

Elektrownia jądrowa

(budowa i działanie)

Łukasz Adamowski

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

Dział Edukacji i Szkoleń, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk, WWW: www.ncbj.gov.pl

Wstęp

Źródła promieniotwórcze

(obiekty o dużej ***radioaktywności***)

wysyłają

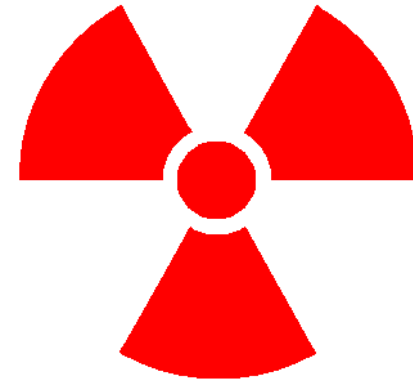
promieniowanie jonizujące

(czyli takie, które powoduje
powstawanie jonów)

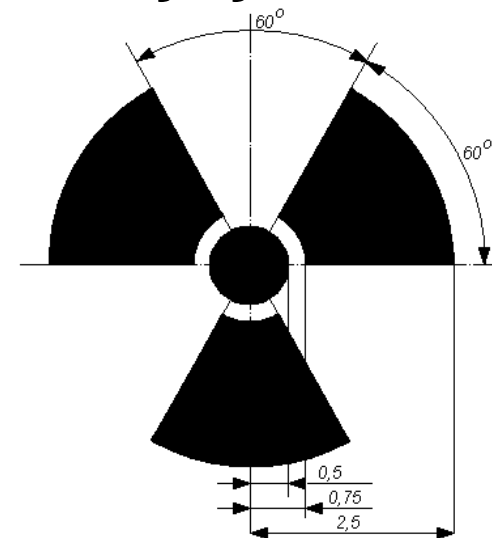
które czasami jest

przenikliwe.

substancje - czerwony



maszyny - czarny



Wstęp

napromieniowany ≠ promieniotwórczy

bo

oświetlony ≠ 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 ***rozszczeplenia***.

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

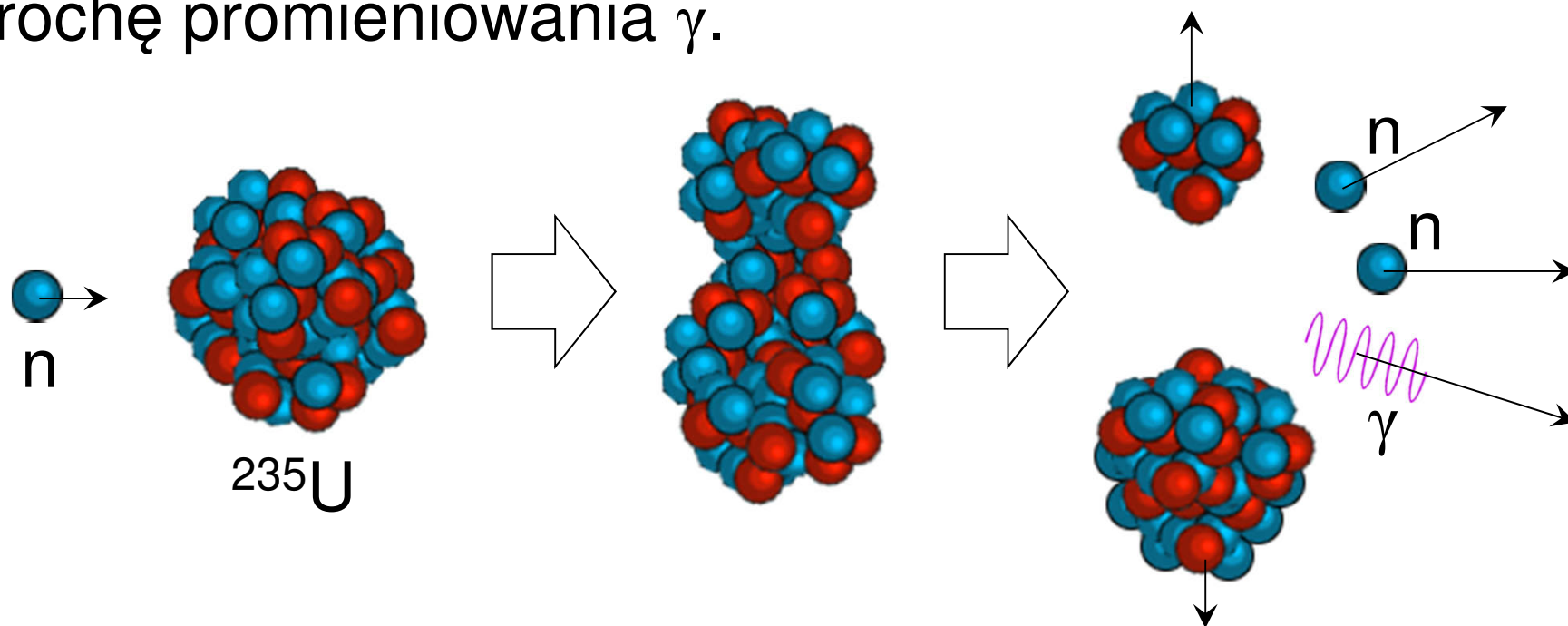
promieniotwórczość ≠ rozszczepialność

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 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, która 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

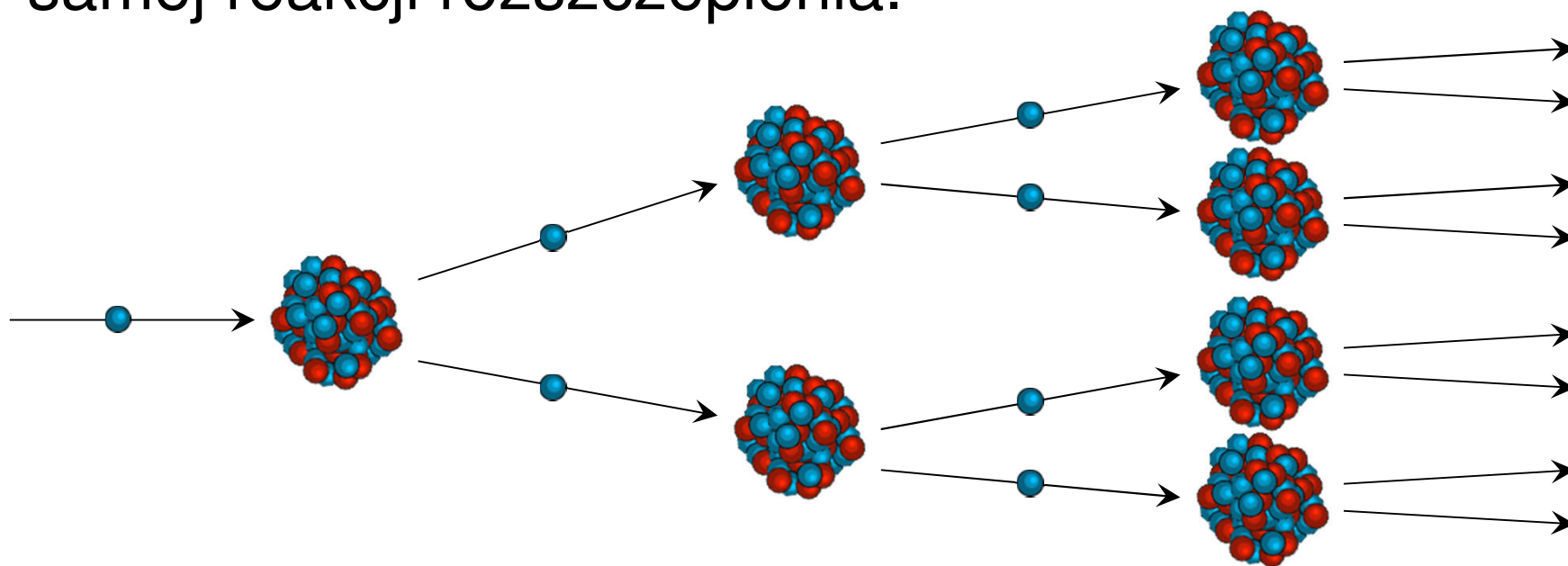
Ponieważ jednak 1 atom ^{235}U ma masę ok. 20 razy większą niż jeden atom węgla, to z 1 kg ^{235}U można teoretycznie uzyskać ok. 2,5 miliona razy więcej energii niż z 1 kg czystego węgla.

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 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.

Reakcja łańcuchowa

Trudność z uzyskaniem reakcji łańcuchowej:

Neutrony, zamiast rozszczepiać uran ^{235}U , mogą być wchłaniane przez inny izotop uranu, ^{238}U .

Rozwiązanie trudności:

Zastosowanie ***uranu wzbogaconego***, w którym jest więcej izotopu ^{235}U niż w uranie naturalnym.

Ponadto ^{238}U wchłania neutrony i po pewnym czasie zamienia się w pluton, ^{239}Pu , który też ulega rozszczepieniu.

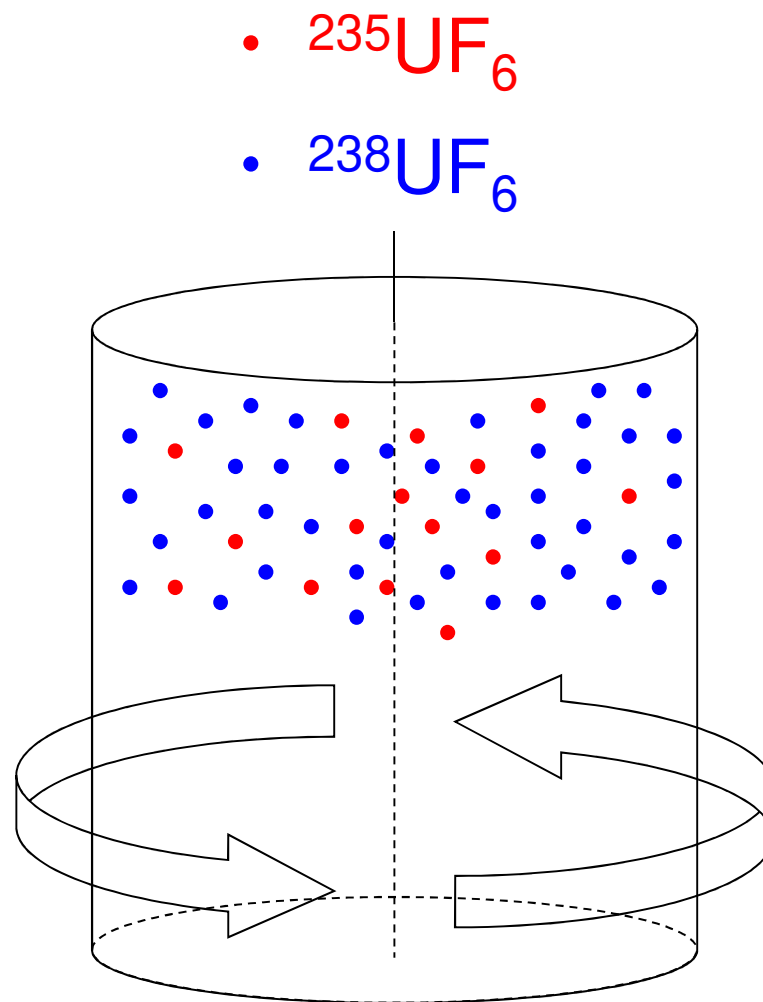
Wzbogacanie uranu

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

Obecnie najczęściej wzbogaca się uran wielostopniową metodą wirówkową z użyciem gazowego sześćfluorku uranu (UF_6). Masa tych cząsteczek zależy tylko od masy izotopu uranu, przez co ten „lżejszy” pozostaje bliżej osi obrotu, a „cięższy” – bliżej ścianek wirówki.



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:

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

Reakcja łańcuchowa

Trudność z uzyskaniem reakcji łańcuchowej:

Neutrony pochodzące z rozszczepienia lecą zbyt szybko, by dobrze powodować rozszczepienie ^{235}U .

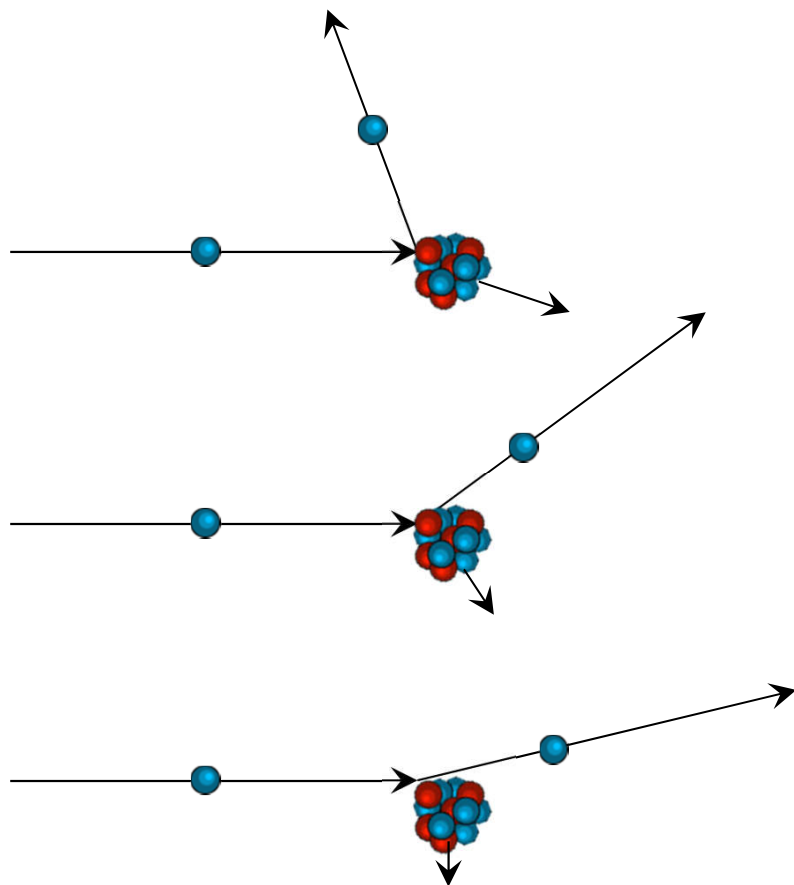
Rozwiązanie trudności:

Zastosowanie ***moderatora***, czyli substancji, która spowalnia neutrony poprzez ich zderzenia z lekkimi jądrami atomowymi.

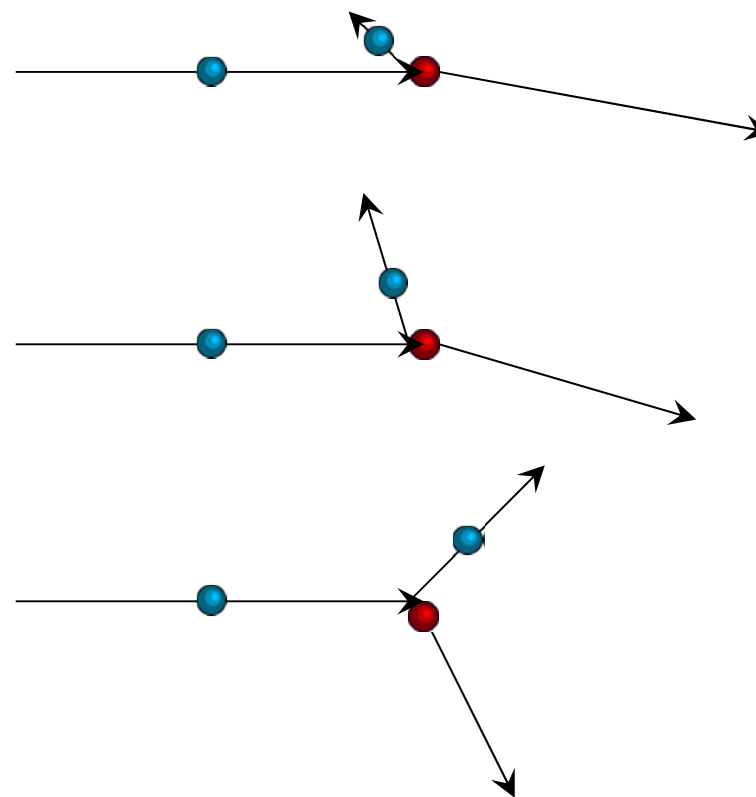
Dobrymi moderatorami są substancje o lekkich atomach, np. woda, beryl, grafit.

Działanie moderatora neutronów

kiepski moderator



dobry moderator



Reakcja łańcuchowa

Trudność z uzyskaniem reakcji łańcuchowej:

Neutrony nie mają ładunku elektrycznego, więc łatwo przenikają przez różne substancje i uciekają poza rdzeń reaktora.

