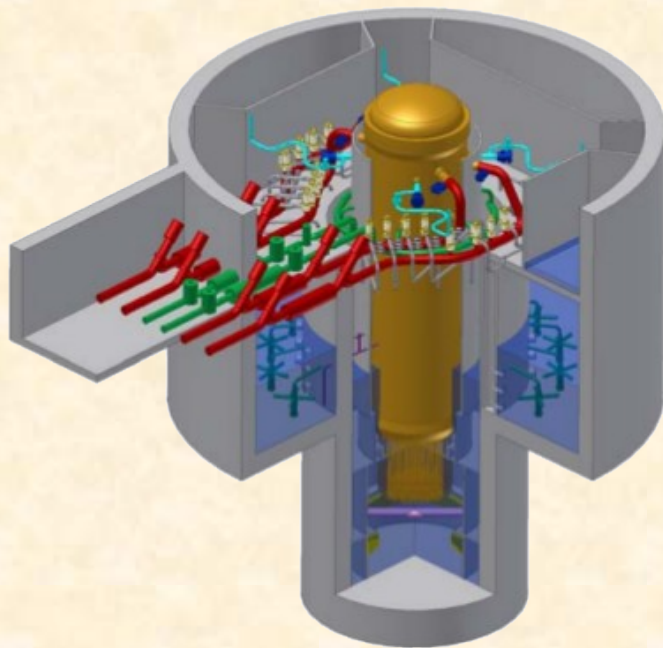
ESBWR



ESBWR



Grawitacyjny system chłodzenia rdzenia



Pozwala na 72 godziny
pracy bez zasilania



ESBWR

<u>Parameter</u>	<u>BWR/4-Mk II</u> (Browns Ferry 3)	<u>BWR/6-Mk III</u> (Grand Gulf)	<u>ABWR</u>	<u>ESBWR</u>
Power (MWt/MWe)	3293/1098	3900/1360	3926/1350	4500/1590
Vessel height/dia. (m)	21.9/6.4	21.8/6.4	21.1/7.1	27.7/7.1
Fuel Bundles (number)	764	800	872	1132
Active Fuel Height (m)	3.7	3.7	3.7	3.0
Power density (kw/l)	50	54.2	51	54
Recirculation pumps	2(large)	2(large)	10	zero
Number of CRDs/type	185/LP	193/LP	205/FM	269/FM
Safety system pumps	9	9	18	zero
Safety diesel generator	2	3	3	zero
Core damage freq./yr	1E-5	1E-6	1E-7	3E-8
Safety Bldg Vol (m ³ /MWe)	115	150	160	< 130

