

ENERGETYKA JĄDROWA TECHNOLOGIE

Adam Jerzy Rajewski
Zakład Termodynamiki
Instytut Techniki Ciepłej
Politechnika Warszawska



KLASYFIKACJA REAKTORÓW JĄDROWYCH

Przeznaczenie

Energia neutronów

Moderator

Chłodziwo

Konstrukcja



KLASYFIKACJA ZE WZGLĘDU NA PRZEZNACZENIE

Reaktory doświadczalne i badawcze

- Badania nad fizyką i chemią jądrową
- Rozwój nowych typów reaktorów
- Produkcja radioizotopów
- Wytwarzanie wiązek promieniowania dla celów badawczych

Reaktory energetyczne

- Wytwarzanie ciepła dla procesu produkcji energii elektrycznej
- Wytwarzanie ciepła dla innego procesu technologicznego

Reaktory napędowe

- Duże nawodne okręty wojenne (krążowniki, lotniskowce)
- Okręty podwodne
- Wielkie lodołamacze
- Statki handlowe (obecnie zarzucone ze względów ekonomicznych)

Reaktory „wojskowe”

- Produkcja materiałów rozszczepialnych dla głowic jądrowych



KLASYFIKACJA ZE WZGLĘDU NA ENERGIĘ NEUTRONÓW

Reaktory na neutrony termiczne

- Energia neutronu poniżej 0,1 eV
- Konieczne stosowanie moderatora

Reaktory na neutrony prężkie

- Energia neutronu powyżej 0,1 MeV
- Konieczność stosowania ciężkich chłodziw
- Zdolność powielania paliwa



KLASYFIKACJA ZE WZGLĘDU NA MODERATOR: STOSOWANE MODERATORY

Grafit

- GCR/AGR (GBR, FRA)
- RBMK (SUN)
- GT-MHR (RUS/USA), HTGR (DEU/ZAF/CHN)

Woda ciężka (D₂O)

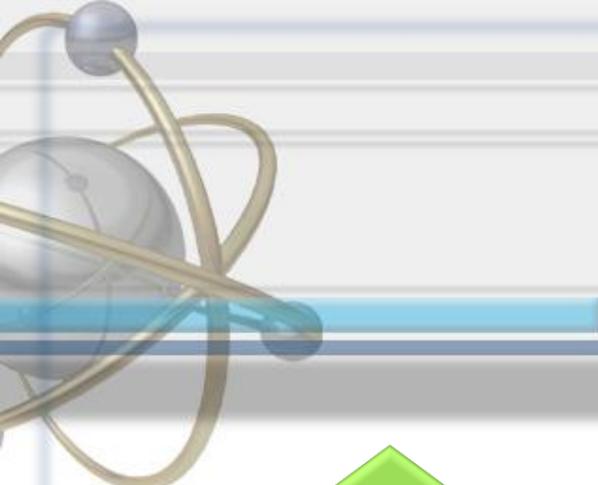
- PHWR/CANDU (CAN, IND)
- ACR (CAN)

Woda lekka (H₂O)

- BWR (USA, DEU, FRA, JPN, SWE)
- PWR (USA, DEU, FRA, KOR, JPN, CHN, SWE)
- WWER (SUN/RUS)

Inne

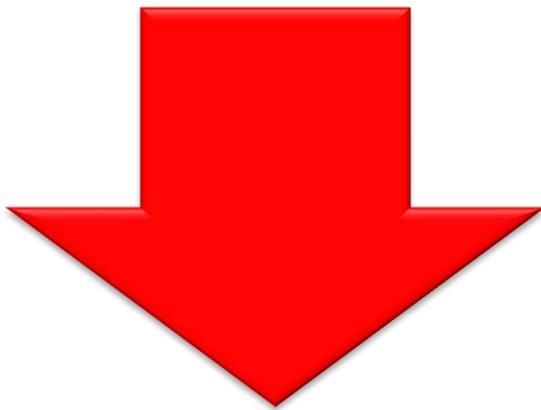
- Reaktory badawcze z różnymi moderatorami (np. woda+beryl – reaktor MARIA)



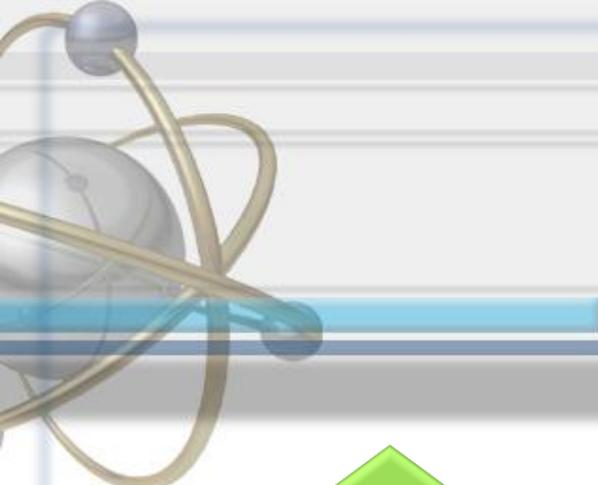
MODERATOR GRAFITOWY



Łatwy do pozyskania i obróbki
Odporny na wysoką temperaturę
(możliwy wzrost sprawności bloku)



Palny
Względnie wysoka masa atomowa
(wzrost objętości rdzenia)



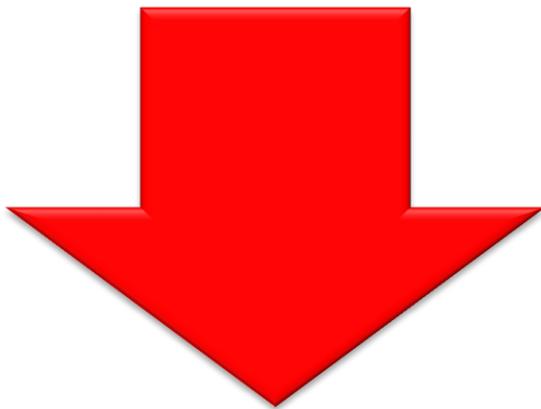
MODERATOR CIĘŻKOWODNY



Umożliwia wykorzystanie uranu naturalnego

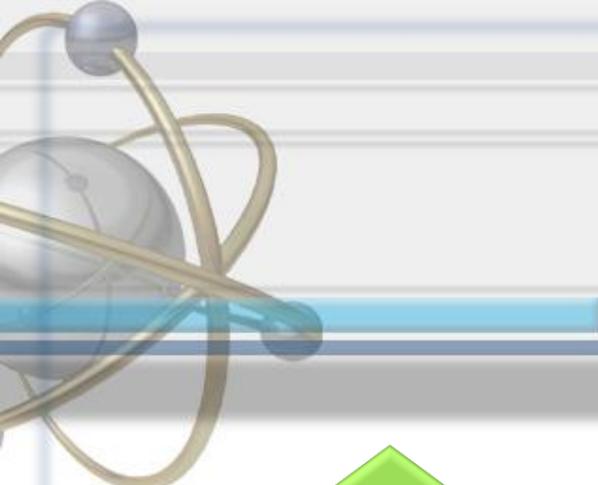
Niski przekrój czynny na pochłanianie neutronów

Niepalny



Masa atomowa D większa od H (większe wymiary rdzenia)

Kłopotliwy technologicznie



MODERATOR LEKKOWODNY

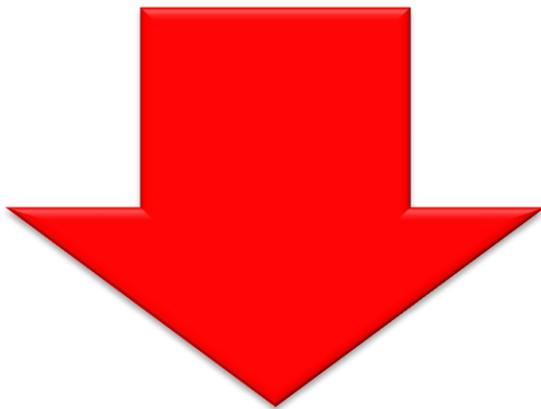


Łatwo dostępny

Najniższa możliwa masa atomowa H – mała objętość rdzenia

Umożliwia wykorzystanie tej samej masy wody jako moderatora i chłodziwa (wzrost bezpieczeństwa)

Niska aktywność chemiczna



Pochłania neutrony (wymaga wzbogacenia uranu)

Niska temperatura wrzenia przy umiarkowanych ciśnieniach (ogranicza temperaturę pracy reaktorów zbiornikowych)



KLASYFIKACJA ZE WZGLĘDU NA CHŁODZIWO: STOSOWANE CHŁODZIWA

Powietrze

- Pierwsze reaktory badawcze i wojskowe

Dwutlenek węgla

- AGR, GCR

Hel

- GT-MHR, HTGR

Woda ciężka

- PHWR/CANDU

Woda lekka

- PWR
- BWR
- WWER
- RBMK
- ACR

Ciekły metal

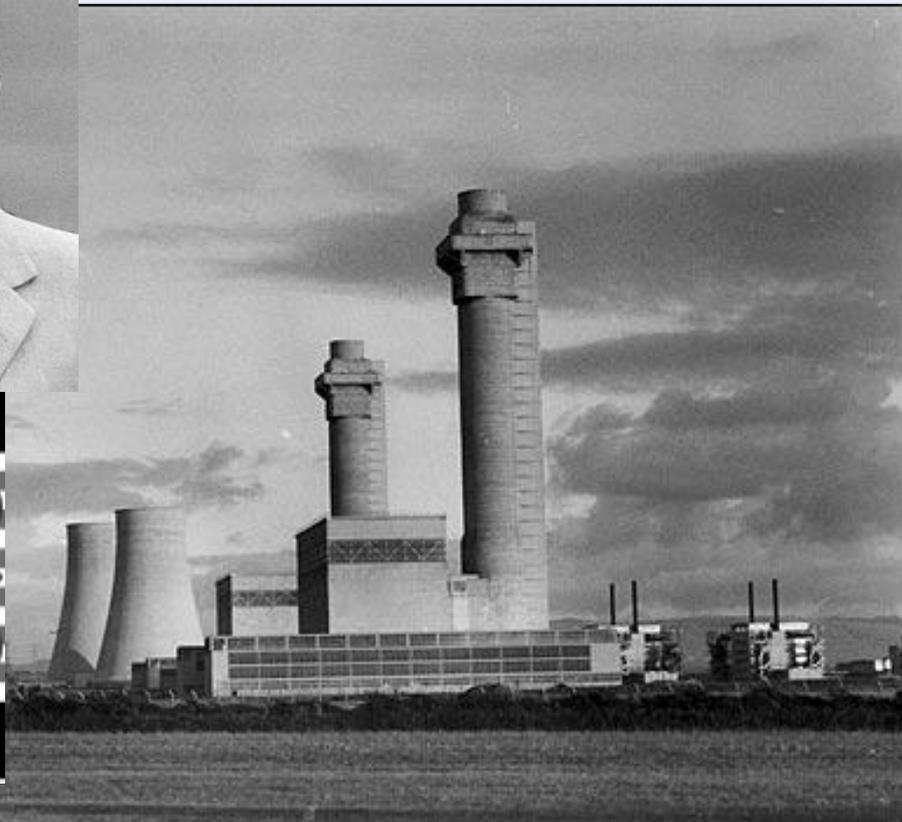
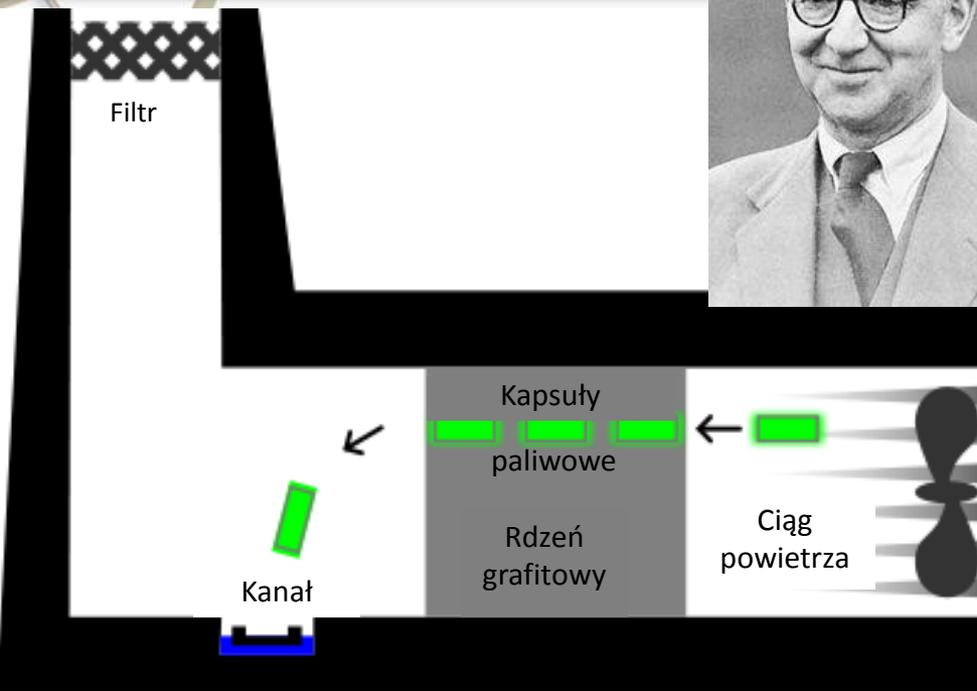
- FBR

CHŁODZENIE POWIETRZEM



Stos CP-1, USA 1942

CHŁODZENIE POWIETRZEM



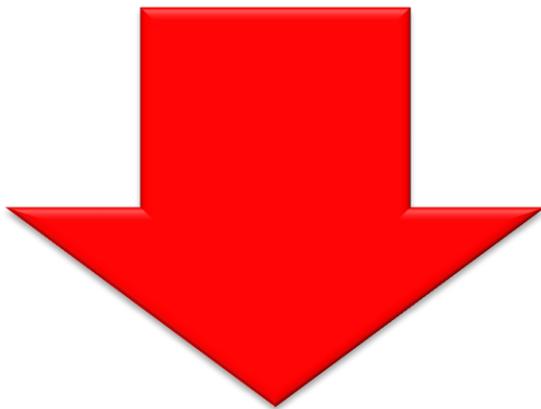
Windscale Pile 1

Wlk. Brytania 1950

CHŁODZENIE CO₂



Możliwe uzyskanie wysokiej temperatury przy niskim ciśnieniu (do 700°C)



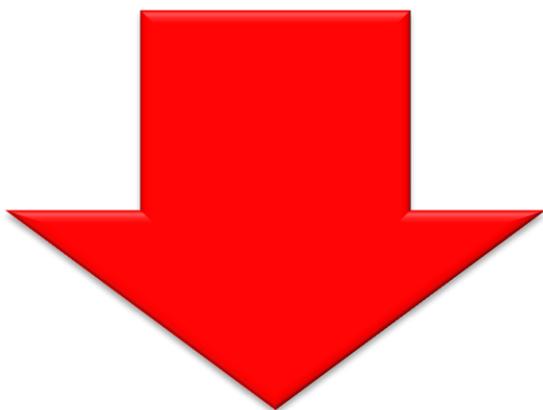
Niskie ciepło właściwe
Duży pobór mocy w dmuchawach
Powyżej 700°C aktywny chemicznie

CHŁODZENIE HE



Możliwe uzyskanie bardzo wysokich temperatur

Obojętność chemiczna



Koszty

Niskie ciepło właściwe

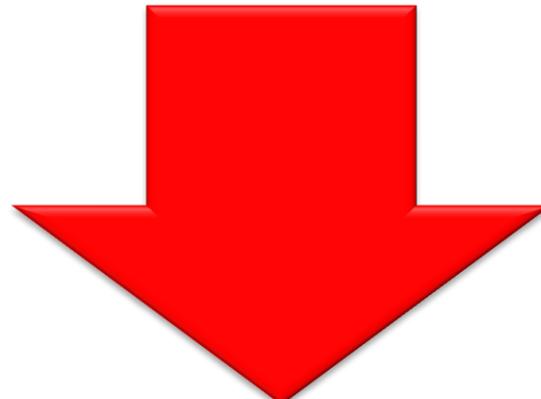
Duży pobór mocy w dmuchawach/
sprężarkach



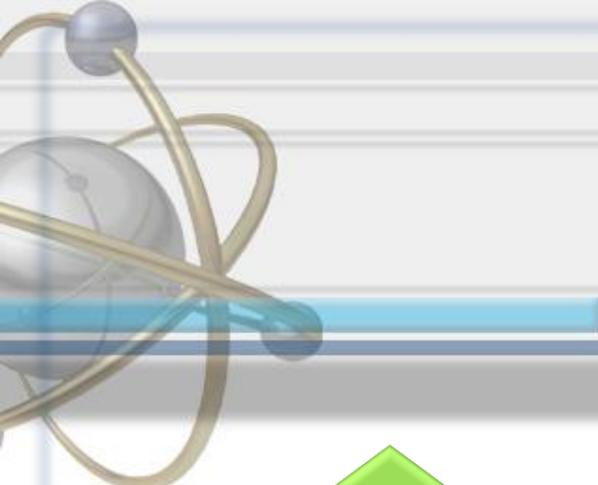
CHŁODZENIE WODĄ CIĘŻKĄ



Możliwość stosowania uranu naturalnego (przy połączeniu z moderatorem ciężkowodnym)



Koszty



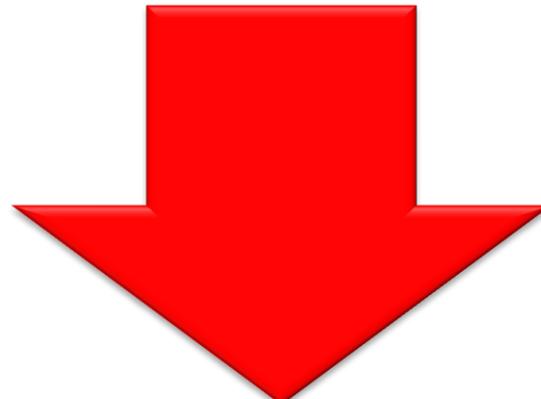
CHŁODZENIE WODĄ LEKKĄ



Koszty

Wysokie ciepło właściwe

Niska moc potrzebna do pompowania



Ograniczenie temperatury

Konieczność stosowania wysokiego ciśnienia

STOSOWANE KOMBINACJE

Moderator Chłodziwo	Grafit	D2O	H2O	Brak
CO ₂	GCR, AGR	–	–	–
He	THTR GT-MHR, PBMR	–	–	–
H2O	RBMK	ACR	PWR, WWER BWR	–
D2O	–	CANDU PHWR	–	–
Ciekły metal	–	–	–	FBR



KLASYFIKACJA ZE WZGLĘDU NA KONSTRUKCJĘ

Zbiornikowe

- PWR, WWER
- BWR
- GCR, AGR
- GT-MHR, PBMR

Kanałowe

- RBMK
- CANDU

Basenowe

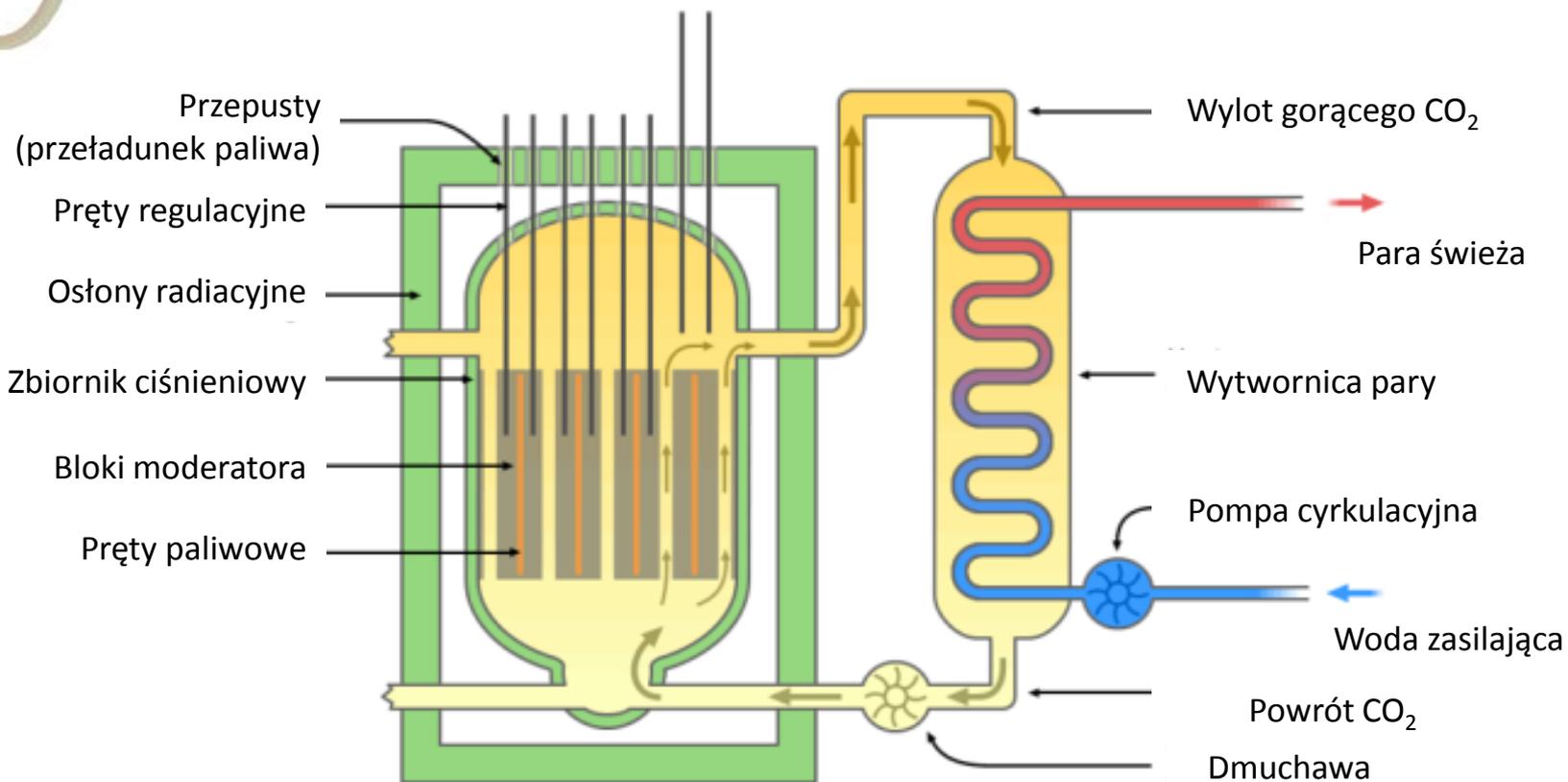
- FBR



REAKTOR CHŁODZONY GAZEM GAS-COOLED REACTOR (GCR)

- Reaktor zbiornikowy (zbiornik stalowy lub betonowy)
- Chłodziwo: CO₂
- Moderator: grafit
- Paliwo: uran naturalny, koszulki Magnox lub Mg-Zr
- Układ dwuobiegowy
 - Obieg pierwotny gazowy, ok. 400°C, 7-27 bar
 - Obieg wtórny wodno-parowy z turbiną parową
- Gęstość mocy w rdzeniu ok. 1 MW/m³
- Sprawność bloku:
- Producenci: GBR (Magnox), FRA (UNGG)
- Użytkownicy: GBR, ITA, JPN, FRA, ESP, PRK
- Bloki 60-550 MWe

REAKTOR CHŁODZONY GAZEM GAS-COOLED REACTOR (GCR)



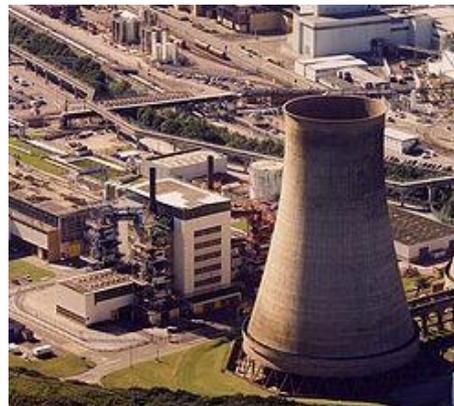
REAKTOR CHŁODZONY GAZEM GAS-COOLED REACTOR (GCR)



Element paliwowy
typu Magnox



Sizewell A (GBR)
2 × 245 MWe brutto
2 × 210 MWe netto
1966-2006

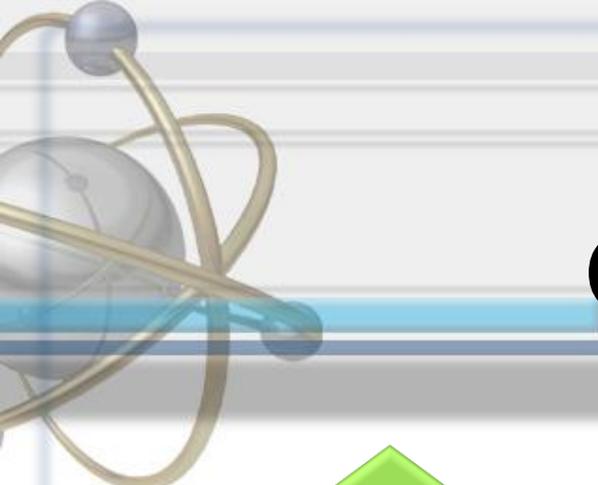


Calder Hall (GBR)
4 × 60 MWe brutto
4 × 50 MWe netto
1956-2003

REAKTOR CHŁODZONY GAZEM GAS-COOLED REACTOR (GCR)



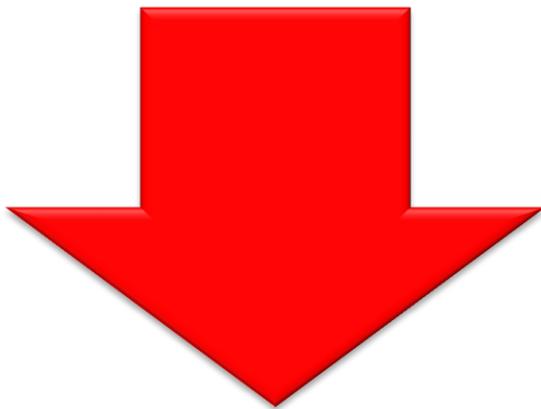
Saint-Laurent A (FRA)
500+530 MWe brutto
480+515 MWe netto
1969-1992



REAKTOR CHŁODZONY GAZEM GAS-COOLED REACTOR (GCR)



- Prosta konstrukcja
- Możliwość chłodzenia konwekcją naturalną
- Możliwość przeładunku paliwa w czasie pracy



