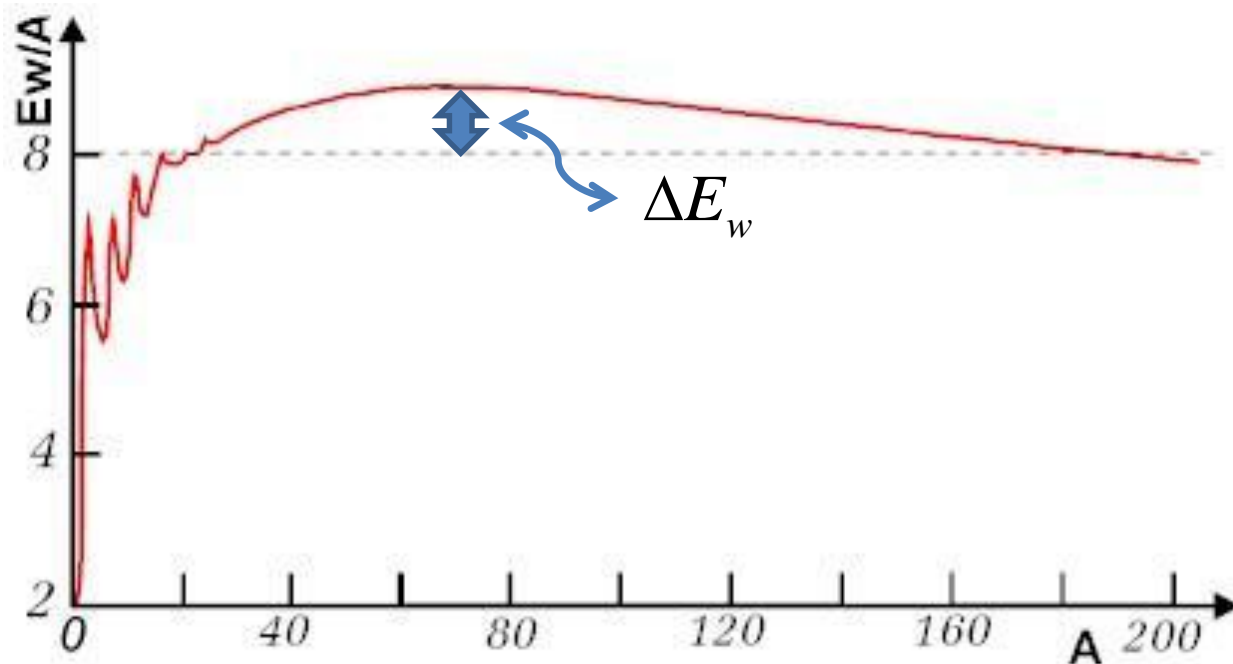


## Reakcje rozszczepienia i energetyka jądrowa

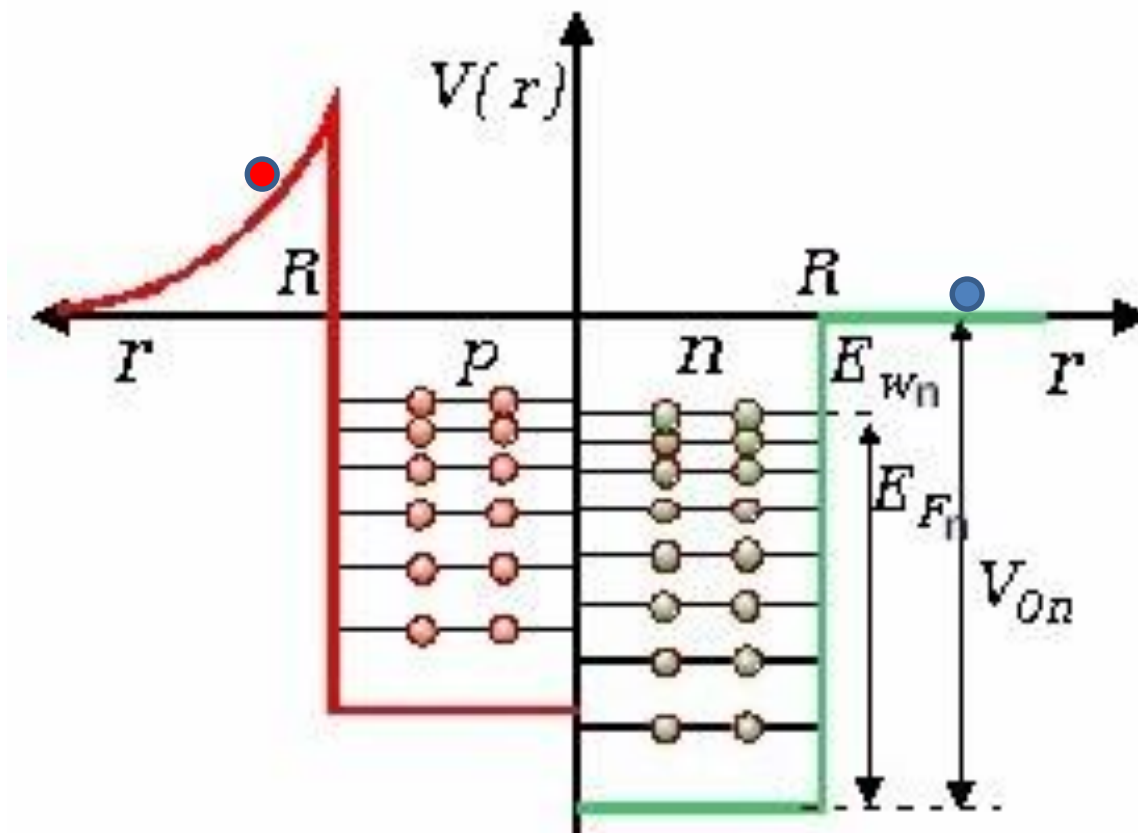
Energia wiązania nukleonu w jądrze w funkcji liczby masowej jądra A:



Warunek energetyczny – deficyt masy:

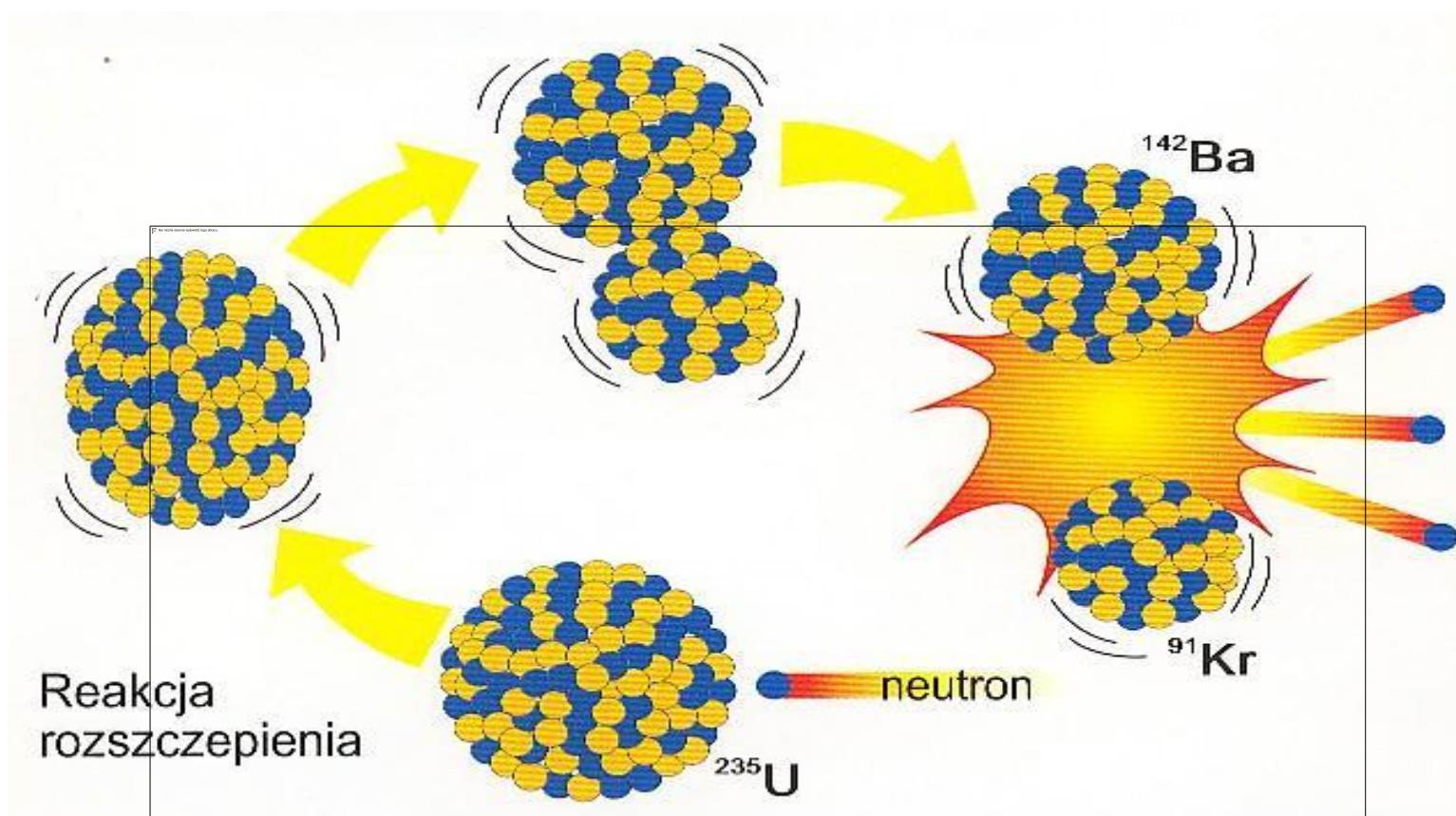
$$E_w = \Delta M \cdot c^2 = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_j) \cdot c^2$$

# Reakcja rozszczepienia

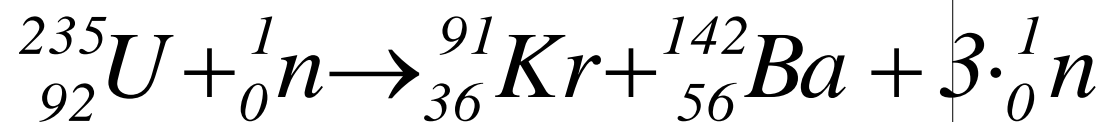


Studnia potencjału dla protonu i neutronu

# Reakcja rozszczepienia

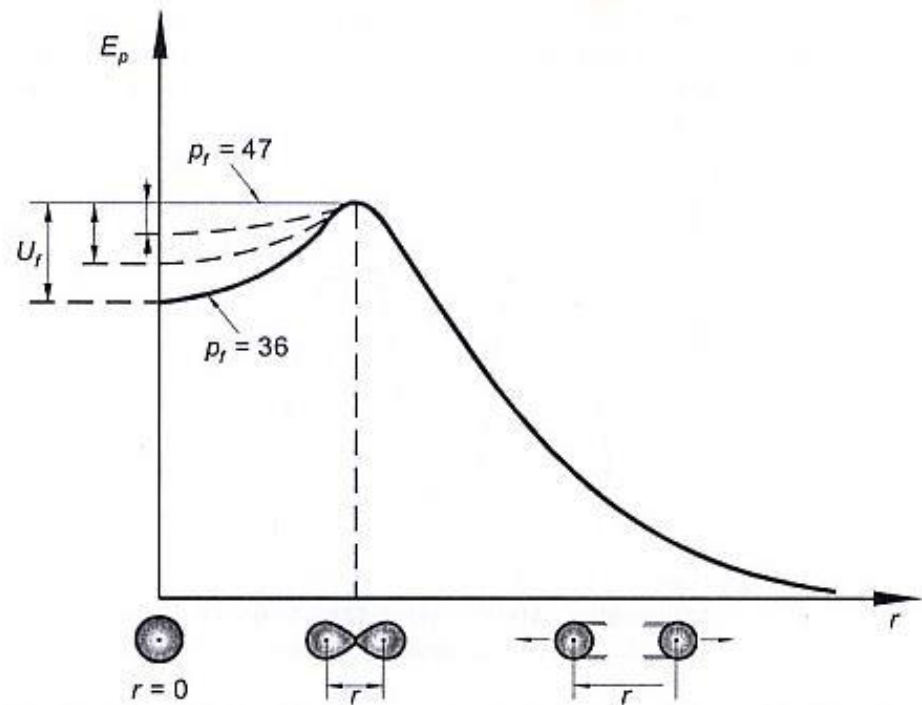
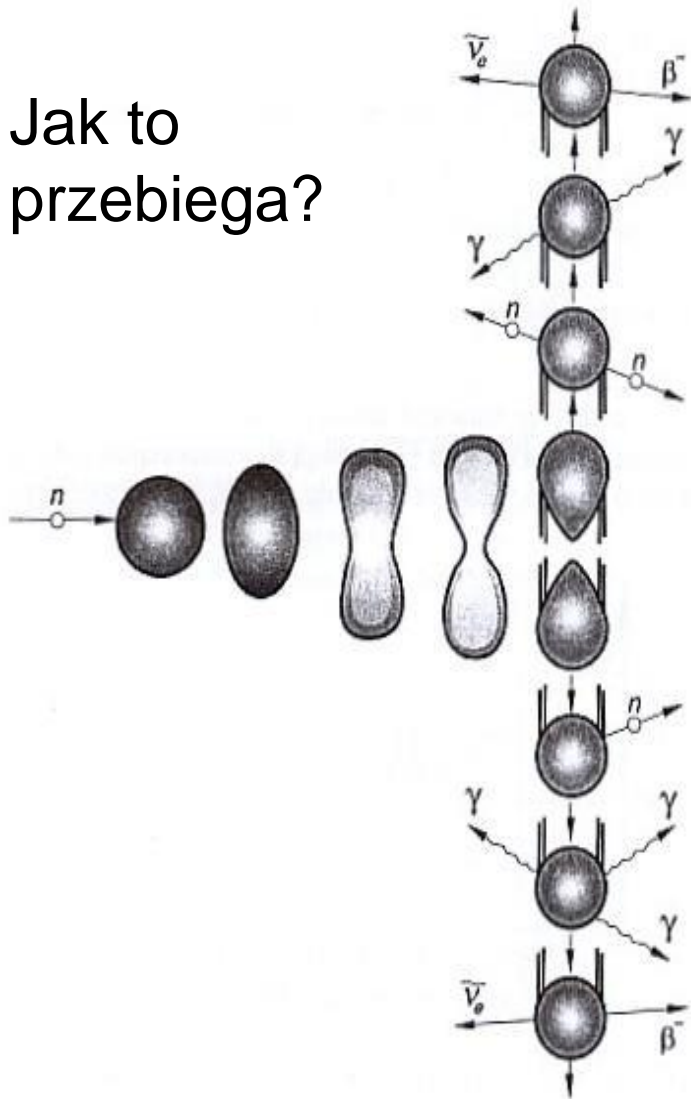


Przykładowa  
reakcja  
rozszczepienia



# Reakcja rozszczepienia

Jak to przebiega?



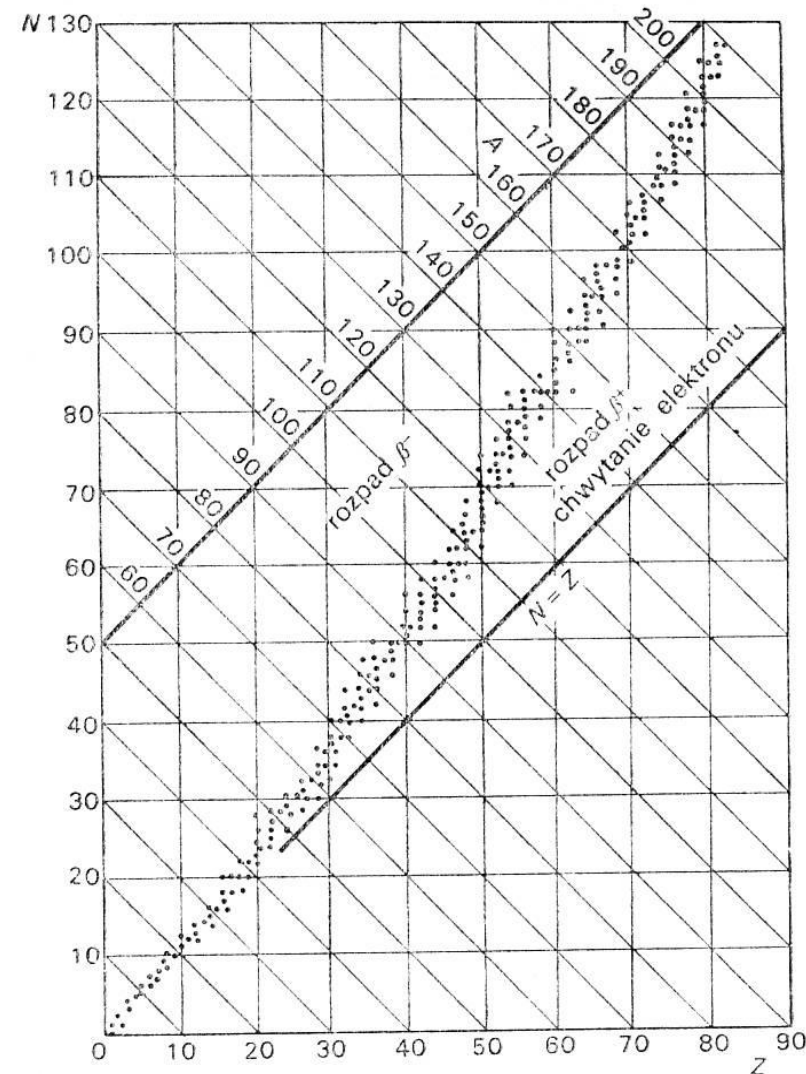
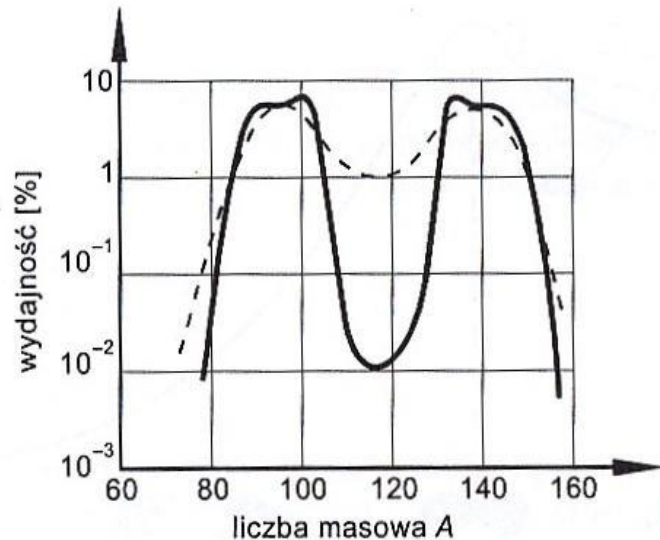
Rys. 11.8. Energia potencjalna  $E_p$  rozszczepiającego się jądra, w zależności od parametru  $r$  deformacji;  $U_f$  – bariera rozszczepienia (w jednostkach energii),  $p_f = Z^2/A$  – parametr rozszczepienia

Rys. 11.6. Hipotetyczny przebieg procesu rozszczepienia jądra i zjawisk wtórnych, według modelu kropłowego

# Reakcja rozszczepienia

Dlaczego rozpady beta(-)

..bo jądra powstałe w wyniku rozszczepienia posiadają nadmiar neutronów.  
Tworzą się sztuczne szeregi promieniotwórcze.  
emisja „neutronów opóźnionych”



Rys. 11.7. Rozkład mas fragmentów rozszczepień jąder  $^{235}\text{U}$  rozszczepianych przez neutrony termiczne (krzywa ciągła) i neutrony prędkie o energii 14 MeV (krzywa przerywana)

(wg A. Strzałkowskiego: *Wstęp do fizyki jądra atomowego*. Warszawa, PWN 1978)



# Reakcja rozszczepienia

„Uwalniają się duże ilości energii”... Jakiej energii – co nią jest?

