



Narodowe Centrum
Badań Jądrowych
Świerk

POKL.09.02.00-14-058/11



Szkoła z przyszłością

Reaktory jądrowe (działanie i zastosowanie)

Łukasz Adamowski

e-mail: l.adamowski@ncbj.gov.pl

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Narodowe Centrum
Badań Jądrowych
Świerk

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Wstęp

Źródła promieniotwórcze

(obiekty o dużej **radioaktywności**)

wysyłają

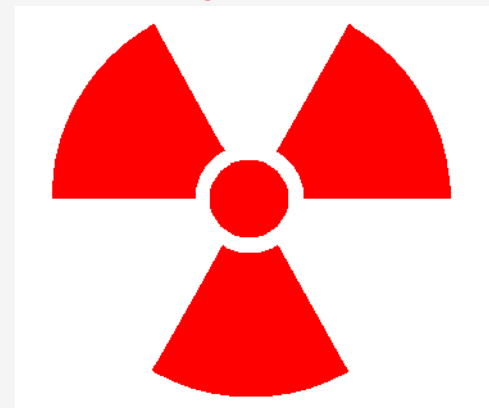
promieniowanie jonizujące

(czyli takie, które powoduje
powstawanie jonów)

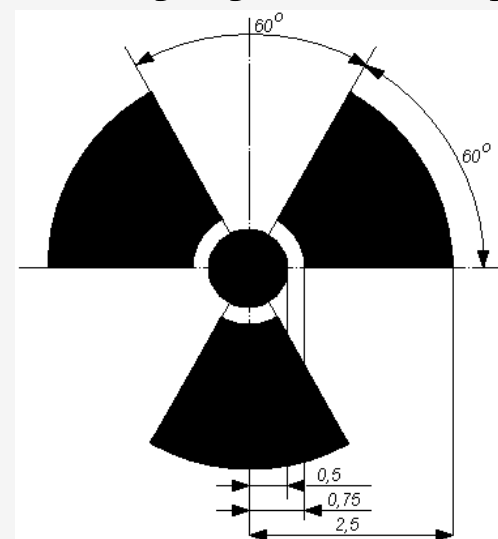
które czasami jest

przenikliwe.

substancje - czerwony



maszyny - czarny



Wstęp

napromieniowany $\neq$ promieniotwórczy

bo

oświetlony $\neq$ świecący

Światło to również rodzaj promieniowania, ale nie jest ono jonizujące, chociaż bywa przenikliwe (np. przenika przez szyby).

Jonizujące są: nadfiolet, promienie rentgenowskie, cząstki alfa, beta, gamma, protony, neutrony oraz promieniowanie kosmiczne (miony, protony, beta).

Reaktory

Reaktor – urządzenie służące do przeprowadzania jakiejś reakcji.

Reaktor jądrowy (lub **nuklearny**) – urządzenie służące do przeprowadzania samopodtrzymującej się reakcji jądrowej **rozszczepienia**.

Przyjęta dość powszechnie nazwa reaktor atomowy jest nieco myląca, bo w reakcjach chemicznych też uczestniczą atomy, ale takie reakcje nie prowadzą do wyzwolenia energii jądrowej (nuklearnej).

Paliwo

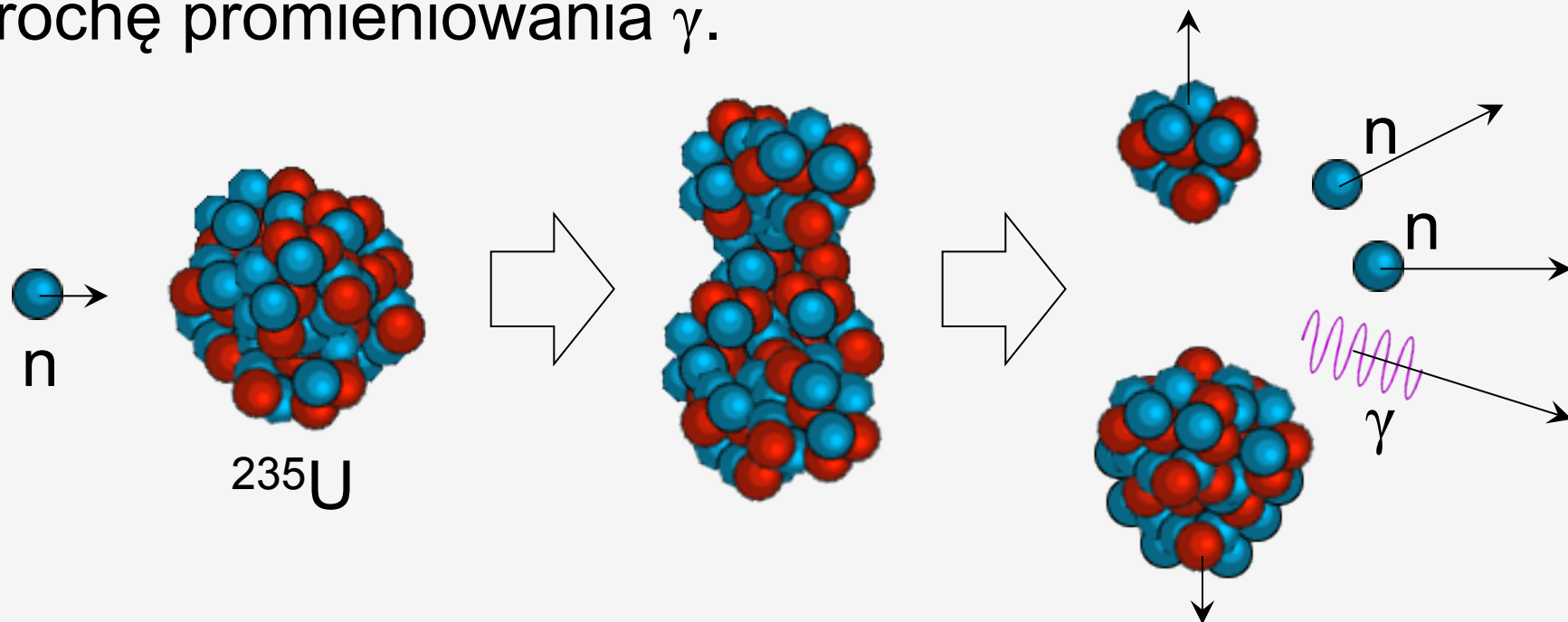
promieniotwórczość $\neq$ rozszczepialność

Uran jest promieniotwórczy, ale nie z tego powodu jest używany w reaktorach jądrowych. Słowo „paliwo” nie oznacza tu, że zachodzi tu jakiekolwiek spalanie chemiczne. Uran jest paliwem w reaktorach, ponieważ jest ***rozszczepialny***.

W szczególności bardzo dobrze rozszczepia się jeden z izotopów uranu: ^{235}U , którego w naturalnym uranie jest ok. 0,7%. Pozostałe 99,3% to zwykle trudno rozszczepialny ^{238}U .

Reakcja rozszczepienia

W **reakcji rozszczepienia** z jednego bardzo ciężkiego jądra atomowego powstają dwa (lub czasem trzy) ciężkie nowe jądra atomowe, pewna liczba neutronów (od 0 do 8, średnio ok. 2,5) oraz trochę promieniowania γ .



Energia z rozszczepienia

Energia wyzwolona w reakcji rozszczepienia wiąże się z tzw. **defektem (deficytem) masy**. Okazuje się, że masa powstałych produktów reakcji jest w sumie mniejsza niż masa początkowego neutronu i jądra uranu. Związek tej różnicy masy z uzyskaną energią wyraża równanie Einsteina:

$$E = mc^2$$

Dotyczy to także reakcji chemicznych, jednak wyzwalamy w nich energię jest znacznie mniejsza, a defekt masy – praktycznie niemierzalny.

Energia z rozszczepienia

Cząstki powstające podczas rozszczepienia (nowe jądra atomowe, neutrony, fotony gamma) poruszają się z dużą energią kinetyczną, którą przekazują innym atomom, wprawiają je w drgania termiczne i przez to paliwo (jako całość) ogrzewa się. Energia wyzwala jest zatem w postaci ciepła.

W wyniku jednego rozszczepienia ^{235}U wyzwala się około **50 milionów razy więcej** ciepła niż w procesie chemicznego spalania jednego przeciętnego atomu węgla ^{12}C (czyli połączenia go z dwoma atomami tlenu z powietrza).

Energia z rozszczepienia

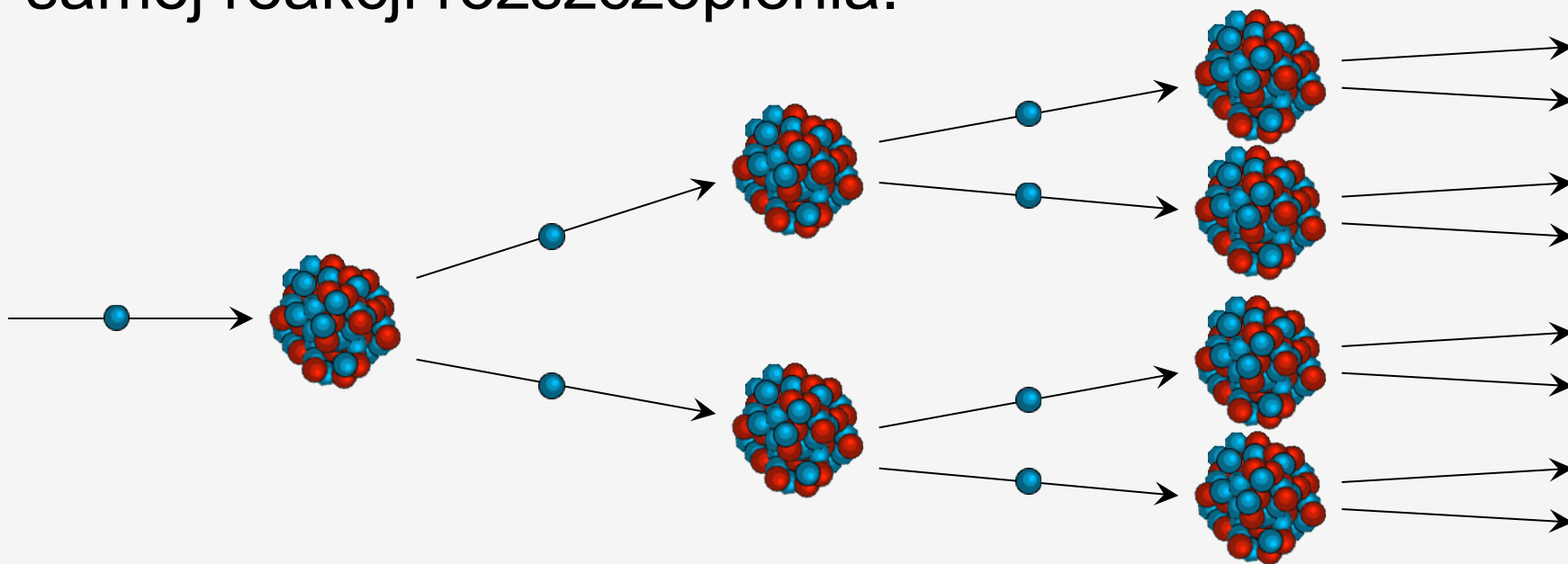
Ponieważ jednak 1 atom ^{235}U ma masę ok. 20 razy większą niż jeden atom węgla, to z 1 kg ^{235}U można teoretycznie uzyskać ok. 2,5 miliona razy więcej energii niż z 1 kg czystego węgla.

W naturze tylko 0,7% uranu stanowi ^{235}U , ale również węgiel nie występuje w czystej postaci. W praktyce **1 kg uranu naturalnego odpowiada kilkudziesięciu tonom węgla kamiennego.**

1 kg uranu kosztuje mniej więcej tyle samo co jedna tona węgla, więc ***paliwo uranowe jest tanie.***

Reakcja łańcuchowa

Do wywołania reakcji rozszczepienia potrzebne są także neutrony, które można produkować w tzw. źródłach neutronów. Nie jest to zbyt opłacalne, ale można też wykorzystać neutrony produkowane w samej reakcji rozszczepienia.



Reakcja łańcuchowa

Schemat reakcji łańcuchowej wyduje się być łatwy, ale tak jest tylko „na papierze”.

Zarówno reaktory, jak i bomby jądrowe korzystają z tej samej reakcji, ale reaktor nie jest w stanie wybuchnąć tak, jak bomba (tzn. niemożliwy jest wybuch nuklearny).

W szczególności paliwo reaktorowe różni się od paliwa w bombie, a ponadto do wybuchu bomby potrzebne są zwykłe materiały wybuchowe, których w reaktorze nie ma.

Wzbogacanie uranu

Reaktory pracujące na uranie naturalnym są mało wydajne, dlatego często opłaca się oddzielać uran rozszczepialny (^{235}U) od nierozszczepialnego (^{238}U). Proces ten nazywa się **wzbogacaniem** i choć zwiększa cenę paliwa (zwykle ok. 10 razy), to poprawia wydajność uzyskiwania energii.

Wzbogacanie uranu jest procesem trudnym, ponieważ atomy ^{235}U i ^{238}U nie różnią się od siebie pod względem chemicznym. Jedyne, co wyraźnie je różni, to niewielka różnica w masie (ok. 1%).

