



# 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 (D<sub>2</sub>O)

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

## Woda lekka (H<sub>2</sub>O)

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

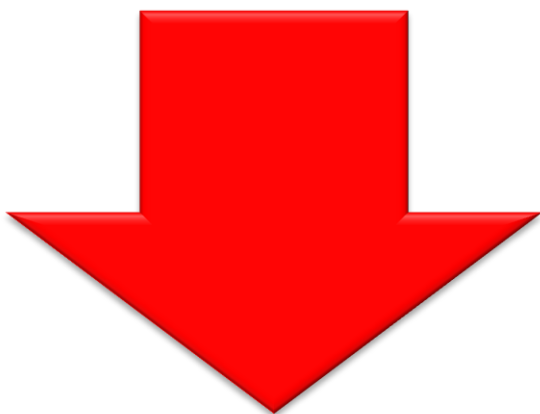
## Inne

- 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)



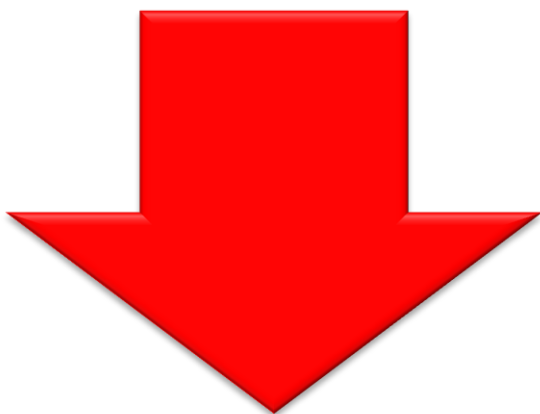
# MODERATOR CIĘŻKOWODNY



Umożliwia wykorzystanie uranu naturalnego

Niski przekrój czynny na pochłanianie neutronów

Niepalny



Masa atomowa D większa od H (większe wymiary rdzenia)

Kłopotliwy technologicznie

# MODERATOR LEKKOWODNY

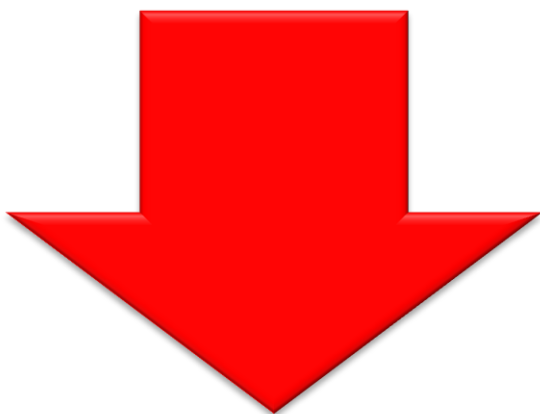


Łatwo dostępny

Najniższa możliwa masa atomowa H – mała objętość rdzenia

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

Niska aktywność chemiczna



Pochłanianie 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

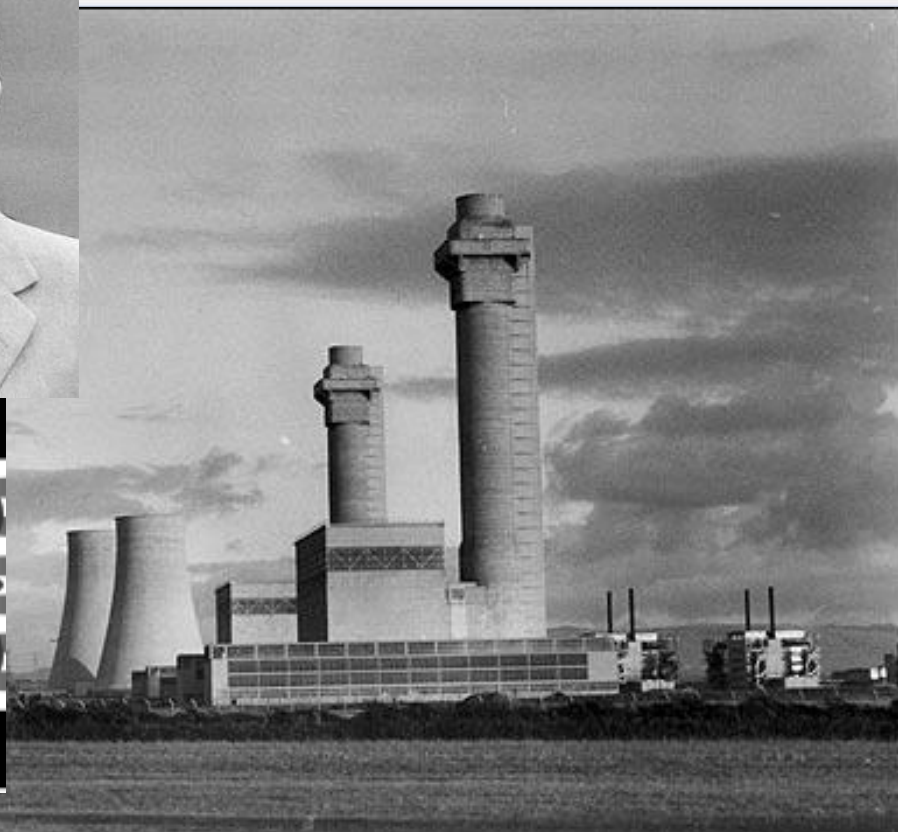
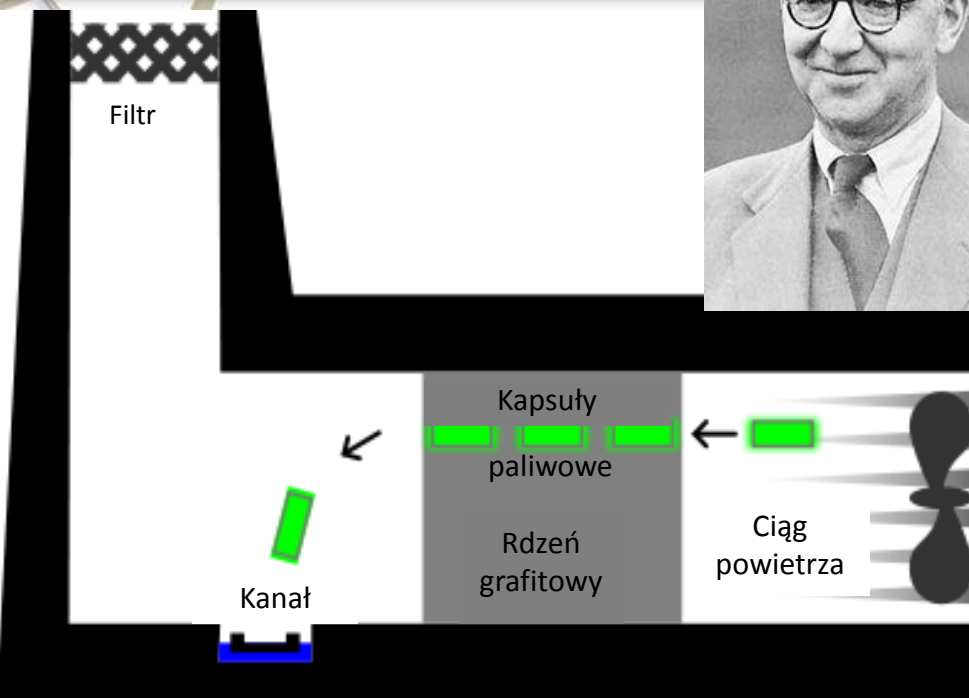
- FBR

# CHŁODZENIE POWIETRZEM



## Stos CP-1, USA 1942

# CHŁODZENIE POWIETRZEM



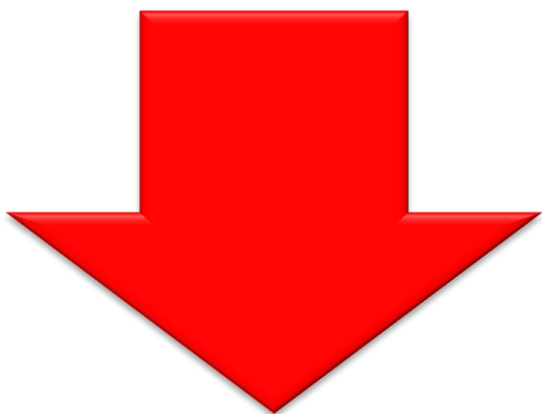
Windscale Pile 1

Wlk. Brytania 1950

# CHŁODZENIE CO<sub>2</sub>



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



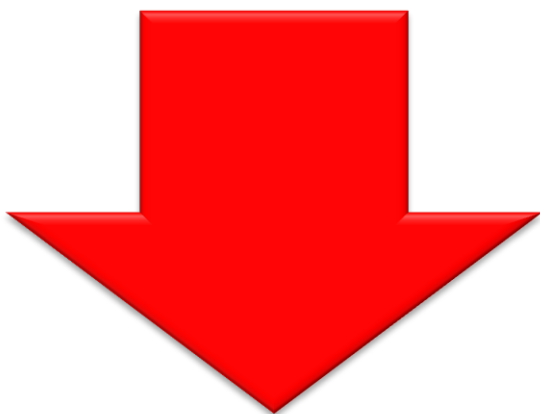
Niskie ciepło właściwe  
Duży pobór mocy w dmuchawach  
Powyżej 700°C aktywny chemicznie

# CHŁODZENIE He



Możliwe uzyskanie bardzo wysokich temperatur

Obojętność chemiczna



Koszty

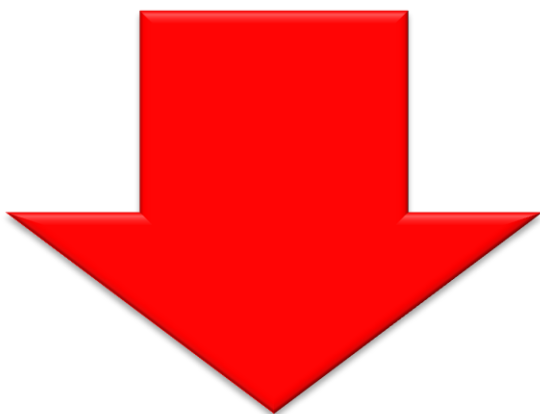
Niskie ciepło właściwe

Duży pobór mocy w dmuchawach/  
sprężarkach

# CHŁODZENIE WODĄ CIĘŻKĄ



Możliwość stosowania uranu naturalnego (przy połączeniu z moderatorem ciężkowodnym)



Koszty

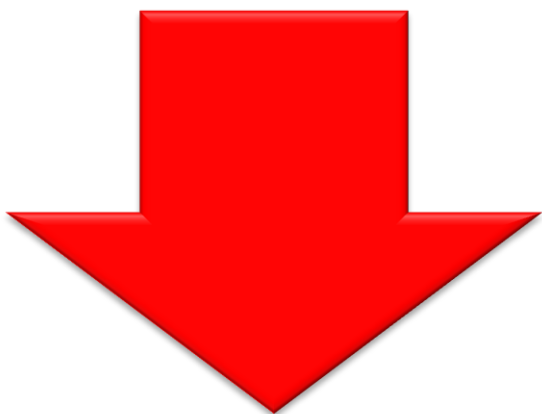
# CHŁODZENIE WODĄ LEKKĄ



Koszty

Wysokie ciepło właściwe

Niska moc potrzebna do pompowania



Ograniczenie temperatury

Konieczność stosowania wysokiego ciśnienia

# STOSOWANE KOMBINACJE

Moderator Chłodziwo	Grafit	D2O	H2O	Brak
CO <sub>2</sub>	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

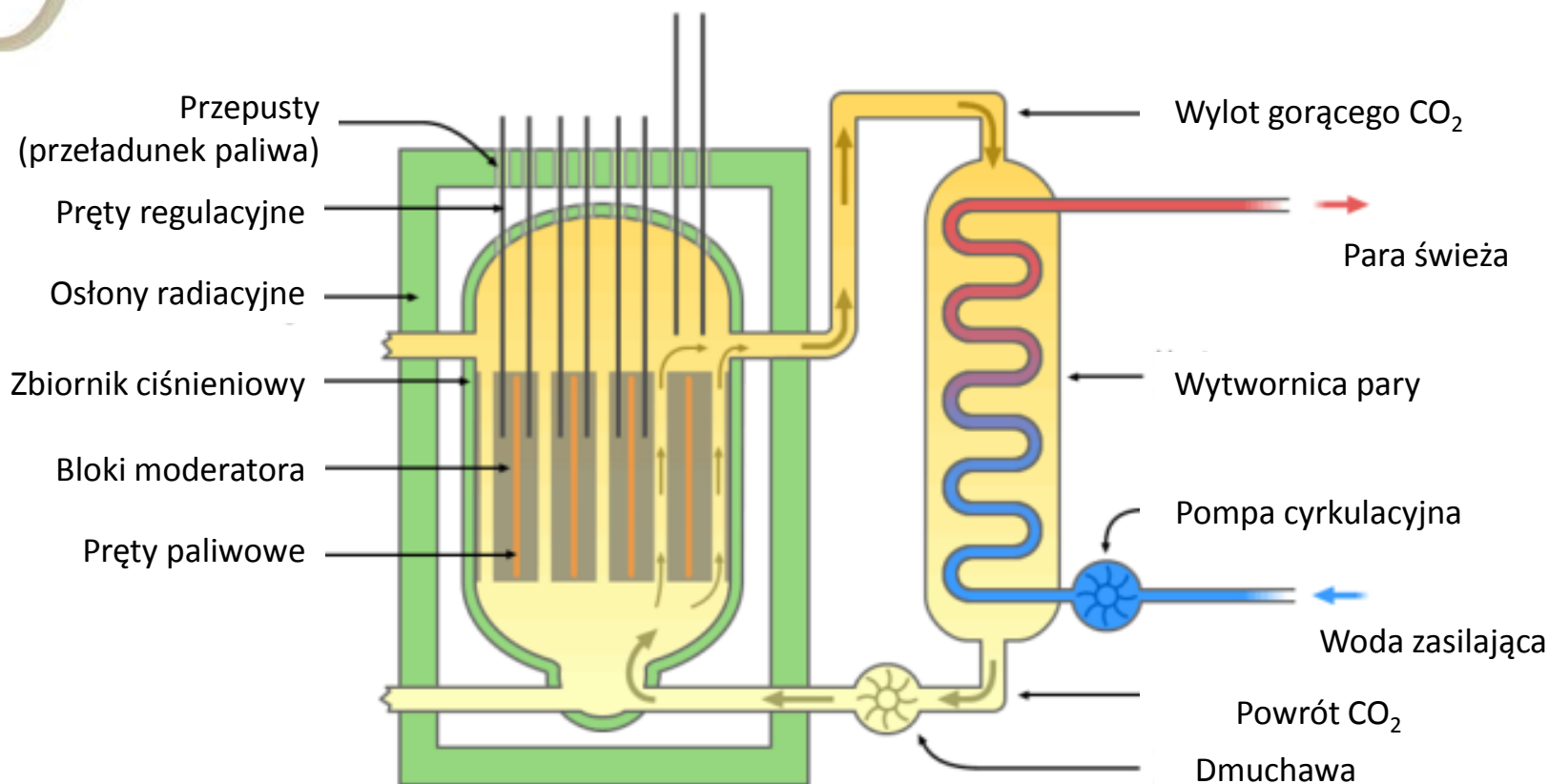
- FBR

# REAKTOR CHŁODZONY GAZEM

## GAS-COOLED REACTOR (GCR)

- Reaktor zbiornikowy (zbiornik stalowy lub betonowy)
- Chłodziwo:  $\text{CO}_2$
- Moderator: grafit
- Paliwo: uran naturalny, koszulki Magnox lub Mg-Zr
- Układ dwuobiegowy
  - Obieg pierwotny gazowy, ok.  $400^\circ\text{C}$ , 7-27 bar
  - Obieg wtórny wodno-parowy z turbiną parową
- Gęstość mocy w rdzeniu ok.  $1 \text{ MW/m}^3$
- 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)



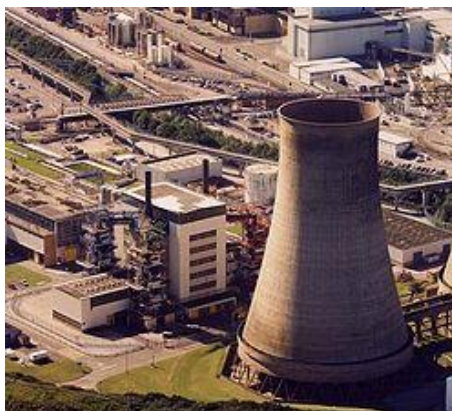
# REAKTOR CHŁODZONY GAZEM GAS-COOLED REACTOR (GCR)



Element paliwowy  
typu Magnox



Sizewell A (GBR)  
 $2 \times 245$  MWe brutto  
 $2 \times 210$  MWe netto  
1966-2006



Calder Hall (GBR)  
 $4 \times 60$  MWe brutto  
 $4 \times 50$  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

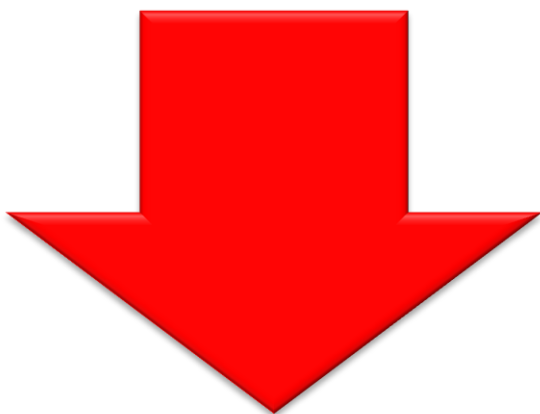
## GAS-COOLED REACTOR (GCR)



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

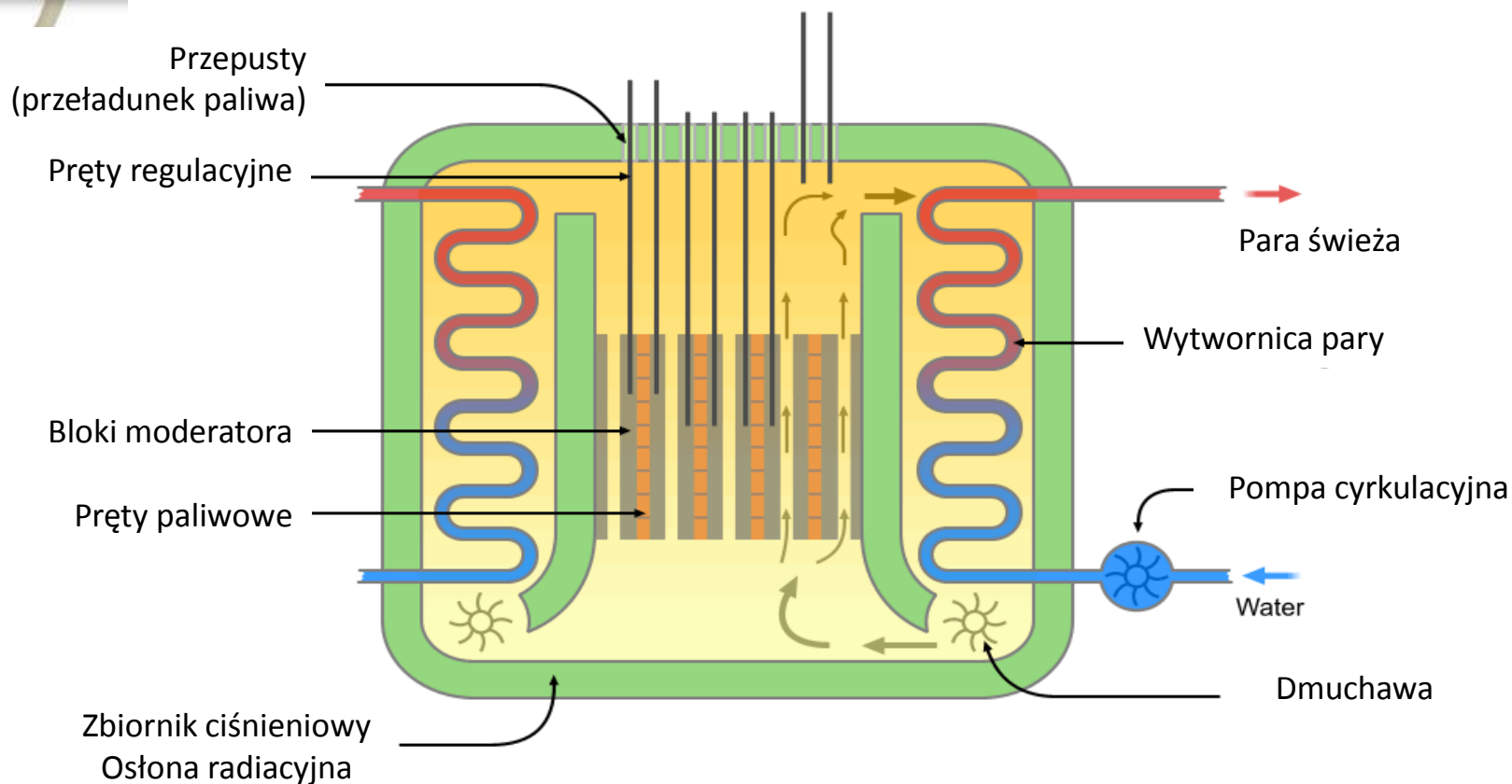
Małe wypalenie paliwa

# REAKTOR CHŁODZONY GAZEM

## ADVANCED GAS-COOLED REACTOR (AGR)

- Reaktor zbiornikowy (zbiornik betonowy z wykładziną stalową)
- Chłodziwo: CO<sub>2</sub>
- 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/m<sup>3</sup>
- 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)  
 $2 \times 682$  MWe brutto  
 $2 \times 615$  MWe netto  
1988-(2023)



# REAKTORY CHŁODZONE GAZEM

## ADVANCED GAS-COOLED REACTOR (AGR)



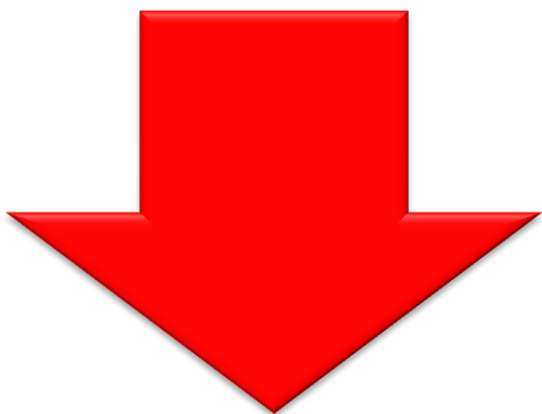
Prosta konstrukcja

Możliwość chłodzenia konwekcją naturalną

Możliwość przeładunku paliwa w czasie pracy

Wysokie parametry pary świeżej (przegrzana)