ESBWR na tle innych technologii BWR



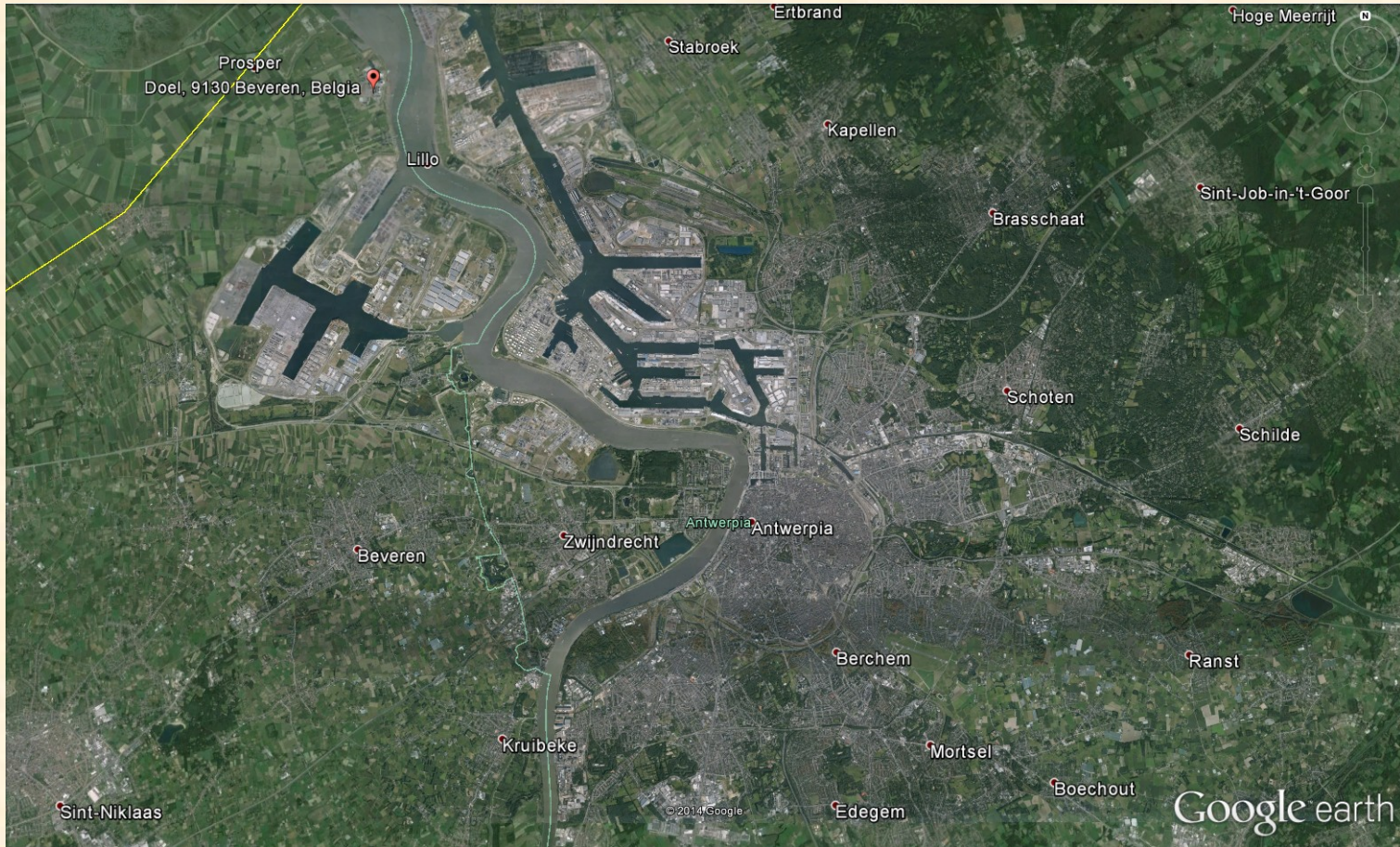
Dziękuję za uwagę

Doel



Doel NPP

Doel



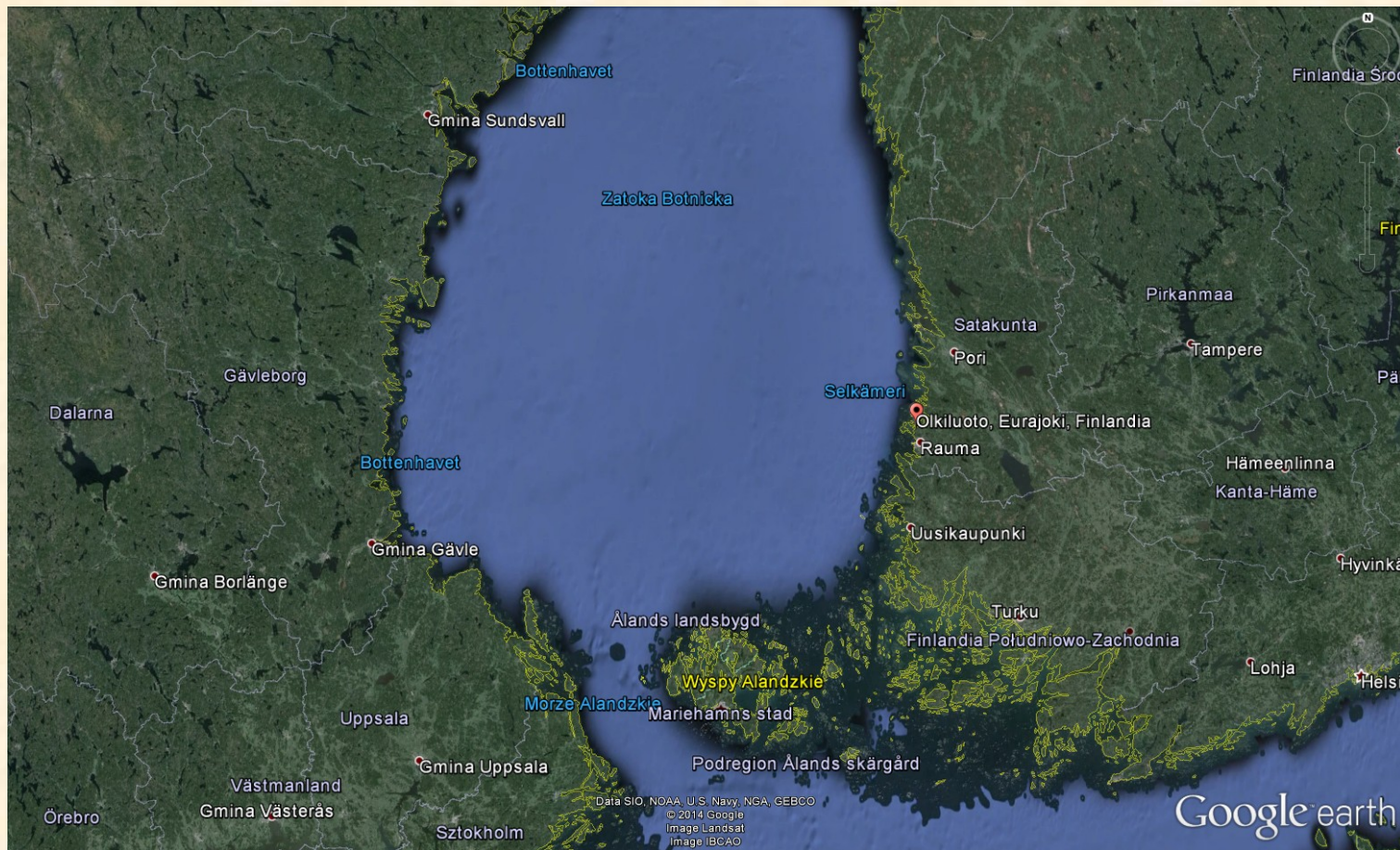