Tabela 11.1

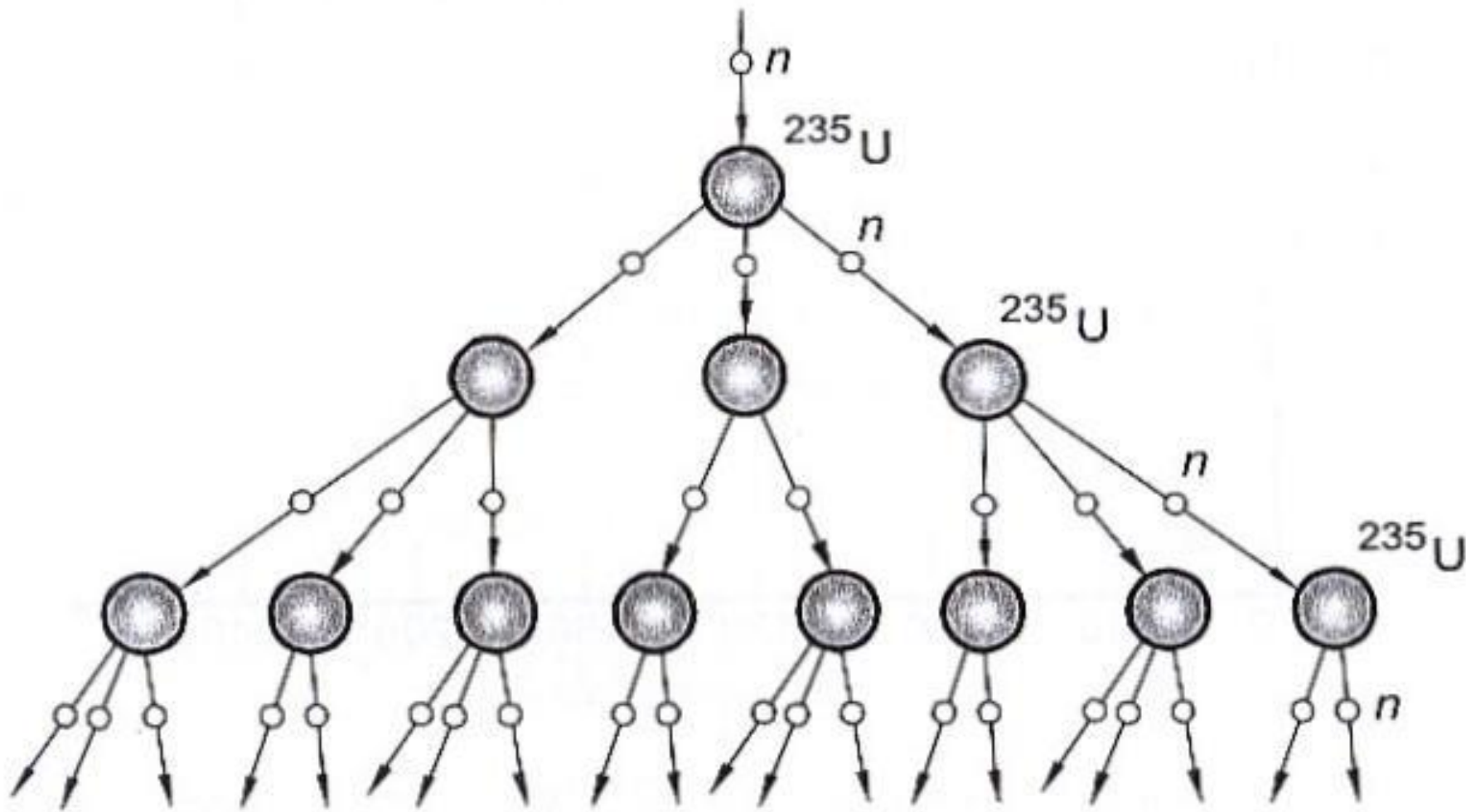
Rodzaj i ilość energii wydzielanej przy rozszczepieniu jednego jądra  $^{235}\text{U}$  przez neutron termiczny

Rodzaj energii	Ilość energii [MeV]
Energia kinetyczna fragmentów rozszczepienia	$167 \pm 5,0$
Energia kinetyczna neutronów natychmiastowych	$5 \pm 0,5$
Energia fotonów gamma (średnio 5 fotonów)	$7 \pm 1,0$
Energia rozpadów beta (średnio 3 rozpady na jeden fragment)	$17 \pm 2,0$
Razem	$200 \pm 6,0$

Energia uwalniana w reakcji:  $\text{C} + \text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2$ , wynosi ok. 4 eV.  
Stosunek wynosi  **$50 \cdot 10^6$  !!!**

# Reakcja rozszczepienia

Co się dzieje z kilkoma neutronami uwolnionymi w reakcji rozszczepienia?



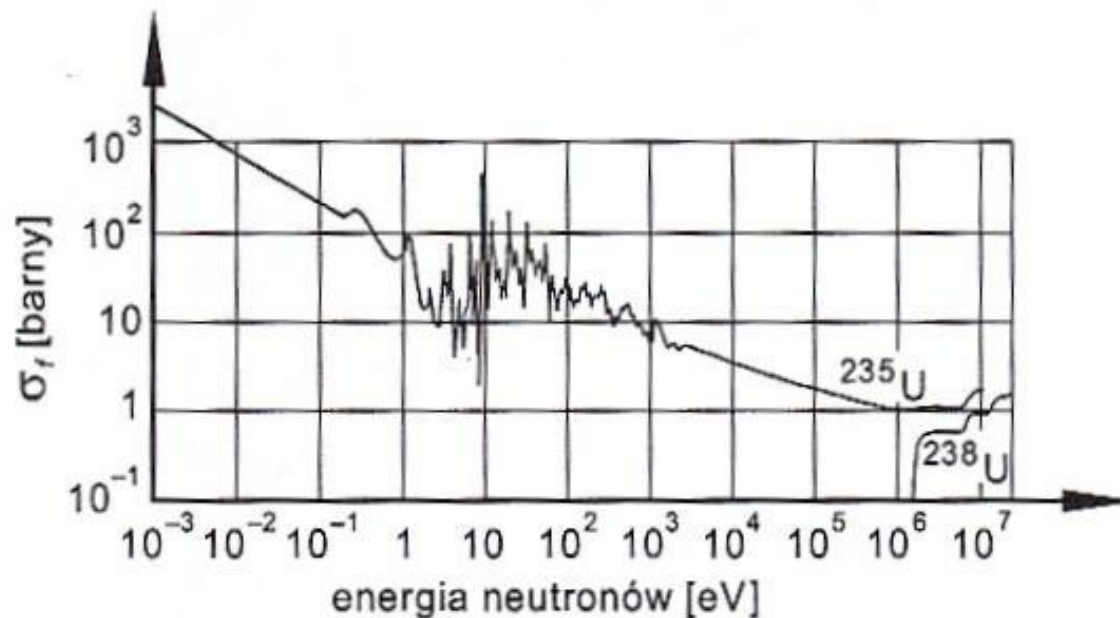
Rys. 11.10. Rozwój lawinowej reakcji rozszczepień jąder  $^{235}\text{U}$

# Reakcja rozszczepienia

Energia neutronów emitowanych w reakcji rozszczepienia  $^{235}\text{U}$  jest rzędu 1 MeV.

Materiały rozszczepialne:  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$

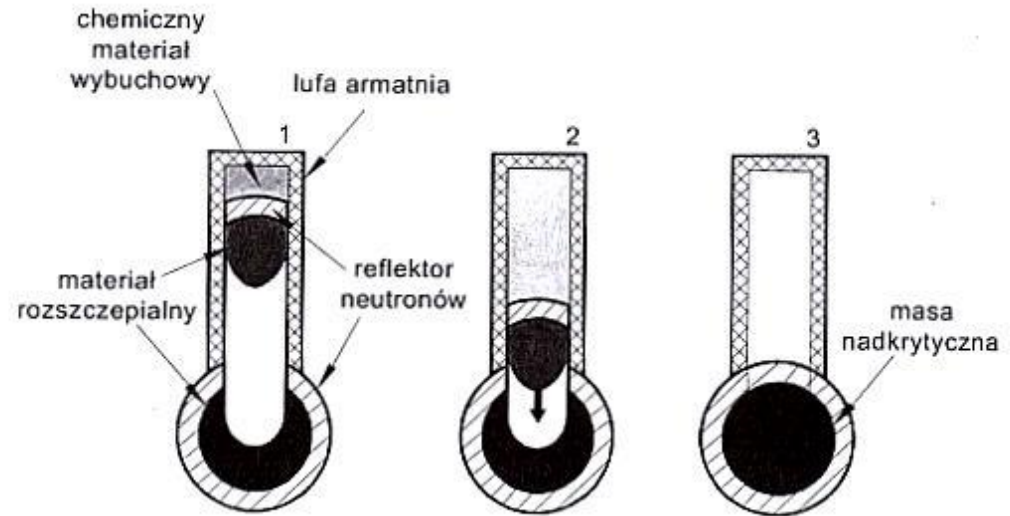
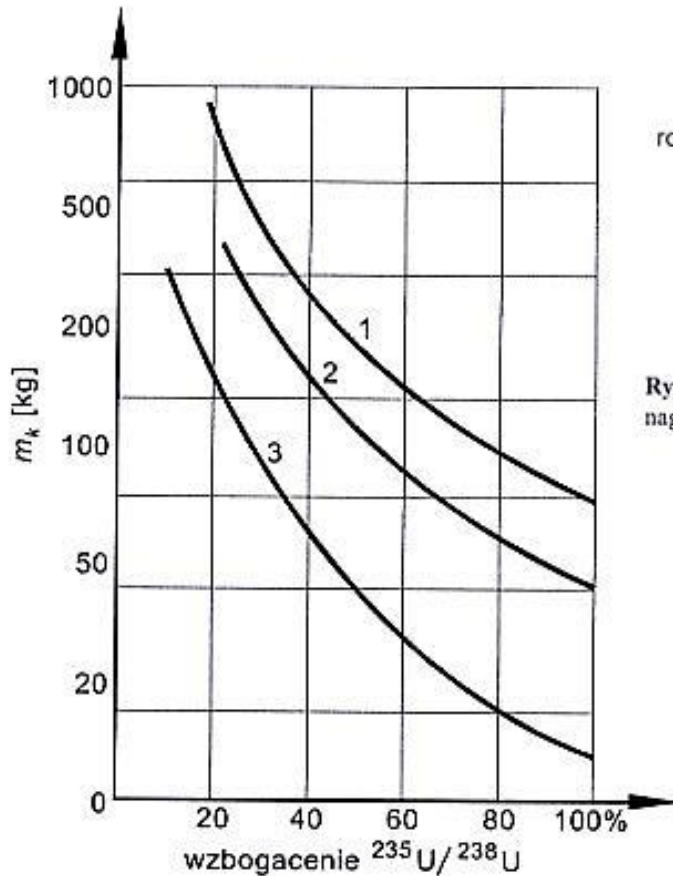
Uran naturalny zawiera 0.7% uranu  $^{235}\text{U}$ :



Rys. 11.5. Przekroje czynne  $\sigma_f$  na rozszczepienie jąder  $^{235}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$  przez neutrony o różnych energiach (wg S. Szczeniowskiego: *Fizyka doświadczalna*. Część VI. Warszawa, PWN 1974, s. 374)



# Reakcja rozszczepienia



Rys. 11.12. Zasada działania bomby uranowej (*gun-assembly device*); wybuch chemiczny powoduje nagle połączenie dwóch podkrytycznych mas materiału rozszczepialnego w jedną bryłę sferyczną o masie nadkrytycznej wskutek czego następuje wybuch jądrowy (wg *Encyclopaedia Americana - International Edition*, 1993, Vol. 2, s. 642)

Rys. 11.11. Masy krytyczne  $m_k$  uranu, w zależności od różnych czynników: 1 – kula z  $\text{UO}_2$  o gęstości  $10,9 \text{ g/m}^3$ , 2 – kula z uranu metalicznego o gęstości  $18,9 \text{ g/m}^3$ , 3 – kula z uranu metalicznego z reflektorem berylowym o grubości 10 cm

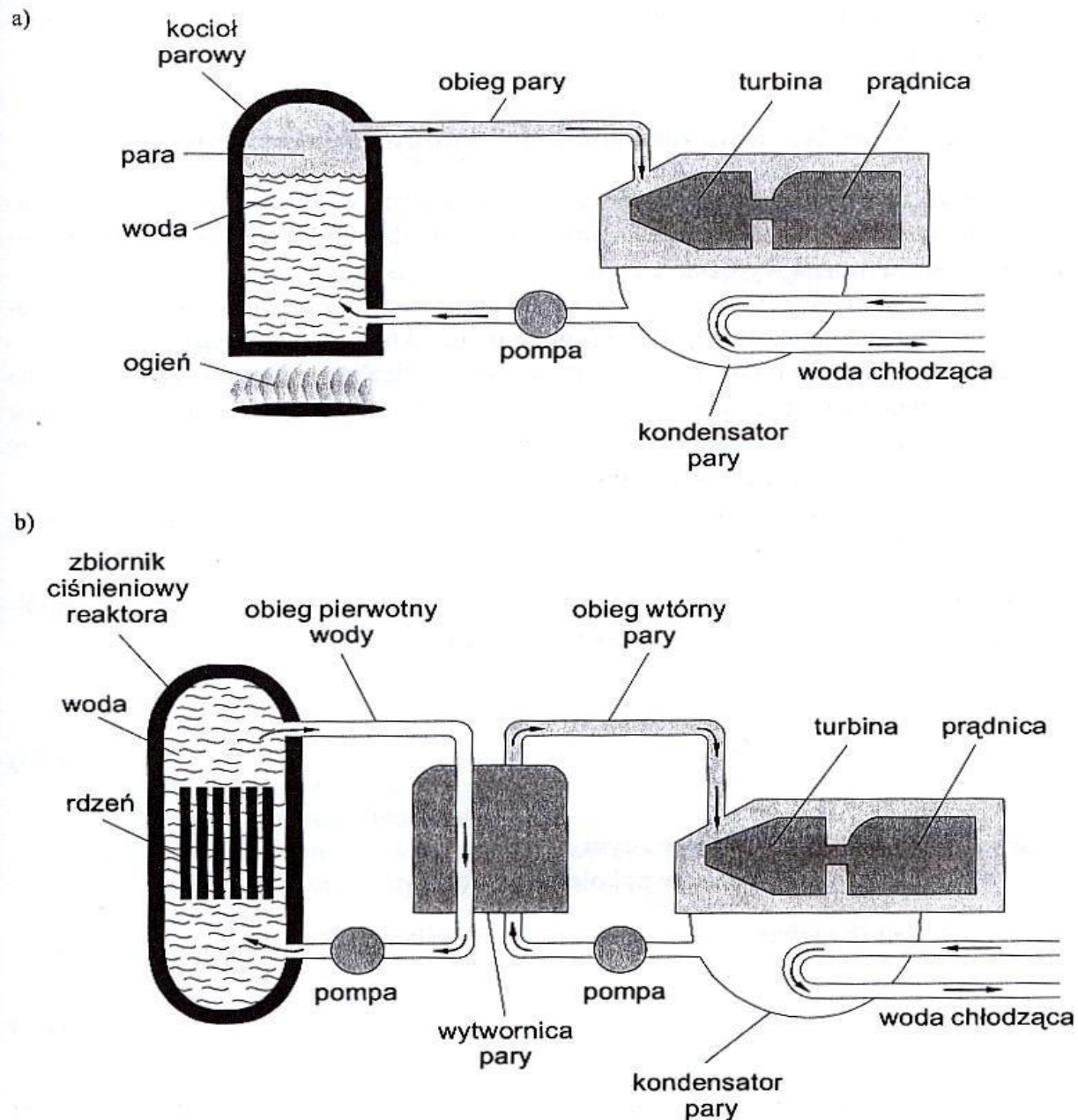
(wg Z. Celińskiego: *Energetyka jądrowa*. Warszawa, PWN 1991)

# Reaktory jądrowe

Porównanie elektrowni:

a) klasyczna

b) Jądrowa **PWR**  
**Pressurized**  
**Water**  
**Reactor**)



# Reaktory jądrowe

## Stany pracy reaktora:

- Podkrytyczny – reakcja wygasa
- Krytyczny – stan równowagi
- Nadkrytyczny – reakcja lawinowa

## Współczynnik mnożenia:

$$k = \frac{n_{i+1}}{n_i}$$

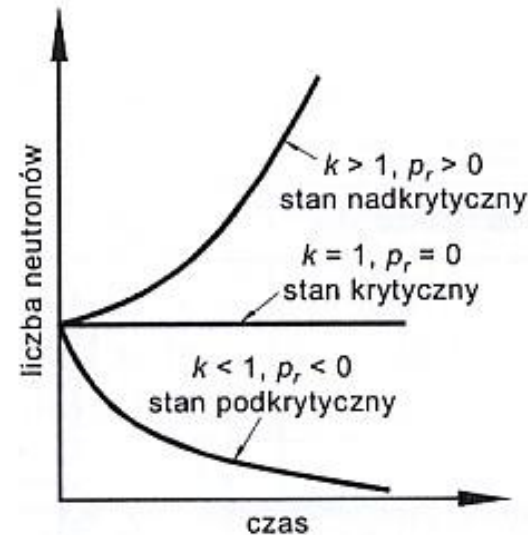
$n_i$  – liczba neutronów w  $i$ -m pokoleniu

$n_{i+1}$  – liczba n. w nast. pokoleniu

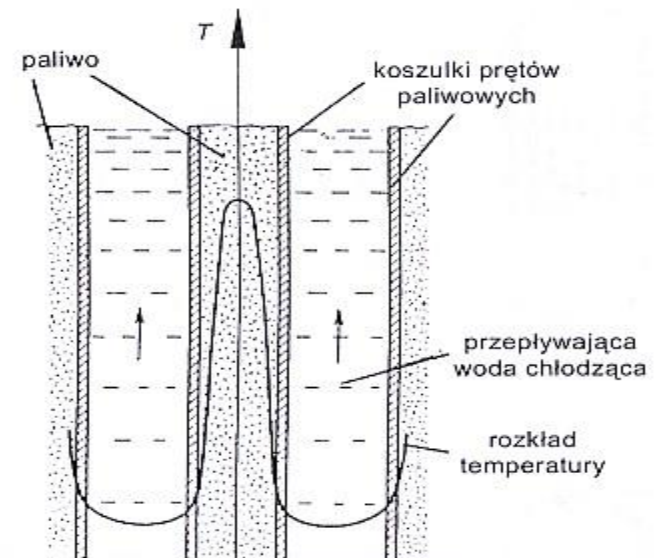
## Współczynnik reaktywności:

$$\rho_r = \frac{k - 1}{k}$$

Istotna rola moderatora  
i reflektora neutronów



Rys. 11.20. Zależność liczby neutronów w rdzeniu reaktora od czasu, w trzech stanach układu