Rozwiązanie trudności:

Zastosowanie ***reflektora neutronów***, który odbija neutrony z powrotem do rdzenia.

W roli reflektora również dobrze sprawdzają się lekkie substancje, np. woda, grafit.

Reakcja łańcuchowa

Trudność z uzyskaniem reakcji łańcuchowej:

Produkty rozszczepienia mogą wylapywać neutrony dużo lepiej niż uran (tzw. ***zatrucie reaktora***).

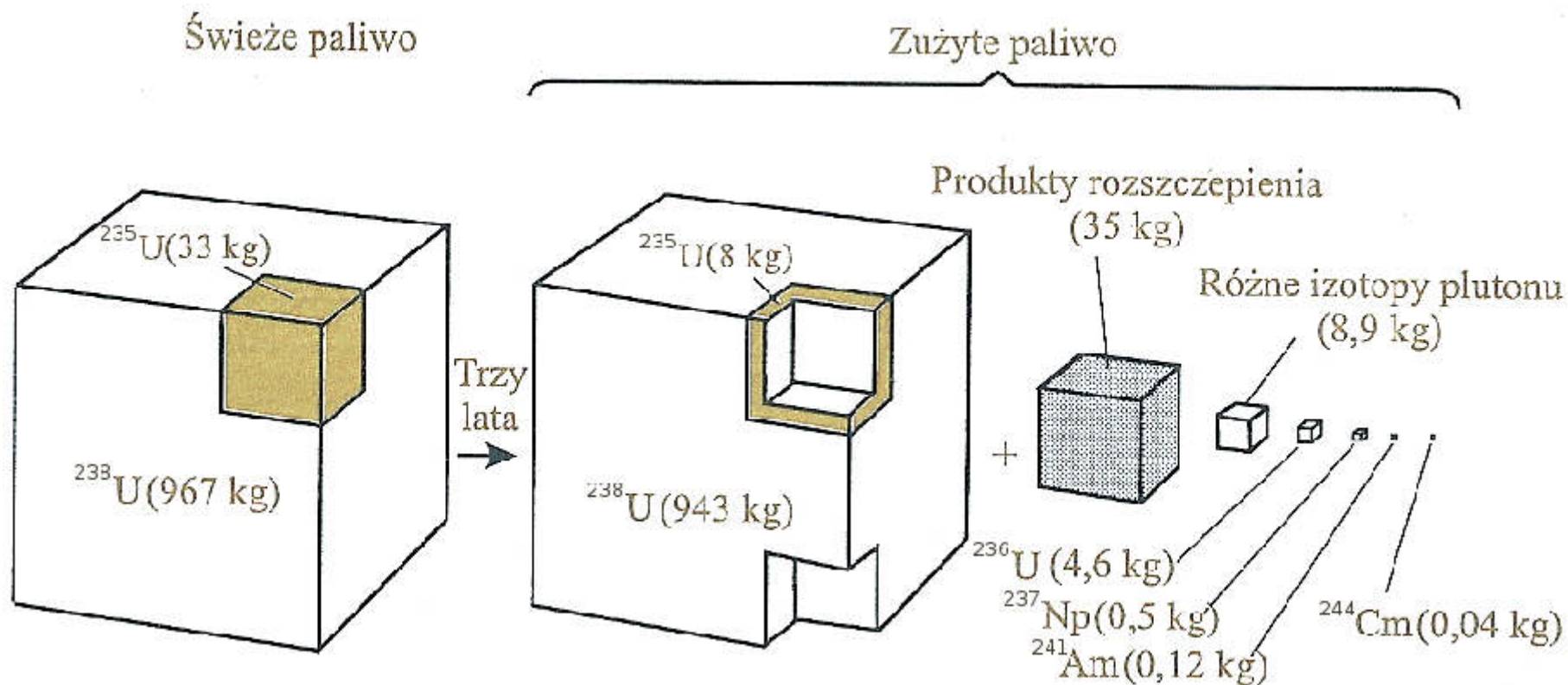
Rozwiązanie trudności:

Usuwanie ***trucizn reaktorowych*** z rdzenia.

Najczęściej trzeba usunąć całe zatrute paliwo i zastąpić je świeżym, ale z zatrutego paliwa można odzyskiwać uran do ponownego użycia.

Wypalenie paliwa uranowego

Uran nigdy nie „wypala się” w stu procentach.



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

Dział Edukacji i Szkoleń, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk, WWW: www.ncbj.gov.pl

Wypalenie paliwa uranowego

Świeże paliwo uranowe jest słabo radioaktywne i 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.

Reakcja łańcuchowa

Trudność z uzyskaniem reakcji łańcuchowej:

Produkty rozszczepienia mogą same wysyłać dodatkowe neutrony po czasie rzędu kilku sekund.

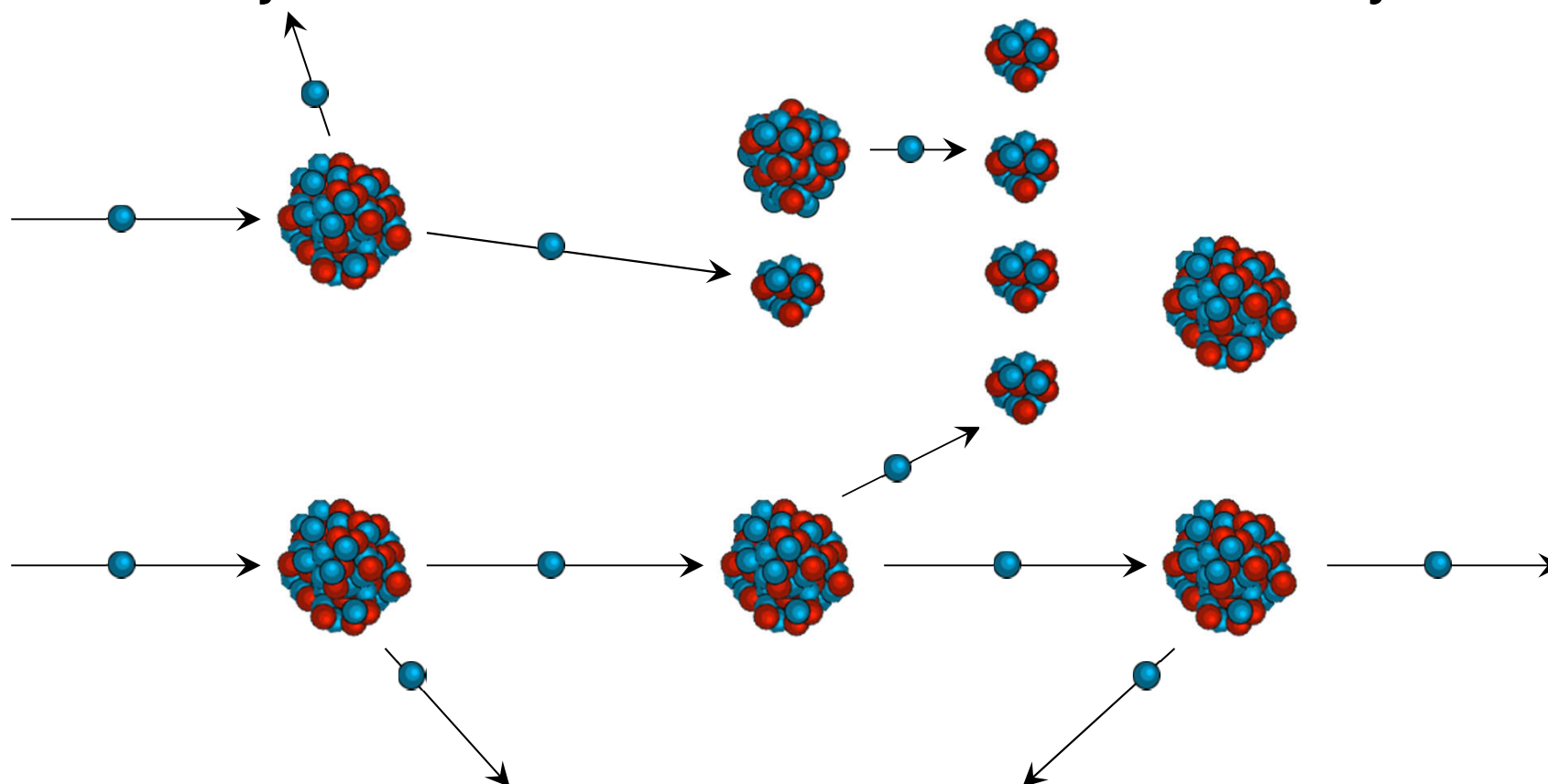
Rozwiązanie trudności:

Zastosowanie tzw. ***neutronów opóźnionych*** do praktycznego sterowania reakcją łańcuchową.

Czas generacji ***neutronów natychmiastowych*** jest zbyt krótki, by przy ich pomocy kontrolować pracę reaktora.

Stan podkrytyczny

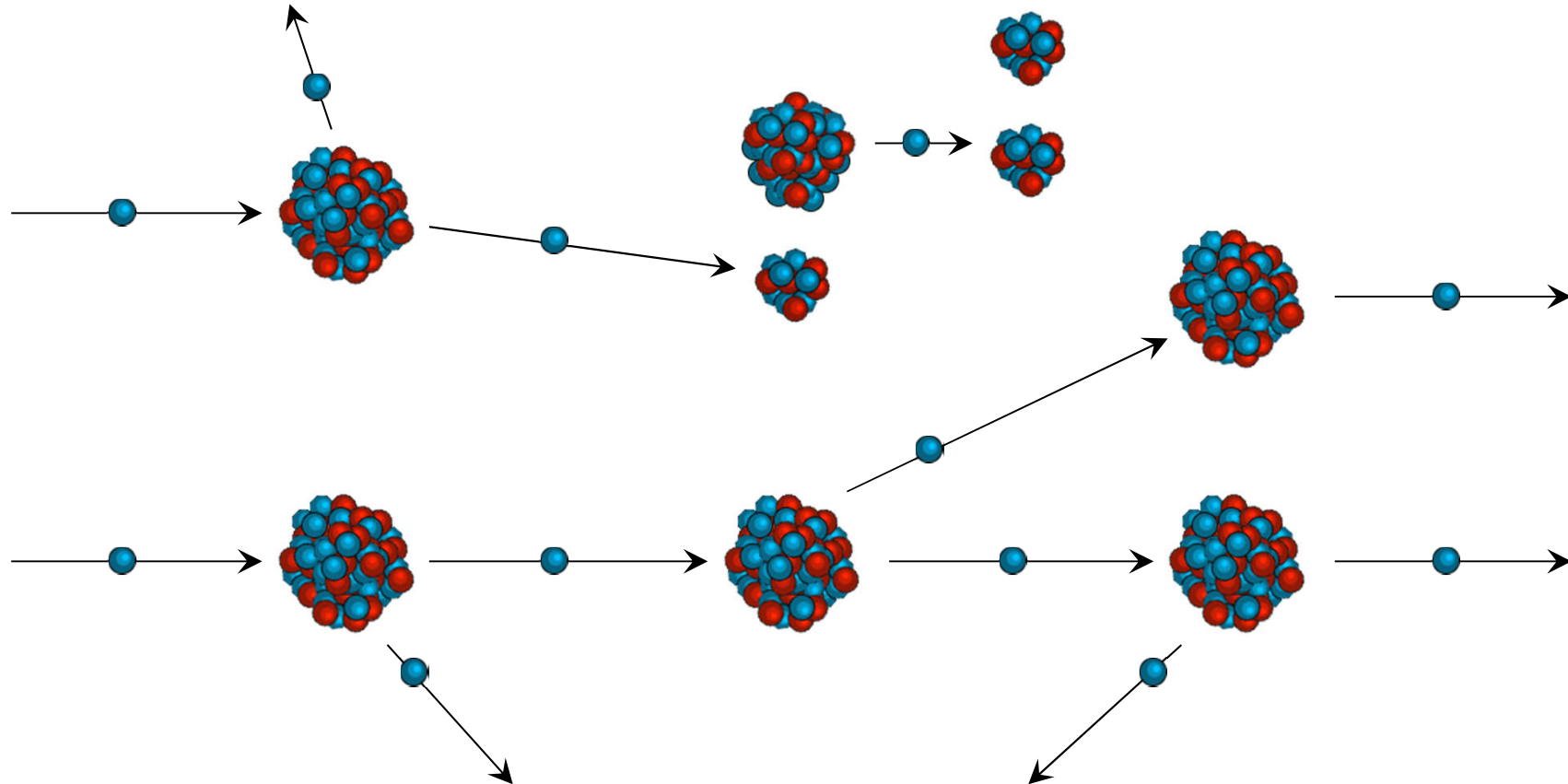
Reakcja łańcuchowa zanika, neutronów ubywa.



współczynnik mnożenia neutronów $k < 1$

Stan krytyczny

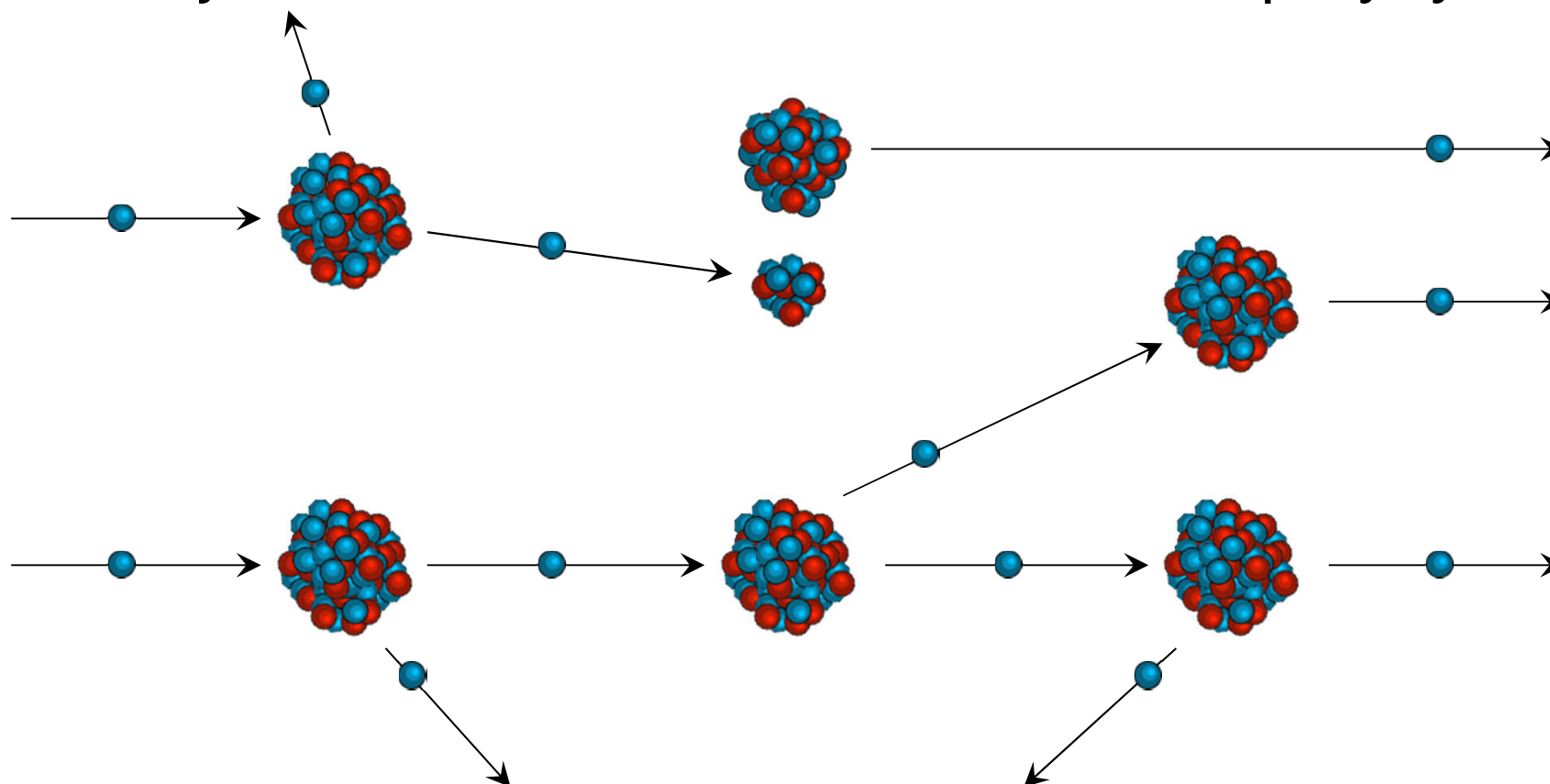
Reakcja łańcuchowa podtrzymuje się sama.



współczynnik mnożenia neutronów **$k = 1$**

Stan nadkrytyczny

Reakcja łańcuchowa narasta, neutronów przybywa.



współczynnik mnożenia neutronów $k > 1$

Sterowanie reaktorem jądrowym

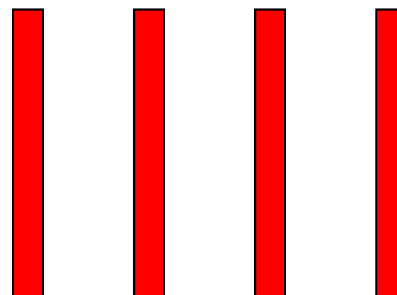
Zwykle do blokowania przepływu neutronów służą **pręty** zawierające substancje silnie **pochłaniające neutrony**, czyli związki chemiczne pierwiastków takich jak bor lub kadm.