Wzbogacanie uranu

Uran wysokowzbogacony (militarny):

$$^{235}\text{U} > 90\% \quad ^{238}\text{U} < 10\%$$

Uran wysokowzbogacony (reaktorowy):

$$^{235}\text{U} > 20\% \quad ^{238}\text{U} < 80\%$$

Uran niskowzbogacony:

$$^{235}\text{U} < 20\% \quad ^{238}\text{U} > 80\%$$

Uran najczęściej stosowany elektrowniach:

$$^{235}\text{U} = 2-5\% \quad ^{238}\text{U} = 95-98\%$$

Uran naturalny:

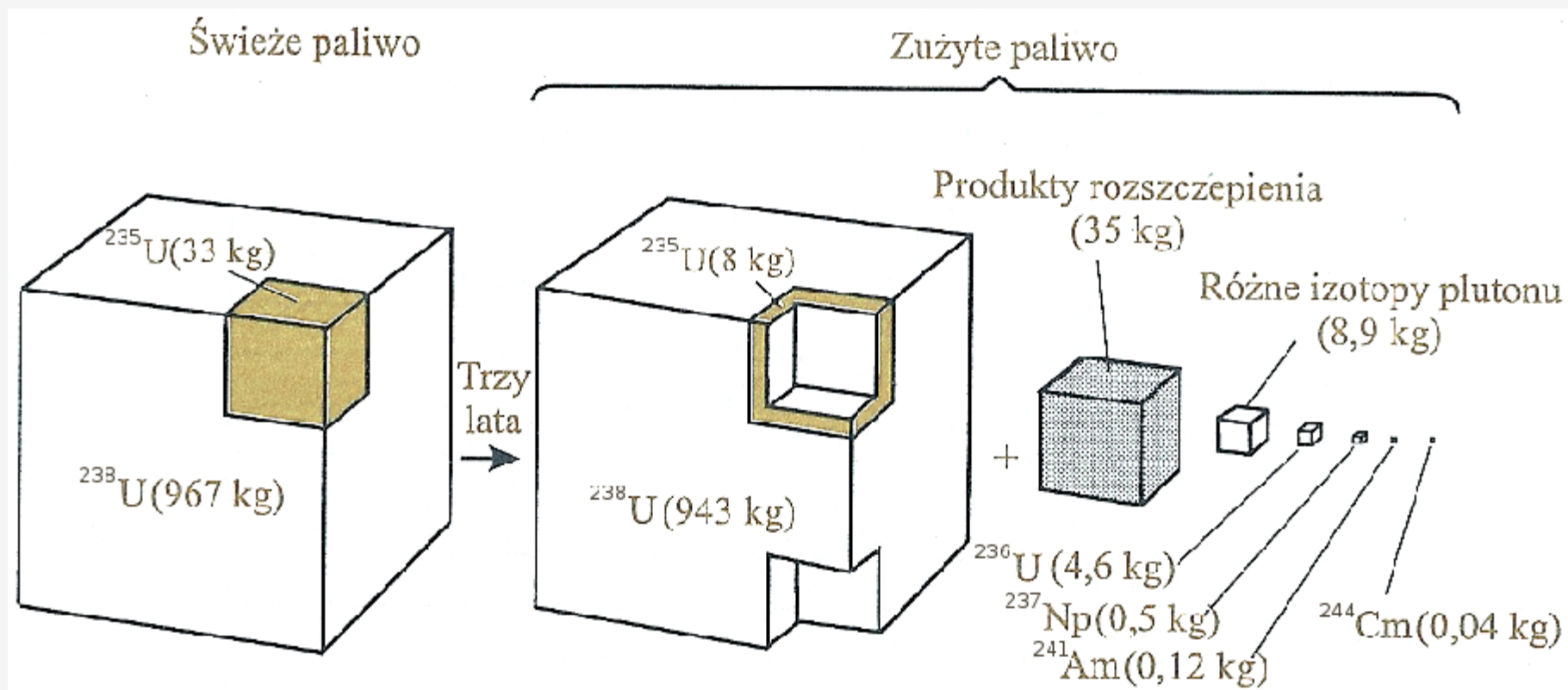
$$^{235}\text{U} = 0,7\% \quad ^{238}\text{U} = 99,3\%$$

Uran zubożony:

$$^{235}\text{U} < 0,7\% \quad ^{238}\text{U} > 99,3\%$$

Wypalenie paliwa uranowego

Uran nigdy nie „wypala się” w stu procentach.



Źródło: B.L.Cohen „The Disposal of Radioactive Waste from Fission Reactors”

Wypalenie paliwa uranowego

Świeże paliwo uranowe jest mało radioaktywne, wysyła głównie cząstki alfa, które mają mały zasięg i w większości nie wychodzą z samego uranu.

Produkty rozszczepienia w wypalonym paliwie są silnie promieniotwórcze i wysyłają cząstki alfa, beta i gamma, z których ostatnie są bardzo przenikliwe.

Część energii wyzwolonej w reaktorze pochodzi z rozszczepienia uranu ^{235}U , część z rozszczepienia plutonu powstającego z uranu ^{238}U , a część z promieniotwórczości produktów rozszczepienia.

Sterowanie reaktorem jądrowym

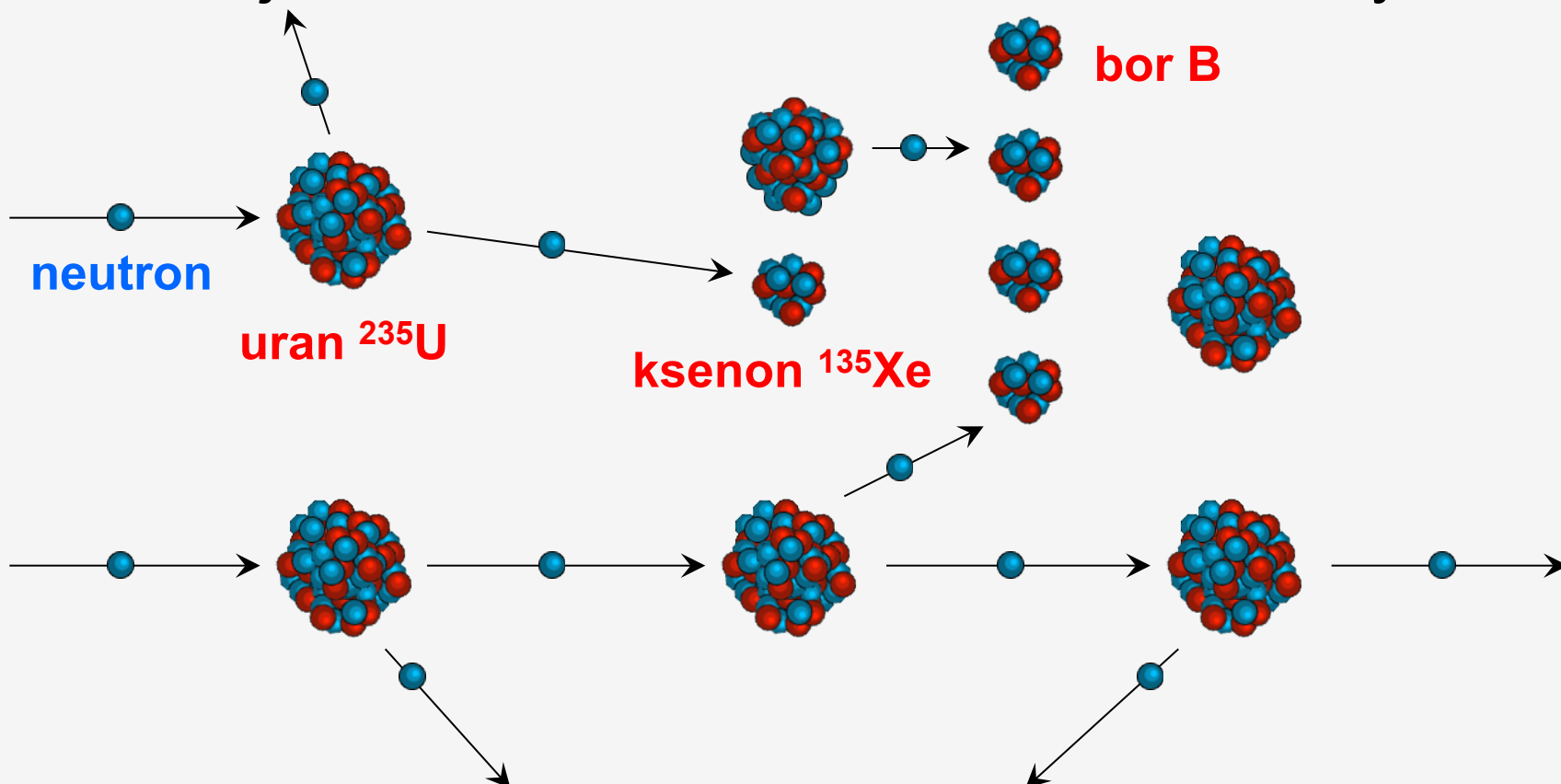
Zwykle do blokowania przepływu neutronów służą **pręty** zawierające substancje silnie **pochłaniające neutrony**, czyli związki chemiczne pierwiastków takich jak bor lub kadm.

Pręty te dzieli się na:

- **pręty bezpieczeństwa** – ich obecność w rdzeniu powoduje stan wysoce podkrytyczny reaktora,
- **pręty sterujące** (kontrolne) – służą do sterowania reakcją łańcuchową (ręcznie lub automatycznie).

Stan podkrytyczny

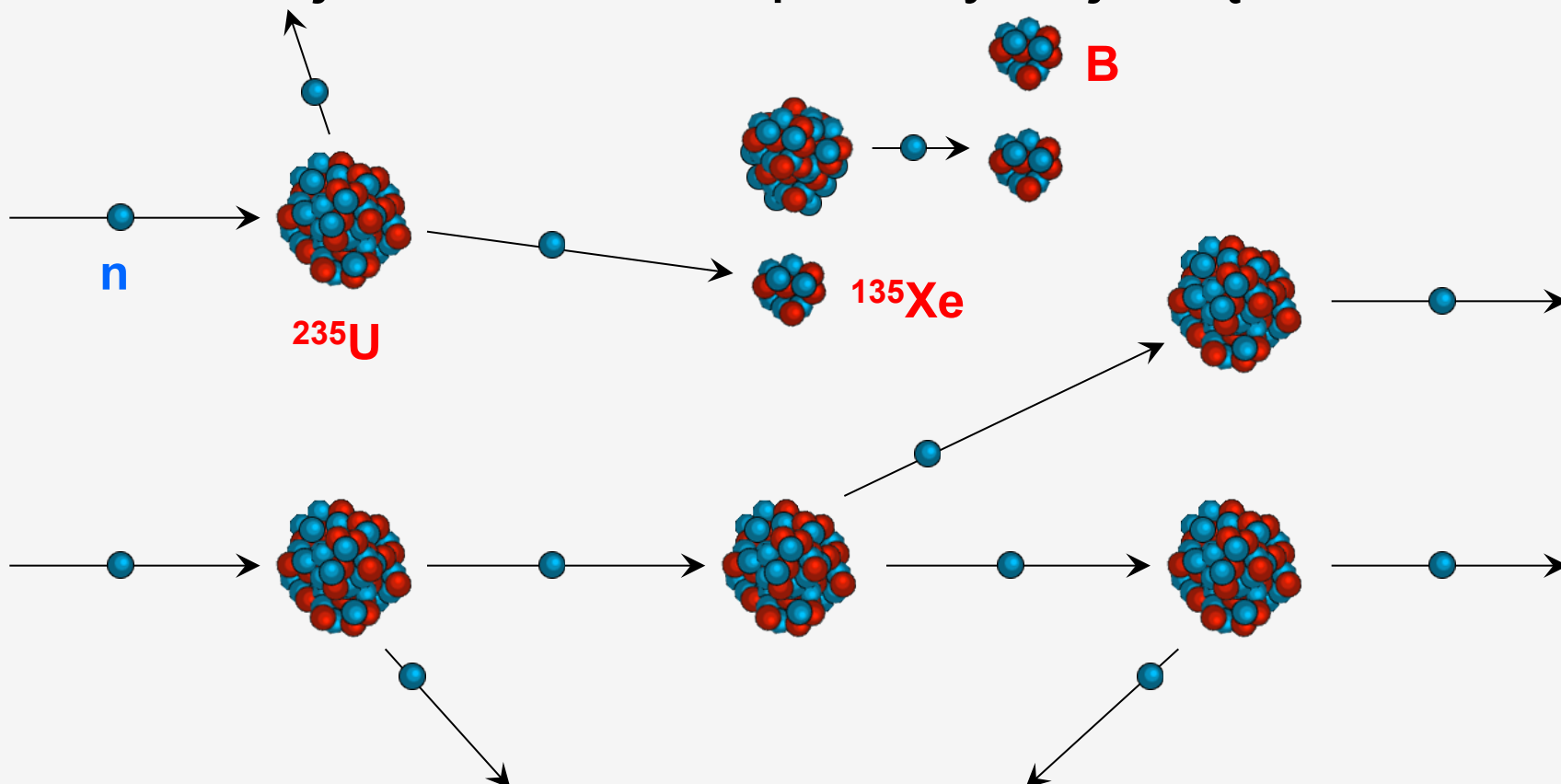
Reakcja łańcuchowa zanika, neutronów ubywa.



współczynnik mnożenia neutronów $k < 1$

Stan krytyczny

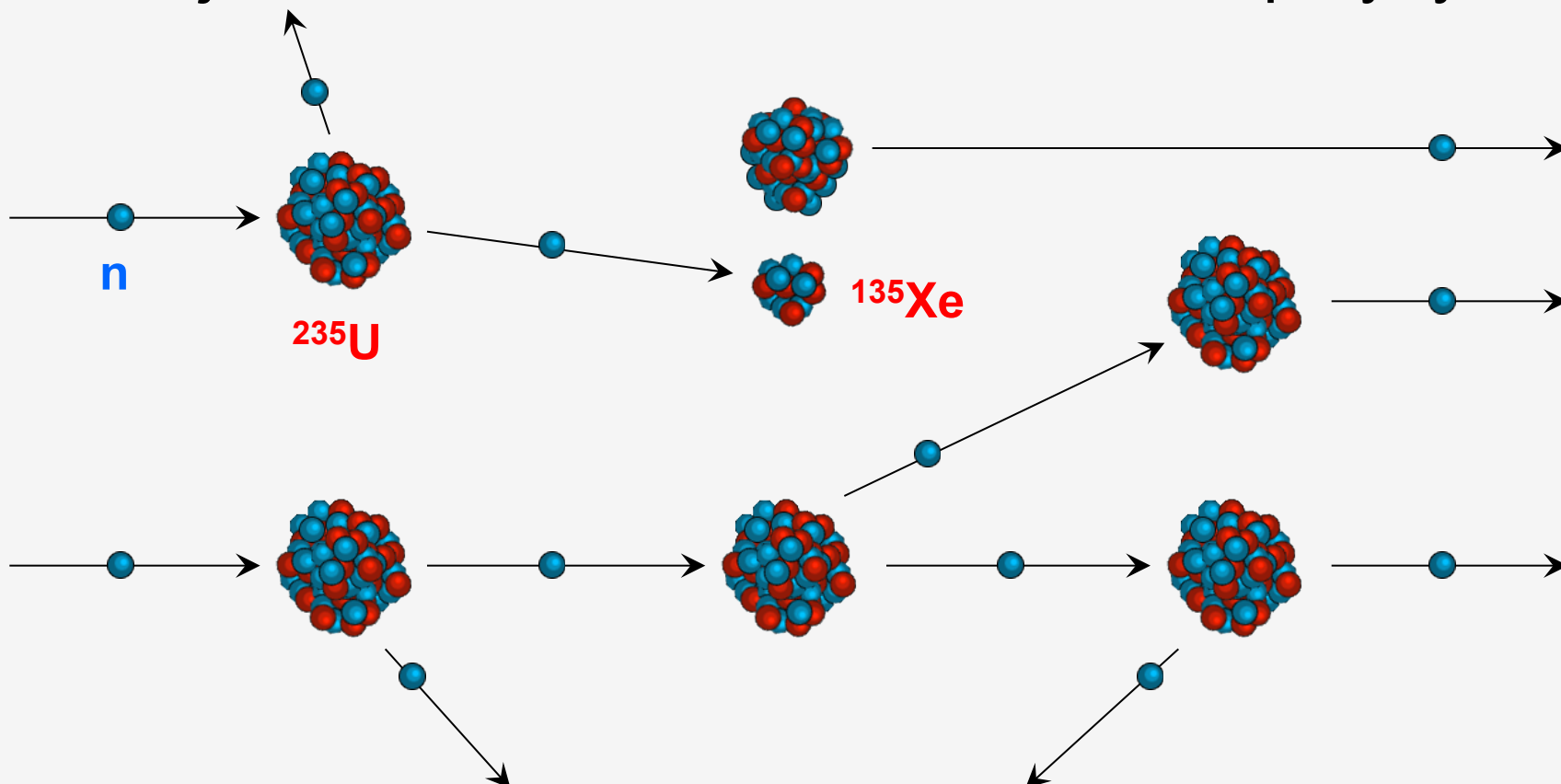
Reakcja łańcuchowa podtrzymuje się sama.



współczynnik mnożenia neutronów $k = 1$

Stan nadkrytyczny

Reakcja łańcuchowa narasta, neutronów przybywa.