Rys. 11.17. Rozkład przestrzenny temperatury  $T$  w pręcie paliwowym i wodzie chłodzącej

# Reaktory jądrowe

## Wartość współczynnika k zależy od:

- Stopnia wzbogacenia paliwa
- Stosunku ilości moderatora do ilości paliwa
- Geometrii rdzenia reaktora
- Rodzaju moderatora i chłodziwa

Zależność k od temperatury:

### **PWR**

- Zmniejszenie przekroju czynnego na absorpcje neutronów w wodzie -  $\rho_r$  rośnie
- Zmniejszenie gęstości wody –  $\rho_r$  maleje (efekt dominujący)
  
- Wzrost temperatury => zmniejszenie reaktywności
- (ujemne temperaturowe sprzężenie zwrotne)

### **RBMK**

- Zmniejszenie przekroju czynnego na absorpcje neutronów w wodzie -  $\rho_r$  rośnie
- Zwiększenie strumienia neutronów spowalnianych w graficie -  $\rho_r$  rośnie
  
- Wzrost temperatury => zwiększenie reaktywności
- (dodatnie temperaturowe sprzężenie zwrotne)

# Reaktory jądrowe

## Sterowanie reaktorem:

- pręty sterownicze – materiał silnie absorbujący neutrony termiczne (kadm)
- źródło rozruchowe – pręty sterownicze głęboko w rdzeniu
- sterowanie – położenie prętów sterowniczych wewnątrz reaktora

## Zatrucie reaktora:

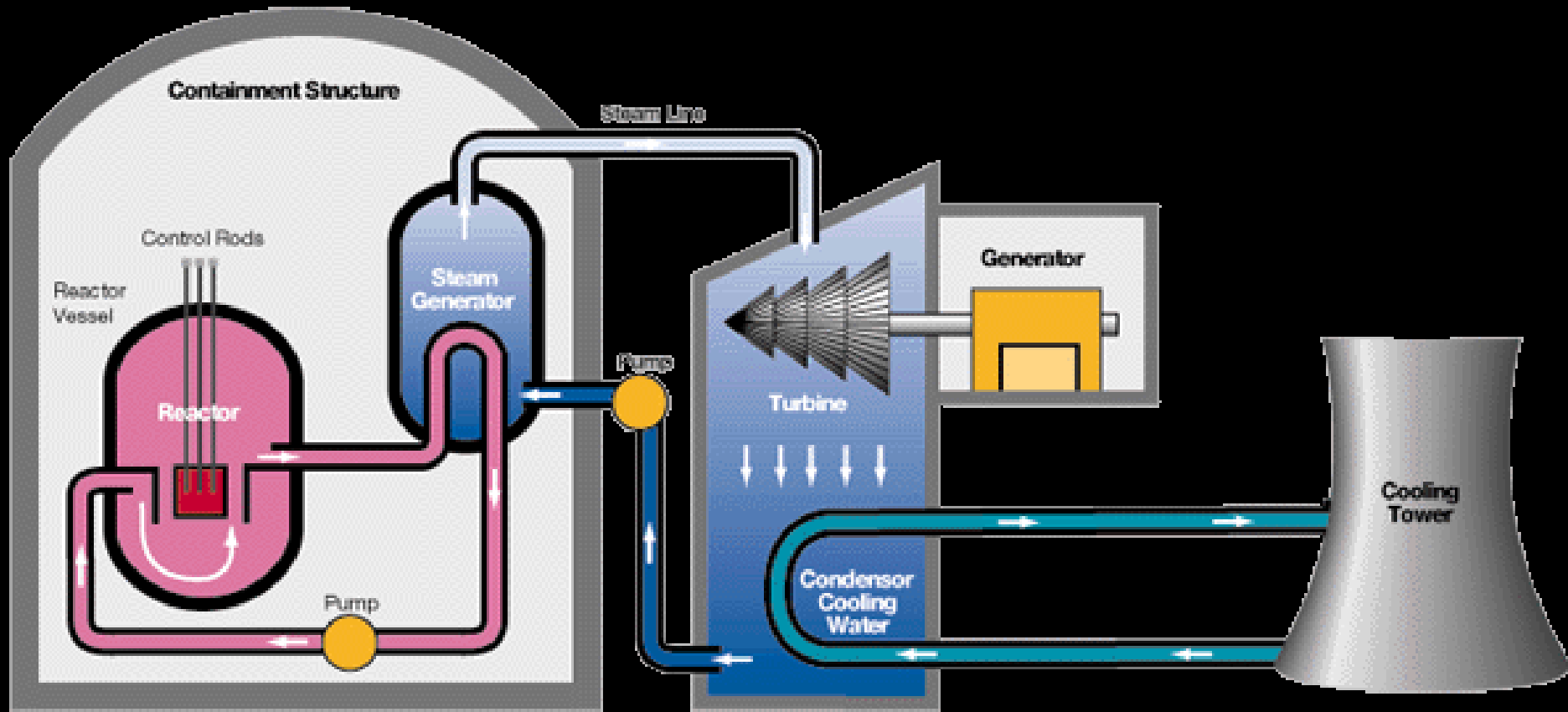
- absorpcja neutronów przez produkty rozszczepień
- trucizna reaktorowa  $^{135}\text{Xe}$  ksenon – bardzo duży przekrój czynny na wychwyty neutronów termicznych
- rozpad ksenonu  $T_{1/2}=9.2$  godz.
- w stanie krytycznym – równowaga promieniotwórcza
- „czas martwy” – kilkadziesiąt godzin



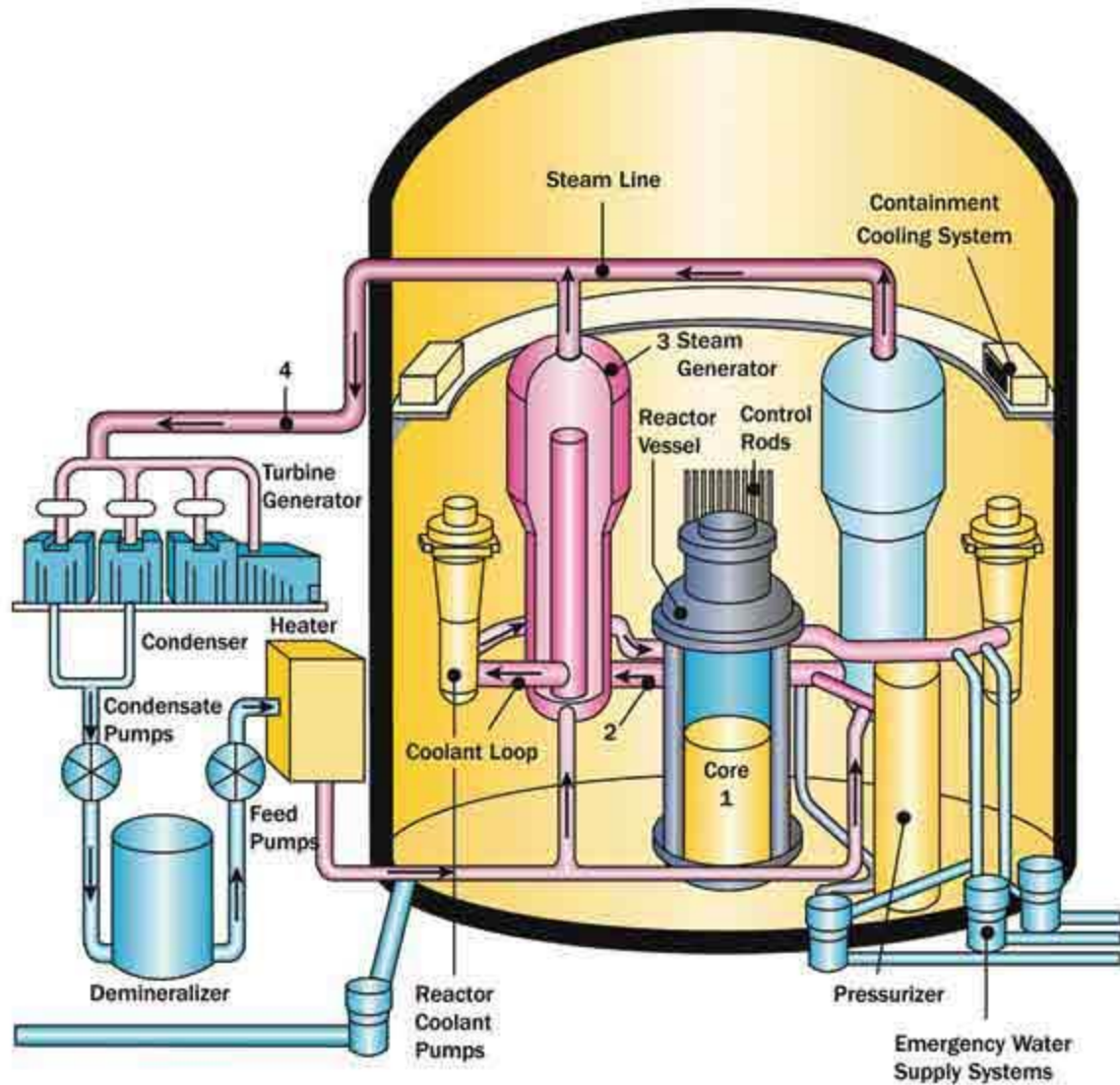
# PWR – Reaktor wodny ciśnieniowy

- Grubościenny zbiornik o rozmiarach rzędu kilku metrów
- Paliwo:  $\text{UO}_2$  wzbogacenie 3-4%
- ciśnienie wody 16 MPa (160 atm)
- Temperatura wody: 300-340 °C
- Rola wody: moderator, chłodziwo, reflektor
- Moc: do 1.5 GW

# *Pressurized Water Reactor (PWR)*

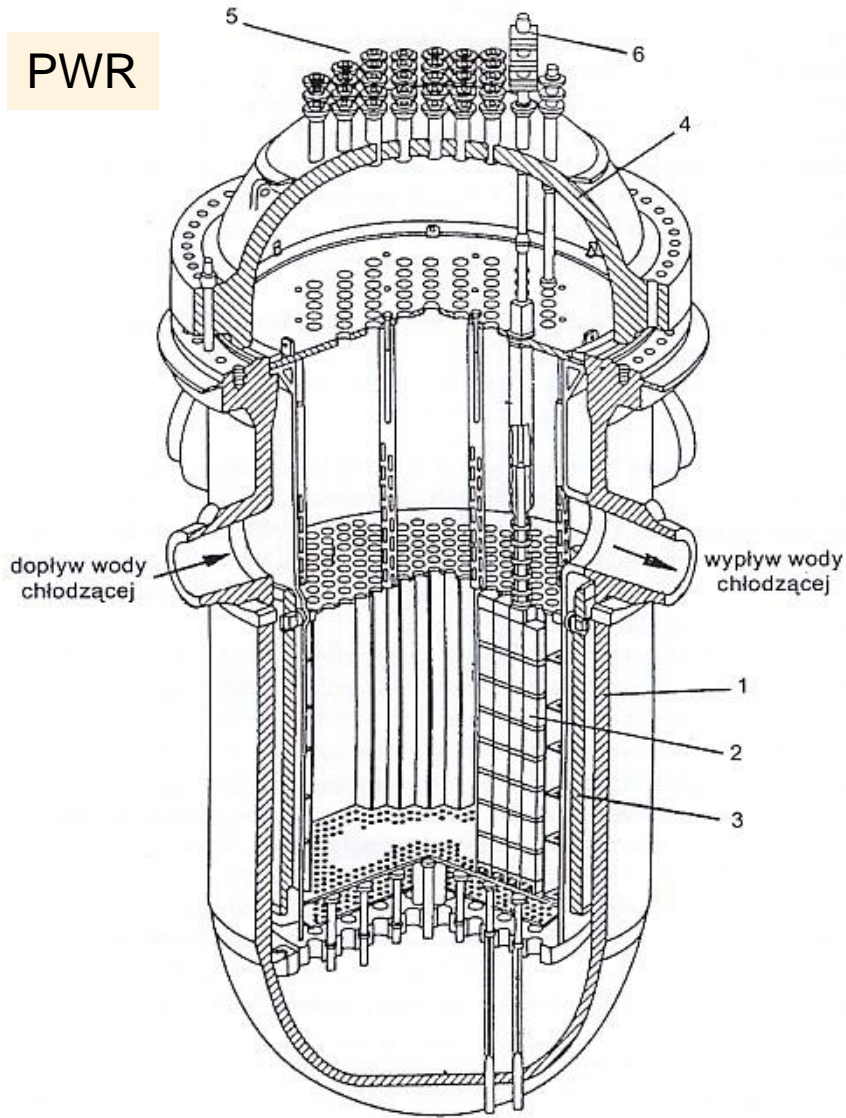


# Typical Pressurized-Water Reactor



# Reaktory jądrowe

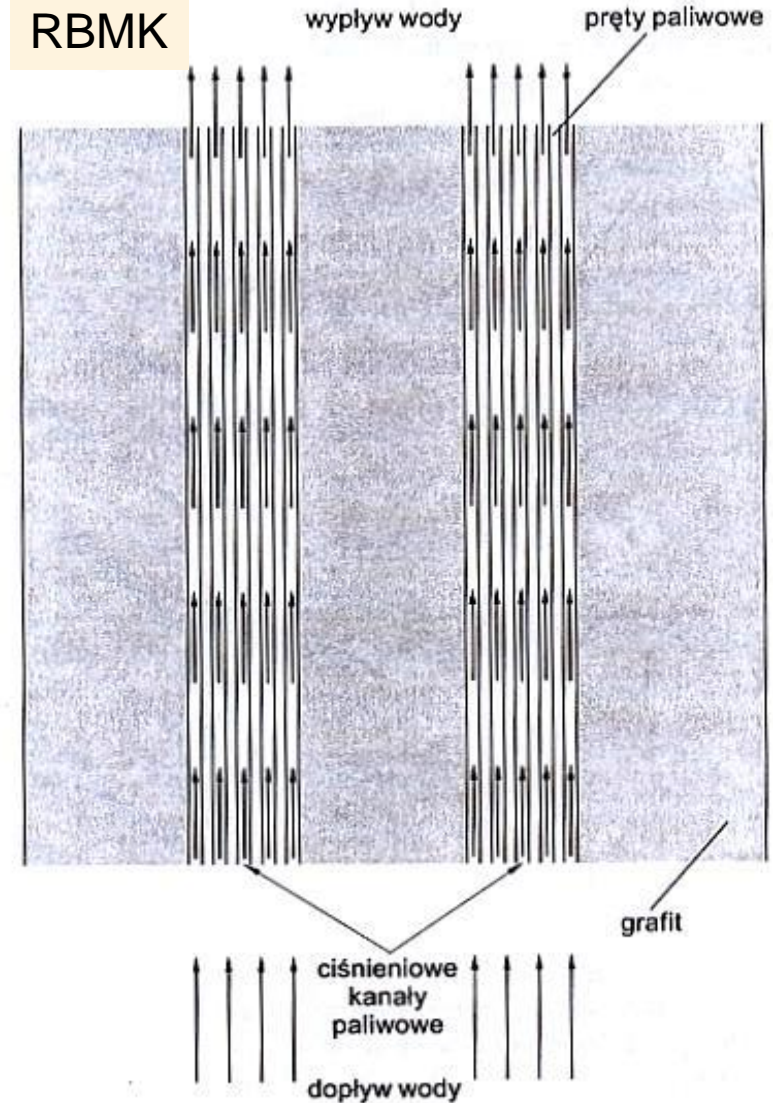
PWR



Rys. 11.15. Schemat konstrukcji typowego reaktora wodnego ciśnieniowego (PWR) firmy Westinghouse; 1 – zbiornik ciśnieniowy, 2 – elementy paliwowe, 3 – osłona termiczna, 4 – głowica zbiornika, 5 – pręty regulacyjne, 6 – napęd prętów regulacyjnych

(wg Z. Celińskiego: *Energetyka jądrowa*. Warszawa, PWN 1991)

RBMK



Rys. 11.16. Zasada konstrukcji reaktora kanałowego

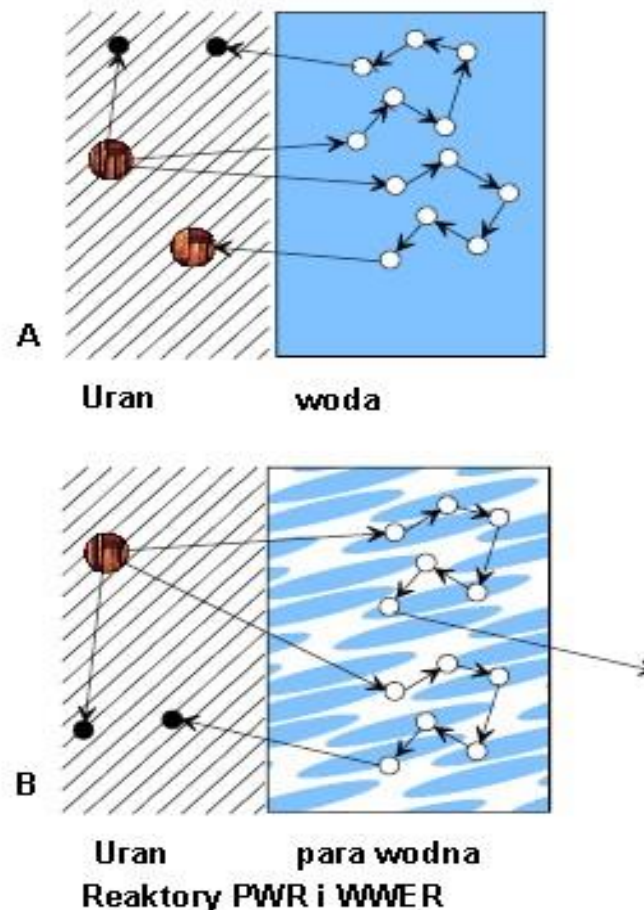
RBMK – Reaktor Bolszoy Moszcznosti Kanałnyj



## II Szkoła Energetyki Jądrowej

### A.Strupczewski – Bezpieczeństwo Elektrowni Jądrowych Dawniej i Dzisiaj

Do spowolnienia neutronów wykorzystujemy w tego typu reaktorach wodę, która w technice reaktorowej nazywana jest „moderatorem”. Zderzając się z jądrami wodoru neutrony prędkie tracą swą energię kinetyczną i po wielu zderzeniach stają się neutronami termicznymi. Im więcej jest wody, tym szybciej neutrony spowalniają się i stają się zdolne do wywołania rozszczepienia jąder uranu. Jednakże z drugiej strony pewna mała część neutronów przy zderzeniu z wodorem ulega pochłanianiu, więc wody w reaktorze nie może być za dużo.