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).

Budowa reaktora jądrowego

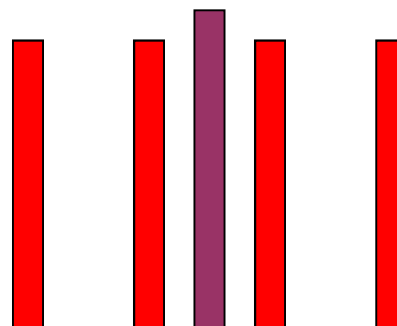
elementy paliwowe



Budowa reaktora jądrowego

elementy paliwowe

pręty bezpieczeństwa

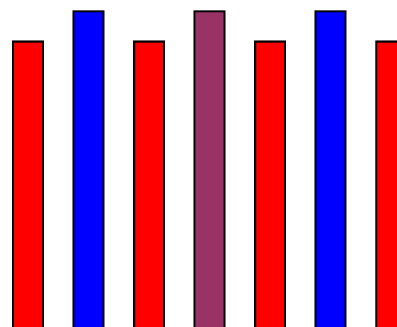


Budowa reaktora jądrowego

elementy paliwowe

pręty bezpieczeństwa

pręty sterujące



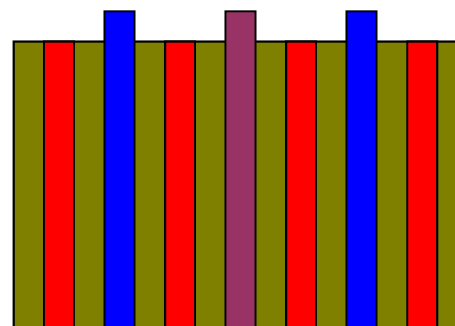
Budowa reaktora jądrowego

elementy paliwowe

pręty bezpieczeństwa

pręty sterujące

moderator neutronów



Budowa reaktora jądrowego

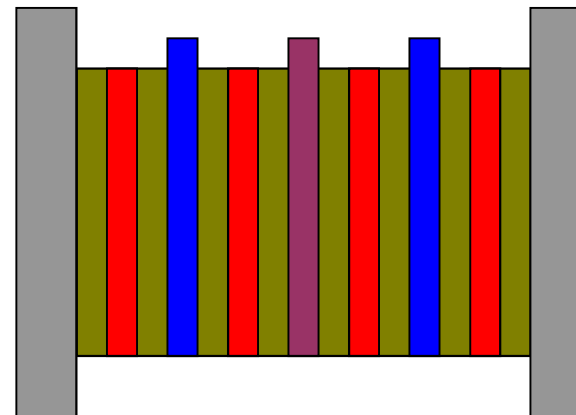
elementy paliwowe

pręty bezpieczeństwa

pręty sterujące

moderator neutronów

reflektor neutronów



Budowa reaktora jądrowego

elementy paliwowe

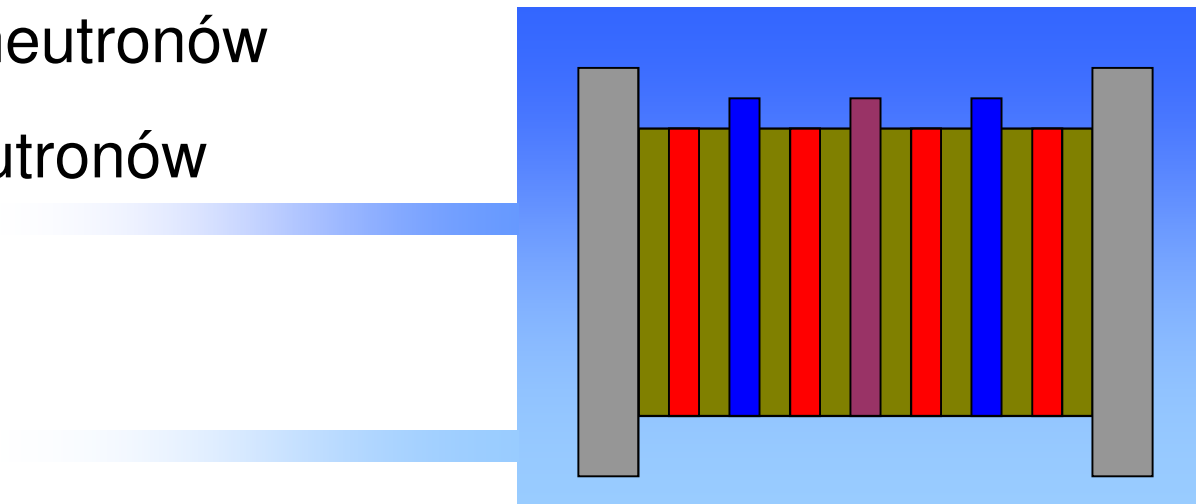
pręty bezpieczeństwa

pręty sterujące

moderator neutronów

reflektor neutronów

chłodzenie



Budowa reaktora jądrowego

elementy paliwowe

pręty bezpieczeństwa

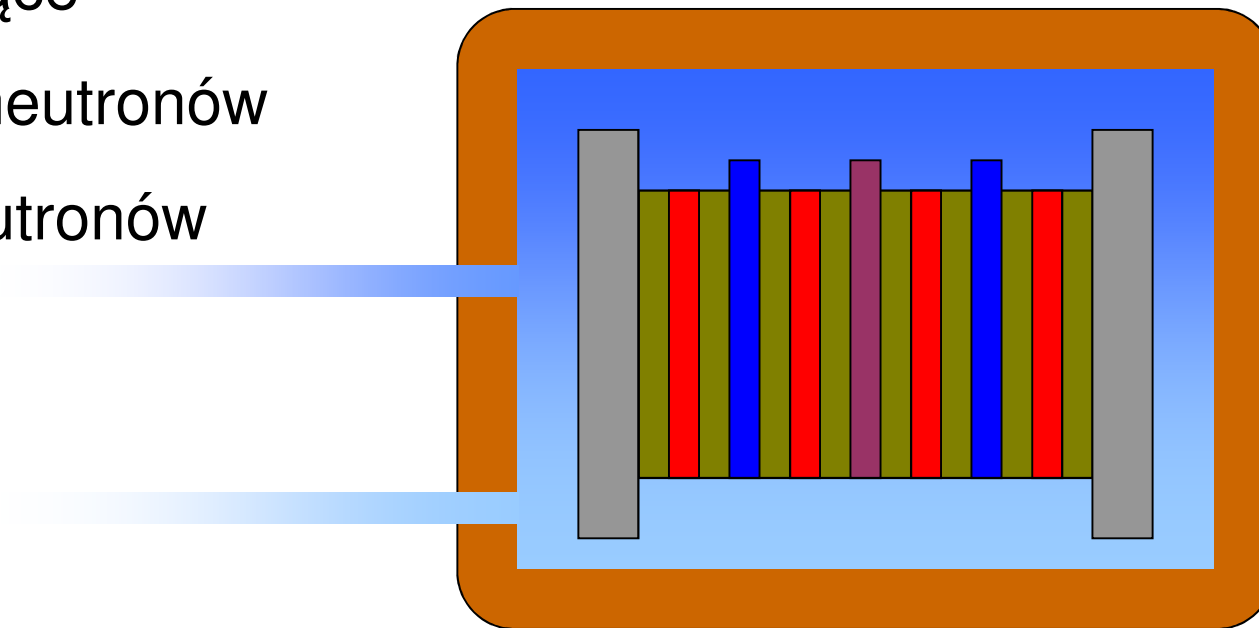
pręty sterujące

moderator neutronów

reflektor neutronów

chłodzenie

obudowa



Budowa reaktora jądrowego

elementy paliwowe

pręty bezpieczeństwa

pręty sterujące

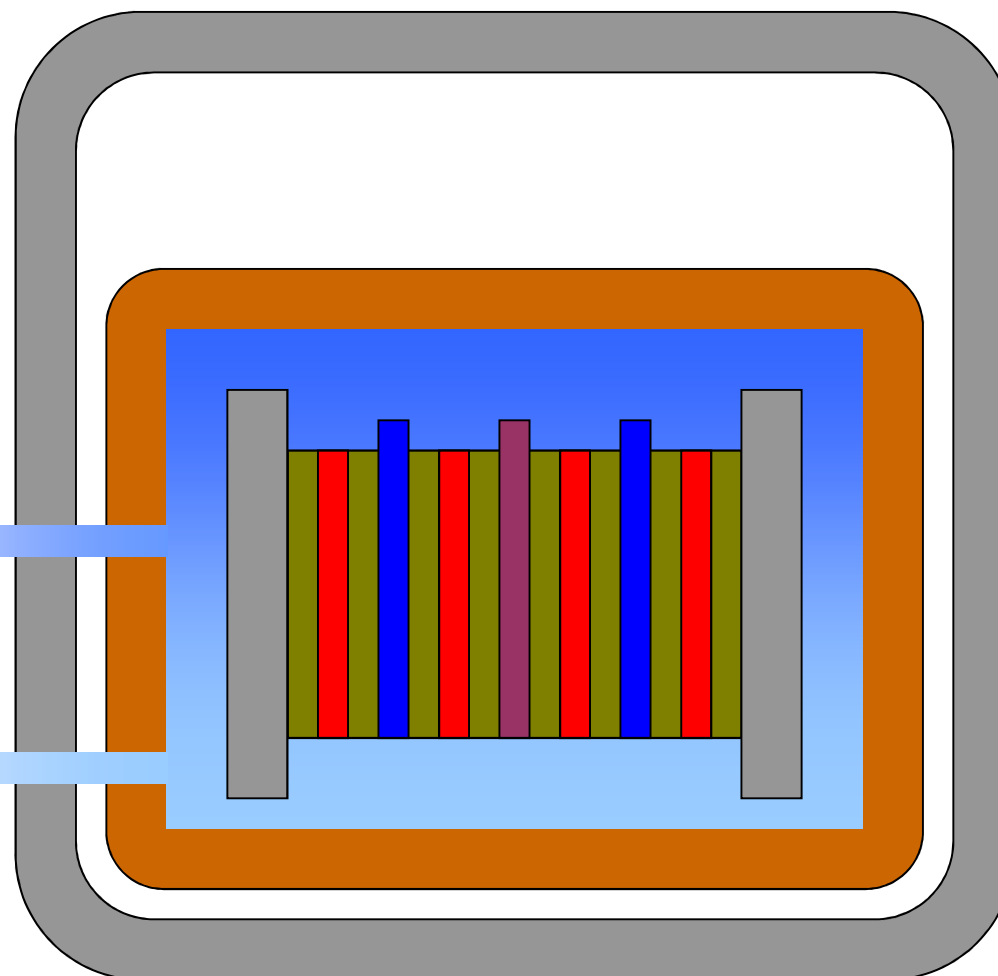
moderator neutronów

reflektor neutronów

chłodzenie

obudowa

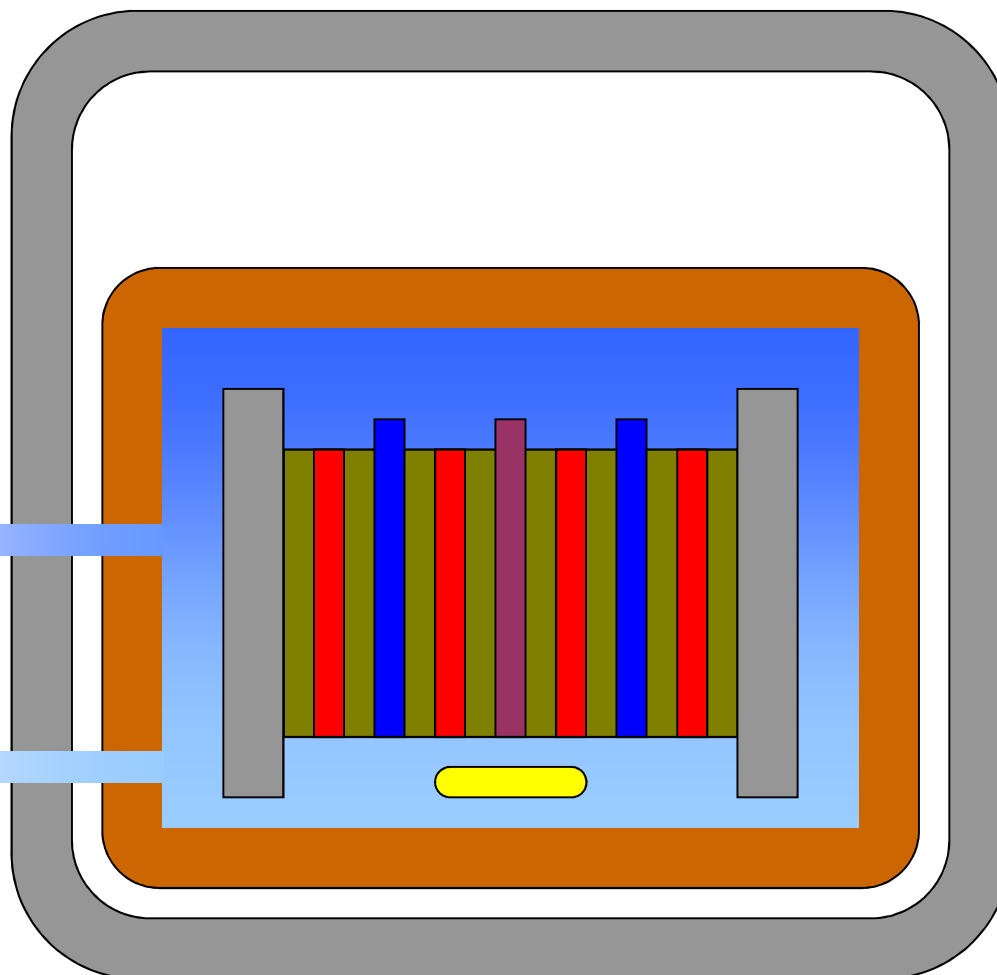
osłona biologiczna



Działanie reaktora jądrowego

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

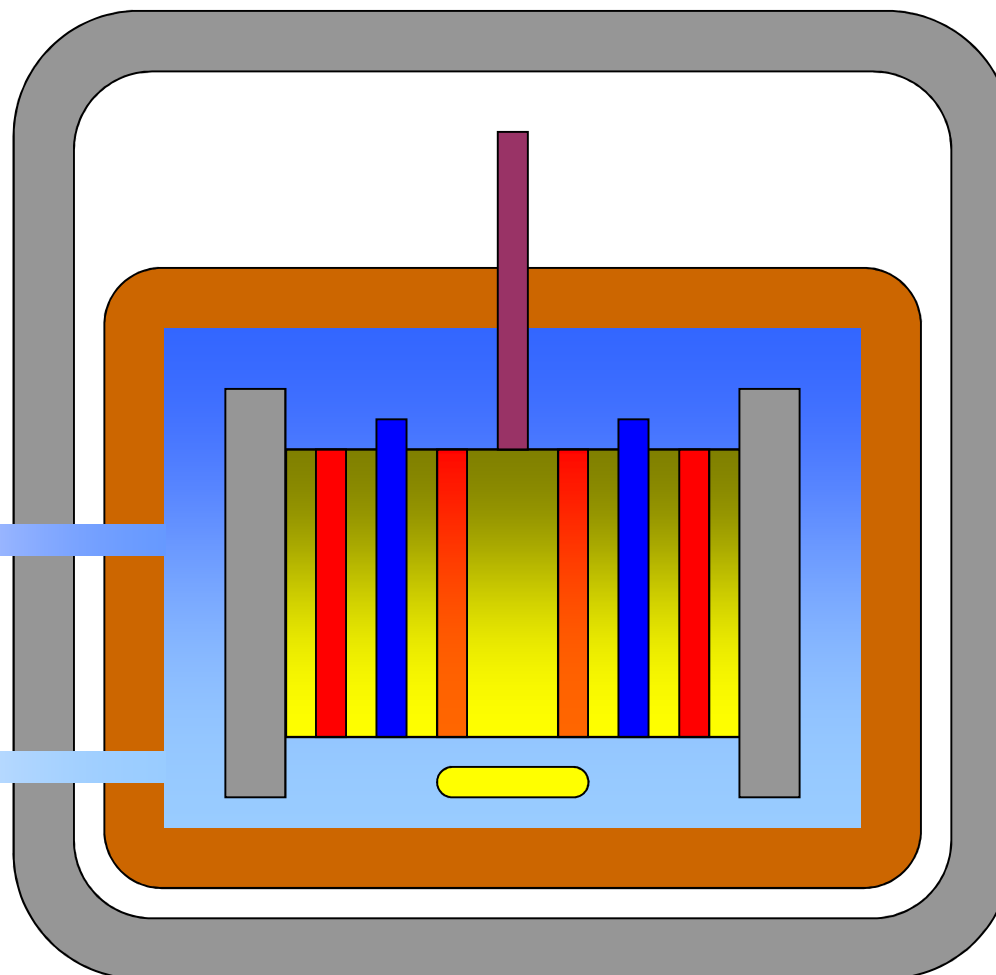
Są różne typy źródeł neutronów.