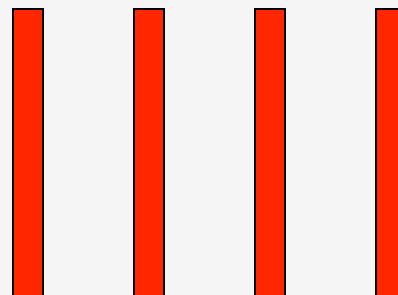


współczynnik mnożenia neutronów $k > 1$

Budowa reaktora jądrowego

elementy paliwowe

(związki chemiczne
uranu w odpowiednio
przygotowanej postaci)

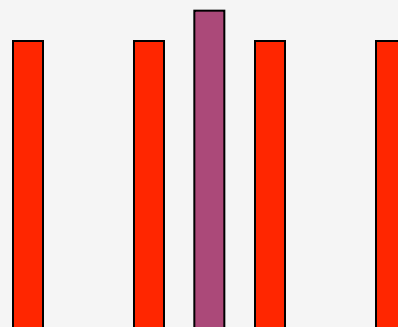


Budowa reaktora jądrowego

elementy paliwowe

pręty bezpieczeństwa

(jeśli są w rdzeniu,
reaktor zawsze będzie
wyłączony)



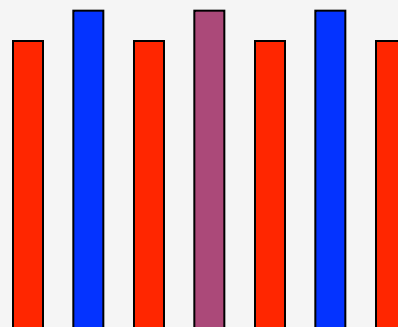
Budowa reaktora jądrowego

elementy paliwowe

pręty bezpieczeństwa

pręty sterujące

(służą do sterowania
reakcją łańcuchową)



Budowa reaktora jądrowego

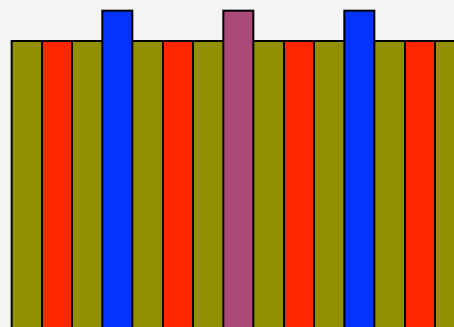
elementy paliwowe

pręty bezpieczeństwa

pręty sterujące

moderator neutronów

(służy do spowalniania neutronów, by lepiej wywoływały reakcje rozszczepienia uranu)



Budowa reaktora jądrowego

elementy paliwowe

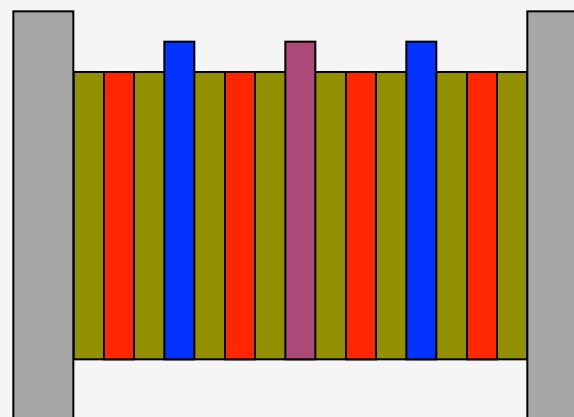
pręty bezpieczeństwa

pręty sterujące

moderator neutronów

reflektor neutronów

(powstrzymuje neutrony
uciekające poza rdzeń
reaktora)



Budowa reaktora jądrowego

elementy paliwowe

pręty bezpieczeństwa

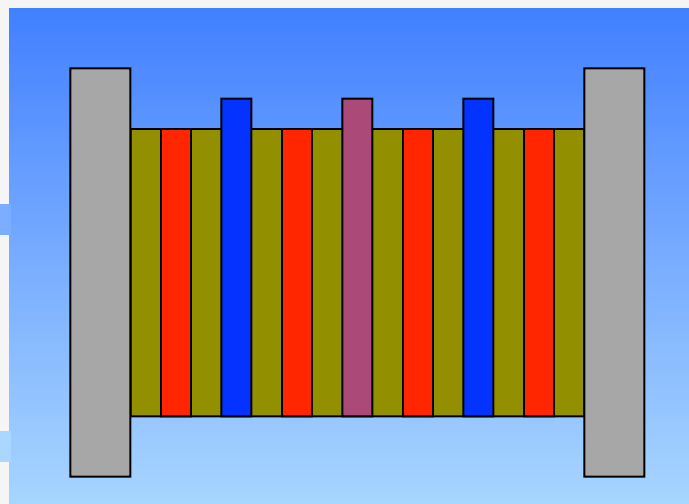
pręty sterujące

moderator neutronów

reflektor neutronów

chłodzenie

(odbiera ciepło z rdzenia reaktora)



Budowa reaktora jądrowego

elementy paliwowe

pręty bezpieczeństwa

pręty sterujące

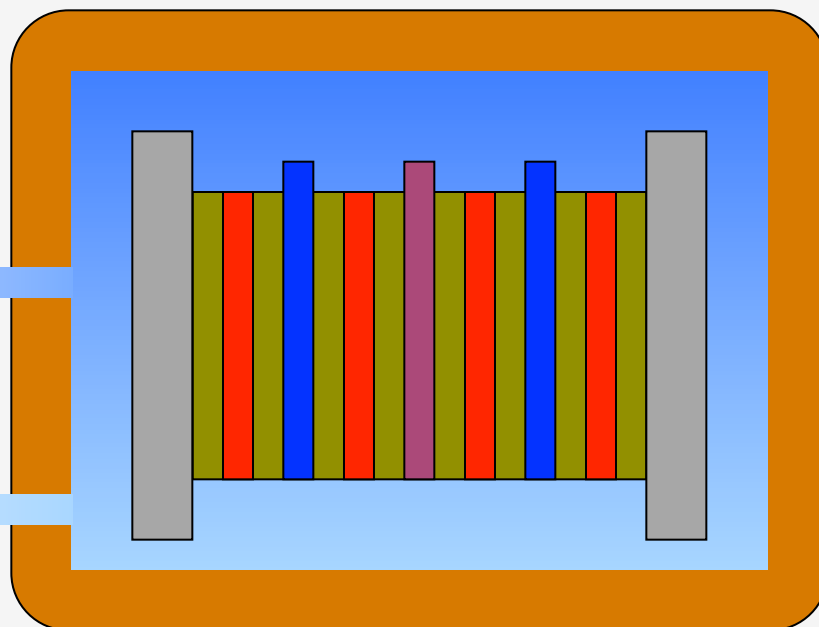
moderator neutronów

reflektor neutronów

chłodzenie

obudowa

(uszczelnia cały reaktor)



Budowa reaktora jądrowego

elementy paliwowe

pręty bezpieczeństwa

pręty sterujące

moderator neutronów

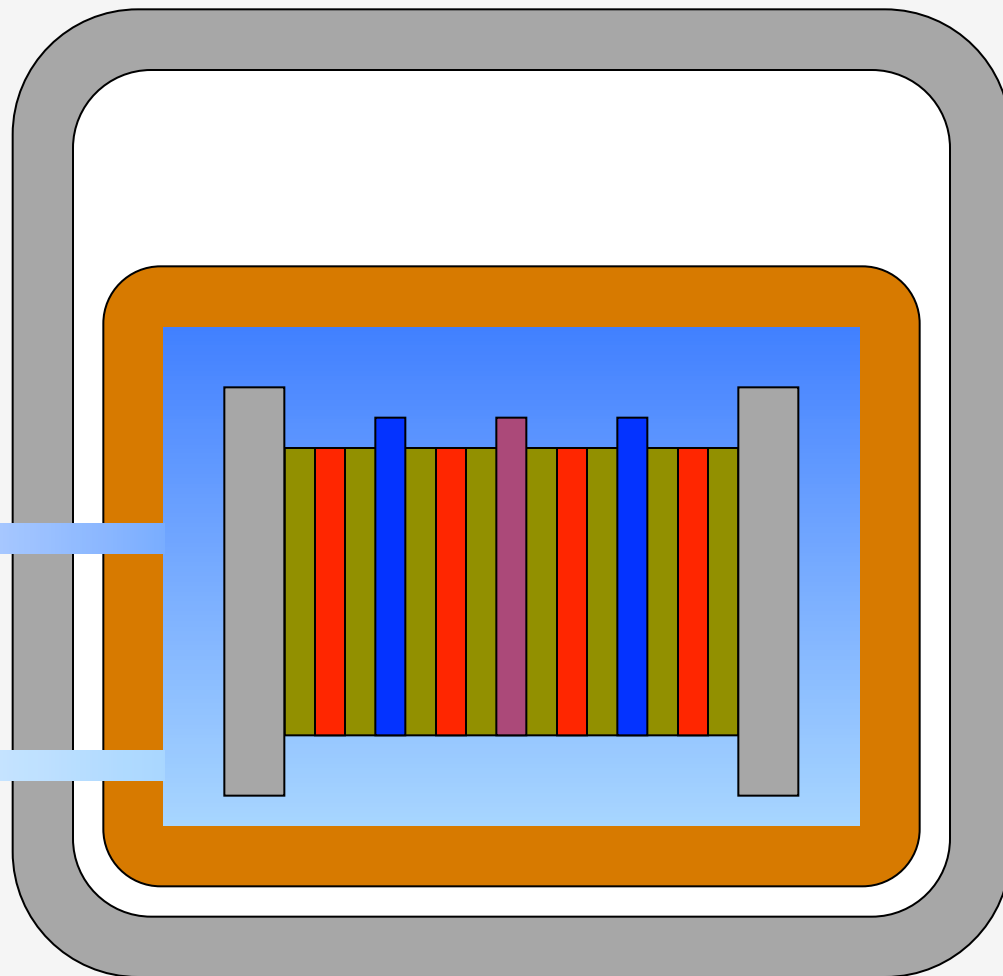
reflektor neutronów

chłodzenie

obudowa

osłona biologiczna

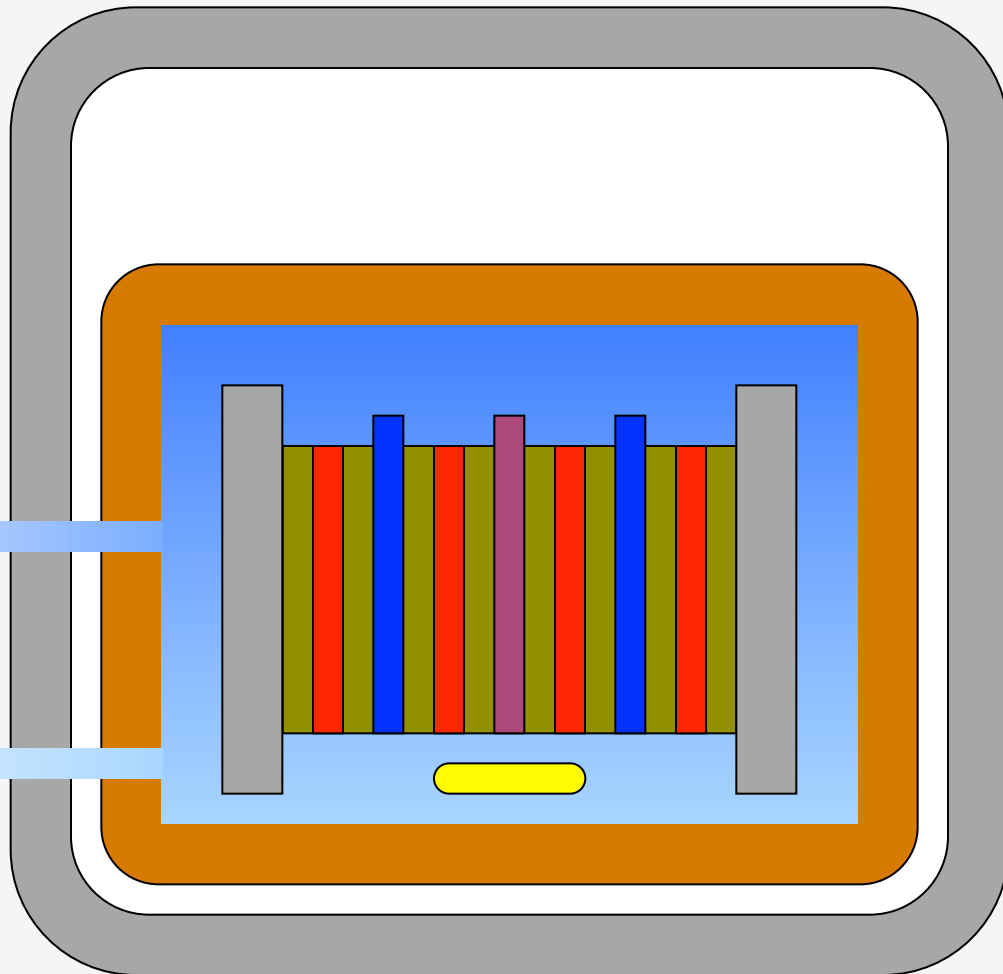
(chroni środowisko)