Doel NPP

Olkiluoto



Olkiluoto NPP

Olkiluoto



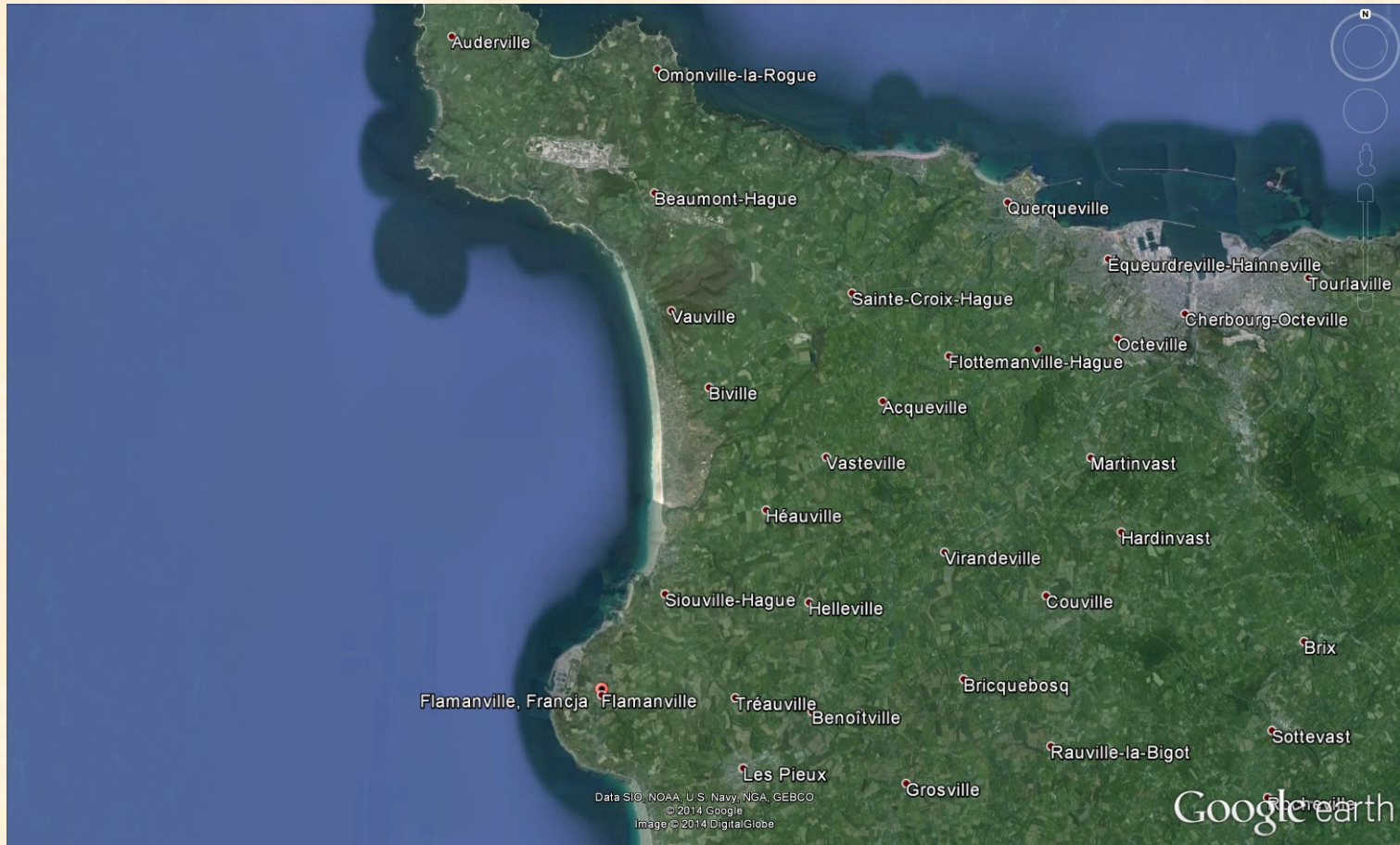
Olkiluoto NPP

Flamanville



Flamanville NPP

Flamanville



Flamanville NPP