Działanie reaktora jądrowego

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

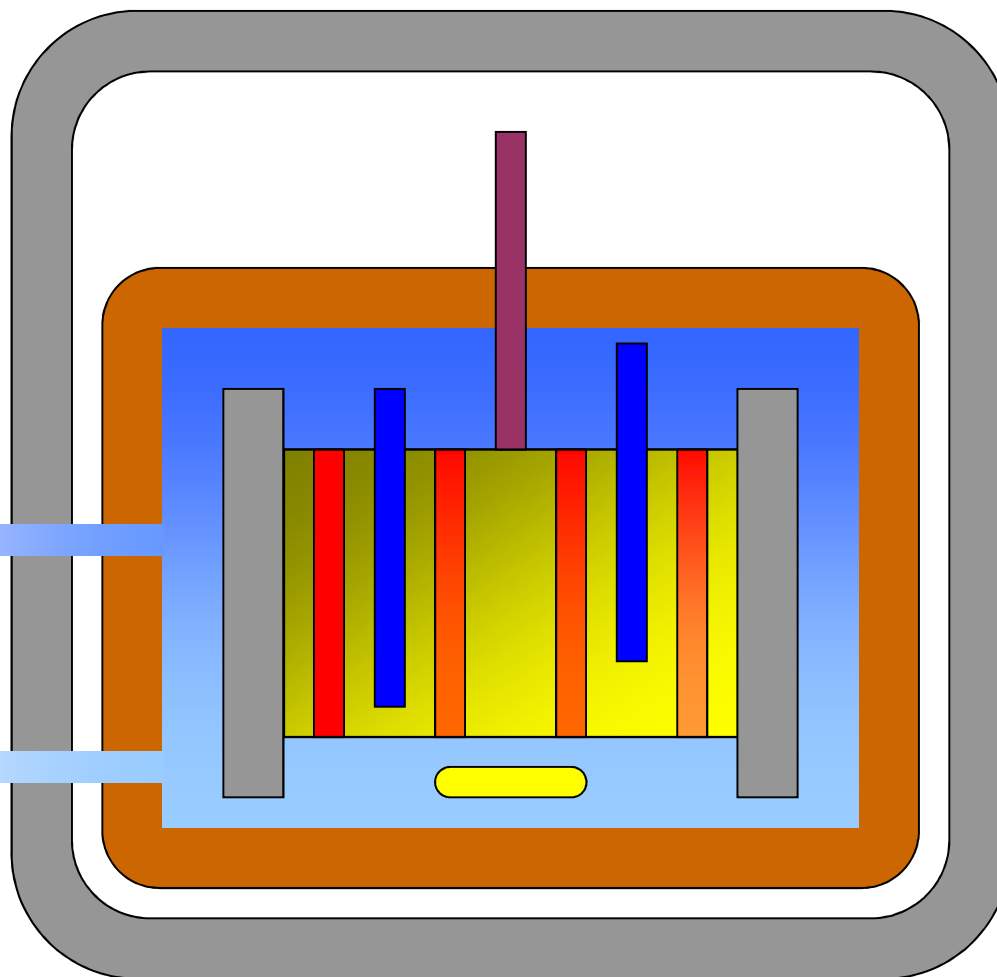
Jako pierwsze
podnoszone są pręty
bezpieczeństwa.



Działanie reaktora jądrowego

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

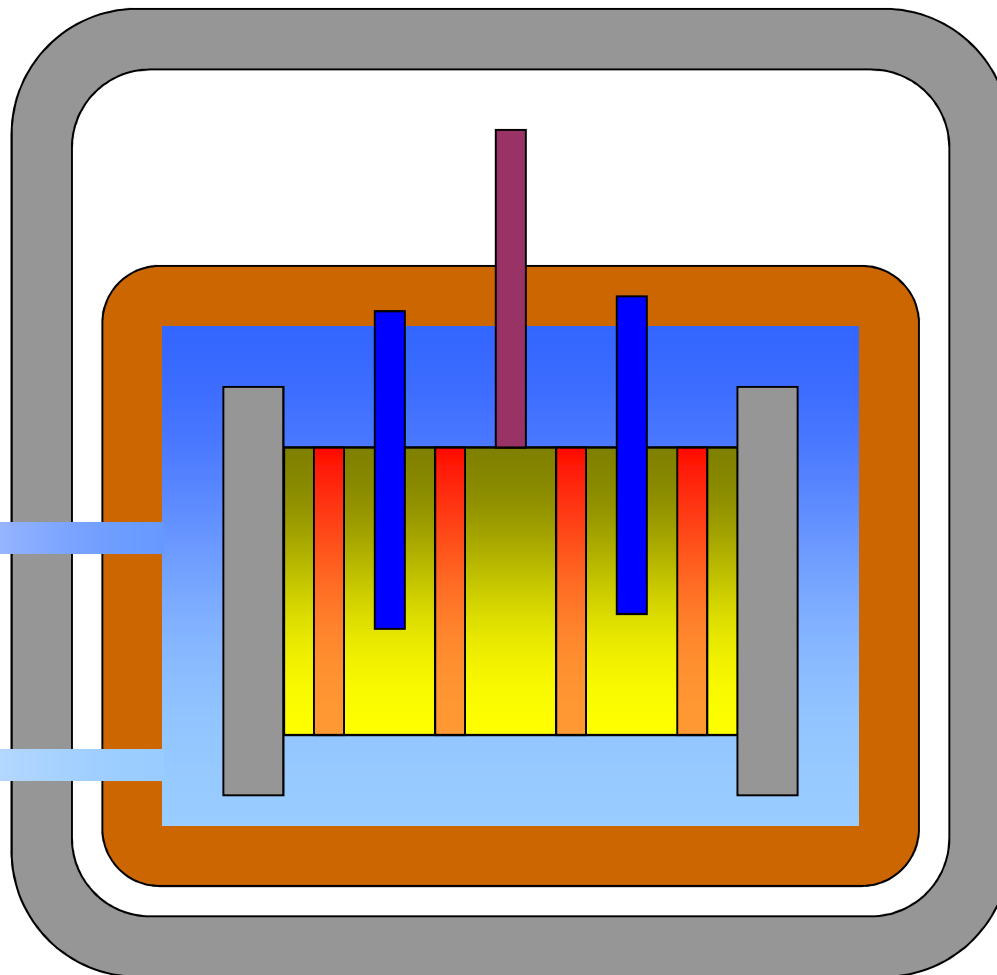
Reakcja łańcuchowa narasta, ale nadal jest podkrytyczna.



Działanie reaktora jądrowego

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

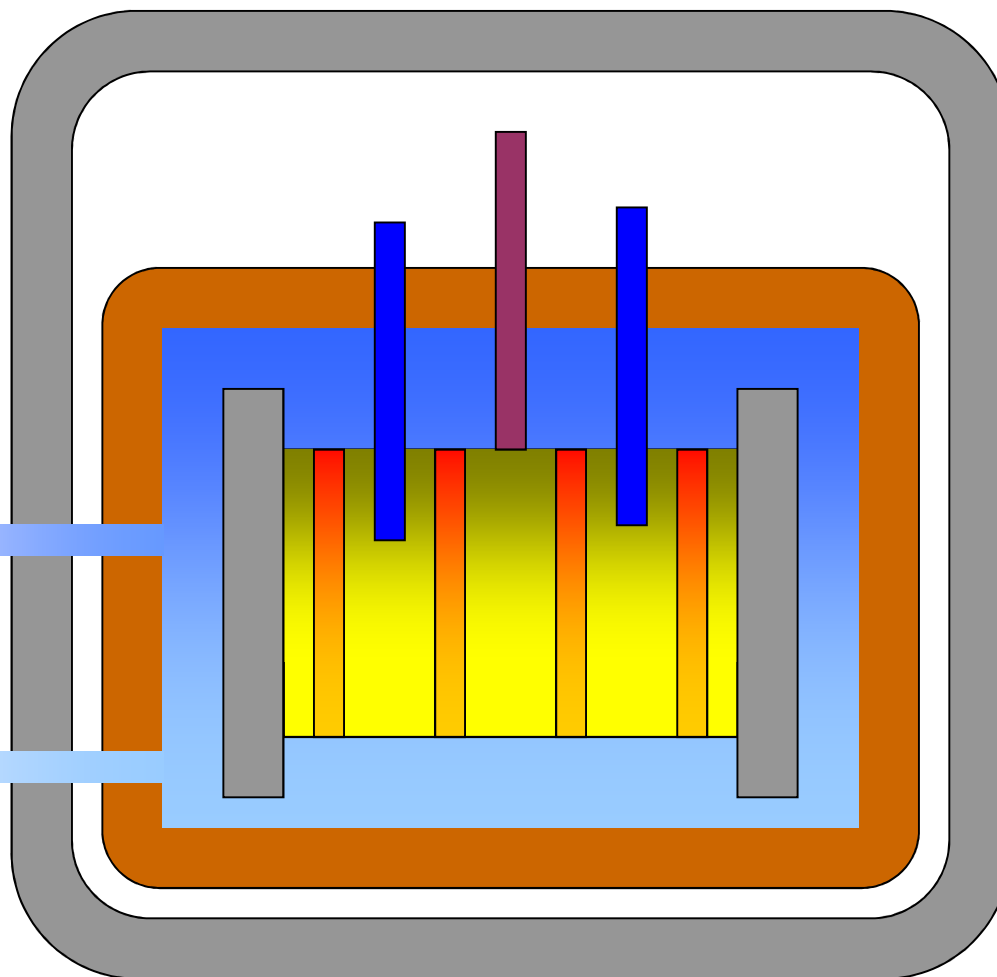
Liczba neutronów maleje, ale bardzo powoli – reakcja jest podkrytyczna.



Działanie reaktora jądrowego

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

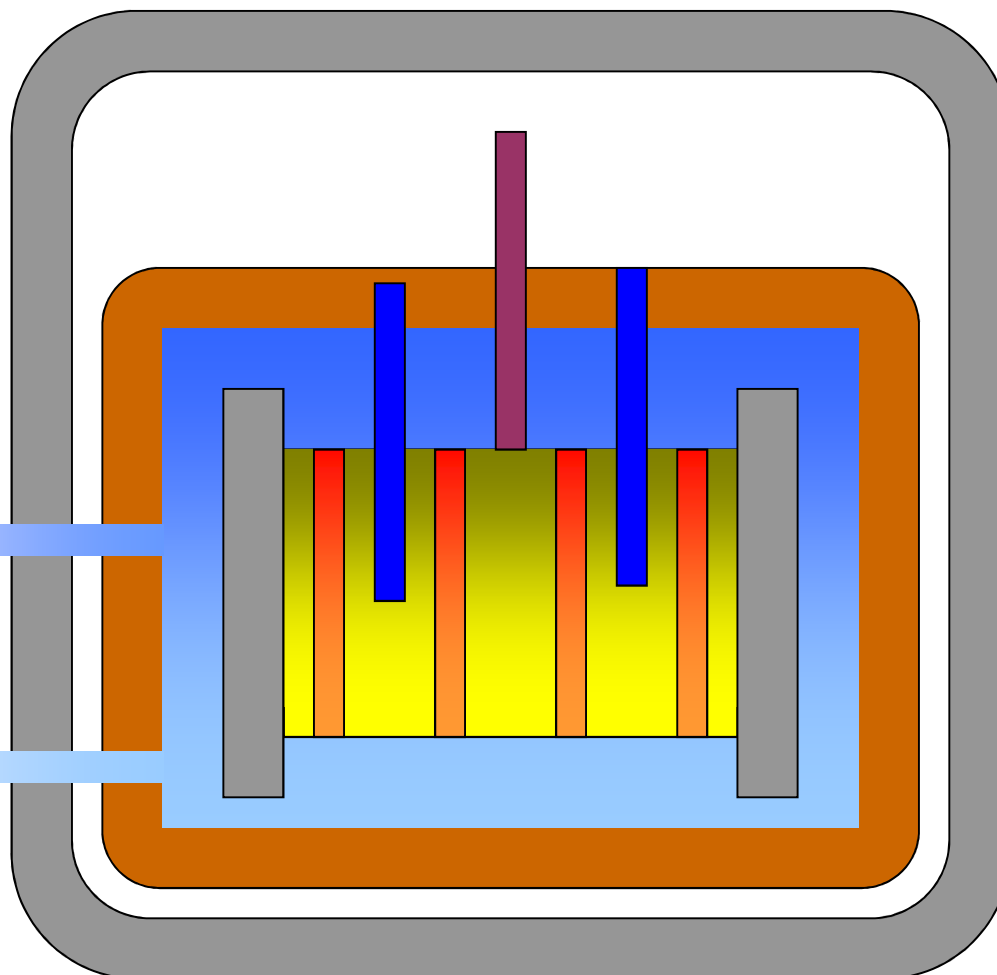
Nadkrytyczność zapewnia ustawienie prętów sterujących.



Działanie reaktora jądrowego

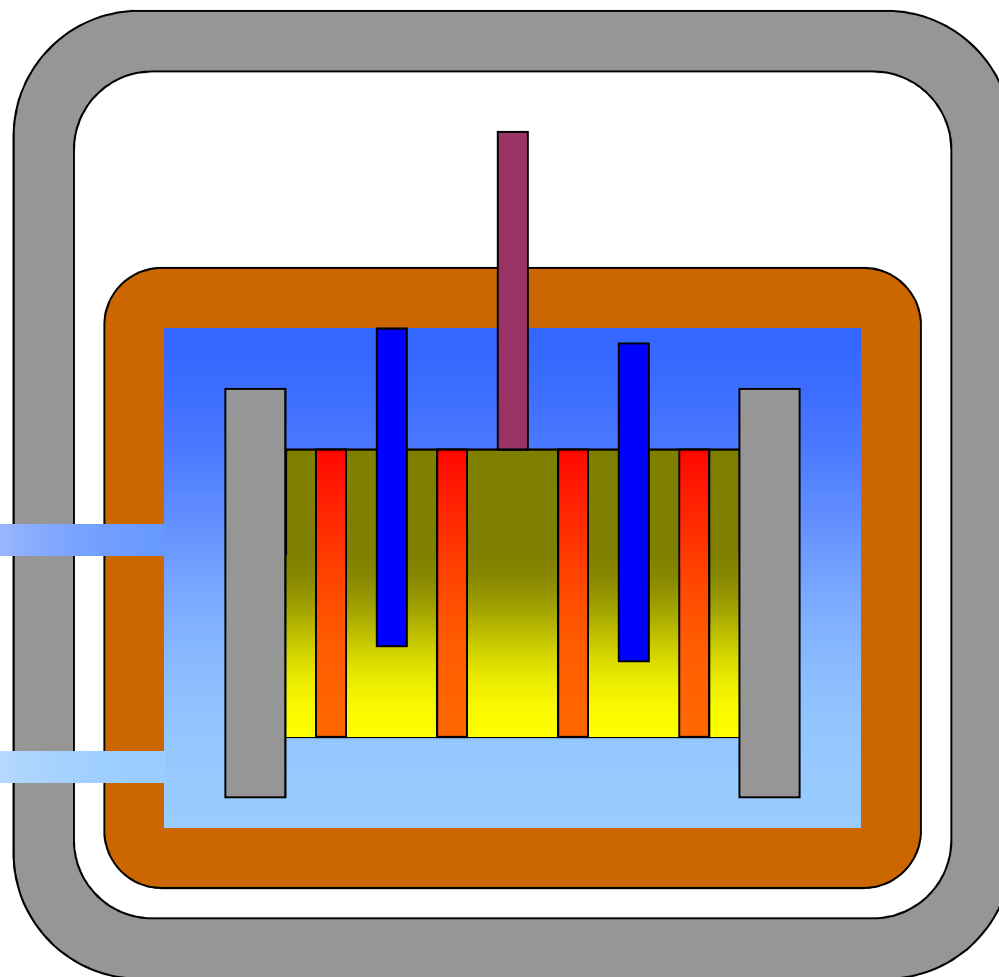
Gdy został osiągnięty odpowiedni poziom mocy, należy pręty sterujące ustawić tak, by reakcja pozostawała na poziomie krytycznym.