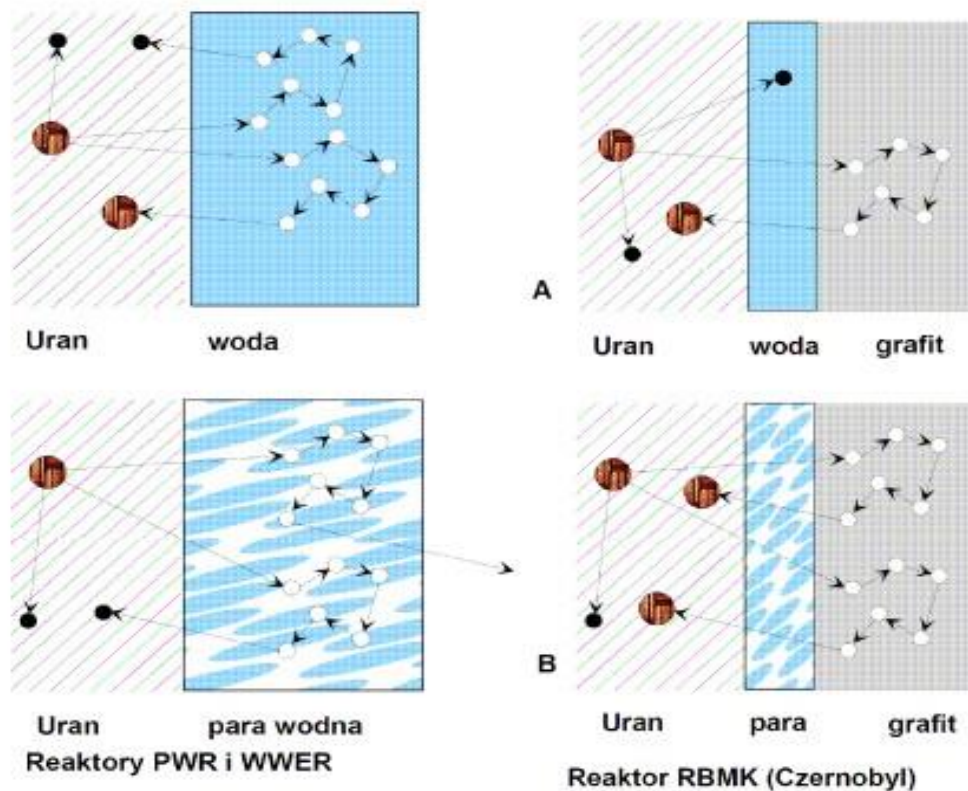
Rys. 1. Zmiany w spowalnianiu neutronów po częściowym odparowaniu wody w reaktorze PWR [1].



## II Szkoła Energetyki Jądrowej

### A.Strupczewski – Bezpieczeństwo Elektrowni Jądrowych Dawniej i Dzis

Dlatego ilości wody i paliwa są starannie obliczane i dobierane tak, by przy normalnej temperaturze pracy zapewniały one najbardziej skuteczne spowalnianie neutronów i najwyższą wydajność reakcji rozszczepienia. Gdy wskutek podgrzania wody lub jej odparowania ilość wody w rdzeniu zmaleje, neutrony będą gorzej spowalniane i zamiast uderzać w jądra uranu, będą wydostawały się poza rdzeń ulegając pochłanianiu w otaczających go materiałach konstrukcyjnych, jak pokazano na rys. 1. Spowoduje to zmniejszenie liczby rozszczepień w rdzeniu i samorzutne wygaszenie reakcji łańcuchowej rozszczepienia. Jest to bardzo ważna cecha zapewniająca stabilność pracy reaktorów PWR. Tej stabilności brakowało reaktorowi w Czarnobylu.



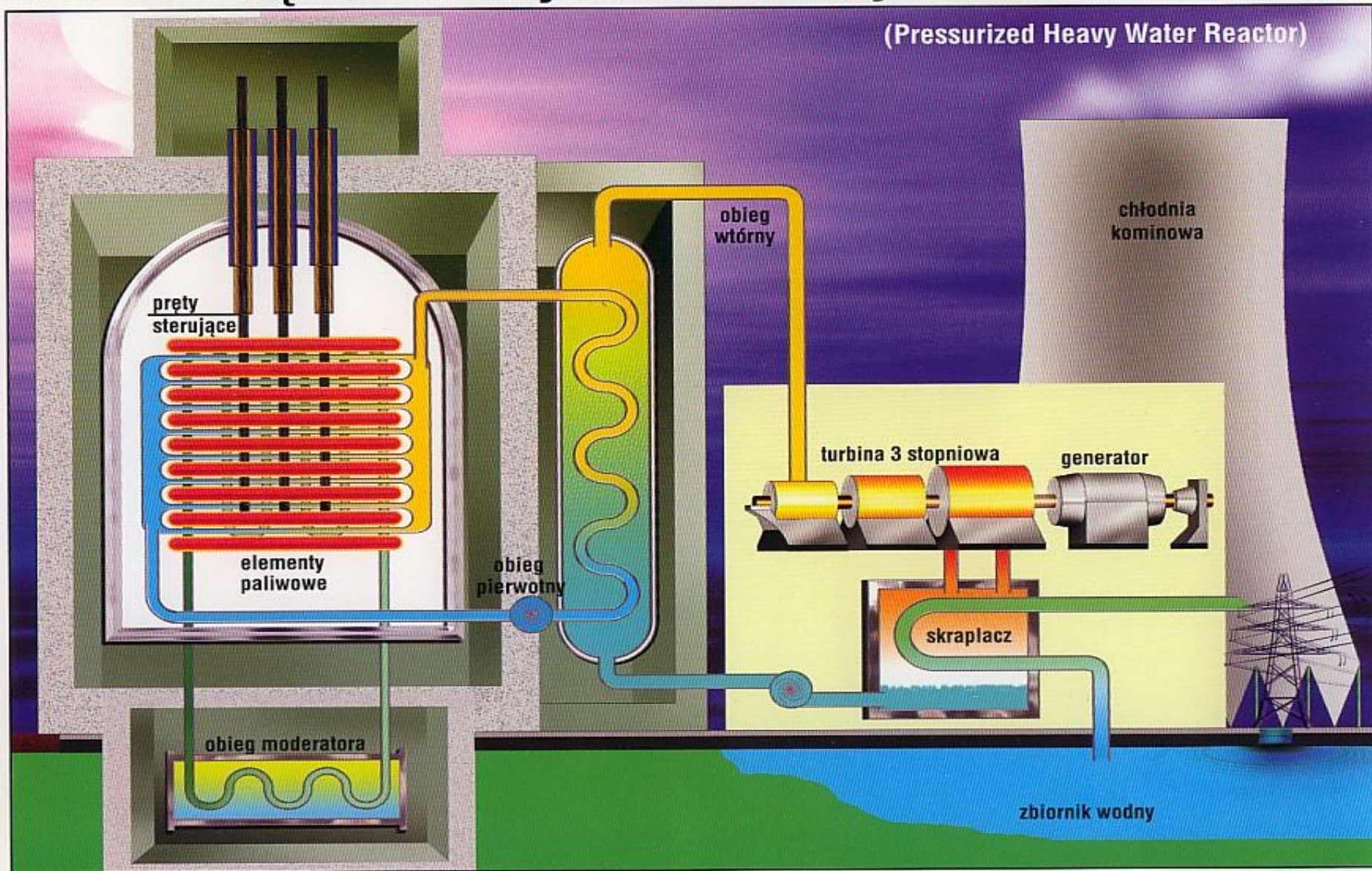
Rys. 9. Zmiany gęstości rozszczepień po odparowaniu części wody [3]. *A* - normalna praca, *B* - spadek przepływu wody, część wody odparowuje. W reaktorze PWR lub WWER moc maleje, w reaktorze RBMK moc rośnie.

Natomiast w reaktorze RBMK rolę spowalnicza neutronów pełni grafit, a woda między prętami paliwowymi służy głównie do przenoszenia ciepła, do spowalniania nie jest niezbędna. Co więcej, wobec tego, że pewna część neutronów ulega pochłanianiu w wodzie, zmniejszenie gęstości wody wskutek podgrzania, a tym bardziej wskutek jej częściowego odparowania, powoduje zmniejszenie liczby tych pochłonieć. Idzie za tym wzrost liczby neutronów, które wracają jako spowolnione do paliwa i powodują nowe rozszczepienie (Rys. 9).



# Reaktor ciężkowodny ciśnieniowy PHWR

# CANDU

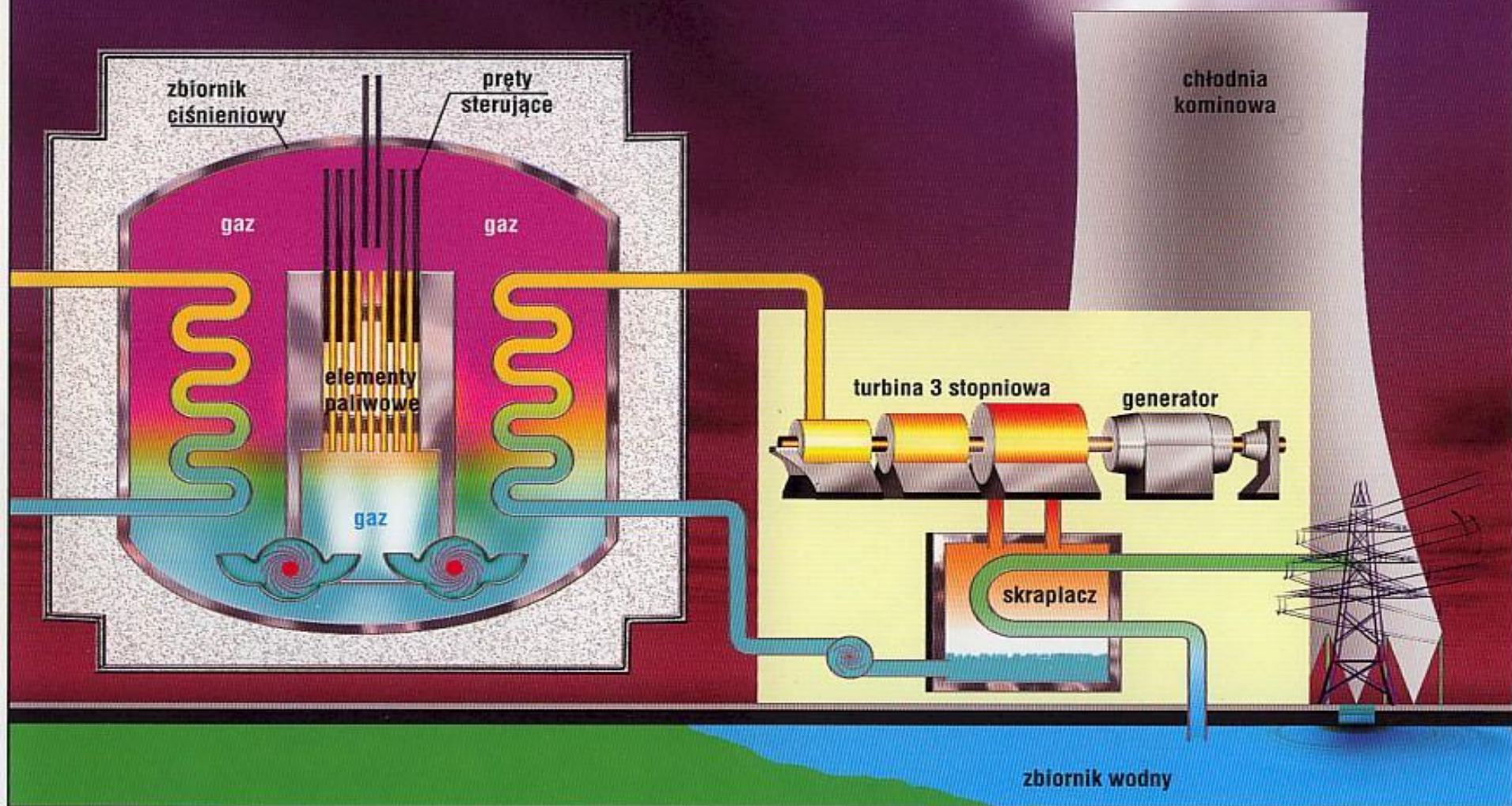


W reaktorze kanałowym CANDU (Canadian Deuterium-Uranium Reactor), w odróżnieniu od reaktora RBMK, ciężka woda spełnia rolę moderatora i chłodziwa, nieznacznie pochłaniając neutrony, dlatego paliwem w tym reaktorze może być naturalny uran. Woda w obiegu pierwotnym nie wrze, jej ciepło wytwarza parę w obiegu wtórnym. Para porusza turbinę.



# Reaktor chłodzony gazem

(Gas Cooled Reactor - GCR, Advanced Gas Cooled Reactor -AGR)

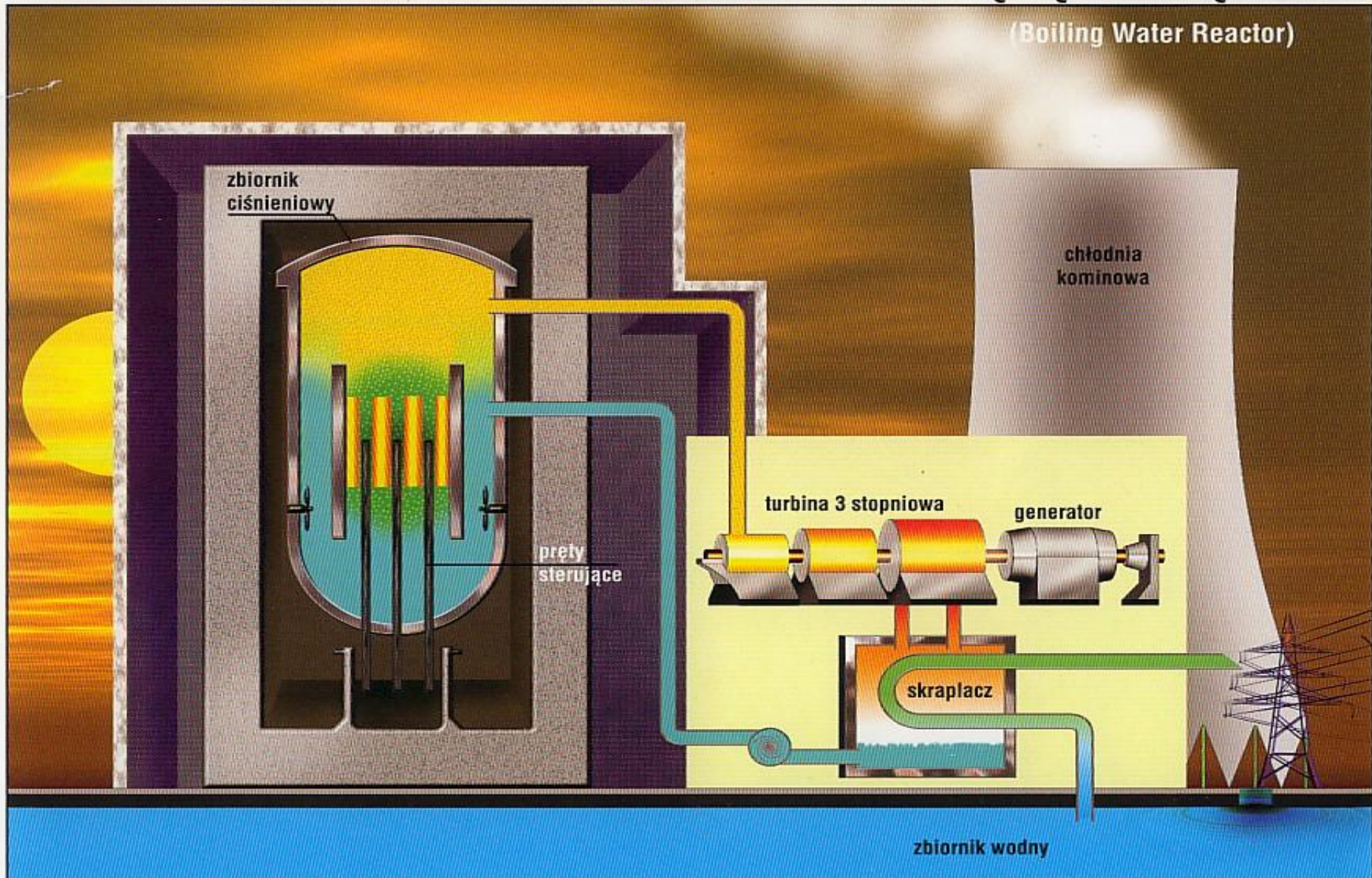


Chłodziwem w tym reaktorze jest gaz (dwutlenek węgla lub hel) pompowany przez kanały w grafitowym moderatorze, w którym umieszczone są pręty paliwowe. Gaz podgrzewa wodę do stanu wrzenia, para porusza turbinę. Tego rodzaju reaktory są popularne w Anglii.



# Reaktor z wrzącą wodą BWR

(Boiling Water Reactor)

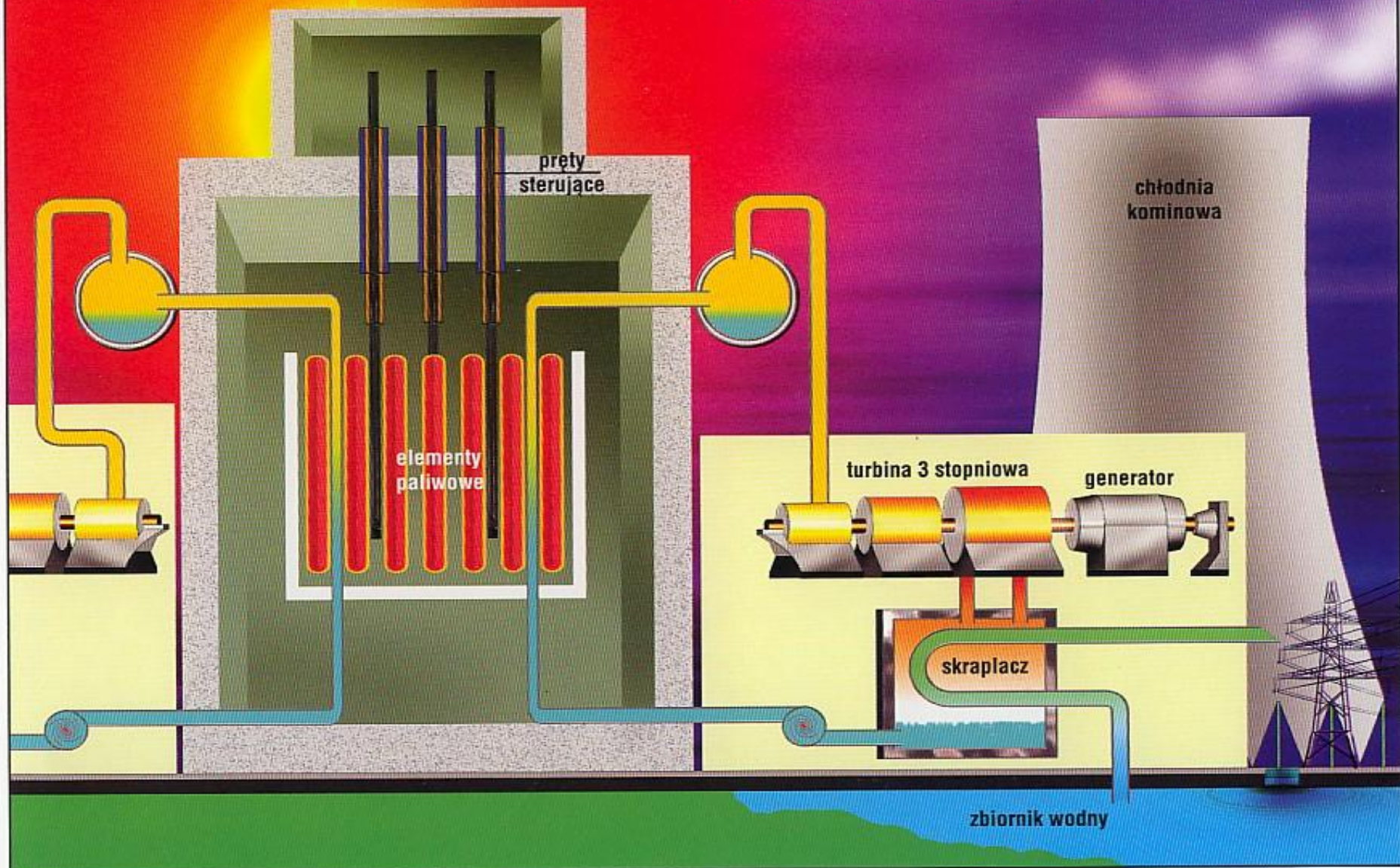


Moderatorem i chłodziwem jest zwykła woda, podobnie jak w reaktorach typu PWR. W odróżnieniu od tych ostatnich w reaktorze BWR woda doprowadzana jest do wrzenia w obiegu pierwotnym, para porusza turbinę, a ta wirnik generatora prądu.



