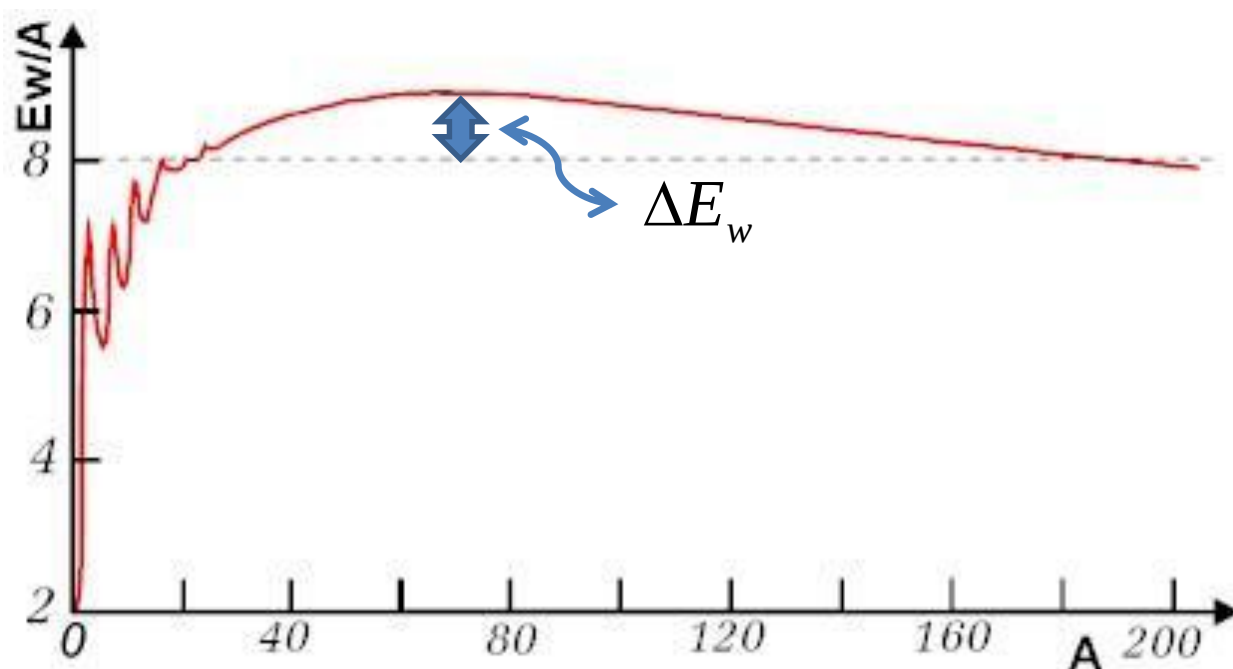


Reakcje rozszczepienia i energetyka jądrowa

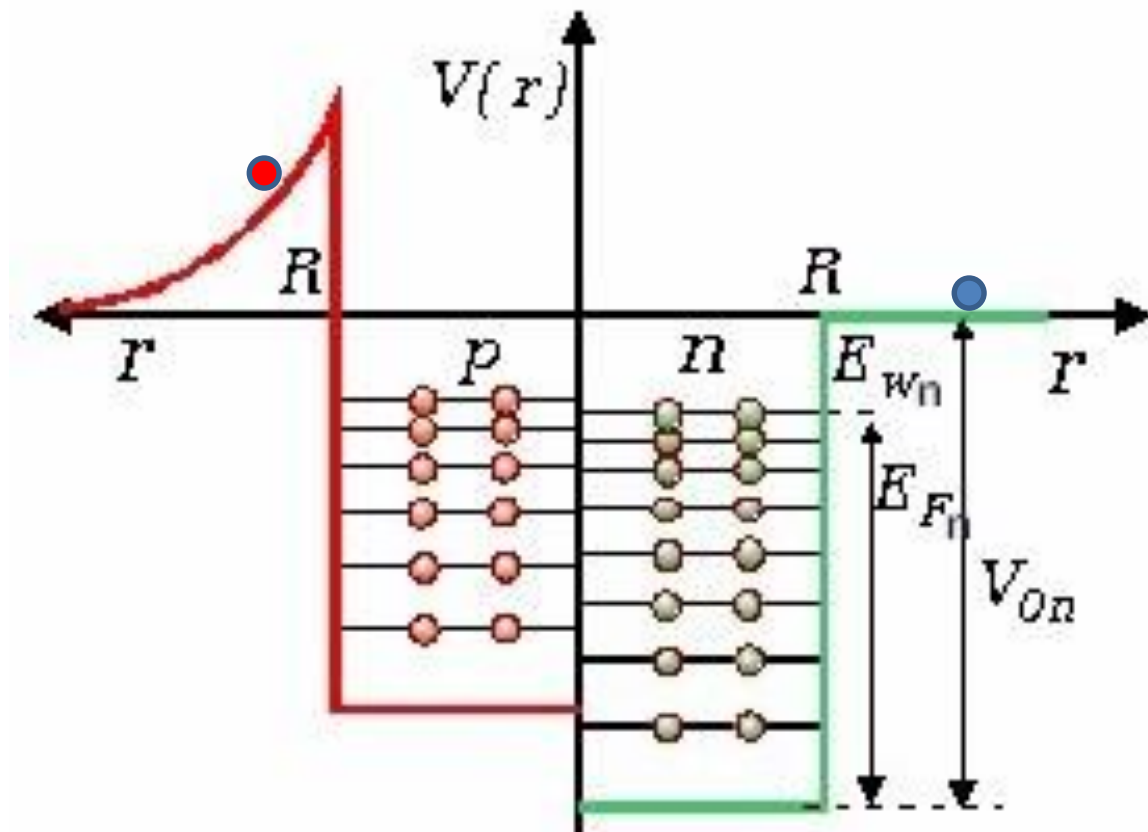
Energia wiązania nukleonu w jądrze w funkcji liczby masowej jądra A:



Warunek energetyczny – deficyt masy:

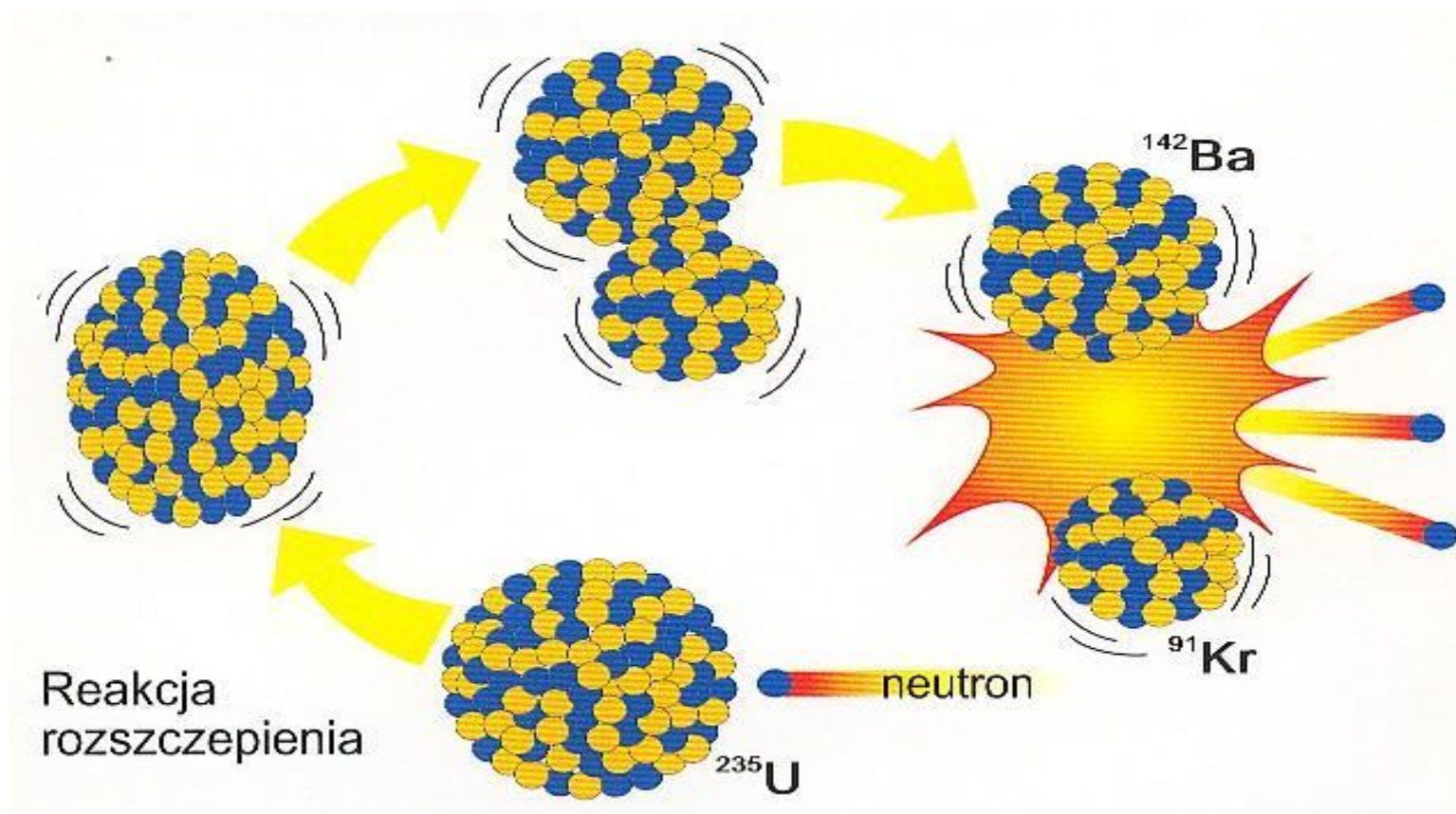
$$E_w = \Delta M \cdot c^2 = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_j) \cdot c^2$$

Reakcja rozszczepienia



Studnia potencjału dla protonu i neutronu

Reakcja rozszczepienia

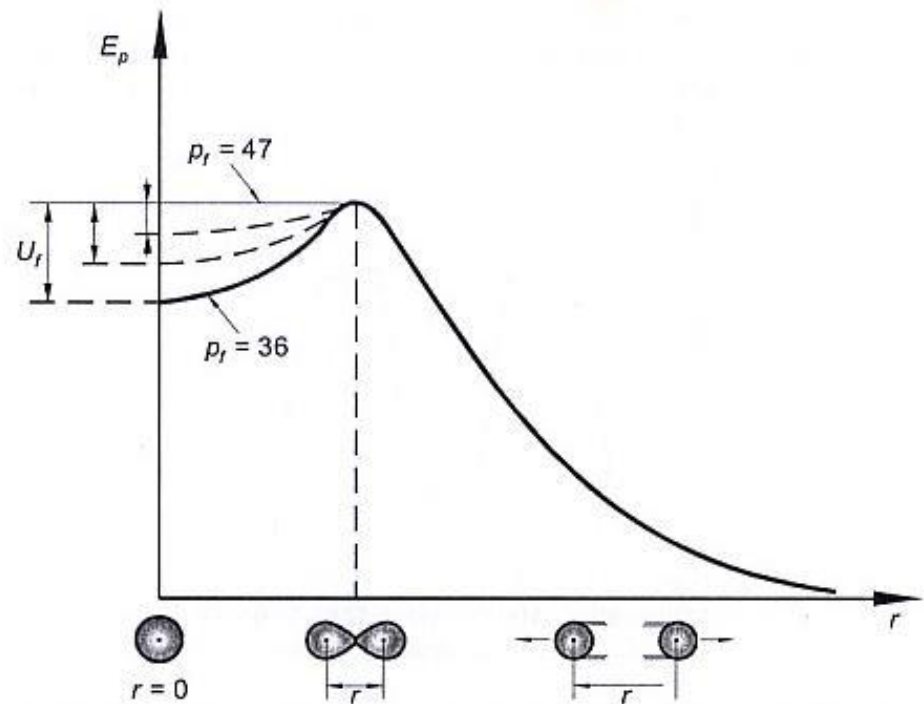
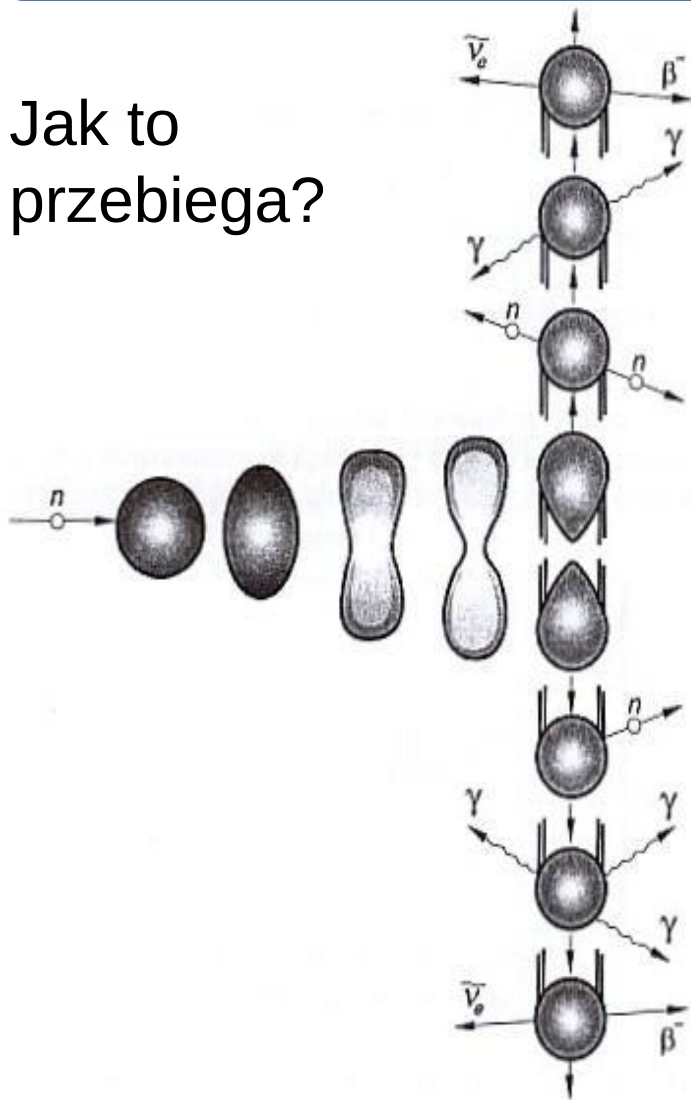


Przykładowa
reakcja
rozszczepienia



Reakcja rozszczepienia

Jak to przebiega?