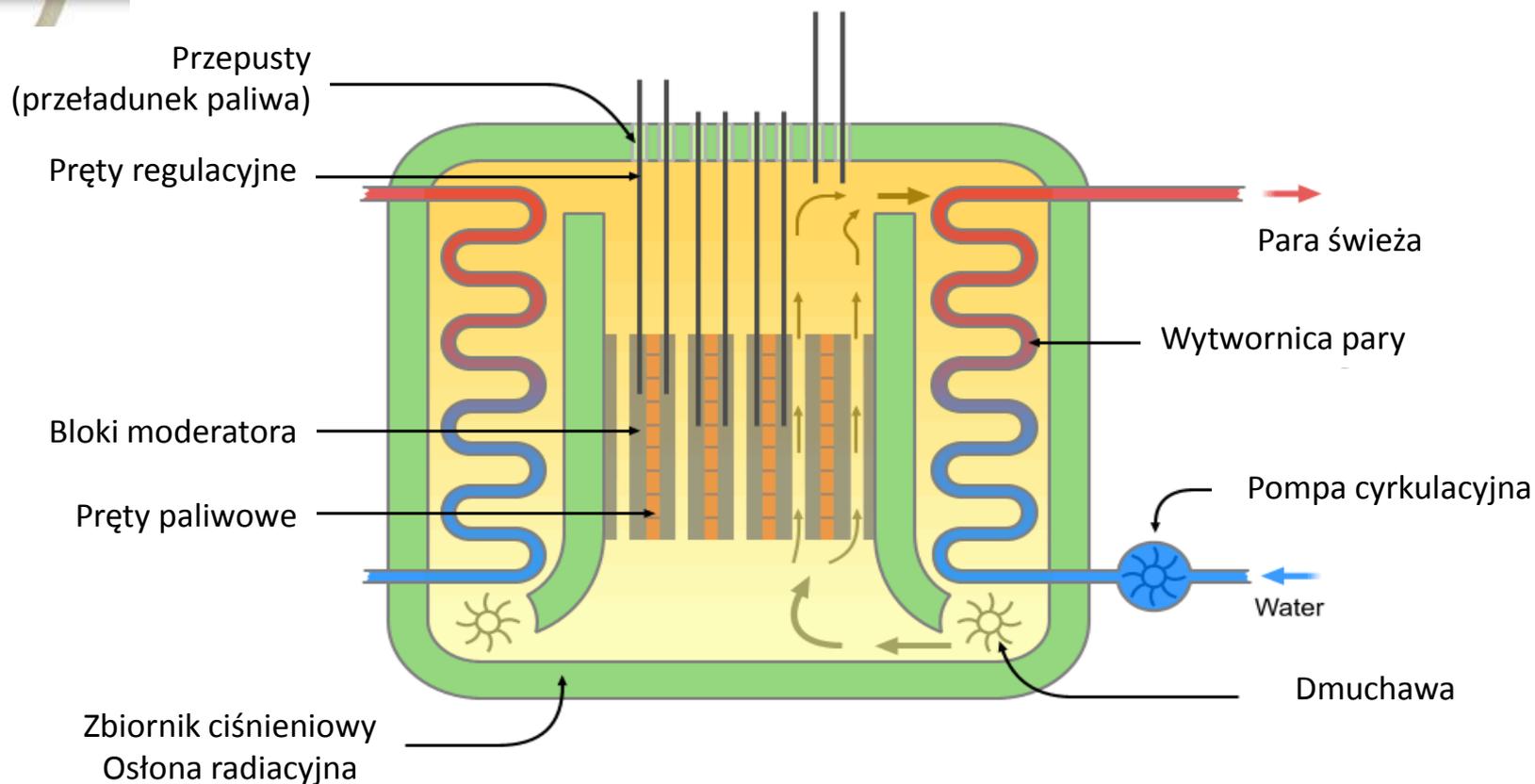
- Duży pobór mocy w dmuchawach
- Ograniczenie temperatury z uwagi na koszulki elementów paliwowych
- Brak obudów bezpieczeństwa
- Małe wypalenie paliwa



REAKTOR CHŁODZONY GAZEM ADVANCED GAS-COOLED REACTOR (AGR)

- Reaktor zbiornikowy (zbiornik betonowy z wykładziną stalową)
- Chłodziwo: CO₂
- Moderator: grafit
- Paliwo: uran lekko wzbogacony (2÷3%), koszulki stalowe
- Układ dwuobiegowy
 - Obieg pierwotny gazowy, ok. 650/300°C, 40 bar
 - Obieg wtórny wodno-parowy z turbiną parową, 196 bar, 543°C
- Gęstość mocy w rdzeniu ok. 1 MW/m³
- Sprawność bloku: 41% brutto
- Producenci: GBR
- Użytkownicy: GBR
- Bloki 550-620 MWe

REAKTOR CHŁODZONY GAZEM ADVANCED GAS-COOLED REACTOR (AGR)



REAKTORY CHŁODZONE GAZEM ADVANCED GAS-COOLED REACTOR (AGR)

Torness (GBR)
2 × 682 MWe brutto
2 × 615 MWe netto
1988-(2023)

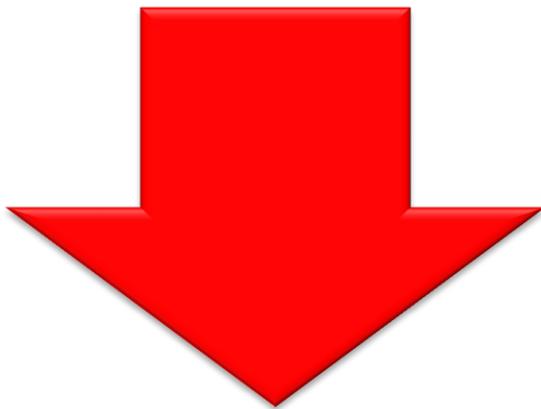




REAKTORY CHŁODZONE GAZEM ADVANCED GAS-COOLED REACTOR (AGR)



- Prosta konstrukcja
- Możliwość chłodzenia konwekcją naturalną
- Możliwość przeładunku paliwa w czasie pracy
- Wysokie parametry pary świeżej (przegrzana)
- Wysoka sprawność



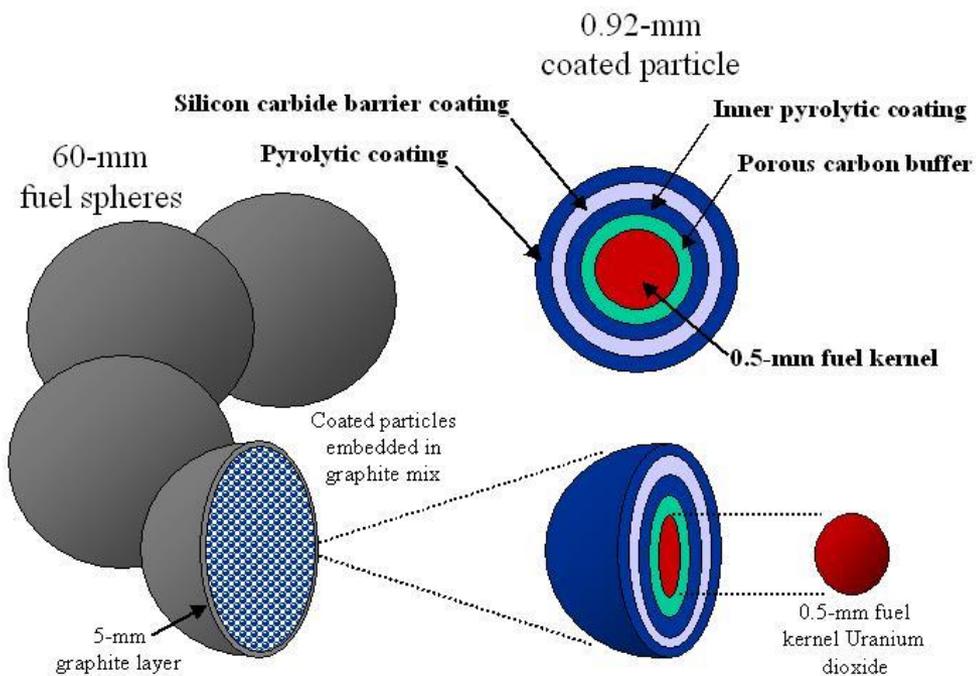
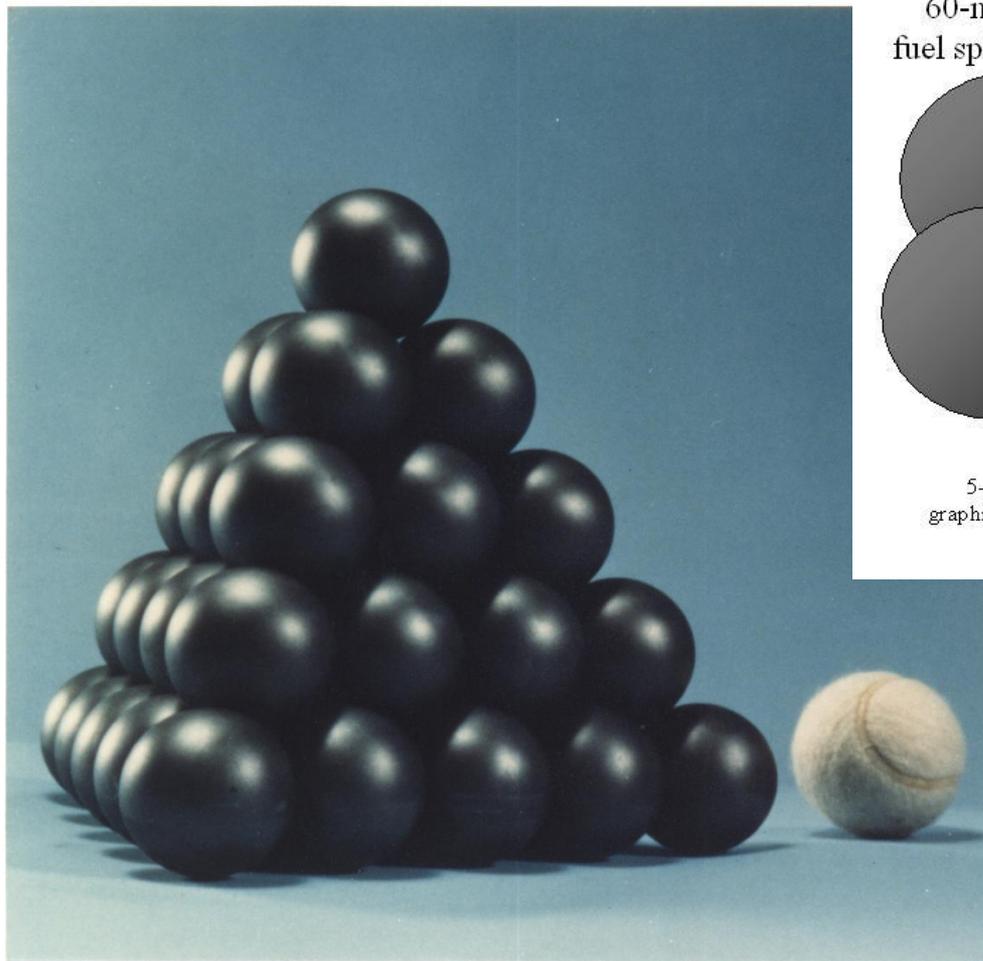
- Duży pobór mocy w dmuchawach
- Małe wypalenie paliwa



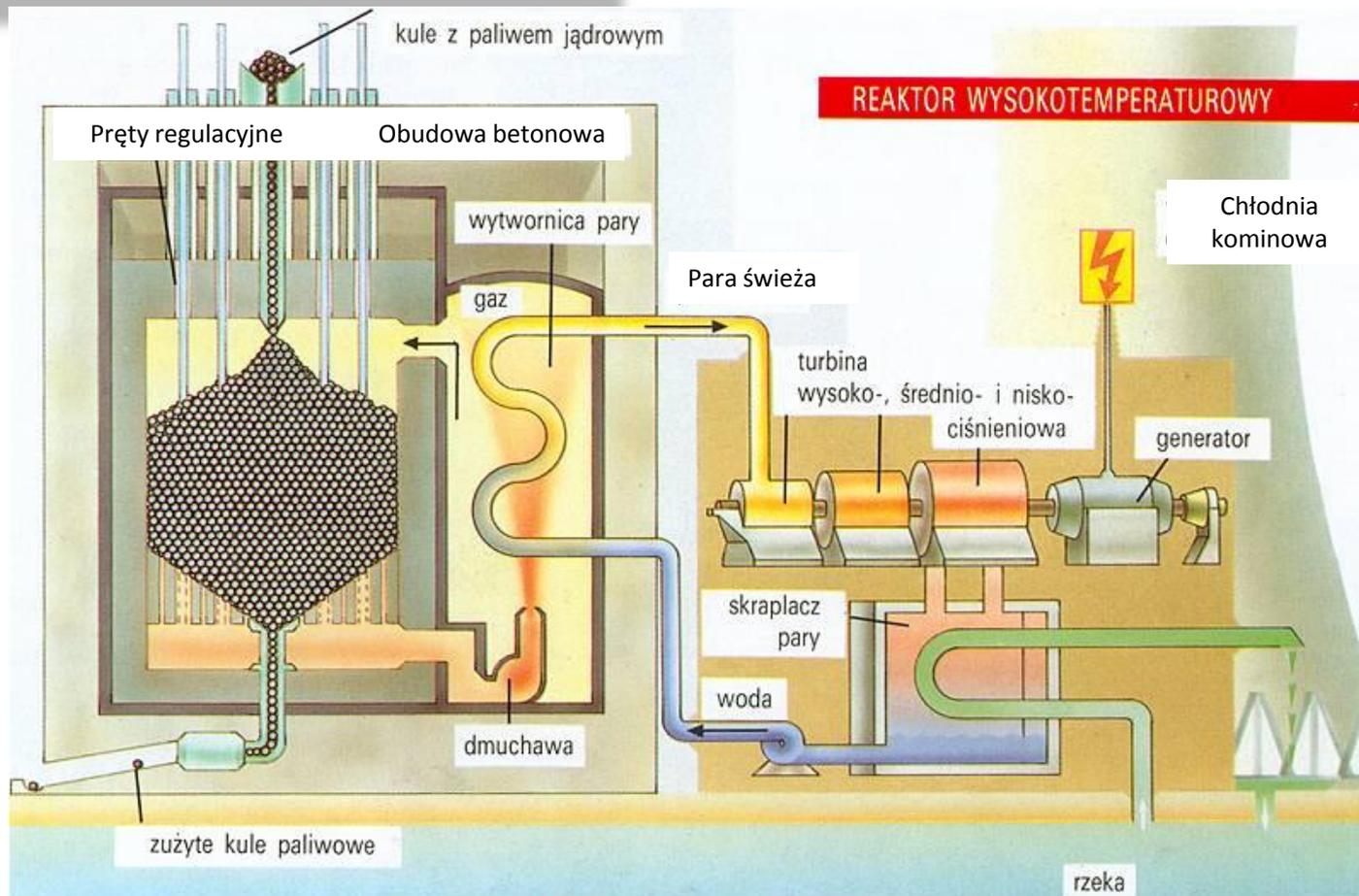
REAKTOR WYSOKOTEMPERATUROWY HIGH-TEMPERATURE REACTOR (HTR)

- Reaktor zbiornikowy (zbiornik betonowy lub stalowy)
- Chłodziwo: He
- Moderator: grafit
- Paliwo: uran lub tor w kulach paliwowych (złóże usypane)
- Układ dwuobiegowy
 - Obieg pierwotny gazowy, ok. 750°C
 - Obieg wtórny wodno-parowy z turbiną parową, >500°C
- Producenci: USA, DEU
- Użytkownicy: USA, DEU
- 40 MWe, 300 MWe, 330 MWe

ZŁOŻE USYPANE - PALIWO KULOWE

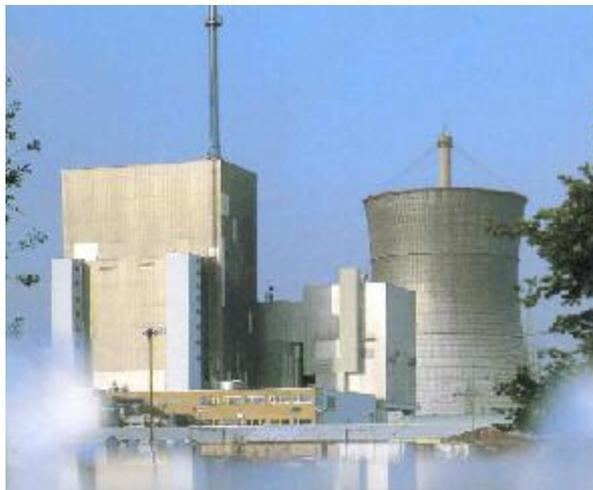


REAKTOR WYSOKOTEMPERATUROWY HIGH-TEMPERATURE REACTOR (HTR)

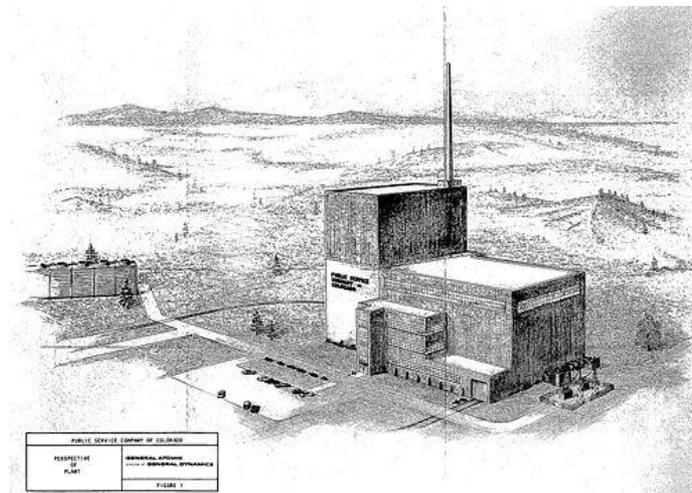


REAKTOR WYSOKOTEMPERATUROWY HIGH-TEMPERATURE REACTOR (HTR)

THTR-300
308 MWe brutto
296 MWe netto
1985-1987



Fort St. Vrain
342MWe brutto
330MWe netto
1976-1989

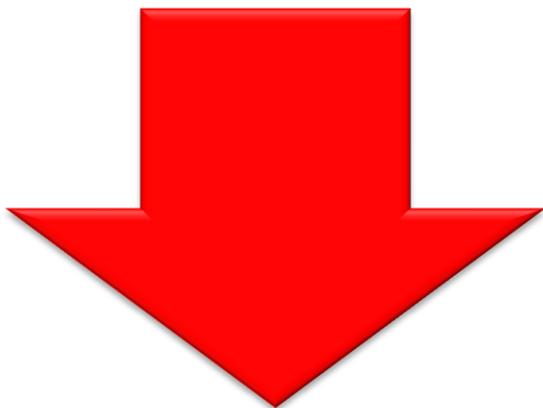




HIGH-TEMPERATURE REACTOR (HTR)



Możliwość przeładunku paliwa w czasie pracy
Stabilna charakterystyka neutronowa rdzenia
Wysoka sprawność
Wysokie parametry pary świeżej (para przegrzana)



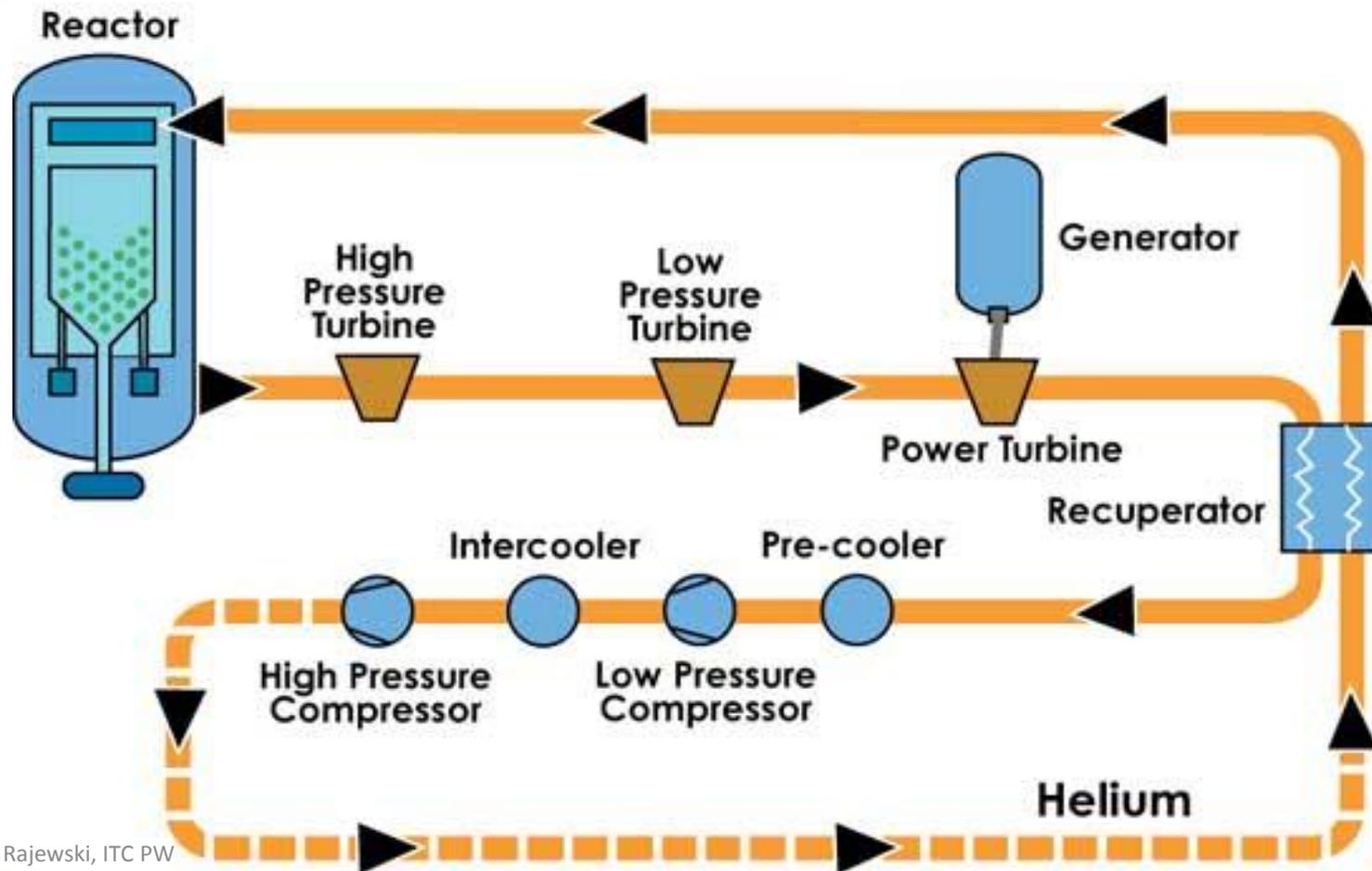
Problemy eksploatacyjne: przecieki, korozja
Niedostateczne badania (przerwane na przełomie lat 80./90.)

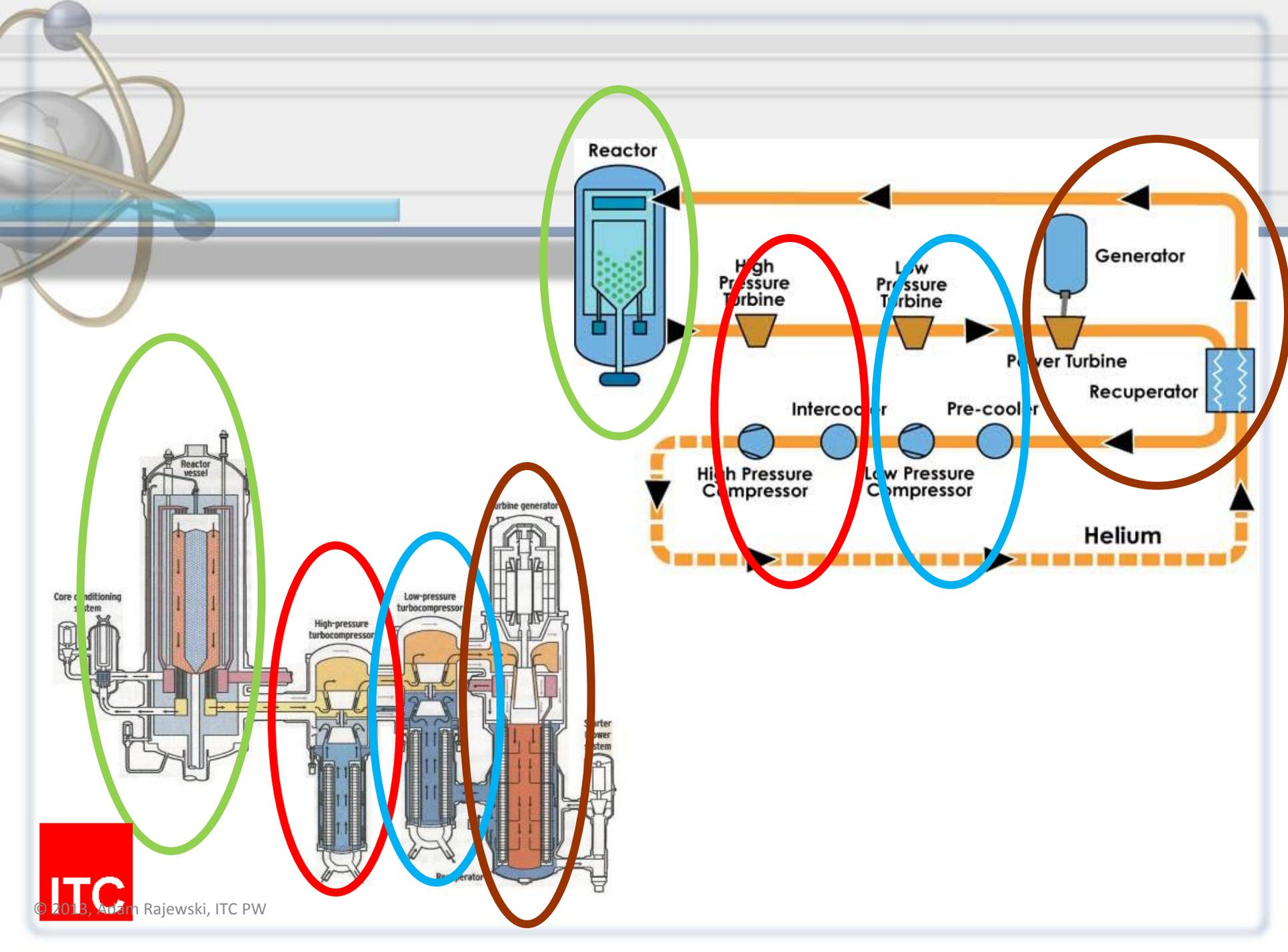


PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR)