Wysoka sprawność



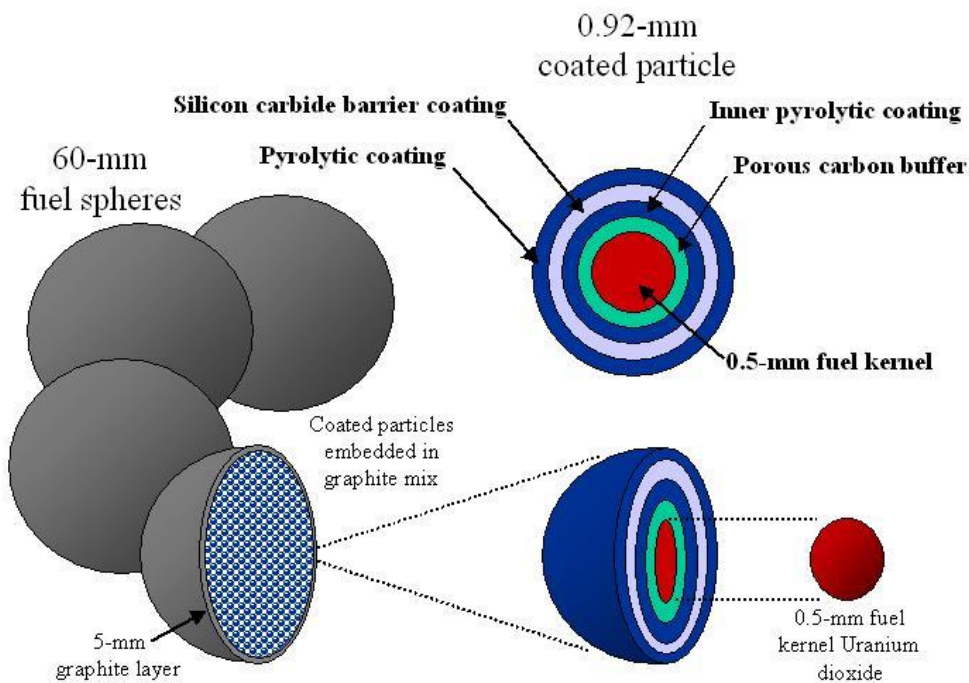
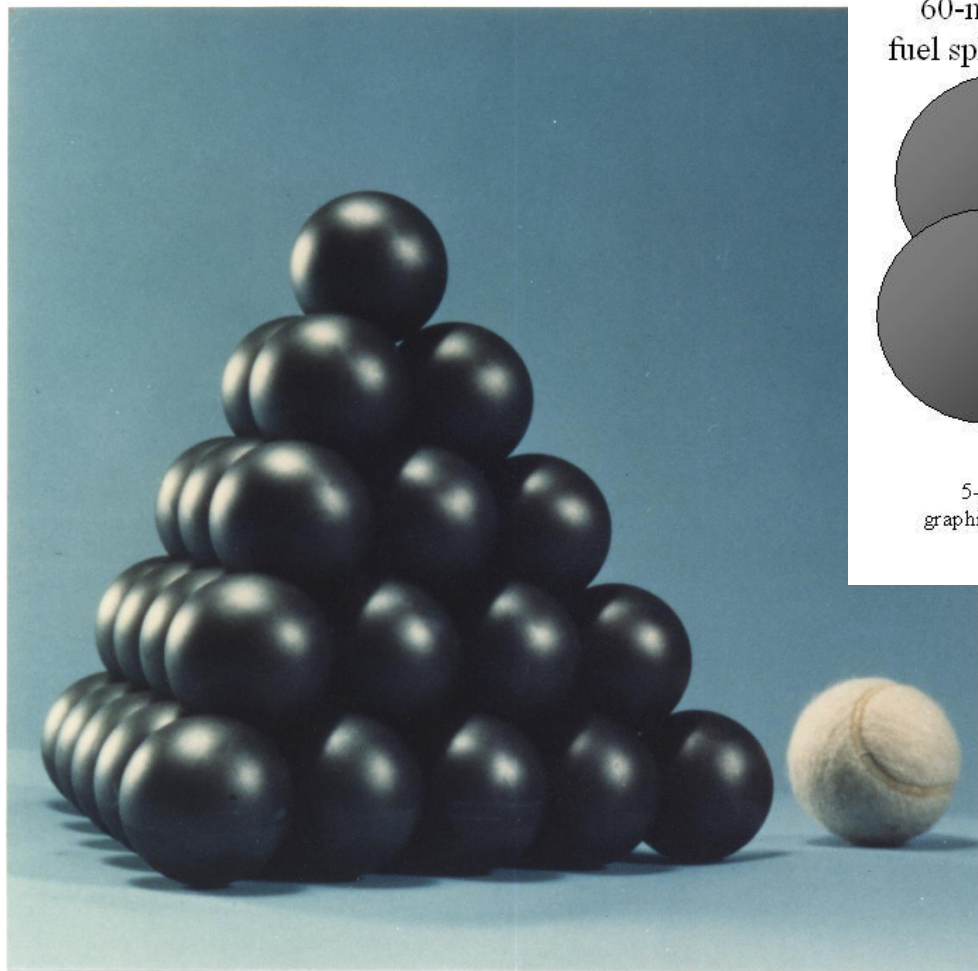
Duży pobór mocy w dmuchawach

Małe wypalenie paliwa

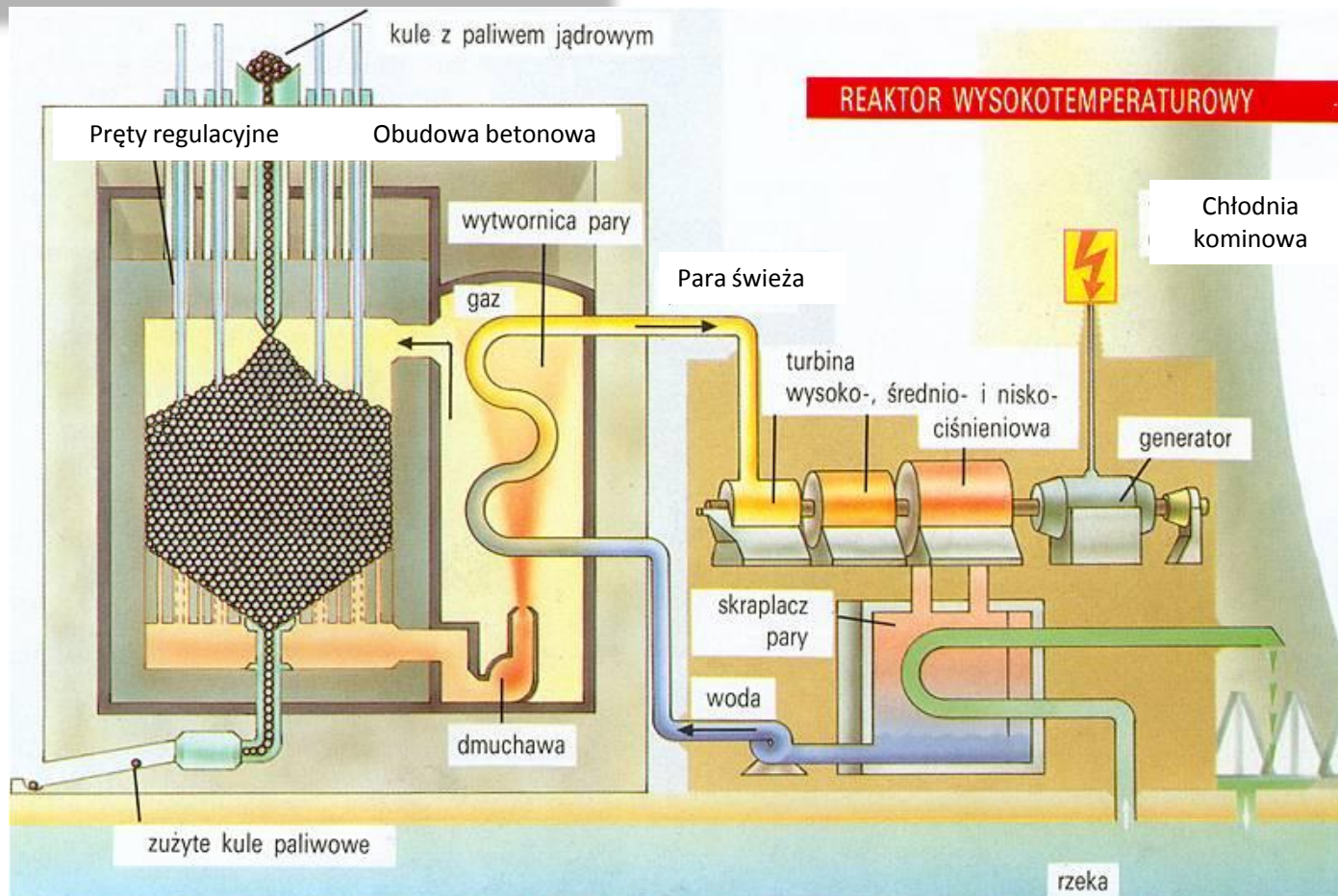
# REAKTOR WYSOKOTEMPERATUROWY HIGH-TEMPERATURE REACTOR (HTR)

- 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

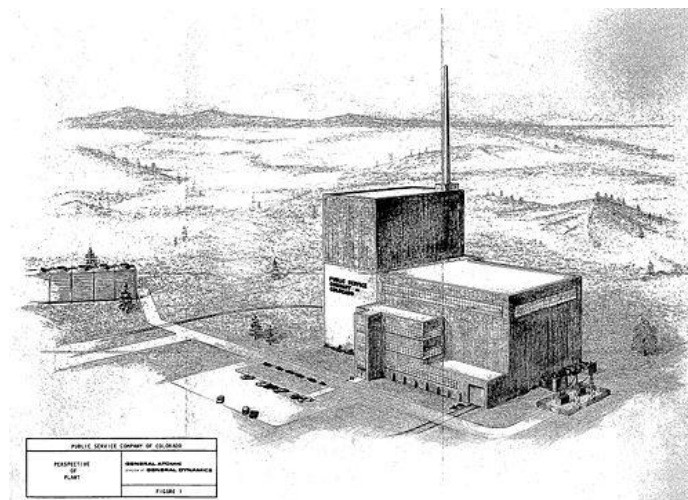


Fort St. Vrain

342MWe brutto

330MWe netto

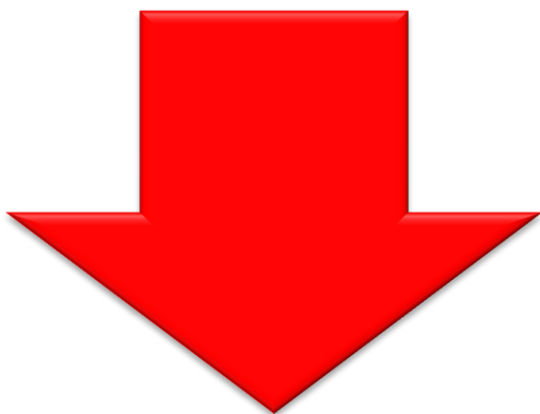
1976-1989



# HIGH-TEMPERATURE REACTOR (HTR)



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

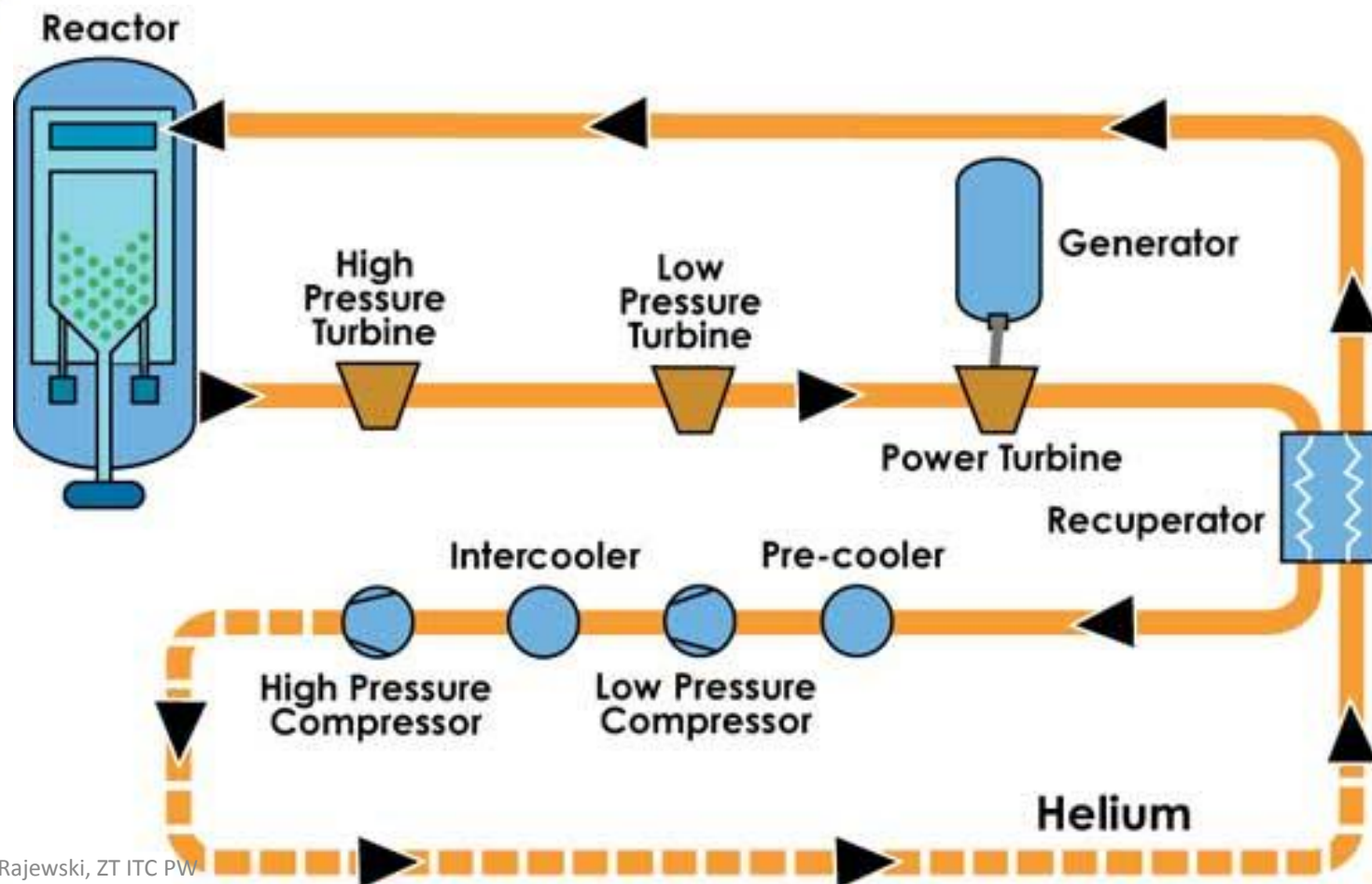


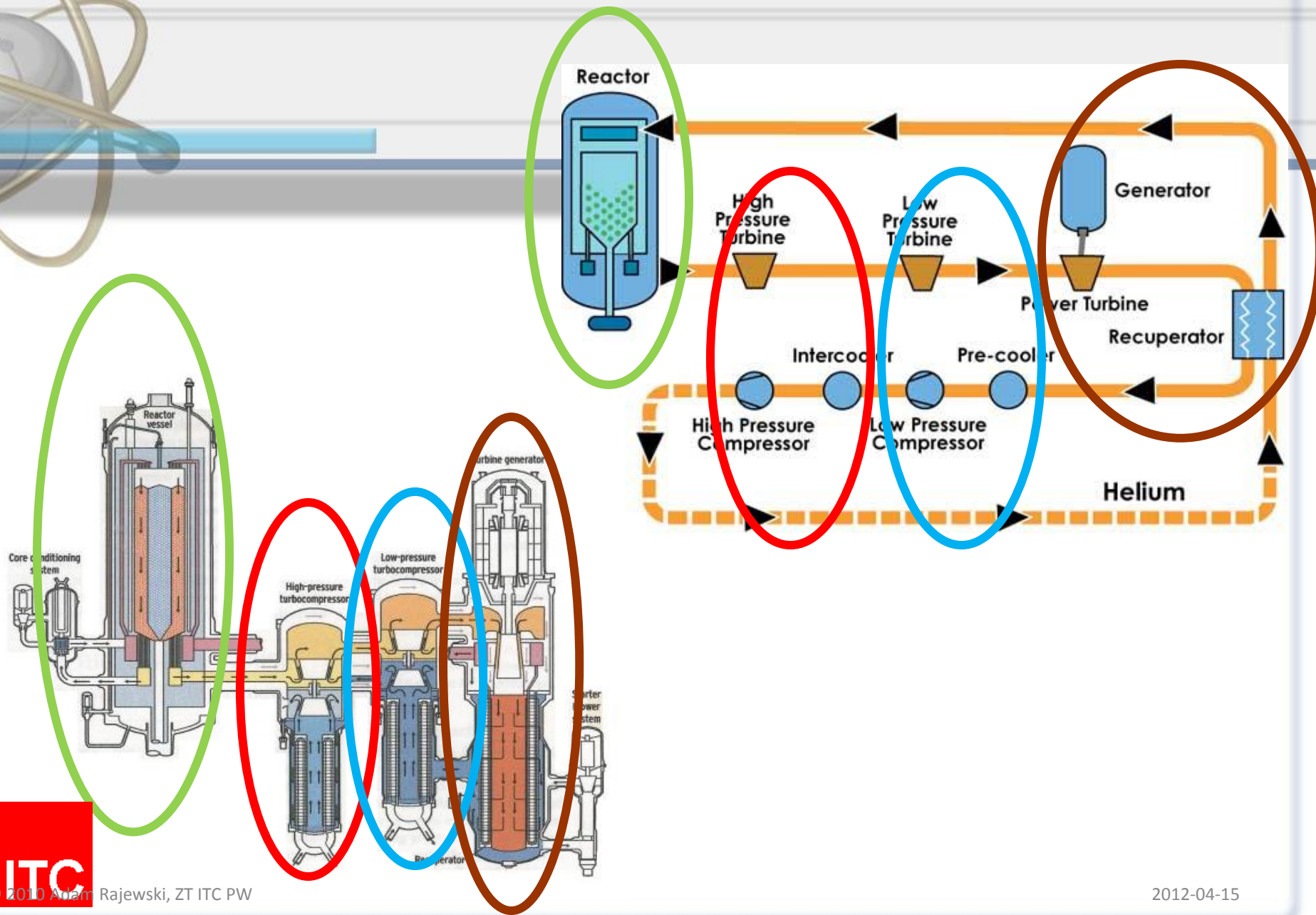
Problemy eksploatacyjne: przecieki, korozja  
Niedostateczne badania (przerwane na przełomie lat 80./90.)

# PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR)

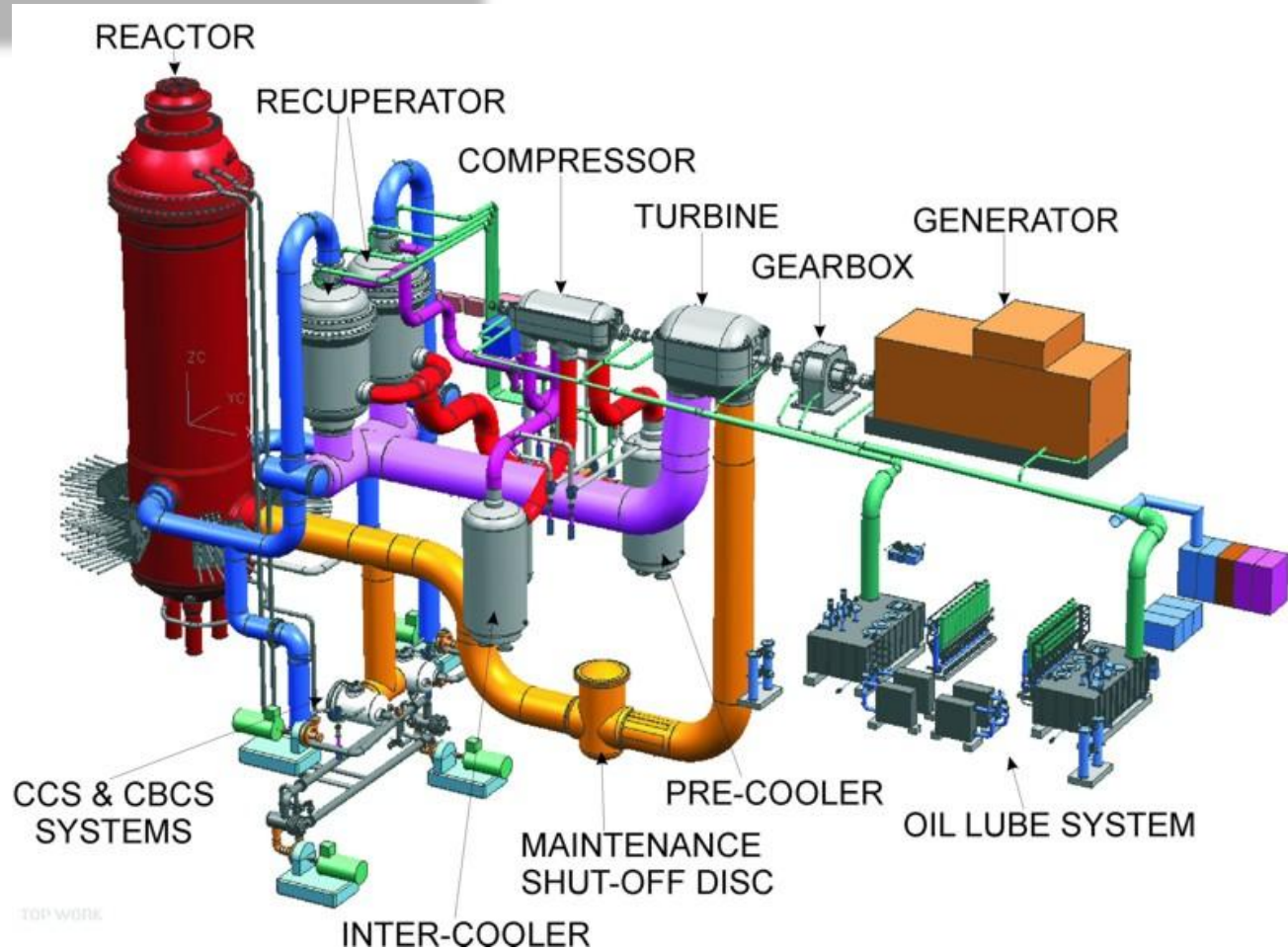
- Reaktor zbiornikowy (zbiornik betonowy z wykładziną stalową)
- Chłodziwo: He
- Moderator: grafit
- Paliwo: uran lub tor w kulach paliwowych (złóże usypane)
- Układ jednoobiegowy: obieg gazowy z turbiną gazową,
  - Temperatury ok. 900/500°C
  - Ciśnienia
- Sprawność: powyżej 45%
- Producenci: ZAF, CHN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

# PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR)





# PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR)



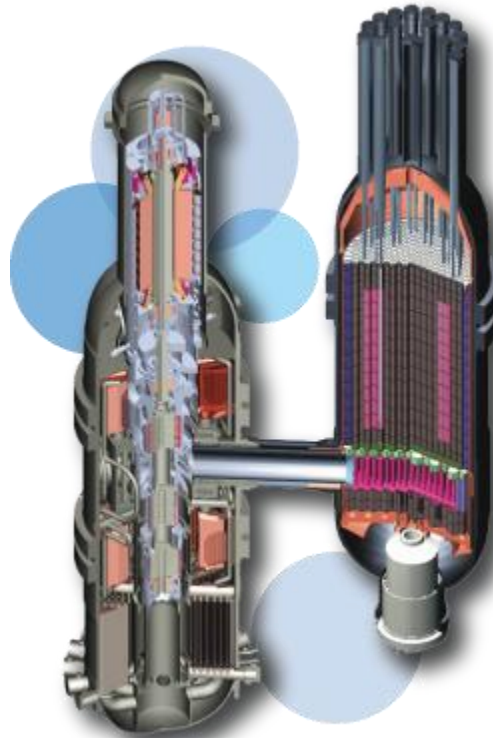
# PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR)