Liczba neutronów i moc pozostają stałe.



Działanie reaktora jądrowego

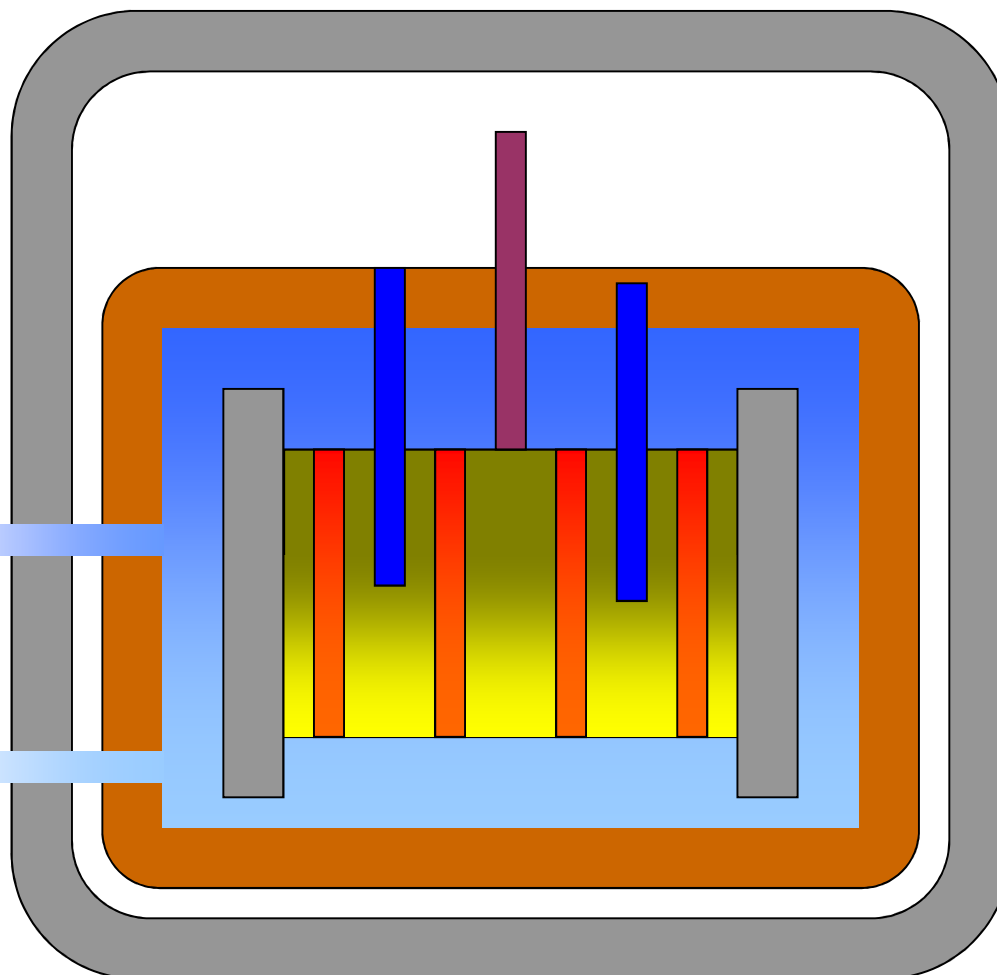
Aby obniżyć moc, należy opuścić pręty sterujące głębiej do reaktora tak, by pochłaniały więcej neutronów i reakcja była podkrytyczna.



Działanie reaktora jądrowego

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

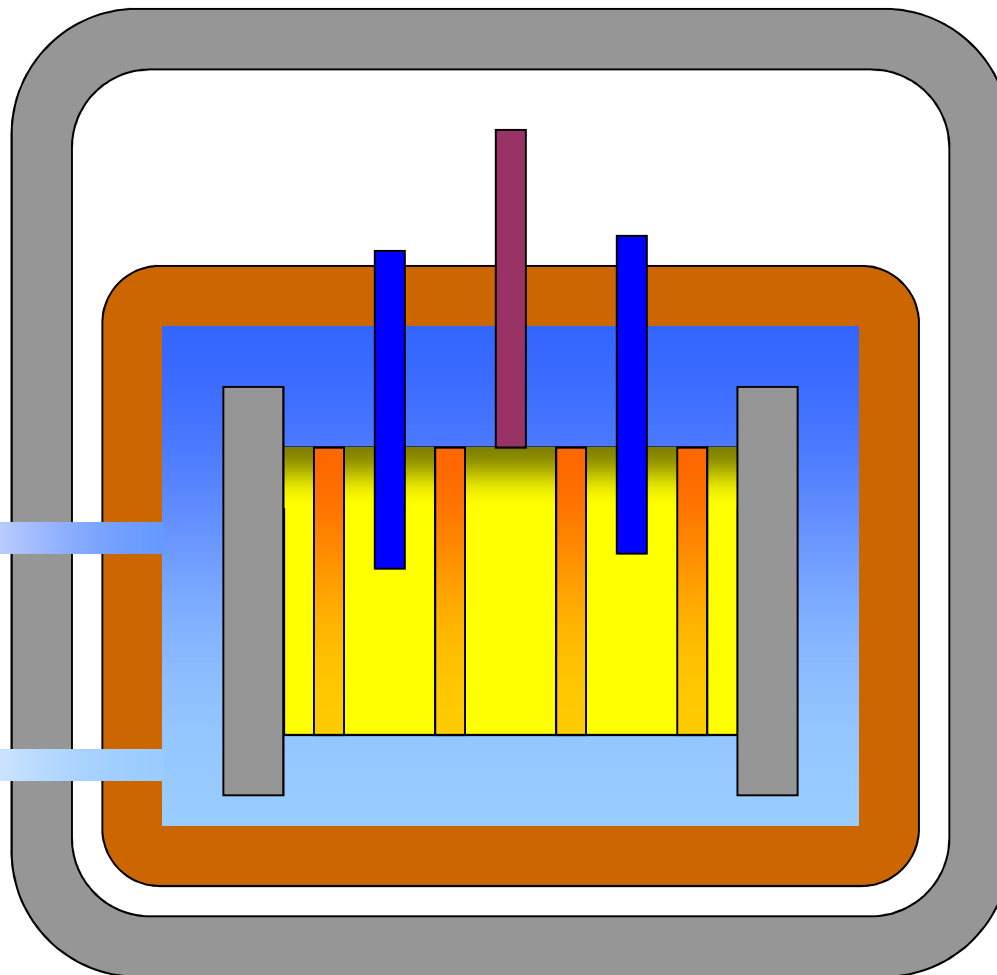
W ten sposób można regulować moc reaktora w dość dużym zakresie, choć najbardziej opłaca się pracować na stałym poziomie mocy.



Działanie reaktora jądrowego

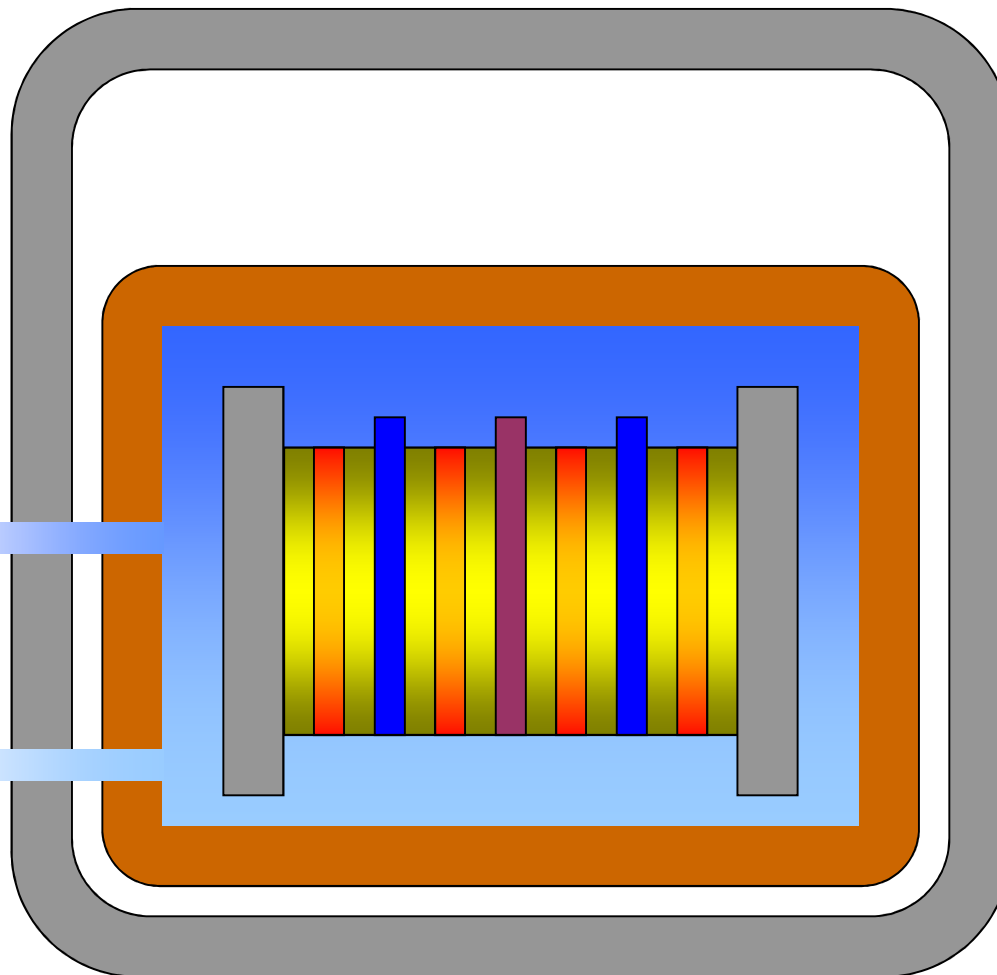
Jeśli pozostawi się reaktor w stanie nawet lekko nadkrytycznym, liczba neutronów i moc mogą wzrosnąć do niebezpiecznie dużej wartości.

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



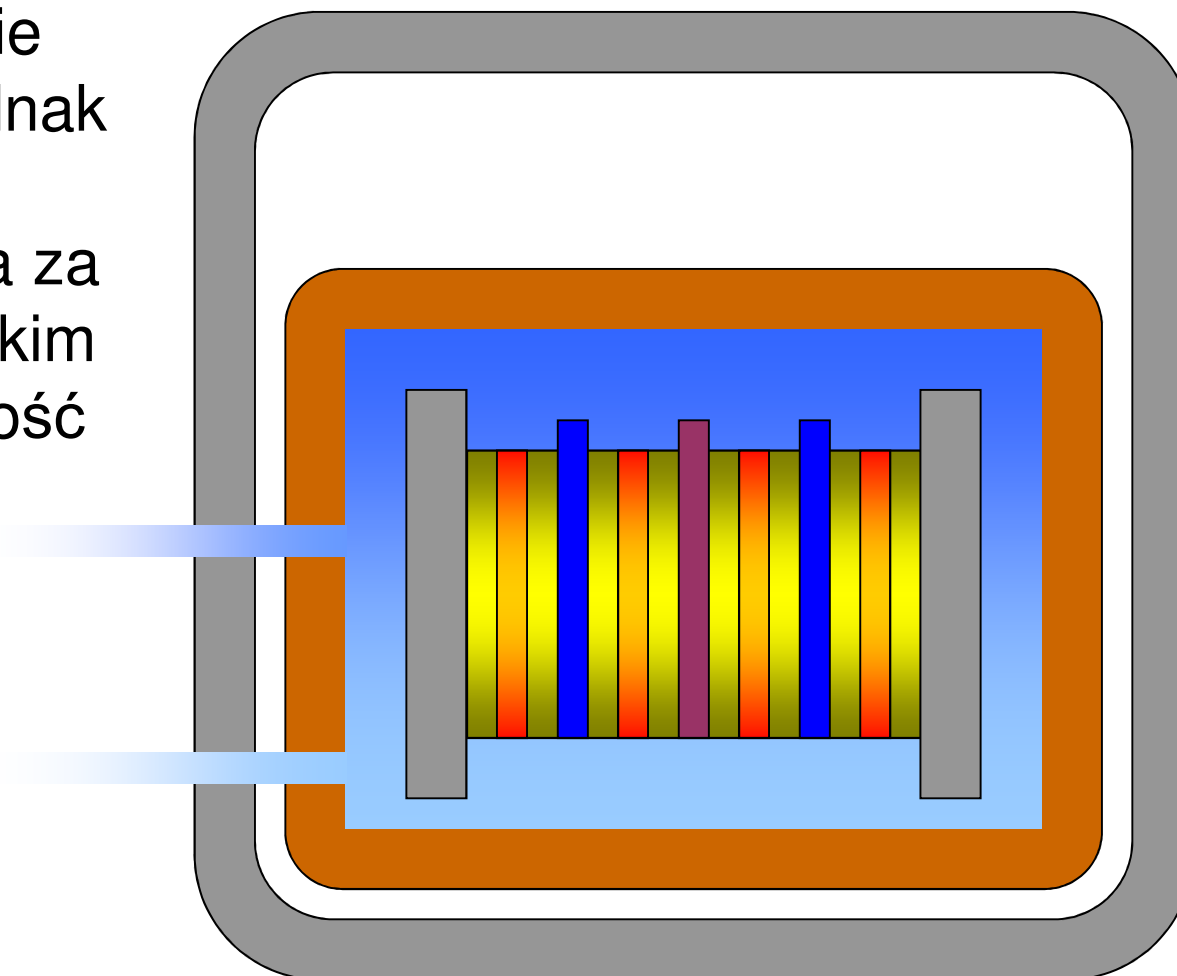
Działanie reaktora jądrowego

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**

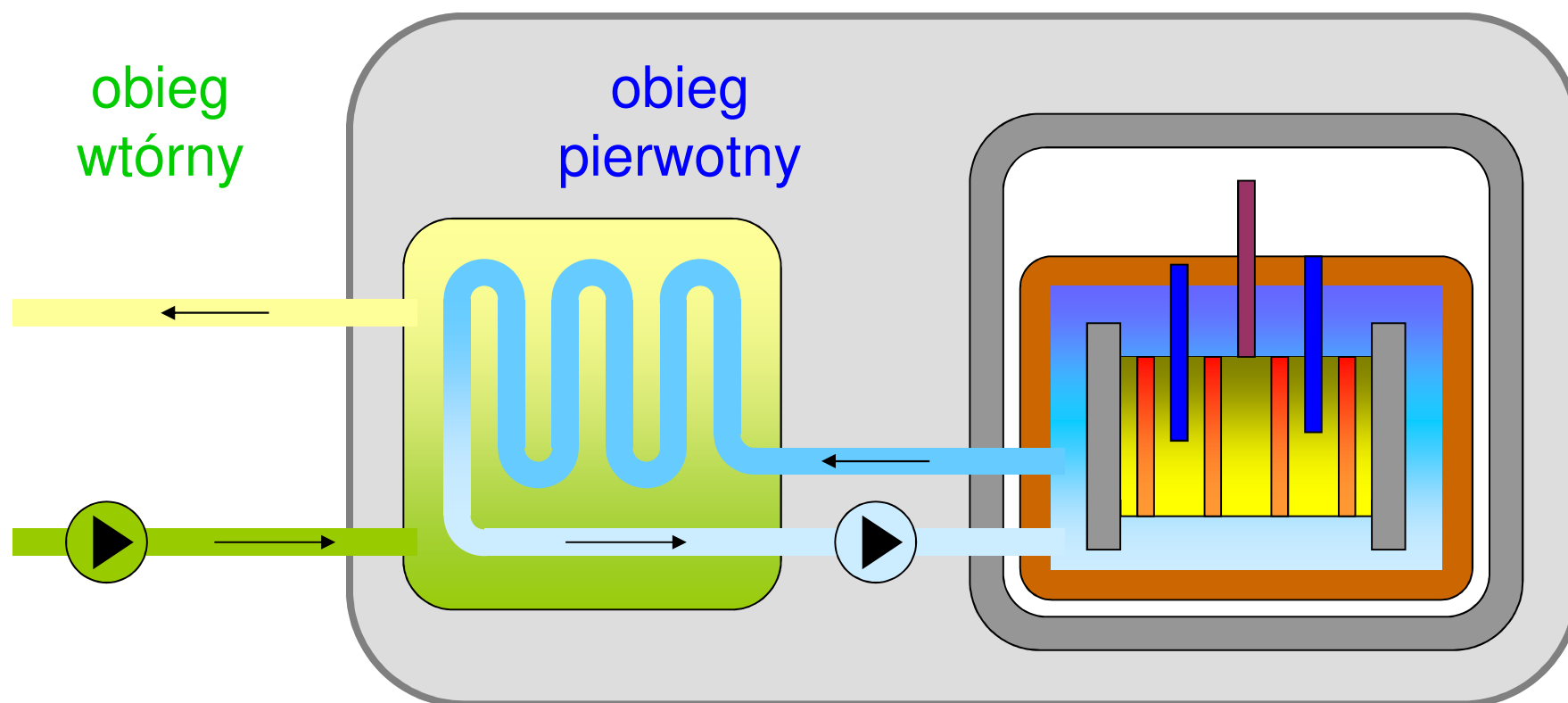
reaktor potrzebuje ***wody demineralizowanej***