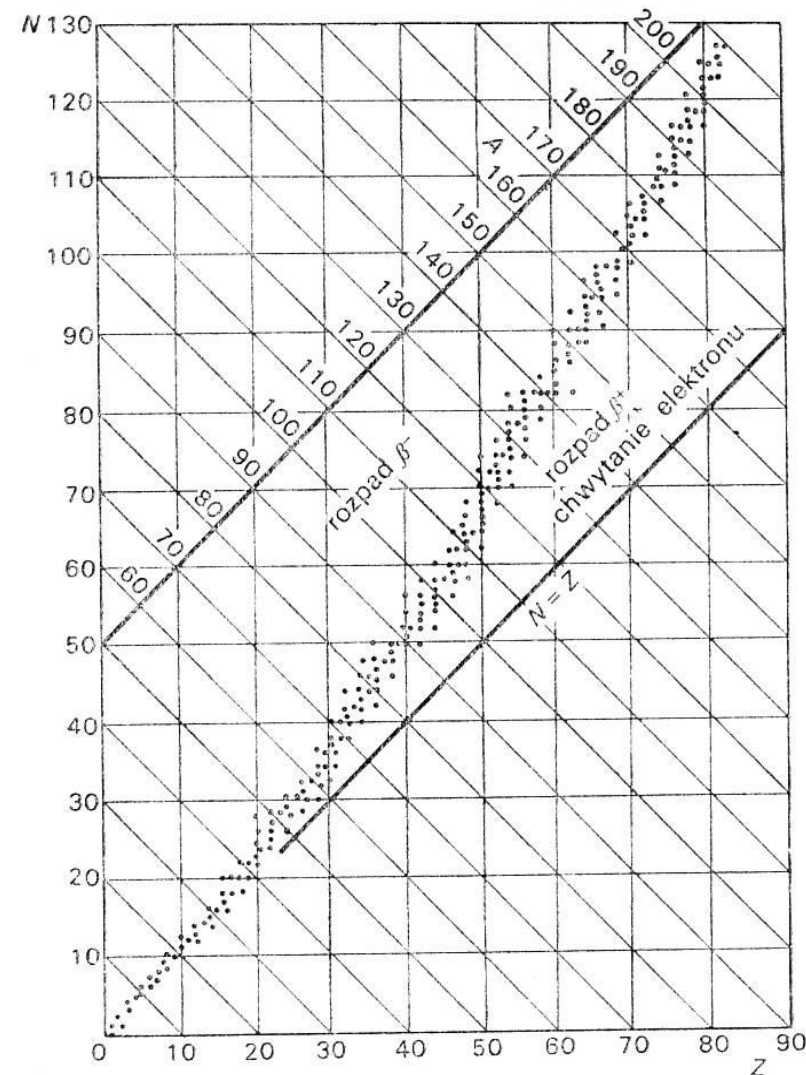
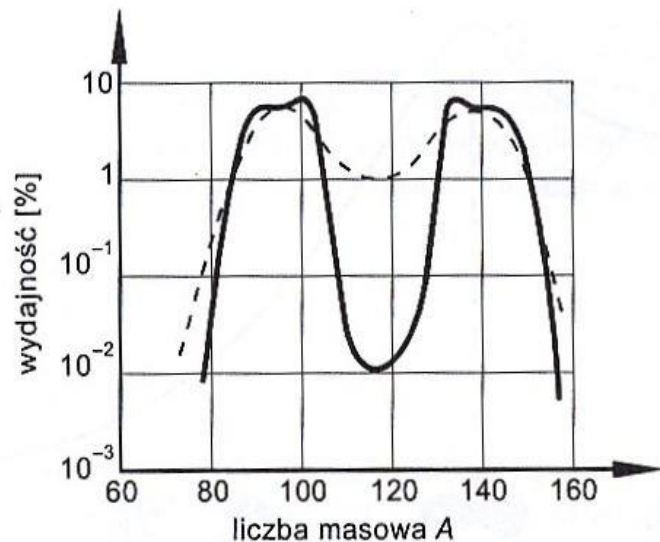
Rys. 11.8. Energia potencjalna E_p rozszczepiającego się jądra, w zależności od parametru r deformacji; U_f – bariera rozszczepienia (w jednostkach energii), $p_f = Z^2/A$ – parametr rozszczepienia

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

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}U rozszczepianych przez neutrony termiczne (krzywa ciągła) i neutrony prężkie 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

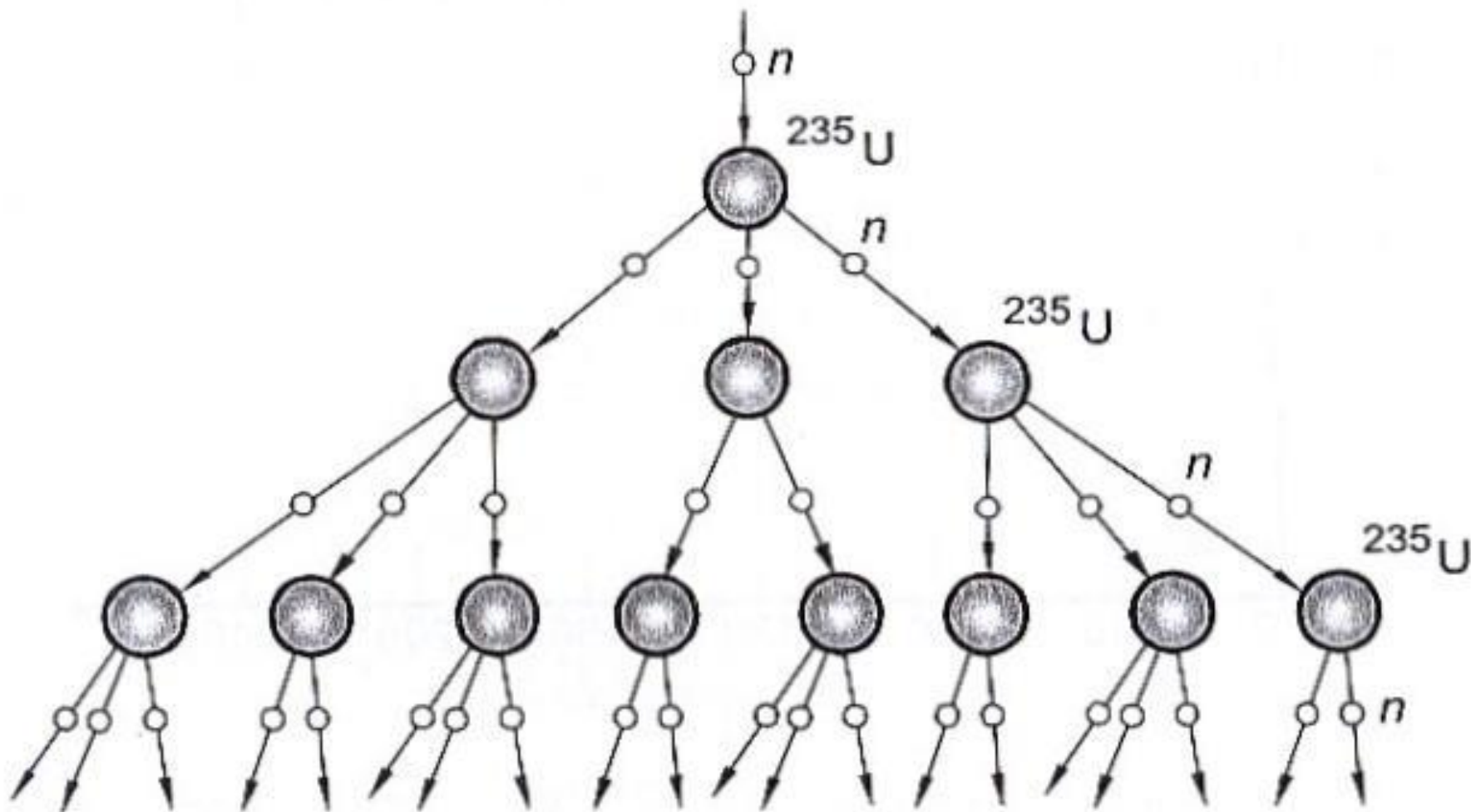
Rodzaj i ilość energii wydzielanej przy rozszczepieniu jednego jądra ^{235}U przez neutron termiczny

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?



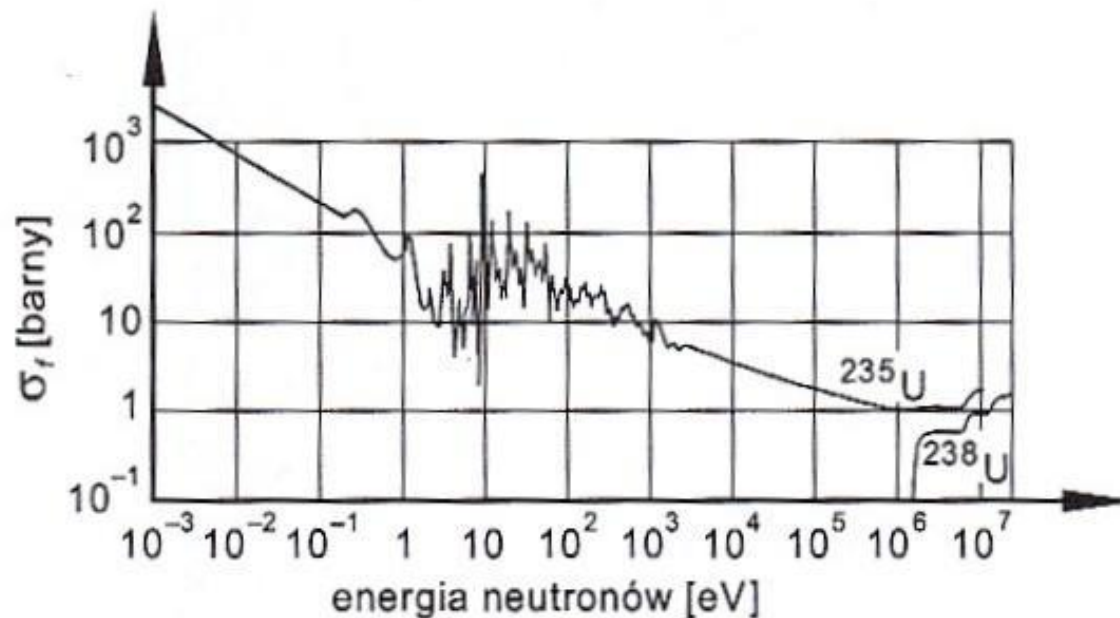
Rys. 11.10. Rozwój lawinowej reakcji rozszczepień jąder ^{235}U