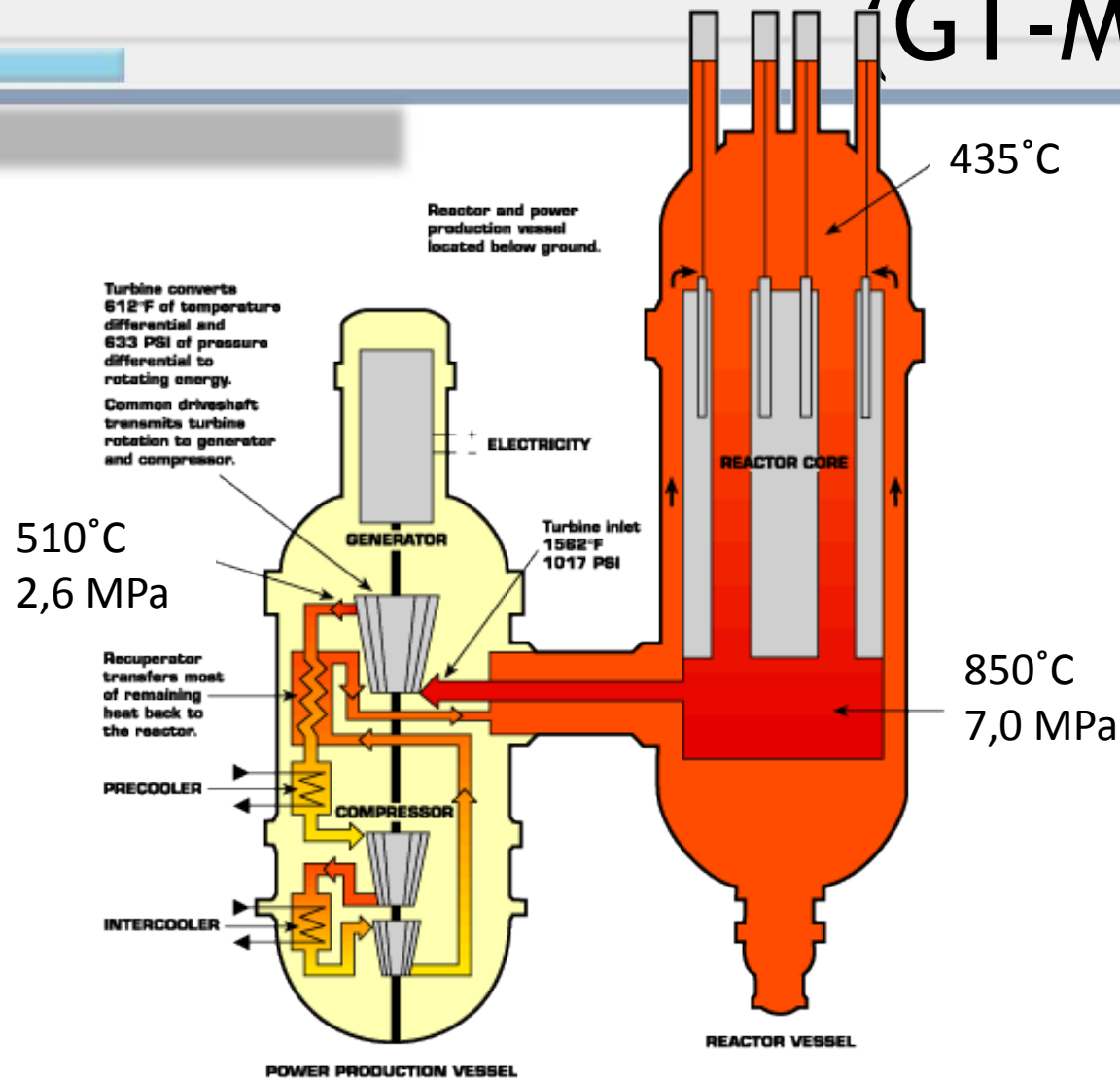
# GAS TURBINE MODULAR HELIUM REACTOR (GT-MHR)

- 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

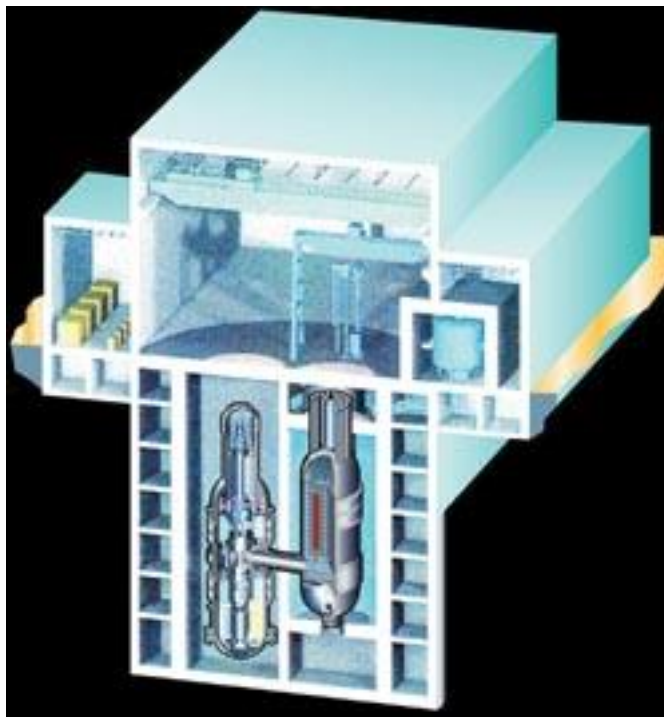
# PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR)



# 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

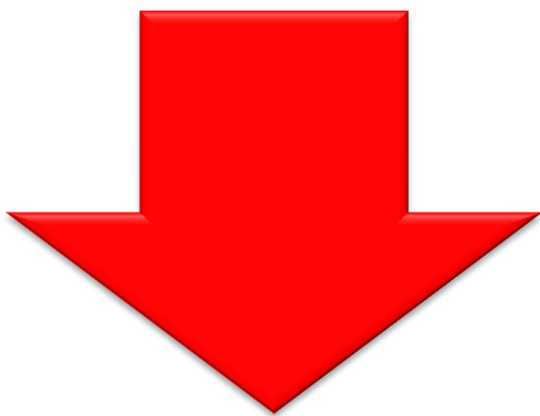
Wysoka elastyczność + małe bloki →

→ regulacja obciążenia

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

Możliwość schłodzenia rdzenia konwekcją naturalną

Eliminacja ryzyka korozji



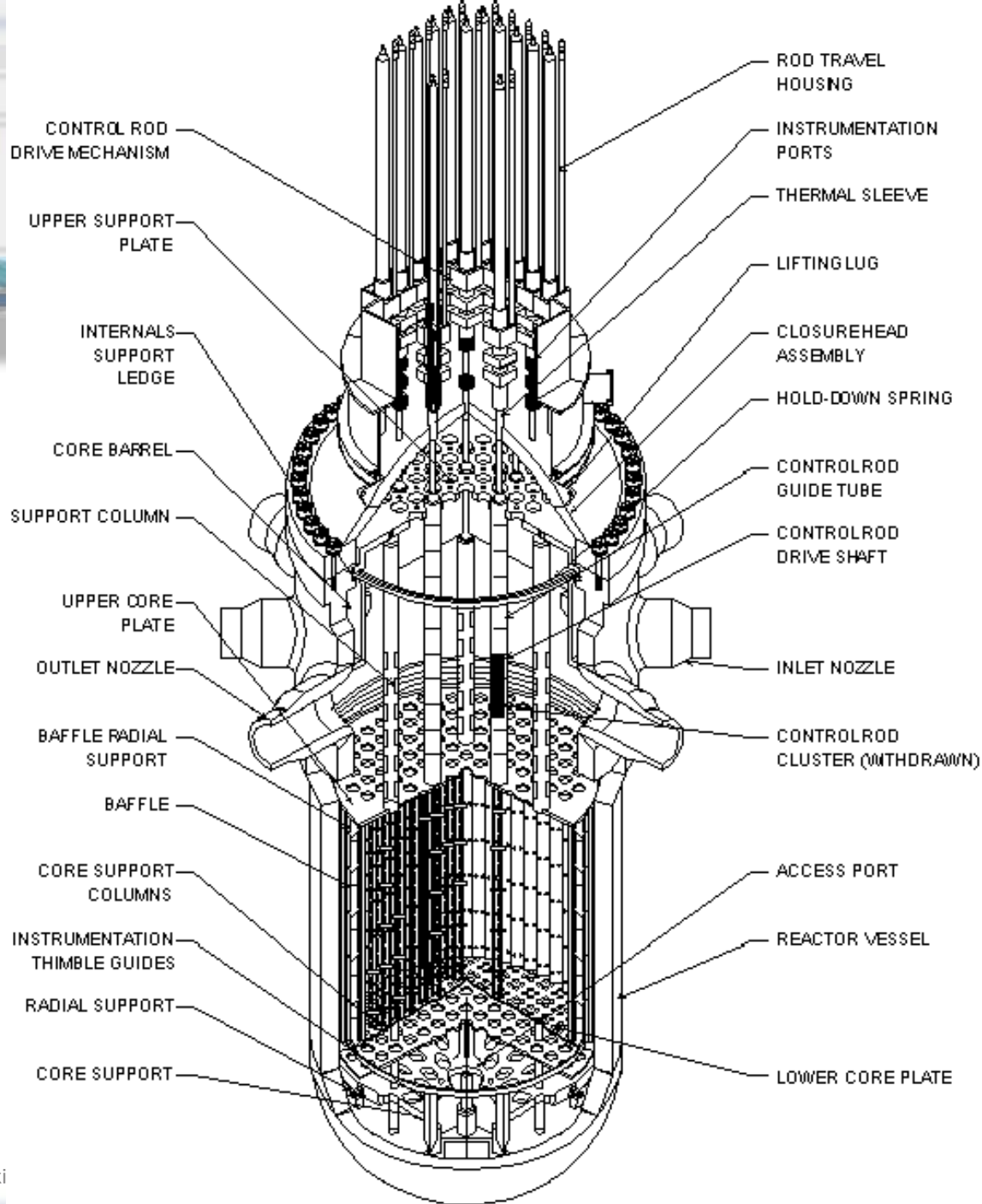
Brak doświadczeń eksperymentalnych

Program rozwojowy PBMR zawieszony z braku funduszy w RPA

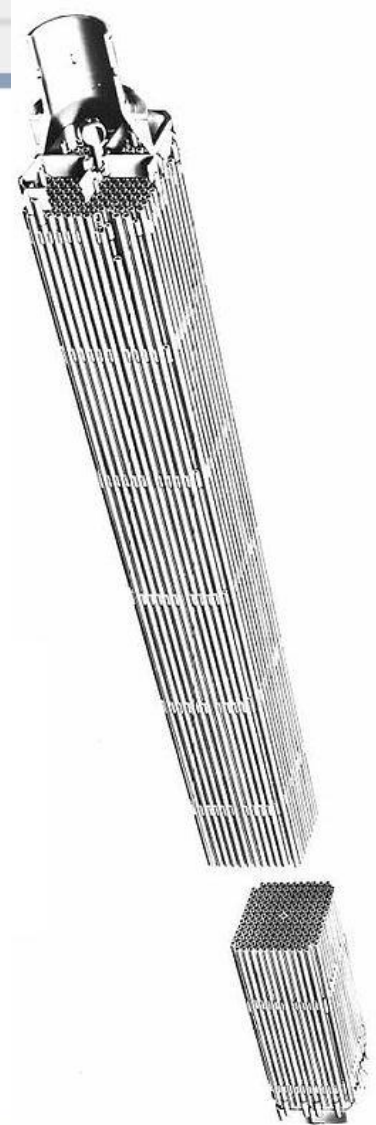
# REAKTOR WODNY CIŚNIENIOWY

## PRESSURIZED WATER REACTOR (PWR)

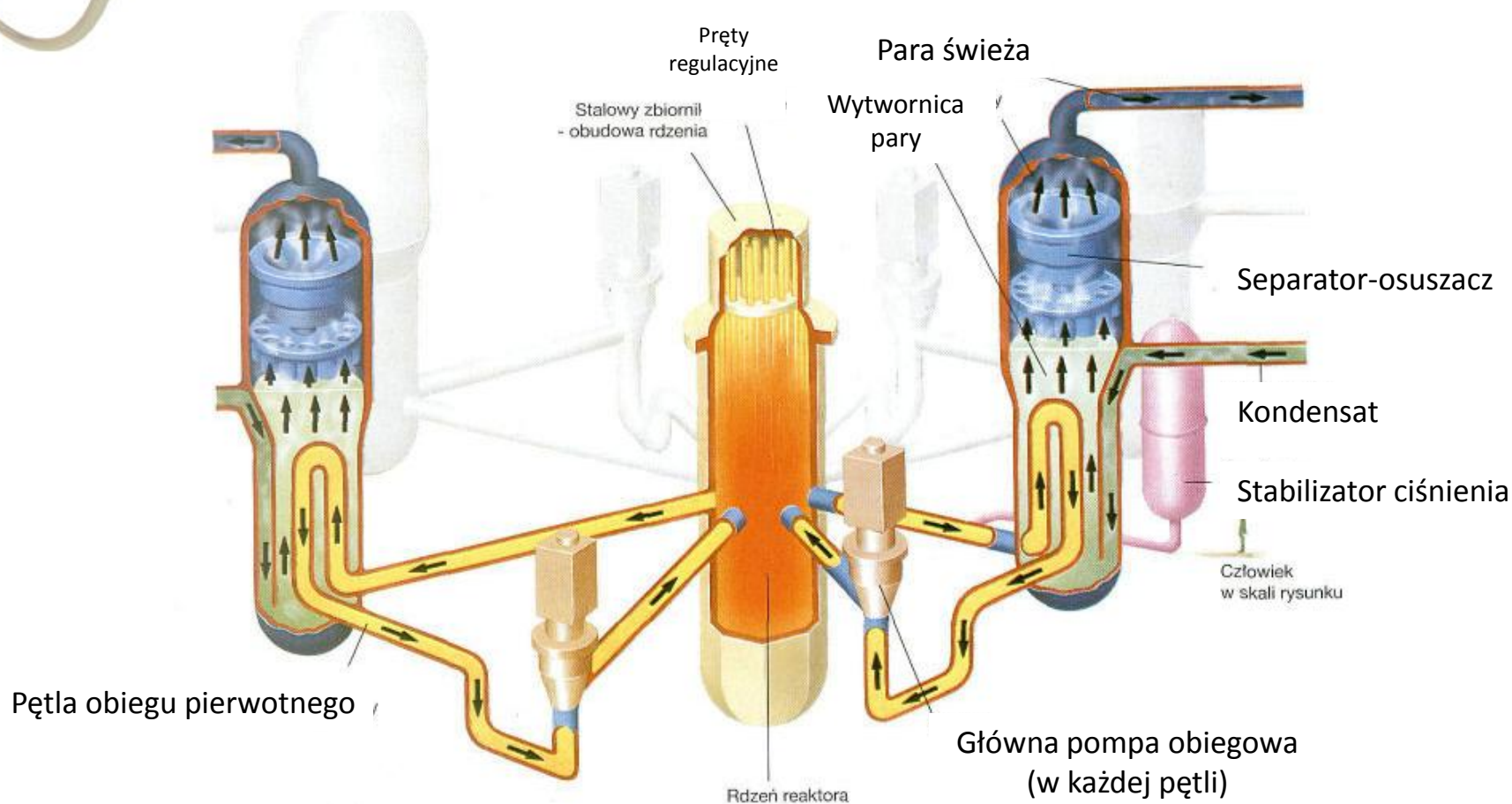
- Reaktor zbiornikowy (zbiornik stalowy)
- Chłodziwo:  $H_2O$
- Moderator:  $H_2O$  (ta sama masa, co chłodziwo)
- Paliwo: uran wzbogacony (4÷5%)
- Układ dwuobiegowy
  - Obieg pierwotny wodny, 150÷200 bar, 300÷350°C
  - Obieg wtórny wodno-parowy, para świeża nasycona ok. 320°C
- Sprawność: ok. 32%
- 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



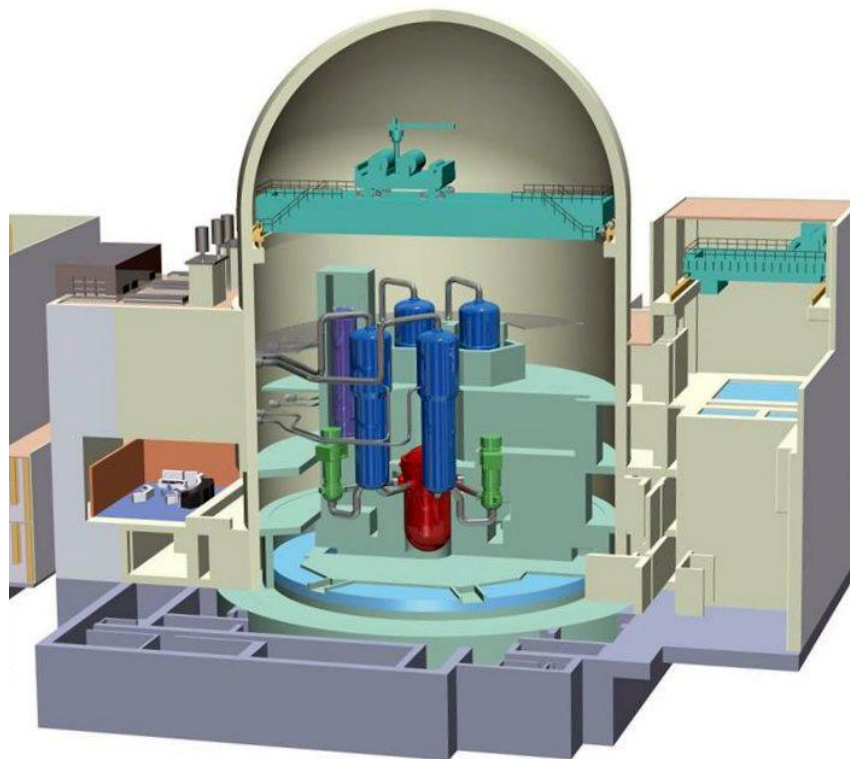
# REAKTOR WODNY CIŚNIENIOWY PRESSURIZED WATER REACTOR (PWR)



# REAKTOR WODNY CIŚNIENIOWY

## PRESSURIZED WATER REACTOR (PWR)

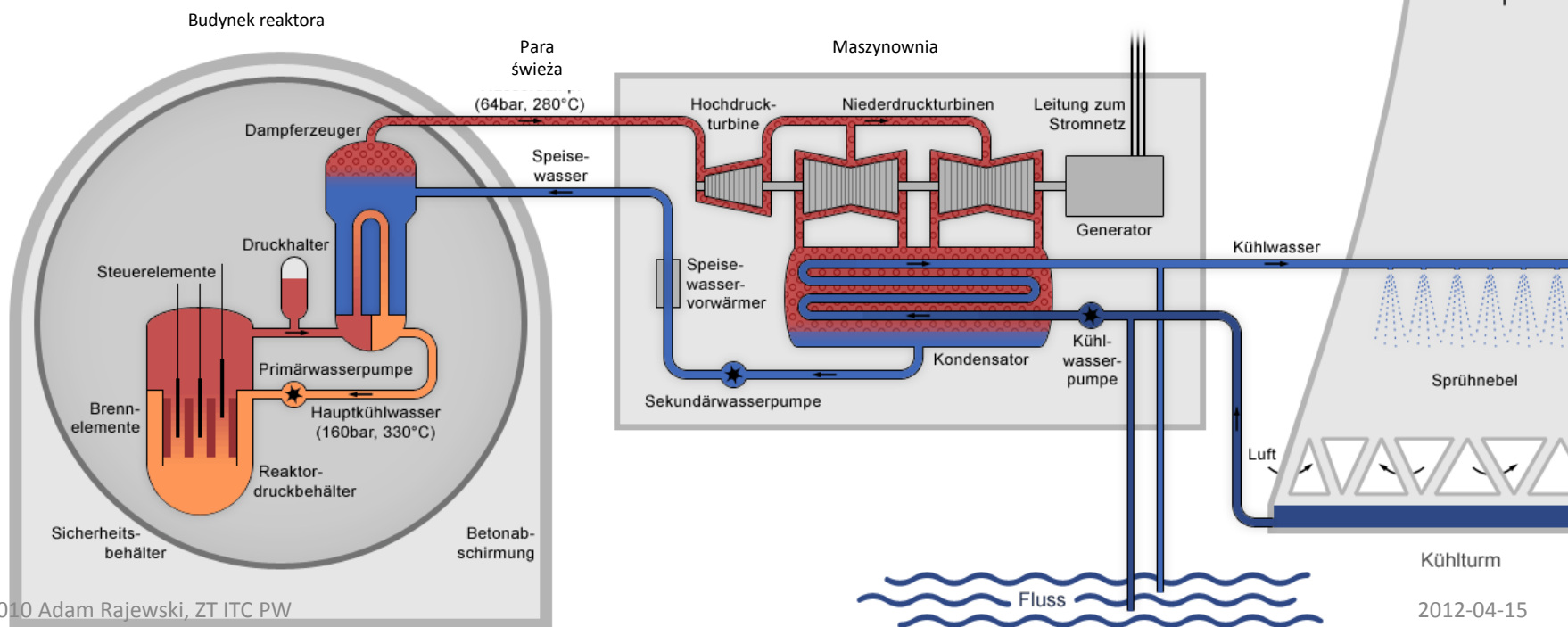
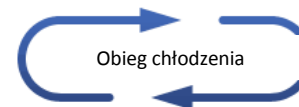
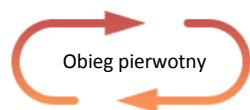
Typical Pressurized Water Reactor



Source: U.S. Nuclear Regulatory Commission

# ELEKTROWNIA Z REAKTOREM PWR

## Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor



# Das Kernkraftwerk Grohnde

## A Reaktorgebäude

- 1 Betonkule
- 2 Reaktorsicherheitsbehälter
- 3 Rundlaufkan
- 4 Reaktordruckgefäß
- 5 Dampferzeuger
- 6 Hauptkühlmittelpumpe
- 7 Personenschleuse
- 8 Lademaschine
- 9 Wasserbecken für gebrauchte Brennelemente
- 10 Nuklearer Zwischenkühler
- 11 Flutbehälter
- 12 Frischdampf-Armatur
- 13 Halbportalgerüst

## B Hilfsanlagengebäude

- 14 Abwasserndampfer
- 15 Zuluftanlage
- 16 Kontrollbehälter für radioaktive Abwässer
- 17 Wäscherei
- 18 Duschräume

## C Büro- und Sozialgebäude

## D Schaltanlagengebäude

- 19 Kraftwerkskante
- 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 Maschinentrailo-Anlage

## F Kondensatreinigungsanlage

## G Notspesegebäude

- 32 Notspesediesel
- 33 Schaltanlage
- 34 Deionatbecken

## H Bedarfsfilteranlage

## I Abluftkamin

## J Notstromdiesel- und Kaltwasserzentrale

- 35 Notstromdiesel
- 36 Kaltmaschine

## K Kühlwasserpumpenbauwerk

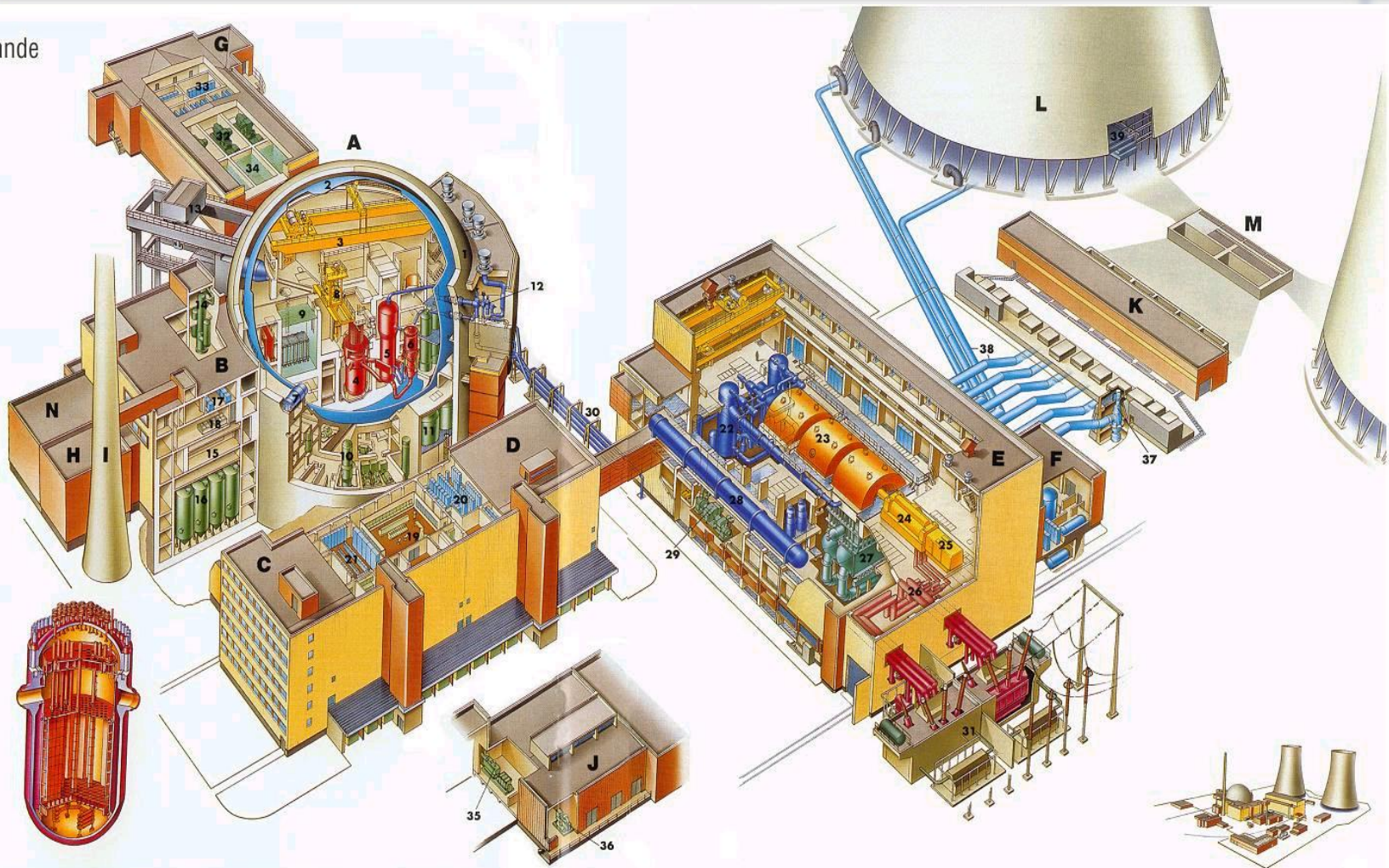
- 37 Hauptkühlwasserpumpe
- 38 Hauptkühlwasserleitungen