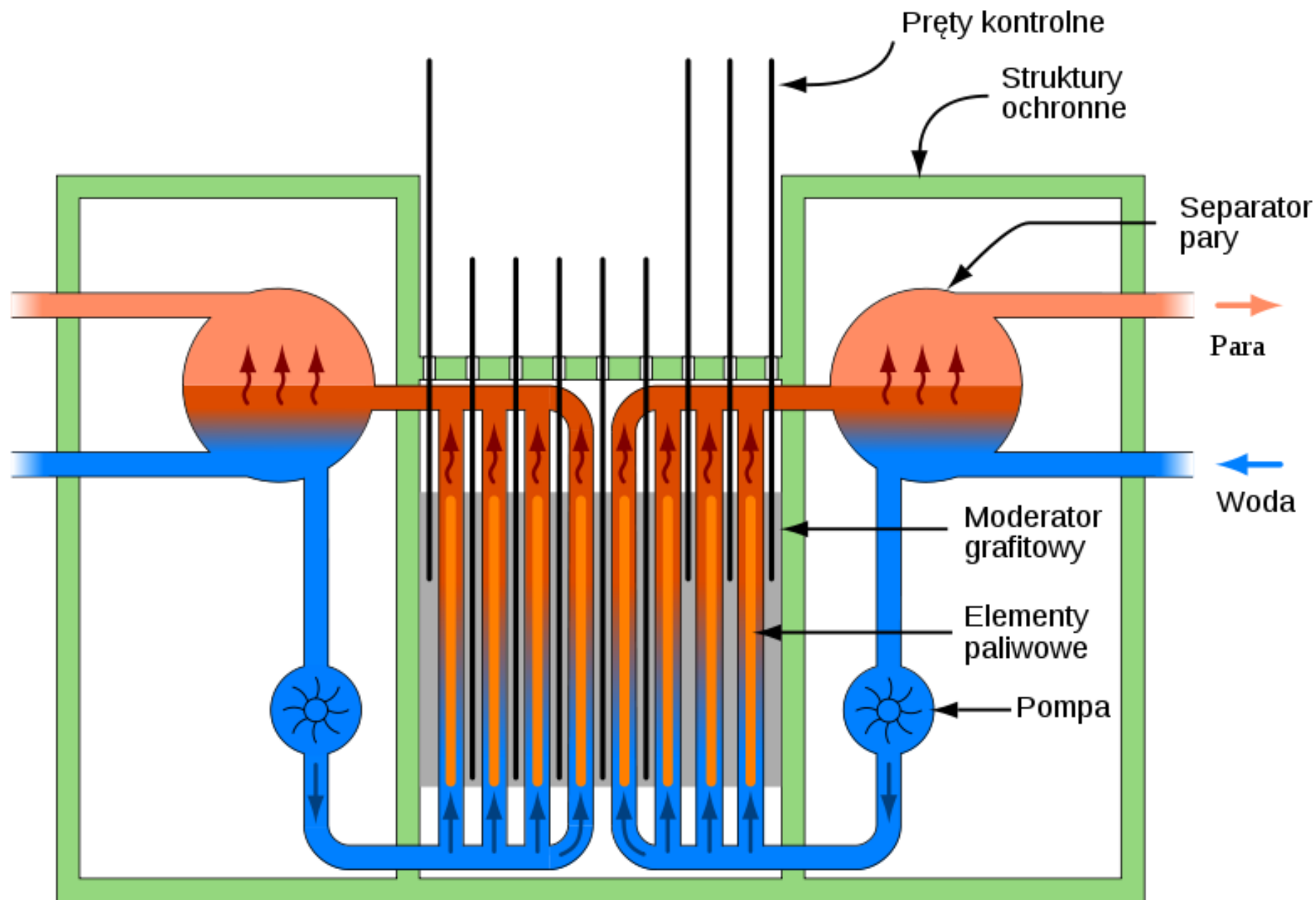
# Reaktor wodny z moderatorem grafitowym RBMK

(Reaktor Bolszoi Moszcznosti Kanalnyj RBMK)



Moderatorem i reflektorem neutronów jest grafit, a chłodziwem zwykła woda. Jest to tzw. reaktor kanałowy, gdyż woda w nim płynie tylko przez kanały zawierające elementy paliwowe, a nie przez cały zbiornik reaktora. Taki reaktor działał w Czarnobylu.

# Реактор Большой Мощности Канальный

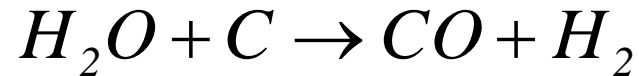


# **RBMK – Reaktor Bolszoy Moszcznosti Kanalnyj** *Реактор Большой Мощности Канальный*

- Paliwem jest naturalny uran
- Woda jest jedynie chłodziwem, i przepływa tylko przez poszczególne kanały
- Moderatorem jest grafit
- Wymiana paliwa możliwa podczas pracy reaktora
- Możliwość wytwarzania plutonu dla celów wojsk.

# Mechanizm awarii w Czarnobylu

- W reaktorze RBMK grafit pracuje w bardzo wysokiej temperaturze (ok. 750 °C), znacznie przekraczającej jego temperaturę zapłonu w powietrzu.
- Bliskie sąsiedztwo pary wodnej pod ciśnieniem i gorącego grafitu stwarza niebezpieczeństwo reakcji chemicznej prowadzącej do wytworzenia tzw. gazu wodnego.



- W przypadku rozerwania rury ciśnieniowej gorąca para dostaje się do grafitu. Reakcja prowadząca do powstania gazu wodnego zachodzi przy temperaturach 1000-1200 °C, a więc niewiele wyższych od normalnej temperatury eksploatacyjnej w graficie.

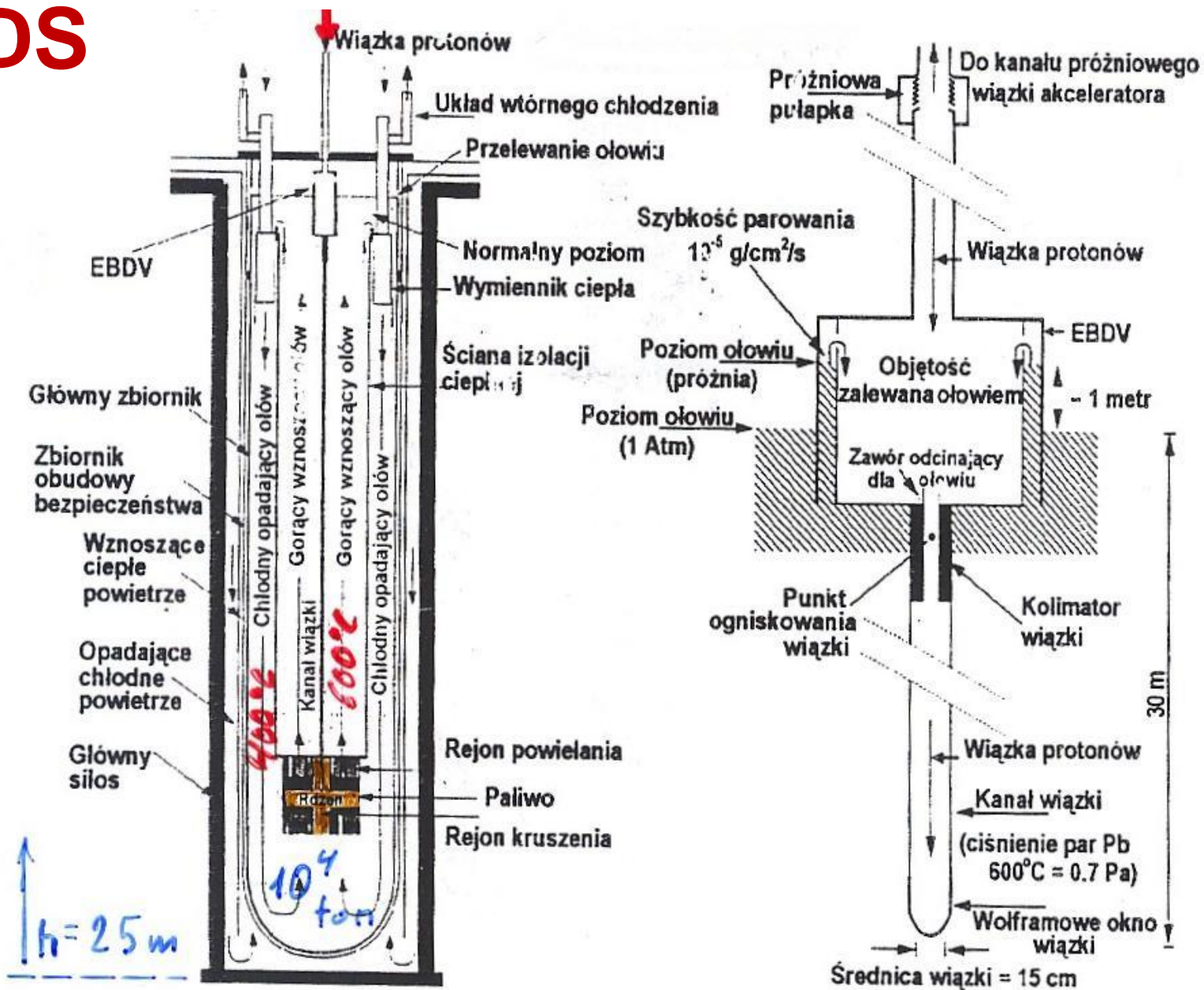
Jeśli w reaktorze dochodzi do utraty chłodziwa z obiegu pierwotnego, to w miarę przekształcania się wody w parę zachodzą w nim dwa niekorzystne procesy. Po pierwsze para jest gorszym chłodziwem niż woda, a więc paliwo zaczyna się podgrzewać i temperatura rośnie. Jednocześnie para wodna pochłania mniej neutronów niż woda, wskutek czego odparowanie wody powoduje w reaktorze RBMK wzrost jego mocy. Ten drugi efekt doprowadza do nagłego zwiększenia strumienia neutronów, wzrostu intensywności reakcji rozszczepienia i nagłego lokalnego przegrzania części rdzenia.

# Nowe tendencje w energetyce jądrowej

- ADS Accelerator Driven System - reaktory sterowane akceleratorami, reakcje transmutacji
- Reaktory wysokotemperaturowe – synergia węglowo-jądrowa
- Kontrolowana reakcja termojądrowa - reaktory termojądrowe

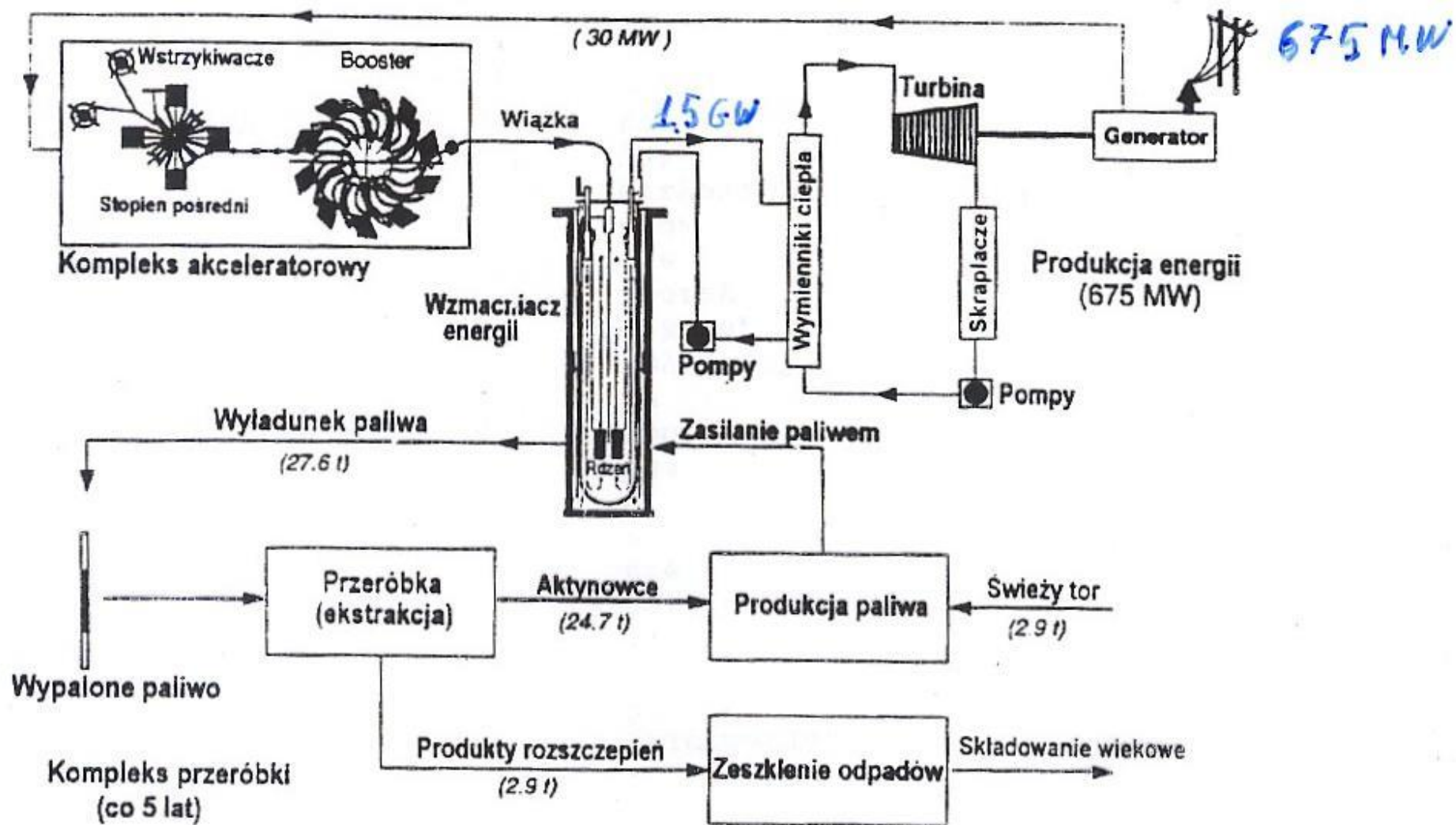


# ADS



Rys. 2. Szkic reaktora oraz układu wprowadzenia wiązki protonów [4].

# ADS

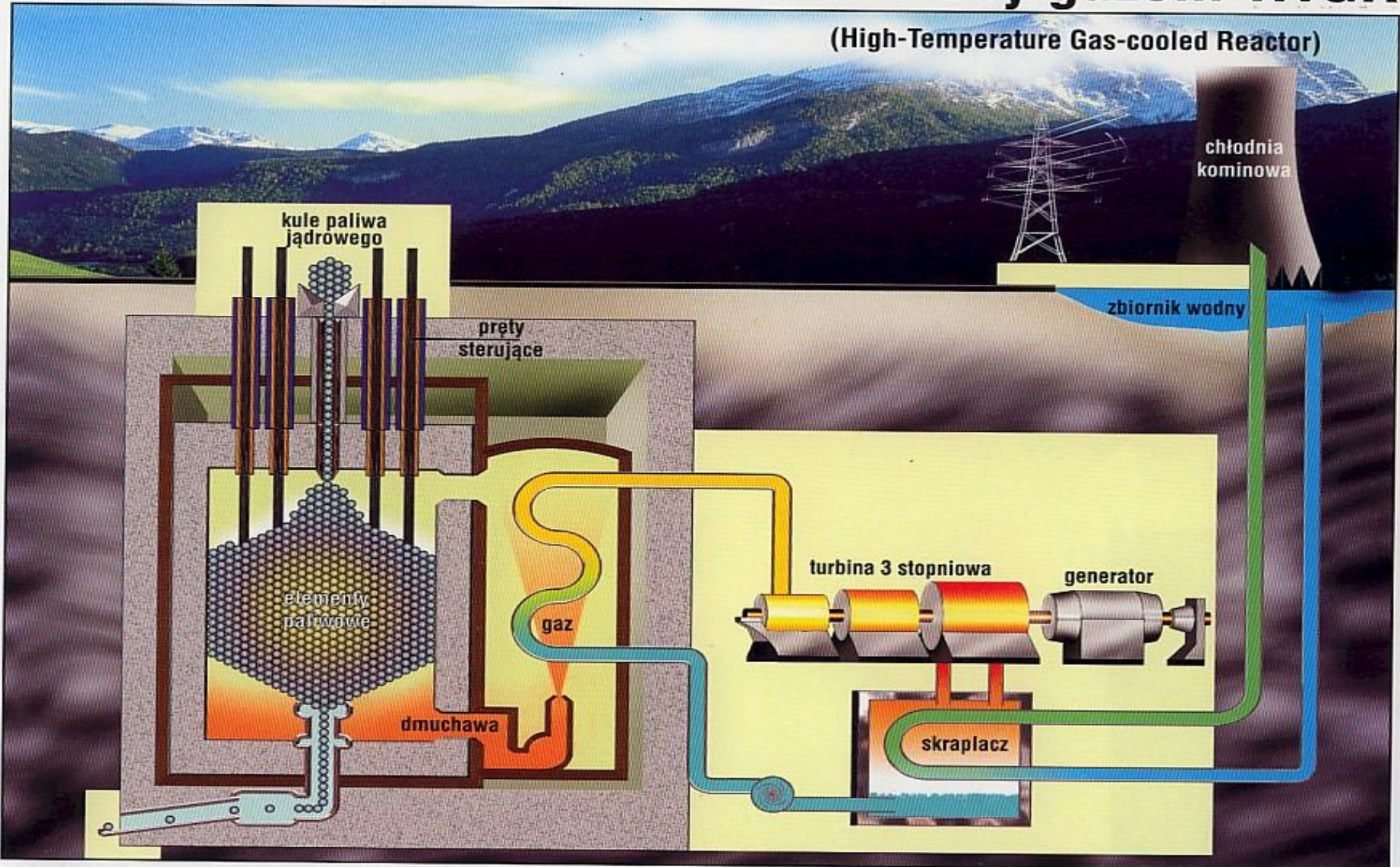


Rys. 3. Ogólny schemat działania projektowanego wzmacniacza energii [4].