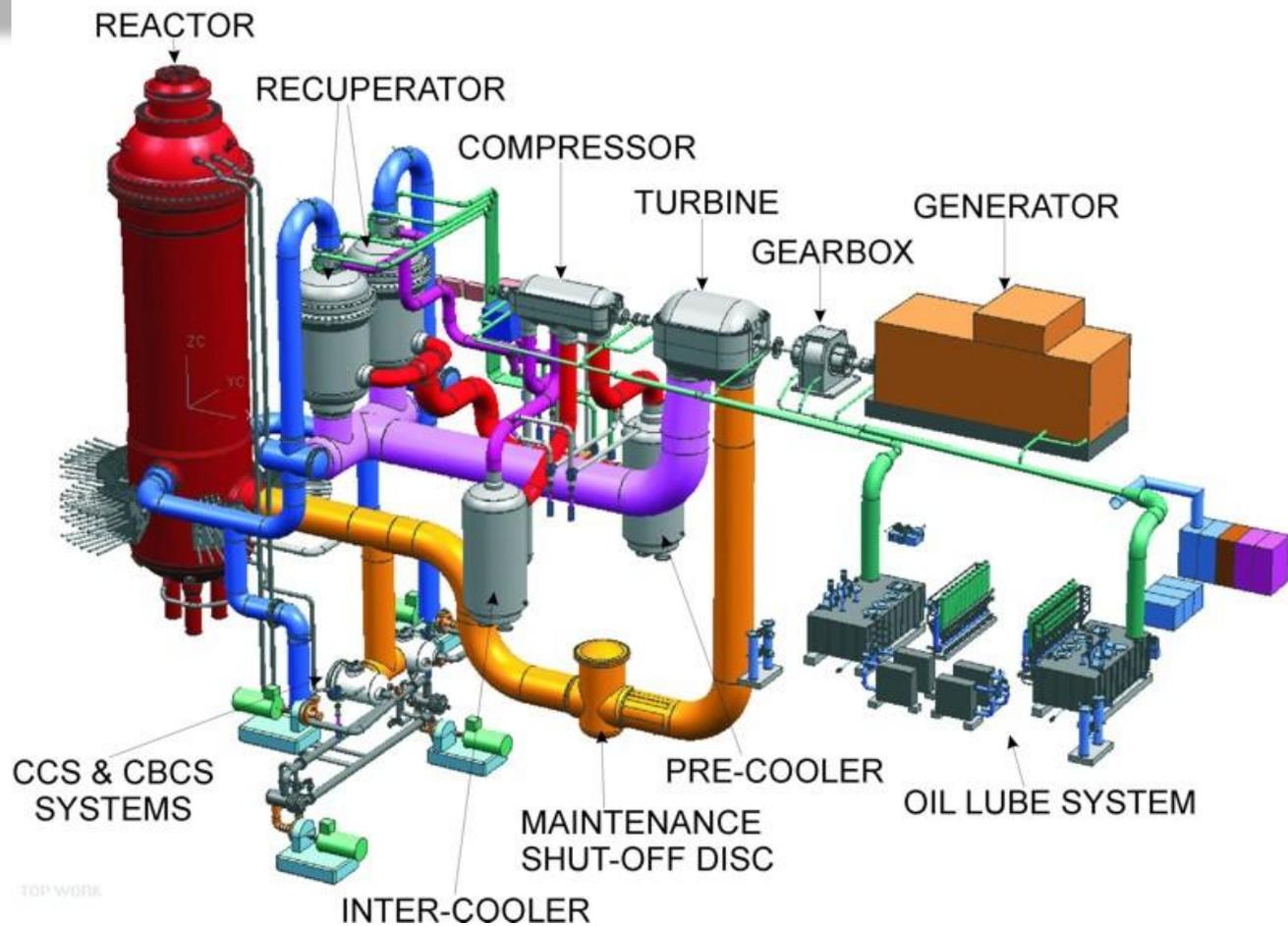
- Reaktor zbiornikowy (zbiornik betonowy z wykładziną stalową)
- Chłodziwo: He
- Moderator: grafit
- Paliwo: uran lub tor w kulach paliwowych (złóże usypane)
- Układ jednoobiegowy: obieg gazowy z turbiną gazową,
 - Temperatury ok. 900/500°C
 - Ciśnienia
- Sprawność: powyżej 45%
- Producenci: ZAF, CHN
- Użytkownicy: brak
- 160 MWe (ZAF), ok. 200 MWe (CHN)

PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR)





PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR)



PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR)

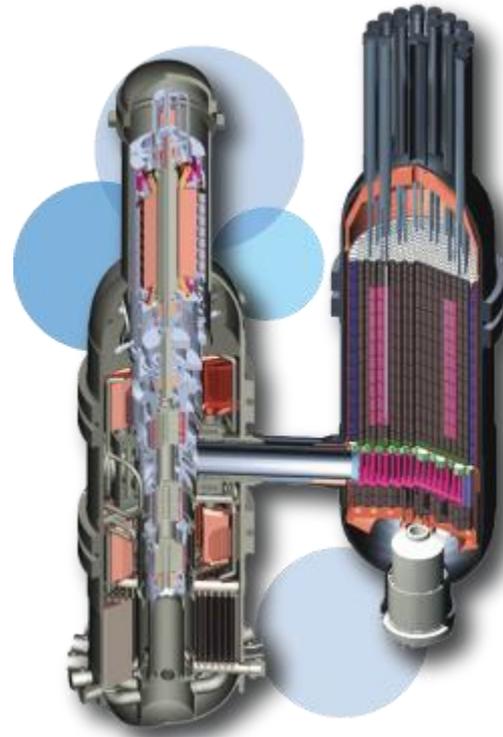




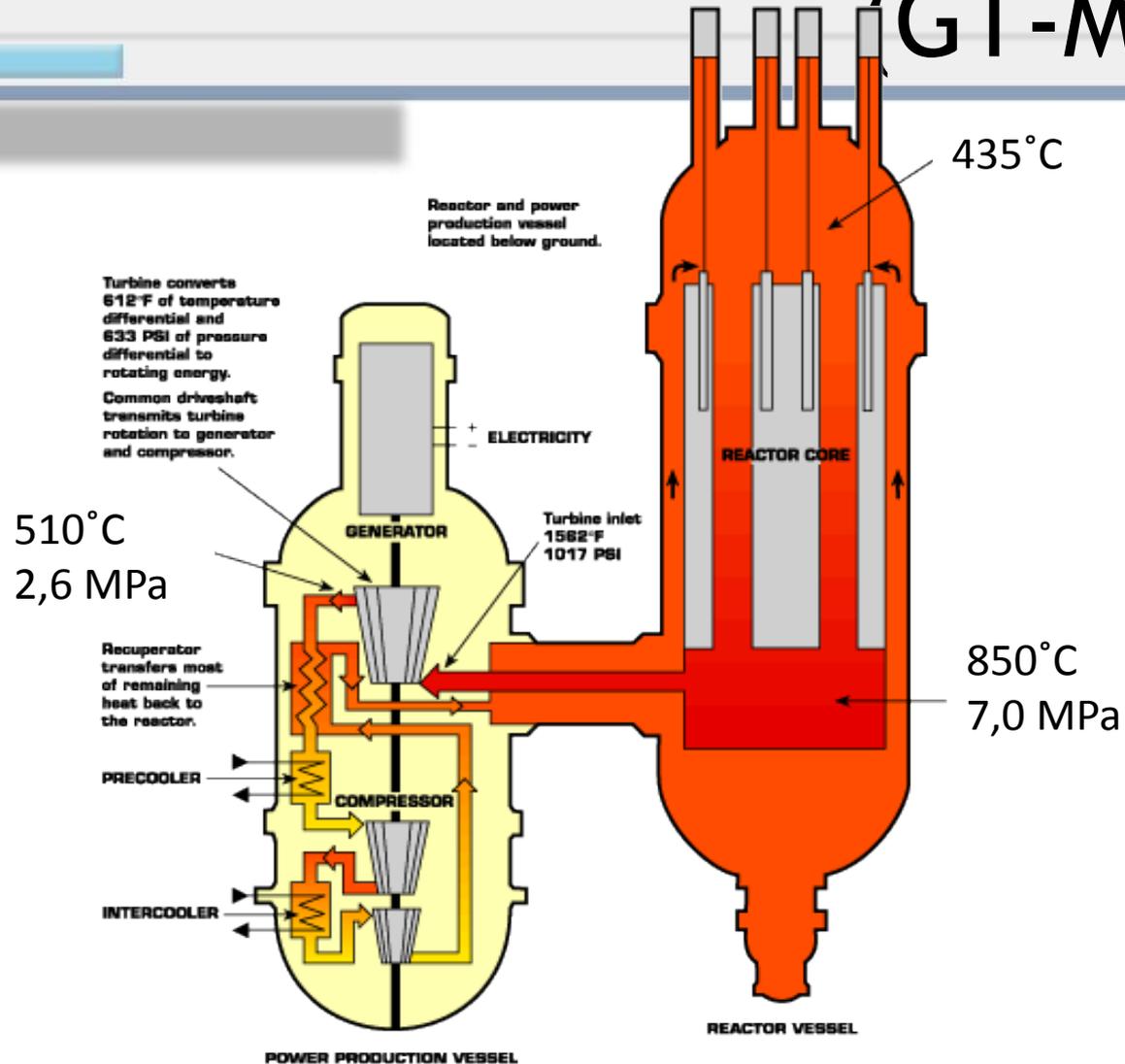
GAS TURBINE MODULAR HELIUM REACTOR (GT-MHR)

- Reaktor zbiornikowo-kanałowy
- Chłodziwo: He
- Moderator: grafit
- Paliwo: kulki uranowe w graniastosłupach grafitowych
- Układ jednoobiegowy: obieg gazowy z turbiną gazową,
 - Temperatury ok. 850/435°C
 - Ciśnienia 70/26 bar
- Sprawność: ok. 48%
- Producenci: USA (RUS)
- Użytkownicy: (RUS?) na razie brak
- Bloki 285 MWe

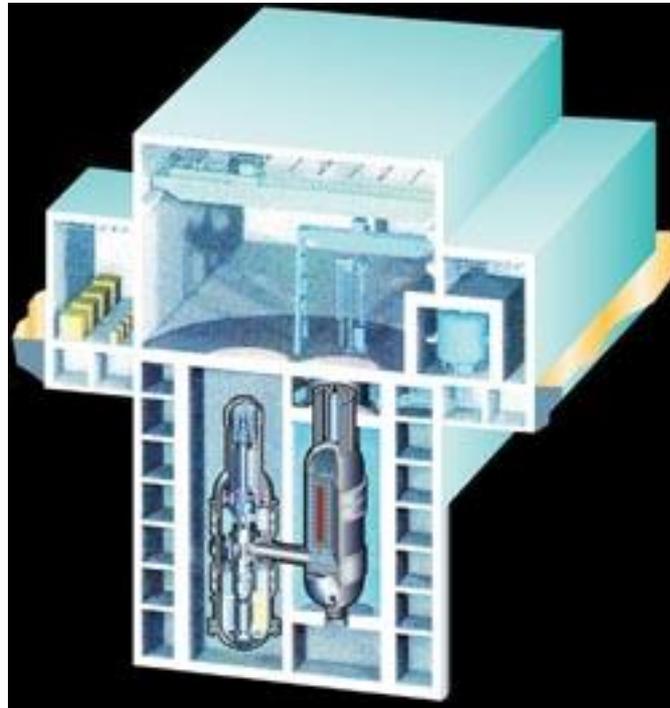
PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR)

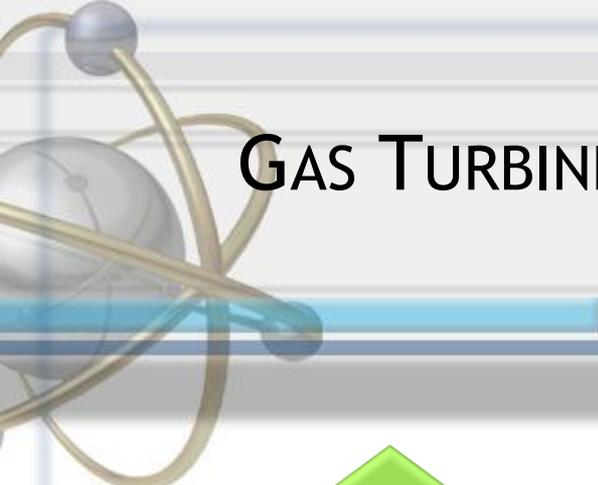


GAS TURBINE MODULAR HELIUM REACTOR (GT-MHR)



GAS TURBINE MODULAR HELIUM REACTOR (GT-MHR)





GAS TURBINE MODULAR HELIUM REACTOR (GT-MHR) PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR)

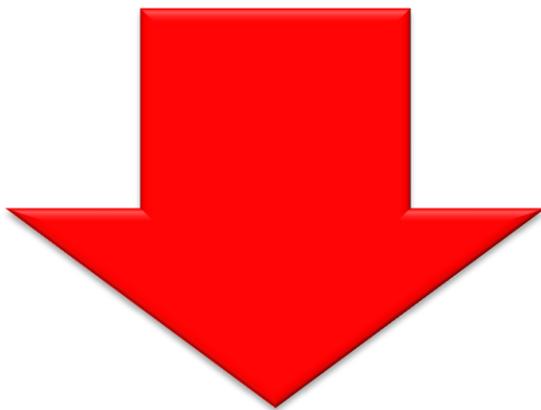


Wysoka sprawność

Wysoka elastyczność + małe bloki →
→ regulacja obciążenia

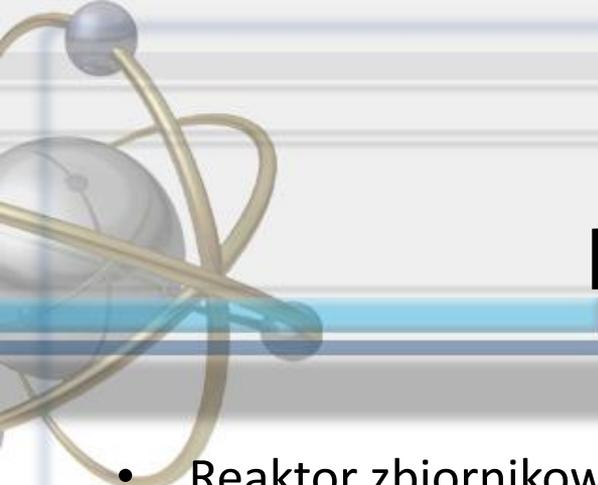
Możliwość przeładunku paliwa w czasie pracy i stała charakterystyka rdzenia (tylko PBMR)

Możliwość schłodzenia rdzenia konwekcją naturalną
Eliminacja ryzyka korozji



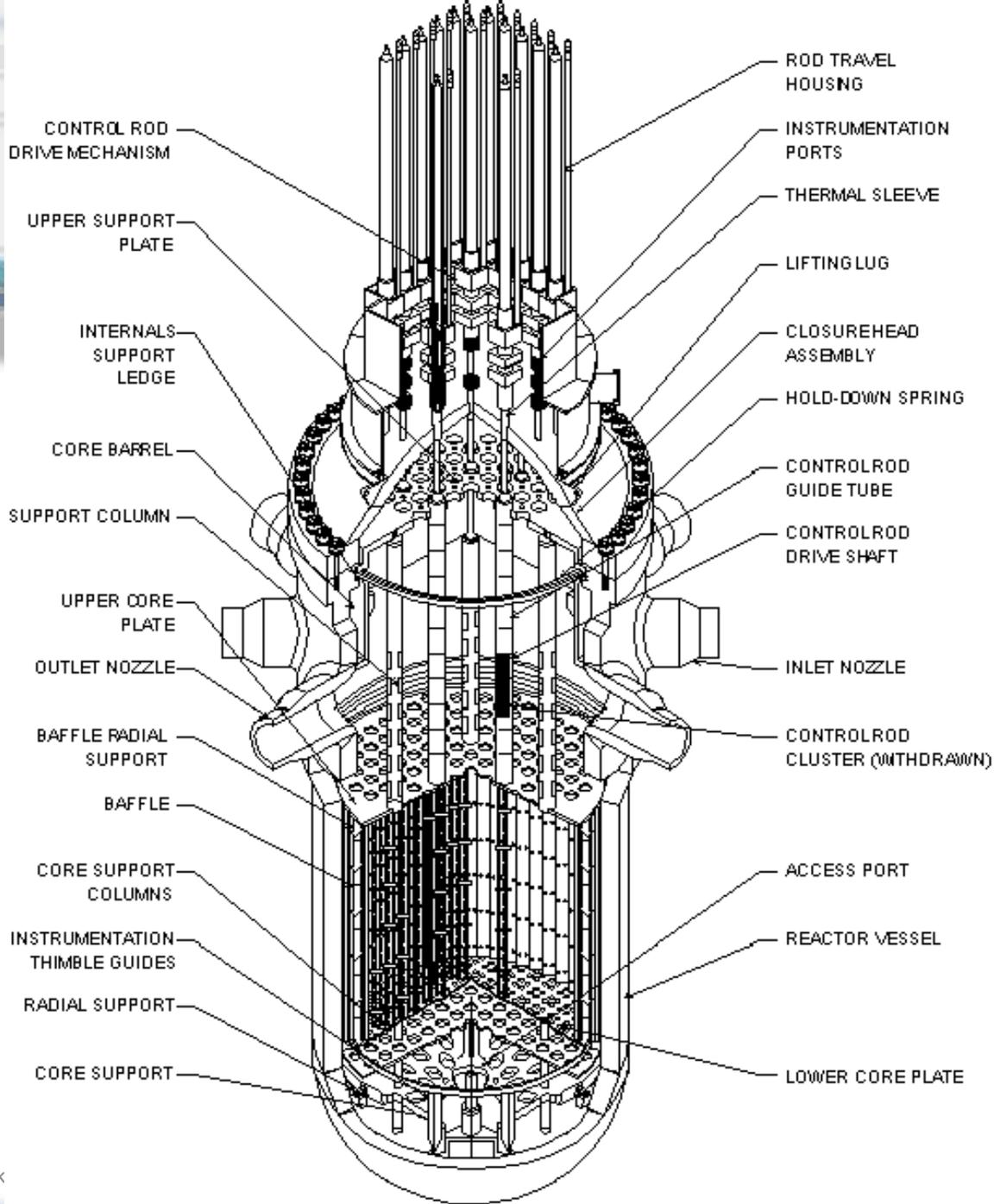
Brak doświadczeń eksperymentalnych

Program rozwojowy PBMR zawieszony z braku funduszy w RPA

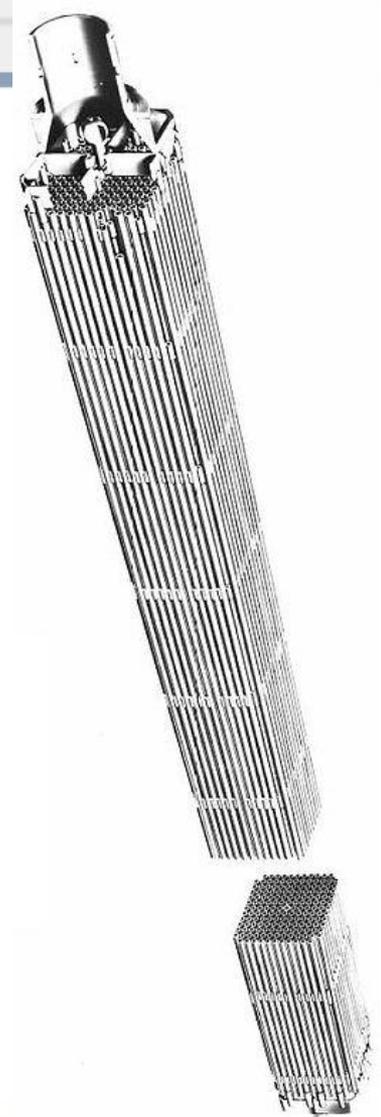


REAKTOR WODNY CIŚNIENIOWY PRESSURIZED WATER REACTOR (PWR)

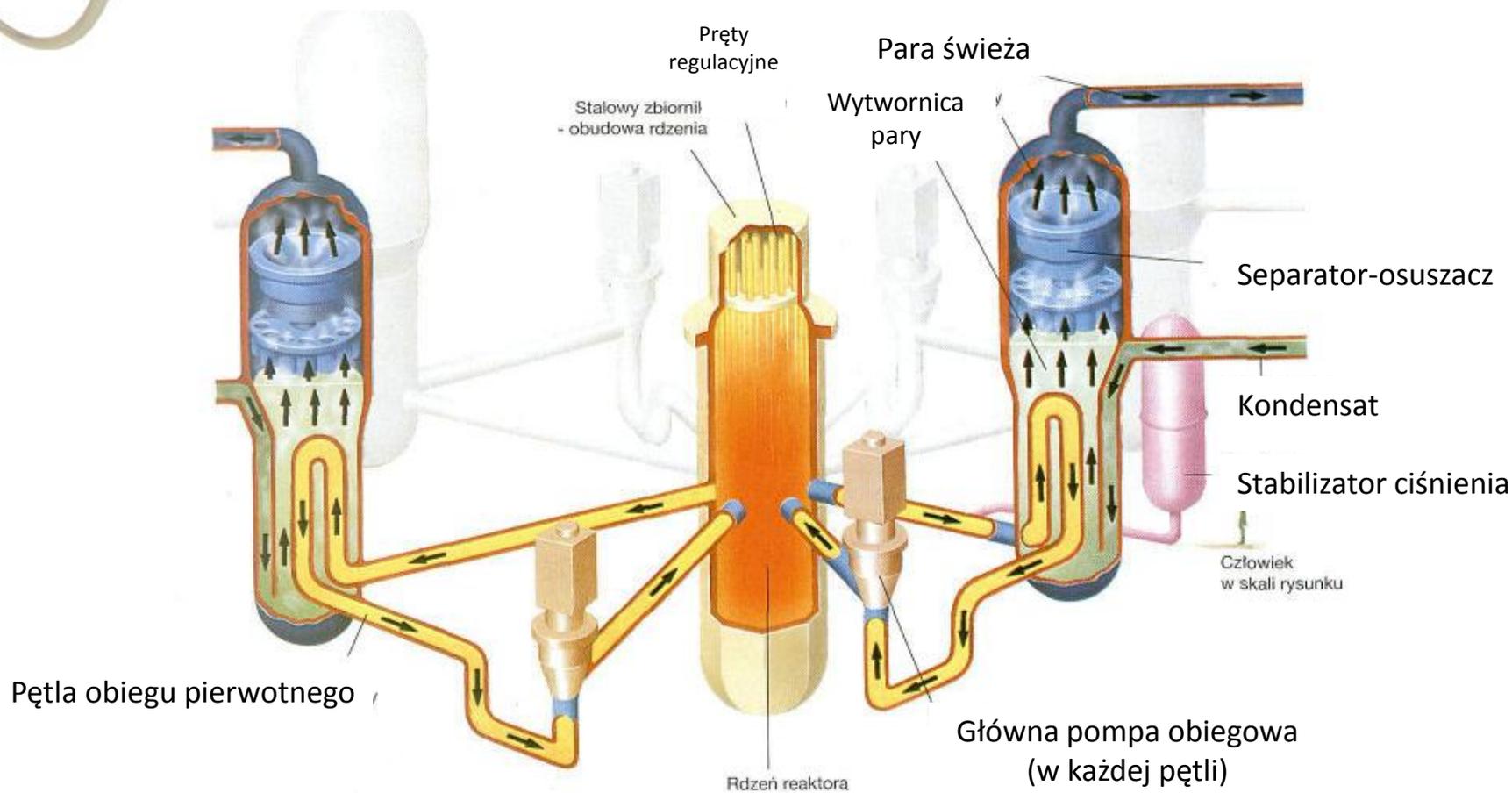
- Reaktor zbiornikowy (zbiornik stalowy)
- Chłodziwo: H₂O
- Moderator: H₂O (ta sama masa, co chłodziwo)
- Paliwo: uran wzbogacony (4÷5%)
- Układ dwuobiegowy
 - Obieg pierwotny wodny, 150÷200 bar, 300÷350°C
 - Obieg wtórny wodno-parowy, para świeża nasycona ok. 320°C
- Sprawność: ok. 32%
- Regulacja mocy: pręty regulacyjne
- Regulacja reaktywności w czasie kampanii: dodatek kwasu borowego do wody w obiegu pierwotnym
- Producenci: USA, DEU, FRA, KOR, JPN, SWE
- Użytkownicy: ...
- do 1600 MWe



PWR

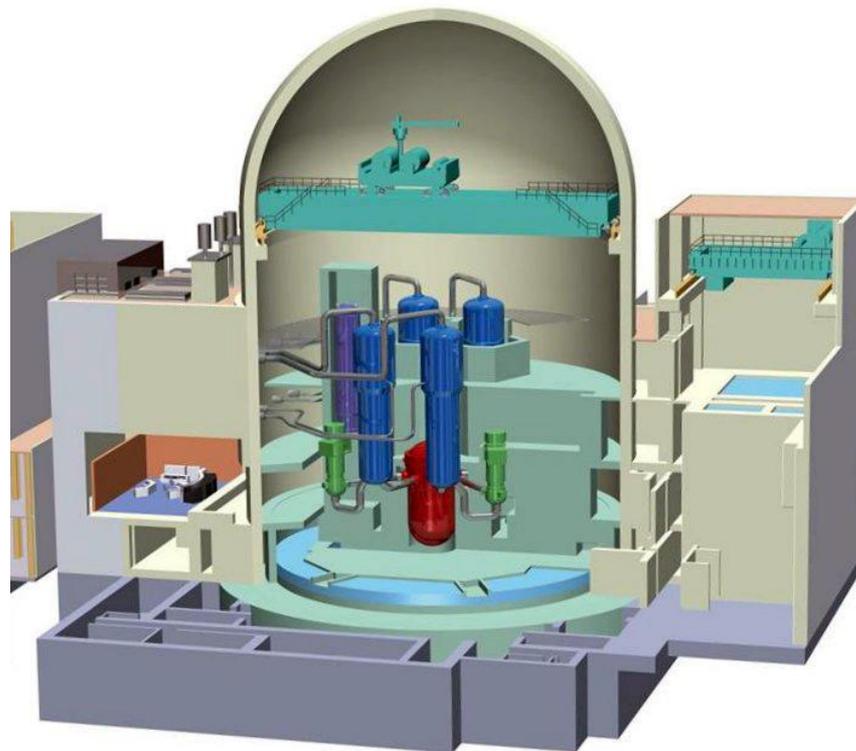


REAKTOR WODNY CIŚNIENIOWY PRESSURIZED WATER REACTOR (PWR)



REAKTOR WODNY CIŚNIENIOWY PRESSURIZED WATER REACTOR (PWR)