Działanie reaktora jądrowego

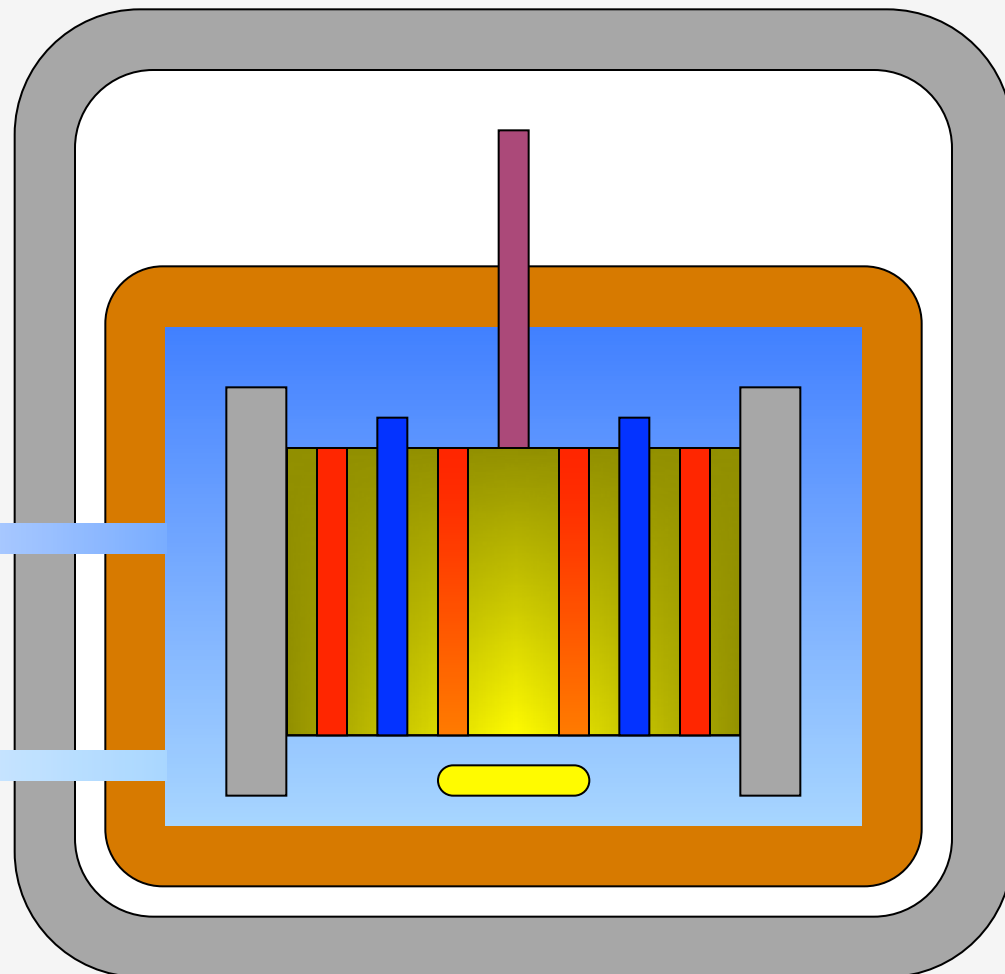
Aby uruchomić reaktor, trzeba wprowadzić do jego wnętrza źródło neutronów, które ma zapoczątkować reakcję łańcuchową.

Są różne typy źródeł neutronów.



Działanie reaktora jądrowego

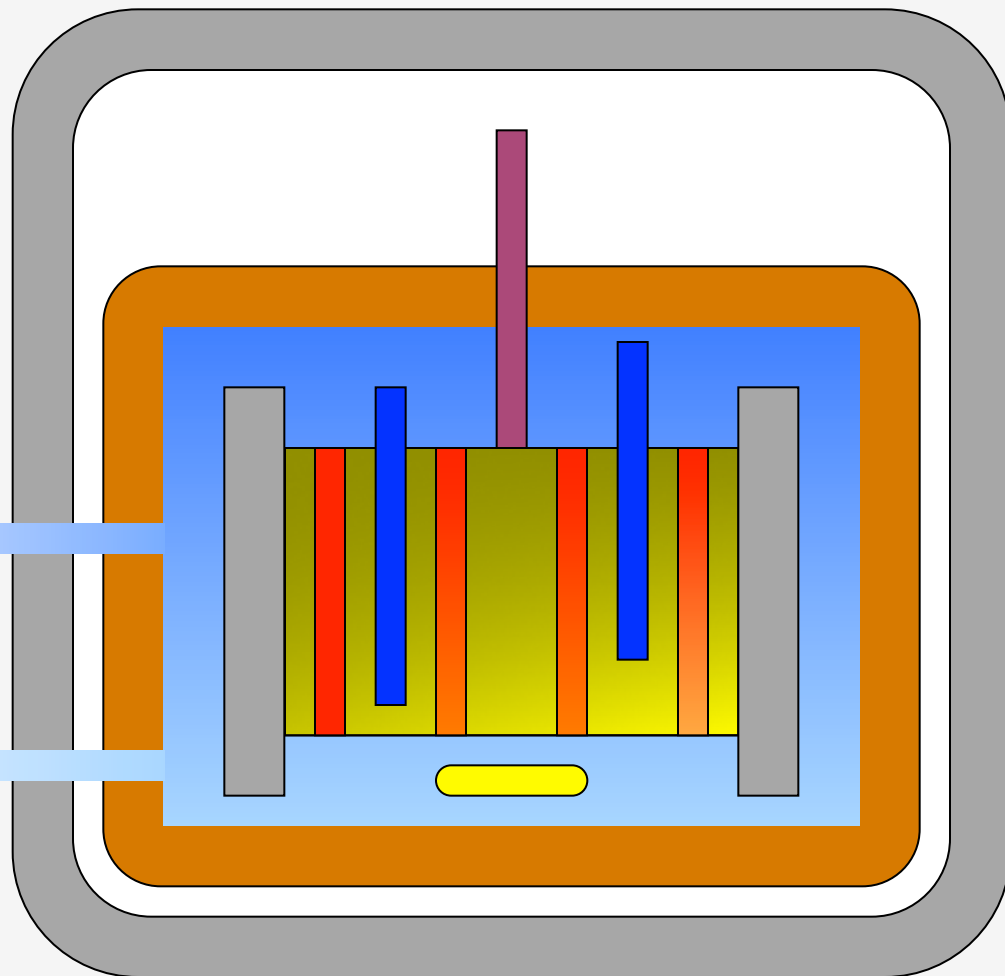
Po włożeniu źródła podnosi się pręty powstrzymujące neutrony przed rozprzestrzenianiem się po rdzeniu reaktora.



Jako pierwsze podnoszone są pręty bezpieczeństwa.

Działanie reaktora jądrowego

Kiedy wszystkie pręty bezpieczeństwa są już w górze (czyli gotowe do awaryjnego opadnięcia do rdzenia), można podnosić pozostałe.

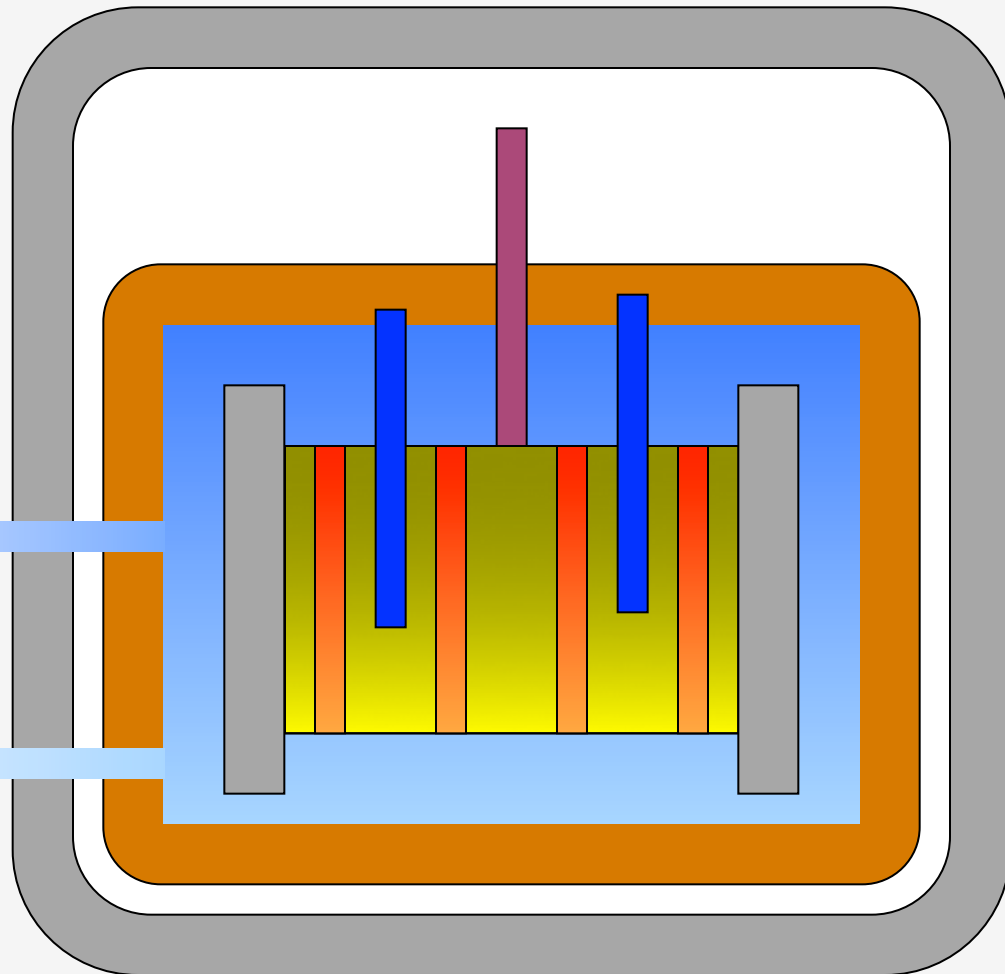


Reakcja łańcuchowa narasta, ale nadal jest podkrytyczna.

Działanie reaktora jądrowego

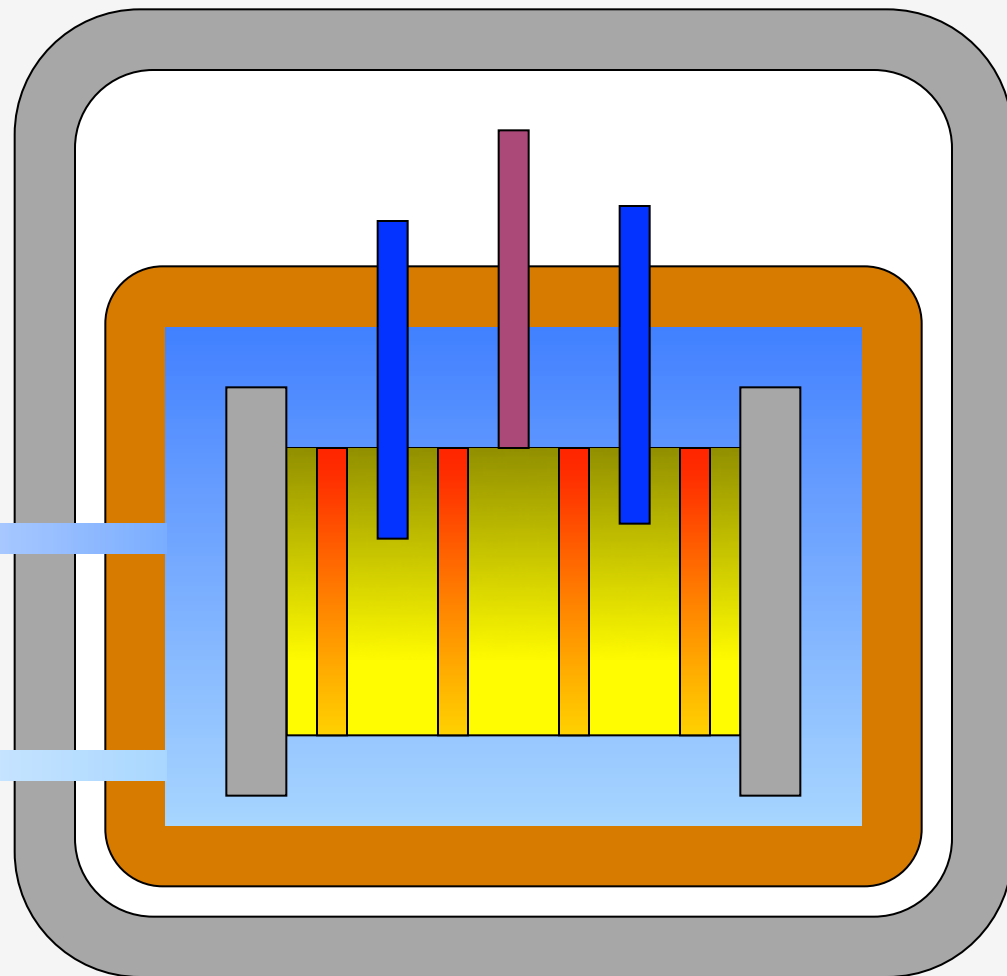
Gdy neutronów jest wystarczająco dużo, można usunąć już „rozrusznik”, czyli pierwotne źródło neutronów.

Liczba neutronów maleje, ale bardzo powoli – reakcja jest podkrytyczna.