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

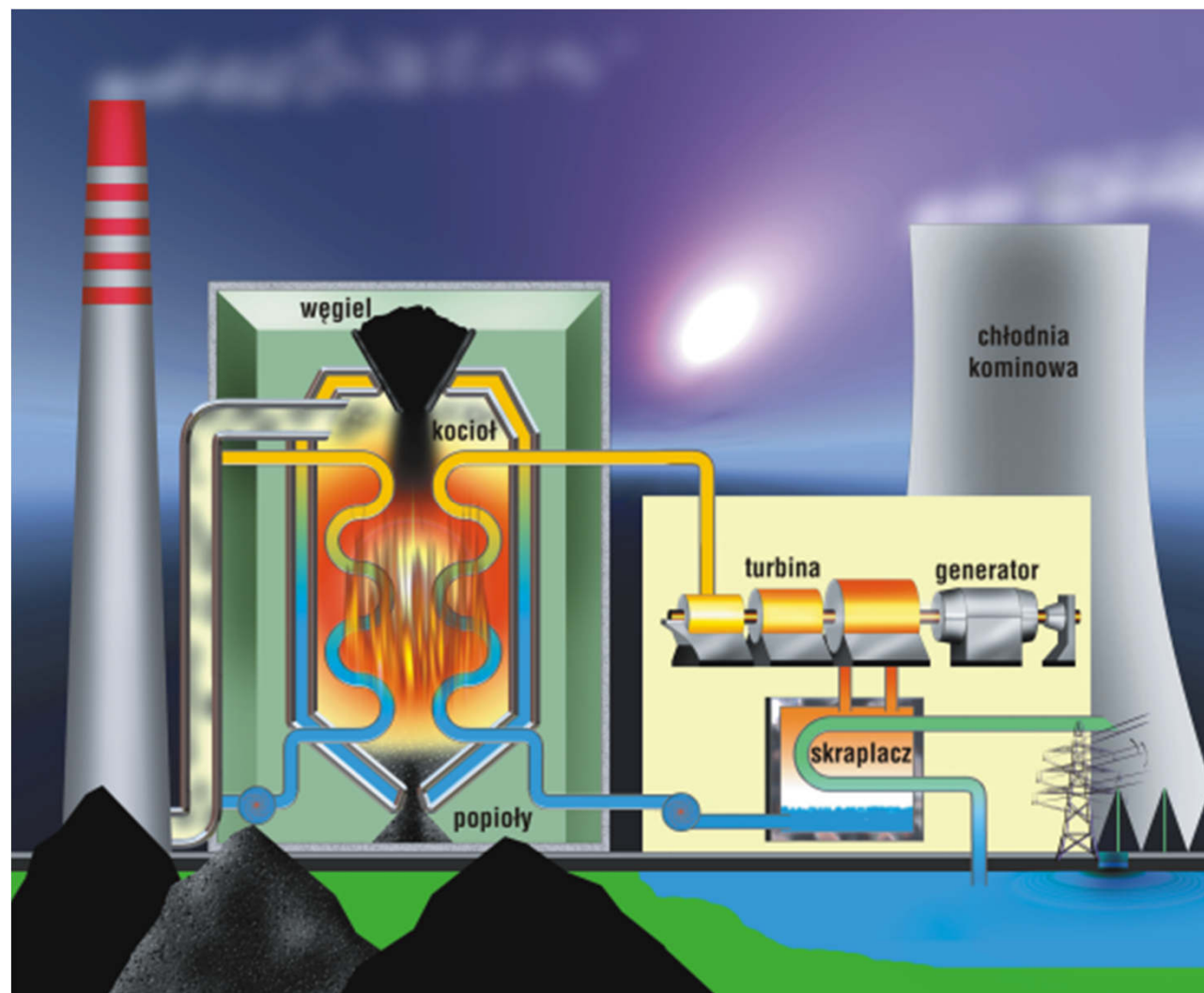
Chłodzenie reaktora składa się zwykle z dwóch obiegów, których chłodziwo nie miesza się, by zredukować ryzyko wydostania się radioaktywnych izotopów do środowiska.



Działanie elektrowni

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

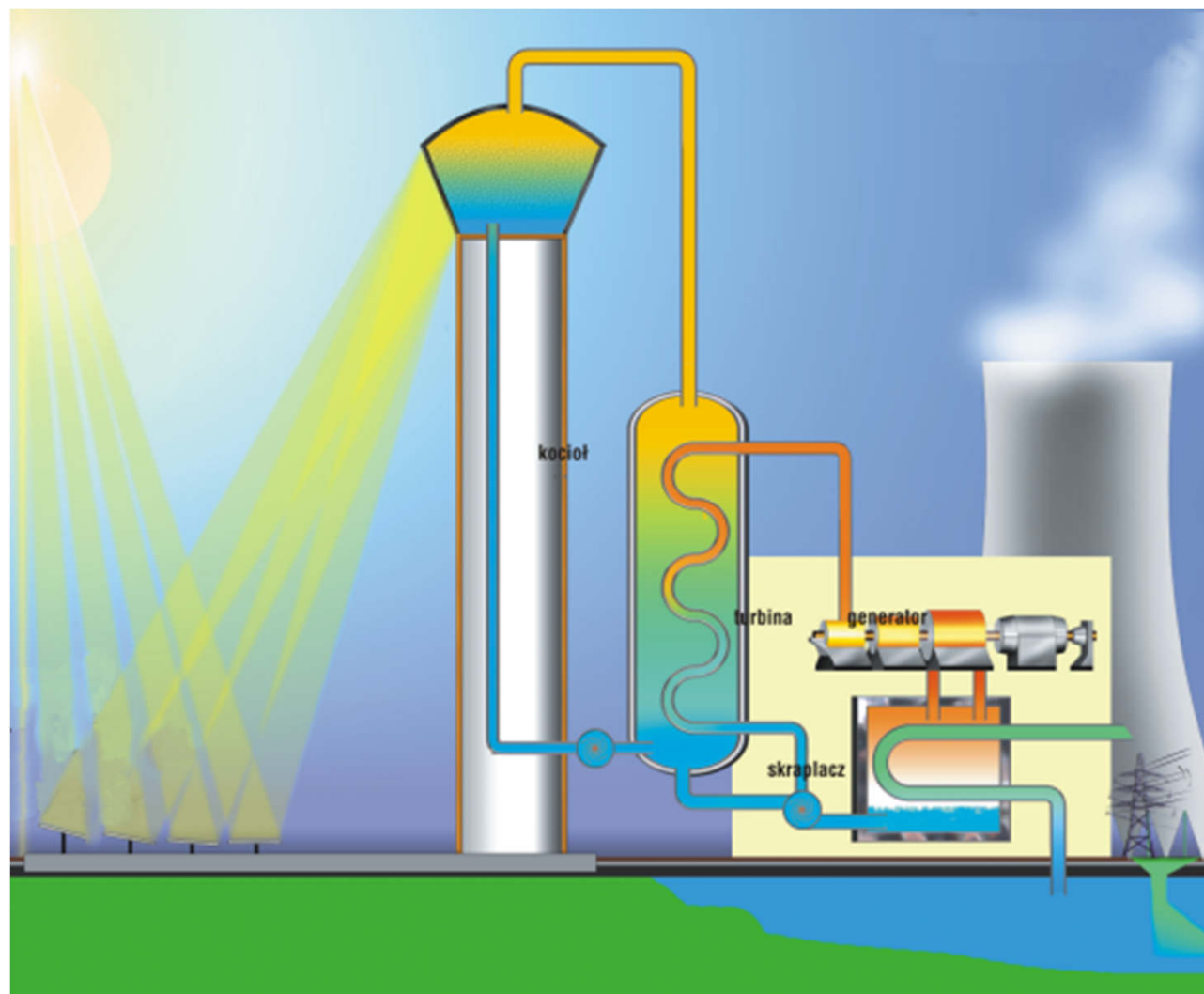
To może być np. kocioł węglowy.



Działanie elektrowni

„Kociołek”
może być
również
ogrzewany
światłem
słonecznym.

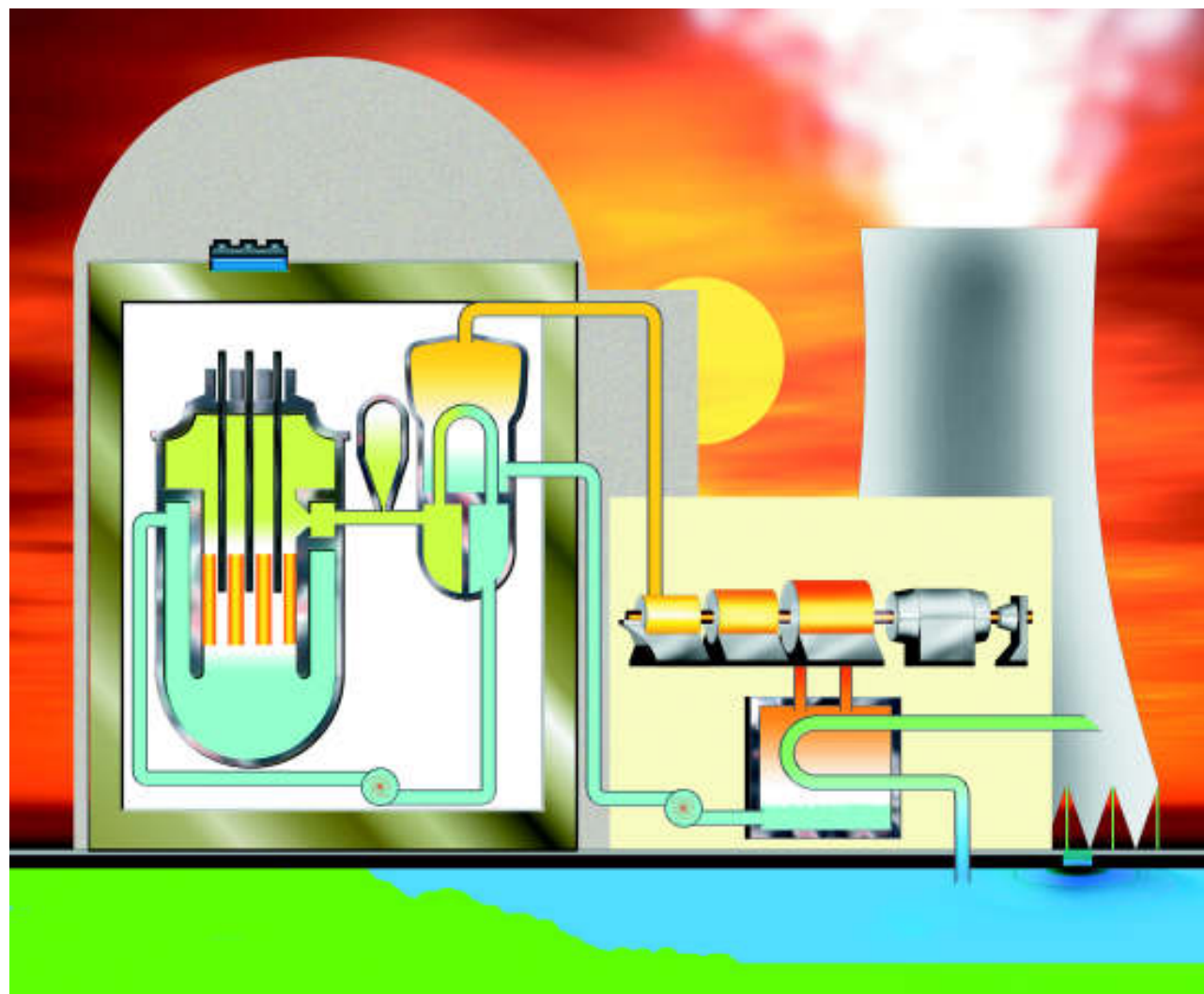
Innym
sposobem jest
pompowanie
wody głęboko
pod ziemię,
gdzie ogrzewa
ją ciepło Ziemi.



Działanie elektrowni

„Kociołkiem”
może być też
reaktor
nuklearny.