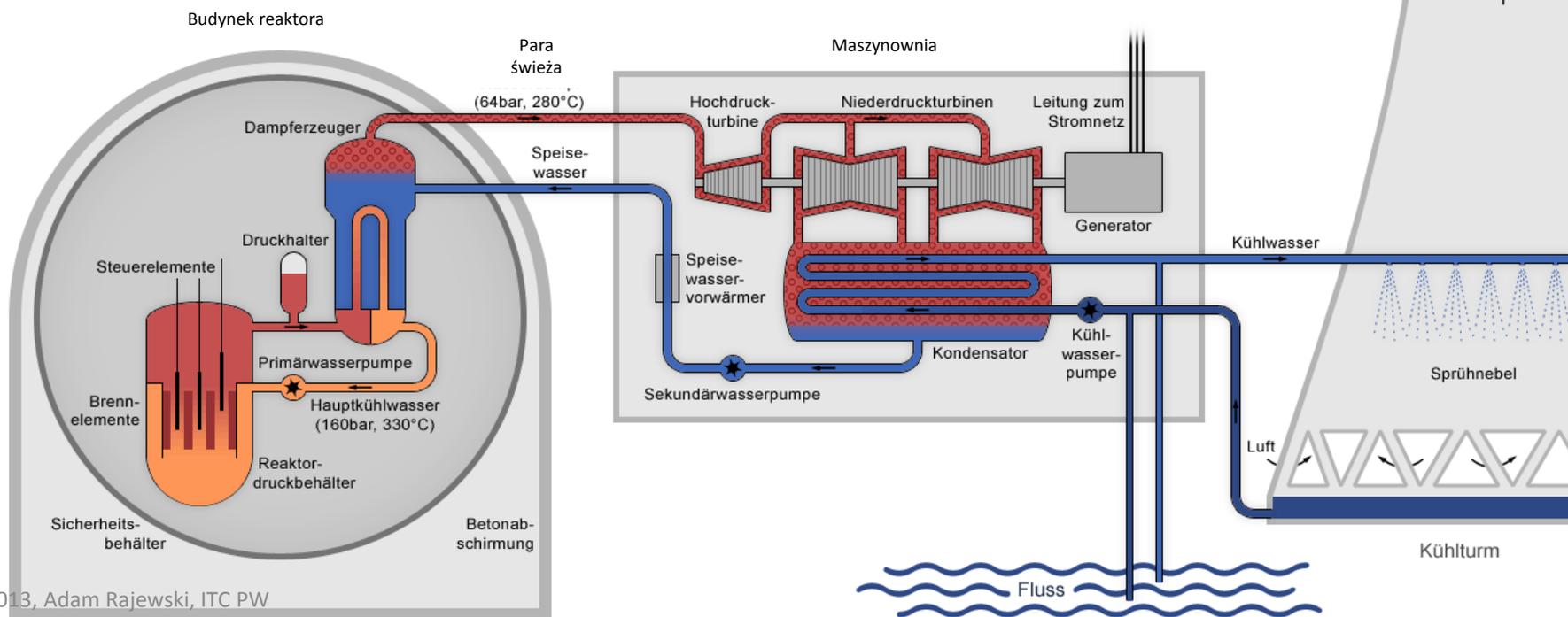
Typical Pressurized Water Reactor



Source: U.S. Nuclear Regulatory Commission

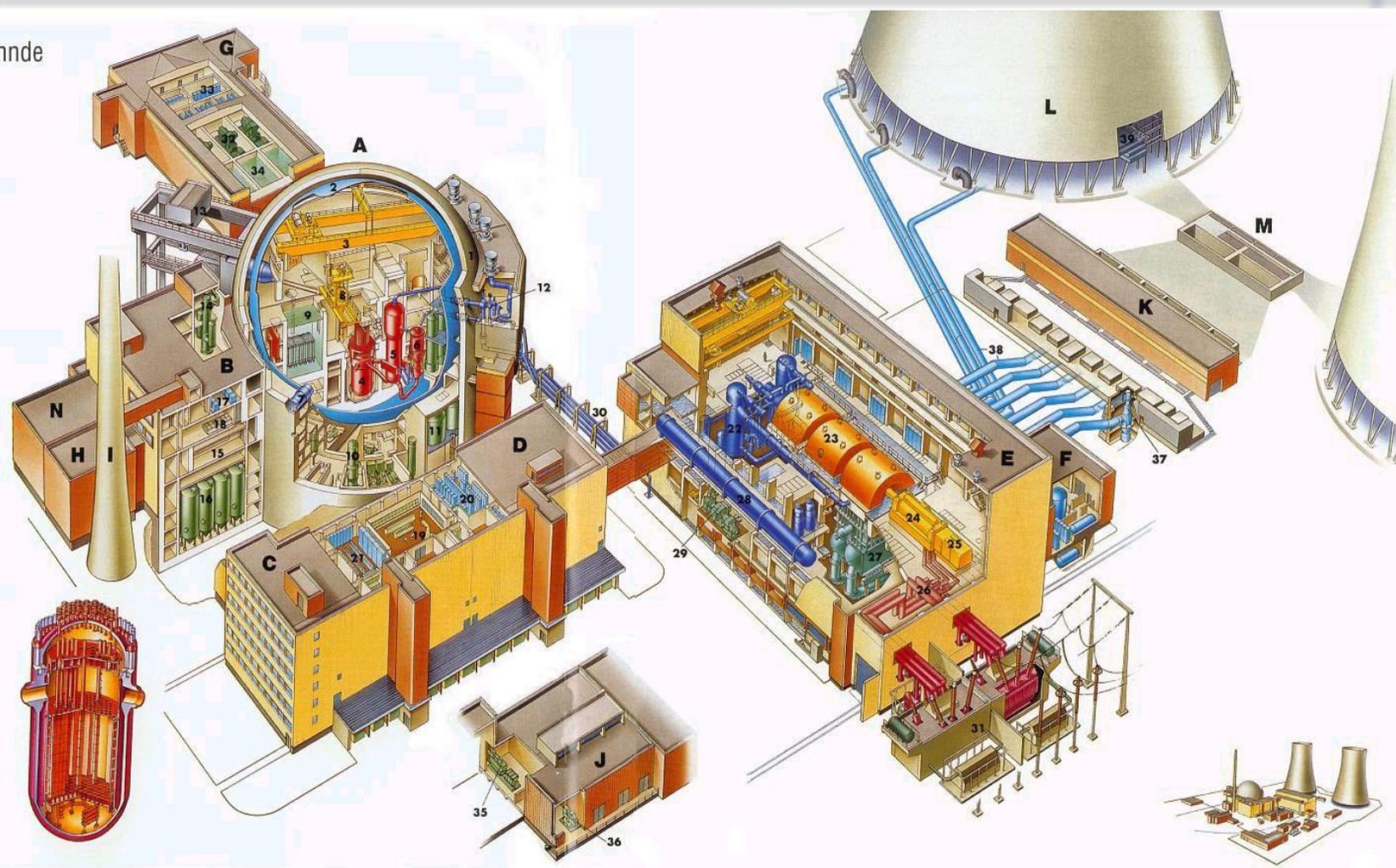
ELEKTROWNIA Z REAKTOREM PWR

Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor

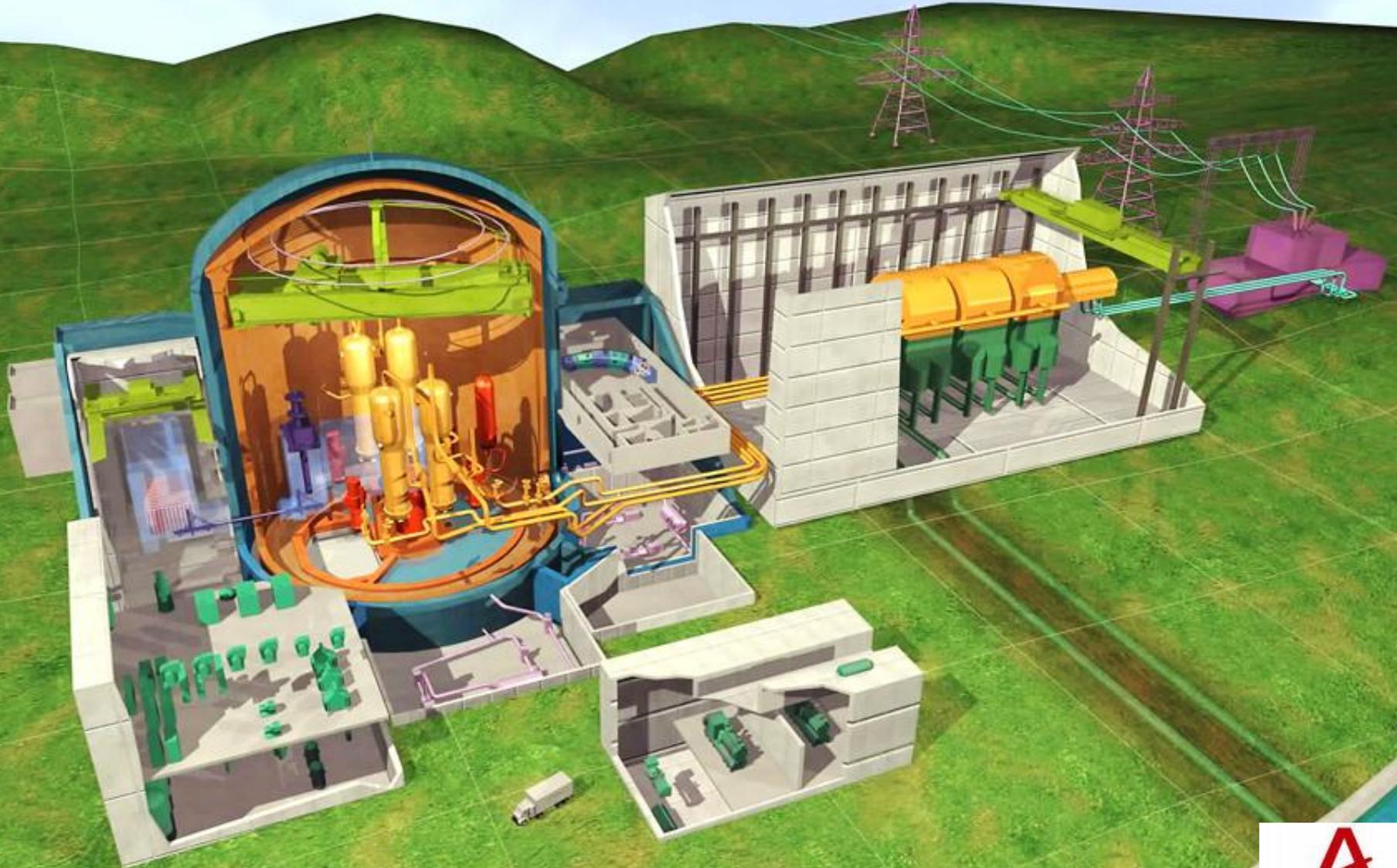


Das Kernkraftwerk Grohnde

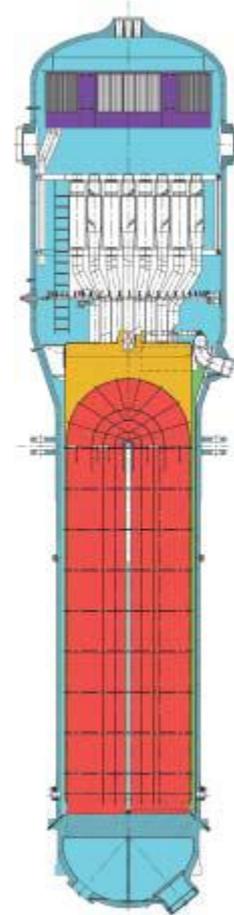
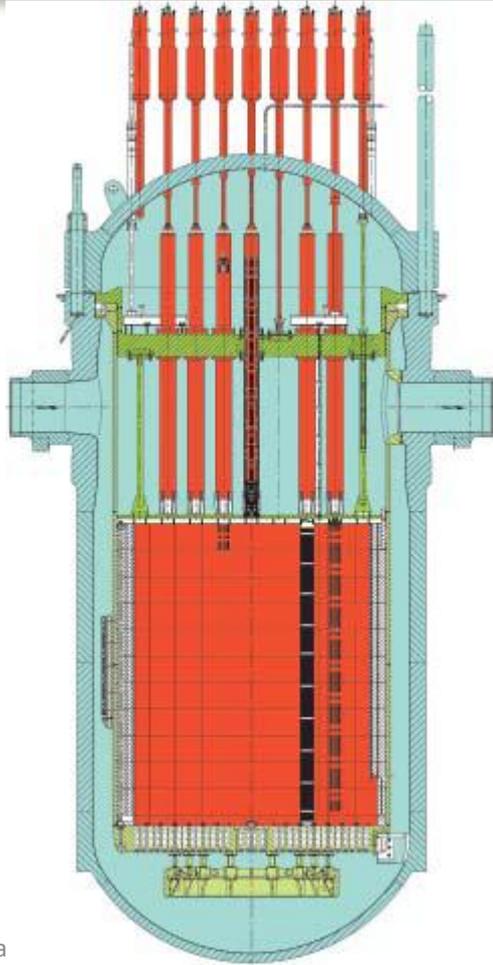
- A Reaktorgebäude**
 - 1 Betonkappe
 - 2 Reaktorsicherheitsbehälter
 - 3 Rundlaufkran
 - 4 Reaktordruckgefäß
 - 5 Dampferzeuger
 - 6 Hauptkühlwasserpumpe
 - 7 Personenschleuse
 - 8 Lademaschine
 - 9 Wasserbecken für gebrauchte Brennelemente
 - 10 Nuklearer Zwischenkühler
 - 11 Flutbehälter
 - 12 Frischdampf-Armatur
 - 13 Halbportalgerüst
- B Hilfsanlagengebäude**
 - 14 Abwasserverdampfer
 - 15 Zuluftanlage
 - 16 Kontrollbehälter für radioaktive Abwässer
 - 17 Wäscherei
 - 18 Duschräume
- C Büro- und Sozialgebäude**
- D Schaltanlagengebäude**
 - 19 Kraftwerkswärte
 - 20 Rechnerraum
 - 21 Warten-Nebenraum
- E Maschinenhaus**
 - 22 Wasserabscheider/Zwischenüberhitzer
 - 23 Turbine
 - 24 Generator
 - 25 Erregermaschine
 - 26 Generatorableitung
 - 27 Kondensator
 - 28 Speisewasserbehälter
 - 29 Speisewasserpumpe
 - 30 Rohrbrücke
 - 31 Maschinentrilo-Anlage
- F Kondensatreinigungsanlage**
- G Notspesegebäude**
 - 32 Notspesediesel
 - 33 Schaltanlage
 - 34 Deonatbecken
- H Bedarfsfilteranlage**
- I Abluftkamin**
- J Notstromdiesel- und Kaltwasserzentrale**
 - 35 Notstromdiesel
 - 36 Kältemaschine
- K Kühlwasserpumpenbauwerk**
 - 37 Hauptkühlwasserpumpe
 - 38 Hauptkühlwasserleitungen
- L Kühlturm**
 - 39 Kühlturmeinbauten
- M Kühlwassermischbauwerk**
- N Abfallbehandlung**



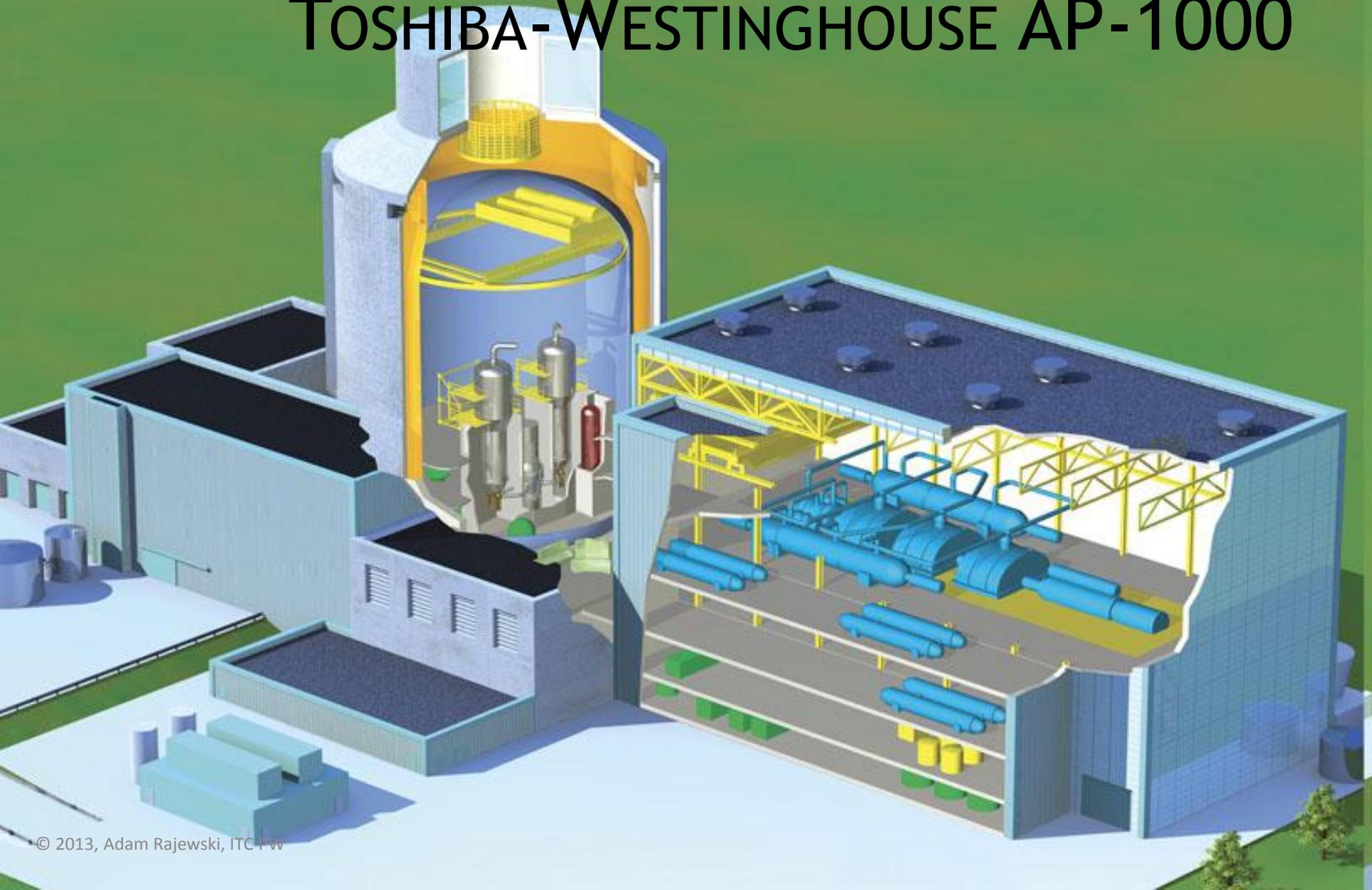
AREVA EPR



AREVA EPR



TOSHIBA-WESTINGHOUSE AP-1000

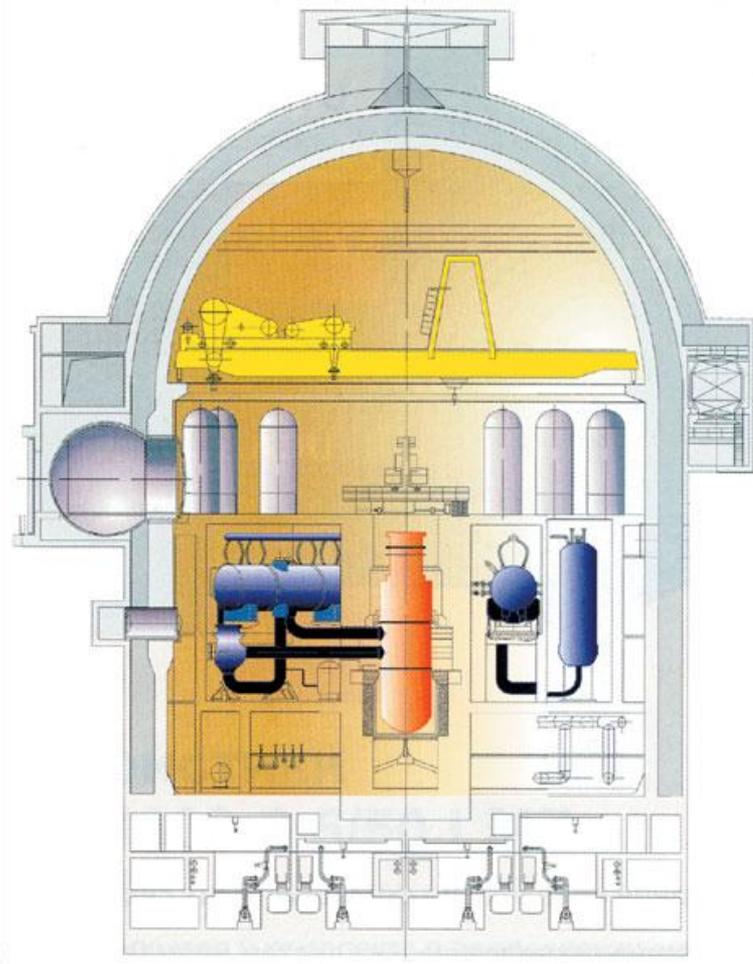
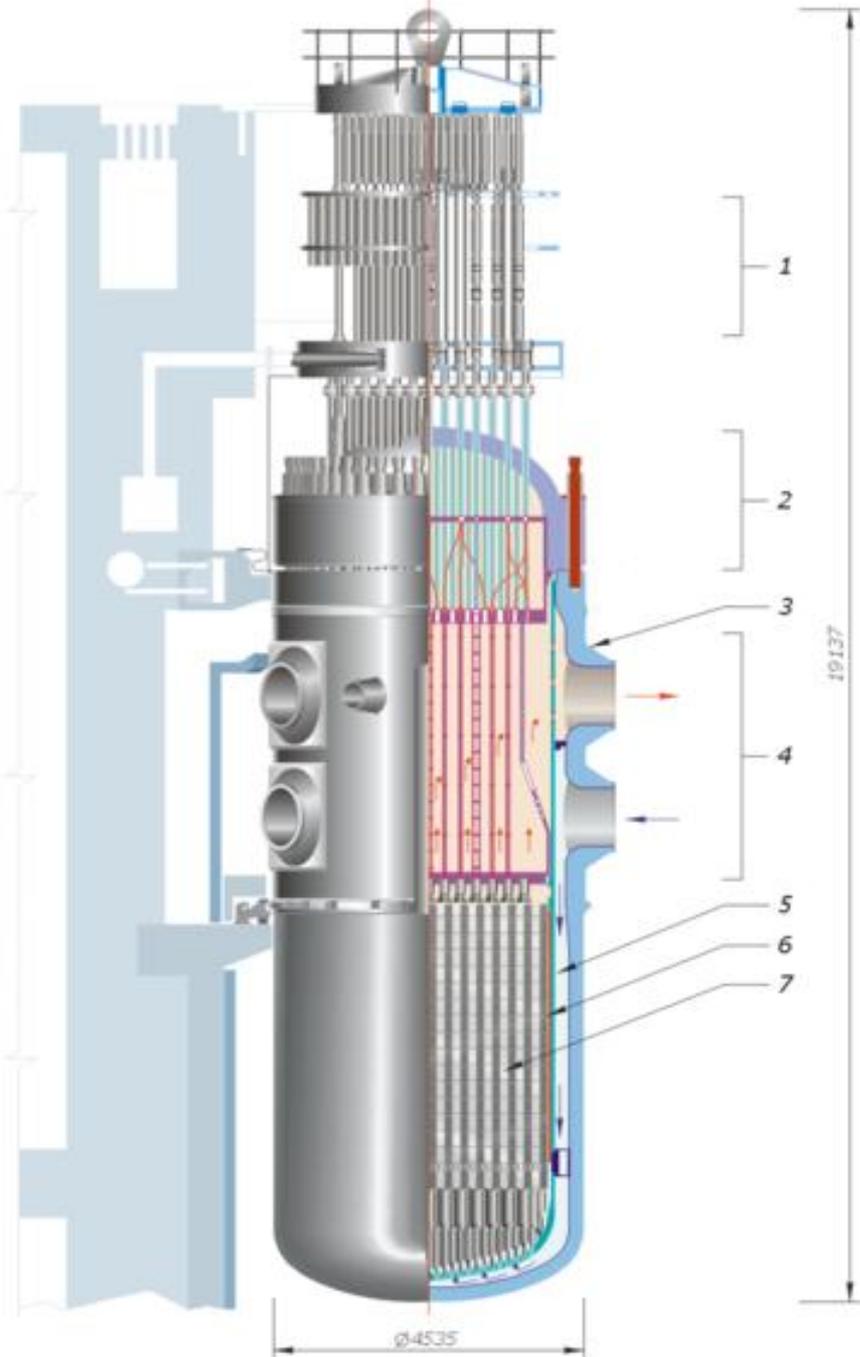




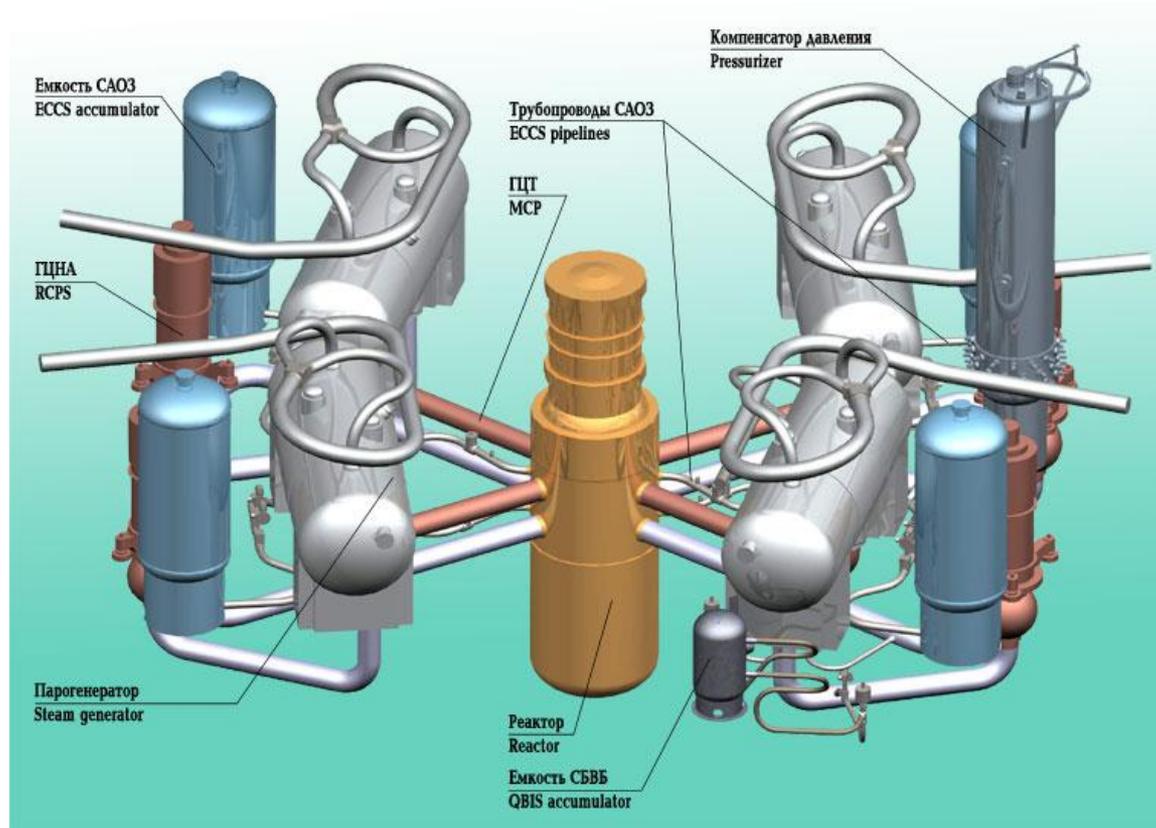
ВОДО-ВОДЯНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РЕАКТОР (WWER)