Działanie reaktora jądrowego

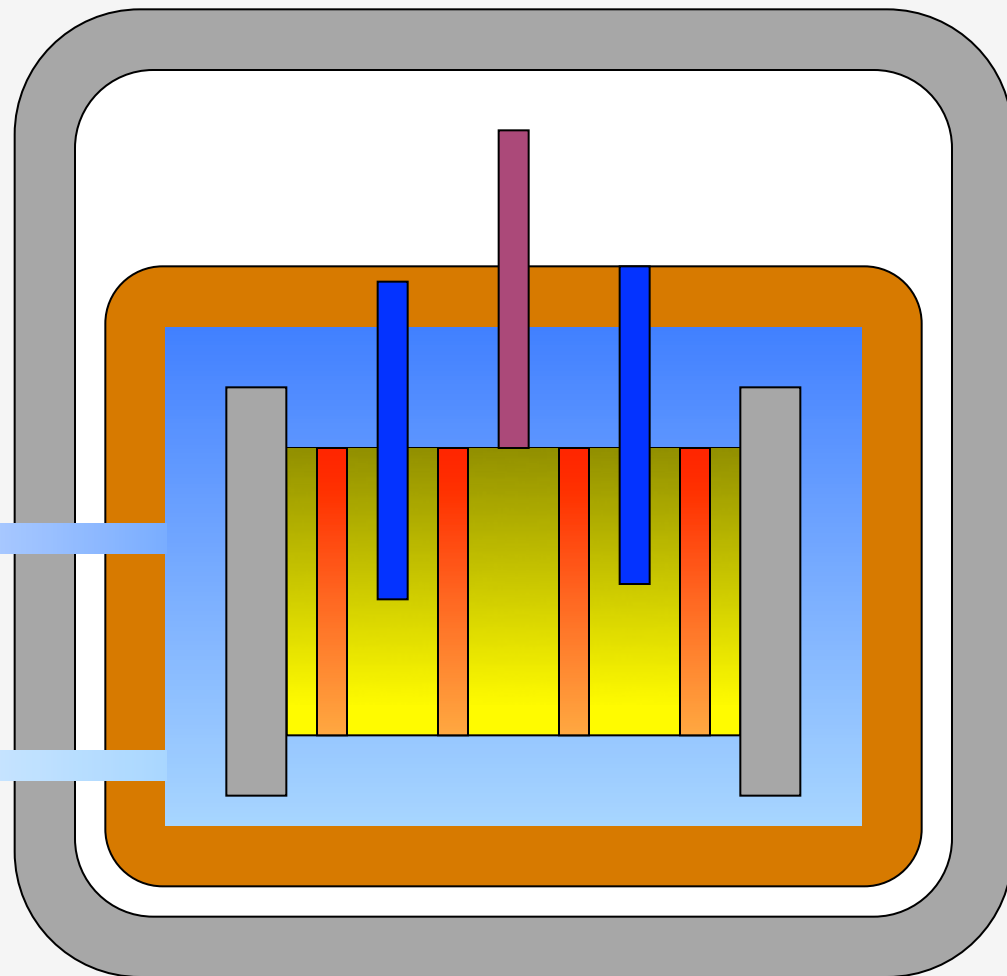
Aby reaktor osiągnął odpowiedni poziom mocy (mierzonej ilości ciepła lub strumieniem neutronów), reakcja przez pewien czas musi być nadkrytyczna.



Nadkrytyczność zapewnia ustawienie prętów sterujących.

Działanie reaktora jądrowego

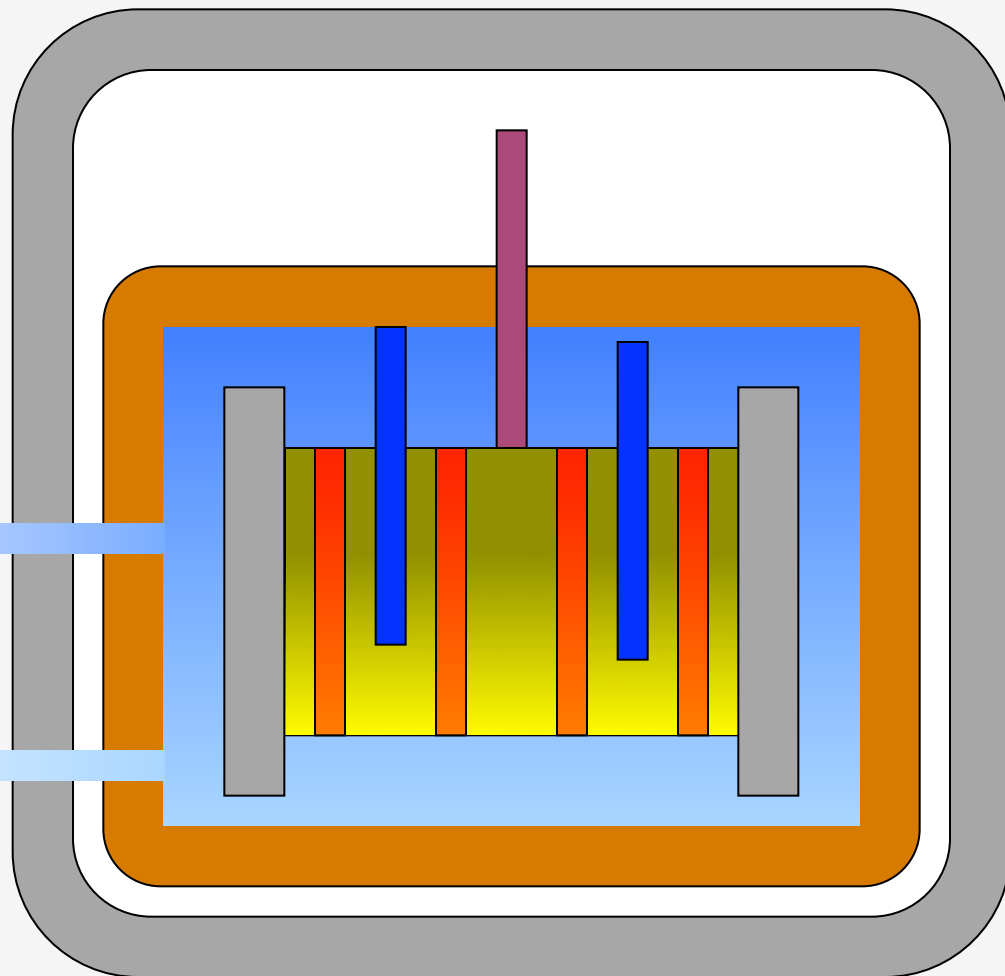
Gdy został osiągnięty odpowiedni poziom mocy, należy pręty sterujące ustawić tak, by reakcja pozostawała na poziomie krytycznym.



Liczba neutronów i moc pozostają stałe.

Działanie reaktora jądrowego

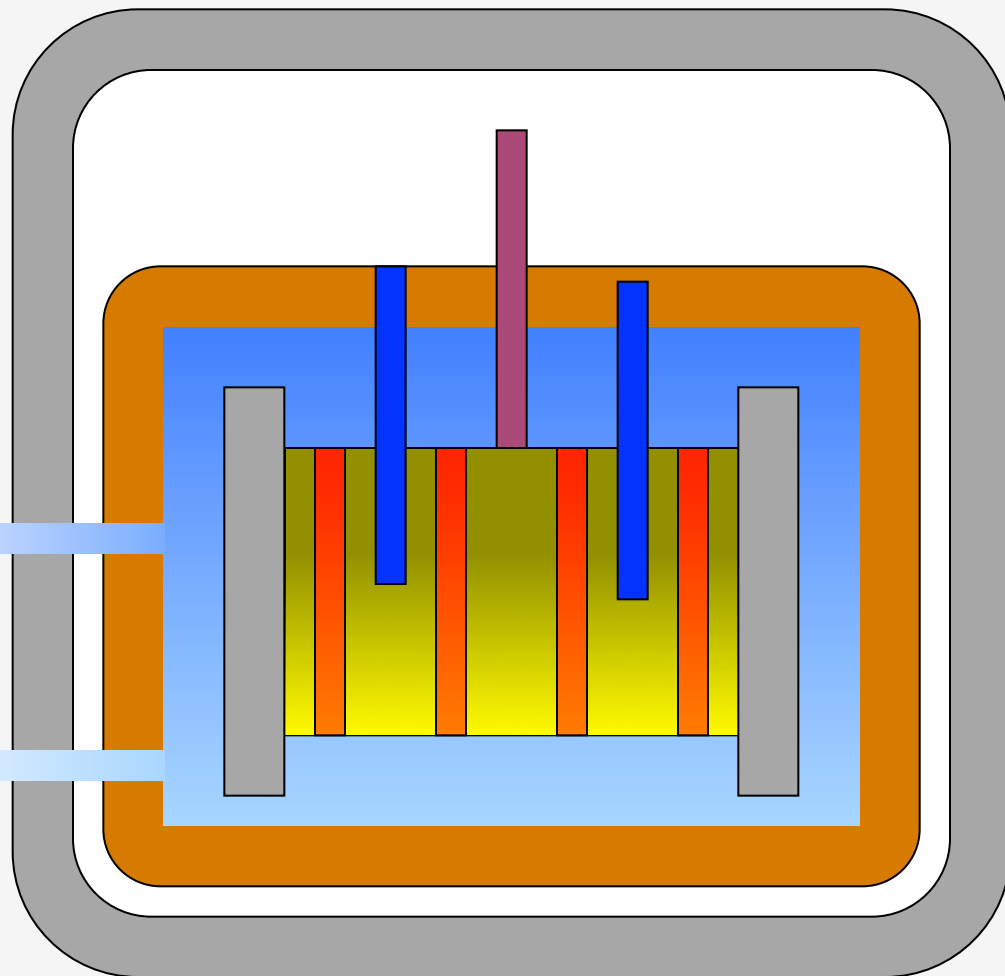
Aby obniżyć moc, należy opuścić pręty sterujące głębiej do reaktora tak, by pochłaniały więcej neutronów i reakcja była podkrytyczna.



Działanie reaktora jądrowego

Po obniżeniu mocy należy znowu ustawić pręty tak, by reakcja pozostawała na poziomie krytycznym.

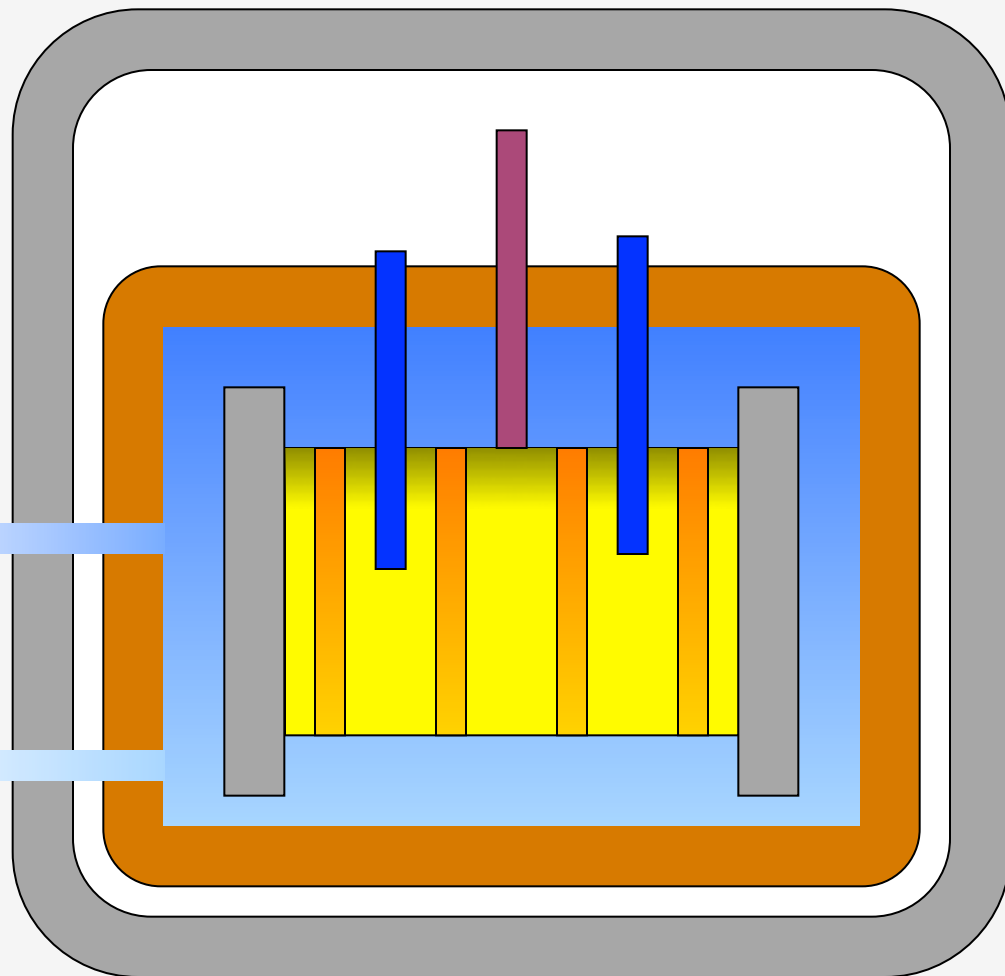
W ten sposób można regulować moc reaktora w dość dużym zakresie, choć najbardziej opłaca się pracować na stałym poziomie mocy.



Działanie reaktora jądrowego

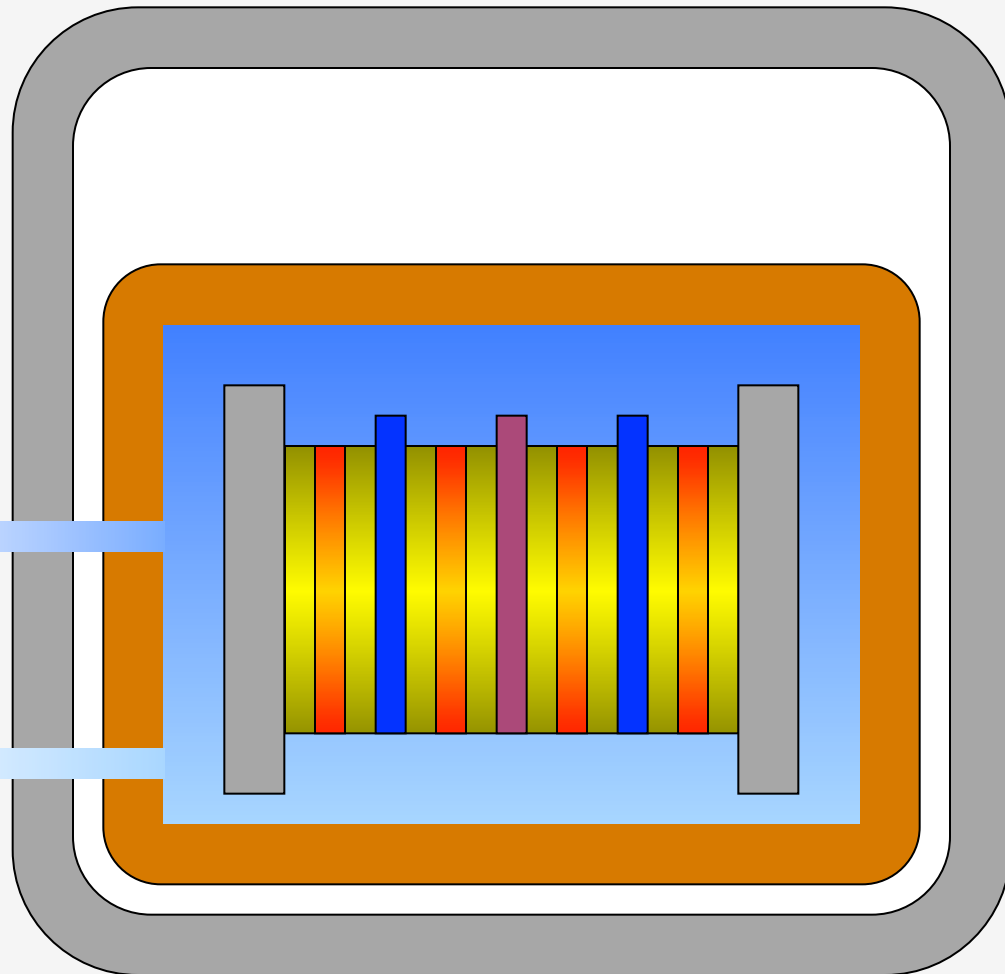
Jeśli pozostawi się reaktor w stanie nawet lekko nadkrytycznym, liczba neutronów i moc mogą wzrosnąć do niebezpiecznie dużej wartości.