## L Kühlturm

- 39 Kühlturmeinbauten

## M Kühlwassermischbauwerk

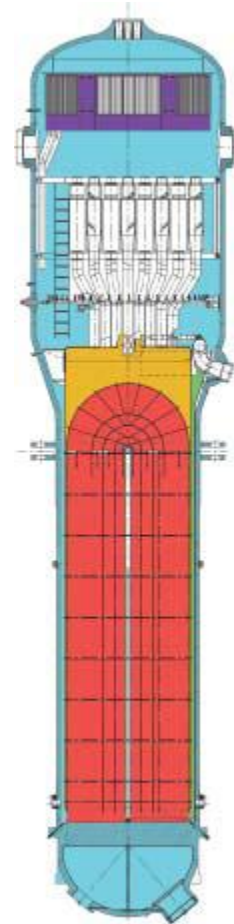
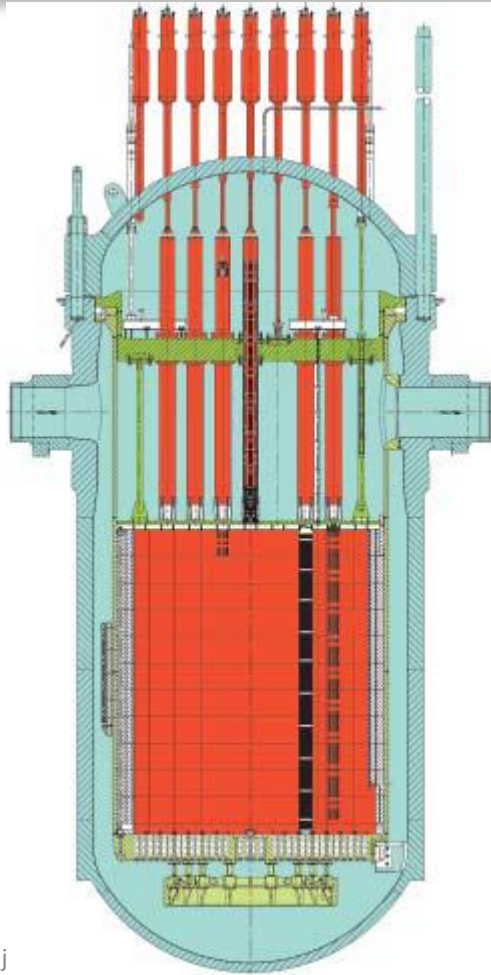
## N Abfallbehandlung



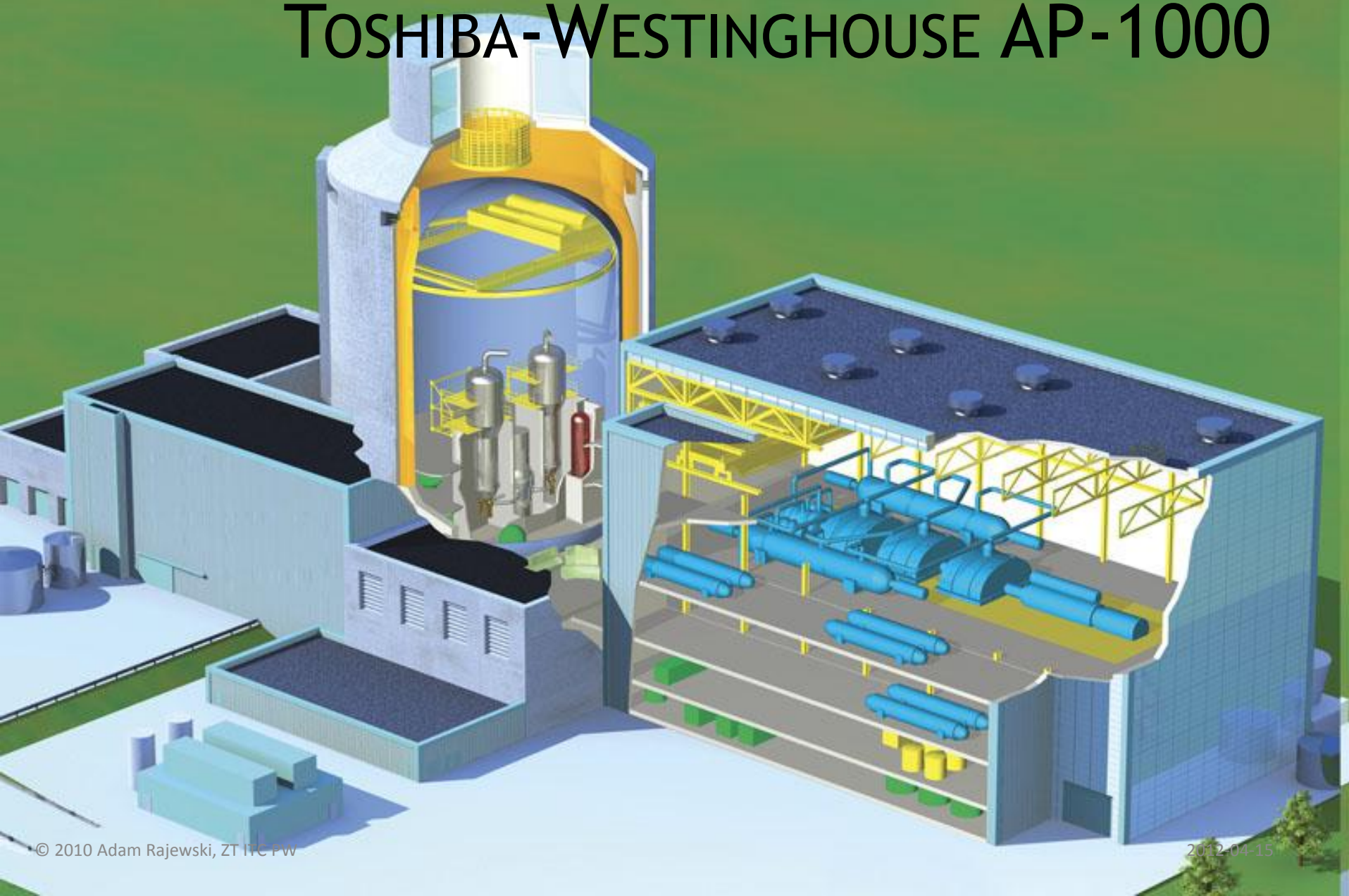
# AREVA EPR



# AREVA EPR



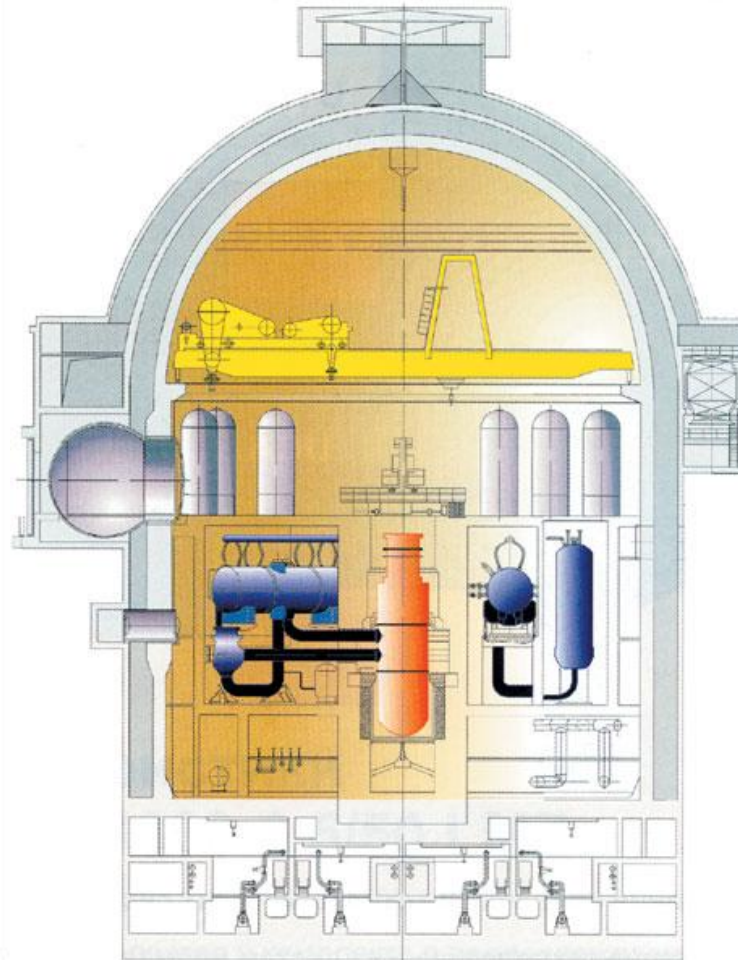
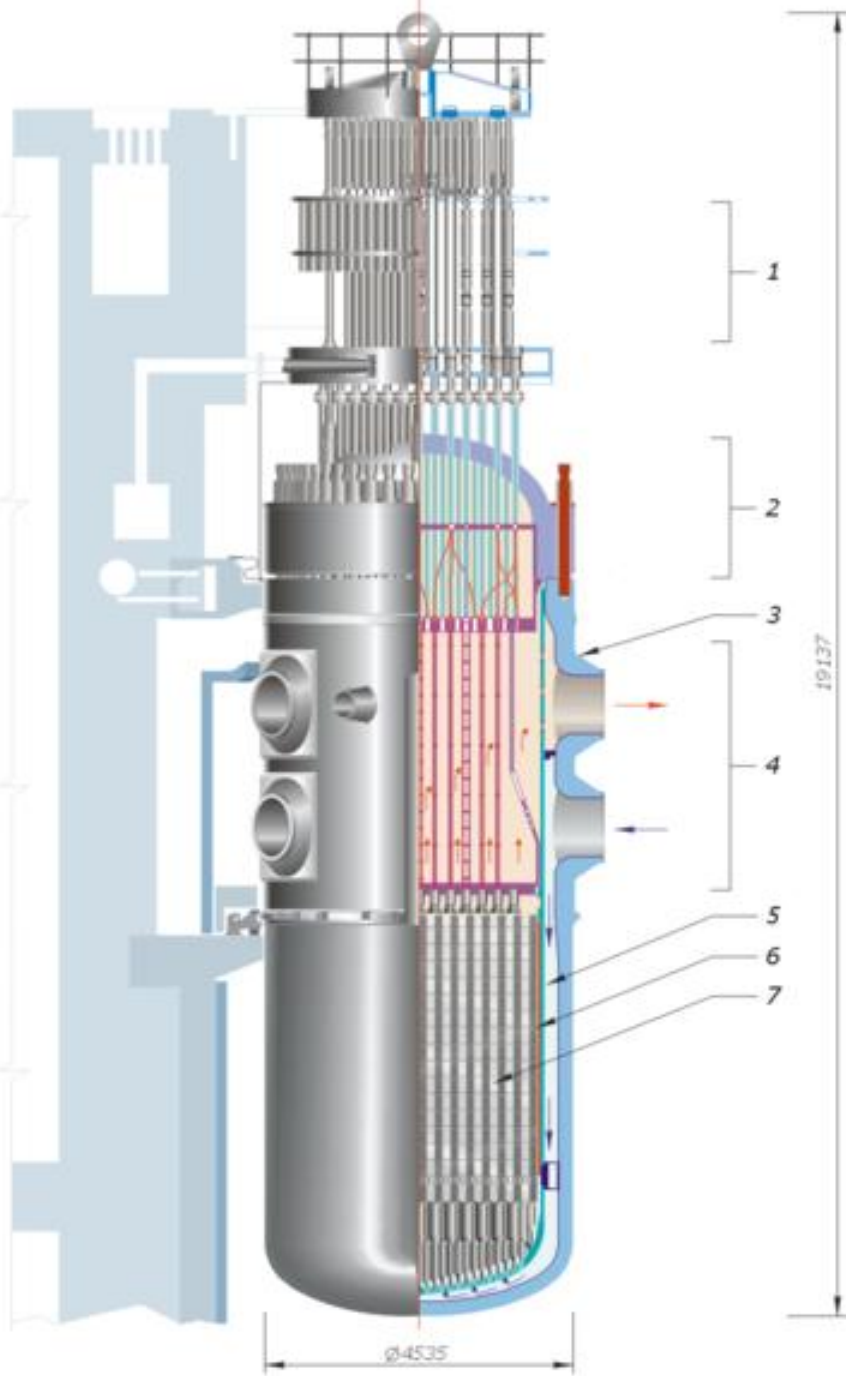
# TOSHIBA-WESTINGHOUSE AP-1000



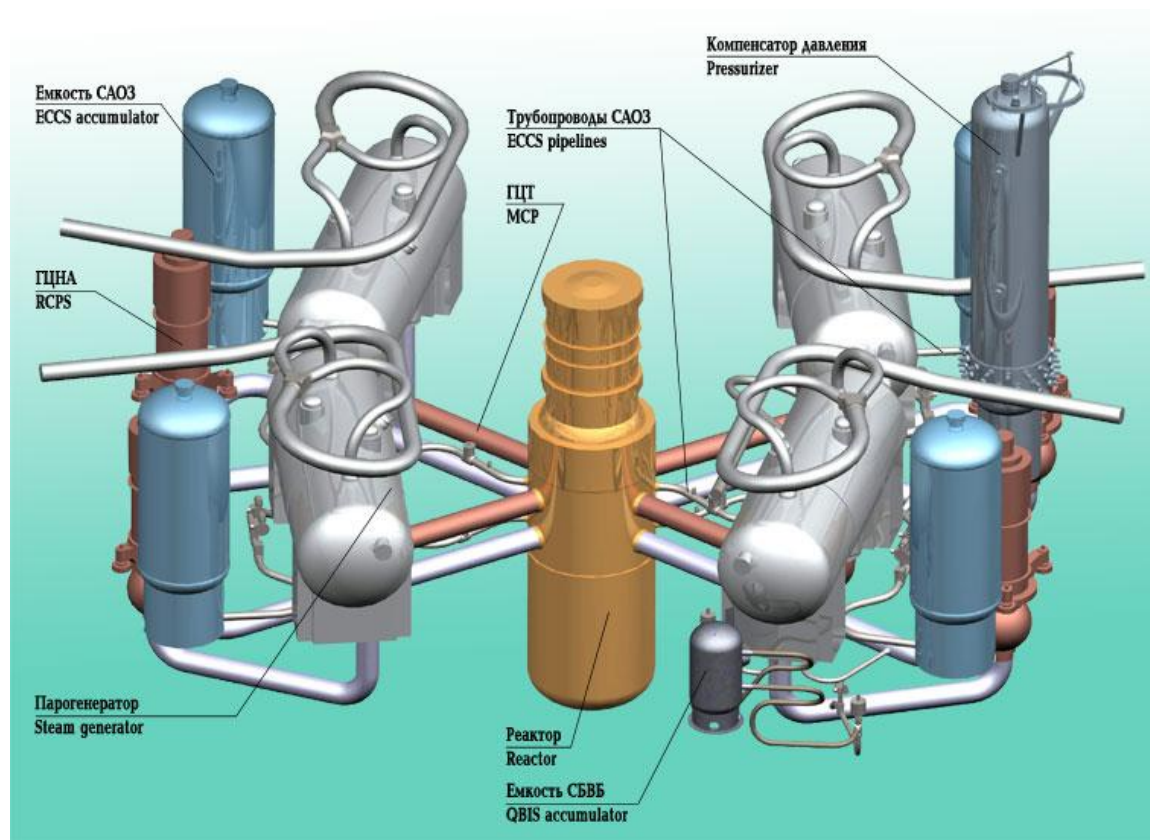
# ВОДО-ВОДЯНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РЕАКТОР(WWER)

- 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



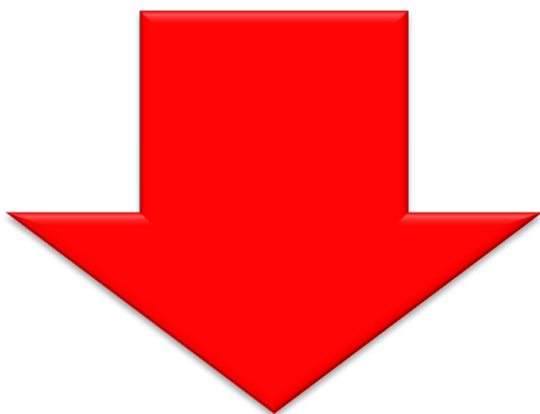
# WWER-1500



# REAKTORY WODNE CIŚNIENIOWE PWR/WWER



Wysoka niezawodność  
Rozpowszechnienie technologii  
Samoczynne wygaszanie reakcji  
przy utracie chłodziwa

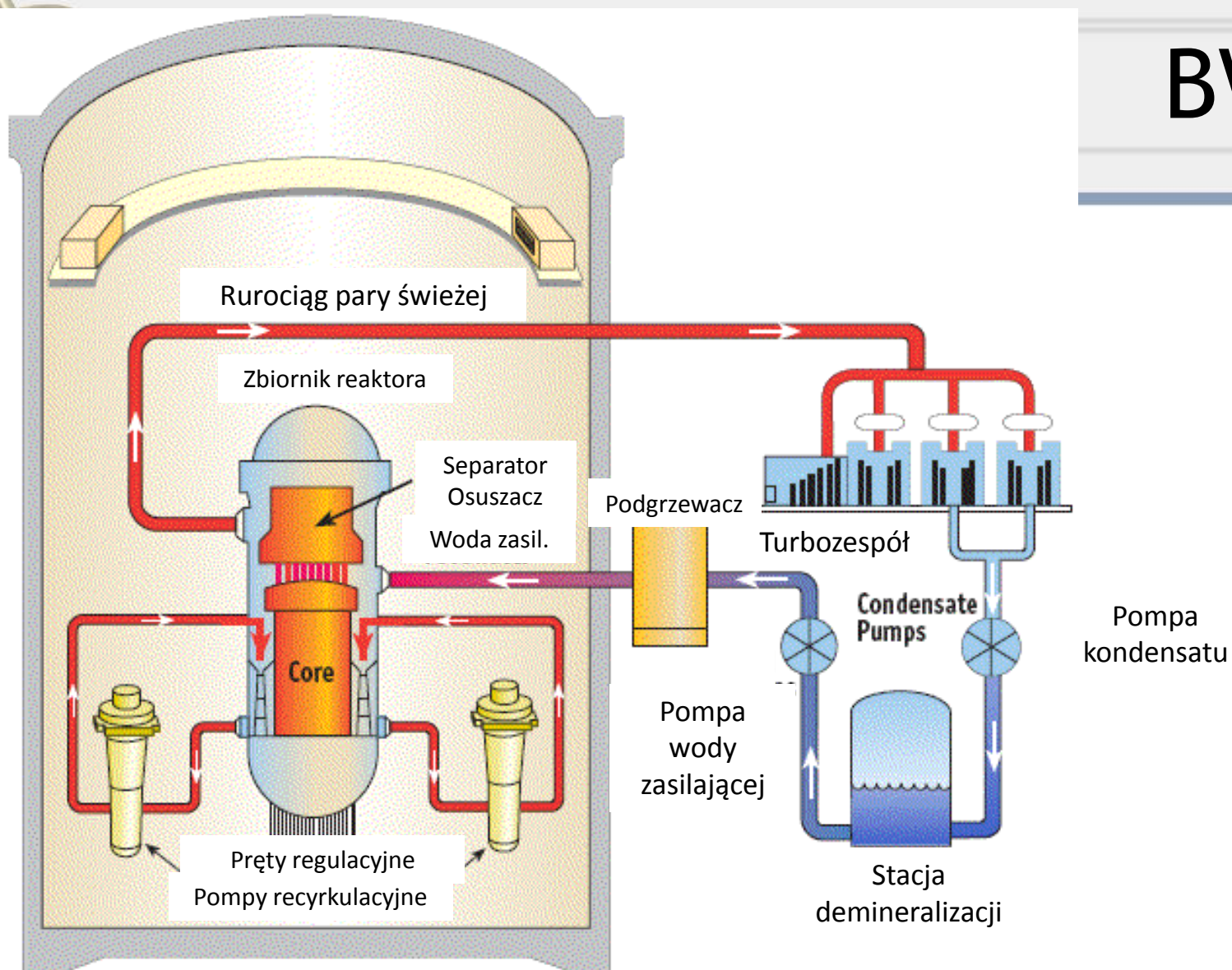


Niska sprawność  
Zagrożenie korozją wskutek  
stosowania kwasu borowego

# REAKTOR WODNY WRZĄCY BOILING WATER REACTOR (BWR)

- Reaktor zbiornikowy (zbiornik stalowy)
- Chłodziwo: H<sub>2</sub>O
- Moderator: H<sub>2</sub>O (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