- Rosyjski odpowiednik reaktora PWR
 - Poziome wytwornice pary (PWR pionowe)
- Producenci: SUN/RUS
- Użytkownicy: RUS, UKR, BGR, HUN, SVK, CZE, DDR, IRN, FIN, IND, CHN
- Modele:
 - WWER-440, 440 MWe
 - WWER-1000, 1000 MWe
 - projektowane WWER-1200, WWER-1500

WWER



WWER-1500

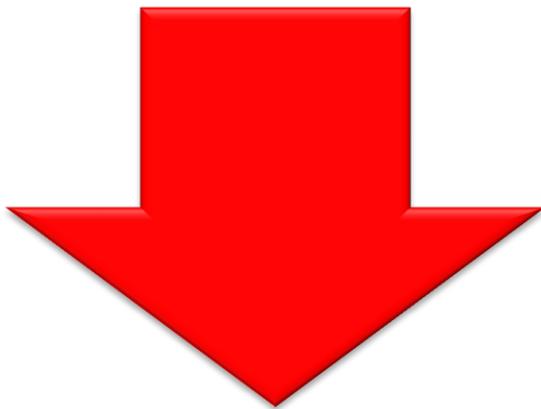




REAKTORY WODNE CIŚNIENIOWE PWR/WWER



Wysoka niezawodność
Rozpowszechnienie technologii
Samoczynne wygaszanie reakcji
przy utracie chłodziwa



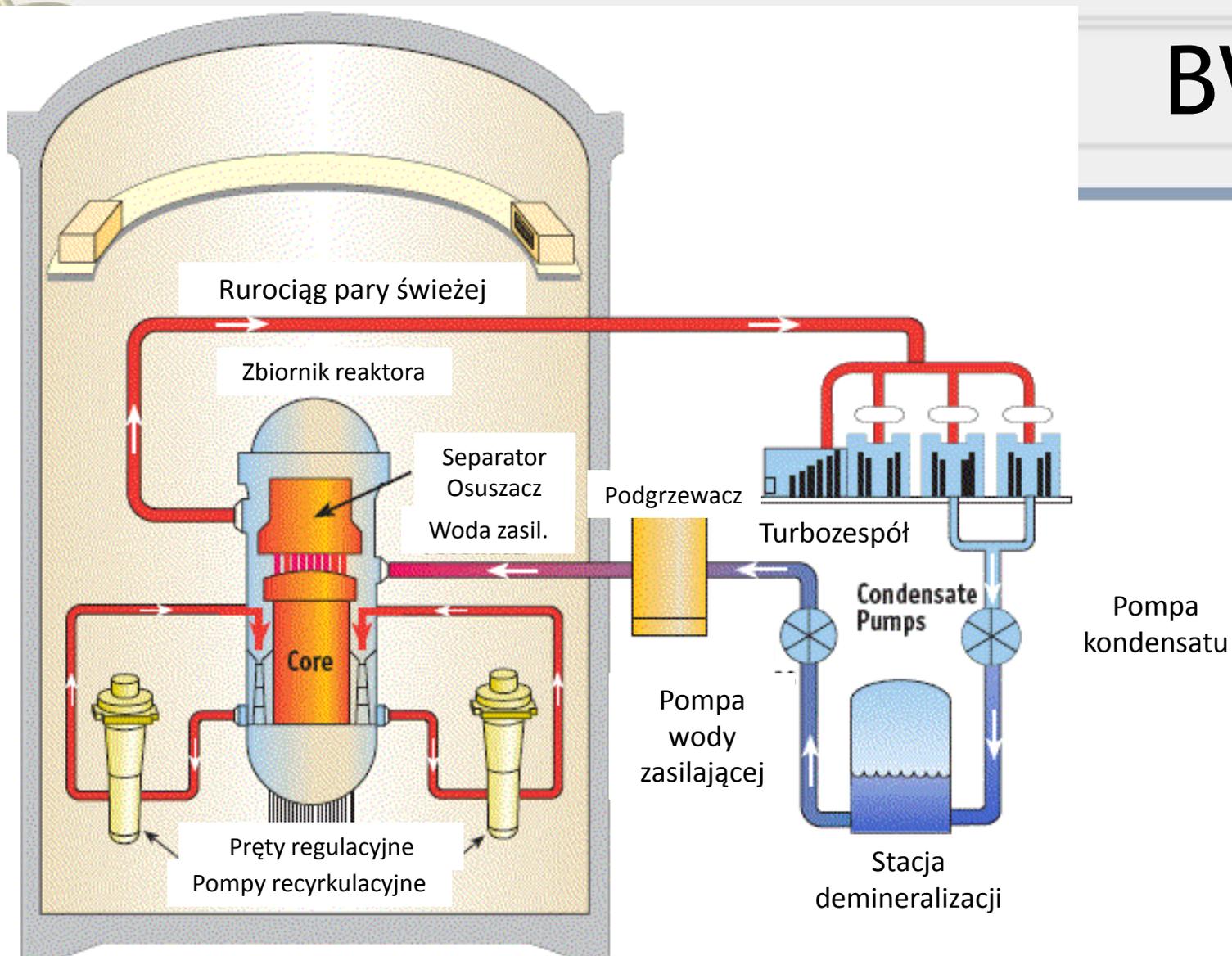
Niska sprawność
Zagrożenie korozją wskutek
stosowania kwasu borowego



REAKTOR WODNY WRZĄCY BOILING WATER REACTOR (BWR)

- Reaktor zbiornikowy (zbiornik stalowy)
- Chłodziwo: H₂O
- Moderator: H₂O (ta sama masa, co chłodziwo)
- Paliwo: uran wzbogacony (4÷5%)
- Układ jednoobiegowy – wrzenie w rdzeniu
 - Produkcja pary nasyconej
- Sprawność: ok. 33%
- Uruchomienie i wyłączenie: pręty regulacyjne
- Regulacja mocy w zakresie powyżej 70%: pompy recyrkulacyjne
- Regulacja reaktywności w czasie kampanii: pręty regulacyjne
- Producenci: USA, DEU, SWE
- Użytkownicy: USA, DEU, SWE, FIN, CHE, JPN, ESP, ITA, MEX
- do 1600 MWe

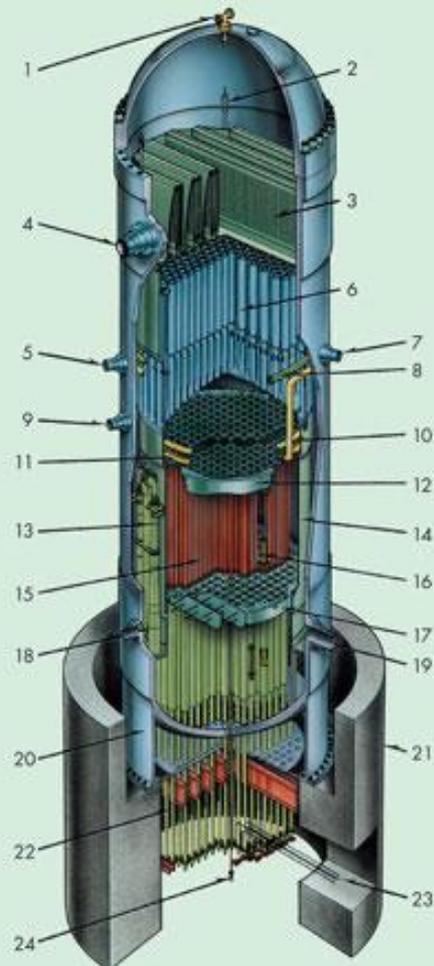
BWR



BWR - GENERAL ELECTRIC

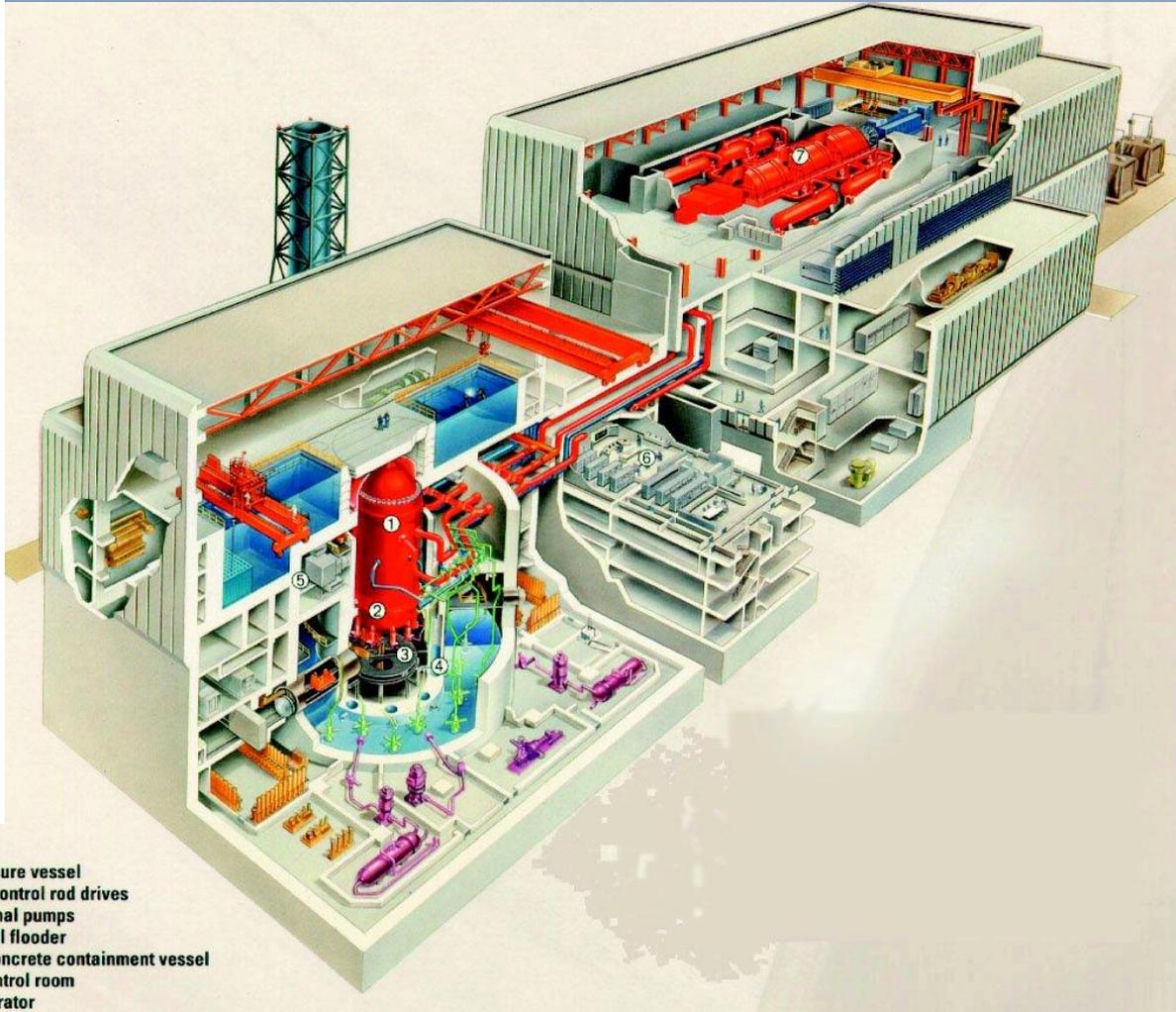
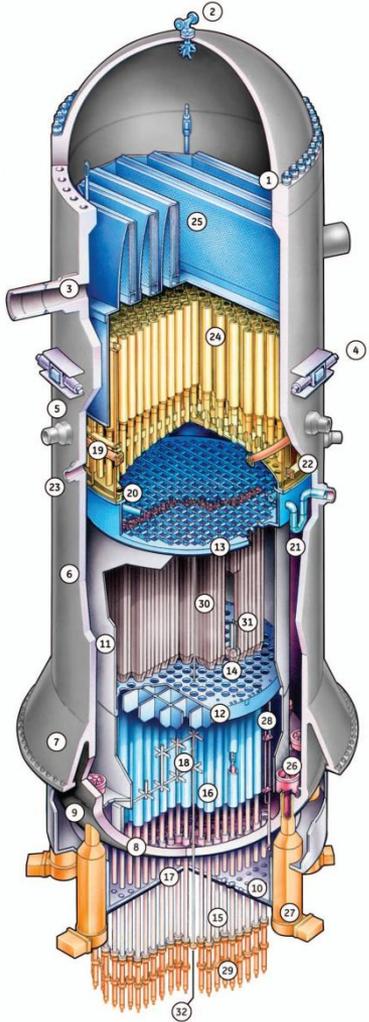
(KERNKRAFTWERK LEIBSTADT, CHF)

Reaktoraufbau



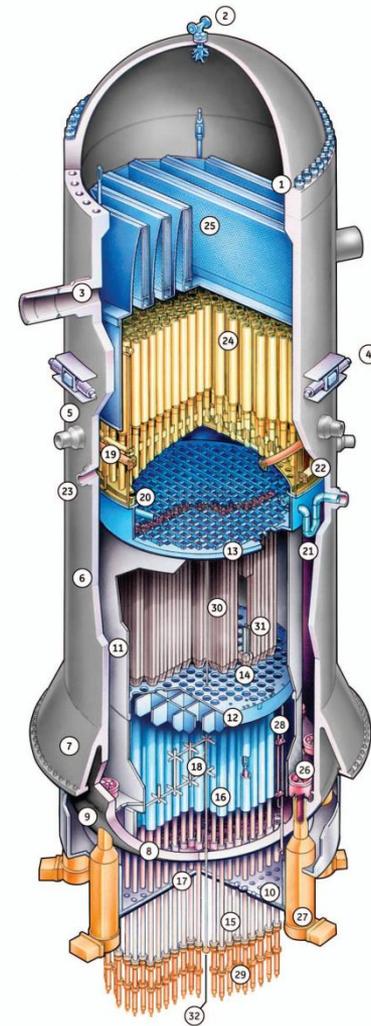
- 1 Entlüftung und Sprühleitung
- 2 Kranhaken für Dampftrockner
- 3 Dampftrockner
- 4 Frischdampfaustritt
- 5 Kernsprüheinheit
- 6 Wasserabscheider
- 7 Speisewassereintritt
- 8 Speisewasserverteilerling
- 9 Niederdruckeinspeisung
- 10 Kernsprühverteilung
- 11 Kernsprühdüsenring
- 12 Oberes Kernführungsgitter
- 13 Wasserstrahlpumpen
- 14 Kernmantel
- 15 Brennelemente
- 16 Steuerstab
- 17 Untere Kernplatte
- 18 Umwälzsystemeinspeisung
- 19 Umwälzsystemansaugung
- 20 Druckgefäßabstützung
- 21 Abschirmwand
- 22 Steuerstabantriebe
- 23 Steuerstabantriebsleitung
- 24 Neutronenflussinstrumentierung

GE-HITACHI ABWR

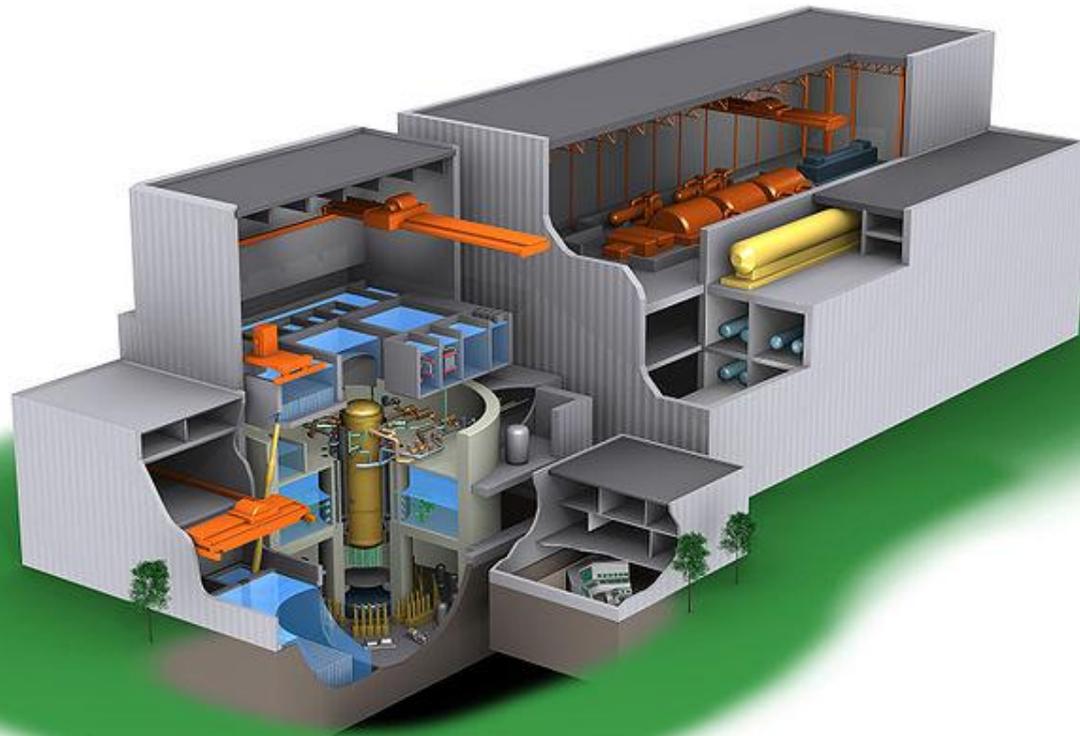


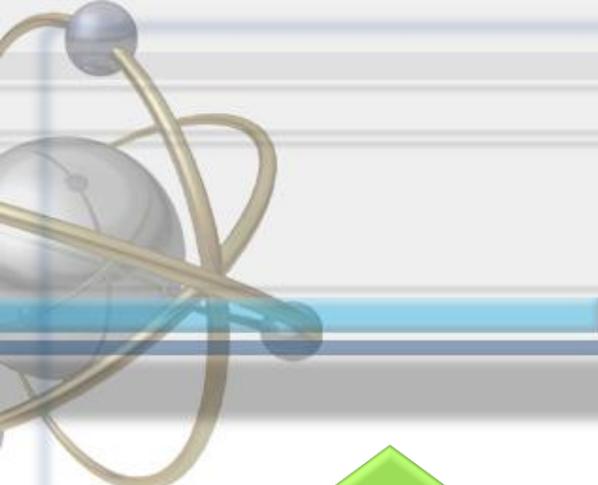
1. Reactor pressure vessel
2. Fine-motion control rod drives
3. Reactor internal pumps
4. Lower drywell flooder
5. Reinforced concrete containment vessel
6. Advanced control room
7. Turbine-generator

GE-HITACHI ABWR



GE-HITACHI ESBWR





REAKTORY WODNE WRZĄCE BWR

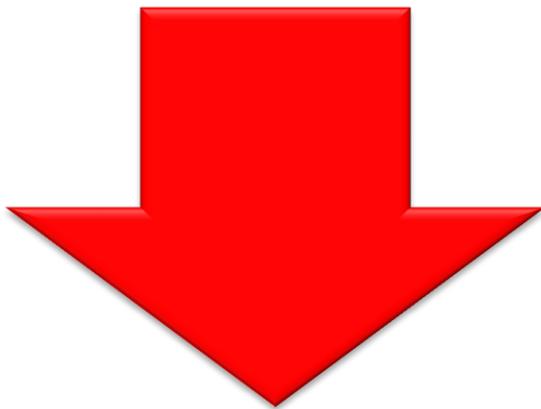


Wysoka niezawodność

Rozpowszechnienie technologii

Samoczynne wygaszanie reakcji przy utracie chłodziwa

Ciśnienie w reaktorze niższe niż dla PWR



Niska sprawność

Radioaktywny czynnik roboczy w turbinie

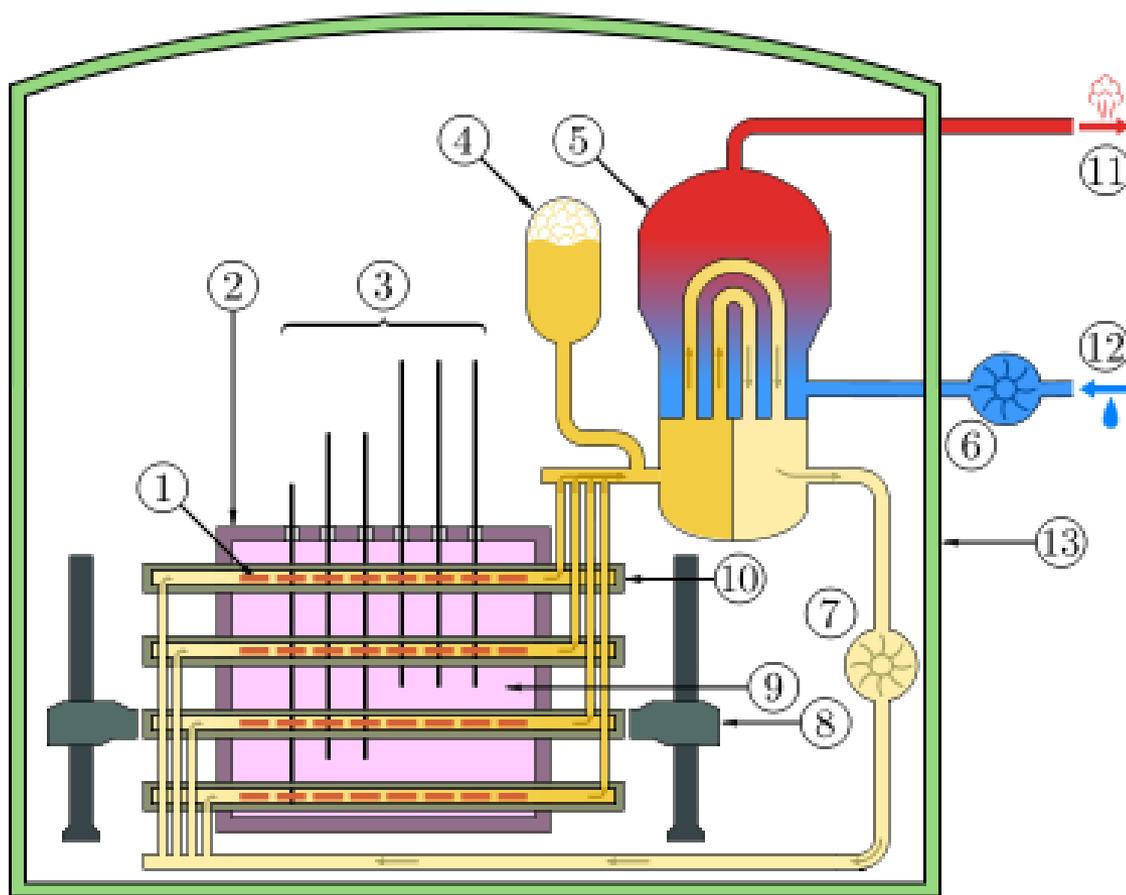
Mniejsza niż dla PWR gęstość mocy w rdzeniu – większy zbiornik



REAKTOR CIŚNIENIOWY CIĘŻKOWODNY CANDU, PHWR, ACL

- Reaktor zbiornikowo-kanałowy (zbiornik stalowy)
- Chłodziwo: D₂O (H₂O w ACL)
- Moderator: D₂O
- Paliwo: uran naturalny lub lekko wzbogacony (0,9÷1,2%)
- Układ dwuobiegowy
 - Obieg pierwotny ciężkowodny, ok. 100 bar (130 bar dla ACL)
 - Obieg wtórny wodno-parowy z turbiną parową, 50 bar, 260°C (70 bar dla ACL)
- Sprawność: ok. 30%
- Producenci: CAN, IND
- Użytkownicy: CAN, IND, ARG, KOR, PAK, ROU, CHN
- do 935 MWe (1200 MWe dla ACL-1200)

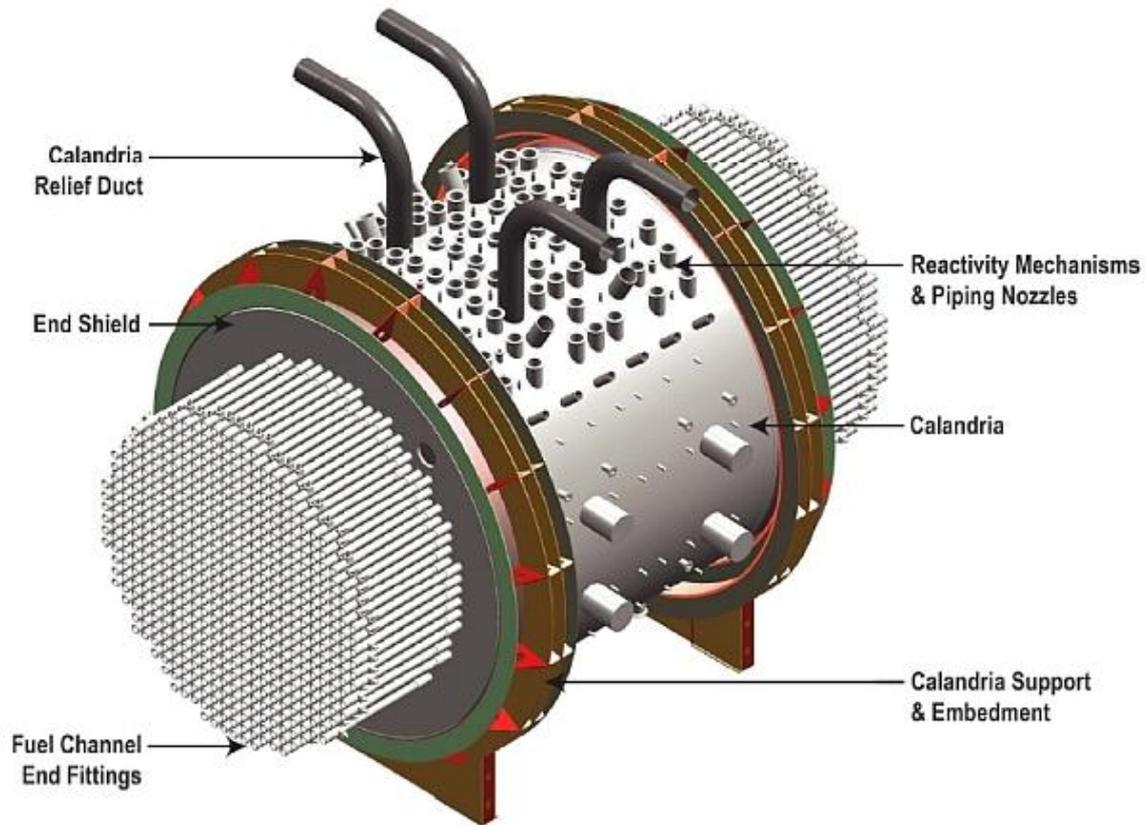
REAKTOR CIŚNIENIOWY CIĘŻKOWODNY CANDU (CANADIAN DEUTERIUM URANIUM)



1. Wiązka elementów paliwowych
2. Kalandria
3. Pręty regulacyjne
4. Stabilizator ciśnienia
5. Wytwornica pary
6. Pompa wody zasilającej
7. Pompa cyrkulacyjna
8. Maszyna załadowcza paliwa
9. Moderator ciężkowodny
10. Kanał ciśnieniowy
11. Rurociąg pary świeżej
12. Rurociąg wody zasilającej