# Reaktor wysokotemperaturowy chłodzony gazem HTGR

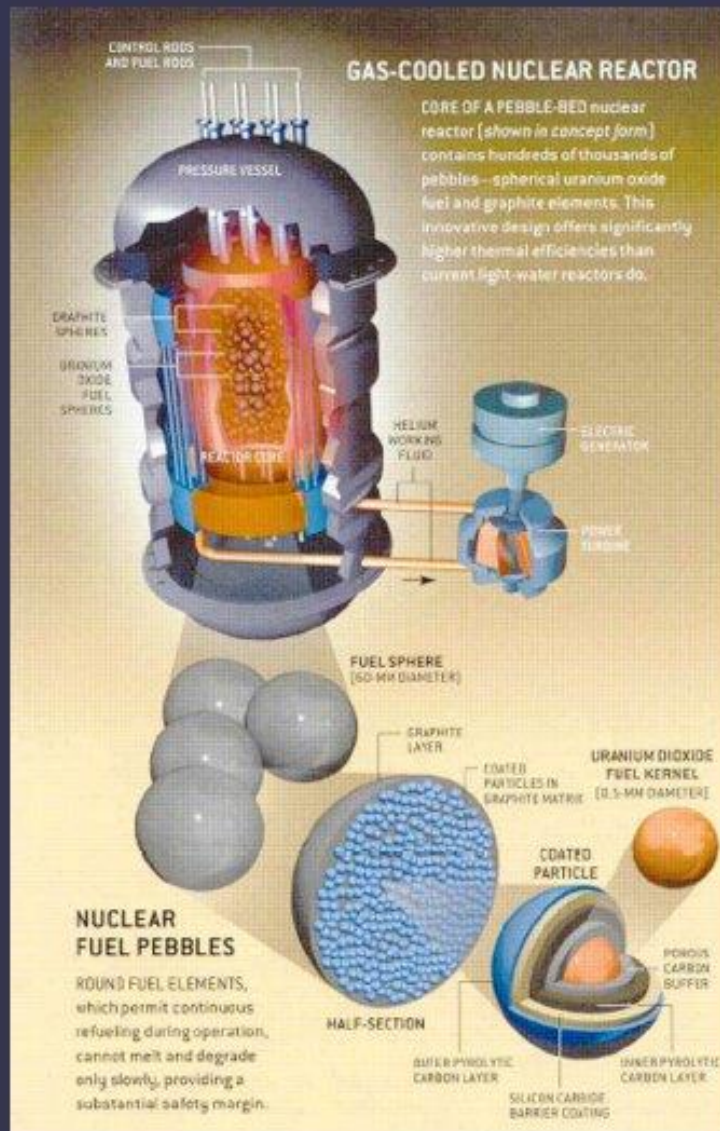
(High-Temperature Gas-cooled Reactor)



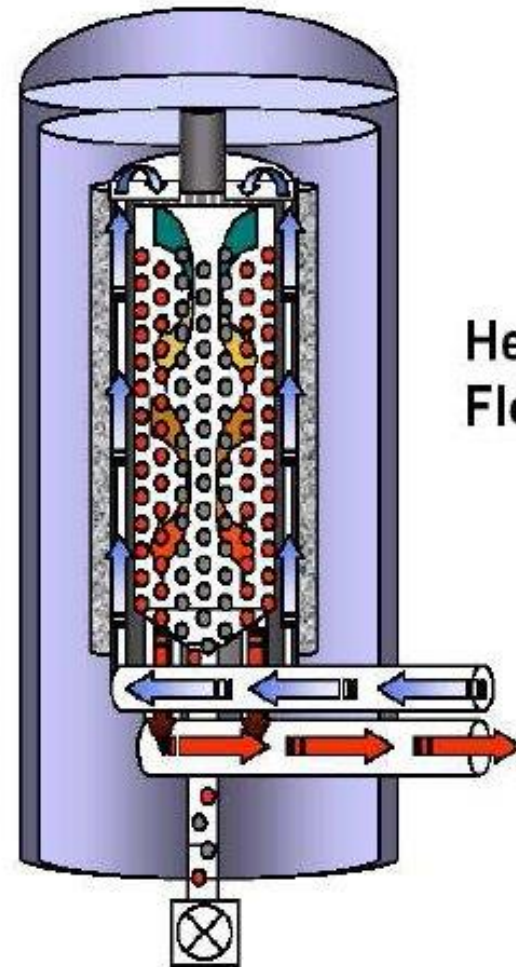
Jest to nowoczesny reaktor o wysokim stopniu bezpieczeństwa. Gaz na wyjściu z reaktora ma temperaturę ok. 900°C. Ciepło dostarczone z reaktora może być wykorzystane do produkcji wodoru, który może zastąpić olej opałowy. Pomysł zlokalizowania reaktora pod ziemią został już zrealizowany w Japonii.



# Reaktor wysokotemperaturowy

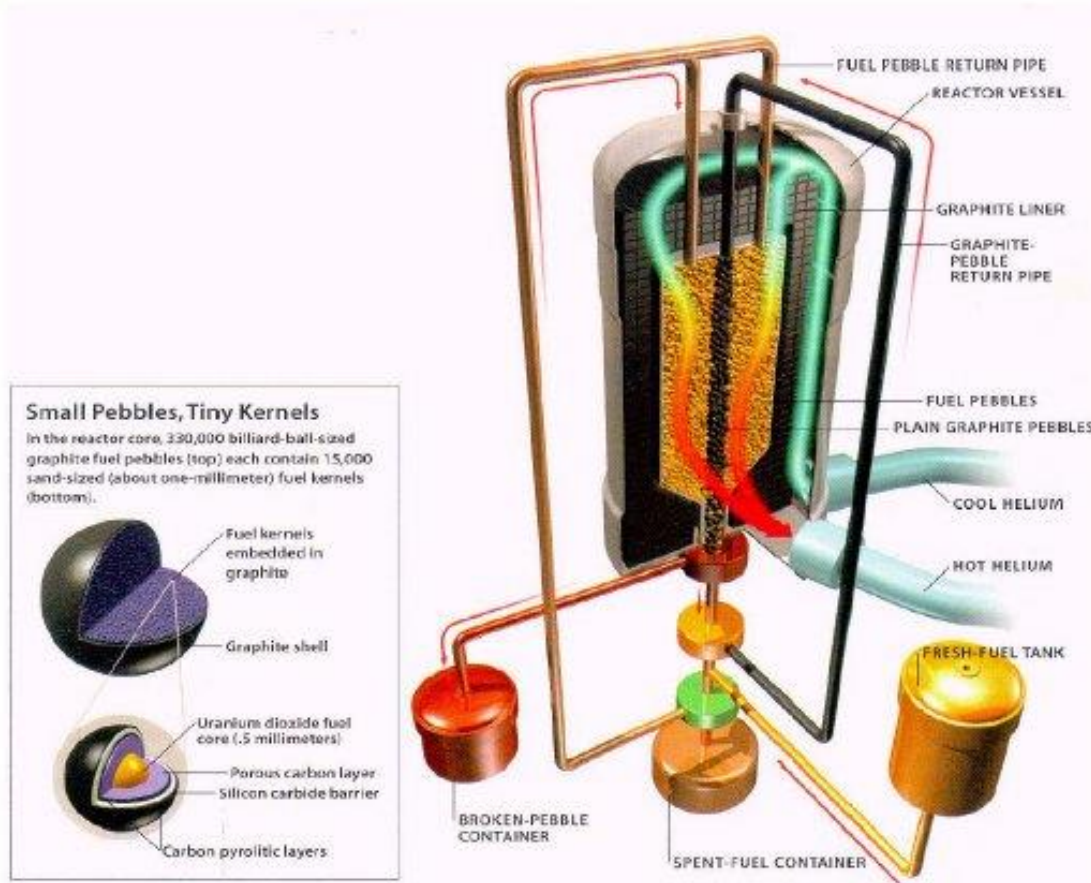


## Reactor Unit



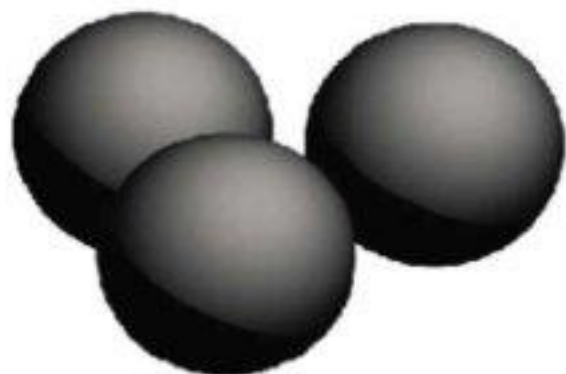
# Reaktor wysokotemperaturowy

## Pebble Bed Reactor and TRISO Fuel





## Element paliwowy reaktora



kule z uranem  
( $\Phi = 6 \text{ cm}$ )



przekrój kuli

powłoka węglowa (5mm)

cząstki z uranem osadzone w  
węglu



kilka różnych warstw  
ochronnych z węgla i  
węglika krzemu

cząstki z uranem w  
osłonach ( $\Phi \approx 1 \text{ mm}$ )



kuleczki z dwutlenku  
uranu ( $\Phi = 0,5 \text{ mm}$ )

# Ciepło z reaktora do przerobu węgla na paliwa gazowe i płynne

Pierwszym etapem produkcji benzyny syntetycznej jest gazyfikacja węgla:

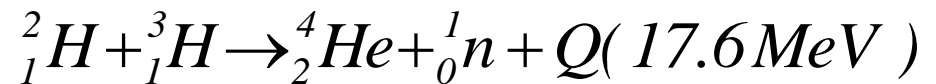
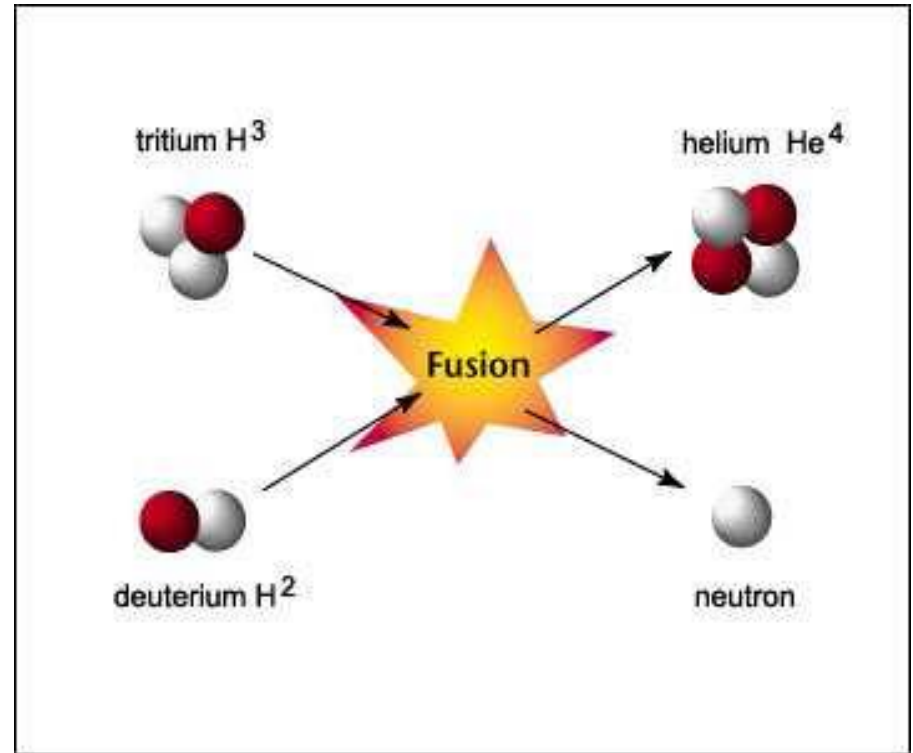
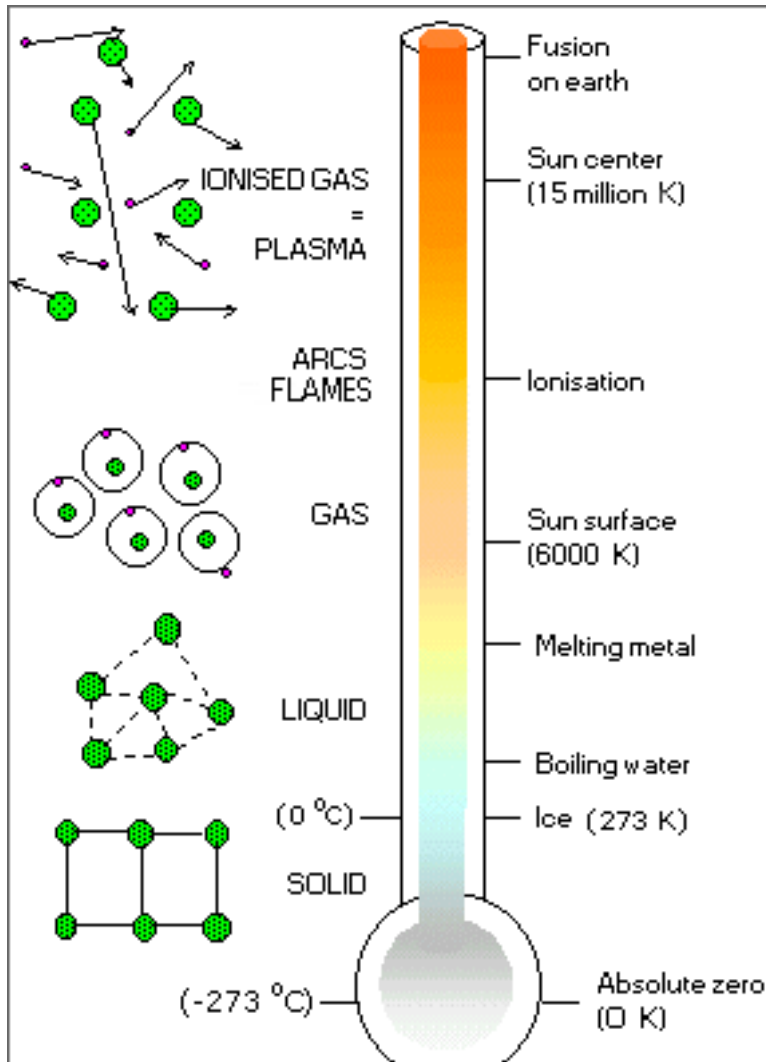


W kolejnych etapach gaz syntezowy oczyszcza się z  $CO_2$  i prowadzi się syntezę wodoru z tlenkiem węgla:



Technologia znana od lat, ale droga i uciążliwa dla otoczenia. Trzeba spalić kilka ton węgla, aby jedną tonę węgla przerobić na benzynę. Ciepło z reaktora wysokotemperaturowego umożliwi przerobienie nawet kilkuset tysięcy ton węgla rocznie na paliwa płynne i proces ten będzie mało uciążliwy dla środowiska

# Rekcje fuzji termojądrowej



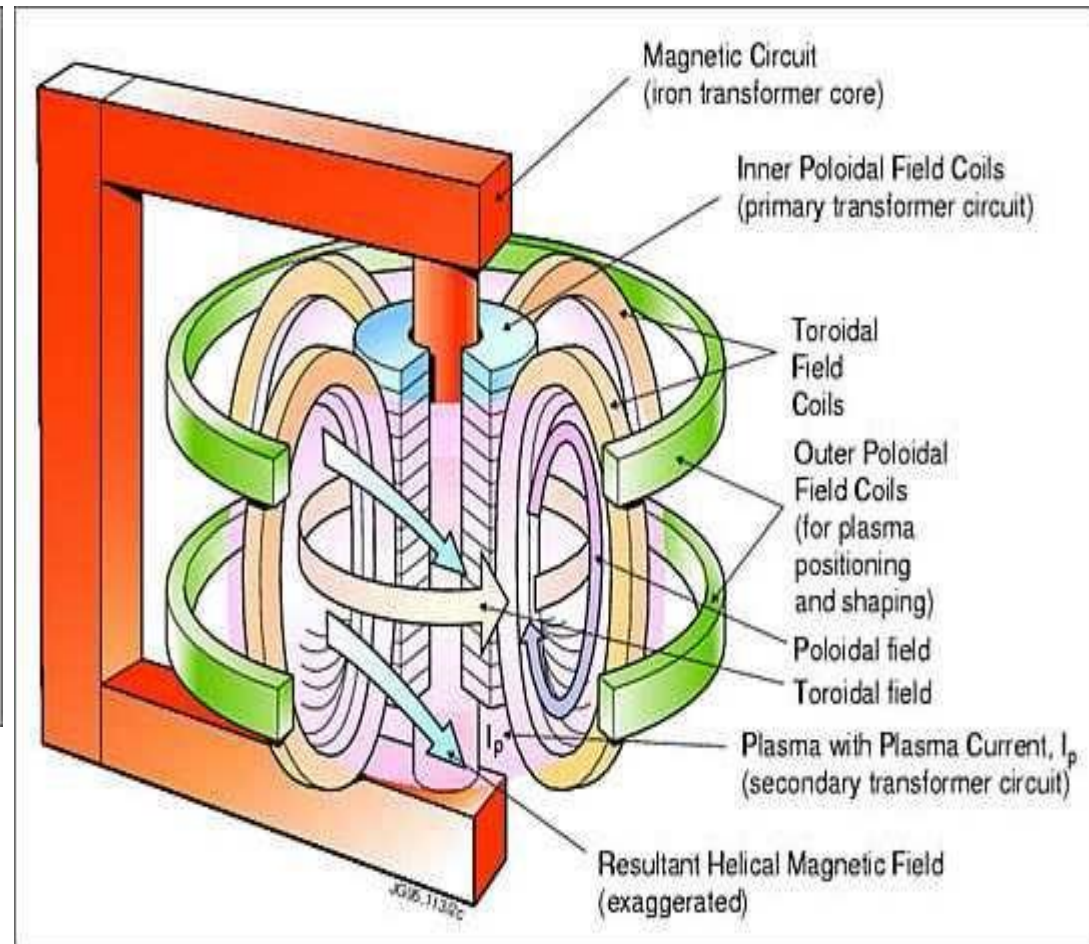
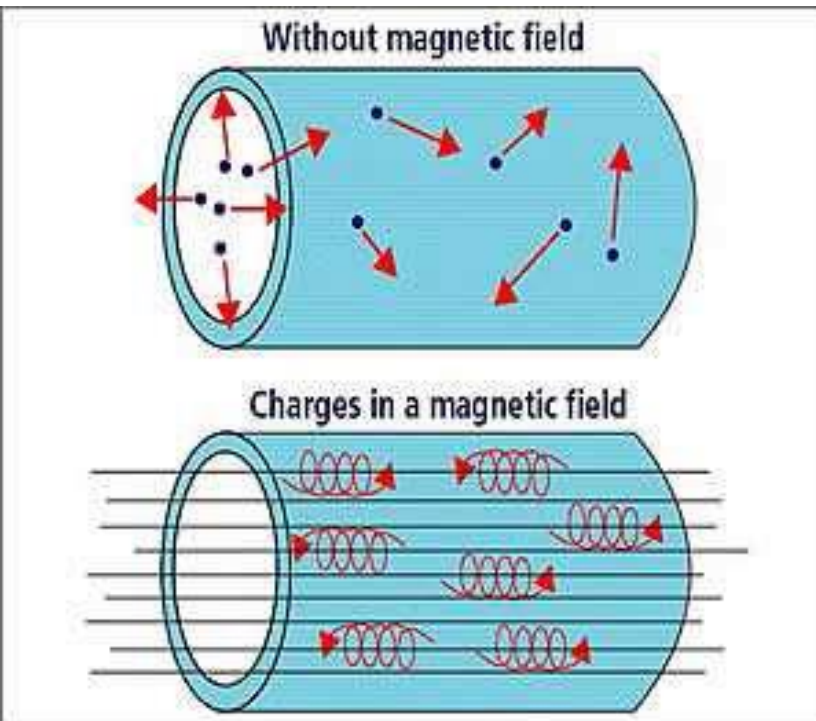
# Warunki zachodzenia reakcji

Iloczyn potrójny; kryterium Lawsona

- Temperatura; powyżej 100 mln K
- Gęstość (konieczność usuwania popiołu (He))
- Utrzymanie plazmy
- Iloczyn musi być większy niż ściśle określona wartość.