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



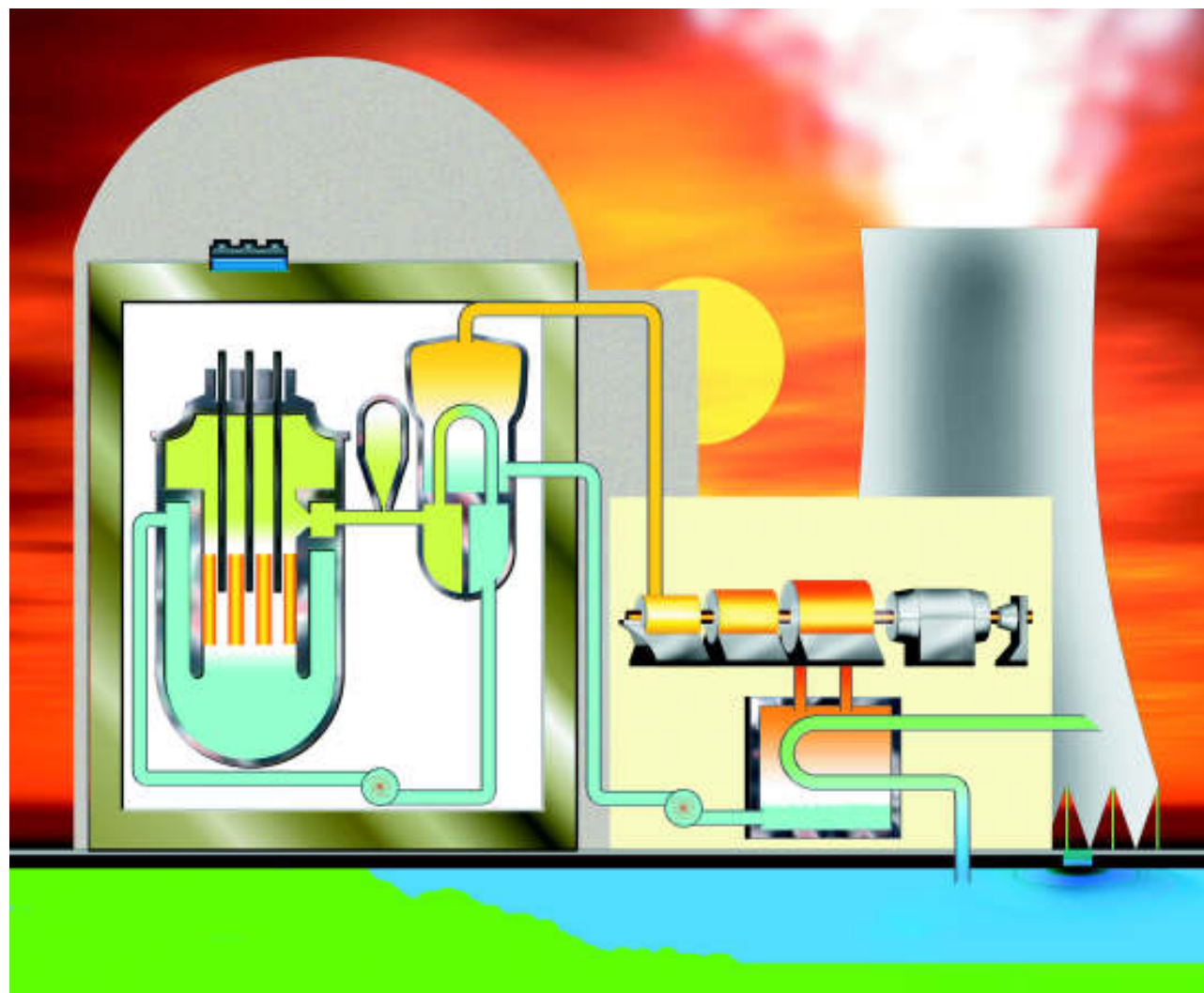
Jak działa elektrownia nuklearna

Pressurized
Water
Reactor

Wodo-
Wodianoj
Energietyczeskij
Reaktor

reaktor wodny

moderator: H_2O
chłodziwo: H_2O

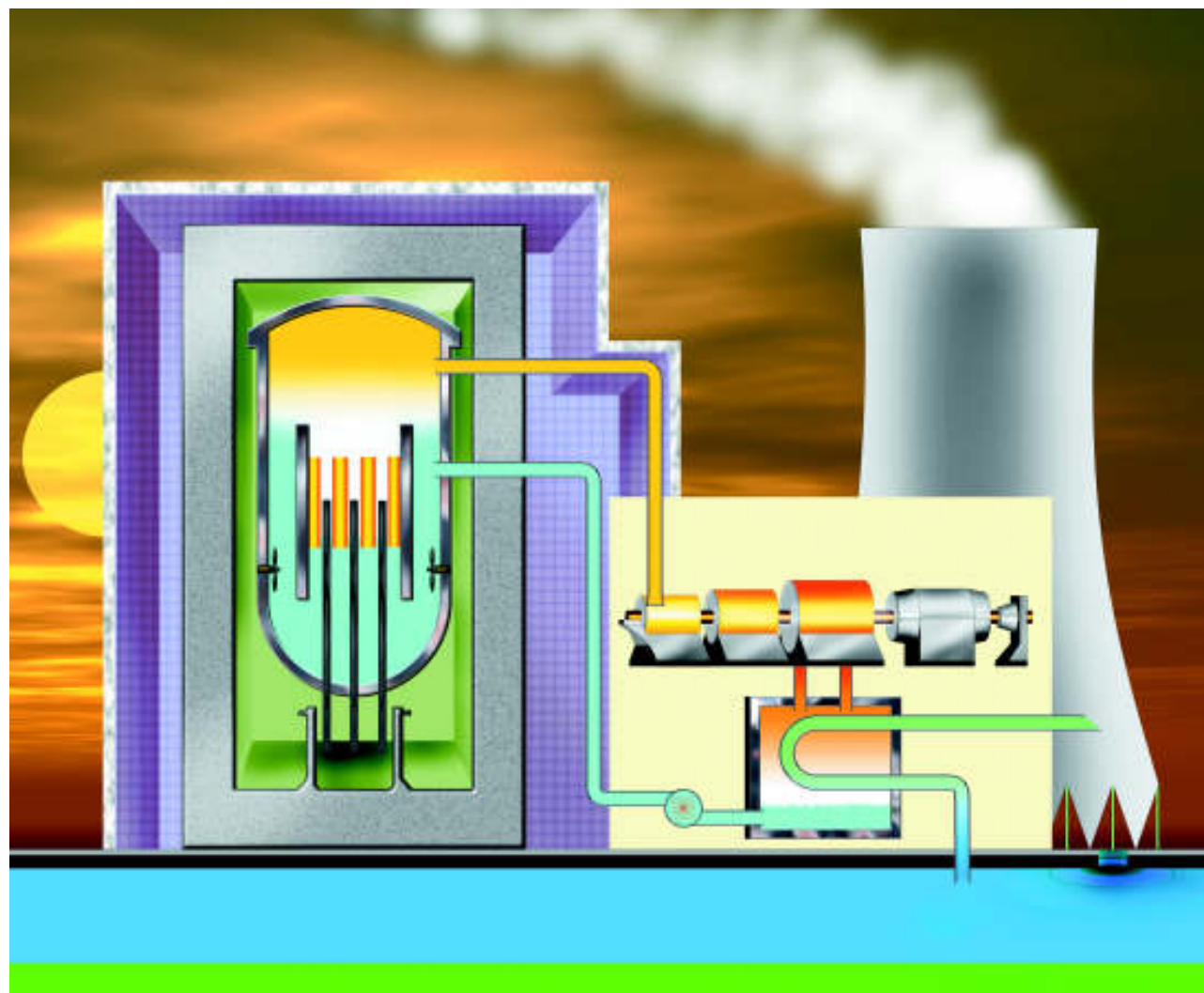


Jak działa elektrownia nuklearna

Boiling
Water
Reactor

reaktor z wodą
wrzącą

moderator: H_2O
chłodziwo: H_2O



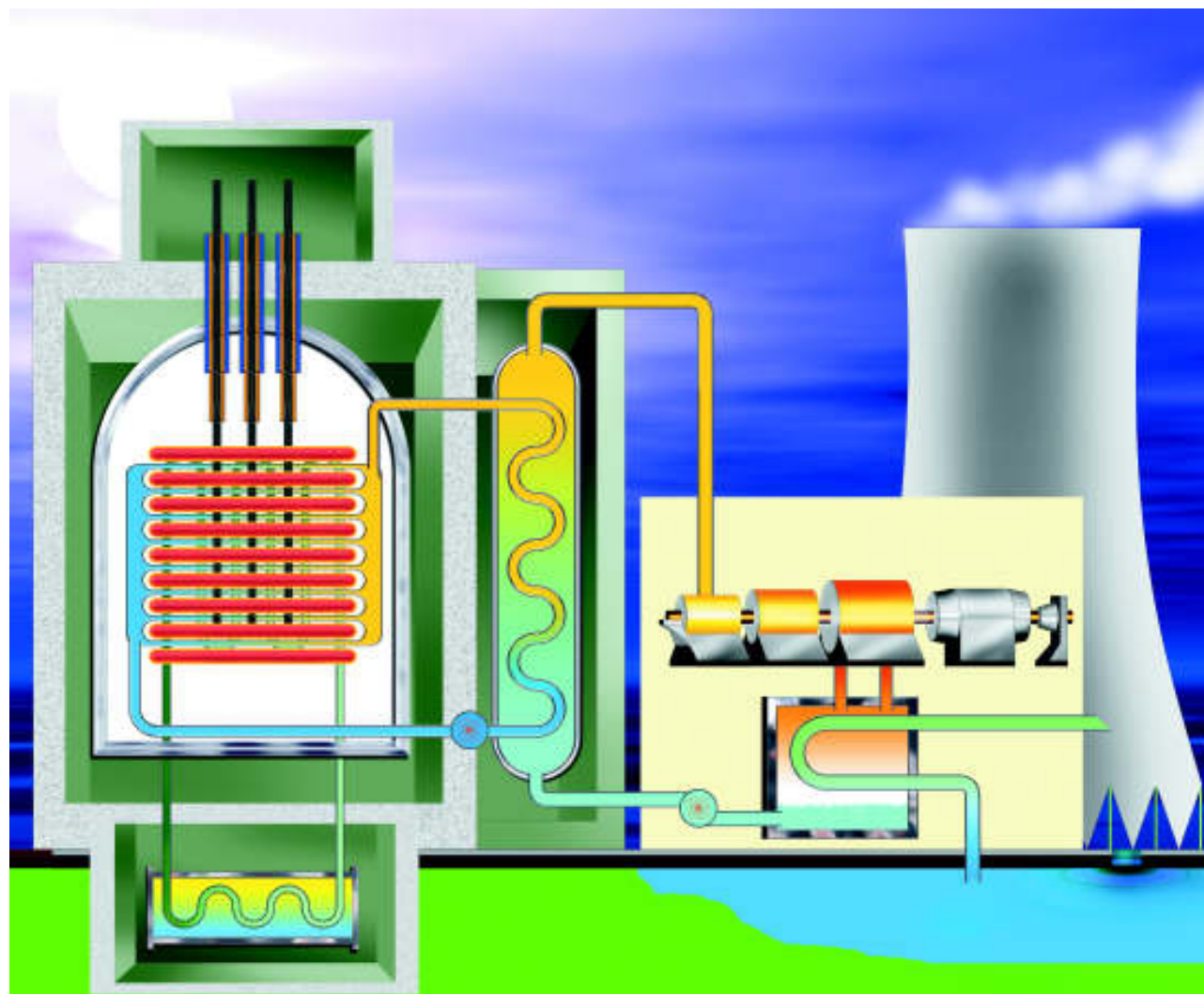
Dział Edukacji i Szkoleń, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk, WWW: www.ncbj.gov.pl

Jak działa elektrownia nuklearna

Pressurized
Heavy
Water
Reactor

reaktor
ciężkowodny

moderator: D_2O
chłodziwo: H_2O
lub D_2O



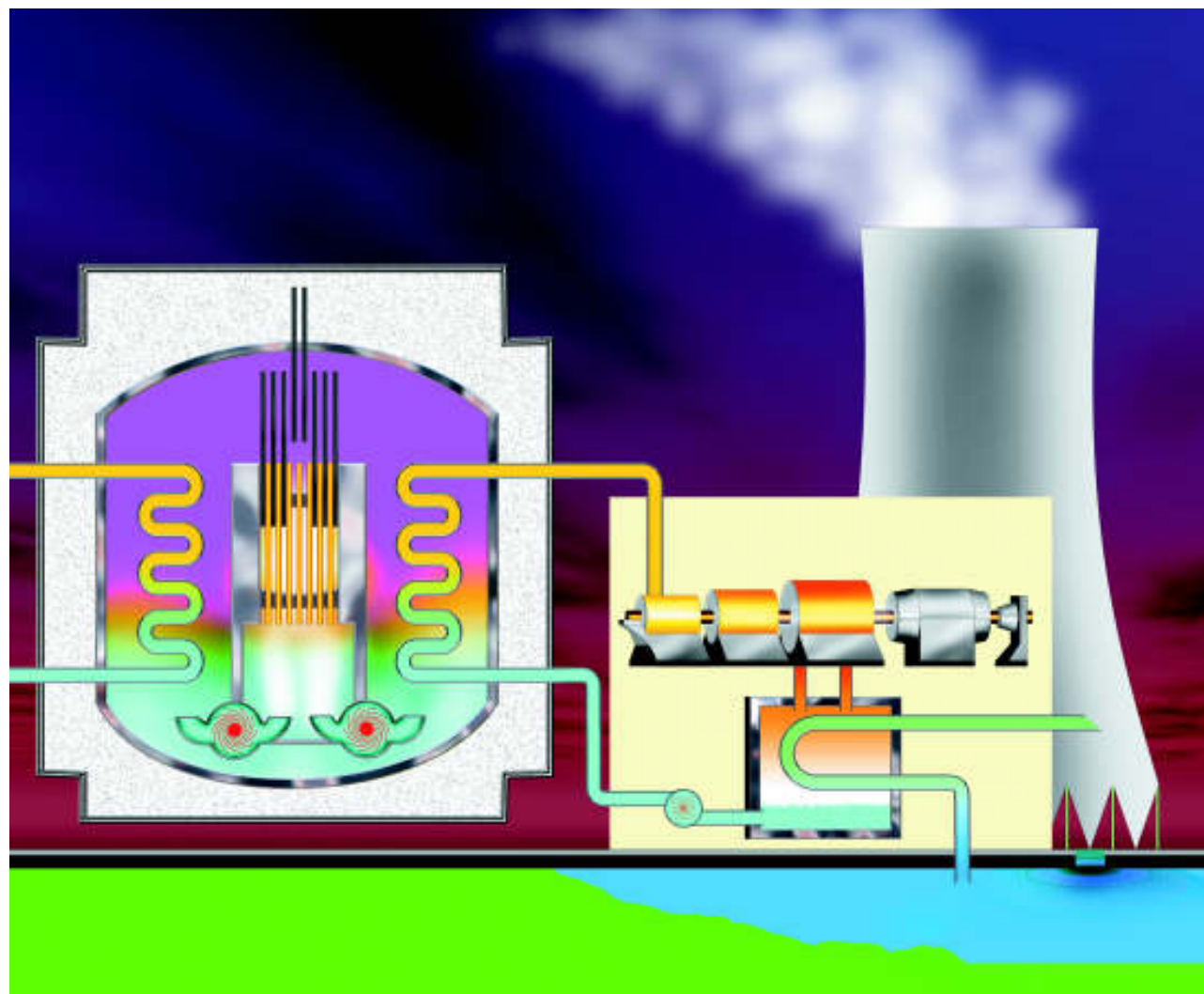
Dział Edukacji i Szkoleń, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk, WWW: www.ncbj.gov.pl

Jak działa elektrownia nuklearna

Gas
Cooled
Reactor

reaktor chłodzony
gazem

moderator: C
chłodziwo: He
lub CO₂



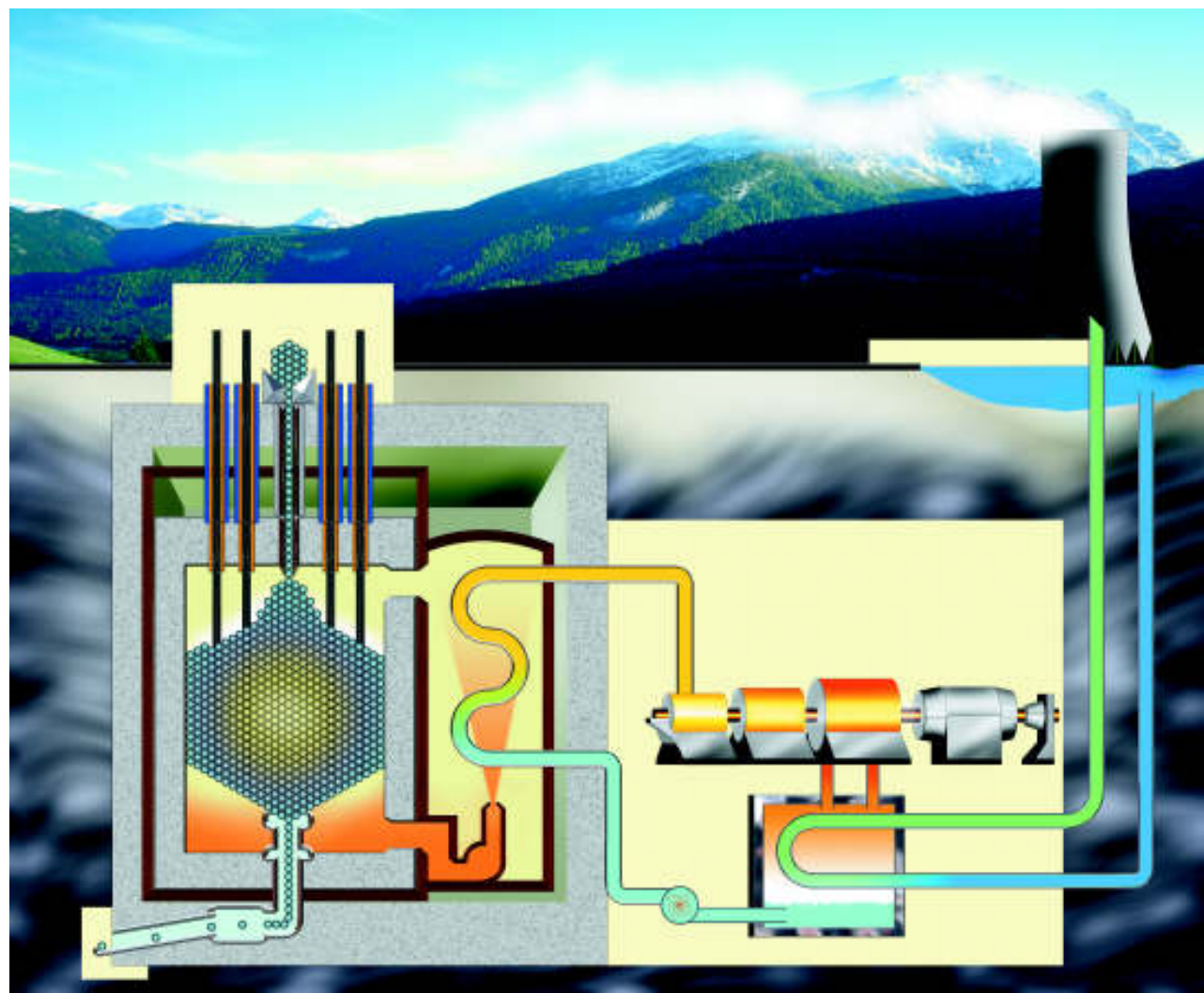
Dział Edukacji i Szkoleń, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk, WWW: www.ncbj.gov.pl