Całe szczęście zarówno systemy zabezpieczeń, jak i same prawa fizyki ograniczają to ryzyko do minimum.



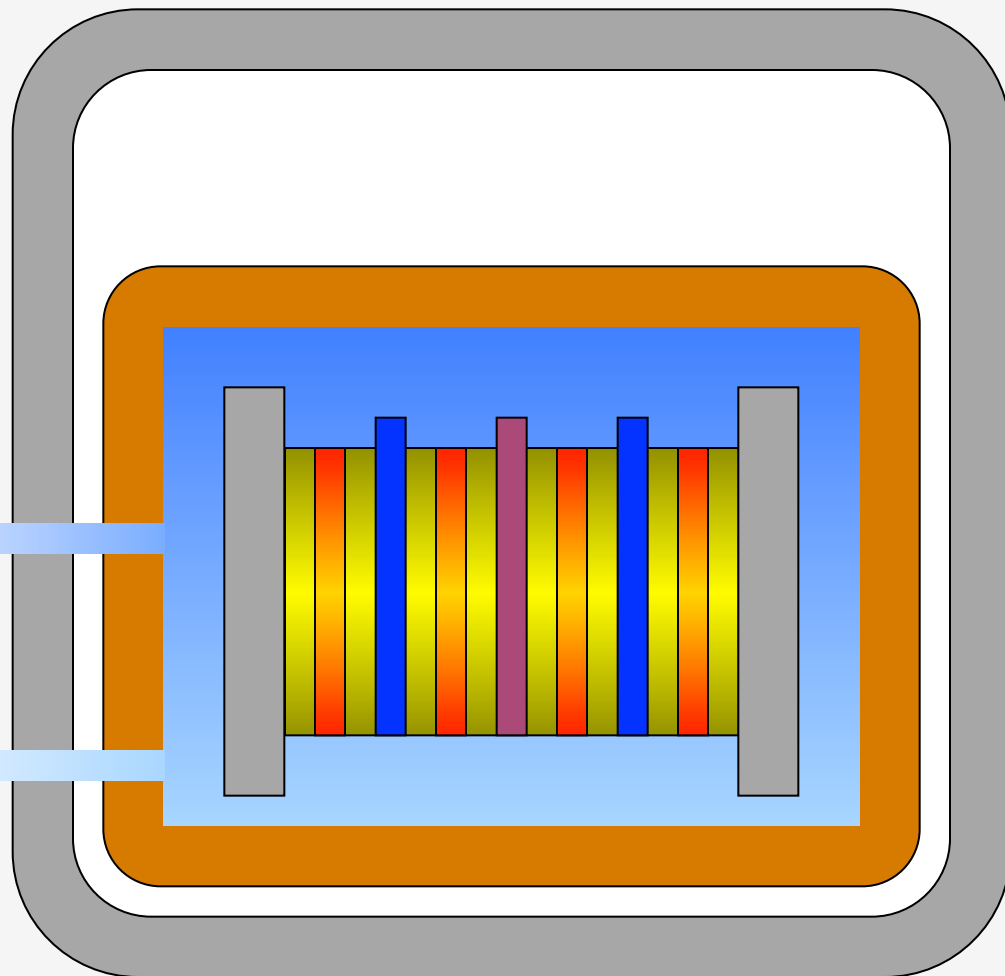
Działanie reaktora jądrowego

W razie wykrycia podejrzenia o niebezpieczeństwie elektromagnesy utrzymujące pręty zostają wyłączone i wszystkie pręty pochłaniające neutrony w ciągu maksimum 1 sekundy spadają do rdzenia pod wpływem grawitacji.



Działanie reaktora jądrowego

Szybkie wyłączenie nie zatrzymuje jednak od razu generacji ciepła. Odpowiada za nią przede wszystkim duża radioaktywność produktów rozszczepienia. Ciepło powyłączeniowe trzeba odbierać zwykle przez co najmniej kilka dni.



Chłodzenie reaktora jądrowego

człowiek potrzebuje wody mineralnej

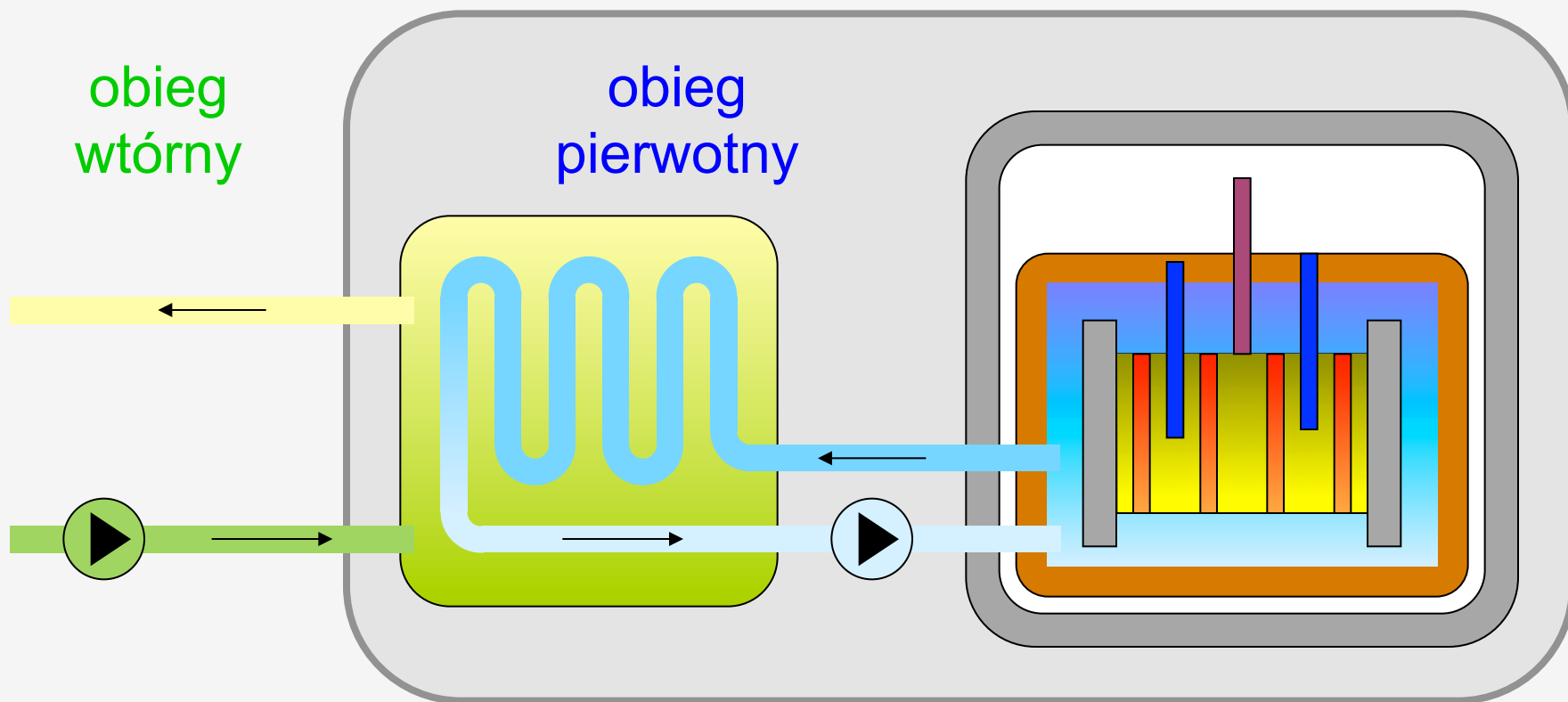
reaktor potrzebuje *wody demineralizowanej*

Woda stosowana w reaktorach musi być bardzo czysta, bo gdyby pływałyby w niej jakieś minerały, to mogłyby one aktywować się w strumieniu neutronów (czyli stać się promieniotwórcze). Oczyszcza się tę wodę na bieżąco i jej czystość przewyższa wielokrotnie czystość wody destylowanej do akumulatorów i żelazek sprzedawanej na stacjach benzynowych i w sklepach.

Inne rodzaje chłodziwa do reaktorów to różne gazy (np. hel, dwutlenek węgla) lub roztopione metale (np. ołów, sód).

Chłodzenie reaktora jądrowego

Chłodzenie reaktora składa się zwykle z dwóch obiegów, których chłodziwo nie miesza się, by zredukować ryzyko wydostania się radioaktywnych izotopów do środowiska.



Bezpieczeństwo reaktorów

W przemyśle jądrowym panują surowe wymogi bezpieczeństwa. Przede wszystkim na całym świecie panują te same standardy, wyznaczane i kontrolowane przez **Międzynarodową Agencję Energii Atomowej** (ang. **International Atomic Energy Agency**, w skrócie **IAEA**), która prowadzi publicznie dostępny centralny rejestr wszystkich niepokojących zdarzeń ocenianych wedle tzw. **skali INES**.

Ponadto różne państwa mogą mieć własne, jeszcze bardziej zaostrzone przepisy.

Bezpieczeństwo reaktorów

Nadmiarowość (redundancja)

Zapas chłodziwa, liczba prętów bezpieczeństwa, liczba systemów awaryjnego zasilania, liczba czujników mierzących te same wielkości oraz ilość wielu innych systemów **przekracza od kilku do kilkuset razy** ilości niezbędne do zwykłego prawidłowego funkcjonowania elektrowni.

W przypadku czujników stosuje się zwykle zasadę „**2 z 3**”, czyli w pomiarze wierzy się wskazaniom tych przynajmniej dwóch, które są zgodne.

Bezpieczeństwo reaktorów

Wielostopniowość (obrona w głąb)

Jeśli zawiedzie jeden system bezpieczeństwa, jego funkcję ma przejąć drugi; jeśli nie zadziała drugi system, to musi zastąpić go trzeci; jeśli nie zadziała trzeci, to musi czwarty itd. aż do szóstego.

Zróżnicowanie

Każdy z równoległych systemów powinien działać na odmiennej zasadzie niż pozostałe, by przypadkiem nie ulec tej samej awarii, co inne. Dotyczy to zarówno zabezpieczeń, jak i czujników.

Bezpieczeństwo reaktorów

Samokontrola

Współczesne reaktory są zaprojektowane tak, by nawet pozbawione zasilania i jakiegokolwiek opieki wyłączały się bezpiecznie na zasadzie zwykłych praw fizyki (np. grawitacja, konwekcja wody).

Awaria projektowa

Projektując reaktor przewiduje się (i symuluje w komputerach) każdą możliwą awarię, łącznie ze stopieniem rdzenia, by sprawdzić i zminimalizować jej skutki (w szczególności skażenie otoczenia).

Bezpieczeństwo reaktorów

Obecnie budowane reaktory mają ryzyko dużej awarii mniejsze niż 1 : 100 000 „reaktorolat” pracy.

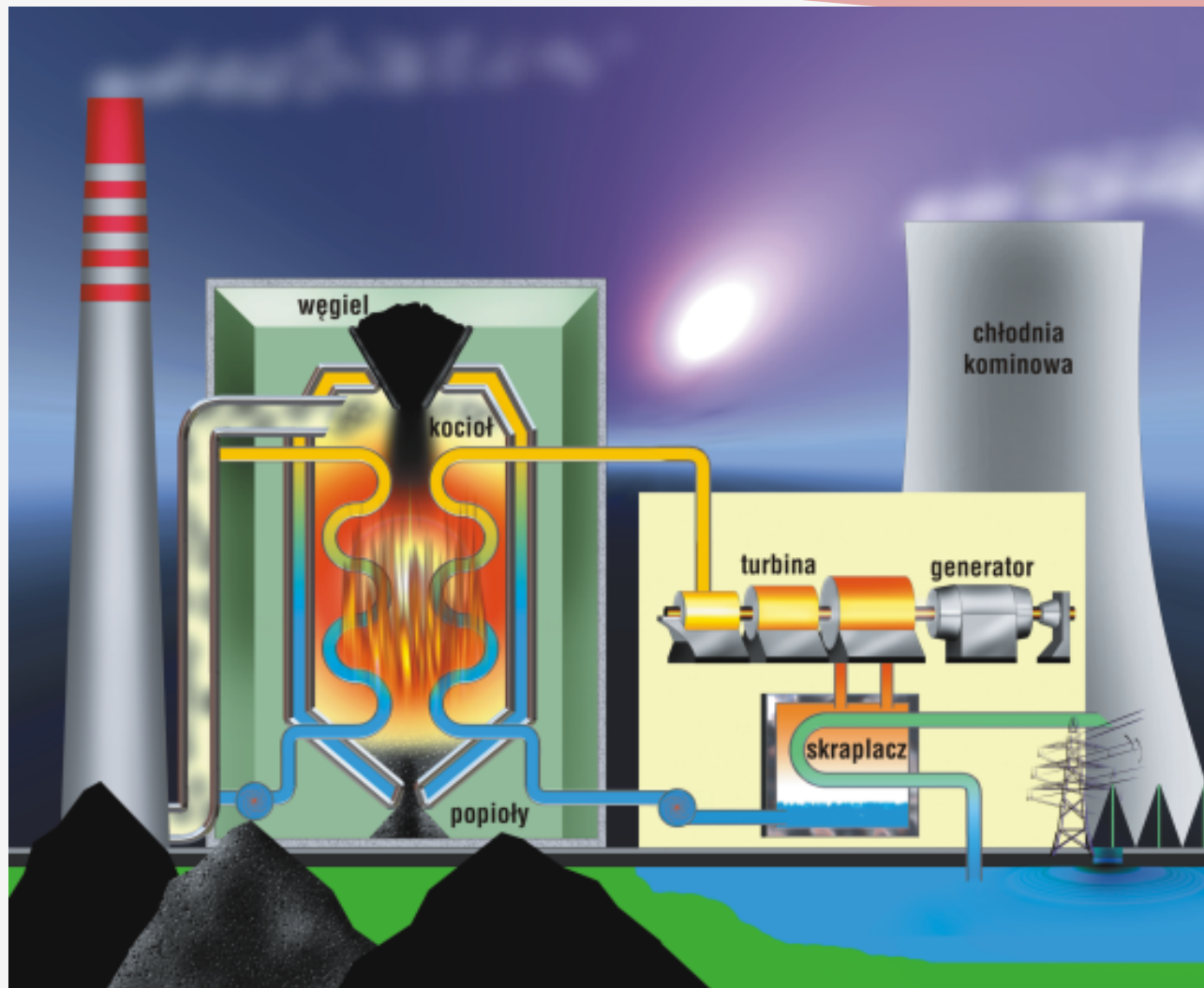
Stosowane w nich zabezpieczenia pozwalają ograniczyć skutki takiej awarii do obszaru o promieniu ok. 800 m od reaktora.