# Utrzymanie gorącej plazmy w reaktorze typu TOKAMAK





# Reaktor termojądrowy ITER w Cadarache (Francja)

## Budowa tokamaka

Centralny solenoid

Cewka toroidalnego pola magnetycznego

**Divertor:**  
Urządzenie oddzielające zanieczyszczenia z plazmy

Kriostat

Komora próżniowa

**Blanket:**  
Modułowa wykładzina komory plazmowej, której zadaniem jest wytwarzanie trytu i odbieranie energii uwalnianej w reakcji syntezy.





# Energetyka jądrowa

Aktualna problematyka energetyki, środowiska i ekologii

**BEDLEWO-POZNAN, POLAND  
7-9 DECEMBER 2008**

**CLEAN COAL AND NUCLEAR TECHNOLOGIES  
FOR COMBATING CLIMATE CHANGE**



## Programme and Presentations

**CONFERENCE  
"CLEAN COAL AND NUCLEAR TECHNOLOGIES FOR COMBATING CLIMATE  
CHANGE"**

Date: 7-9 December 2008

Venue: Palace in Bedlewo - Parkowa 1 Str., Poland

*(last update: 2008-12-09, 10:00)*

Message

## Programme and Presentations

Conference fee

Registration

Organizers

Partners

Sponsors

Honorary Patronage

Media Patronage

Venue and location

Contact

Interesting places to see



# Nuclear Generation: social consensus and technical, economic, environmental issues



**Paul Amoravain**  
Executive Vice-President,  
International Generation Projects

Bedlewo, Poland,  
December 9, 2008





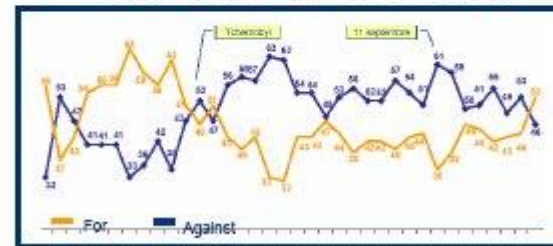


## France's energy policy backs nuclear revival

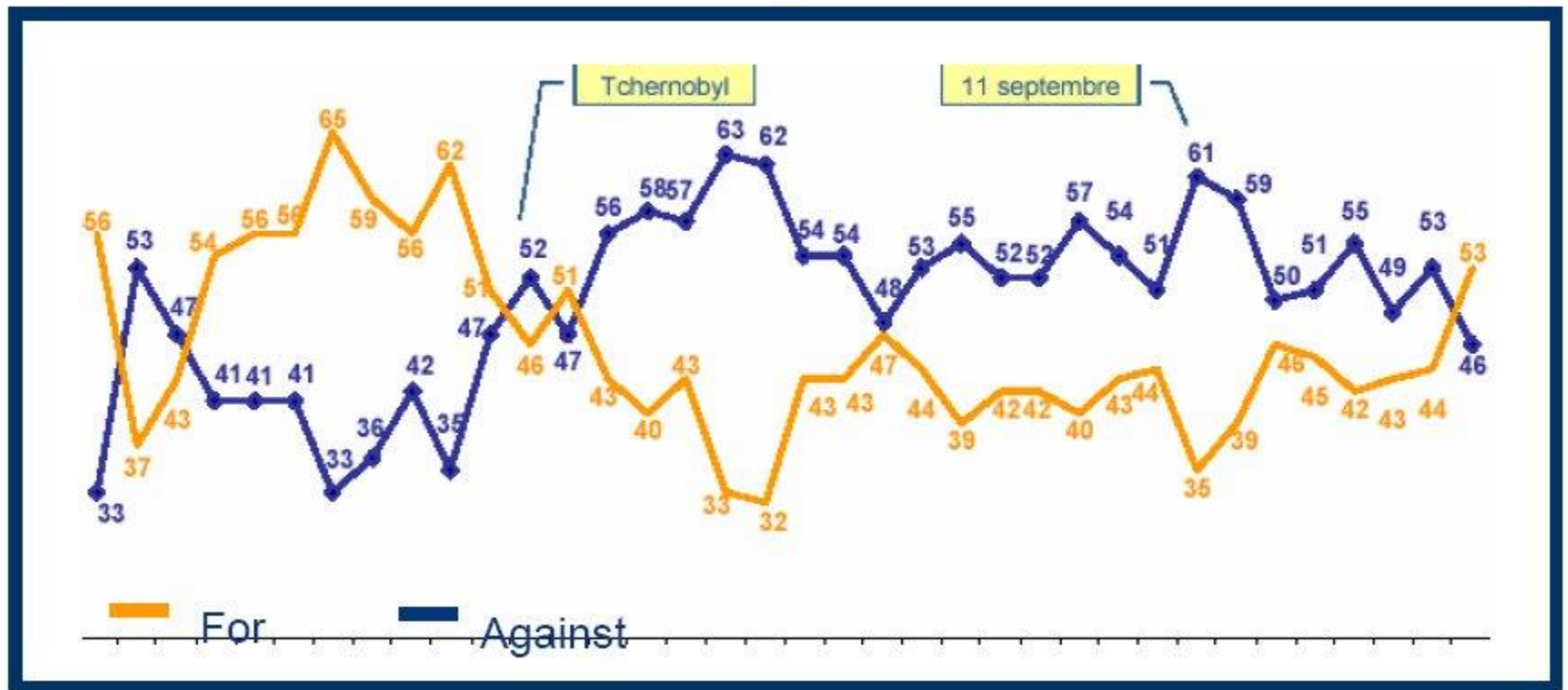
### Public acceptance

- 2003 : energy debate
- 2005 : law setting the energy policy guidelines
  - keep nuclear option open
  - bring a new generation reactor on-line in about 2015
- 2006 : law about nuclear **transparency**
  - strengthens the **nuclear safety authority independency**
    - defines safety objectives, approves satisfactory practices and ensures control over them
    - under joint authority of the Ministries of Industry, Environment and Health, undertakes planned and unscheduled on-site inspections
  - precise **transparency rules** : information rights for everybody / duties of Local Information Commission / National High Committee for transparency and information on nuclear safety.

French Public Opinion on Nuclear

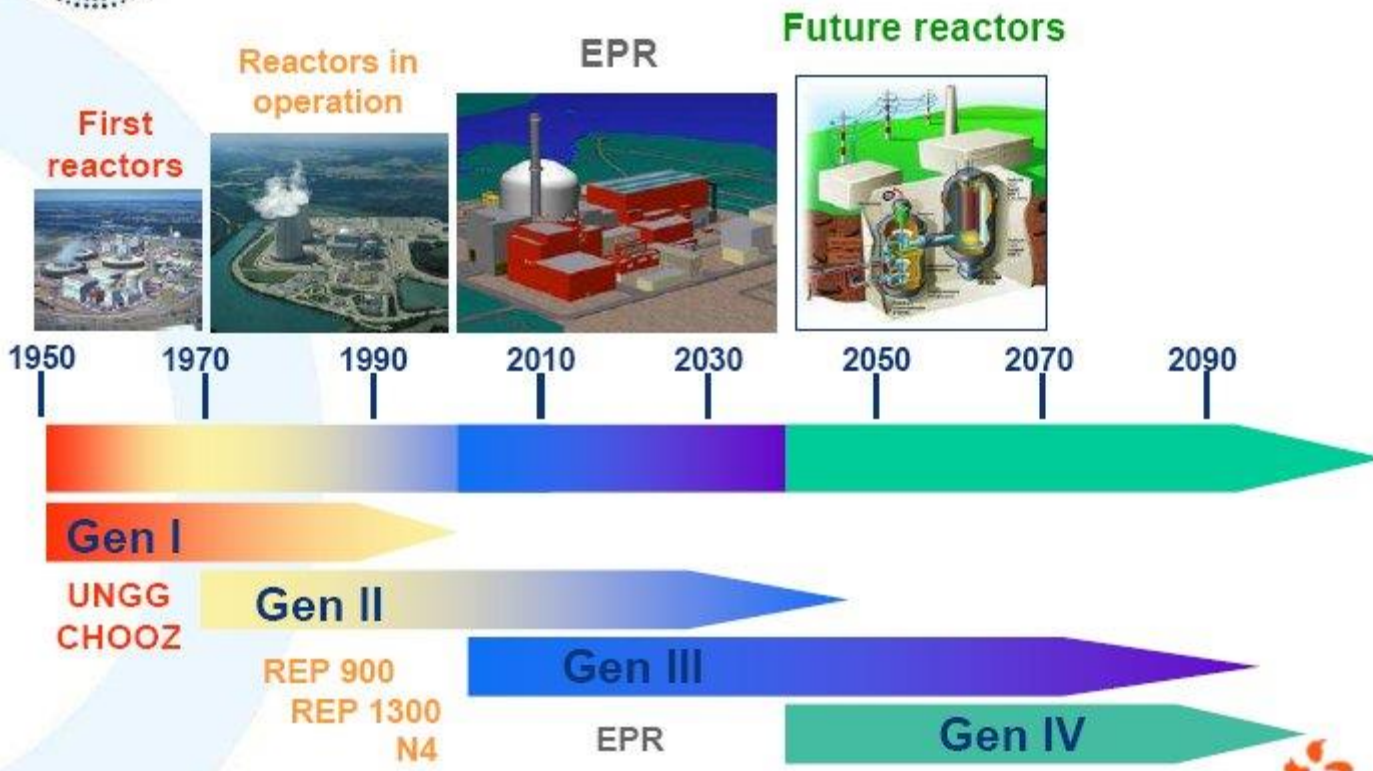


# French Public Opinion on Nuclear

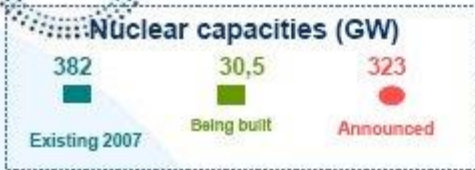




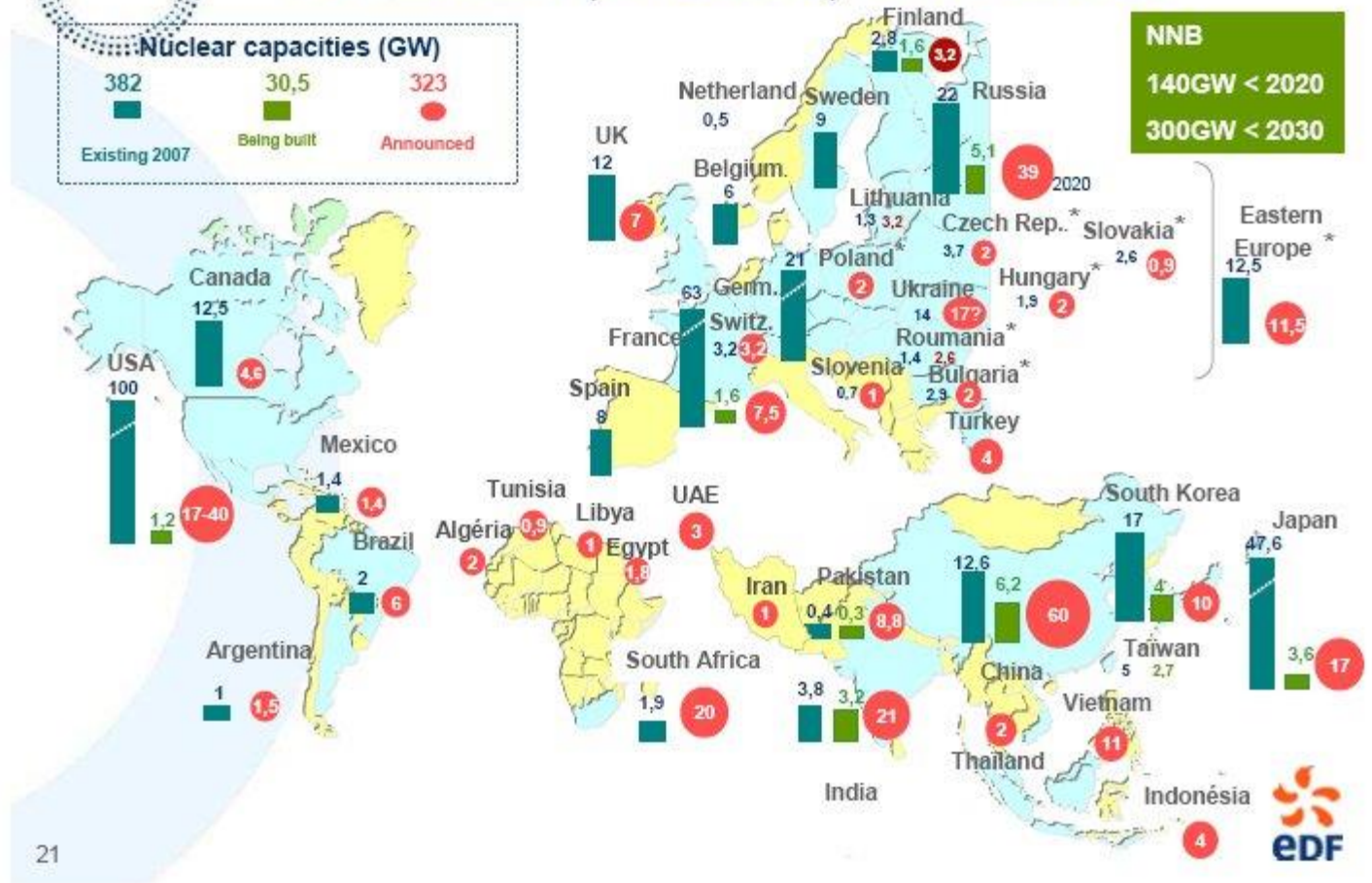
# EPR : a path between today's and future reactors



# New Nuclear Build Worldwide : GWs under Construction (June 2008) & Announced



**NNB**  
 140GW < 2020  
 300GW < 2030





# Nuclear Energy in Finland

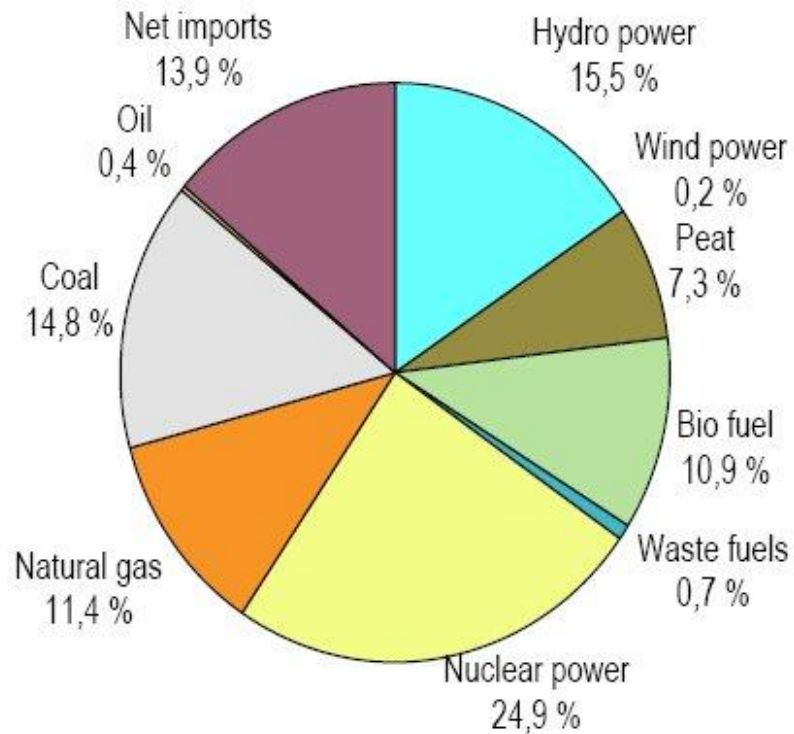
- ❑ Electricity Supply in Finland
- ❑ Recent National Climate and Energy Strategy
- ❑ Nuclear Power in Finland
  - Existing and Planned Nuclear Power Plants
- ❑ Nuclear Licencing
- ❑ Cost base model enabling nuclear power projects
- ❑ Nuclear Waste Management

***Clean Coal and Nuclear Technologies for Combating Climate Change  
– European Initiatives in Nuclear Energy***

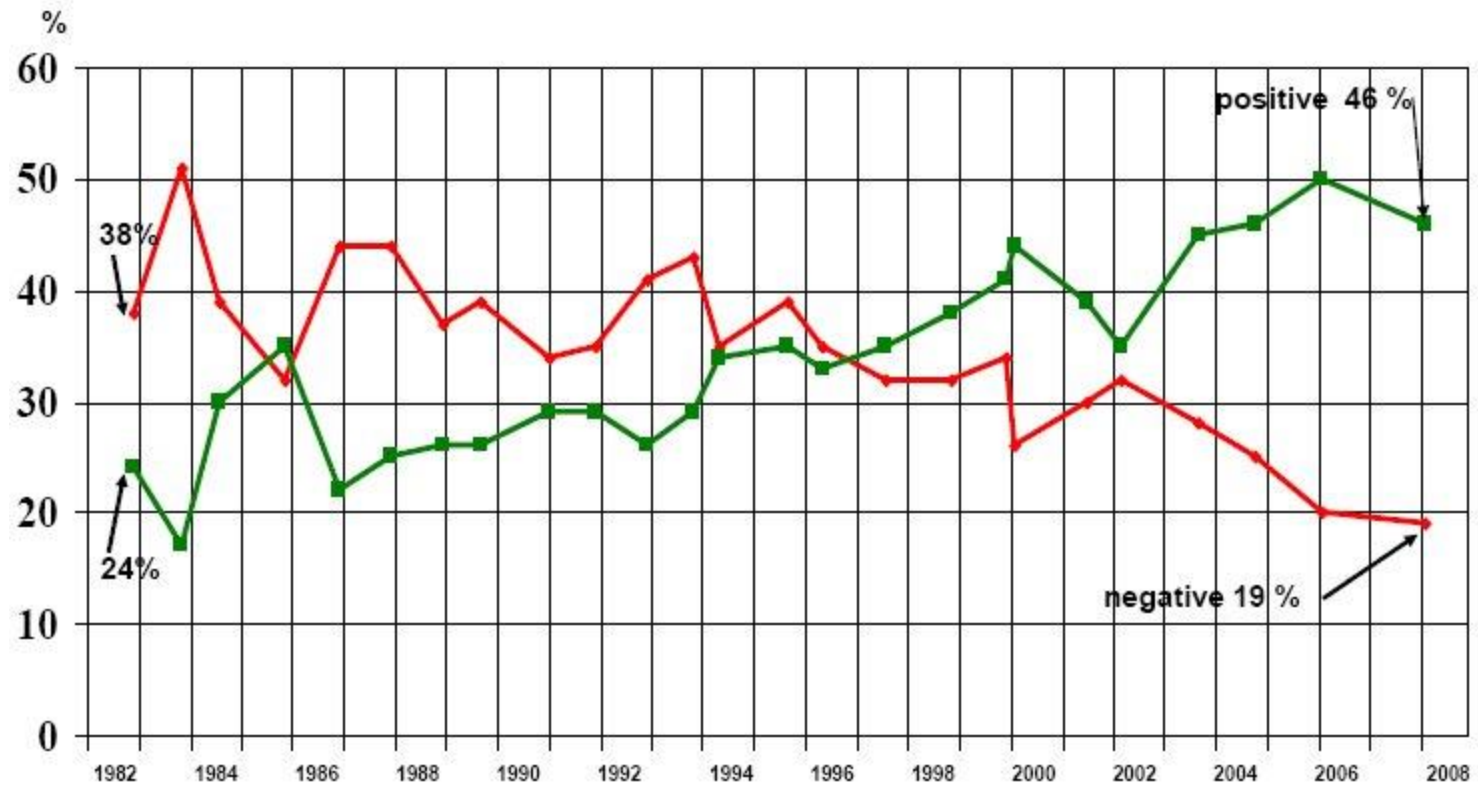
*Bedlewo/Poznan, Poland, 9 December 2008*