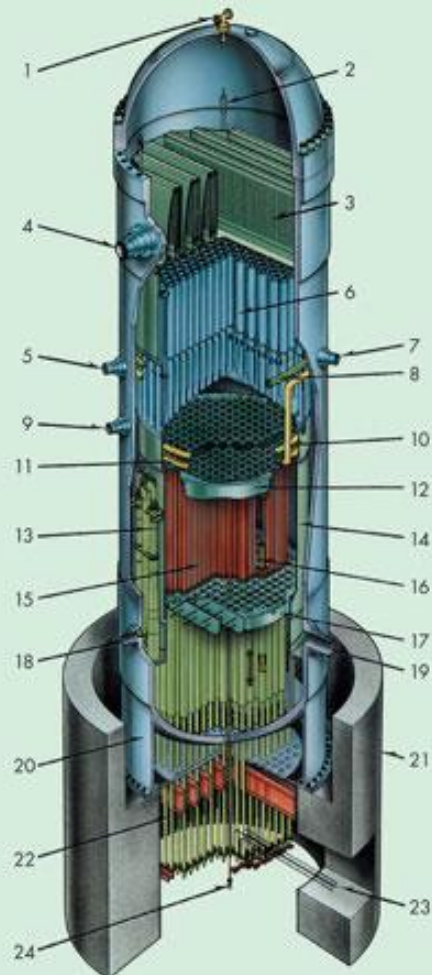
# BWR



# BWR – GENERAL ELECTRIC

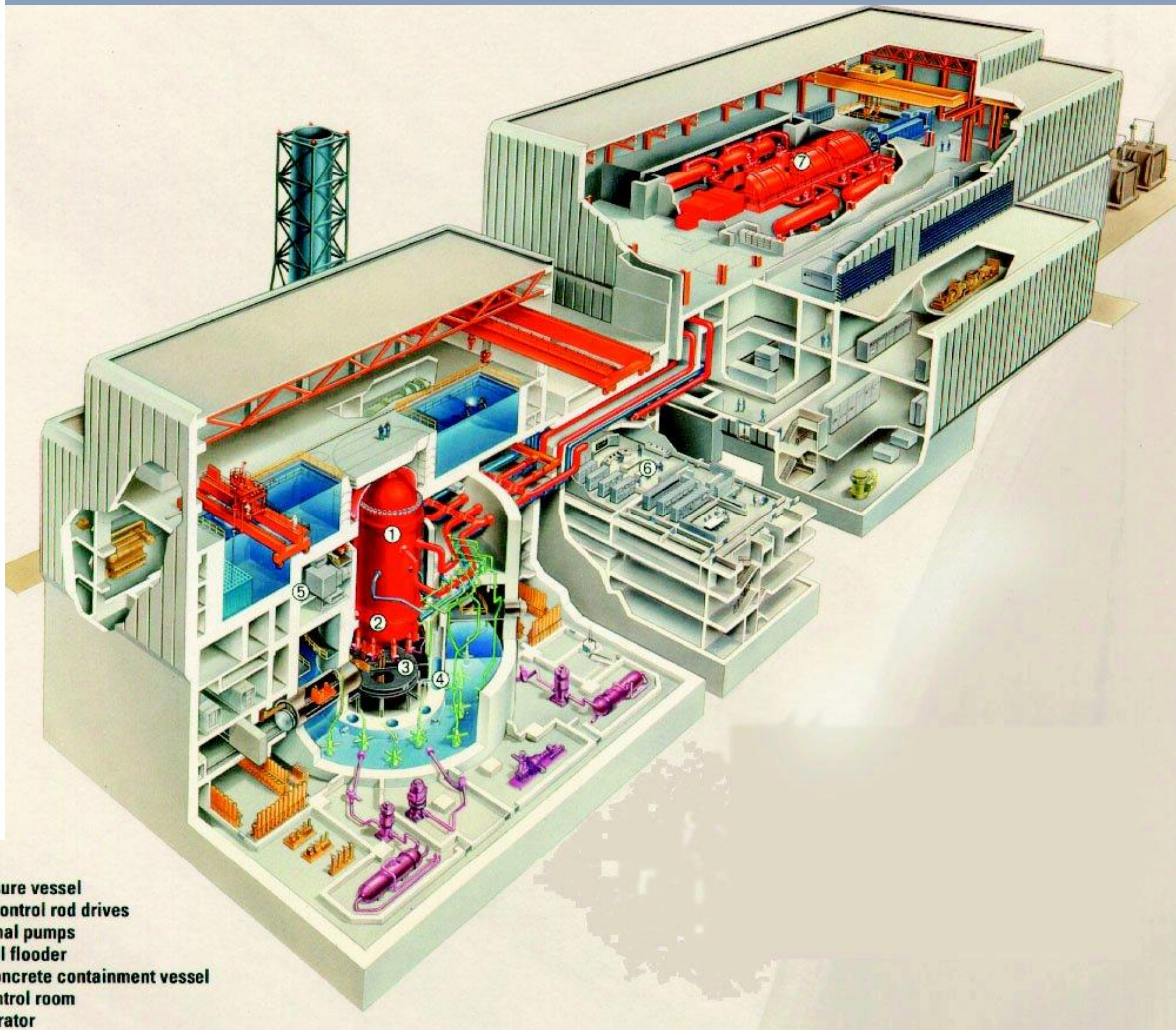
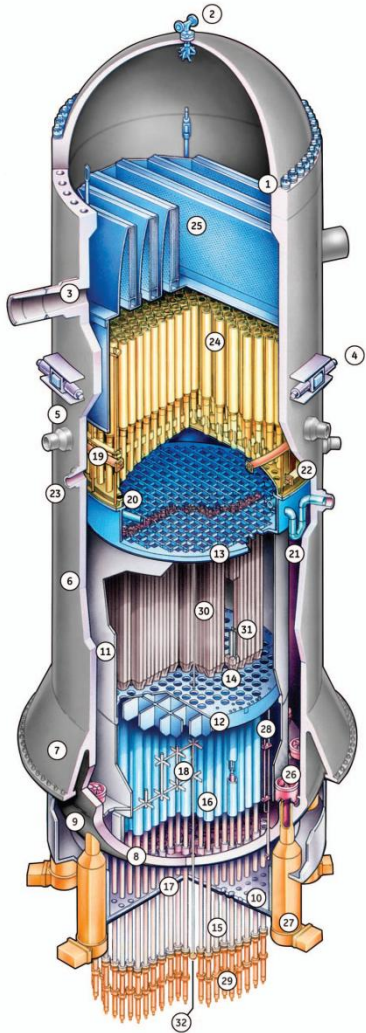
## (KERNKRAFTWERK LEIBSTADT, CHF)

Reaktoraufbau



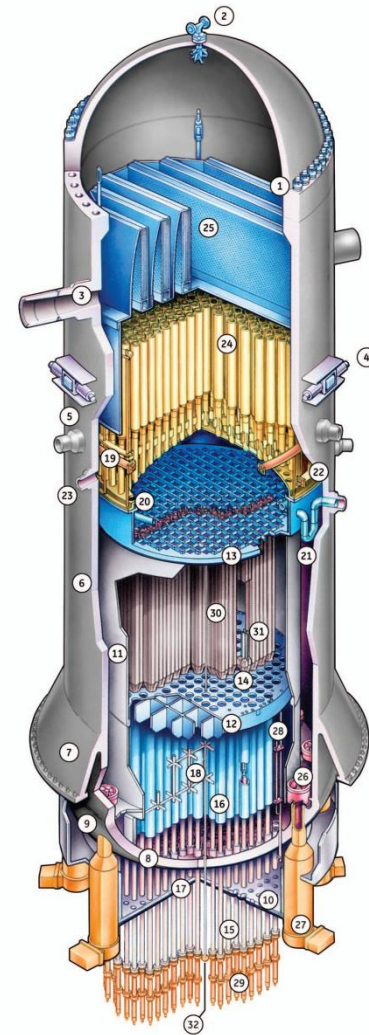
- 1 Entlüftung und Sprühleitung
- 2 Kranhaken für Dampftrockner
- 3 Dampftrockner
- 4 Frischdampfaustritt
- 5 Kernsprüheinheit
- 6 Wasserabscheider
- 7 Speiswassereintritt
- 8 Speisewasserverteiler
- 9 Niederdruckeinspeisung
- 10 Kernsprühverteilung
- 11 Kernsprühdüsenring
- 12 Oberes Kernführungsgitter
- 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

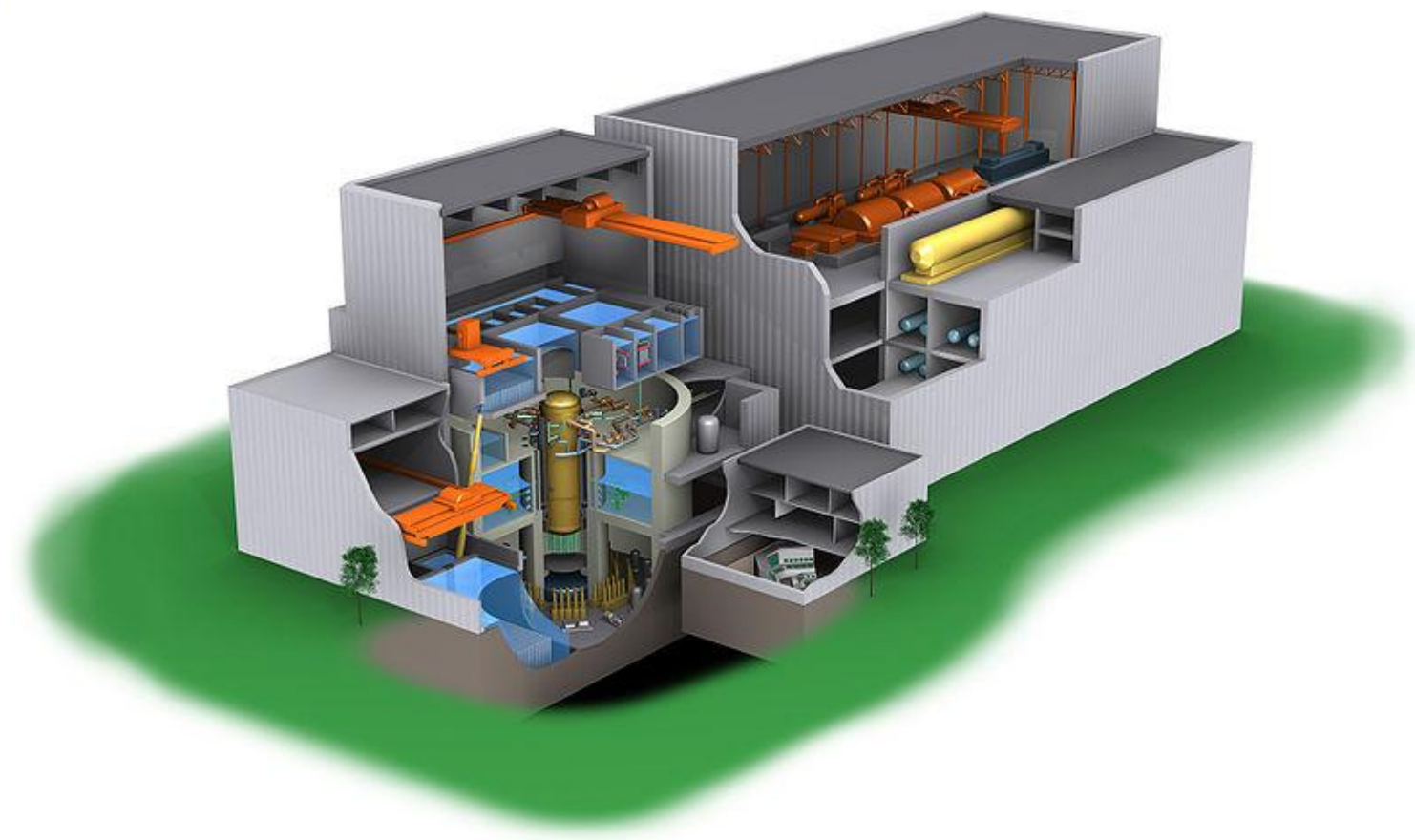


1. Reactor pressure vessel
2. Fine-motion control rod drives
3. Reactor internal pumps
4. Lower drywell flooder
5. Reinforced concrete containment vessel
6. Advanced control room
7. Turbine-generator

# GE-HITACHI ABWR



# GE-HITACHI ESBWR



# REAKTORY WODNE WRZĄCE BWR

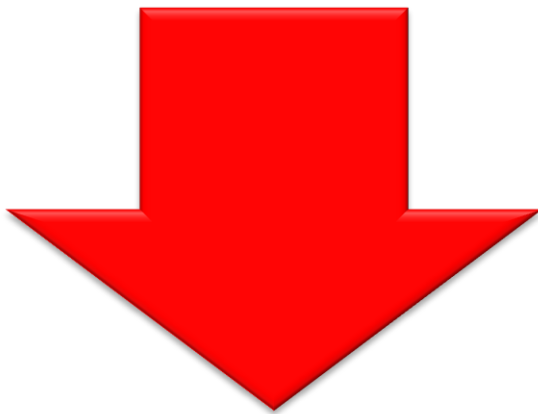


Wysoka niezawodność

Rozpowszechnienie technologii

Samoczynne wygaszanie reakcji przy utracie chłodziwa

Ciśnienie w reaktorze niższe niż dla PWR



Niska sprawność

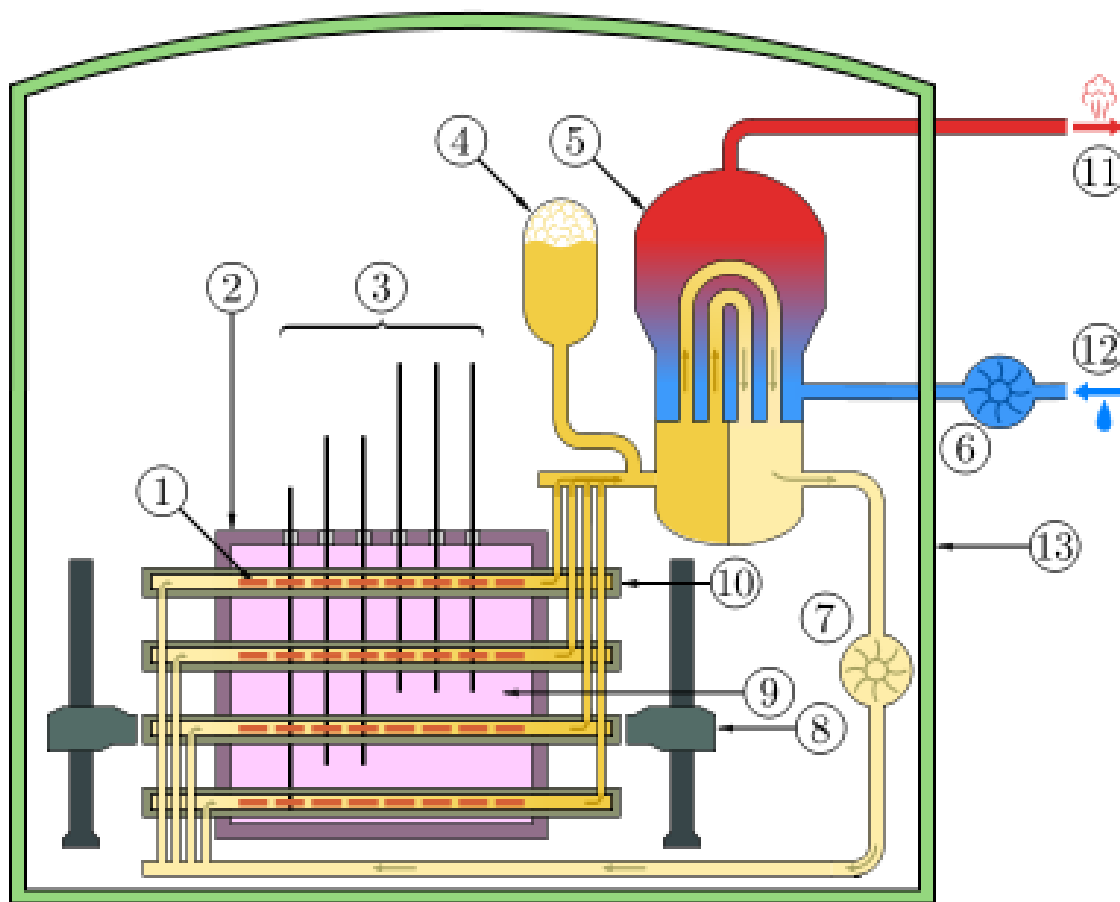
Radioaktywny czynnik roboczy w turbinie

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)

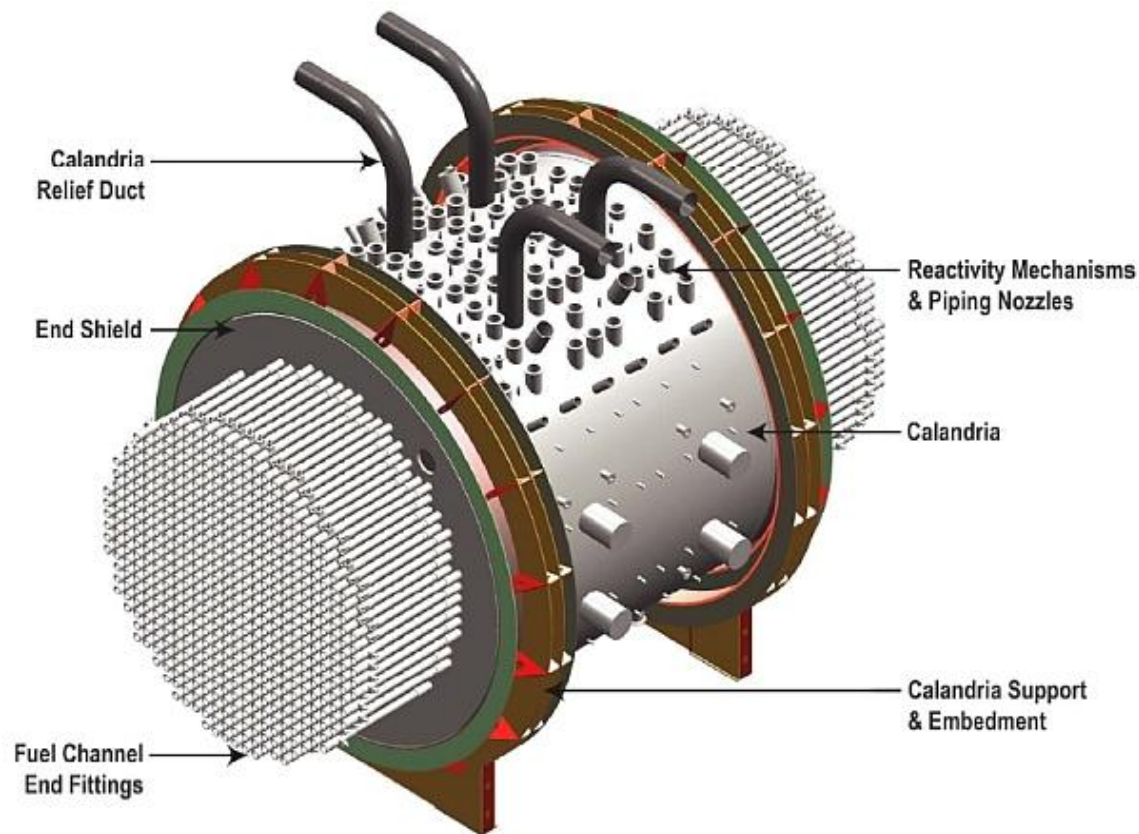
# REAKTOR CIŚNIENIOWY CIĘŻKOWODNY CANDU (CANADIAN DEUTERIUM URANIUM)



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



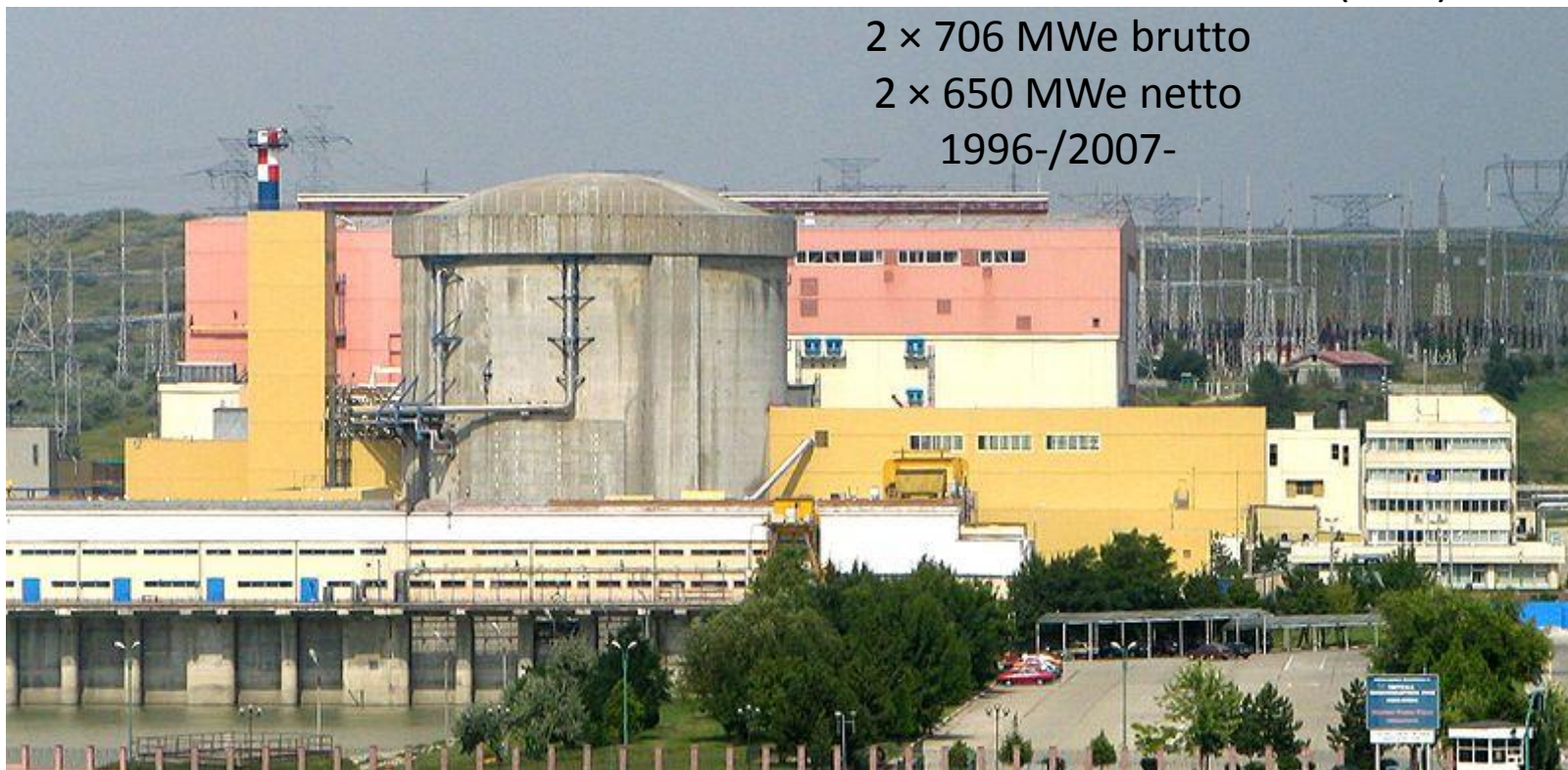
# REAKTOR CIŚNIENIOWY CIĘŻKOWODNY CANDU

Centrala Nucleară de la Cernavodă (ROU)

2 × 706 MWe brutto

2 × 650 MWe netto

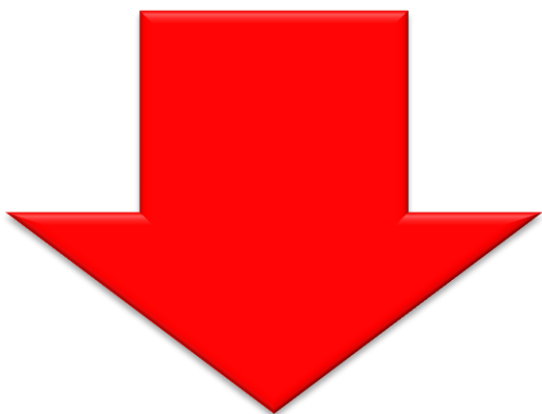
1996-/2007-



# REAKTOR CIŚNIENIOWY CIĘŻKOWODNY



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



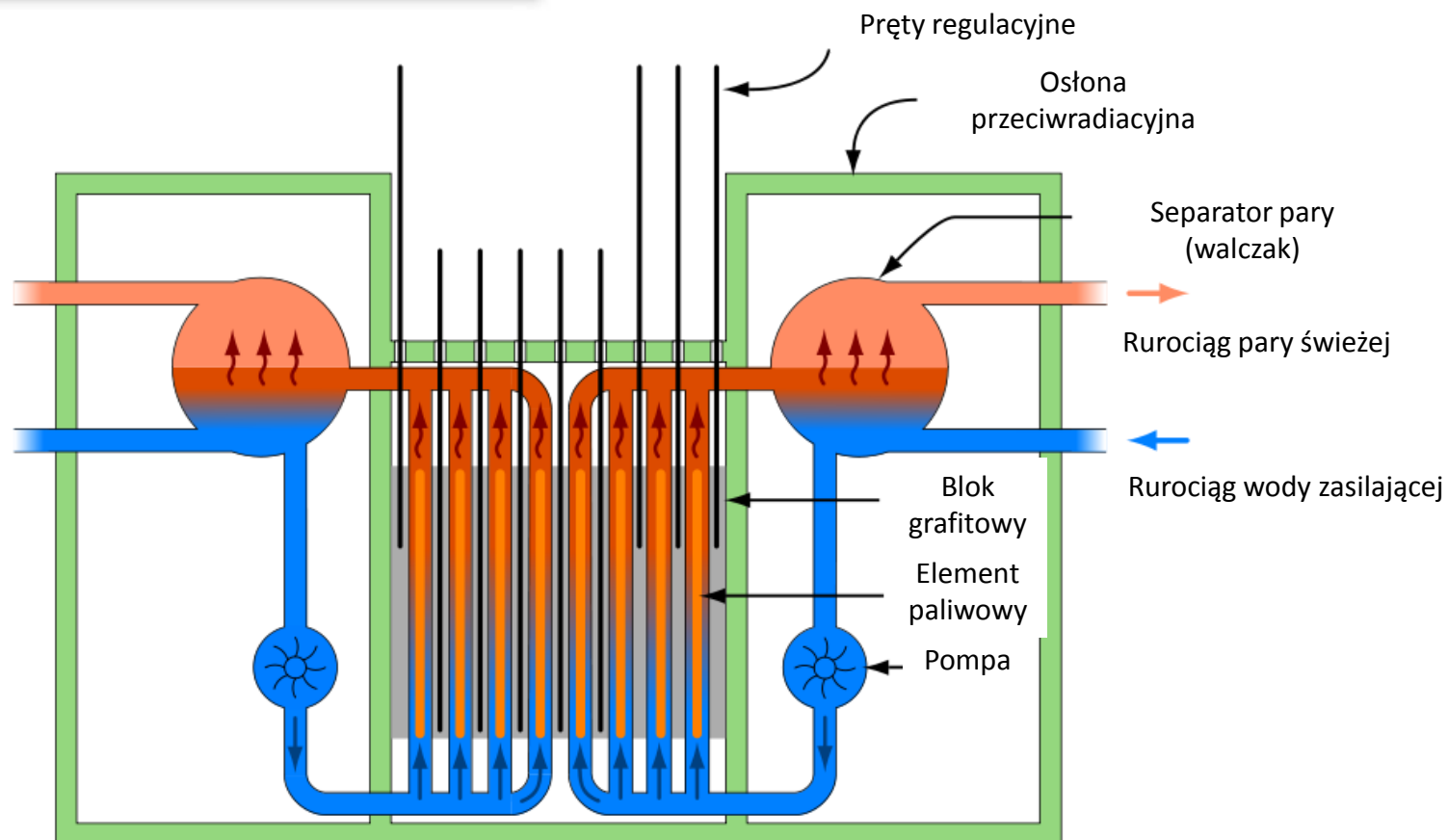
- Niska sprawność
- Duża objętość rdzenia
- Przecieki – duża liczba połączeń
- Konieczność wytwarzania ciężkiej wody