Reakcja rozszczepienia

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

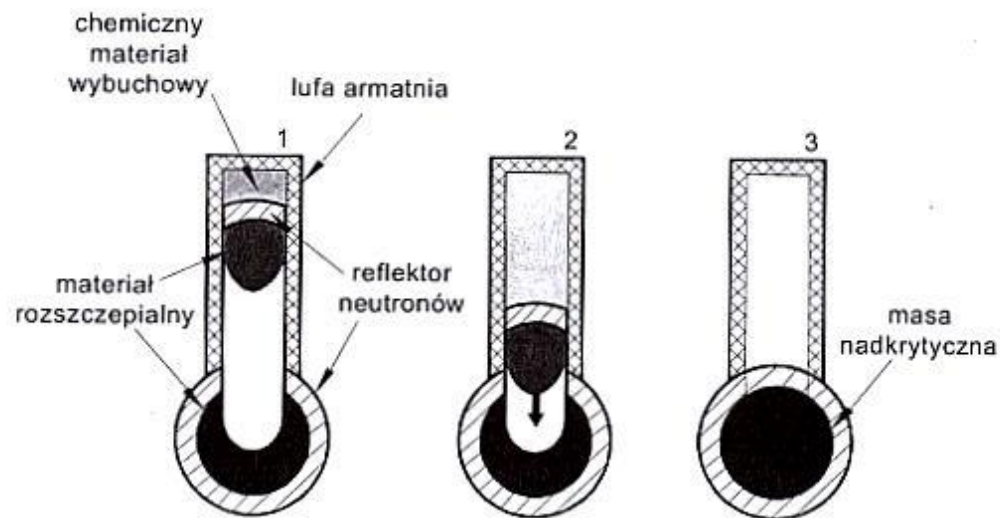
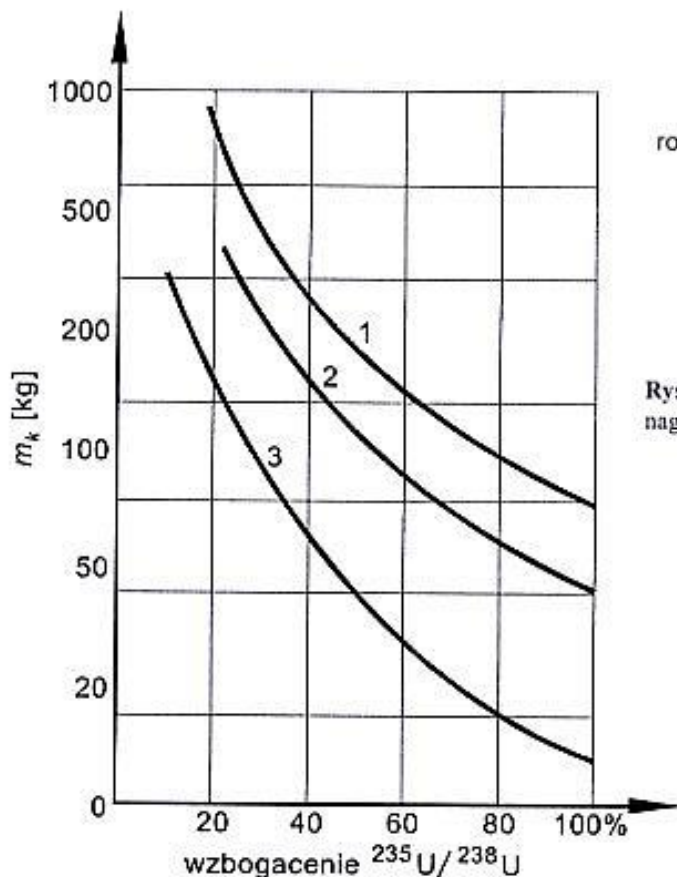
Materiały rozszczepialne: ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu

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



Rys. 11.5. Przekroje czynne σ_f na rozszczepienie jąder ^{235}U i ^{238}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 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

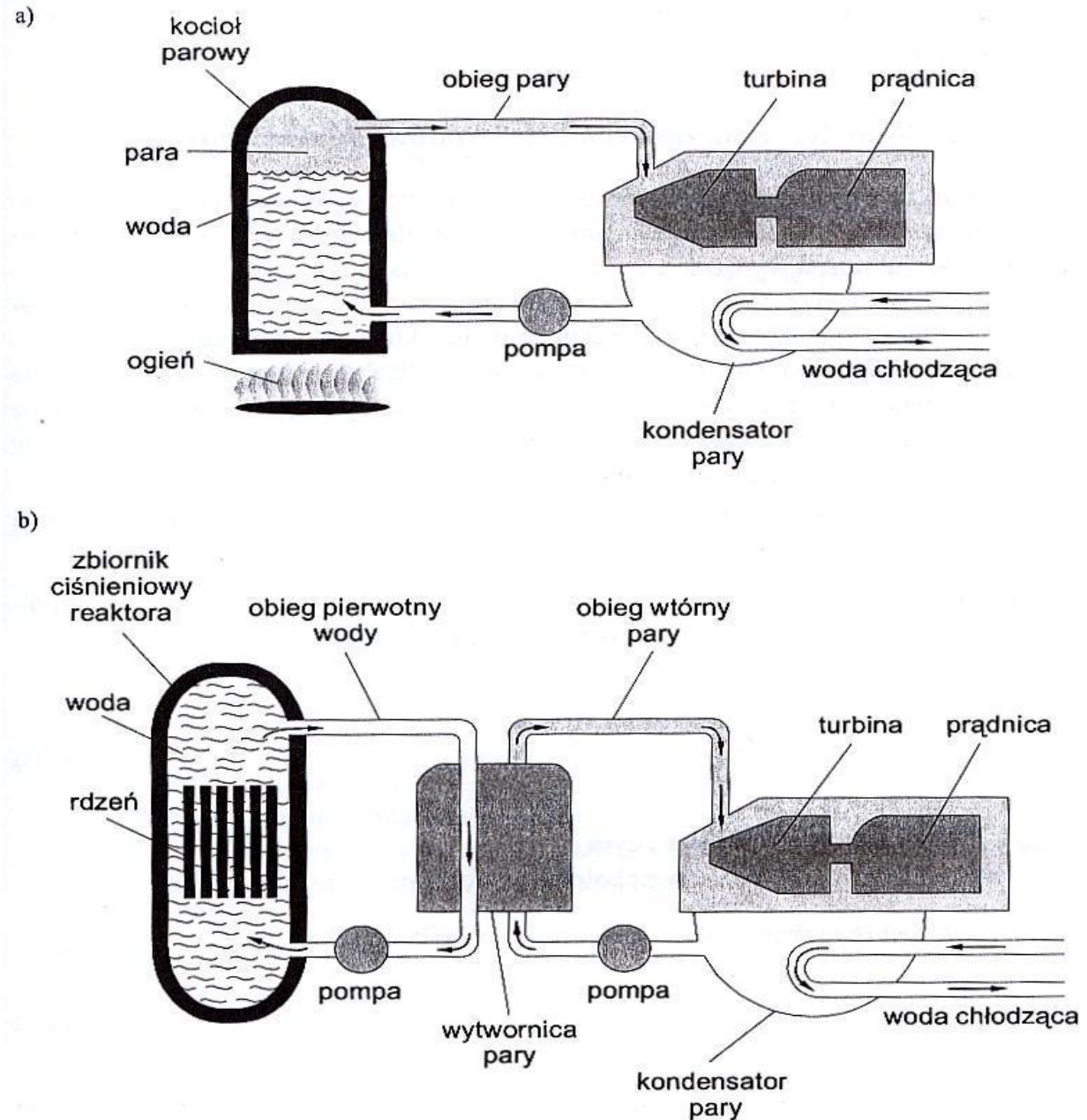
(wg Z. Celińskiego: *Energetyka jądrowa*. Warszawa, PWN 1991)

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:

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

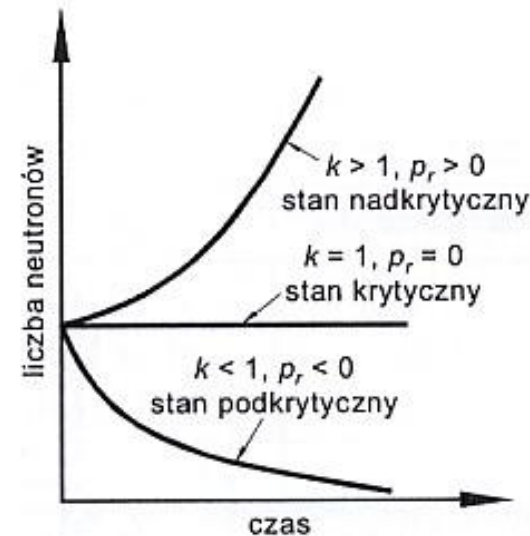
n_i – liczba neutronów w i-m pokoleniu

n_{i+1} – liczba n. w nast. pokoleniu

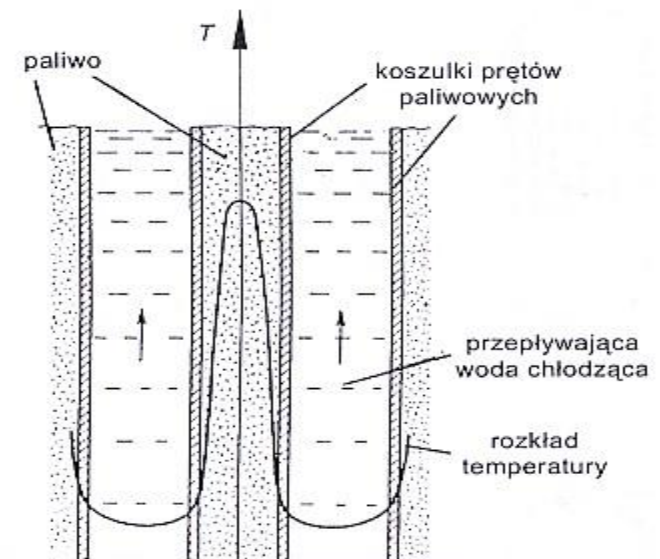
Współczynnik reaktywności:

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

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 przecie 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 - p_r rośnie
- Zmniejszenie gęstości wody – p_r maleje (efekt dominujący)
- Wzrost temperatury => zmniejszenie reaktywności
- (ujemne temperaturowe sprzężenie zwrotne)

RBMK

Zmniejszenie przekroju czynnego na absorpcje neutronów w wodzie - p_r rośnie
Zwiększenie strumienia neutronów spowalnianych w graficie - p_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

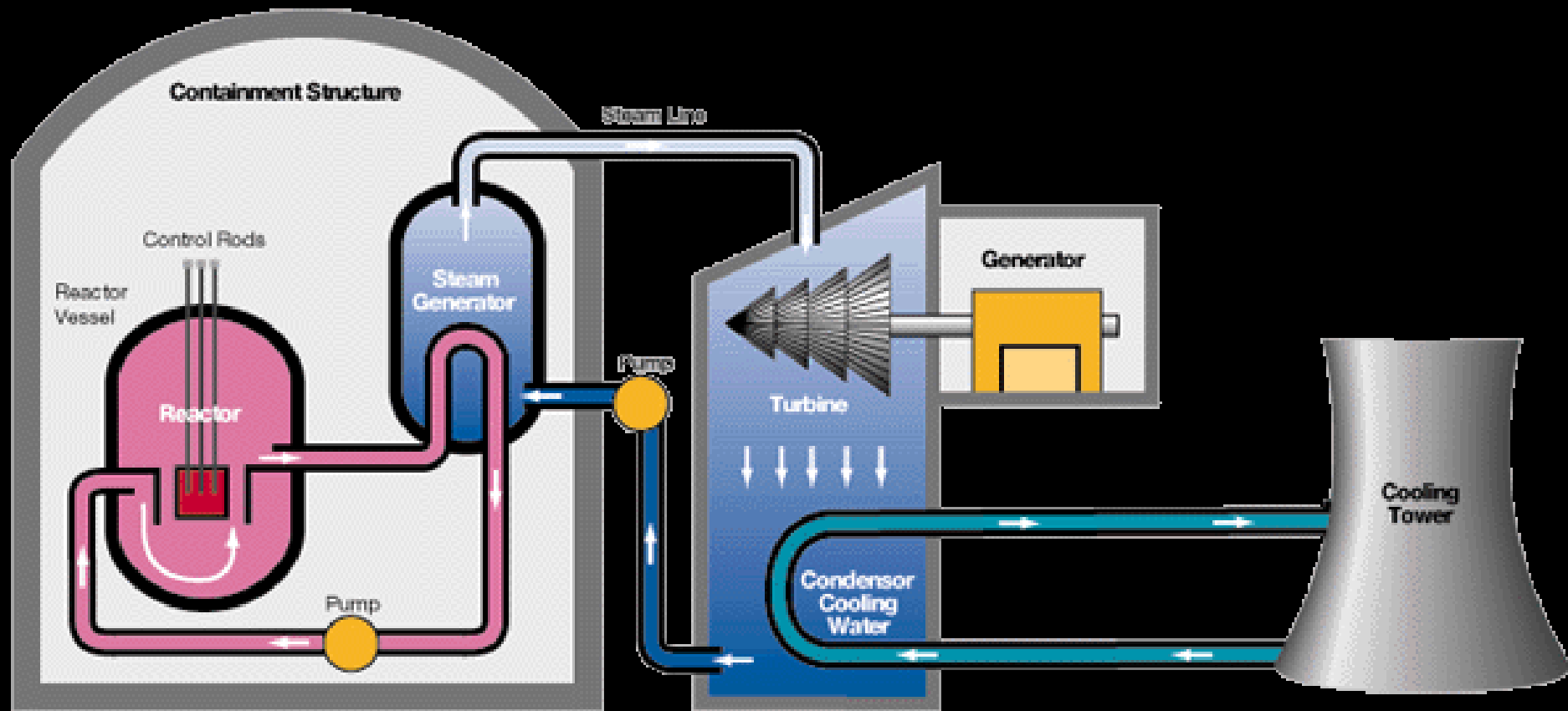
Zatrucie reaktora:

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

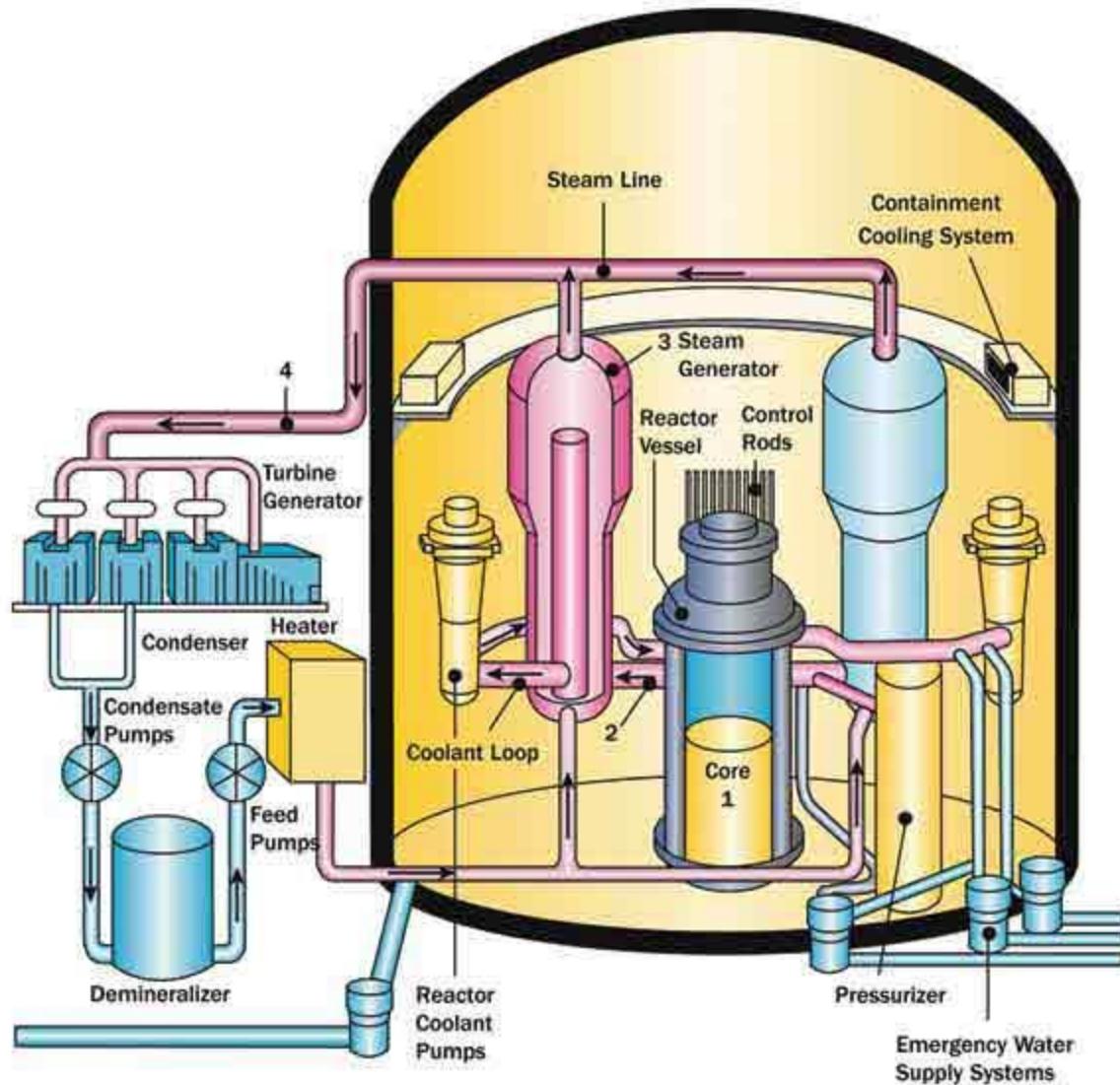
PWR – Reaktor wodny ciśnieniowy

- Grubościenny zbiornik o rozmiarach rzędu kilku metrów
- Paliwo: 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)

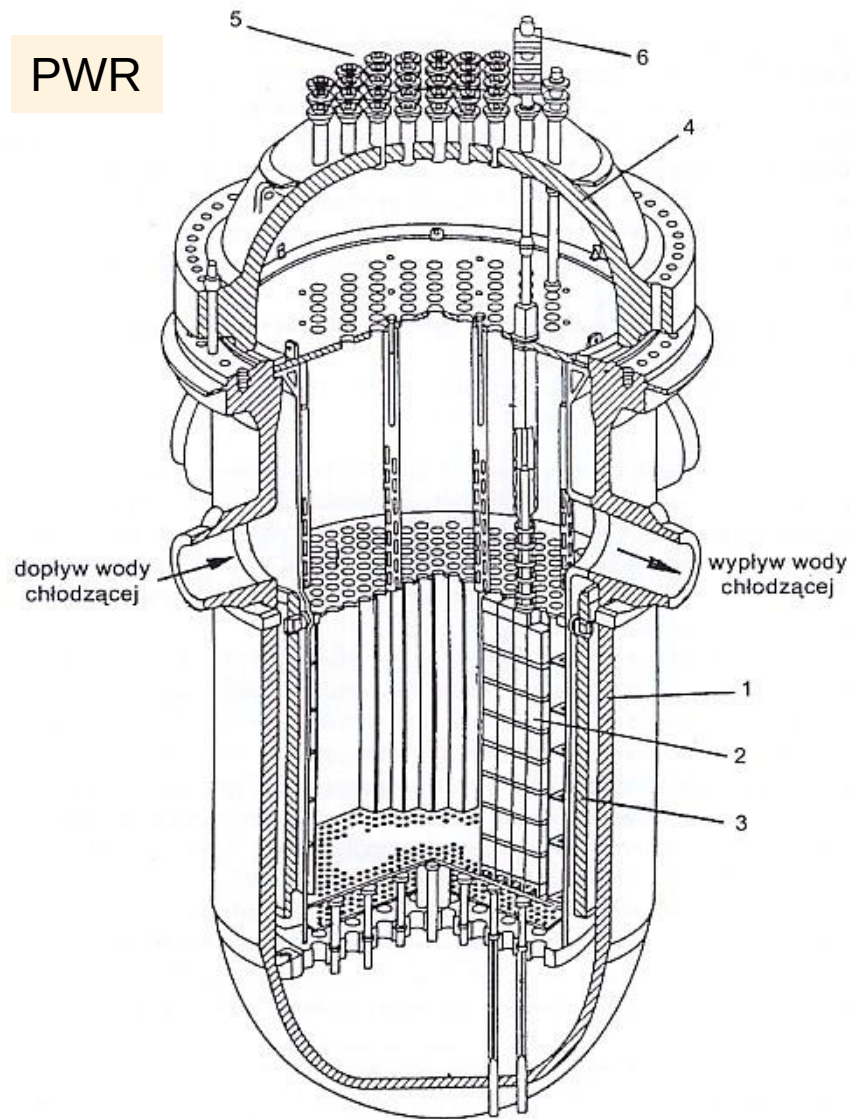


Typical Pressurized-Water Reactor



Reaktory jądrowe

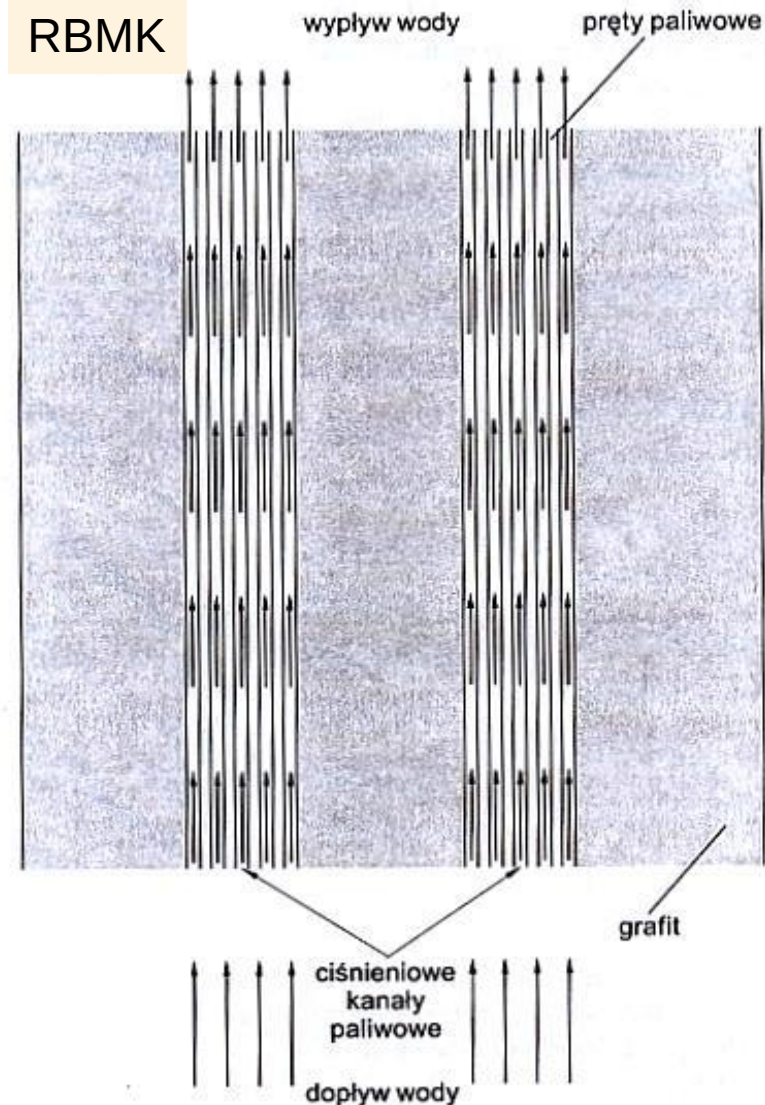
PWR



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)