ACR - ADVANCED CANDU REACTOR



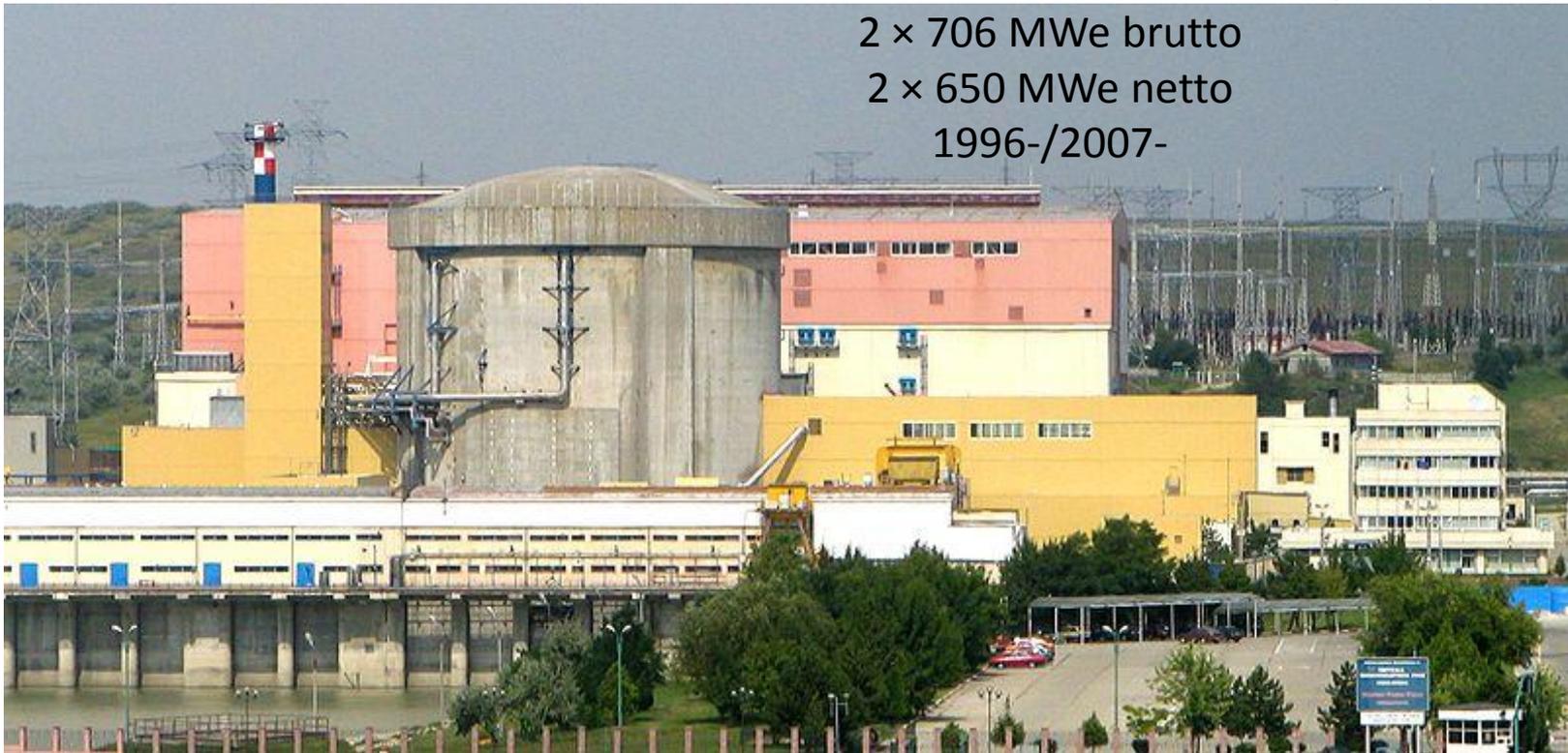
REAKTOR CIŚNIENIOWY CIĘŻKOWODNY CANDU

Centrala Nucleară de la Cernavodă (ROU)

2 × 706 MWe brutto

2 × 650 MWe netto

1996-/2007-

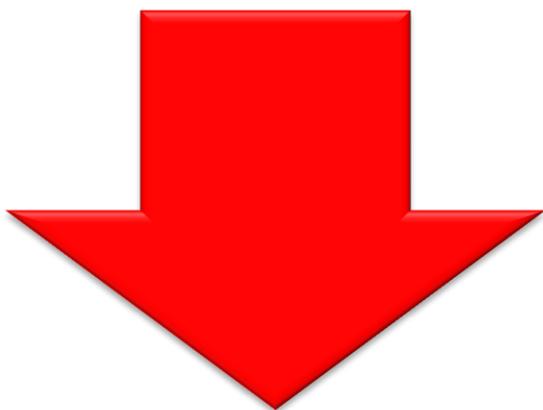




REAKTOR CIŚNIENIOWY CIĘŻKOWODNY



- Niskie ciśnienie w kalandrii
- Możliwość produkcji izotopów promieniotwórczych
- Możliwość przeładunku paliwa w czasie pracy
- Niskie wymagane wzbogacenie paliwa



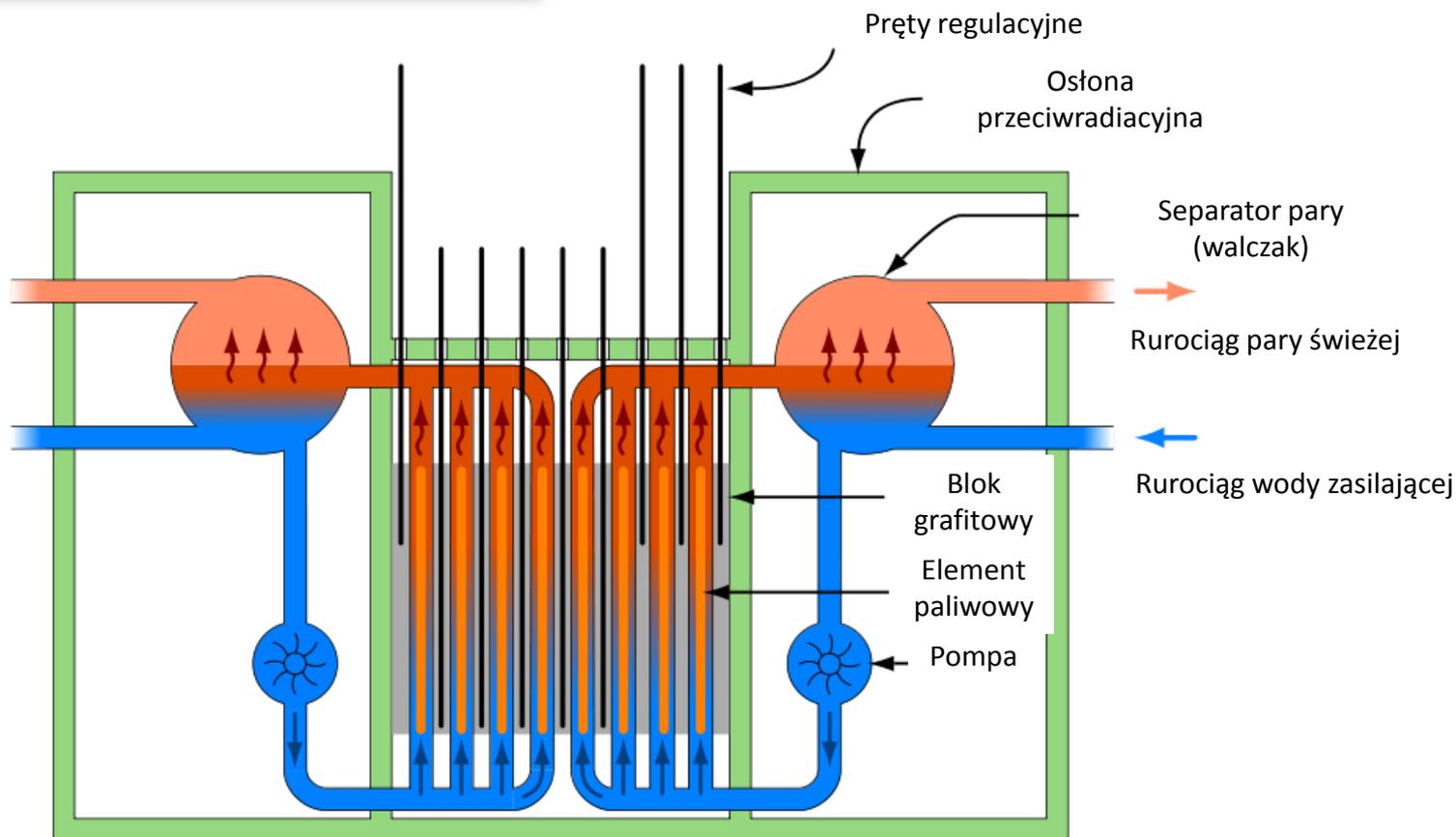
- Niska sprawność
- Duża objętość rdzenia
- Przecieki – duża liczba połączeń
- Konieczność wytwarzania ciężkiej wody



REAKTOR WODNO-GRAFITOWY KANAŁOWY (LWGR) РЕАКТОР БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ КАНАЛЬНЫЙ (РВМК)

- Reaktor kanałowy
- Chłodziwo: H₂O
- Moderator: Grafit
- Paliwo: uran wzbogacony, 2%
- Układ jednoobiegowy (z wyj. pierwszego reaktora w Obnińsku)
 - Parametry pary świeżej: 70 bar, 285°C
- Sprawność: ok. 32%
- Producenci: SUN
- Użytkownicy: SUN, LTU
- Bloki 1000 lub 1500 MWe

REAKTOR WODNO-GRAFITOWY KANAŁOWY РЕАКТОР БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ КАНАЛЬНЫЙ (РВМК)





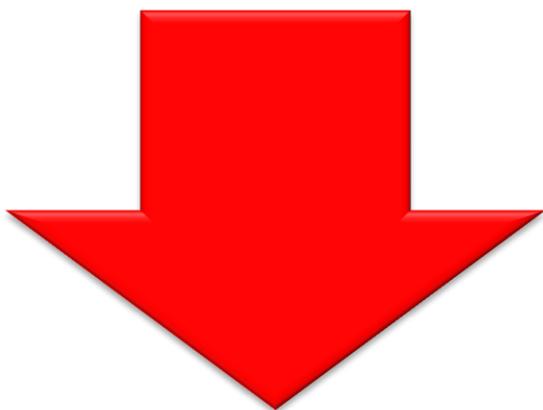
REAKTOR WODNO-GRAFITOWY KANAŁOWY РЕАКТОР БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ КАНАЛЬНЫЙ (РВМК)



Łatwa konstrukcja

Teoretyczna możliwość uzyskania pary przegrzanej (nigdy nie wdrożona)

Możliwość przeładunku paliwa w czasie pracy



Dodatni współczynnik temperaturowy reaktywności!!!

Temperatura pracy grafitu powyżej temperatury jego zapłonu w powietrzu

Niska sprawność

Duża objętość rdzenia

Brak obudowy bezpieczeństwa

(Niedostateczne systemy bezpieczeństwa)

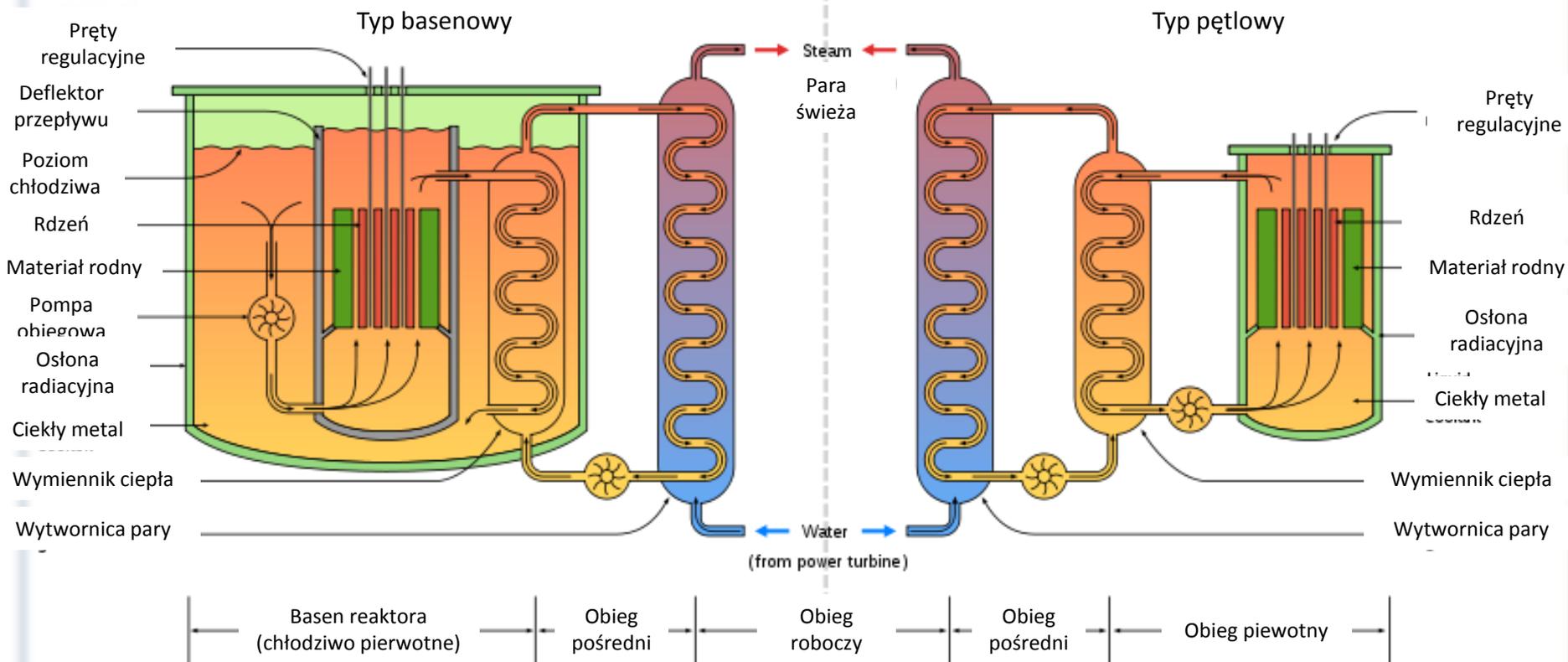


REAKTOR PRĘDKI POWIELAJĄCY FAST BREEDER REACTOR (FBR)

- Reaktor basenowy lub zbiornikowy
- Chłodziwo: ciekły Na (ew. Bi-Pb)
- Moderator: brak
- Paliwo: MOX – PuO₂ + UO₂
- Układ trójbiegowy
 - Obieg pierwotny, ciekły metal, aktywny, 400÷600°C
 - Obieg pośredni, ciekły metal, nieaktywny
 - Obieg wtórny, wodno-parowy, turbina parowa, 550°C, 160 bar
- Bardzo wysoka gęstość mocy w rdzeniu
- Pomnażanie paliwa (konwersja materiału rodniego w rozszczepialny)

REAKTOR PRĘDKI POWIELAJĄCY FAST BREEDER REACTOR (FBR)

Liquid Metal cooled Fast Breeder Reactors (LMFBR)



REAKTOR PRĘDKI POWIELAJĄCY FAST BREEDER REACTOR (FBR)

Biełojarsk-3 – BN-600
600 MWe brutto
560 MWe netto
1980-



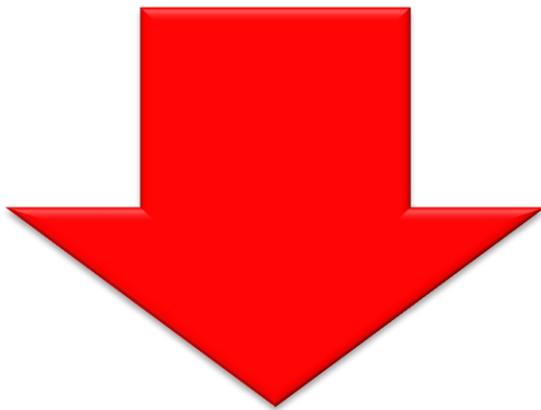


REAKTOR PRĘDKI POWIELAJĄCY FAST BREEDER REACTOR (FBR)

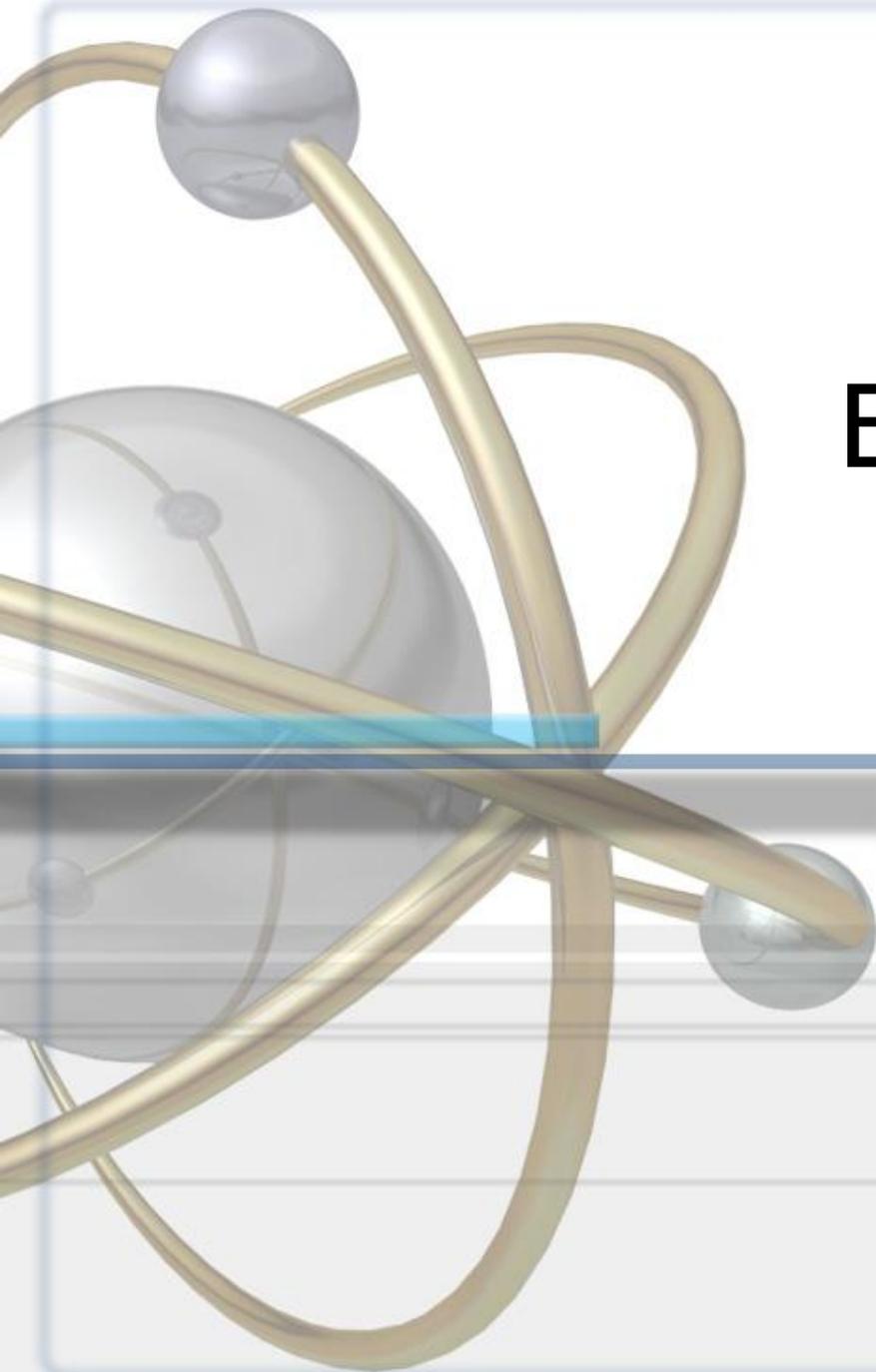


Możliwość powielania paliwa

Wysokie parametry pary –
wysoka sprawność

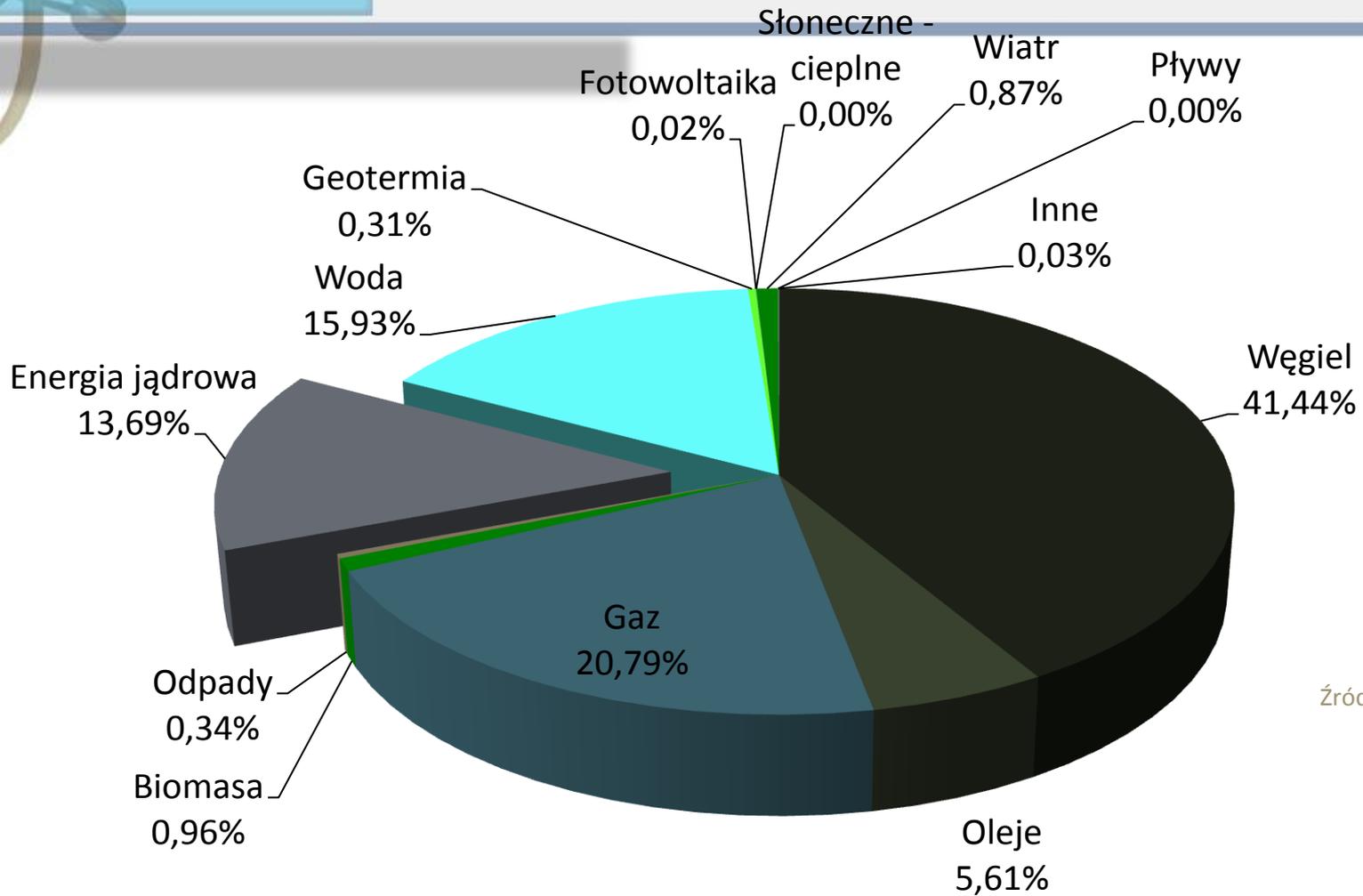


Problemy technologiczne
wynikające z zastosowanego
chłodziwa



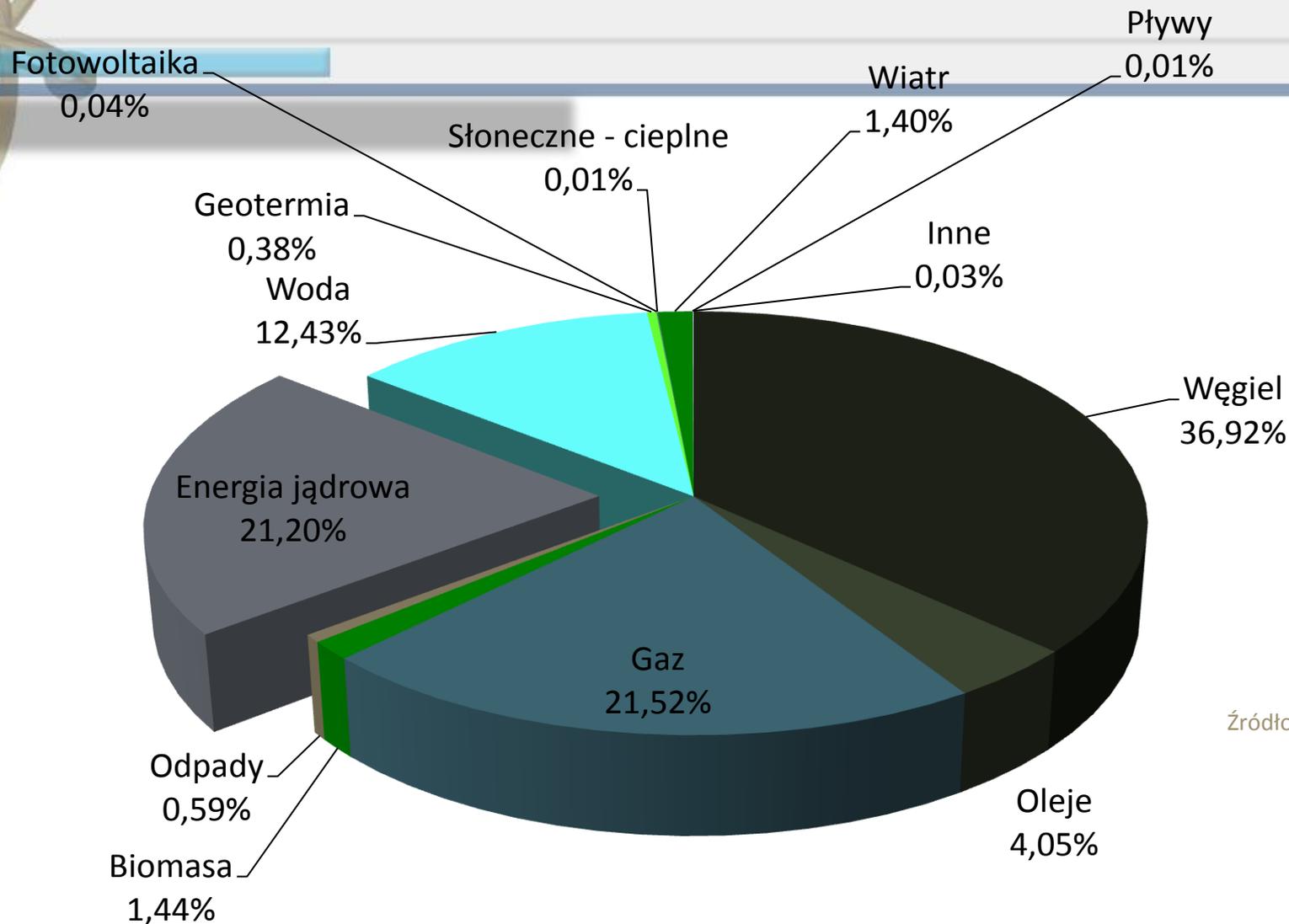
ENERGETYKA JĄDROWA DZIŚ I JUTRO

Produkcja energii elektrycznej na świecie (2007)