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

- Reaktor kanałowy
- Chłodziwo: H<sub>2</sub>O
- 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

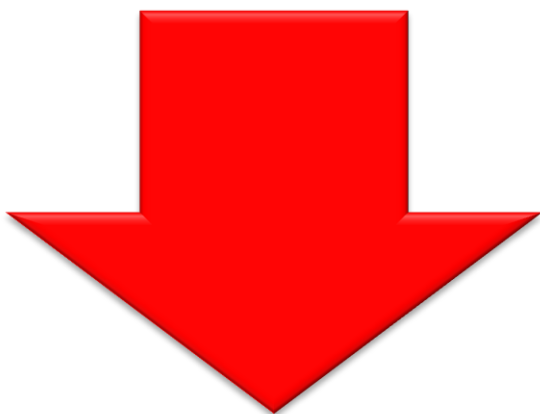
## РЕАКТОР БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ КАНАЛЬНЫЙ (RBMK)



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)

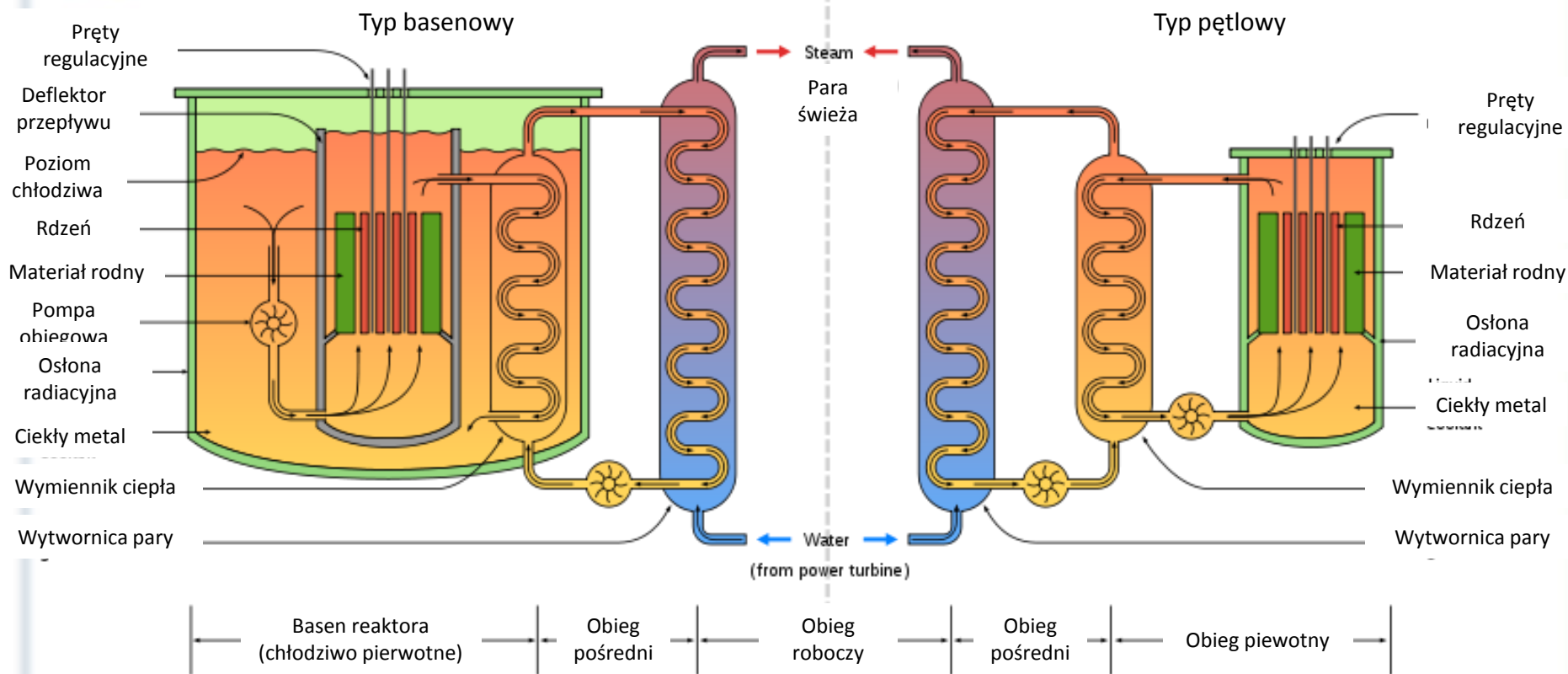
# REAKTOR PRĘDKI POWIELAJĄCY FAST BREEDER REACTOR (FBR)

- Reaktor basenowy lub zbiornikowy
- Chłodziwo: ciekły Na (ew. Bi-Pb)
- Moderator: brak
- Paliwo: MOX –  $\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$
- Układ trójbiegowy
  - Obieg pierwotny, ciekły metal, aktywny,  $400\div 600^\circ\text{C}$
  - Obieg pośredni, ciekły metal, nieaktywny
  - Obieg wtórny, wodno-parowy, turbina parowa,  $550^\circ\text{C}$ , 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-



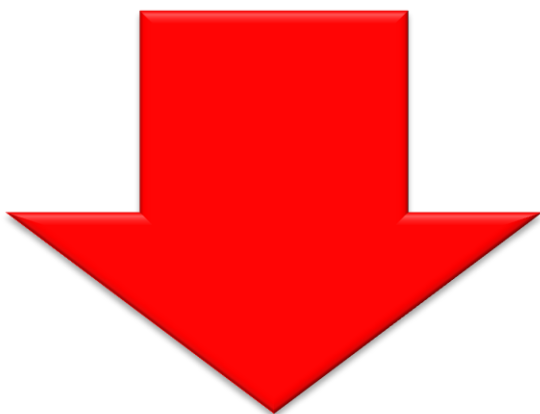


# REAKTOR PRĘDKI POWIELAJĄCY FAST BREEDER REACTOR (FBR)

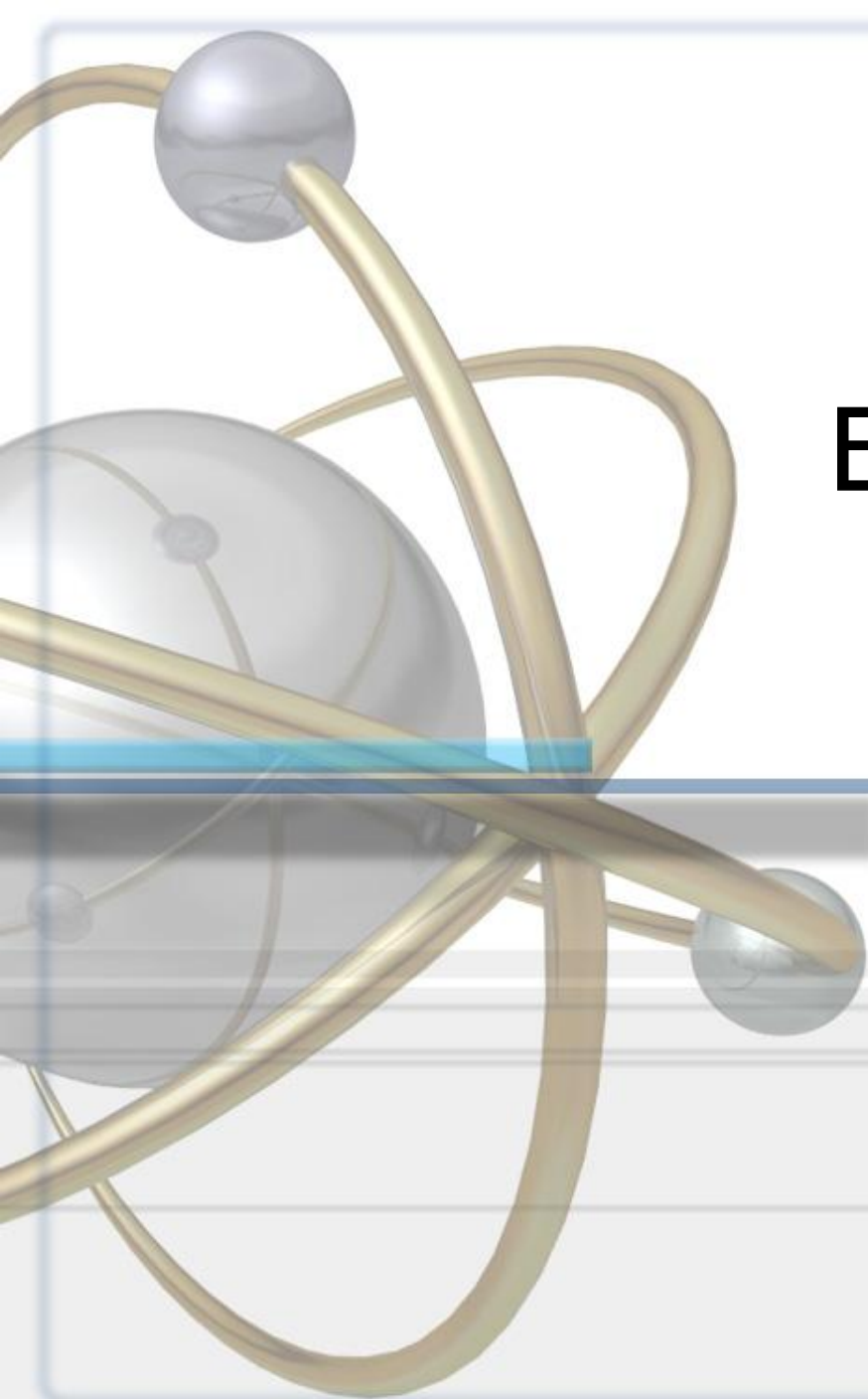


Możliwość powielania paliwa

Wysokie parametry pary –  
wysoka sprawność



Problemy technologiczne  
wynikające z zastosowanego  
chłodziwa



# ENERGETYKA JĄDROWA DZIŚ I JUTRO

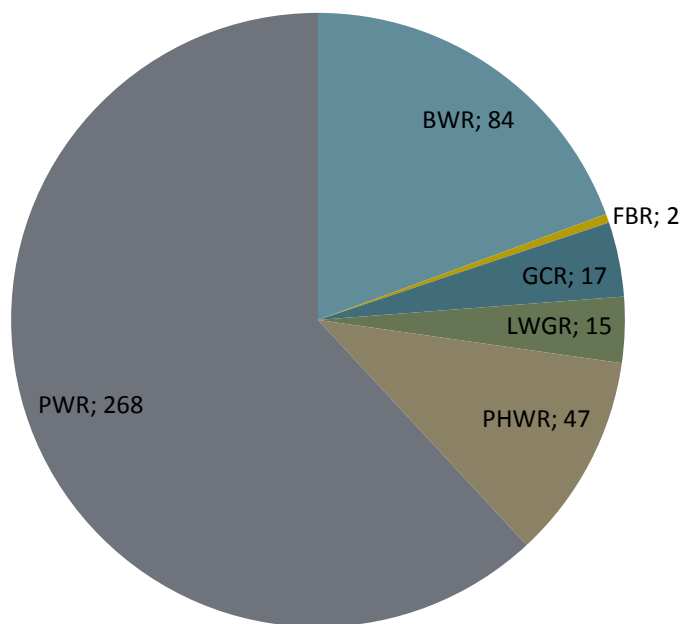
Adam Jerzy Rajewski  
Zakład Termodynamiki  
Instytut Techniki Ciepłej  
Politechnika Warszawska

# ENERGETYKA JĄDROWA DZIŚ

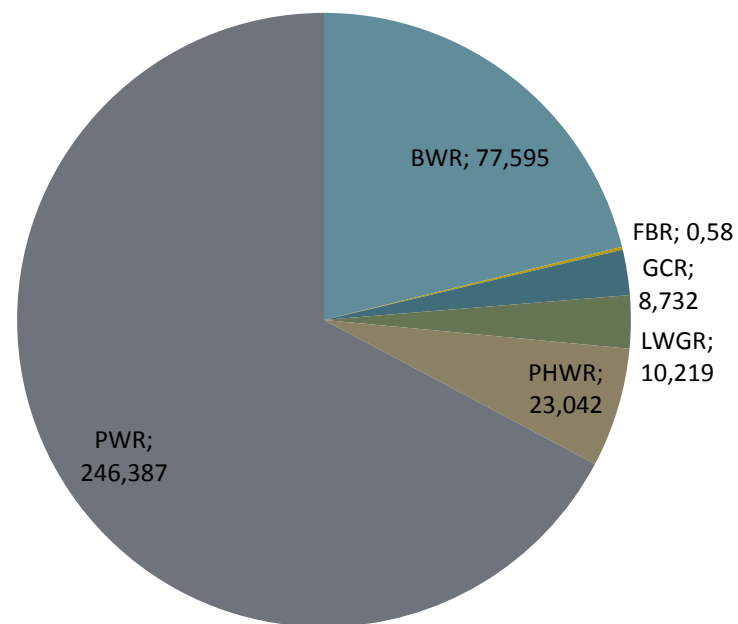
- 433 pracujące bloki jądrowe w 31 krajach
- łączna moc zainstalowana 366 GWe
- 5 bloków długoterminowo wyłączonych
- 65 bloków w budowie

# ENERGETYKA JĄDROWA DZIŚ

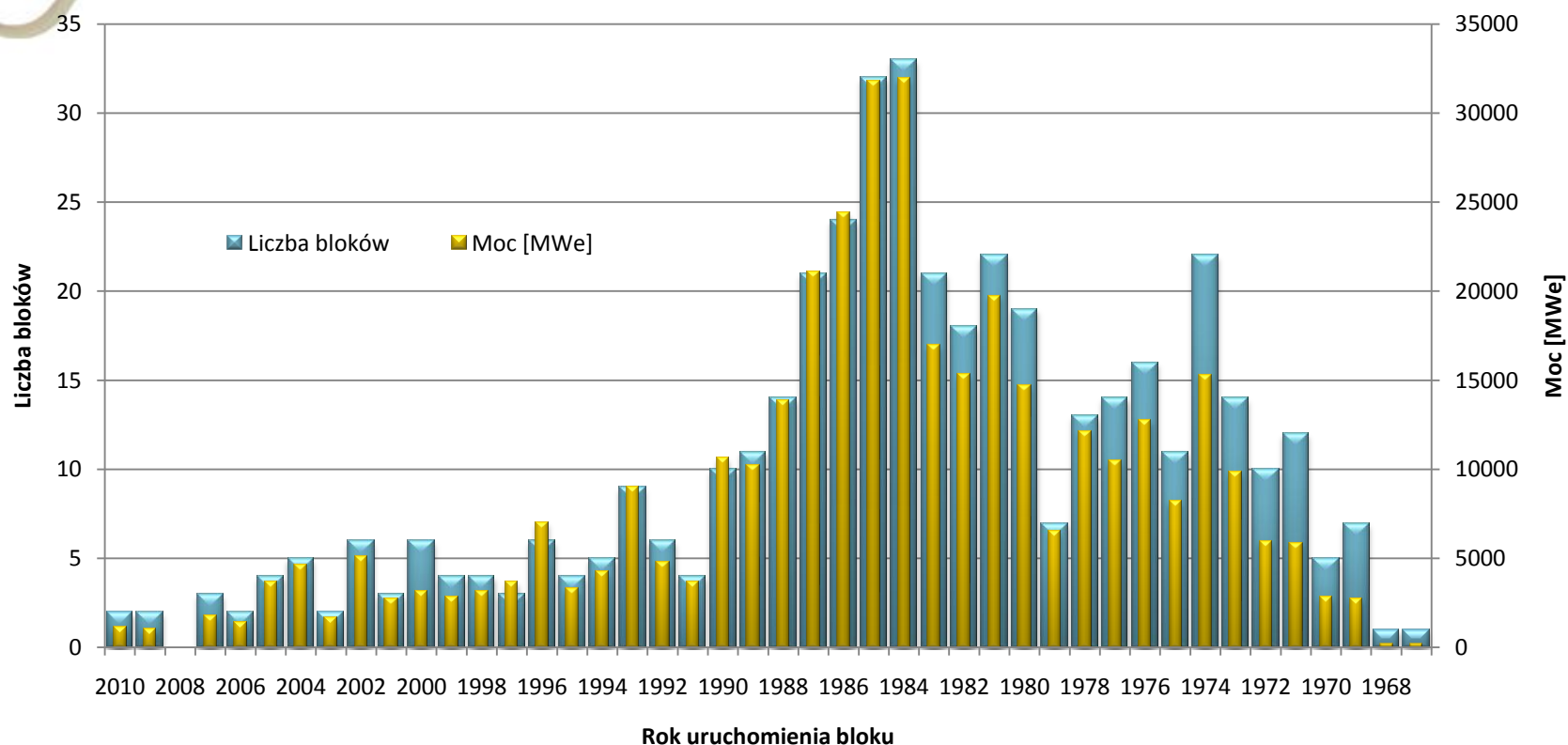
Liczba bloków



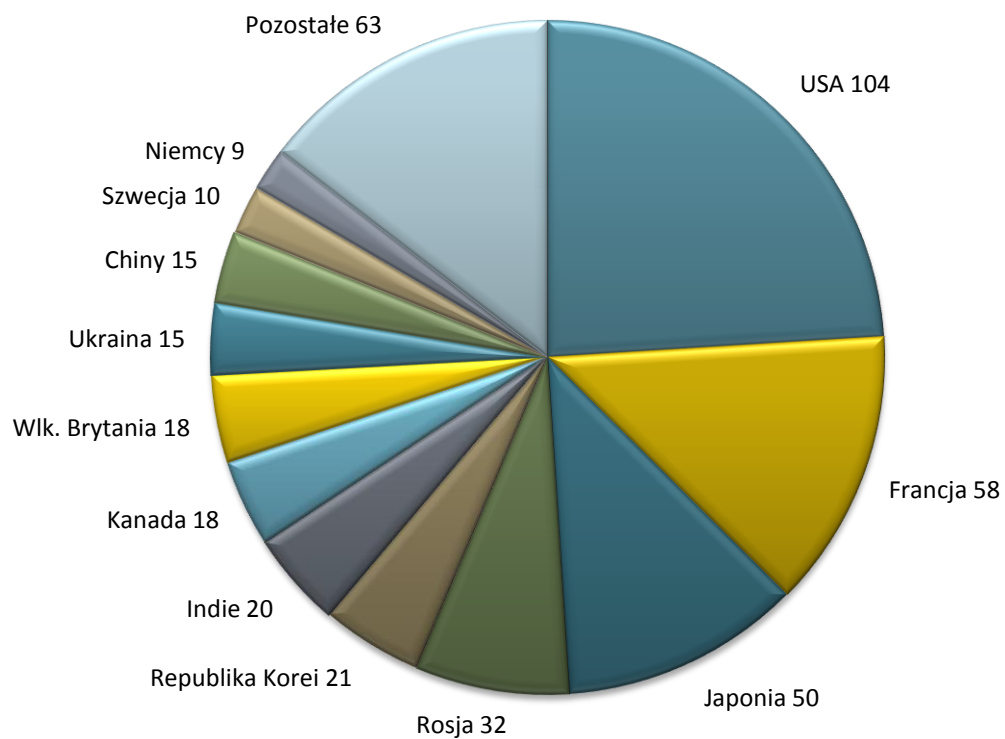
Moc zainstalowana [GWe]



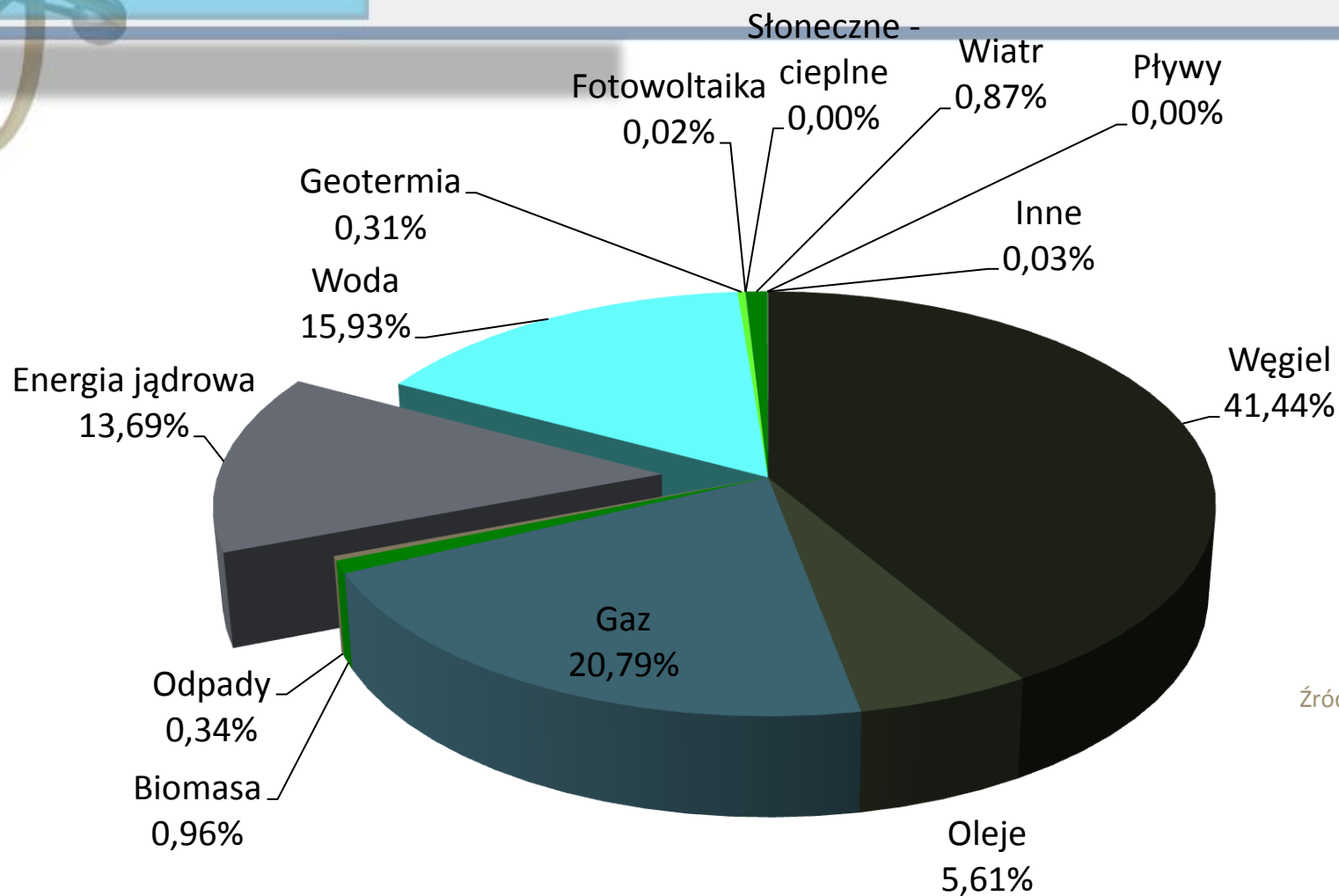
# WIEK PRACUJĄCYCH BLOKÓW JĄDROWYCH (STAN NA 2010)