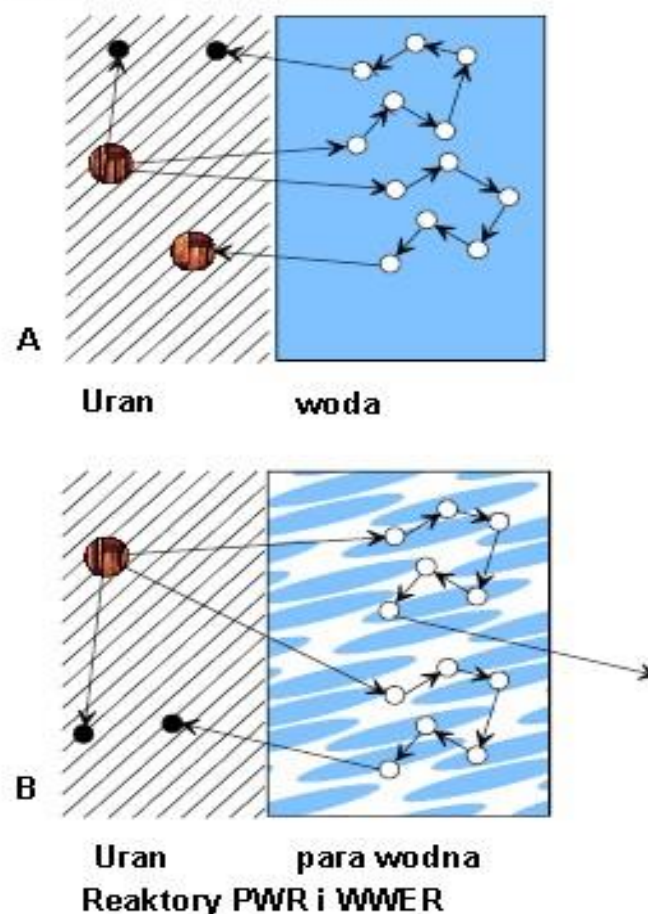
RBMK



Rys. 11.16. Zasada konstrukcji reaktora kanałowego

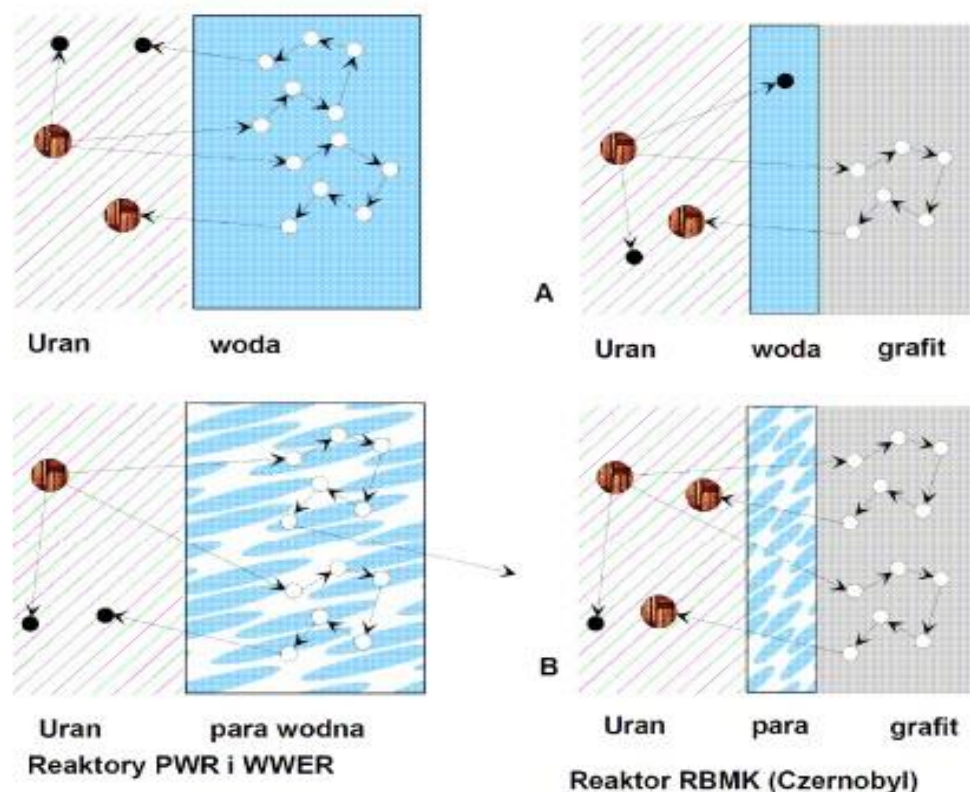
RBMK – Reaktor Bolszoy Moszcznosti Kanalnyj

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].

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.

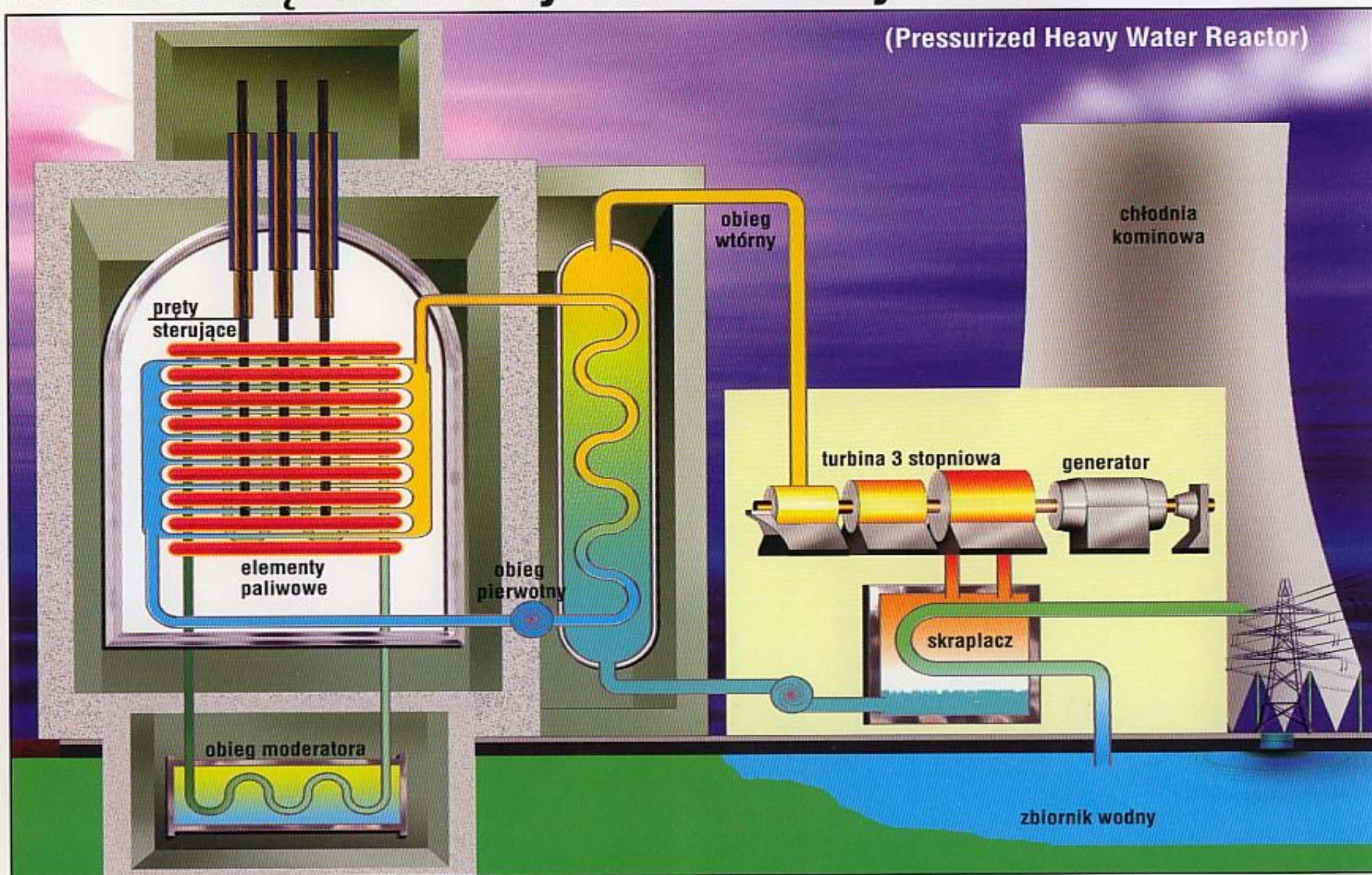


Rys. 9. Zmiany gęstości rozszczepień po odparowaniu części wody [3]. A- normalna praca, B – spadek przepływu wody, część wody odparowuje. W reaktorze PWR lub WWER moc maleje, w reaktorze RBMK moc rośnie.

Natomiast w reaktorze RBMK rolę spowalniacza 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

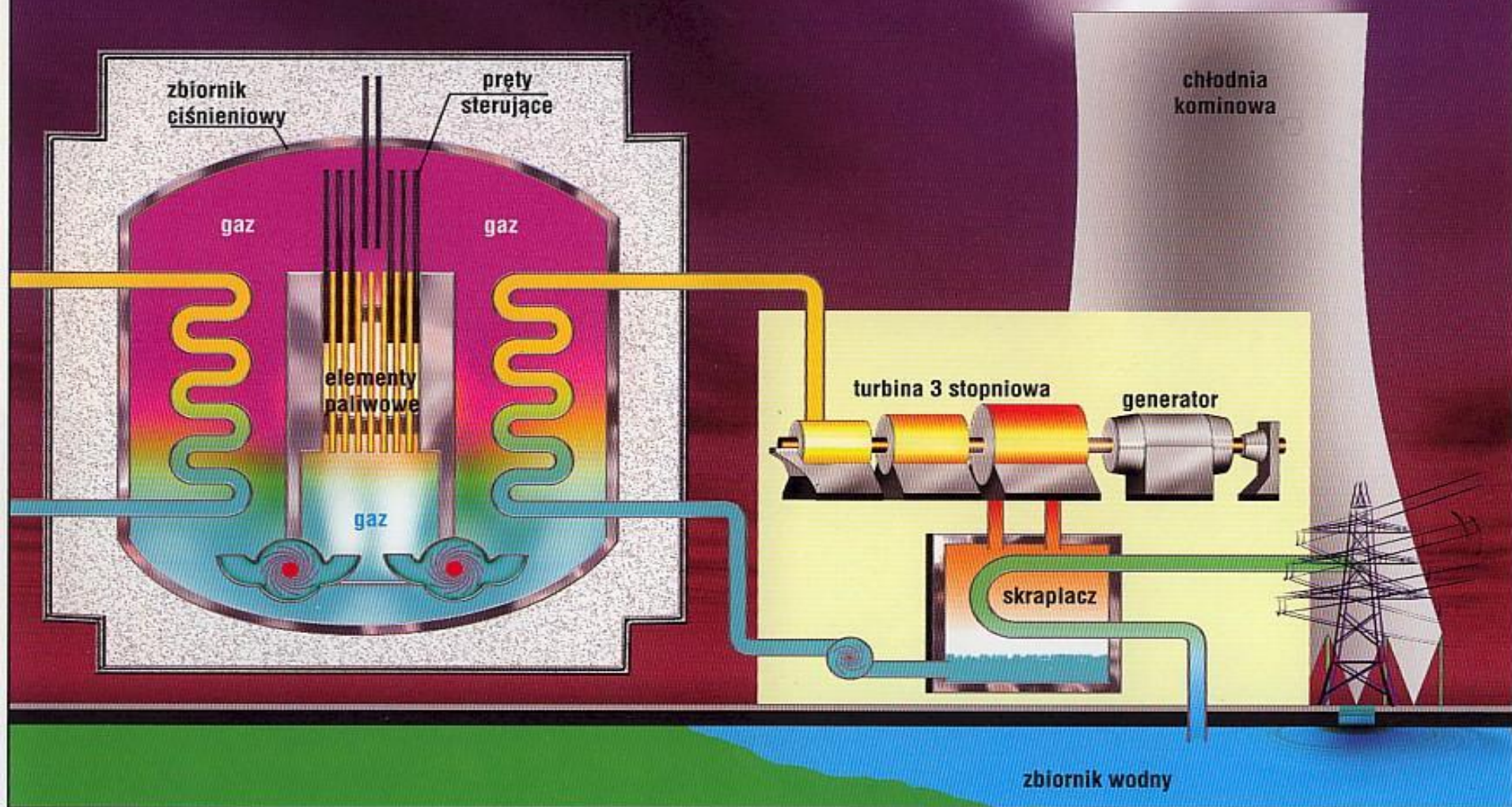
CANDU



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

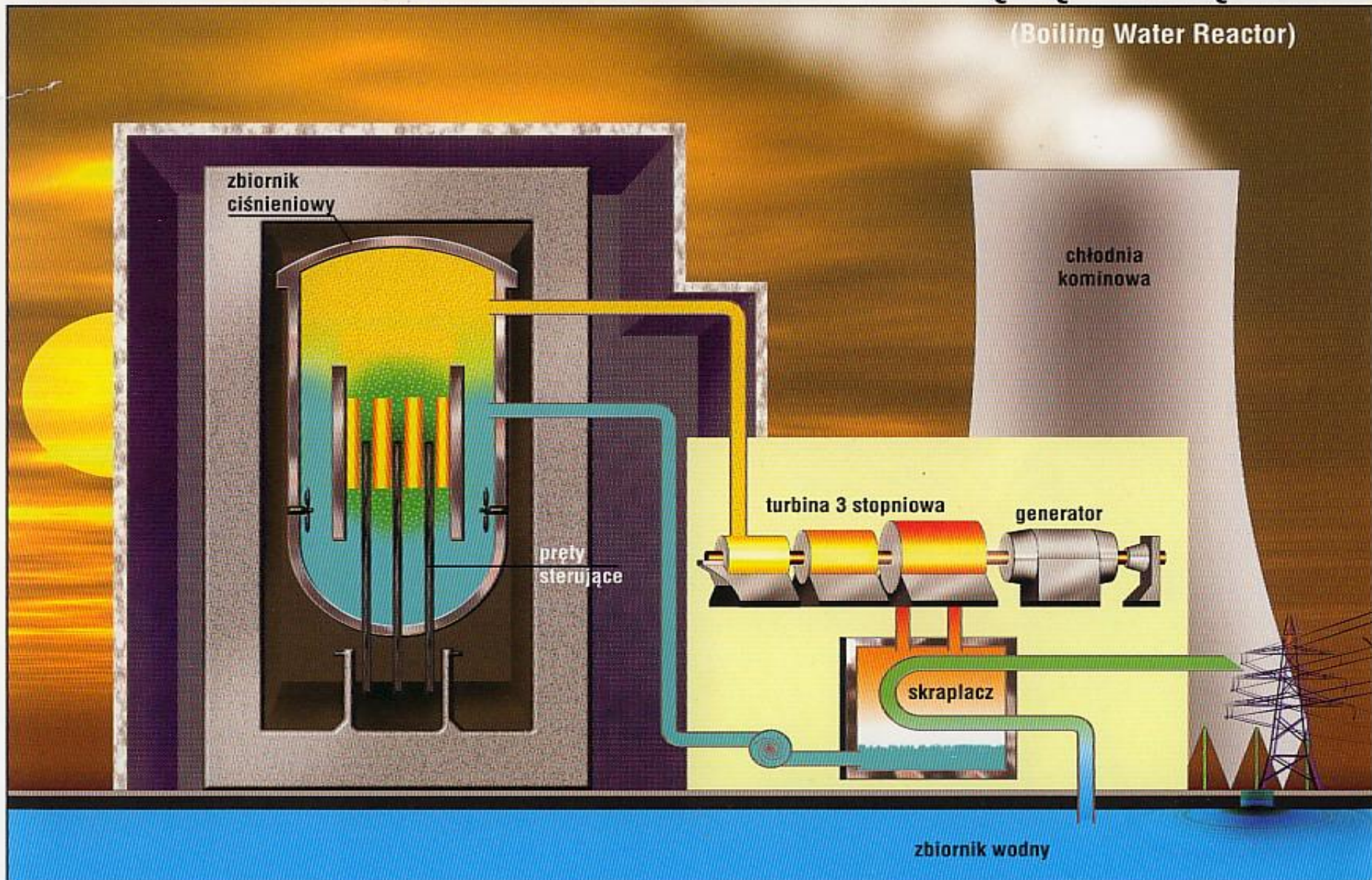
(Gas Cooled Reactor - GCR, Advanced Gas Cooled Reactor -AGR)