W praktyce w elektrowniach jądrowych częściej ulegają awarii elementy części niejądrowej (np. rozgrzane i rozpędzone łopatki turbin, uszczelki poddane wysokim ciśnieniom pary). Część reaktorowa jest wysoce niezawodna.

Działanie elektrowni

Elektrownia to zwykle „duża prądnica” napędzana ciśnieniem pary wodnej podgrzanej w „kociołku”.

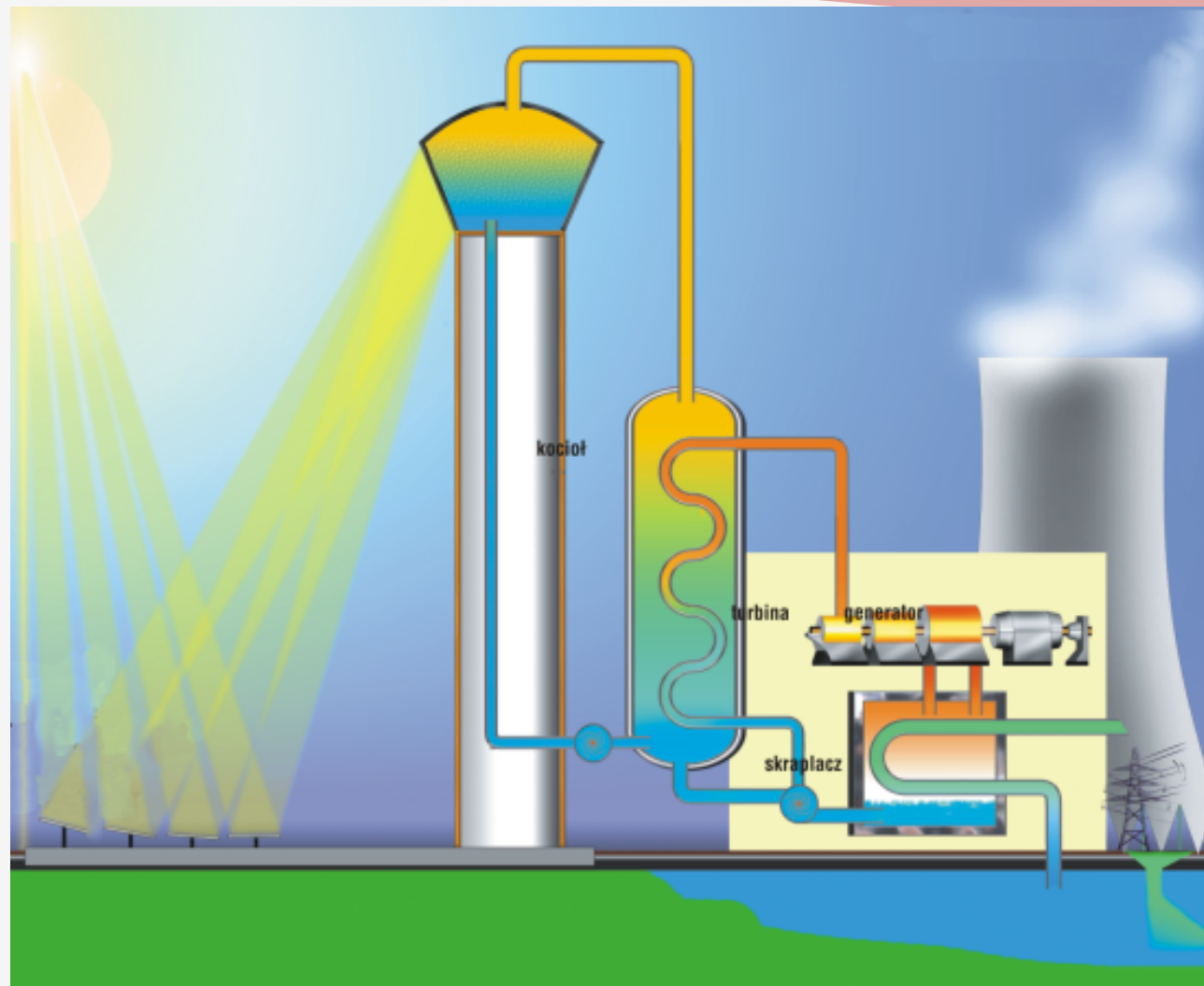
To może być np. kocioł węglowy.



Działanie elektrowni

„Kociołek”
może być
również
ogrzewany
światłem
słonecznym.

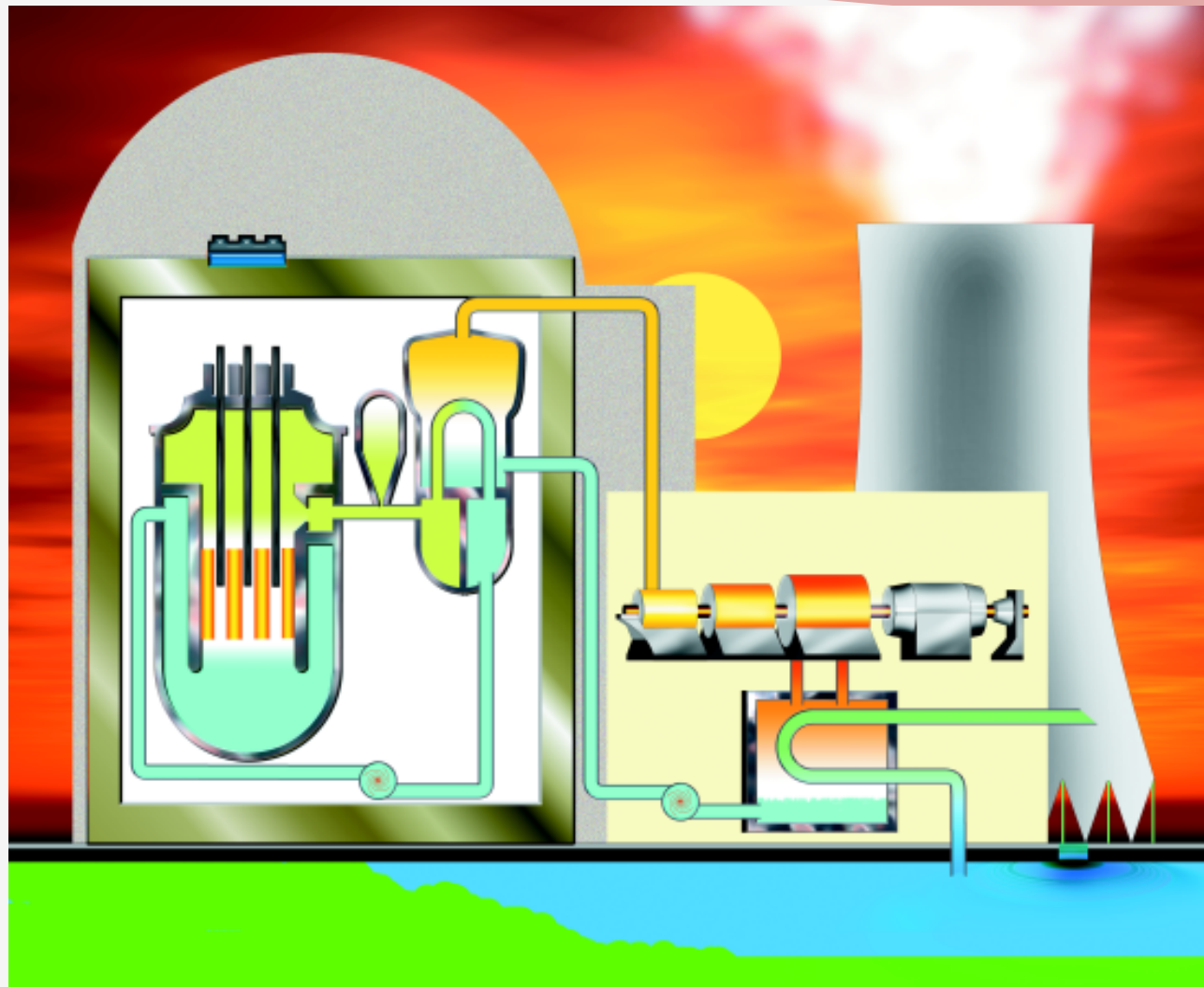
Innym
sposobem jest
pompowanie
wody głęboko
pod ziemię,
gdzie ogrzewa
ją ciepło Ziemi.



Działanie elektrowni

„Kociołkiem”
może być też
reaktor
nuklearny.

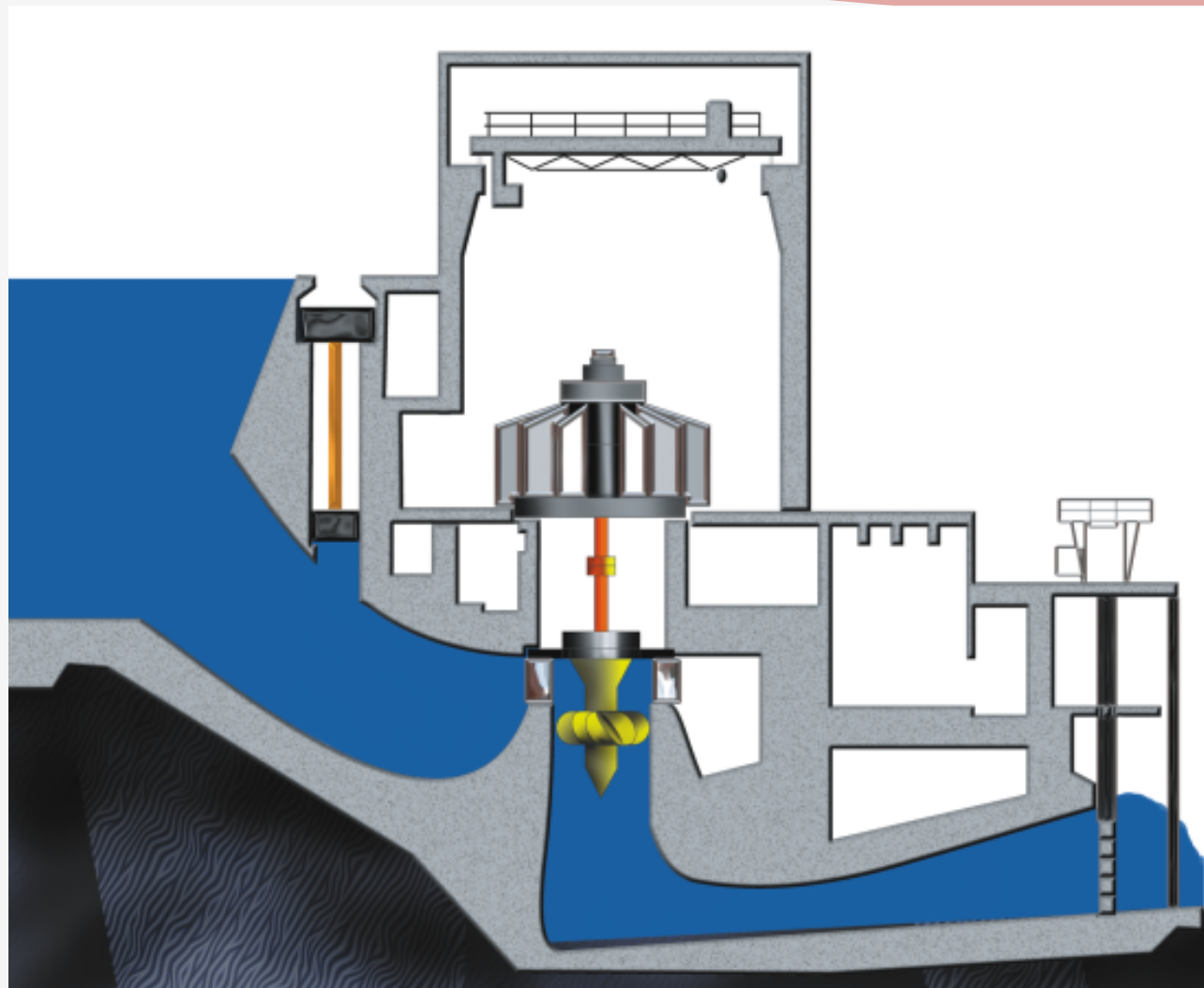
W zależności
od konstrukcji
na świecie
istnieją
elektrownie
oparte o różne
typy reaktorów.