Źródło: IEA, 2010

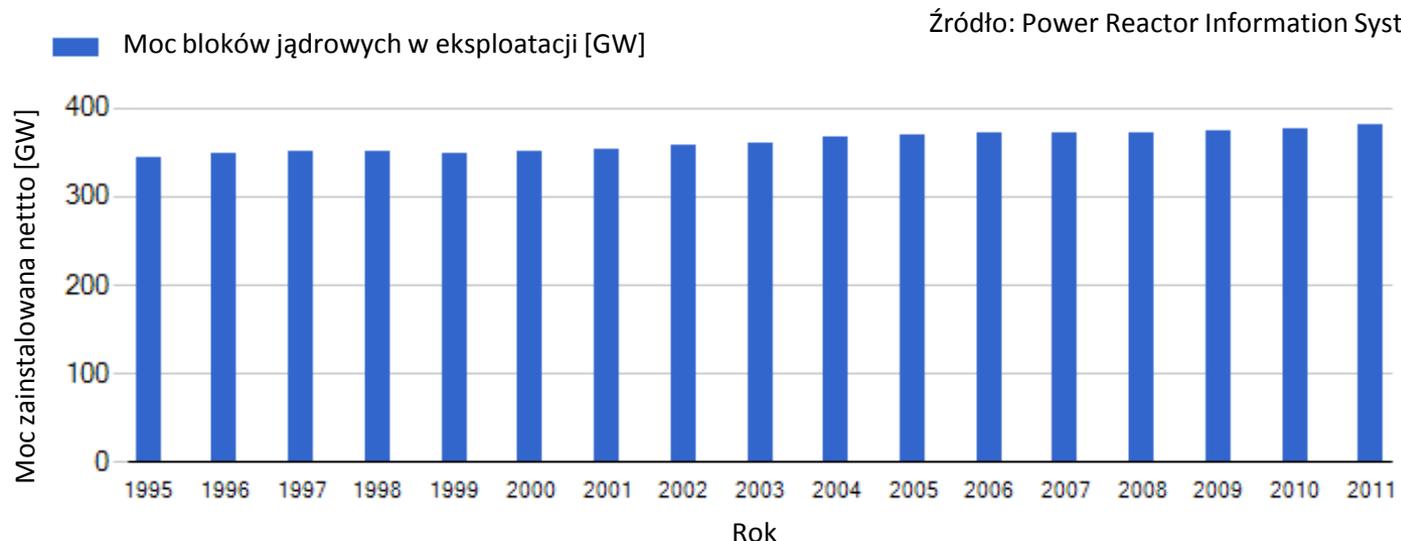
Produkcja energii elektrycznej w krajach OECD (2007)



Źródło: IEA, 2010

ENERGETYKA JĄDROWA DZIŚ (I 2013)

- 390 pracujących bloków w 31 krajach
- łączna moc zainstalowana 331 GW_e (netto)
- 48 bloków długoterminowo wyłączonych (Japonia, 41 GWe)
- 68 bloków w budowie



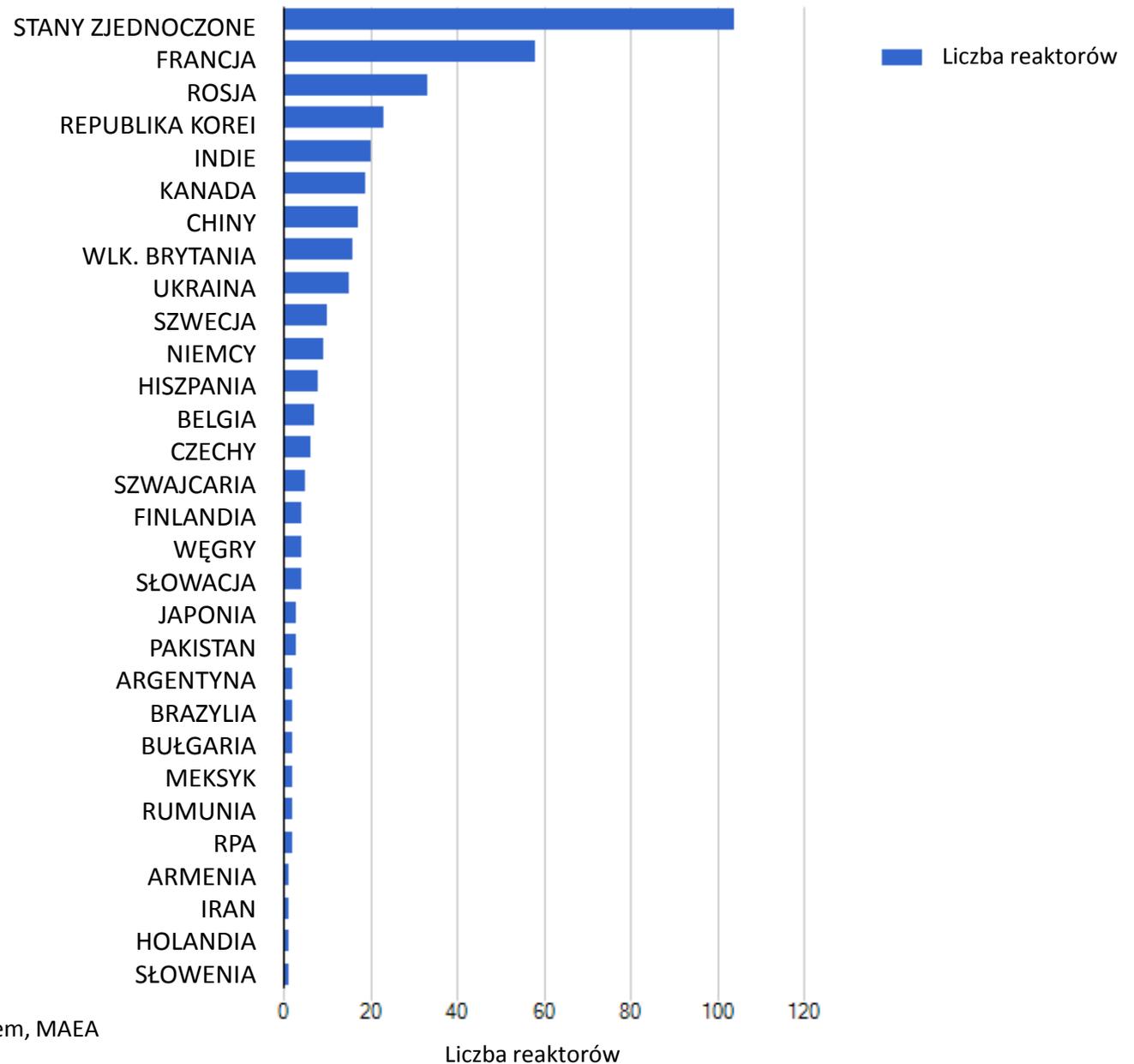
ENERGETYKA JĄDROWA DZIŚ (I 2013)



Źródło: Power Reactor Information System, MAEA

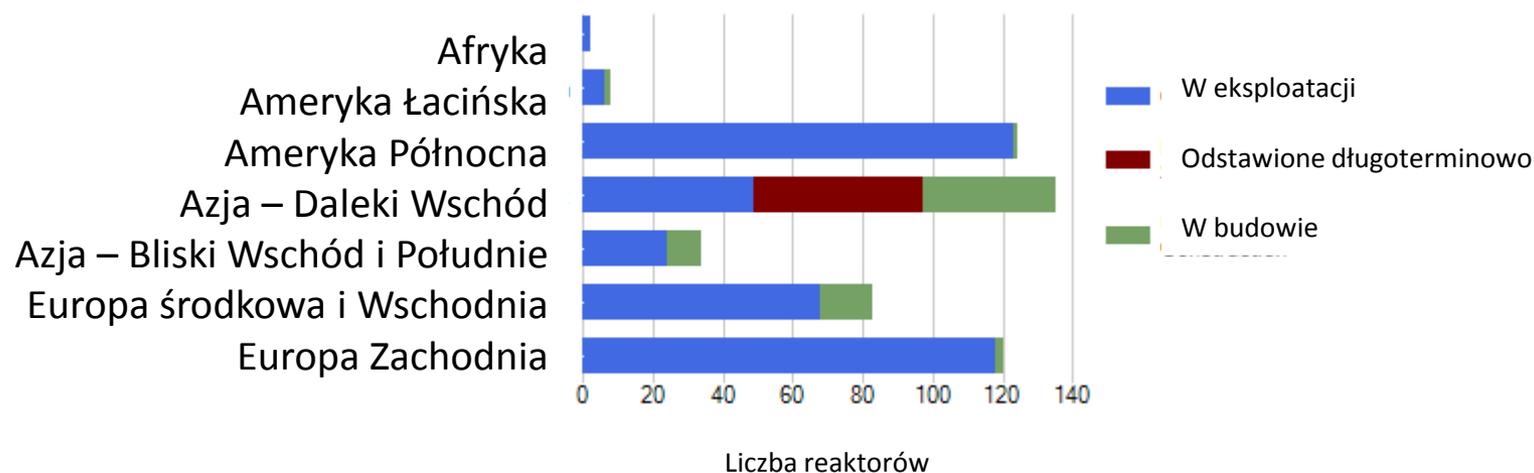


Łączna liczba reaktorów: 390



Źródło: Power Reactor Information System, MAEA

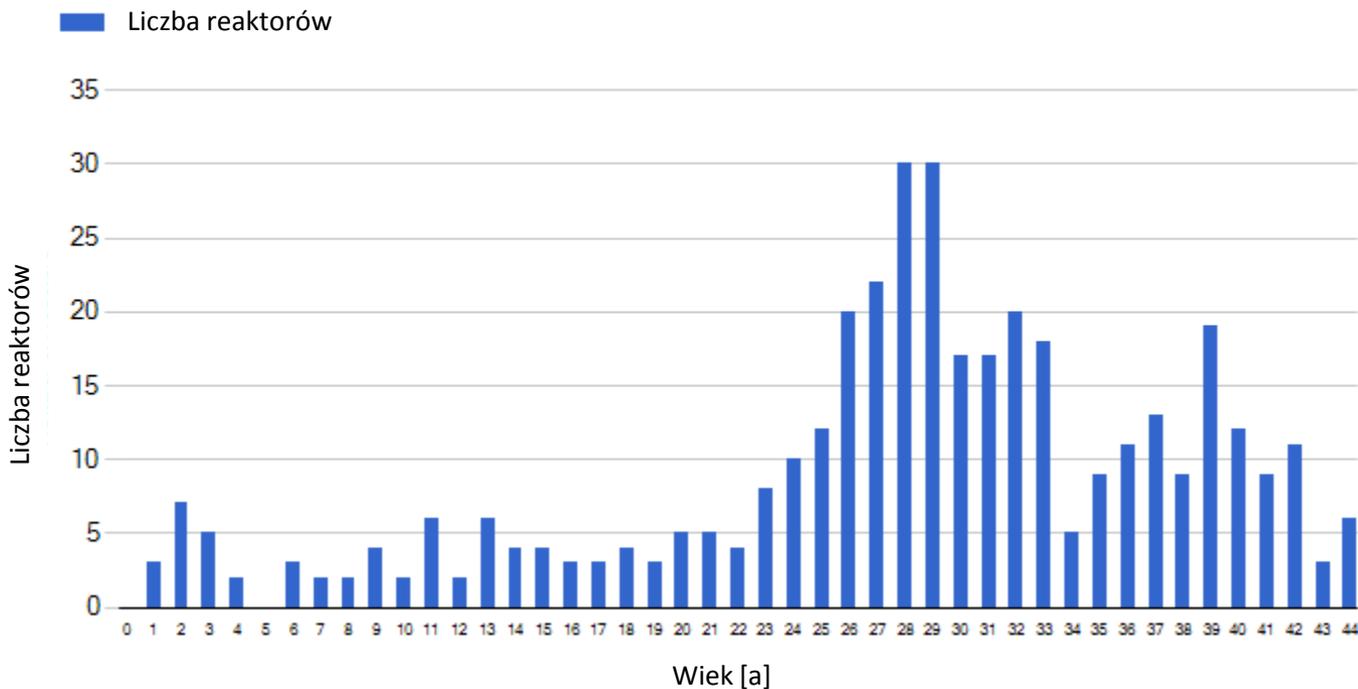
ENERGETYKA JĄDROWA NA ŚWIECIE



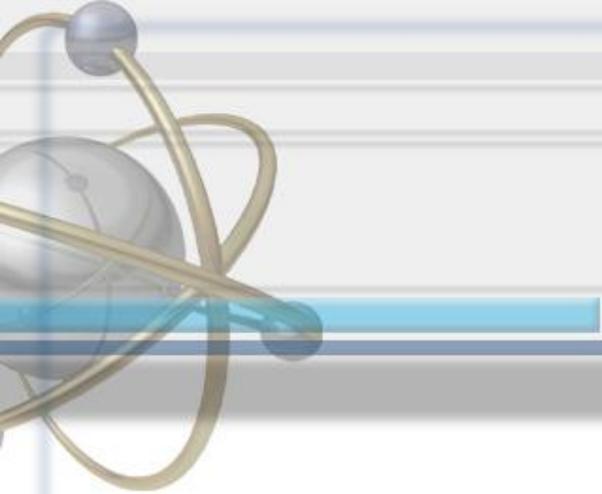
Źródło: Power Reactor Information System, MAEA

WIEK REAKTORÓW ENERGETYCZNYCH

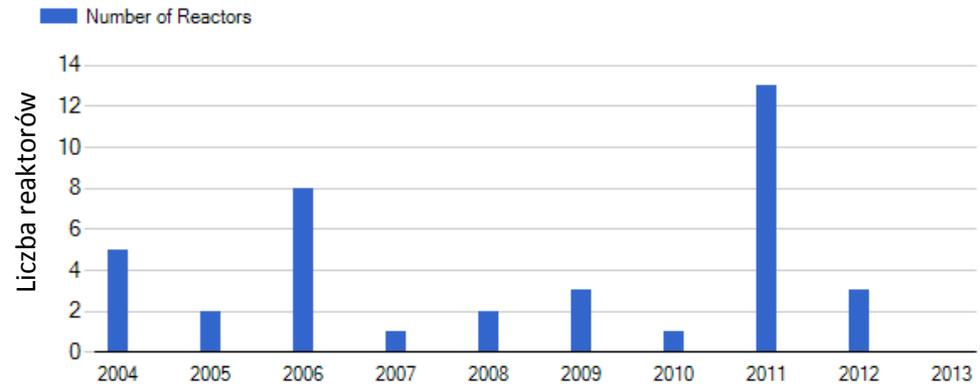
Łączna liczba reaktorów: 390



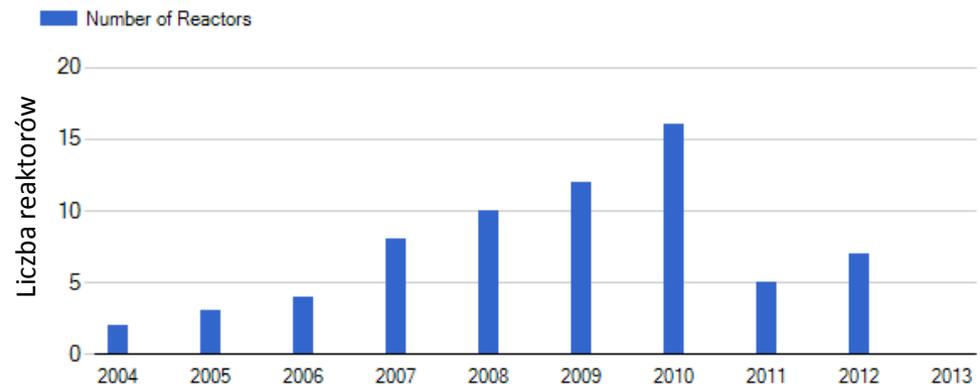
Źródło: Power Reactor Information System, MAEA



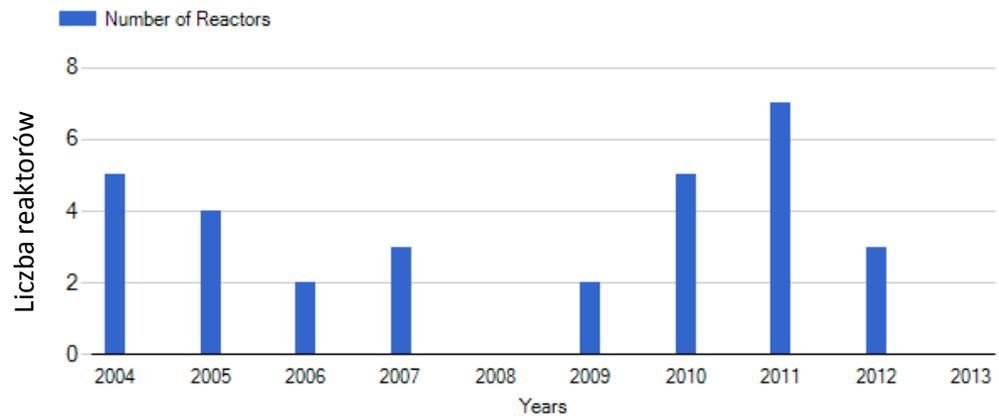
Odstawienia ostateczne



Nowe budowy



Nowe przyłączenia



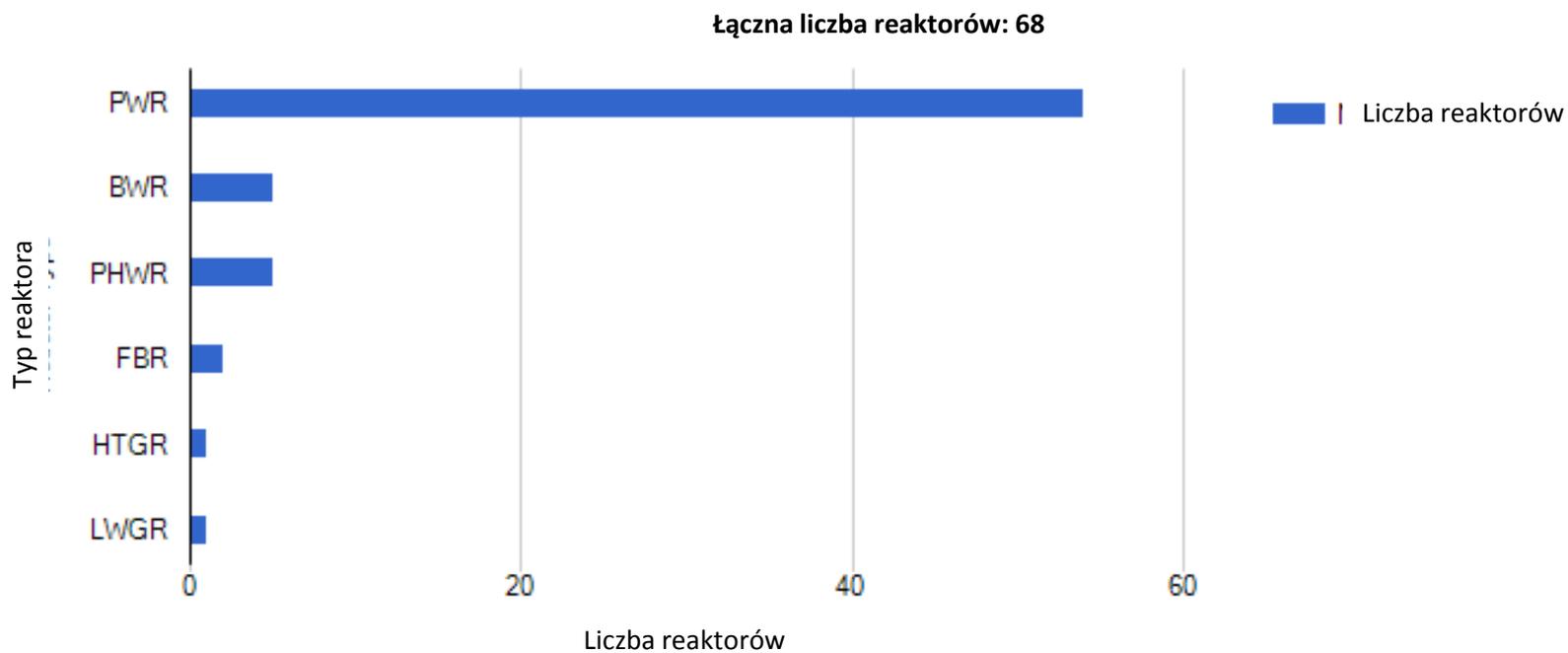
Źródło: Power Reactor Information System, IAEA

BLOKI W BUDOWIE



Źródło: Power Reactor Information System, MAEA

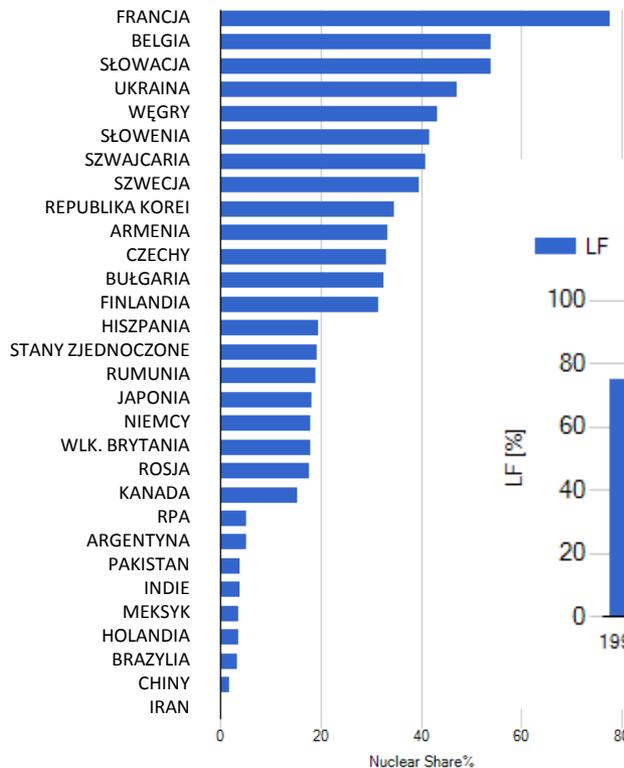
BLOKI W BUDOWIE



Źródło: Power Reactor Information System, MAEA

ROLA EJ (2011)

Udział EJ w krajowej produkcji energii elektrycznej



Źródło: Power Reactor Information System, MAEA

PWR

AREVA
(EPR,
Atmea)

ROSATOM
(WWER-1200,
MIR-1200)

Toshiba-
Westinghouse
(AP-1000)

KEPCO
(OPR-1000,
APR-1400)

CGNPC
(CPR-1000)

Mitsubishi
(APWR,
Atmea)

BWR

GE-Hitachi
(ABWR,
ABWR II, ESBWR)

Toshiba
(ABWR)

Areva
(Kerena)

Atomenergo-
proekt
(VK-300)

PHWR

AECL
(CANDU-6,
ACR)

NPCIL
(AHWR)

FBR

OKBM
Afrikantowa
(BN-800, BN-1200
BREST)

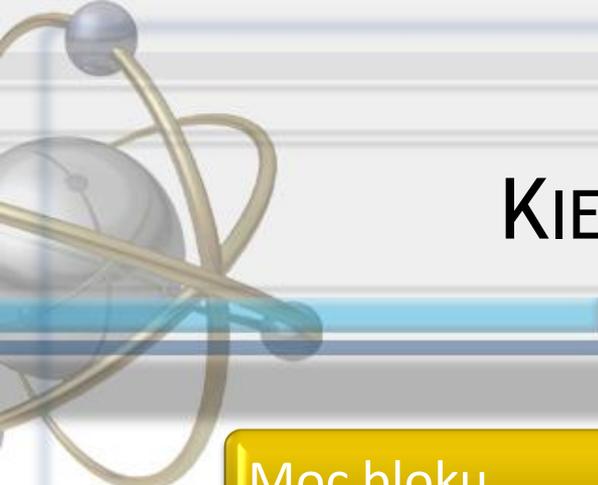
Bhavini

Chiny
(CEFR)

HTR

Tsinghua Univ.
(HTR-PM)

Oferowane, prototypowe i planowane konstrukcje



KIERUNKI ROZWOJU SIŁOWNI JĄDROWYCH

Moc bloku

- Wzrost mocy jednostek dużych (APR-1400, EPR, WWER-1500, ESBWR...)
- Projekty małych reaktorów modułowych (HTGR, KŁT-40, WK-300, NuScale...)

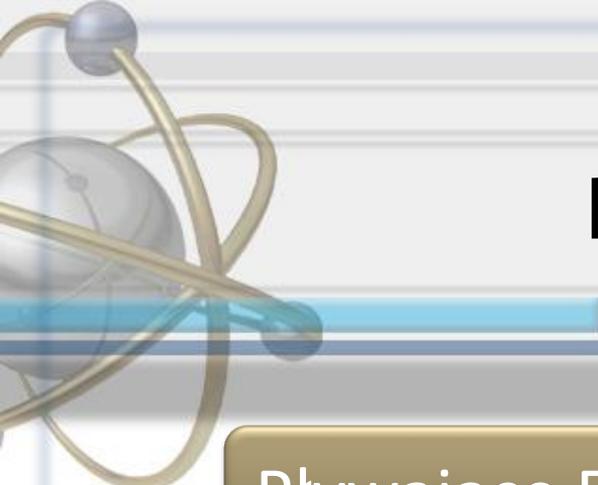
Zwiększanie bezpieczeństwa

- Generacja III+
- Wprowadzanie systemów pasywnych (szczególnie AP1000, ESBWR)

Zwiększanie sprawności konwersji energii

- Nowe rozwiązania tradycyjnych bloków PWR, BWR
- Nowe typy reaktorów (HTGR)
- Kogeneracja?