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

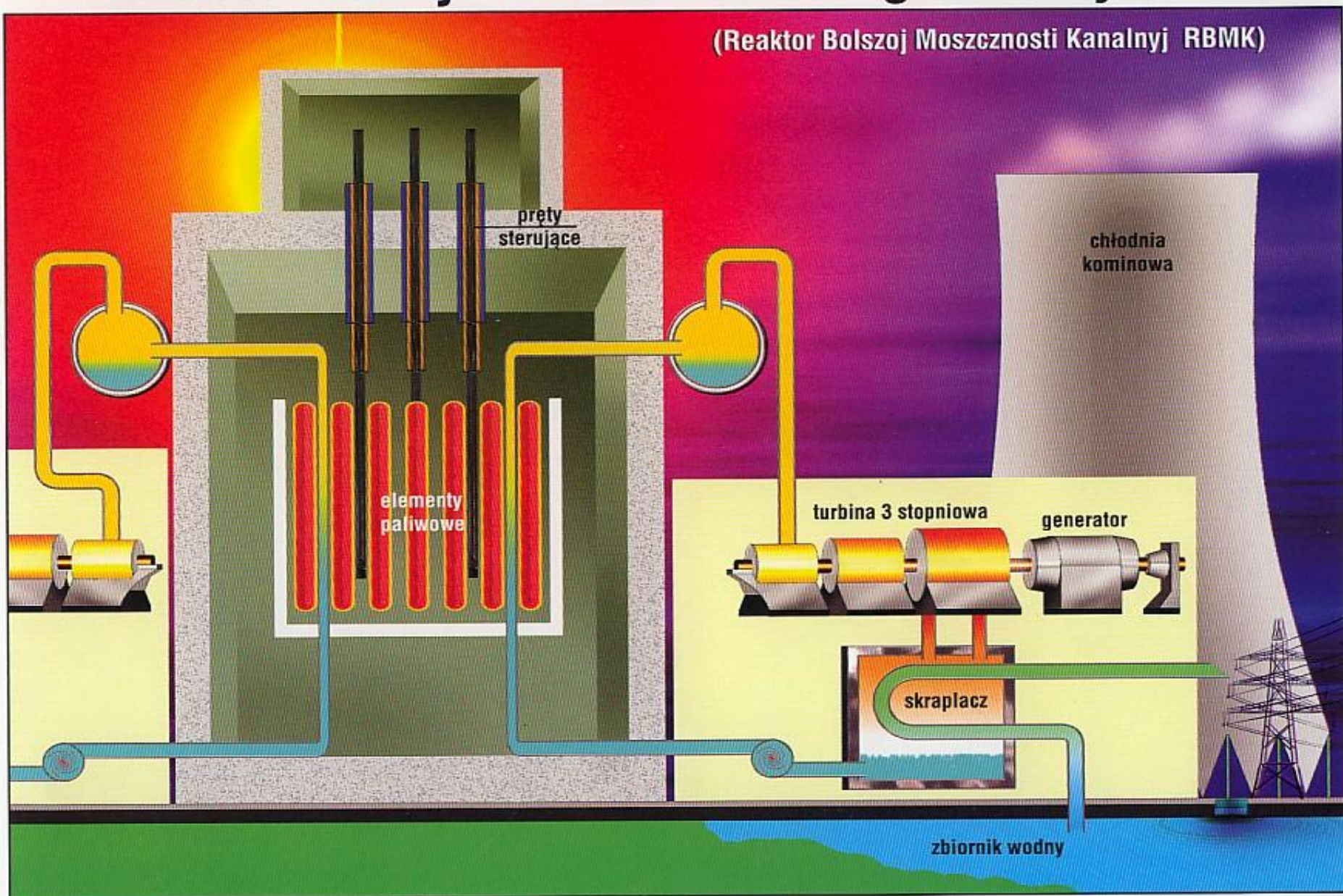
(Boiling Water Reactor)



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.

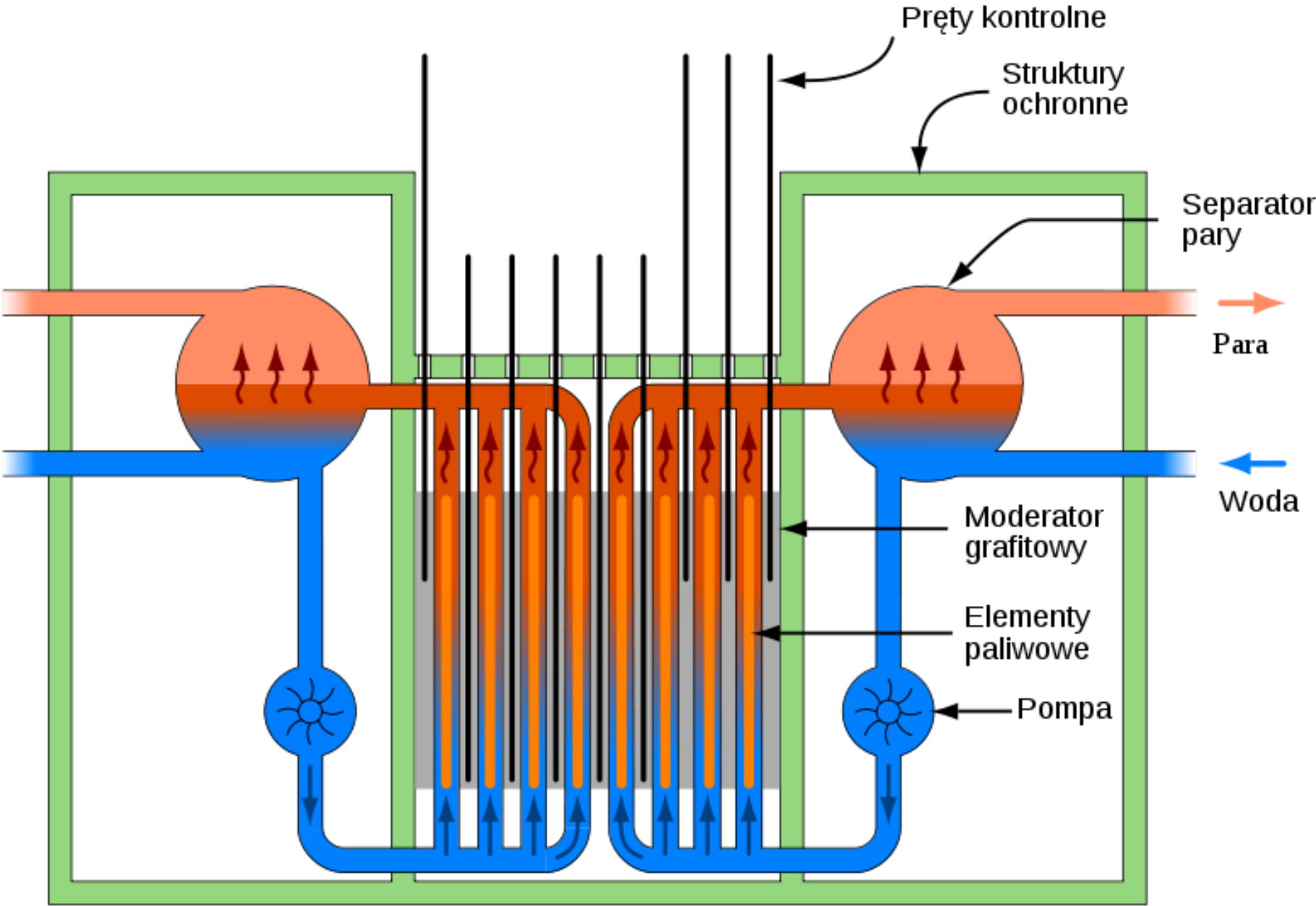
Reaktor wodny z moderatorem grafitowym RBMK

(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

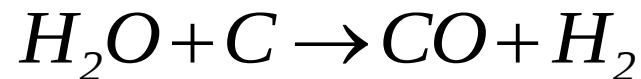


RBMK – Reaktor Bolszoj Moszcznosti Kanalnyj ***Реактор Большой Мощности Канальный***

- 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.



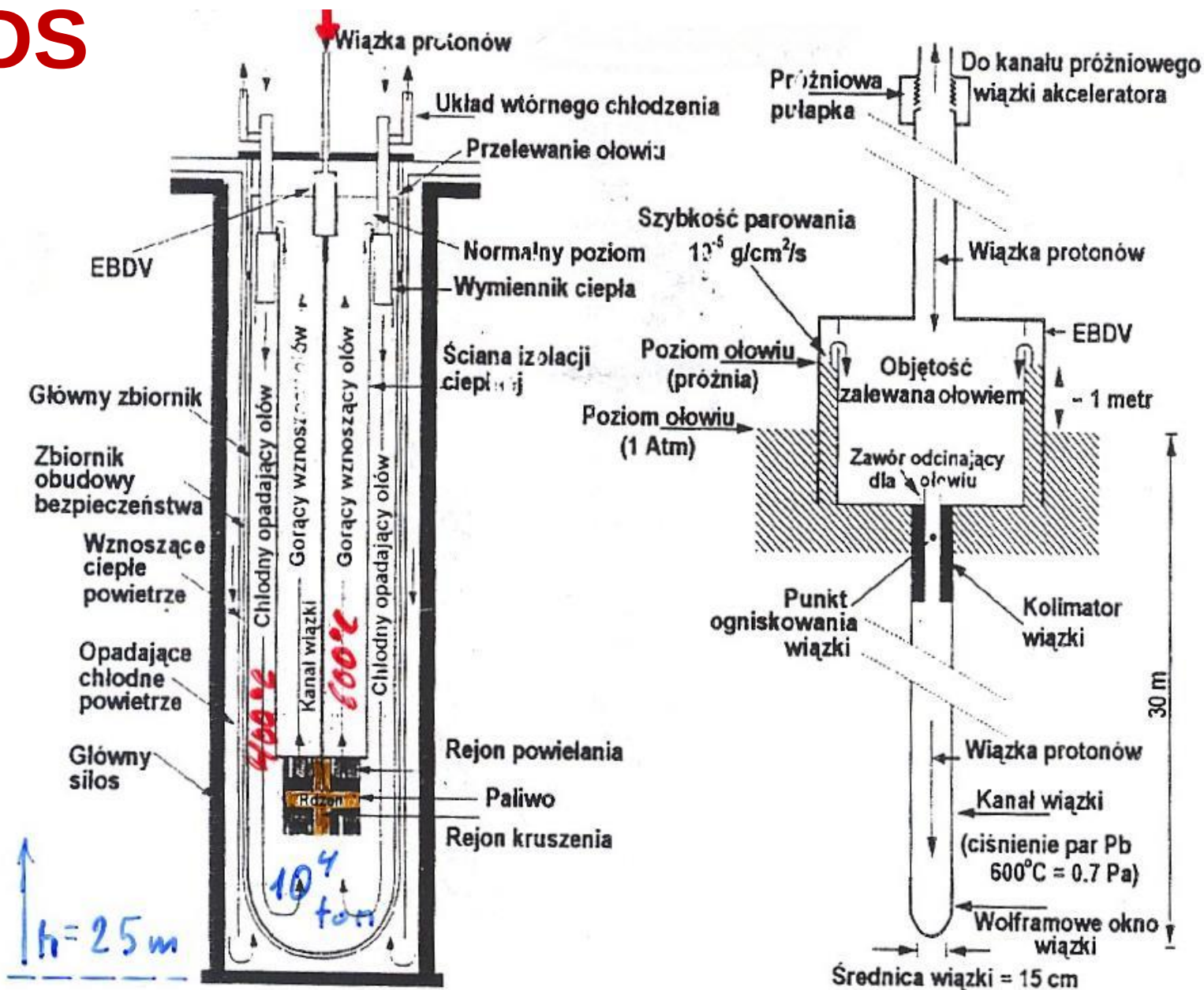
- W przypadku rozerwania rury ciśnieniowej gorąca para dostaje się do grafitu. Reakcja prowadząca do powstania gazu wodnego zachodzi przy temperaturach 1000-1200 °C, a więc niewiele wyższych od normalnej temperatury eksploatacyjnej w graficie.