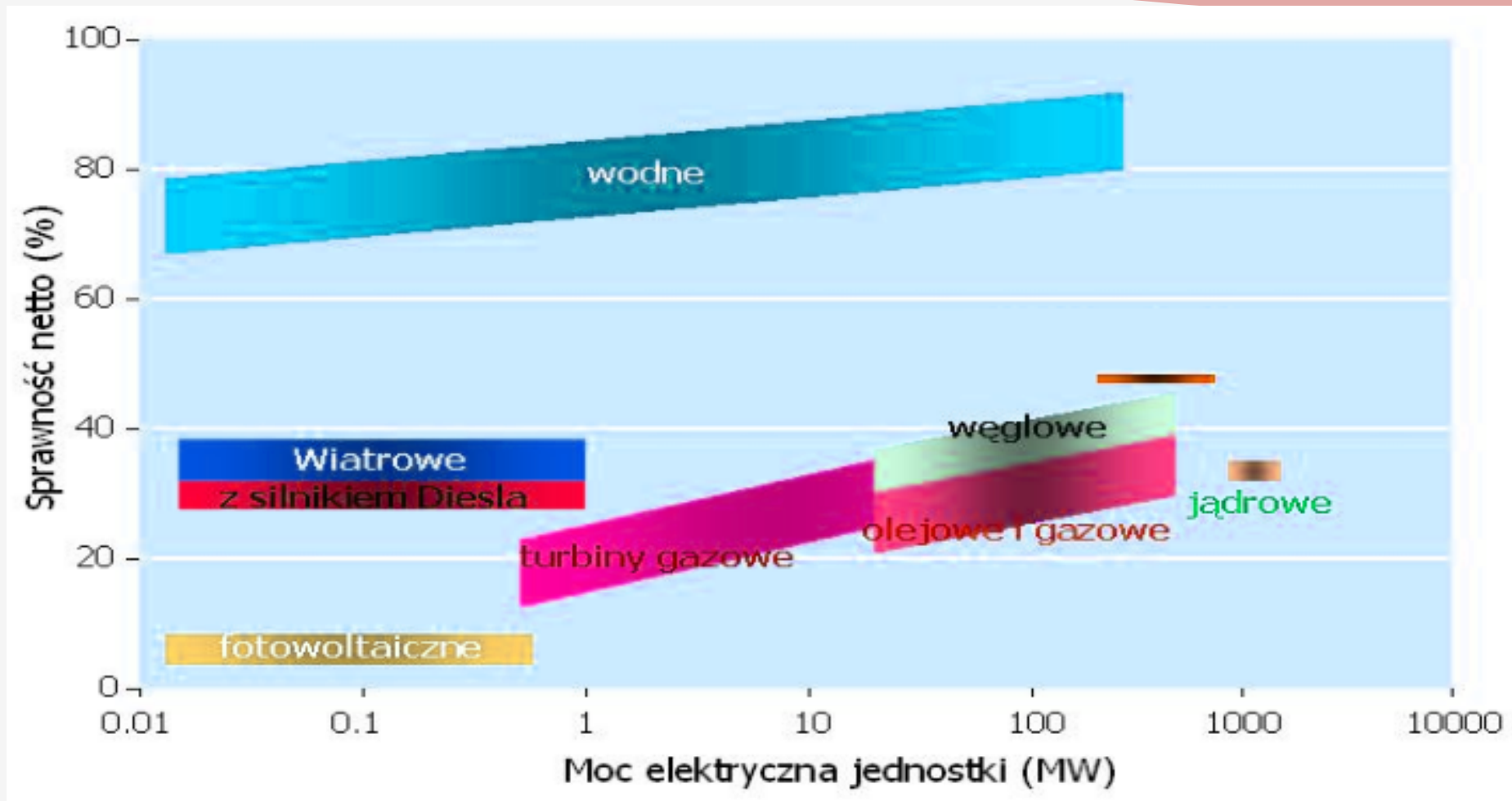
Działanie elektrowni

Inaczej działają elektrownie wodne, gdzie generator jest napędzany siłą spływającej wody.

Z kolei w elektrowniach wiatrowych wykorzystuje się ruch mas powietrza.



Sprawność elektrowni



Źródło: K. Bodek, cykl wykładów pt. „Energia jądrowa – fakty i mity”

Porównanie elektrowni

Nie ma „lepszyc” lub „gorszych” elektrowni w ogólnym tych słów znaczeniu.

Każdy z rodzajów elektrowni ma swoje zalety i wady, a poza tym trzeba brać pod uwagę: rodzaj zapotrzebowania, dostępność surowców i możliwość ich transportu, wpływ na środowisko naturalne i lokalną społeczność, dostępność i zaawansowanie technologii, kulturę pracy, bezpieczeństwo energetyczne (w skali kraju, jak i lokalnie) i jeszcze wiele innych czynników. Oprócz tego należy też brać pod uwagę płynną i owocną współpracę różnych technologii, np.:

el. jądrowa + wiatraki + el. wodna szczytowo-pompowa

Porównanie elektrowni

Elektrownia	Opole (Polska)	Beznau (Szwajcaria)
Moc 1 bloku	360 MW (brutto)	360 MW (netto)
Typ	węglowa	jądrowa
Roczne zużycie surowców	1 000 000 t węgla 32 500 t mączki wapiennej (dostawa <u>ciągła</u> pociągami lub taśmociągami)	13 t uranu wzbogaconego do 3,3% ^{235}U (wymiana paliwa <u>raz na rok</u> , dostawa może być rzadziej)
Źródło: K. Bodek, „Energia jądrowa – fakty i mity”		

Porównanie elektrowni

Elektrownia	Opole (Polska)	Beznau (Szwajcaria)
Moc 1 bloku	360 MW (brutto)	360 MW (netto)
Typ	węglowa	jądrowa
Roczna emisja odpadów	2 000 000 t CO ₂ (przez komin) 190 000 t popiołu i żużlu (na hałdzie) 44 500 t gipsu 3 600 t NO _x 3 000 t SO _x 200 t CO	0,8 m ³ odpadów wysokoaktywnych 50 beczek odpadów średnioaktywnych 150 beczek odpadów niskoaktywnych (zabezpieczone)

Źródło: K. Bodek,
„Energia jądrowa –
fakty i mity”

Odpady promieniotwórcze

Wypalone paliwo to te same elementy paliwowe, które wcześniej wkłada się do reaktora, tylko ze zmienioną zawartością: jest mniej uranu, a więcej promieniotwórczych produktów rozszczepienia.

Wypalone paliwo wymaga chłodzenia przez ok. 3 lata, po czym może być wywiezione z elektrowni.

W przemyśle jądrowym przyjętą praktyką jest, że podczas kupna świeżego paliwa płaci się od razu za jego późniejszy odbiór i unieszkodliwianie przez producenta paliwa.

Odpady promieniotwórcze

Aktywowane materiały to substancje, które były pod wpływem neutronów i stały się radioaktywne.

Materiały skażone to przedmioty, które zostały wybrudzone substancjami promieniotwórczymi.

Mogą to być maszyny (np. zawory, części pomp), narzędzia (np. śrubokręty, młotki), odzież ochronna (np. fartuchy, kapcie), materiały (np. kawałki blach, filtry, a nawet zwykłe ścierki). Jeśli pod jakimś czasie ich aktywność spadnie poniżej szkodliwego poziomu, mogą być traktowane jak zwykłe śmieci.

Odpady promieniotwórcze

Radioaktywne ścieki pochodzą albo z obiegów chłodzenia reaktora, albo powstają podczas mycia skażonych ubrań, narzędzi i ludzi.

Ścieki te są albo zatężane (przez filtrowanie, wytrącanie osadów lub odparowanie czystej wody), albo przechowywane póki nie wypromieniują się.

Radioaktywne gazy są przepuszczane przez odpowiedni system wentylacji, filtrowane w razie potrzeby, a poniżej dozwolonych aktywności – usuwane do środowiska przez wysoki komin.

Odpady promieniotwórcze

Większość odpadów promieniotwórczych na świecie pochodzi nie z elektrowni jądrowych, ale z zastosowań promieniowania w medycynie:

np. zużyte aparaty do naświetleń, radioaktywne lekarstwa, opakowania po nich, skażone fartuchy, strzykawki, rękawiczki itp.

oraz w przemysłe:

np. zużyte izotopowe czujki dymu, aparaty do prześwietlania metali, odpady kopalniane (gazowe, ciekłe i stałe – nie tylko z kopalń uranu!)

Zatrudnienie w elektrowni jądrowej

Ekipa budująca: ok. 1000 osób w ciągu ok. 5-6 lat.

Polacy mają doświadczenie w budowie elektrowni jądrowych! (np. Olkiluoto w Finlandii)

Ekipa eksploatacyjna: 600-1200 osób przez 50-60 lat, w tym:

50-80% - po technikum lub szkole zawodowej

20-35% - po studiach magisterskich

ok. 5% - po studiach doktorskich

Wszyscy przechodzą dodatkowe szkolenia.

Nie tylko elektrownie

Oprócz powszechnie kojarzonego zastosowania reaktorów do produkcji energii elektrycznej mają one szereg innych, pokojowych zastosowań.

Reaktor jądrowy to także źródło dużej ilości neutronów, które mogą być zastosowane do badań strukturalnych (np. prześwietleń, analizy składu), produkcji nowych substancji (np. domieszkowania kryształów, tworzenia izotopów niewystępujących w przyrodzie), a także wielu badań podstawowych, mających na celu poznanie praw przyrody.

Reaktor MARIA

Działający w Polsce reaktor MARIA o mocy cieplnej 30 MW:

- nie produkuje prądu elektrycznego,
- obecnie produkuje rocznie ok. 2 miliony dawek diagnostycznych technetu ^{99m}Tc i miliony dawek innych izotopów promieniotwórczych,
- służy do badań wykopalisk archeologicznych, zabytkowych dzieł sztuki, właściwości nowych stopów metali, procesów schnięcia materiałów budowlanych i wielu, wielu innych...

Reaktor MARIA

W reaktorze MARIA pracuje ok. 70 osób.

W całym Narodowym Centrum Badań Jądrowych pracuje ponad 1000 osób.

Cały czas jest zapotrzebowanie na młodych pracowników, zarówno w NCBJ, jak i innych instytucjach związanych z technologiami jądrowymi i pokrewnymi, takich jak Państwowa Agencja Atomistyki, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej czy Instytut Chemii i Technik Jądrowych.

Dziękuję z uwagę

Polecane źródła:

www.paa.gov.pl – Państwowa Agencja Atomistyki

www.ncbj.gov.pl – Narodowe Centrum Badań Jądrowych

www.ncbj.edu.pl – część edukacyjna strony NCBJ

www.atom.edu.pl – strona pod patronatem NCBJ

Poważne awarie w energetyce

elektrownia jądrowa **Czarnobyl** (ZSRR)

blok IV uruchomiony w **1983 r.**, awaria w **1986 r.**

przyczyna: błędy konstrukcyjne, proceduralne i inne

rodzaj awarii: wybuch ciśnieniowy → wybuch chemiczny → pożar → roztopienie rdzenia

poszkodowani:

- 134 ratowników dostało dawkę powodującą chorobę popromienną, 28 zmarło z jej powodu
- kilka tysięcy raków tarczycy = kilkanaście zgonów
- setki tysięcy przesiedlonych (zdrowych)

Poważne awarie w energetyce

elektrownia jądrowa **Fukushima** (Japonia)

blok I uruchomiony w **1970 r.**, awaria w **2011 r.**

przyczyna: trzęsienie ziemi i tsunami

rodzaj awarii: • trzęsienie ziemi → wyłączenie reaktorów, • tsunami → brak chłodzenia → wybuch chemiczny i nadtopienie rdzenia

poszkodowani: • kilkudziesięciu pracowników dostało dawkę w granicach limitów awaryjnych,
• 0 zgonów z powodu promieniowania (2 z innych),
• 160 tyś. ewakuowanych (połowa dobrowolnie).

Poważne awarie w energetyce

terminal LPG w **Mexico City** (Meksyk), **1984 r.**

rodzaj awarii: wyciek i wybuch gazu

poszkodowani: • ponad 500 zgonów, • 200 tysięcy ewakuowanych.

elektrownie wodne w **Henan** (Chiny), **1975 r.**

rodzaj awarii: zerwanie tam po obfitych deszczach

poszkodowani: • 26 tyś. zginęło w powodzi, • 145 tyś. zmarło od epidemii i klęski głodu, • 11 milionów dotkniętych innymi skutkami.

Poważne awarie w energetyce

kopalnia węgla w **Fuxin** (Chiny), **2005 r.**

rodzaj awarii: wybuch gazu

poszkodowani: • ponad 200 zgonów,
• kilkunastu rannych.

kopalnia węgla w **Rudzie Śląskiej** (Polska), **2009 r.**

rodzaj awarii: wybuch metanu

poszkodowani: • 20 zgonów,
• 36 rannych.

Zakresy dawek

tło naturalne:

średnio ok. 3 mSv/rok

maksimum ok. 300 mSv/rok

poza elektrownią („przy płocie”):

średnio 0,01 mSv/rok

norma zezwala na ok. 0,3 mSv/rok

w elektrowni (pracownicy):

zwykle poniżej 0,1 mSv/rok

norma zezwala na 50 mSv/rok (100 mSv / 5 lat)

Zakresy dawek

diagnostyka medyczna:

jednorazowo od 0,1 mSv (prześwietlenie)
do kilkudziesięciu mSv (tomografia komputerowa)

terapia medyczna: powyżej 10 000 mSv na tkankę

narażenie zawodowe (w Polsce):

górnicy – do 20 mSv/rok

pielęgniarki – do 50 mSv/rok

pracownicy reaktora MARIA – średnio poniżej 0,2 mSv, maks. np. 1,71 mSv (2012) i 3,42 mSv (2011)

Zakresy dawek

dawka < 200 mSv/rok i 100 mSv jednorazowo
brak wykryto negatywnego wpływu
możliwy wpływ pozytywny

dawka > 200 mSv/rok lub 100 mSv jednorazowo
możliwe większe ryzyko nowotworów

dawka > 500 mSv jednorazowo
uleczalna choroba popromienna

dawka $> 2\ 000$ mSv
choroba popromienna może być śmiertelna

Skutki długofalowe

Doświadczenie
związane z
badaniem efektów
broni jądrowej i
Czarnobyla uczy:
**promieniowanie
jonizujące nie
powoduje
powstawania
dziedzicznych
„mutacji”.**



Źródło: zbiory cara Piotra I w Sankt Petersburgu, www.kunstkamera.ru

Skutki długofalowe

Doświadczenie ludzkości z energią nuklearną jest zresztą dłuższe niż od jej odkrycia. Choć świadomie poznaliśmy ją ok. 100 lat temu, to promieniowanie towarzyszyło nam od początków świata (w szczególności promieniowanie ze skał i z kosmosu).

Pierwszy samoistny reaktor jądrowy działał ok. 2 miliardy lat temu w złożach uranu w Oklo w Gabonie (Afryka). Dane z tego rejonu pozwalają zbadać, jak zachowują się radioaktywne odpady nawet bez zabezpieczeń.