Zwiększenie stopnia wypalenia paliwa



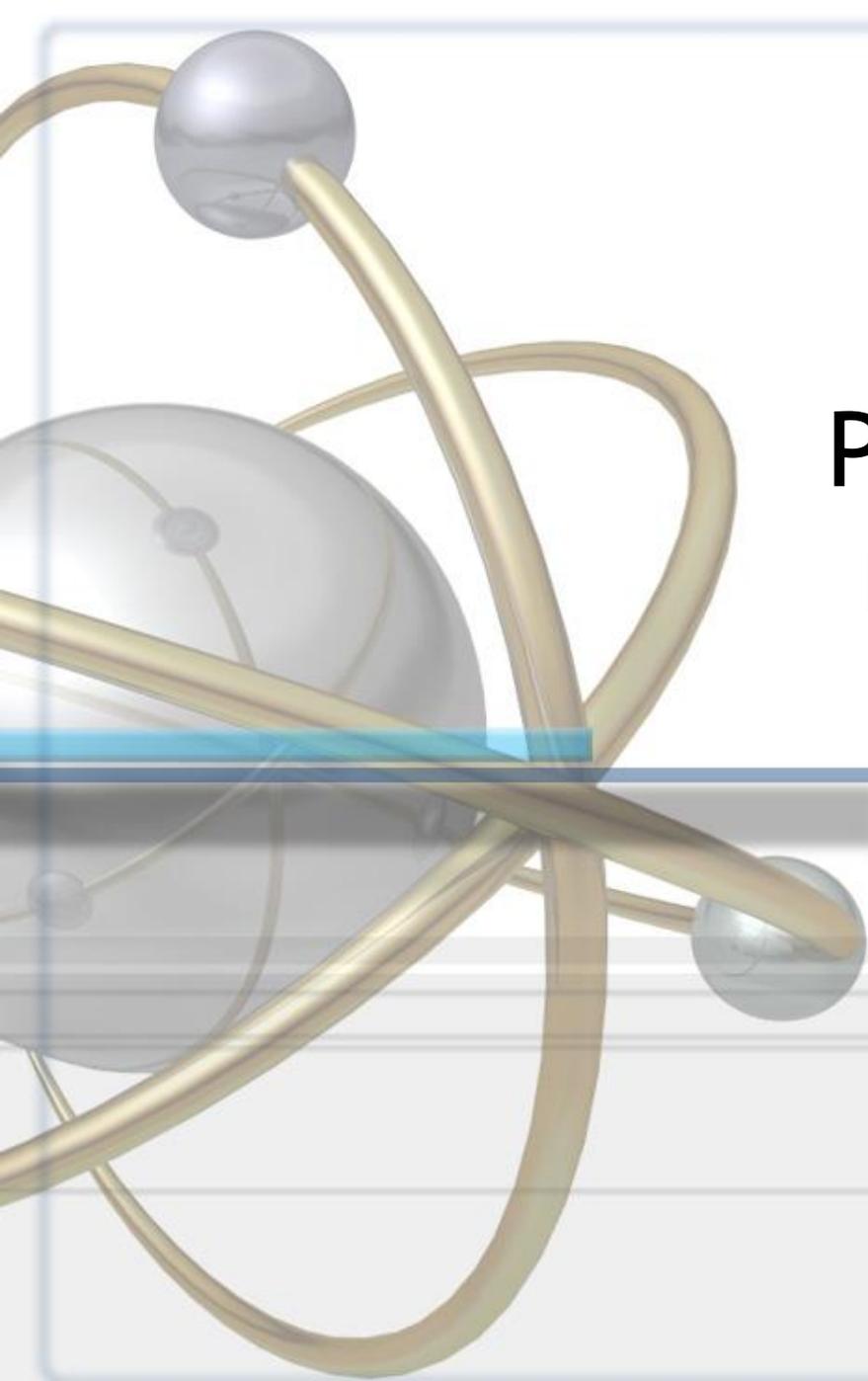
ROZPROSZONA ENERGETYKA JĄDROWA?

Pływające EJ (Rosja)

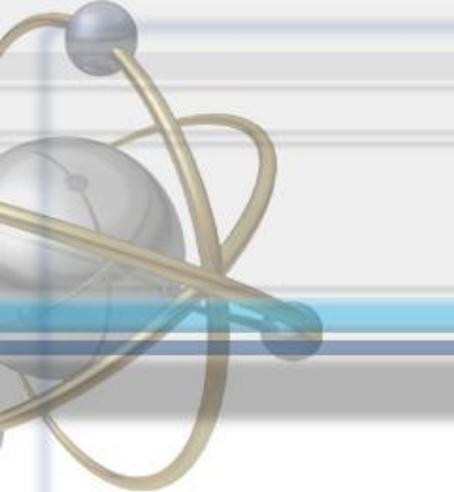
- Reaktory KŁT-40 (przejęte z lodołamaczy)
- Zasilanie trudno dostępnych rejonów
- Kogeneracja

Reaktory modułowe (SMR)

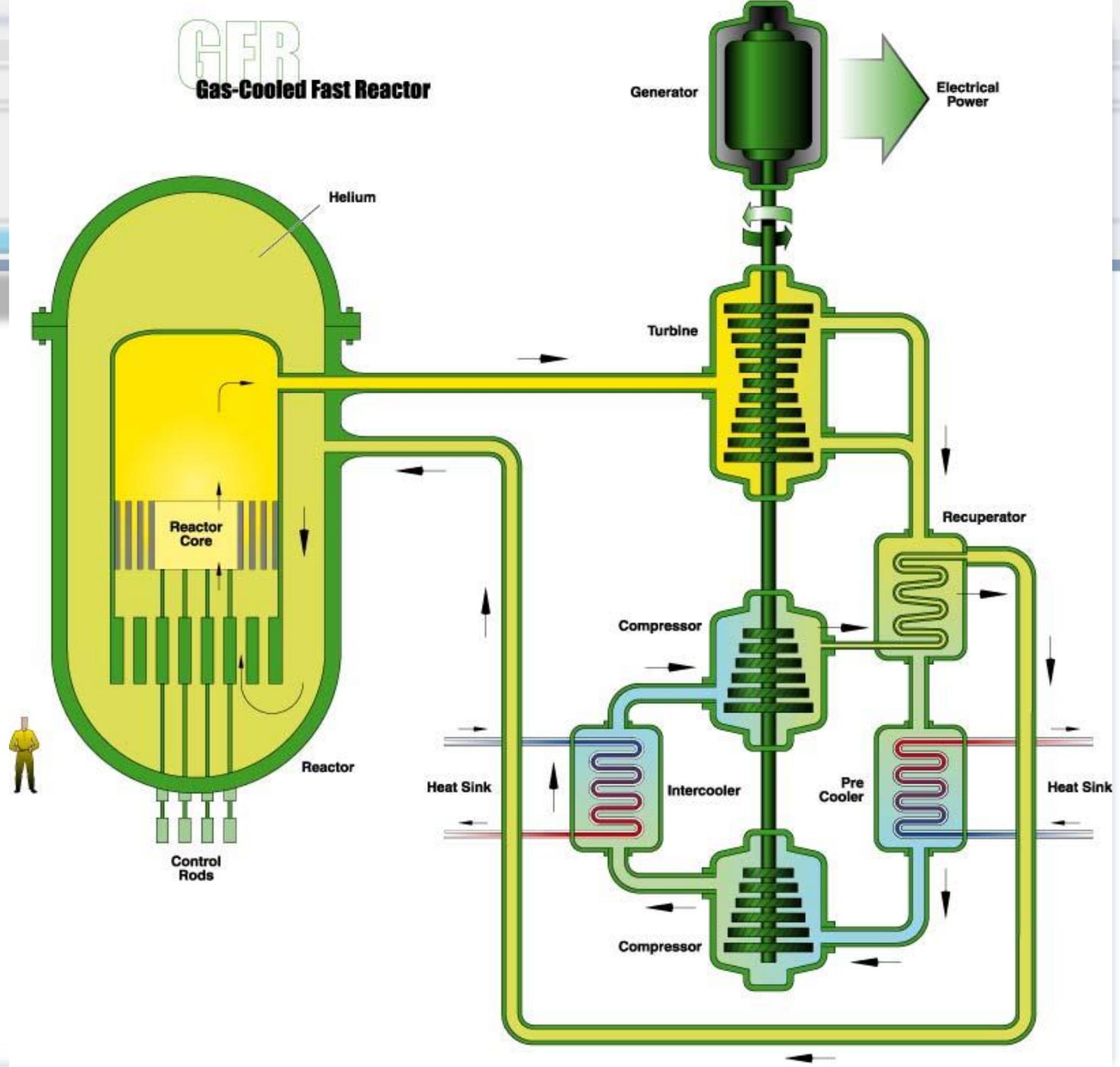
- NuScale (USA), LWR, 45 MW_e
- IRIS (USA), PWR, 50 MW_e
- PBMR (RPA), HTGR, 160 MWe (rozwój zawieszony)
- HTR-PM (ChRL), HTGR, 200 MWe (2 reaktory + 1 turbina)



PROJEKTY NA PRZYSZŁOŚĆ REAKTORY IV GENERACJI

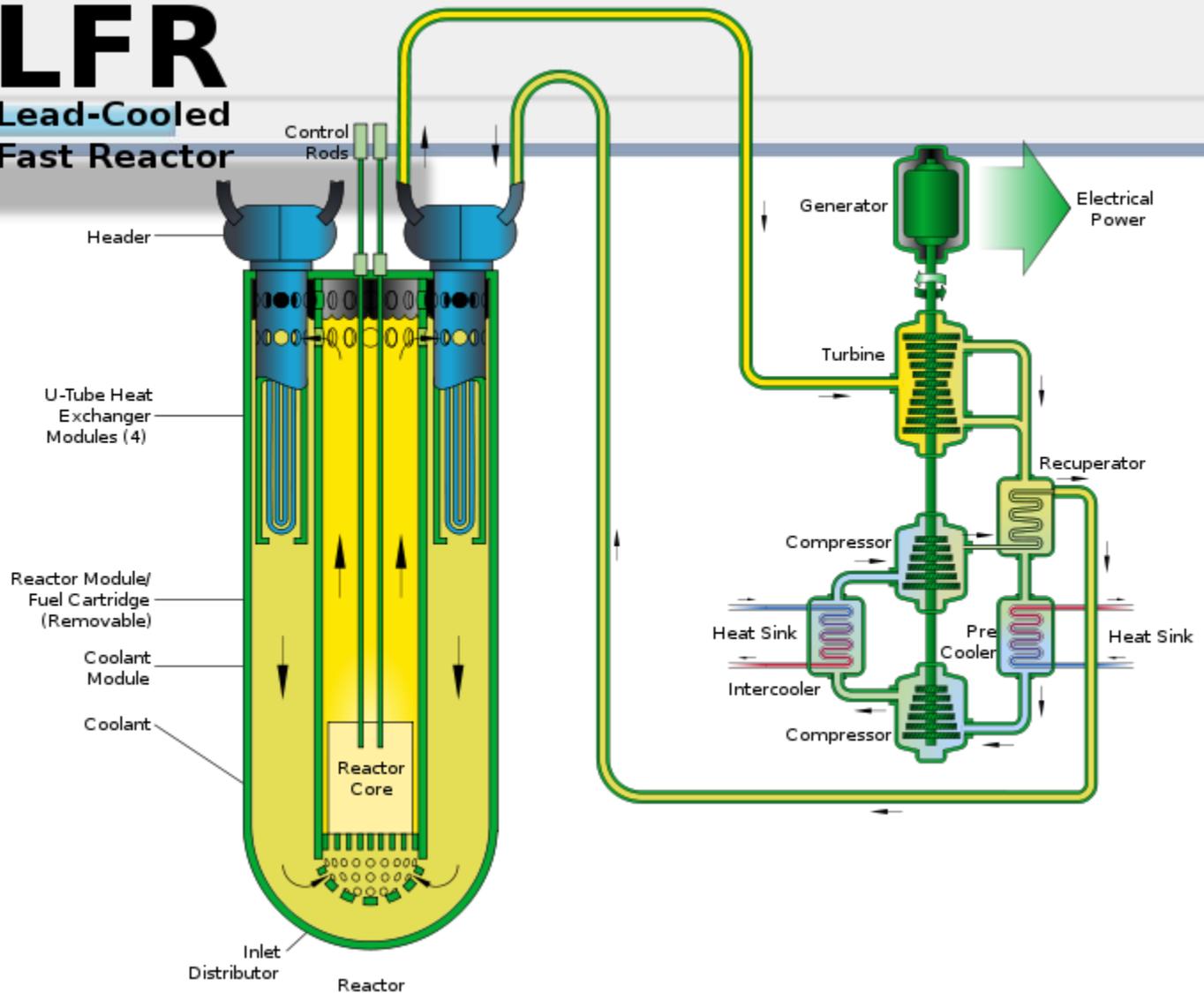


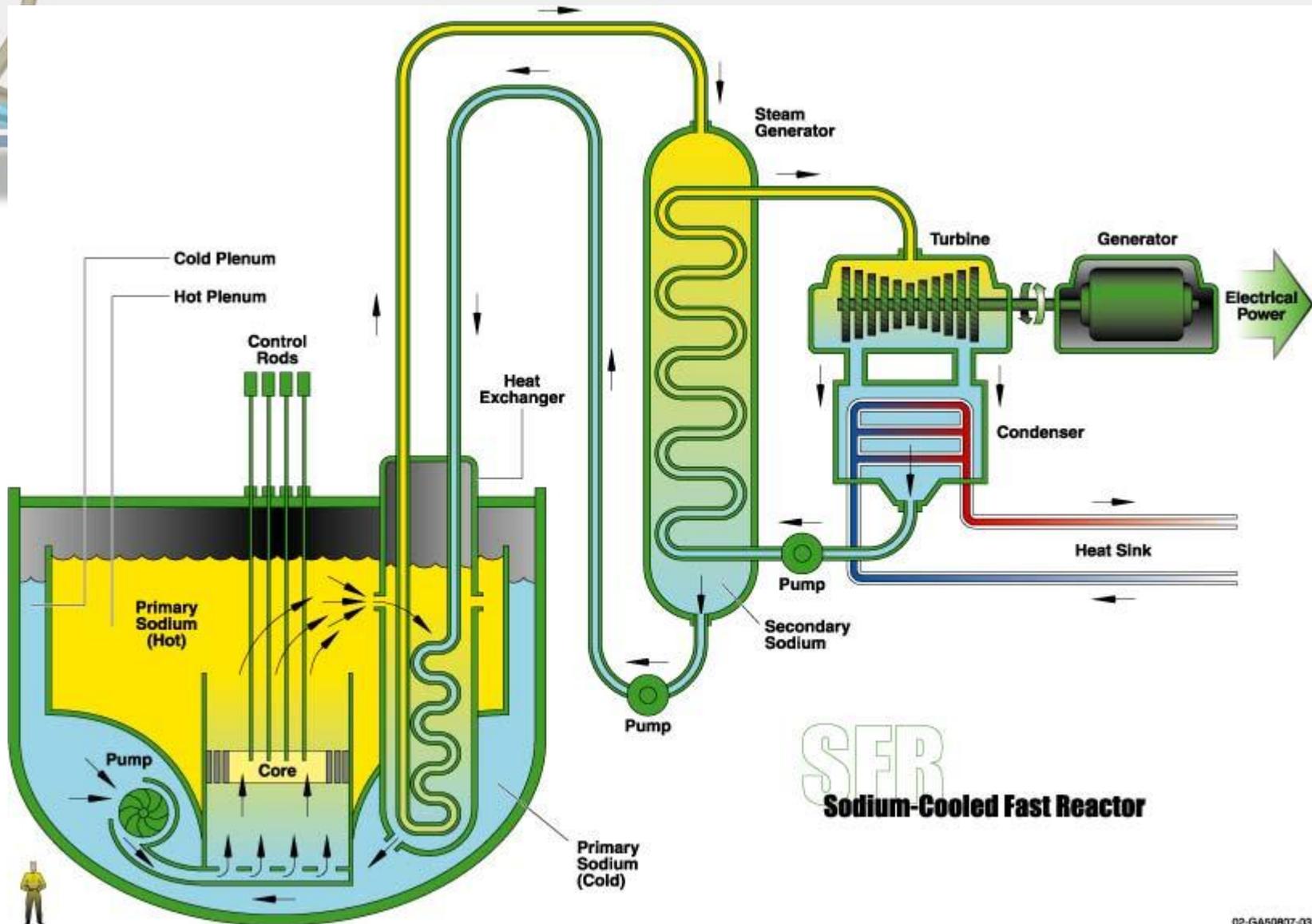
GFR Gas-Cooled Fast Reactor



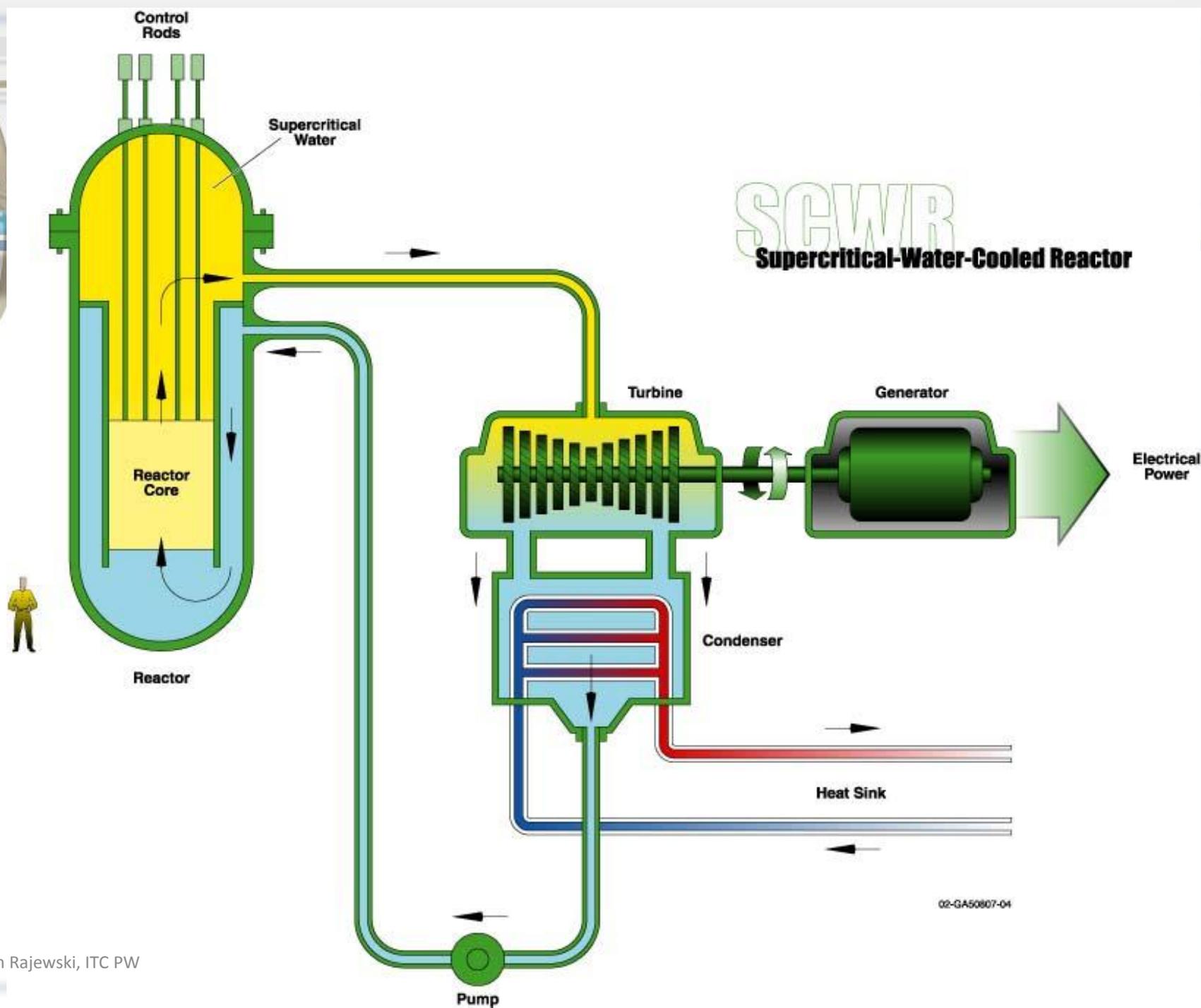
LFR

Lead-Cooled Fast Reactor

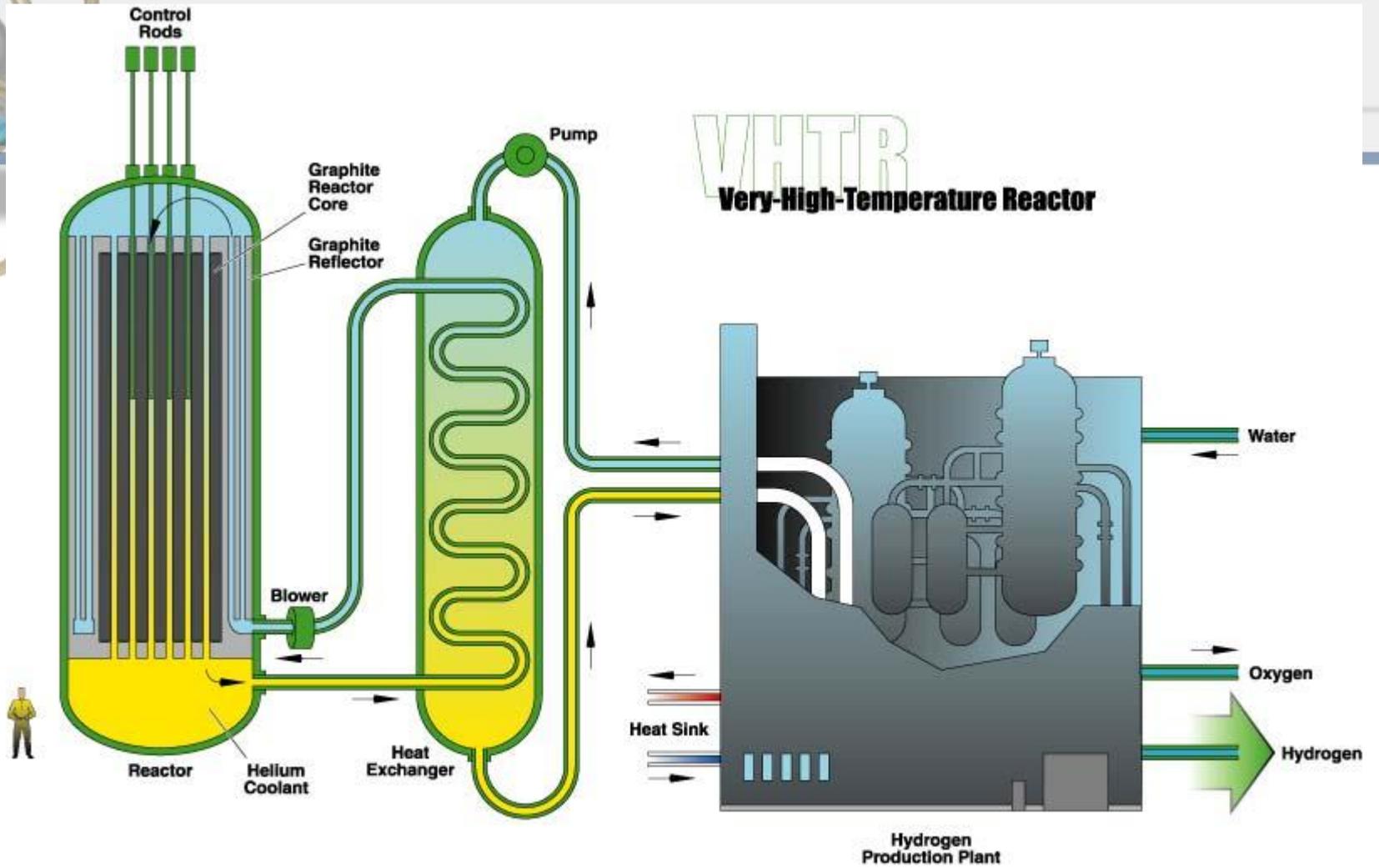




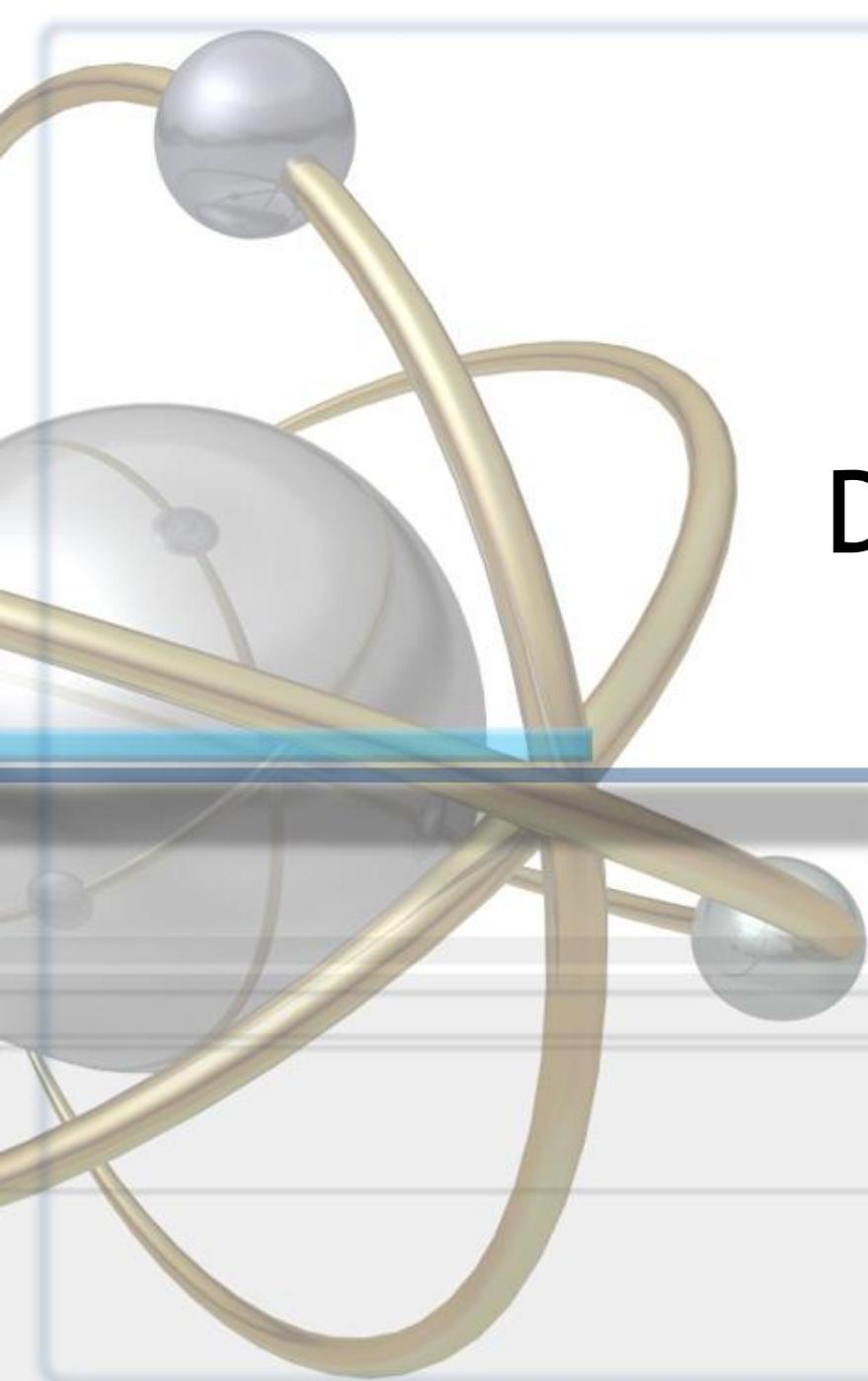
SFR
Sodium-Cooled Fast Reactor



02-GA50807-04



02-GA50807-01



DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ.

adam.rajewski@itc.pw.edu.pl