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

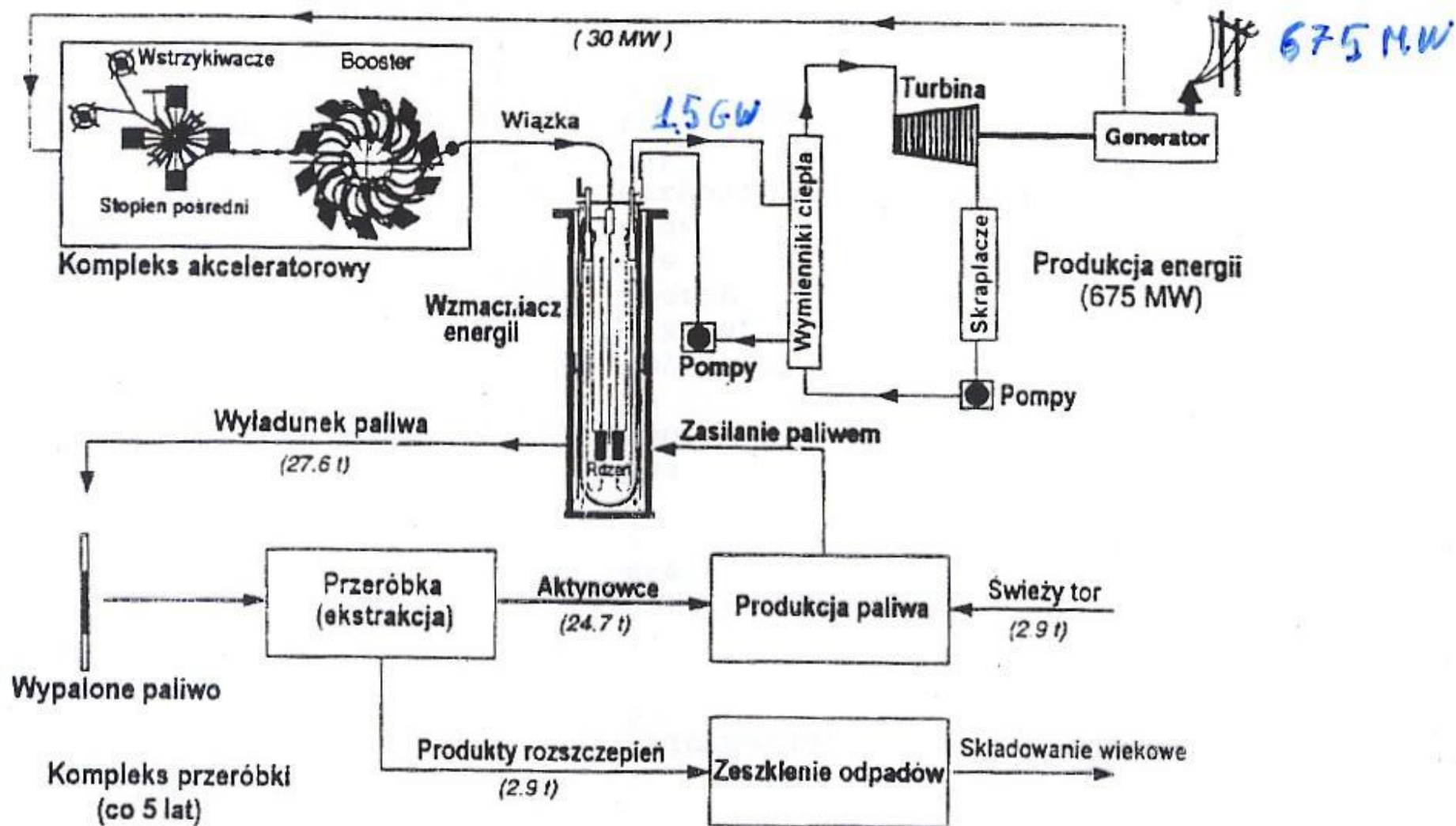
- ADS Accelerator Driven System - reaktory sterowane akceleratorami, reakcje transmutacji
- Reaktory wysokotemperaturowe – synergia węglowo-jądrowa
- Kontrolowana reakcja termojądrowa - reaktory termojądrowe

ADS



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

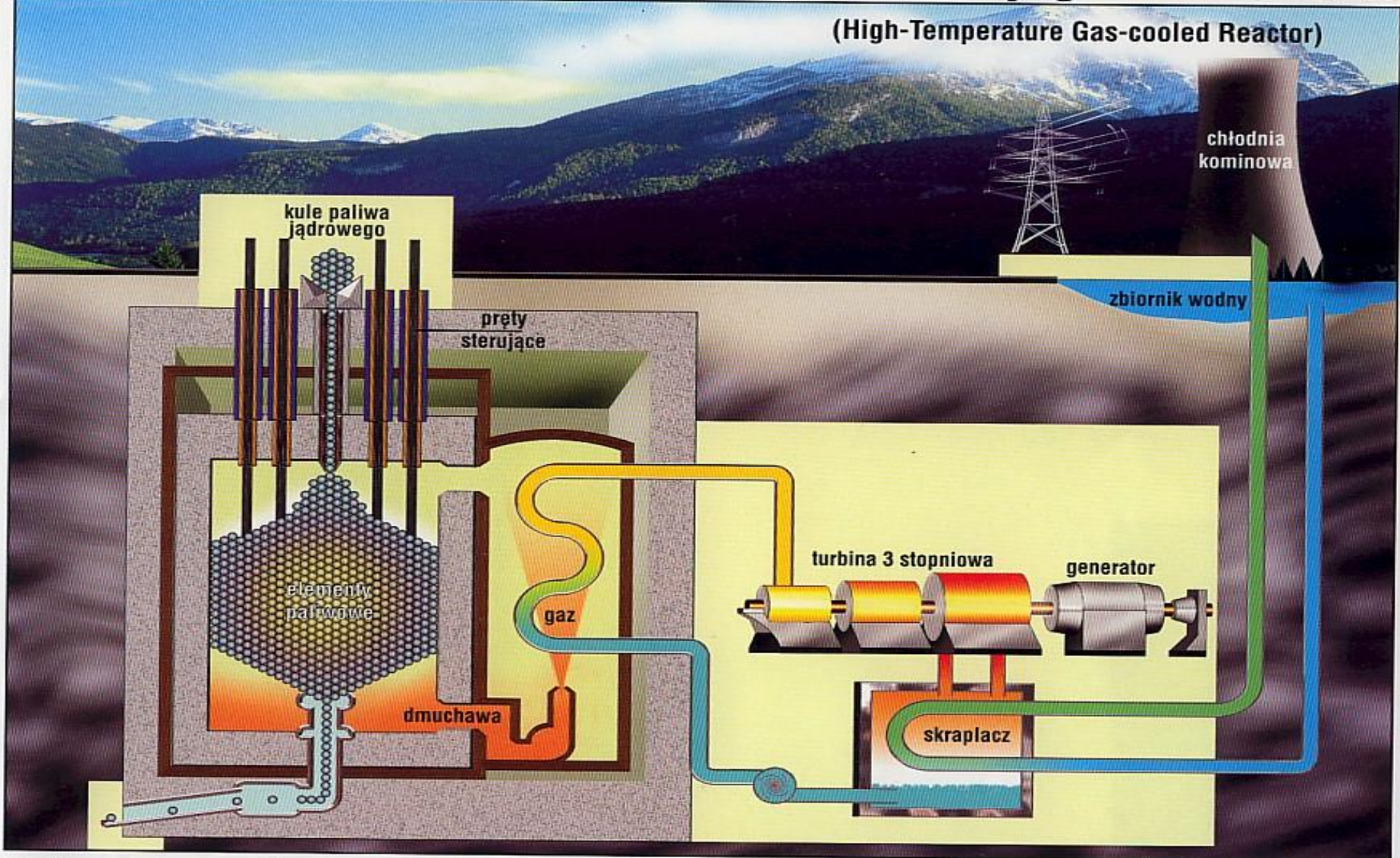
ADS



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

Reaktor wysokotemperaturowy chłodzony gazem HTGR

(High-Temperature Gas-cooled Reactor)

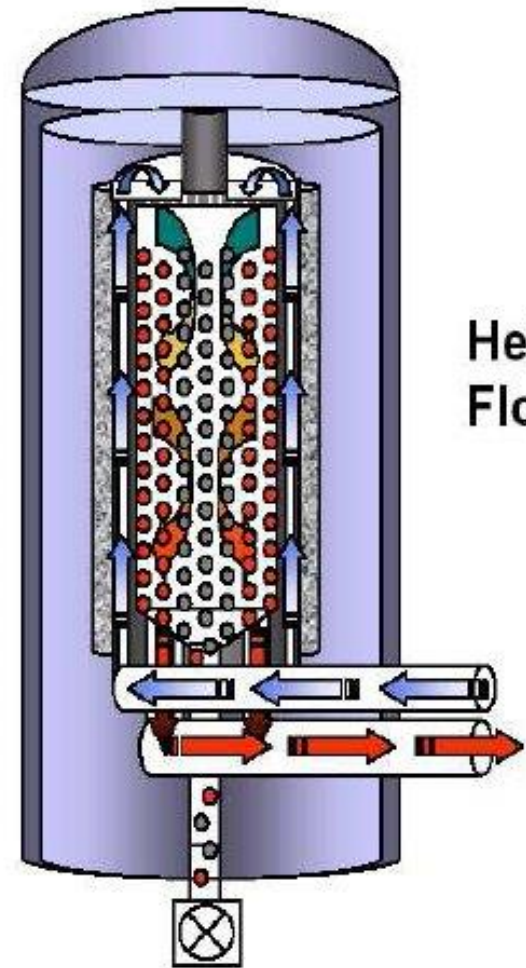


Jest to nowoczesny reaktor o wysokim stopniu bezpieczeństwa. Gaz na wyjściu z reaktora ma temperaturę ok. 900°C. Ciepło dostarczone z reaktora może być wykorzystane do produkcji wodoru, który może zastąpić olej opałowy. Pomysł zlokalizowania reaktora pod ziemią został już zrealizowany w Japonii.