# BLOKI JĄDROWE NA ŚWIECIE

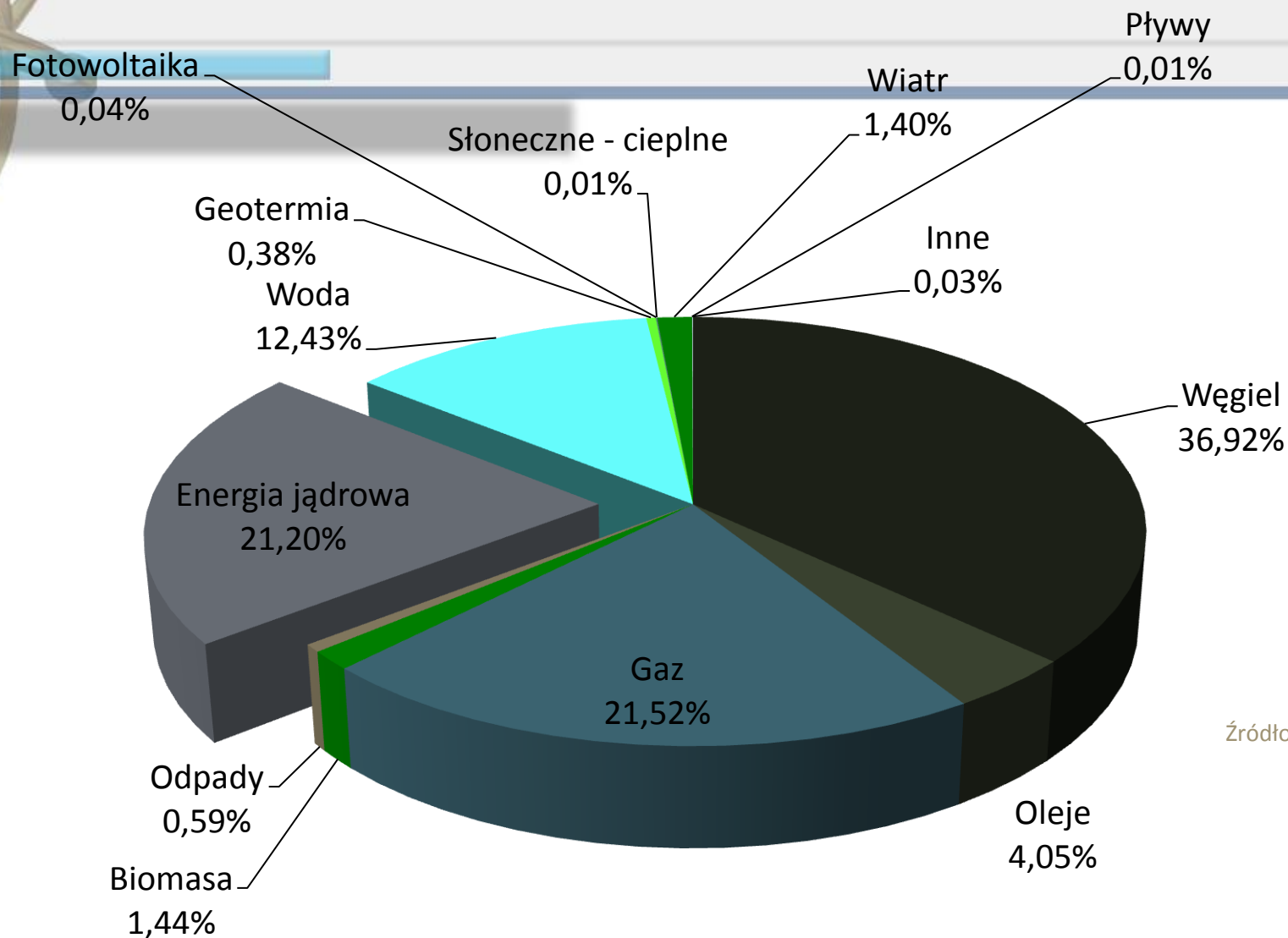


## Produkcja energii elektrycznej na świecie (2007)



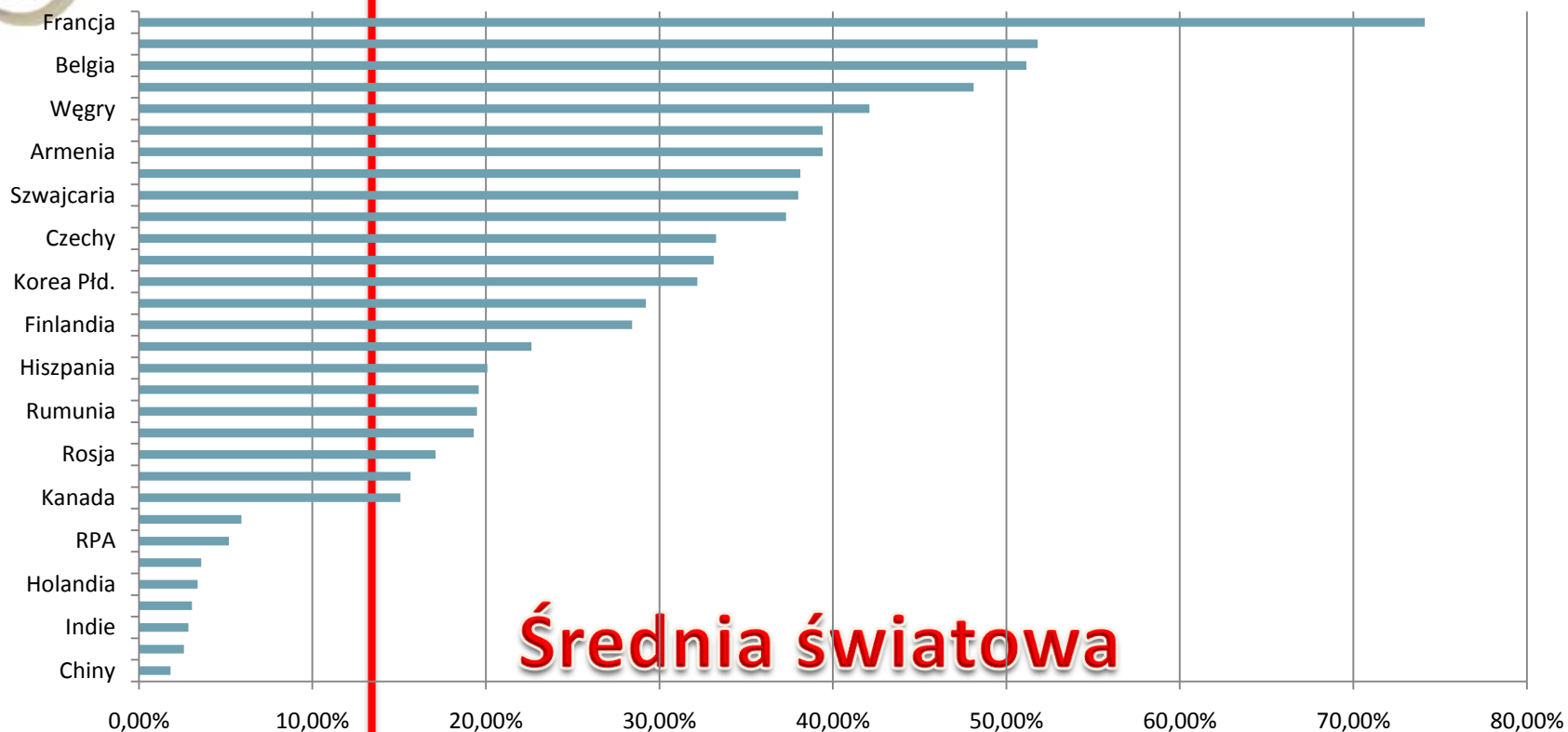
Źródło: IEA, 2010

# Produkcja energii elektrycznej w krajach OECD (2007)

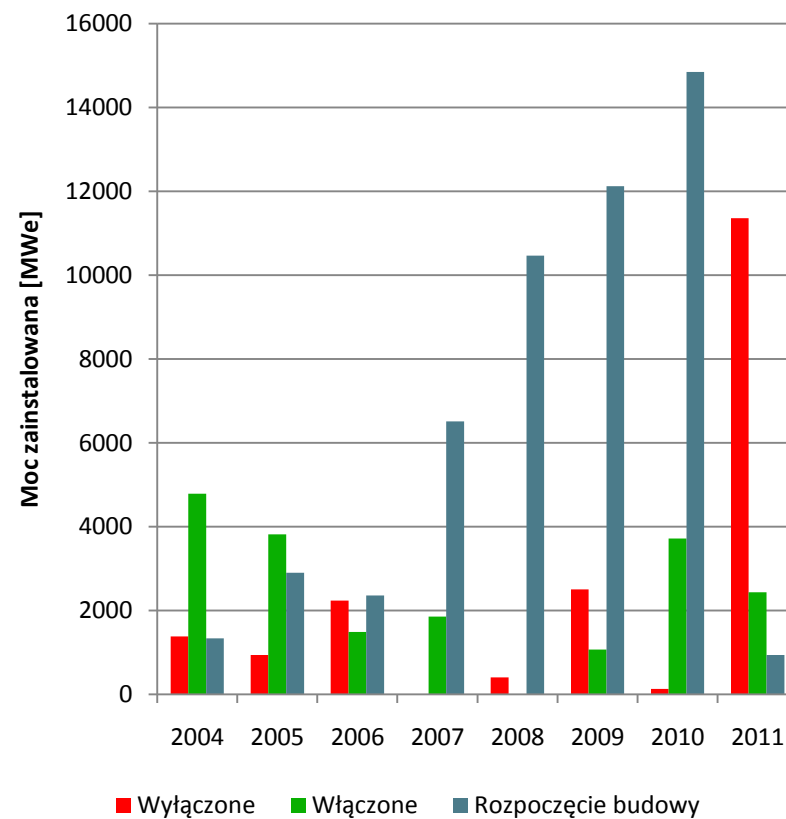
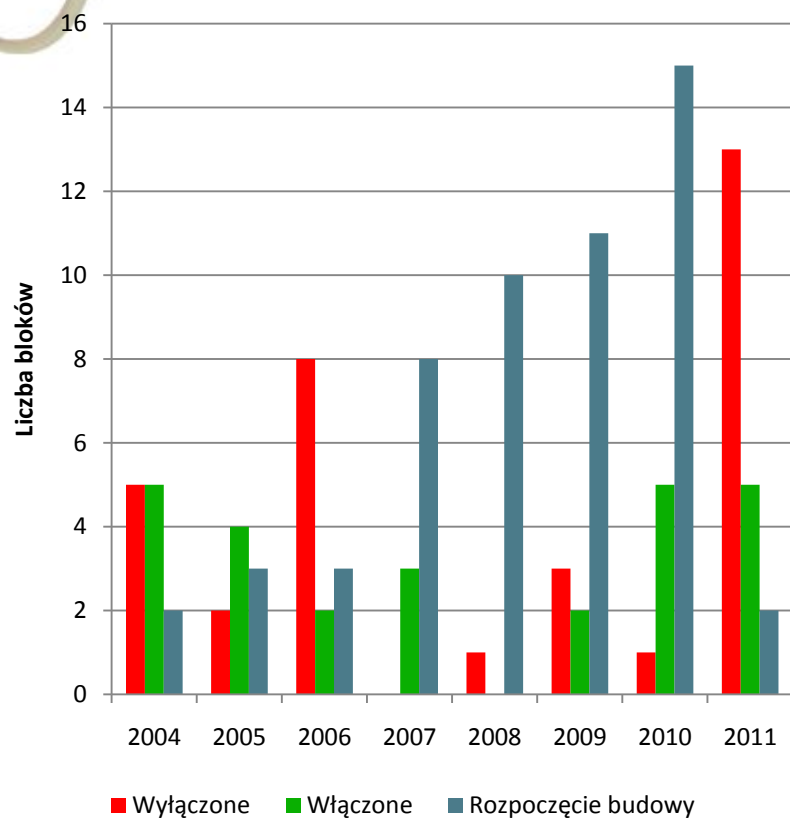


Źródło: IEA, 2010

# ENERGETYKA JĄDROWA W KRAJOWYM SYSTEMIE ENERGETYCZNYM (2010)



# WŁĄCZENIA I WYŁĄCZENIA

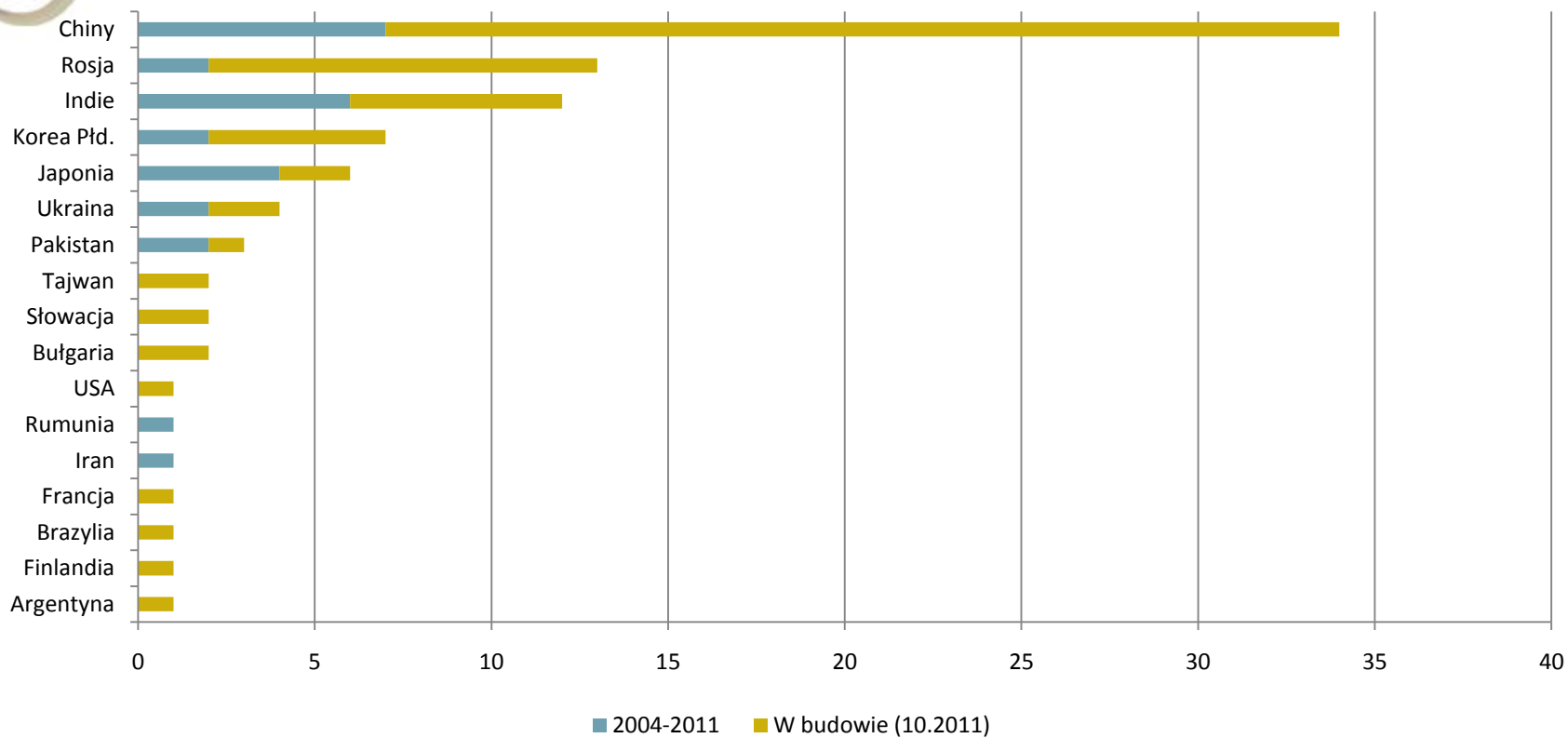




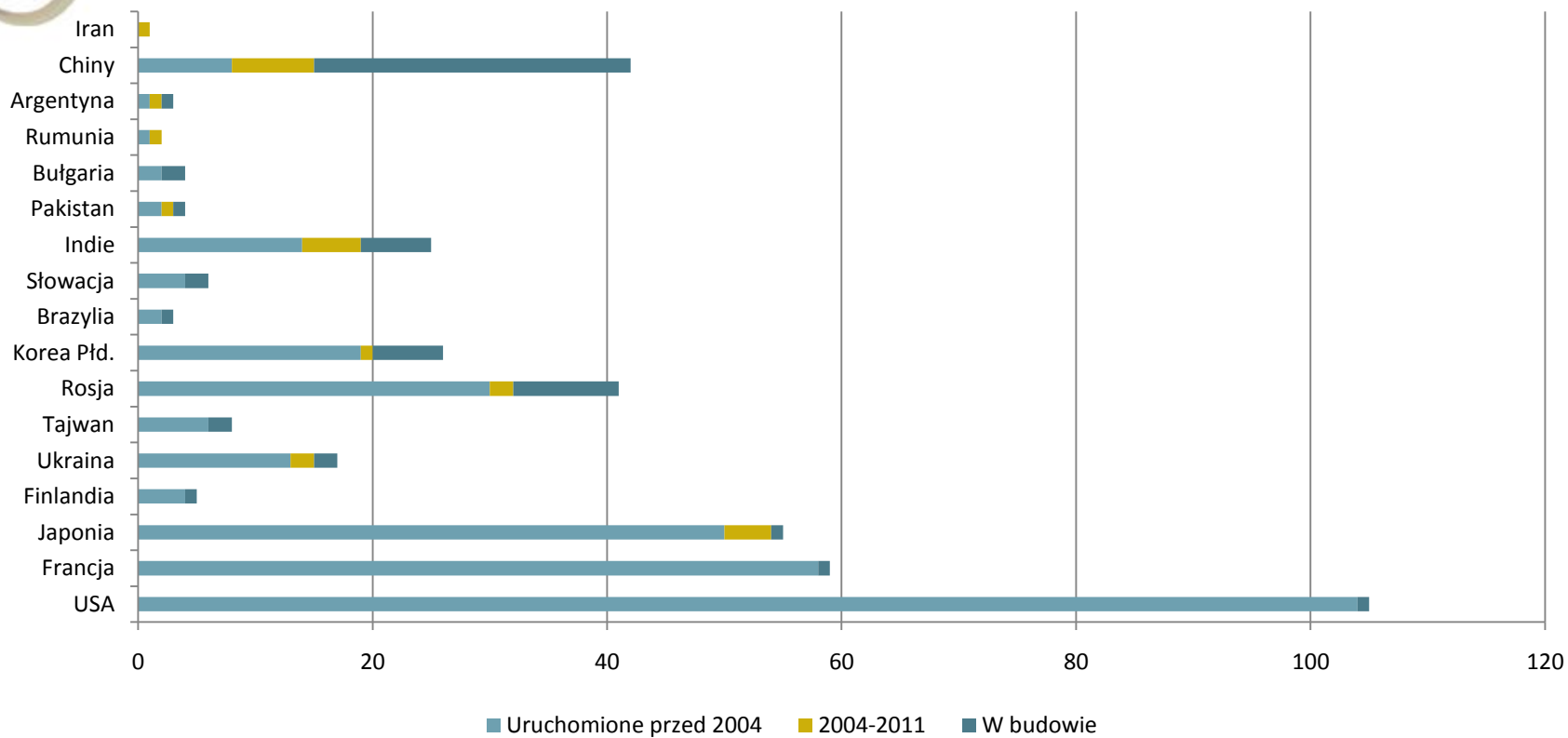
# BLOKI JĄDROWE W BUDOWIE

- $4 \times \text{BWR}$
- $2 \times \text{FBR}$
- $1 \times \text{LWGR (RBMK-1000)}$  – teoretycznie
- $4 \times \text{PHWR}$
- $54 \times \text{PWR}$  (w tym 2 w elektrowni pływającej)

# NOWE BLOKI 2004-2011



# NOWE BLOKI 2004-2011



# PWR

AREVA  
(EPR,  
Atmea)

Gidropress  
(WWER-1000,  
1500)

OKBM  
(KLT-40)

Toshiba-  
Westinghouse  
(AP-1000)

KHNP  
(APR-1400)

Mitsubishi  
(APWR,  
Atmea)

# BWR

GE-Hitachi  
(ABWR,  
ESBWR)

Areva  
(Kerena /  
SWR-1000)

Atomenergo-  
projekt  
(WK-300)

# PHWR

AECL  
(CANDU-6,  
ACR)

NPCIL, Bhavini  
(AHWR)

# FBR

OKBM  
(BN-800,  
BREST)

Bhavini

ChRL

# HTR

Eskom  
Westinghouse  
(PBMR)

General  
Atoms  
(GT-MHR)

ChRL

Areva  
(Antares)

# KIERUNKI ROZWOJU SIŁOWNI JĄDROWYCH

## Moc bloku

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

## Zwiększanie bezpieczeństwa

- Generacja III+

## Zwiększanie sprawności konwersji energii

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

## Zwiększenie stopnia wypalenia paliwa

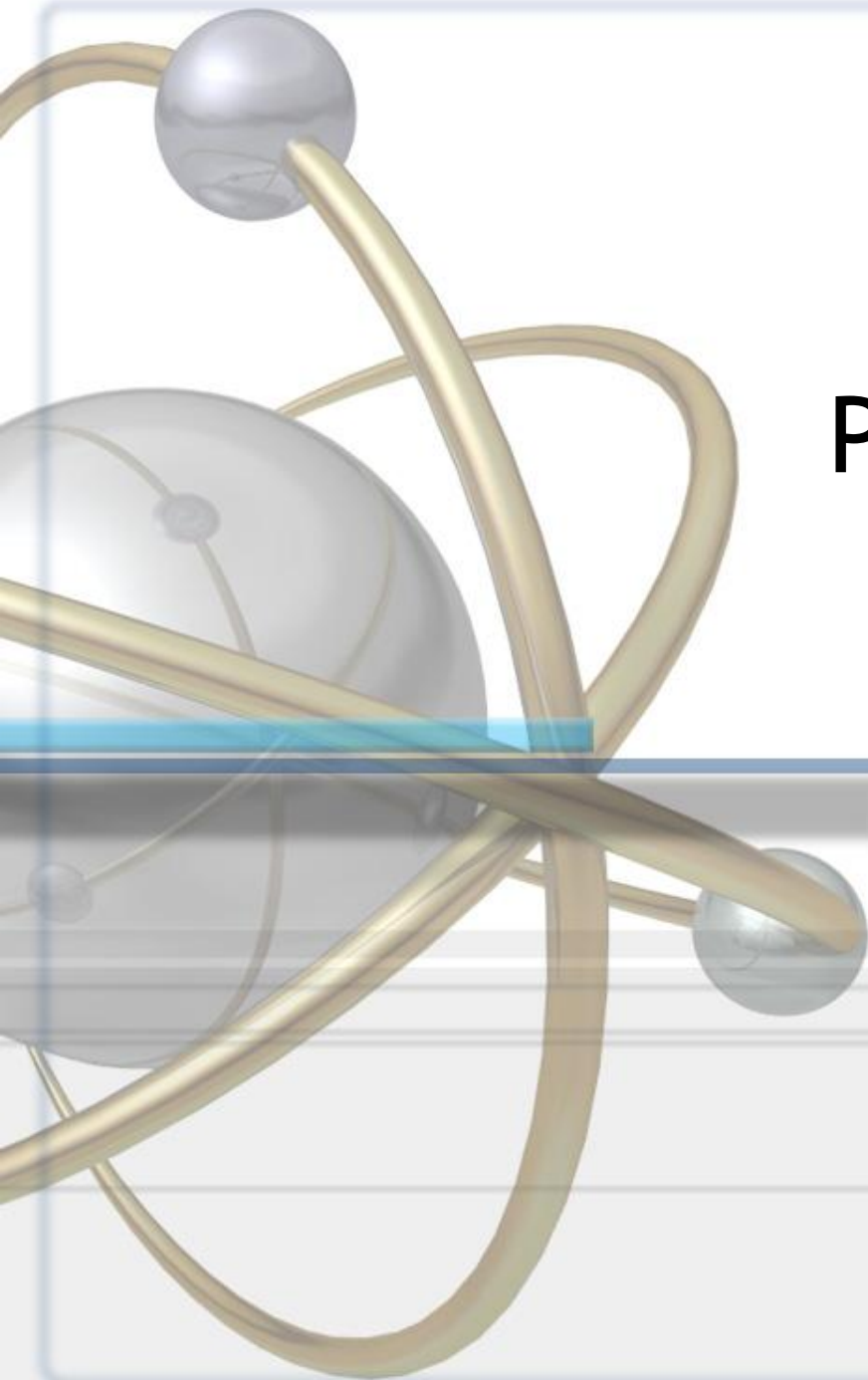
# ROZPROSZONA ENERGETYKA JĄDROWA?