*Jouko Rämö, Pohjolan Voima Oy (PVO)*

## Electricity Supply by Source of Energy in Finland (90,3 TWh in 2007)



## Acceptance of nuclear power in Finland 1982 - 2008



Source: TNS Gallup Oy





# POLISH CLEAN COAL TECHNOLOGY INITIATIVES

**ANDRZEJ SIEMASZKO**

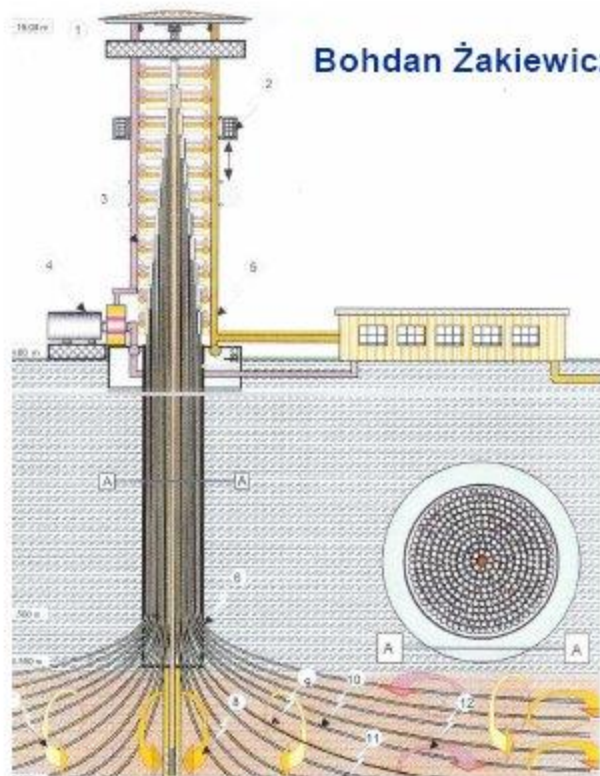
NATIONAL CONTACT POINT FOR EUROPEAN RESEARCH PROGRAMMES

GOVERNMENT GROUP OF THE ZERO EMISSION FOSSIL FUEL POWER PLANT  
EUROPEAN TECHNOLOGY PLATFORM

[www.kpk.gov.pl](http://www.kpk.gov.pl)



# RYBNIK PILOT PLANT ENHANCED COAL BED METHANE UNDERGROUND COAL GASIFICATION



## Pilot Plant in Rybnik

- ❑ Single SDS shaft
- ❑ 4 km<sup>2</sup> of georeactor
- ❑ 100 mln m<sup>3</sup>/yr syngas production =
  - ❑ (75 mln m<sup>3</sup>/yr hydrogen)
  - ❑ 35-50 MWe power production
- ❑ 50 years of exploitation



## The potential of HTR for contributing to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions and security of energy supply in Europe

Dominique Hittner

AREVA NP

Chairman of the (European) HTR Technology Network  
(HTR-TN)





# Why do we need HTR?



- Specific assets of modular HTR

- **High temperature**

- Beyond electricity generation, a large range of industrial process heat applications
    - Cogeneration application: a growing need of industry

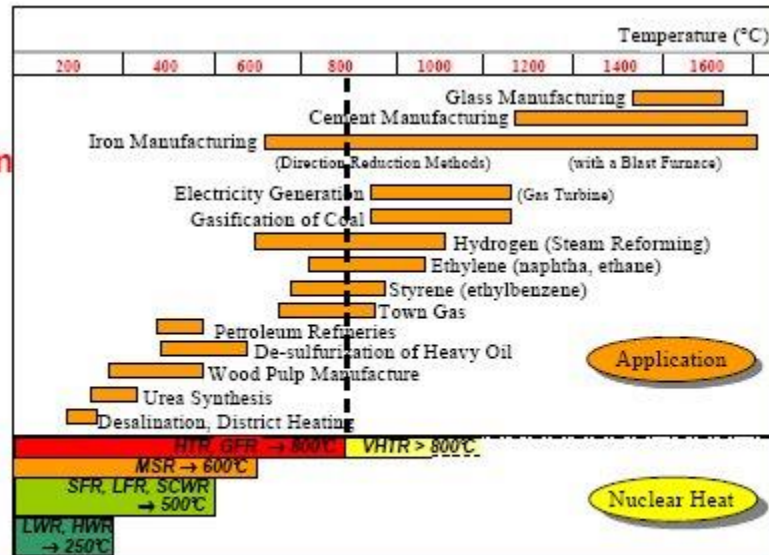
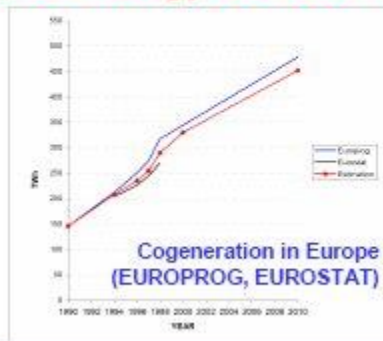
- **Flexibility**

- Modular concept: possibility to adapt more easily to the versatility of applications power needs
    - Cogeneration: even more fine tuning

- **Mature technology**

- It can address *in the short term* the reduction of CO<sub>2</sub> emissions and energy independence

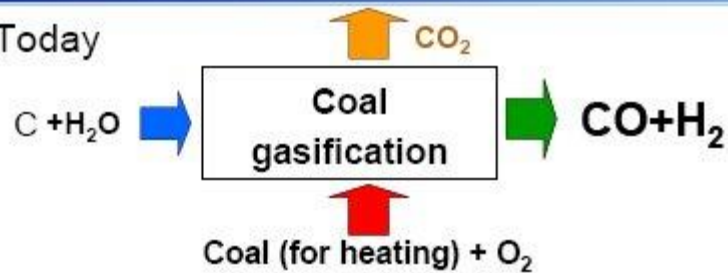
⇒ **HTR: most appropriate fission system to address energy needs of industry**



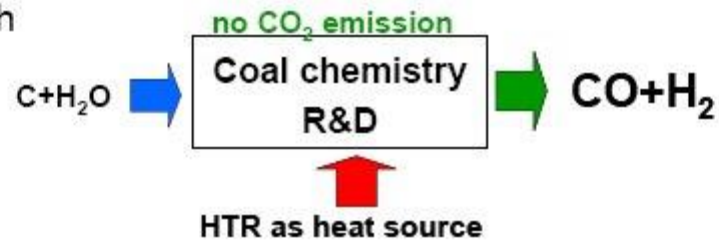


# Syngas production

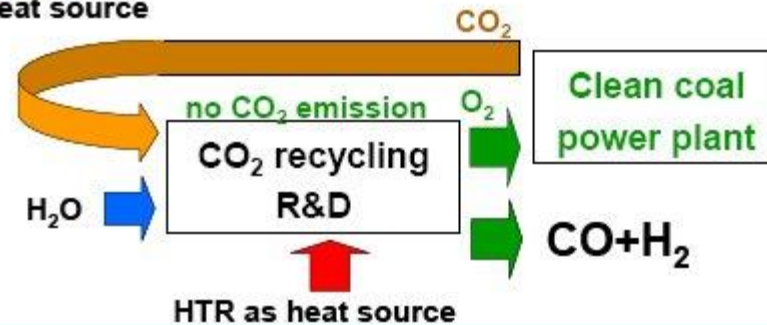
- Today



- A short term path



- A longer term path





# The assets of Europe: the present situation



- The renaissance of HTR technology development in Europe

- Materials qualified for HTR applications
- Advanced technologies for heat exchangers developed
- Fuel manufacturing technology recovered



*UO<sub>2</sub> kernel fabrication*



*UO<sub>2</sub> kernel coating  
(CEA Cadarache)*



*HE-FUS3 helium loop  
(ENEA Brasimone)*



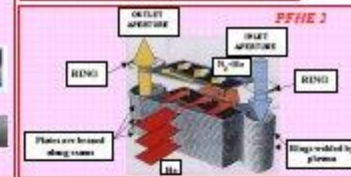
*PMHE concept*



*Corrugated plate IHX*



*PFHE 1*



*PFHE 2*

*Plate heat exchanger concepts*

- EURATOM is involved in GIF VHTR projects

- The European industry is involved in the main international HTR projects (USA, South Africa and China), supplying technology and components

⇒ Europe is also ready to develop its own HTR:

**within 10 to 15 years there could be in Europe a HTR demonstrator supplying heat to industrial processes**





NIE WÓJ  
WOMOCY  
I POMOCY

No dobrze – elektrownie atomowe nie są piękne. Ale te potężne, betonowe rury to nie kominy, tylko wleża chłodnicze, a ledź z nich nie dym, lecz czysta para wodna

KIEDY SPOJRZYSZ  
NA OBRAZEK OBOK,  
DOMYŚLISZ SIĘ, ŻE **NIE  
ZAMIERZAM STRASZYĆ  
TU ŚMIERCIONOŚNĄ  
ENERGIĄ ATOMOWĄ.**  
GDYBYM – TAK JAK  
TO ROBIĄ NIEKTÓRE  
ORGANIZACJE ZAJMUJĄCE  
SIĘ (PODOBNO)  
OCHRONĄ ŚRODOWISKA  
– CHCIAŁ OSTRZEGAĆ  
I GROZIĆ, WYBRAŁBYM  
RACZEJ CZARNO-BIAŁE  
ZDJĘCIE ROZWALONEGO  
REAKTORA  
W CZARNOBYLU ALBO  
LUDZI UBRANYCH  
W STROJE OCHRONY  
RADIOLOGICZNEJ

# ZŁ

PIOTR STANIŚLAWSKI

**S**traszyć już nie trzeba. Katastrofa jądrowa z 1986 roku napędziła światu globalnego stracha, którego nie pozbył się do dziś. Wzmogła go jeszcze sowiecka tradycja nieinformowania o tym, co naprawdę się stało. Zwykle służyła ona wzmocnieniu wszystkim, że jest znacznie lepiej, niż było w rzeczywistości. Tym razem jednak zadziałała odwrotnie. Wypadek w elektrowni imienia Lenina, co można ocenić po ponad 20 latach, okazał się znacznie mniejszą katastrofą, niż dziś się sądzi. Najpoważniejszą jego konsekwencją dla świata było nie skażenie radioaktywne, lecz powszechny, paniczny i niepoddający się rozsądkowi strach przed energią jądrową.

Tymczasem prawda jest okrutna – nie ma obecnie czystszej, bezpieczniejszego i wygodniejszego źródła energii niż energia jądrowa. Z pewnością nie zgodzi się ze mną Greenpeace, ale my często się nie zgadzamy. Strona [www.greenpeace.org/poland/kampanie/energia-atomowa](http://www.greenpeace.org/poland/kampanie/energia-atomowa) ostrzega, że energia atomowa jest niebezpieczna i droga, a rozsądną dla niej alternatywą są odnawialne źródła energii.

Kwestią tak zwanych czystych źródeł zajmujemy się na stronie 40. Warto jednak zwrócić uwagę, że o nowej energii piszemy raczej w czasie przyszłym – żadna z istniejących technologii nie jest na tyle efektywna, by choć w najmniejszym stopniu zagrozić paliwom kopalnym lub materiałom rozszczepialnym. Co więcej, te najbardziej obiecujące z nowych źródeł energii napotykają przeszkody inne niż tylko techniczne niedoskonałości. Elektrownie wiatrowe, by miały rację bytu, muszą zajmować ogromne przestrzenie. Każdy chciałby korzystać z czystych źródeł prądu, lecz nikt nie chciałby mieszkać w pobliżu ogromnych, zasłaniających niebo wiatraków. Umieszczanie ich, jak to się ostatnio robi, na morzu, poza zasięgiem wzroku wcale nie jest takie łatwe – niewiele jest na świecie miejsc, w których odpowiednio mocno i stale wieje.

Z kolei elektrownie słoneczne są rozpaczliwie mało efektywne. Ogniwa, które nie kosztują fortuny, potrafią „odzyskać” zaledwie 15 procent energii, jaką emituje Słońce. Na jeden metr kwadratowy Ziemi pada energia około jednego kilowata. Z tego potrafimy wyciągnąć ledwie 150 watów – dość, by zasilili dwie żarówki. Do zasilania czajnika elektrycznego potrzebowalibyśmy 10–15 metrów kwadratowych ogniw. I znowu nikt nie chce mieszkać w sąsiedztwie pozbawionych zieleni pól w całości przykrytych bateriami słonecznymi. Nie twierdzę, że źródła odnawialne nie mają sensu. Po prostu przez dziesięciolecia nie będą jeszcze dość doskonałe, by mogły zastąpić ropę, węgiel i atom.

**Łap neutrony!**  
Wady paliw kopalnych znamy wszyscy i już oswoiliśmy się z dymem walącym z kominów. Tymczasem tajemnicze procesy zachodzące →

# o najmniejsze



→ wewnątrz elektrowni atomowej pozostają niezrozumiałe, a kojarzą się przede wszystkim z Hiroszimą i Czarnobylem.

Pierwsze nieporozumienie to kojarzenie elektrowni jądrowej z wybuchem jądrowym. Cokolwiek by robić i jakkolwiek by się starać, paliwo używane w reaktorze nie może ulec niekontrolowanej reakcji łańcuchowej prowadzącej do wybuchu. To nie kwestia zabezpieczeń, lecz praw fizyki. Uran będący paliwem elektrowni składa się w ponad 99 procentach z izotopu U-238 i w mniej niż 1 procentcie z U-235. Materiał rozszczepialny bomby atomowej to w stu procentach U-235. Jaka jest różnica? Zasadnicza. Reakcja rozszczepienia całego materiału w bombie atomowej przebiega w ułamku sekundy, a cała energia wydziela się niemal w tym samym czasie. W reaktorze reakcja zachodzi tygodniami, powoli przetwarzając paliwo.

**NIE TWIERDZĘ, ŻE ODNAWIALNE ŹRÓDŁA ENERGII NIE MAJĄ SENSU. JEDNAK DOPÓKI NIE UCZYNIAMY ICH REALNĄ KONKURENCJĄ DLA WĘGLA I ROPY, POZOSTAJE NAM TYLKO JEDNA DROGA – ATOM**

Istotą reakcji łańcuchowej jest rozpad jądra uranu, podczas którego wydzielają się dwa lub trzy neutrony. Uderzają one w kilka kolejnych jąder U-235, powodując ich rozpad i wydzielanie kolejnych neutronów. Reakcja błyskawicznie się rozszerza, w ułamku sekundy obejmując cały materiał rozszczepialny i nagle wyzwala energię. Tak się dzieje, gdy reakcja przebiega w czystym uranie 235.

Tymczasem w reaktorze znajduje się dużo uranu 238, który ma zdolność pochłaniania neutronów. Te, zamiast wywoływać kolejne rozpady, grzęzną w uranie 238 i reakcja nie dochodzi do skutku.

By w ogóle uruchomić reakcję w reaktorze, trzeba zastosować pewien trik. Normalnie neutrony po rozpadzie jądra pędzą jak oszalałe. Jeśli jednak uda się je spowolnić, to za-

miał wbijać się w jądra U-238 i tam zostawać, odbijają się od nich jak piłki i mają jeszcze szansę trafić na jakieś jądro U-235. Taki zwalniacz neutronów nazywa się moderatorem. Może nim być zwykła lub ciężka woda (jak w większości nowoczesnych elektrowni) bądź grafit (jak w Czarnobylu). Jeżeli wszystko dobrze się zaplanuje, średnio jeden neutron z każdego rozpadu trafia na jądro U-235 i wywołuje kolejny rozpad. Dzięki temu reakcja ani nie przyspiesza, ani nie zwalnia i pozostaje na stałym, bezpiecznym poziomie.

### Atom w kulkach

Jeśli w wyniku awarii, zamachu albo błędu moderator zostanie usunięty z reaktora, neutrony znowu przyspieszą i zaczną wbijać się w jądra U-238, a cała reakcja nagle się zatrzyma. Co prawda radioaktywność i związana z nią temperatura nadal będą wysokie, ale z całą pewnością nie uda się zrobić z tego bomby atomowej. Można by jeszcze zapytać, co się stanie przy nadmiarze moderatora: czy mnóstwo wolnych neutronów nie wywoła wybuchu jądrowego? Tę sytuację znamy aż za dobrze – właśnie to zdarzyło się w Czarnobylu. Reakcja łańcuchowa wymknęła się spod kontroli i zaczęła przyspieszać, jednak niska zawartość U-235 nie pozwoliła jej się rozkręcić. Zamiast tego gwałtowny wzrost temperatury wywołał wybuch pary, który rozsądził reaktor, jednak nie miało to nie wspólnego z wybuchem jądrowym.

Od tego czasu wiele się nauczyliśmy. Dziś eksperymentuje się z tak zwanymi reaktorami ze złożem usypanym (PBR), których konstrukcja w zasadzie nie wymaga stosowania dodatkowych zabezpieczeń, bo paliwo wraz z moderatorem wsypywane jest w postaci małych kulek. Tu nie może się przegrzać, wyciec ani wybuchnąć. Takie reaktory mamy już w zasięgu ręki, znacznie bliżej niż choćby ogniwa słoneczne o rozsądnej efektywności.

Pozostaje jeszcze kwestia odpadów radioaktywnych. Tych jednak wcale nie jest aż tak wiele. Poza tym nauczyliśmy się je całkiem bezpiecznie składować. Oczywiście koszt tego jest bardzo wysoki, ale koszt – zwłaszcza dla środowiska – alternatywy paliw kopalnych wydaje się znacznie większy. □