Reaktor wysokotemperaturowy

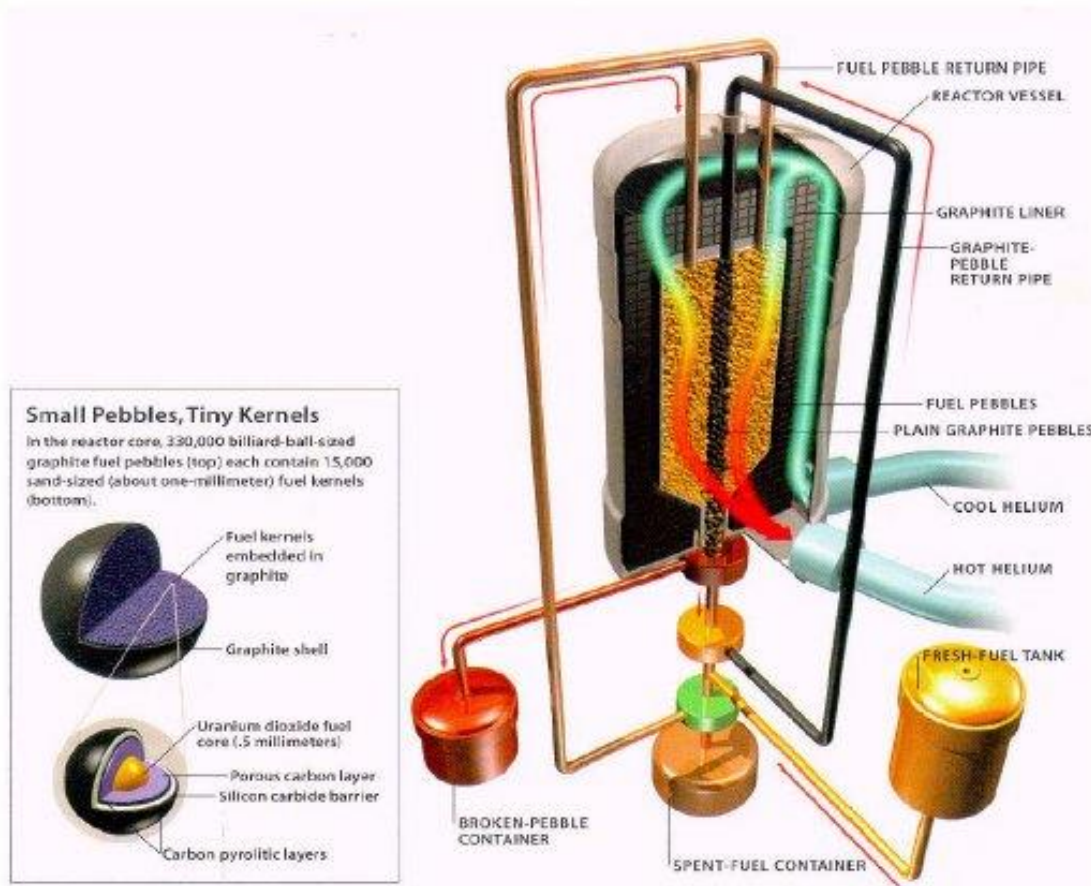


Reactor Unit

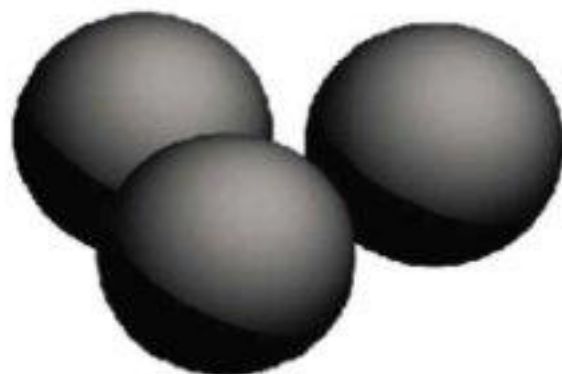


Reaktor wysokotemperaturowy

Pebble Bed Reactor and TRISO Fuel



Element paliwowy reaktora



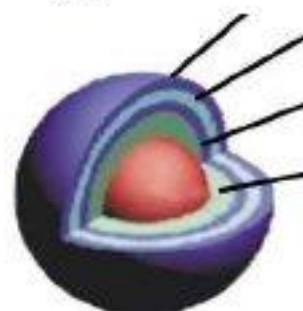
kule z uranem
($\Phi = 6 \text{ cm}$)



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:

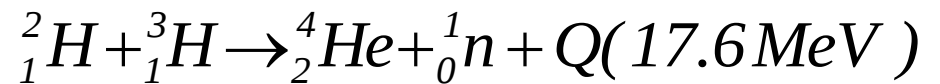
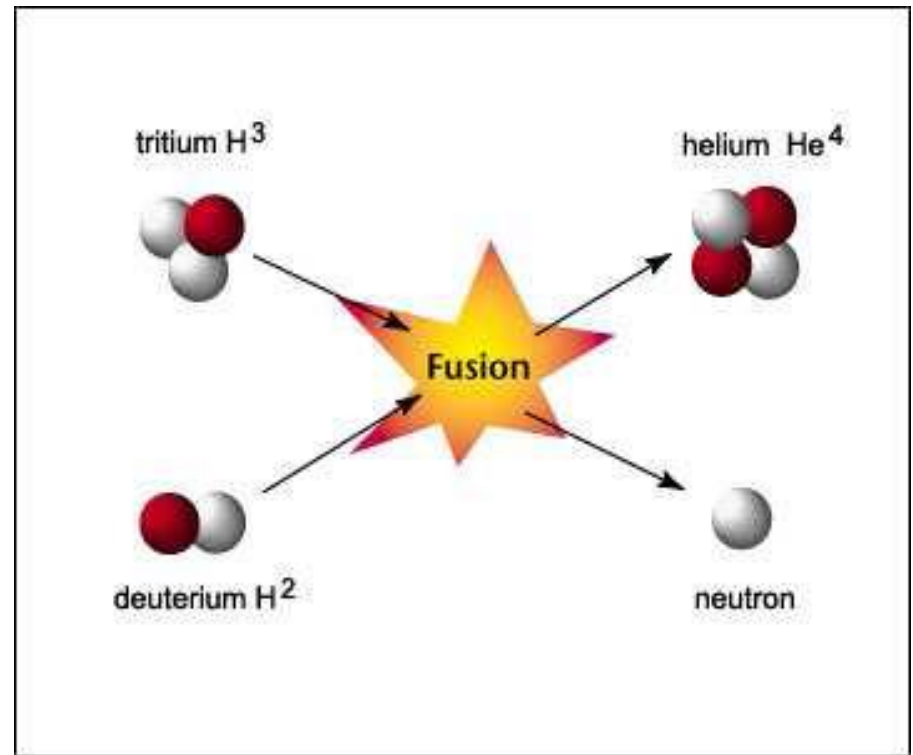
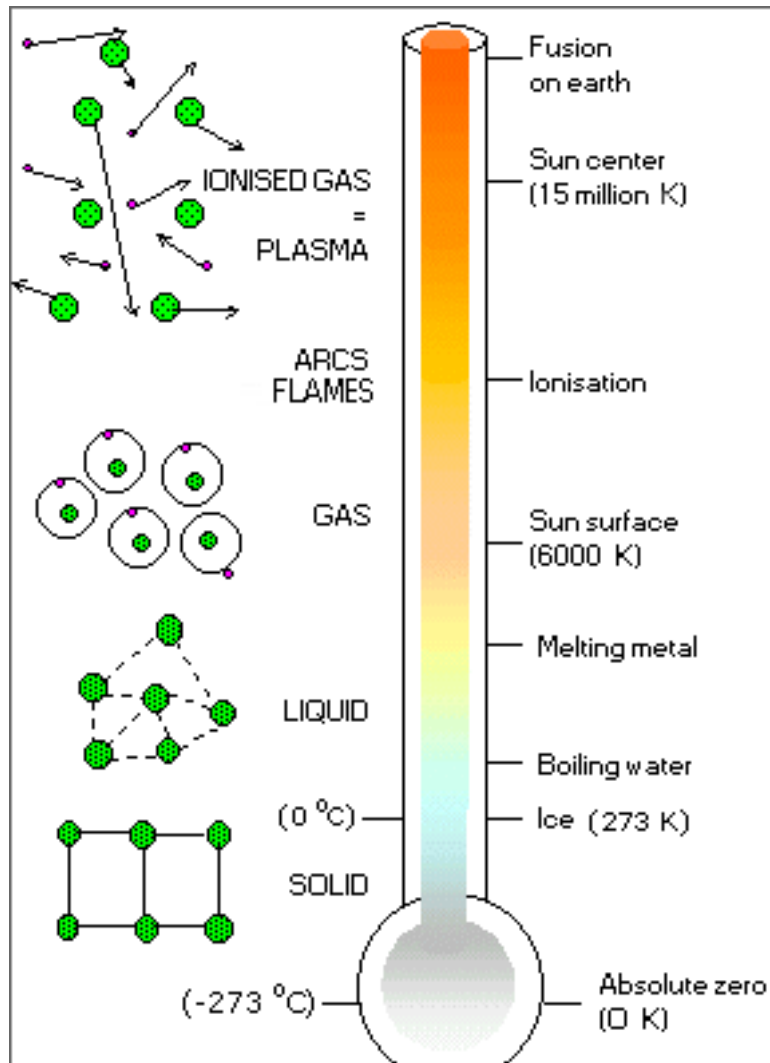


W kolejnych etapach gaz syntezowy oczyszcza się z CO_2 i prowadzi się syntezę wodoru z tlenkiem węgla:



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

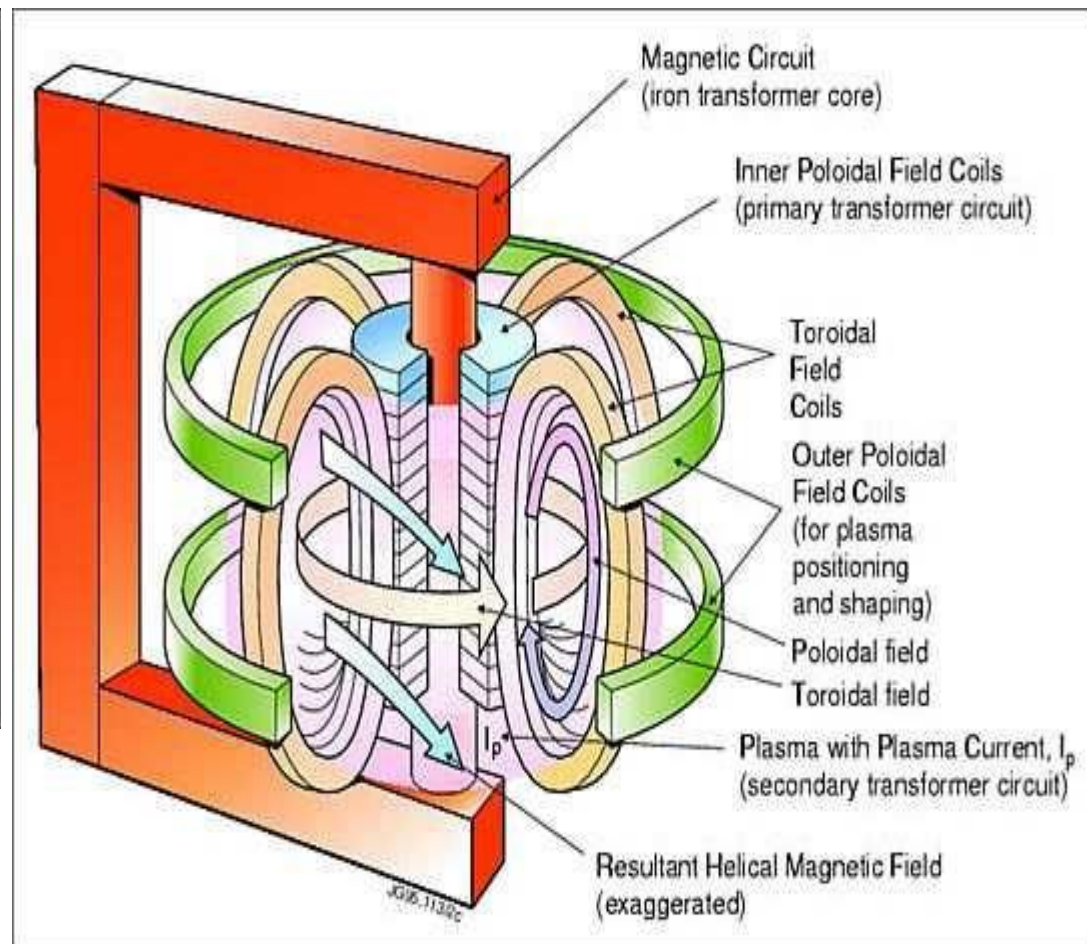
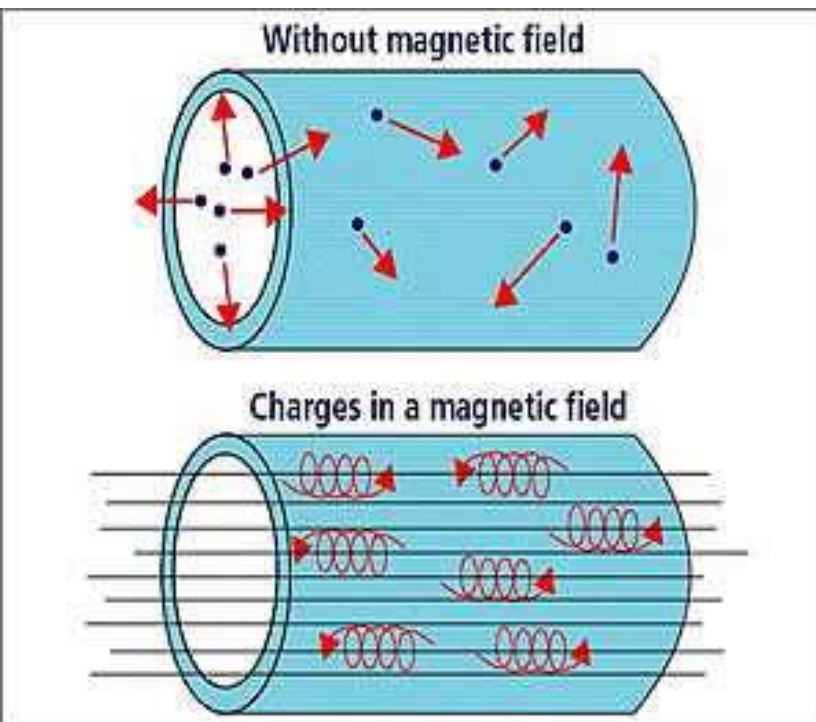


Warunki zachodzenia reakcji

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

Diverktor:
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.