## Pływające EJ (Rosja)

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

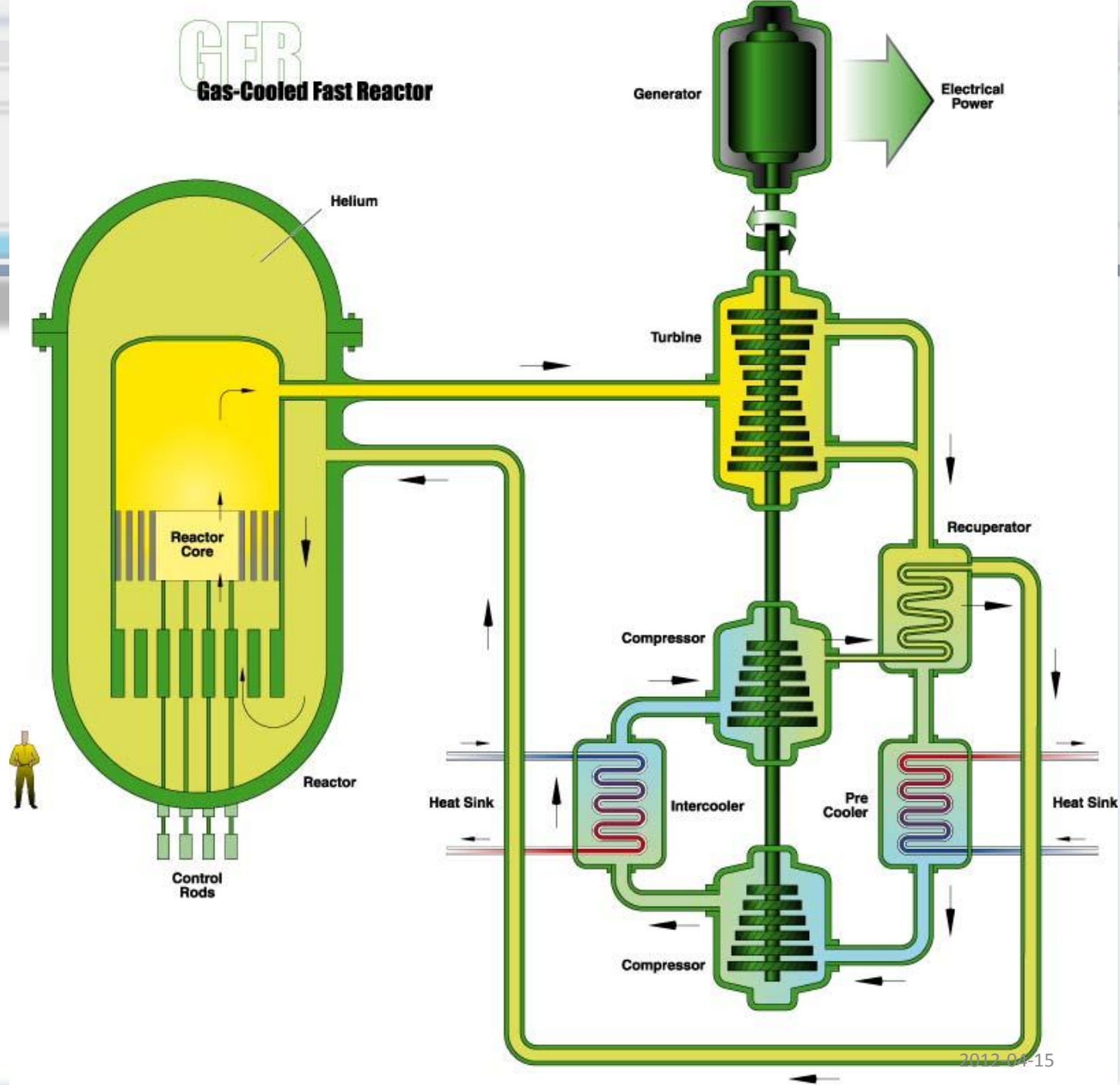
## Projekt HTGR (RPA)

- Bloki ok. 160 MWe
- Wysoka sprawność cieplna bloku (>40%)
- Obieg Braytona – turbina gazowa
- Planowana praca „podszczytowa”
- Elektrownie z wieloma małymi blokami



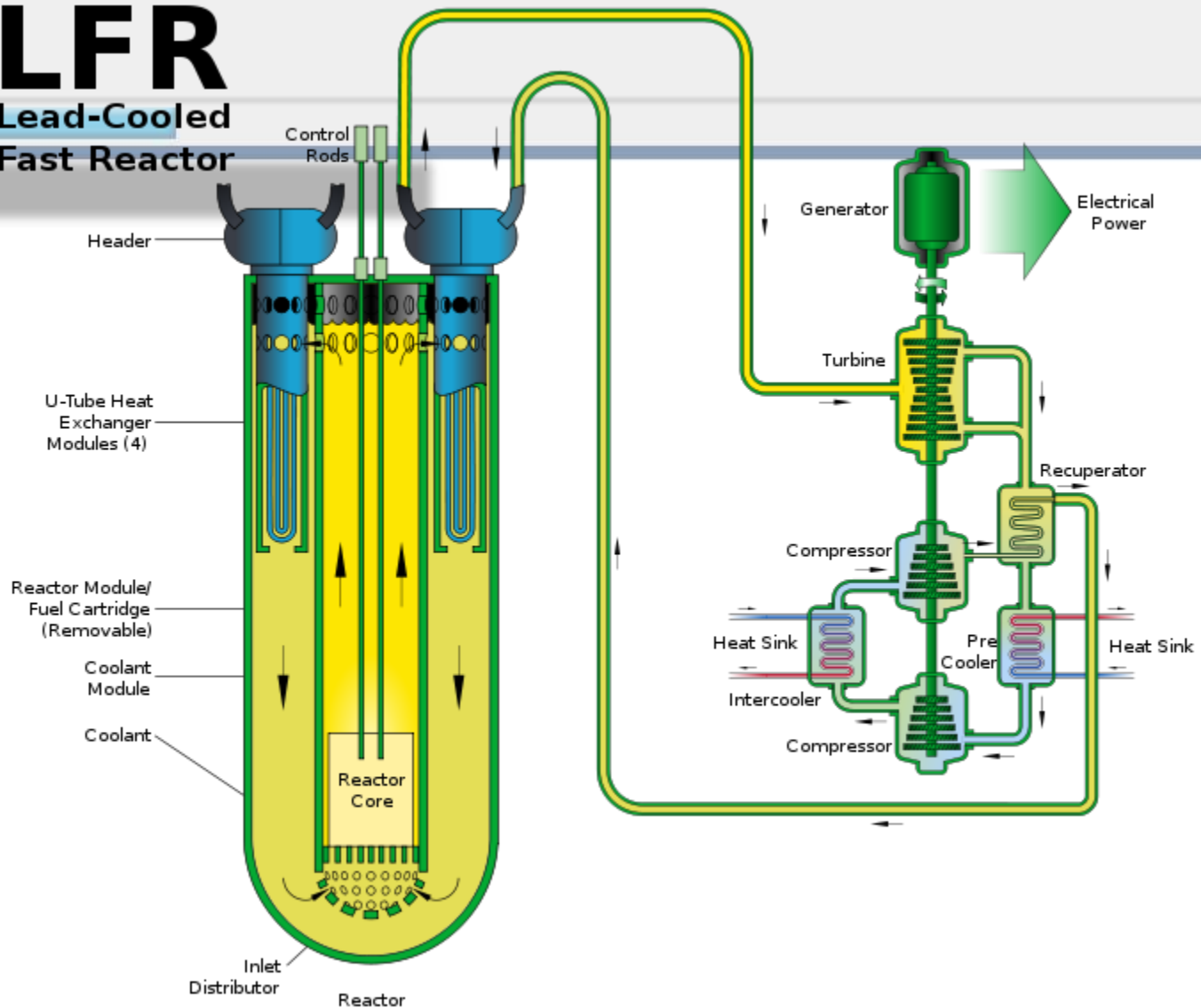
# PROJEKTY NA PRZYSZŁOŚĆ REAKTORY IV GENERACJI

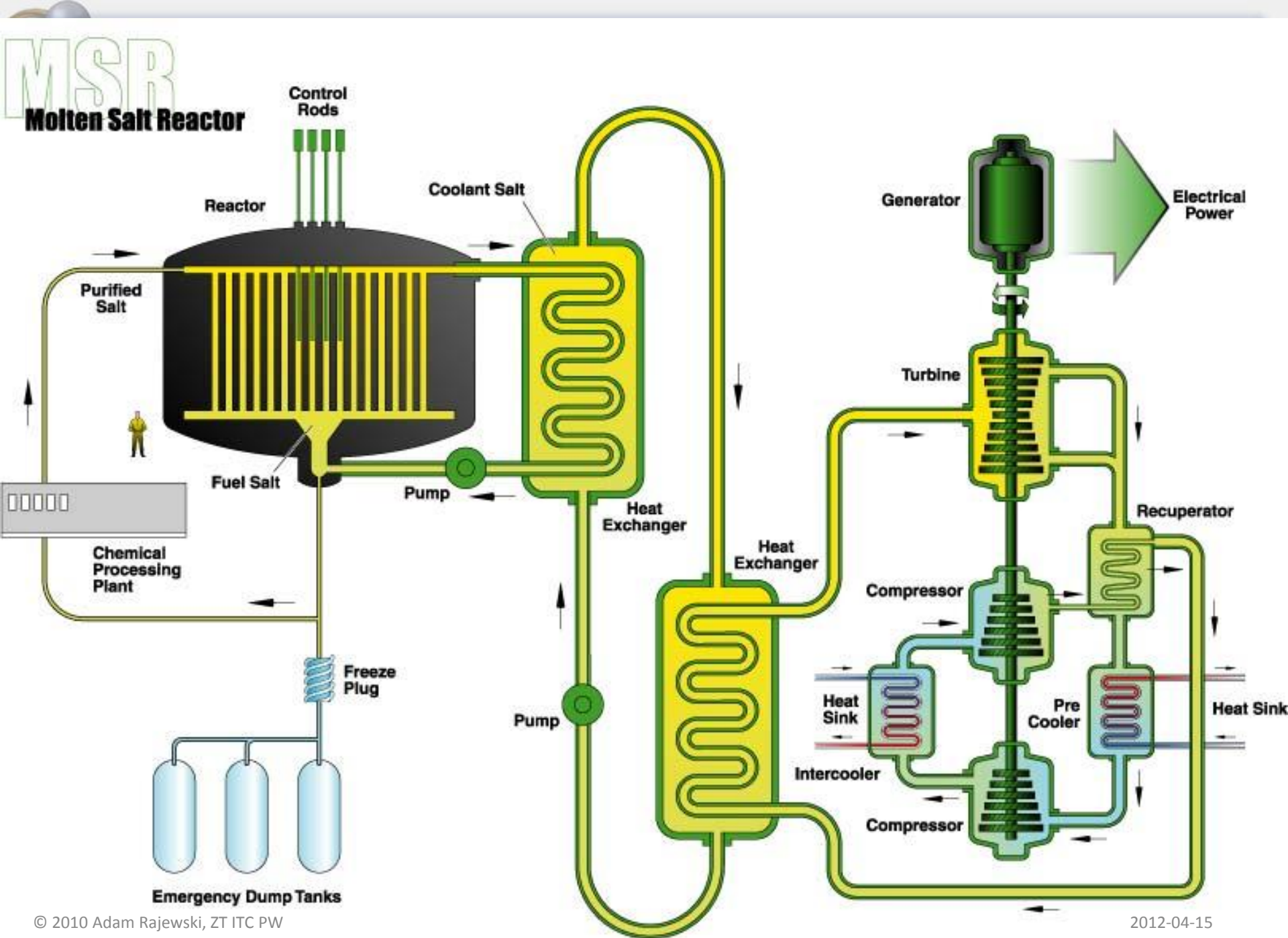
GFR

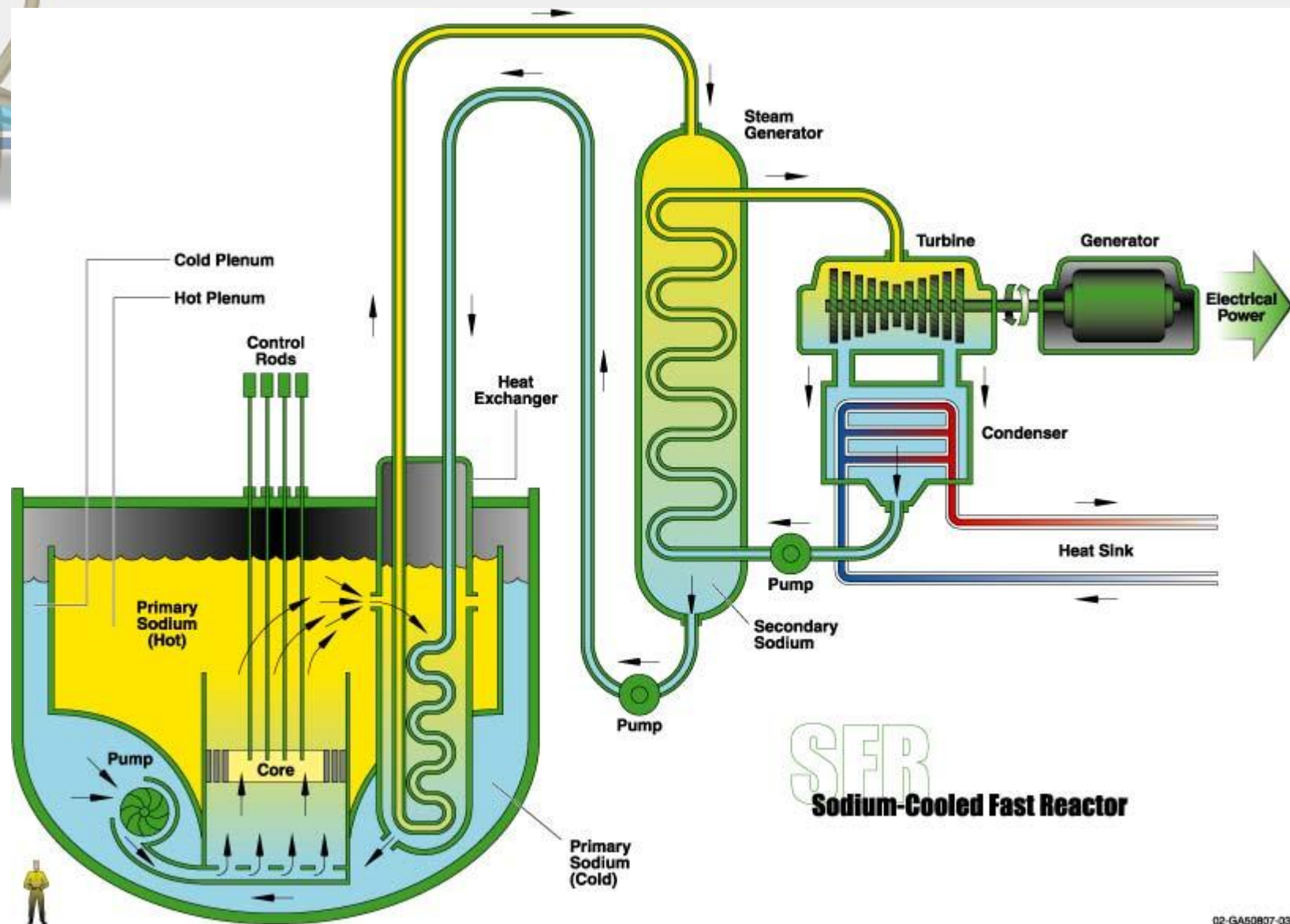
**Gas-Cooled Fast Reactor**

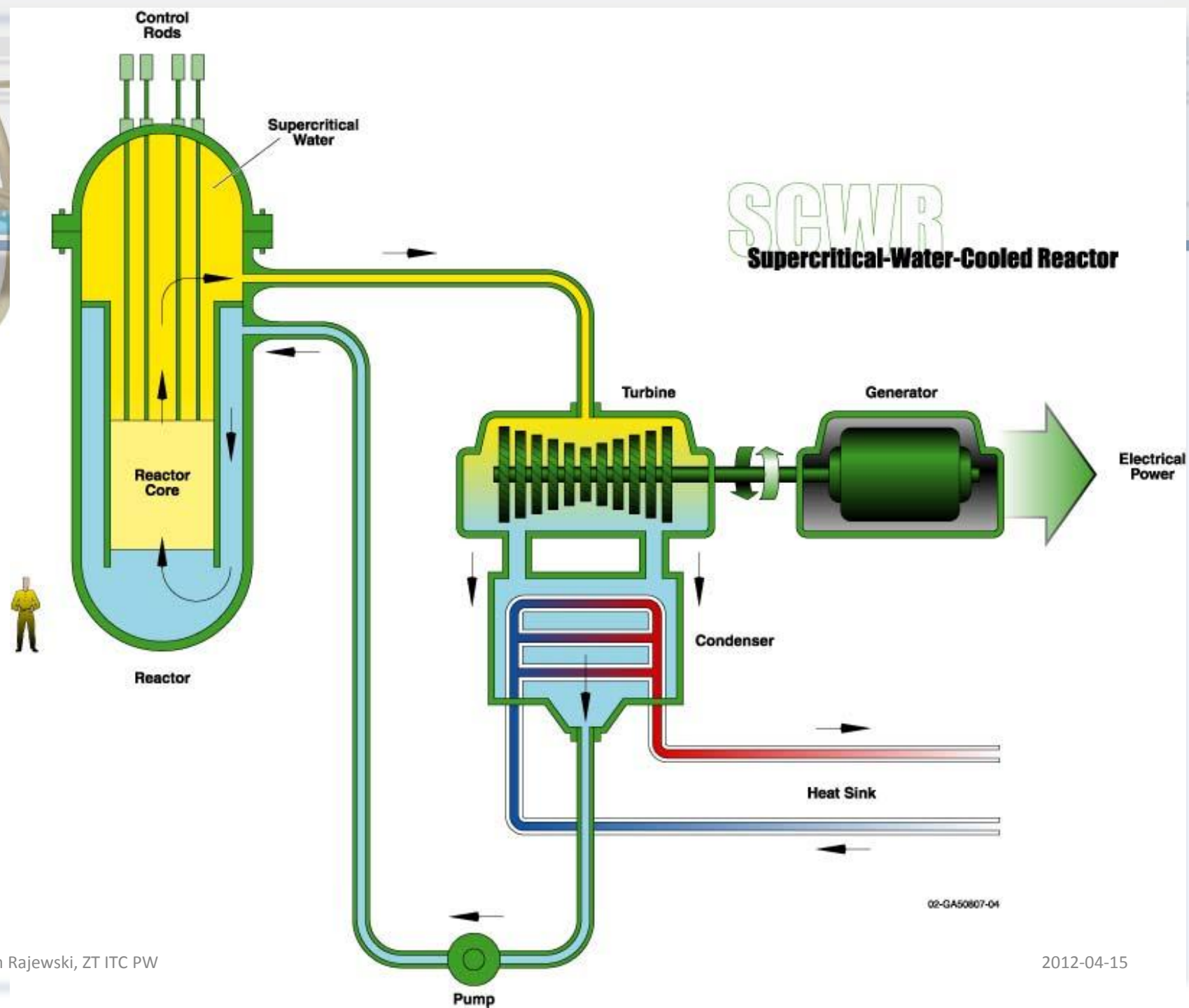
# LFR

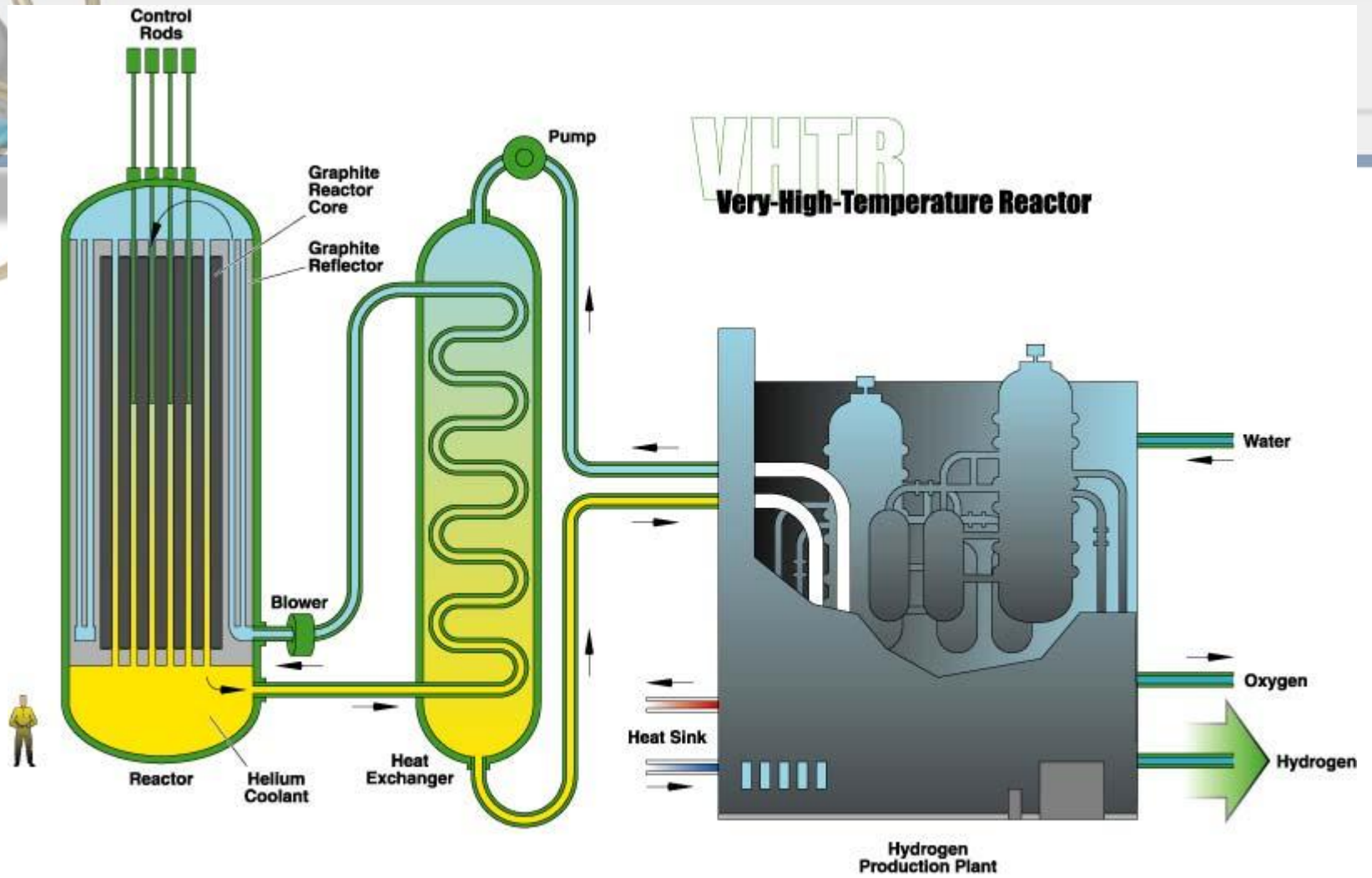
## Lead-Cooled Fast Reactor











02-GA50807-01



**DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ.**

[adam.rajewski@itc.pw.edu.pl](mailto:adam.rajewski@itc.pw.edu.pl)