Jak działa elektrownia nuklearna

High
Temperature
Gas cooled
Reactor

reaktor wysoko-
temperaturowy
chłodzony gazem

moderator: C
chłodziwo: He
lub CO₂



Dział Edukacji i Szkoleń, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk, WWW: www.ncbj.gov.pl

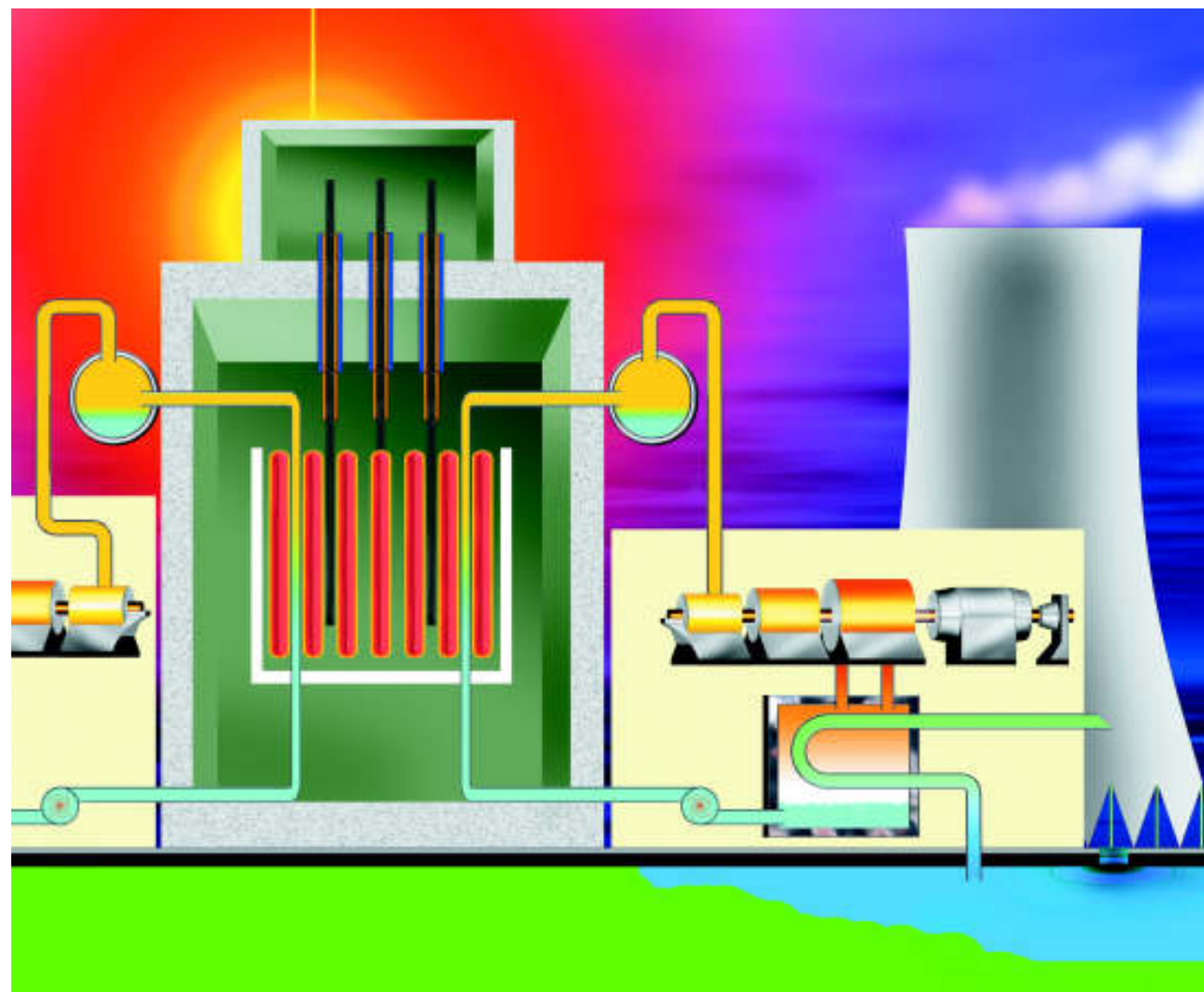
Jak działa elektrownia nuklearna

Light Water
Graphite
Reactor

Rieaktor
Bolszoj
Moszcznosti
Kanalnyj

reaktor kanałowy
dużej mocy

moderator: C
chłodziwo: H₂O

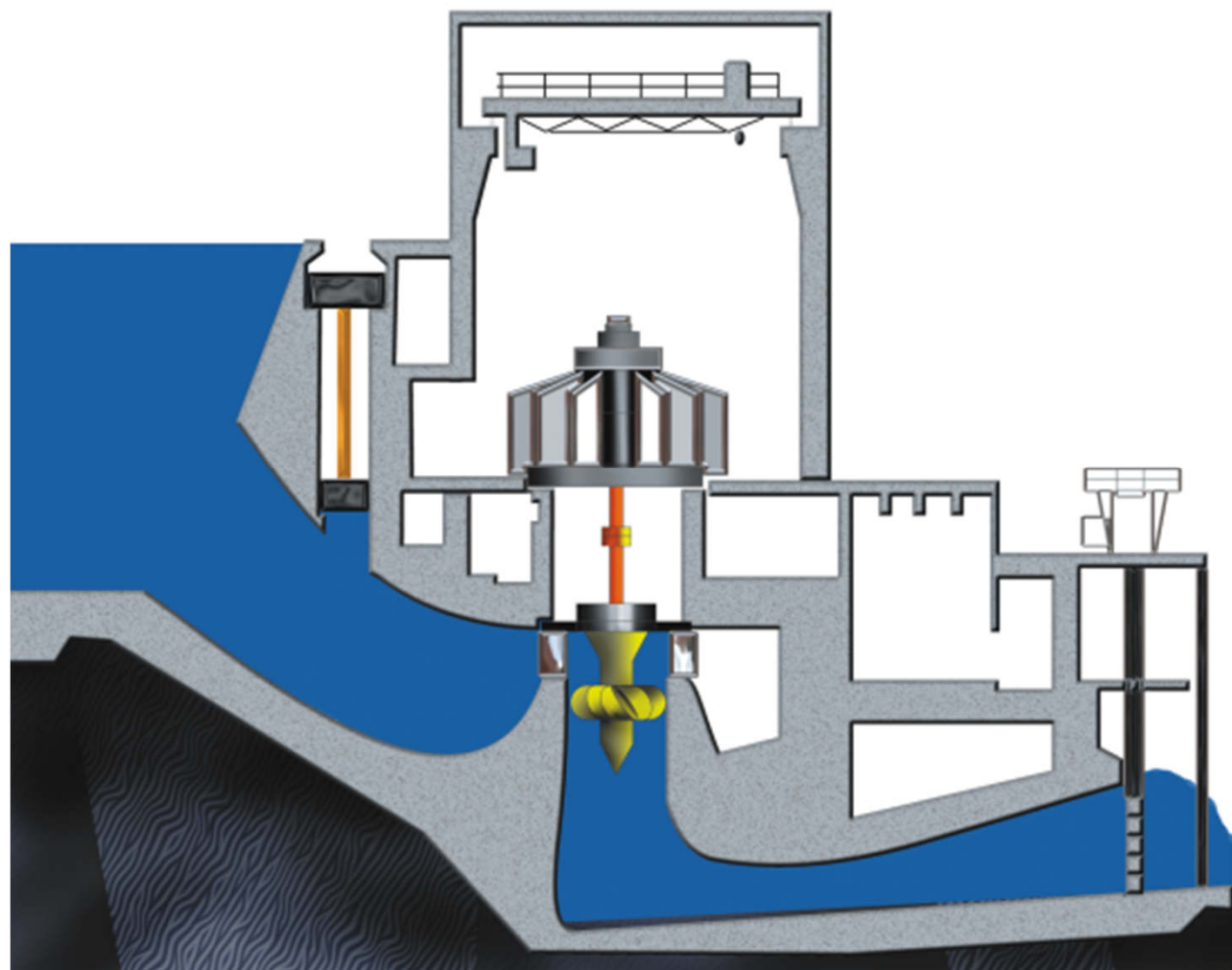


Dział Edukacji i Szkoleń, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk, WWW: www.ncbj.gov.pl

Działanie elektrowni

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

Z kolei w elektrowniach wiatrowych wykorzystuje się ruch mas powietrza.



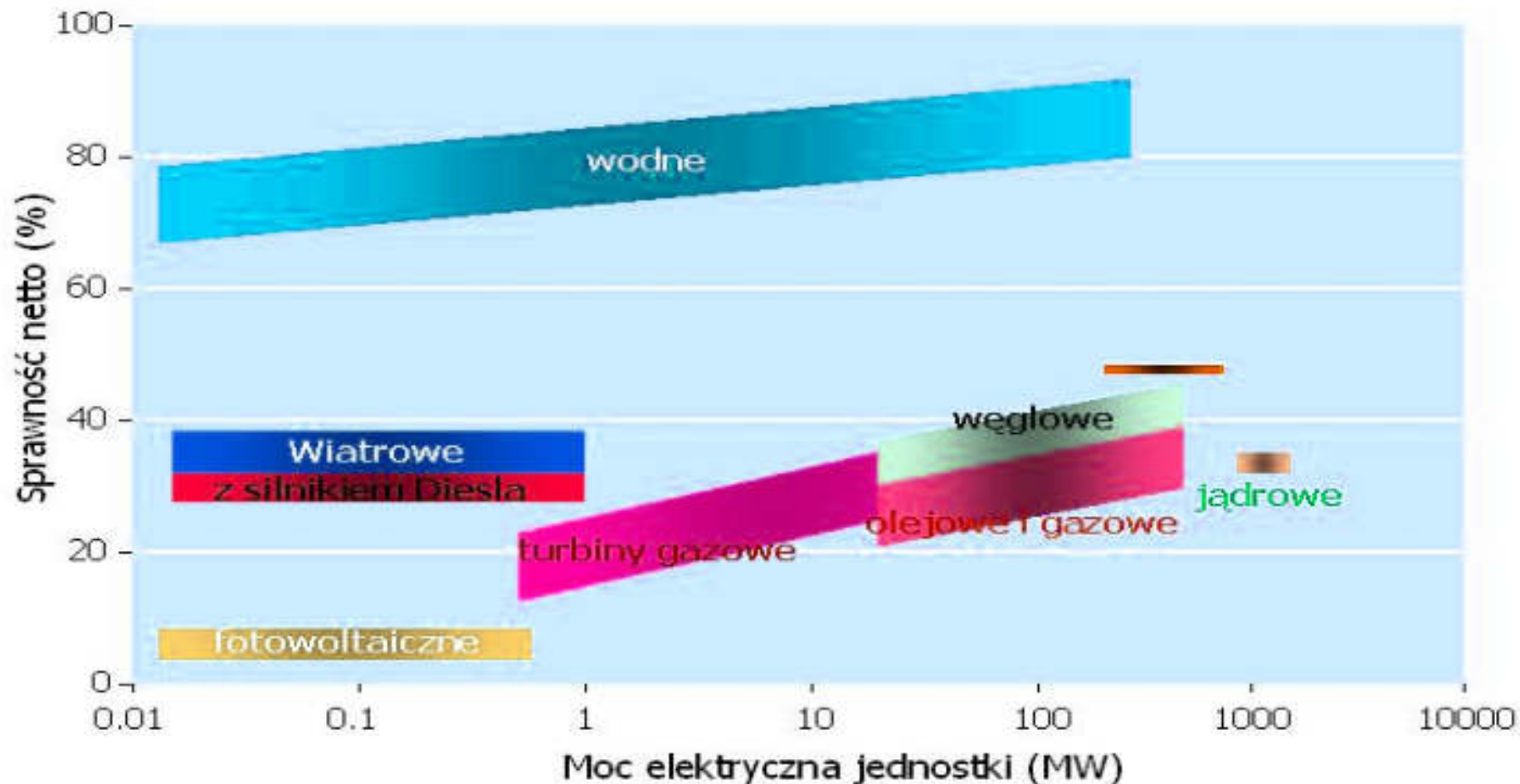
Porównanie elektrowni

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

Sprawność elektrowni



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

Dział Edukacji i Szkoleń, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk, WWW: www.ncbj.gov.pl

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

Odpady powstające podczas normalnej pracy reaktora to:

- wypalone paliwo jądrowe,
- aktywowane i skażone materiały,
- aktywowane ścieki i gazy.

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 przemyśle:

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

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.

Skala INES



Źródło: Państwowa Agencja Atomistyki, www.paa.gov.pl

Dział Edukacji i Szkoleń, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk, WWW: www.ncbj.gov.pl

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 jakiejkolwiek 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).

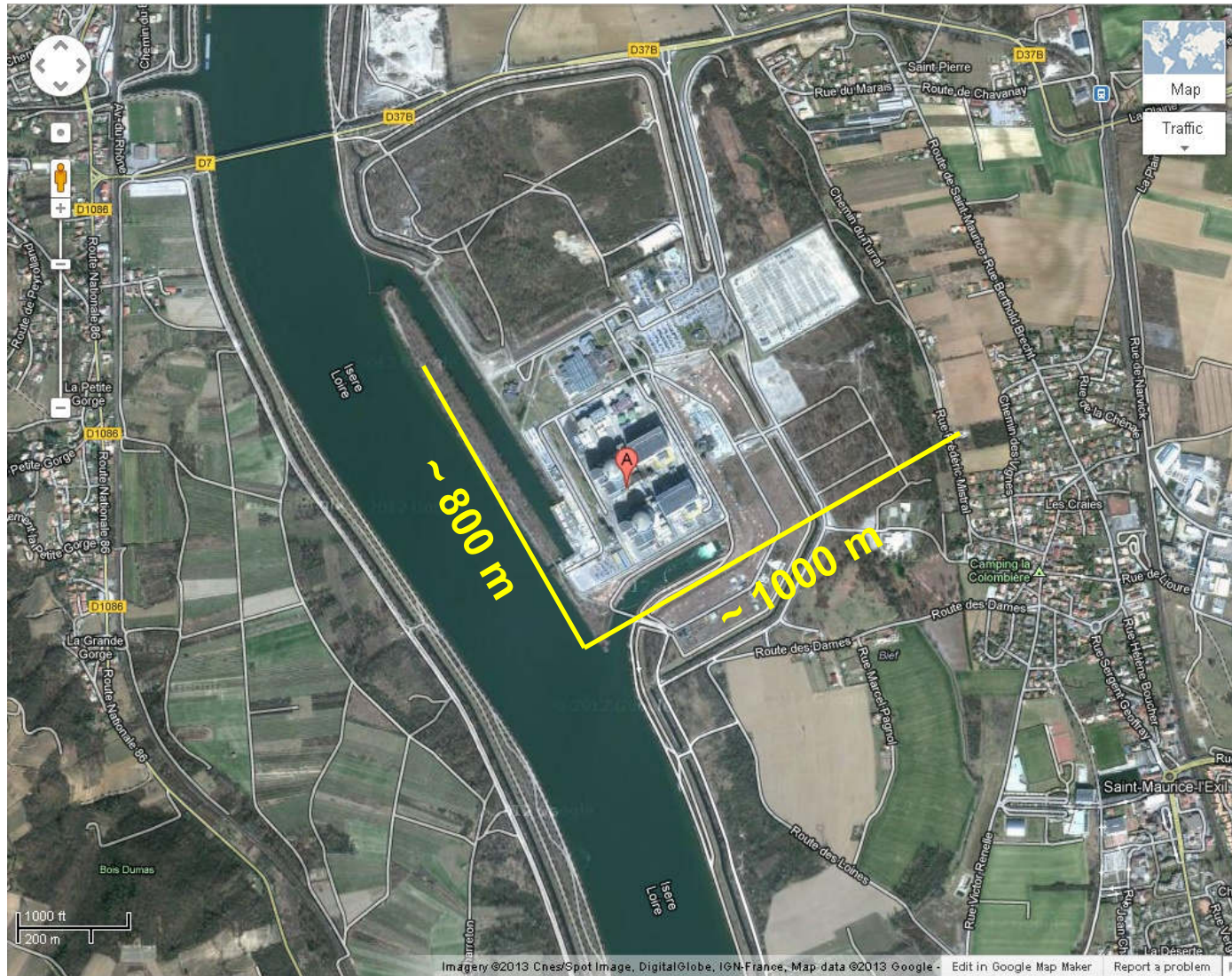
Bezpieczeństwo reaktorów

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.

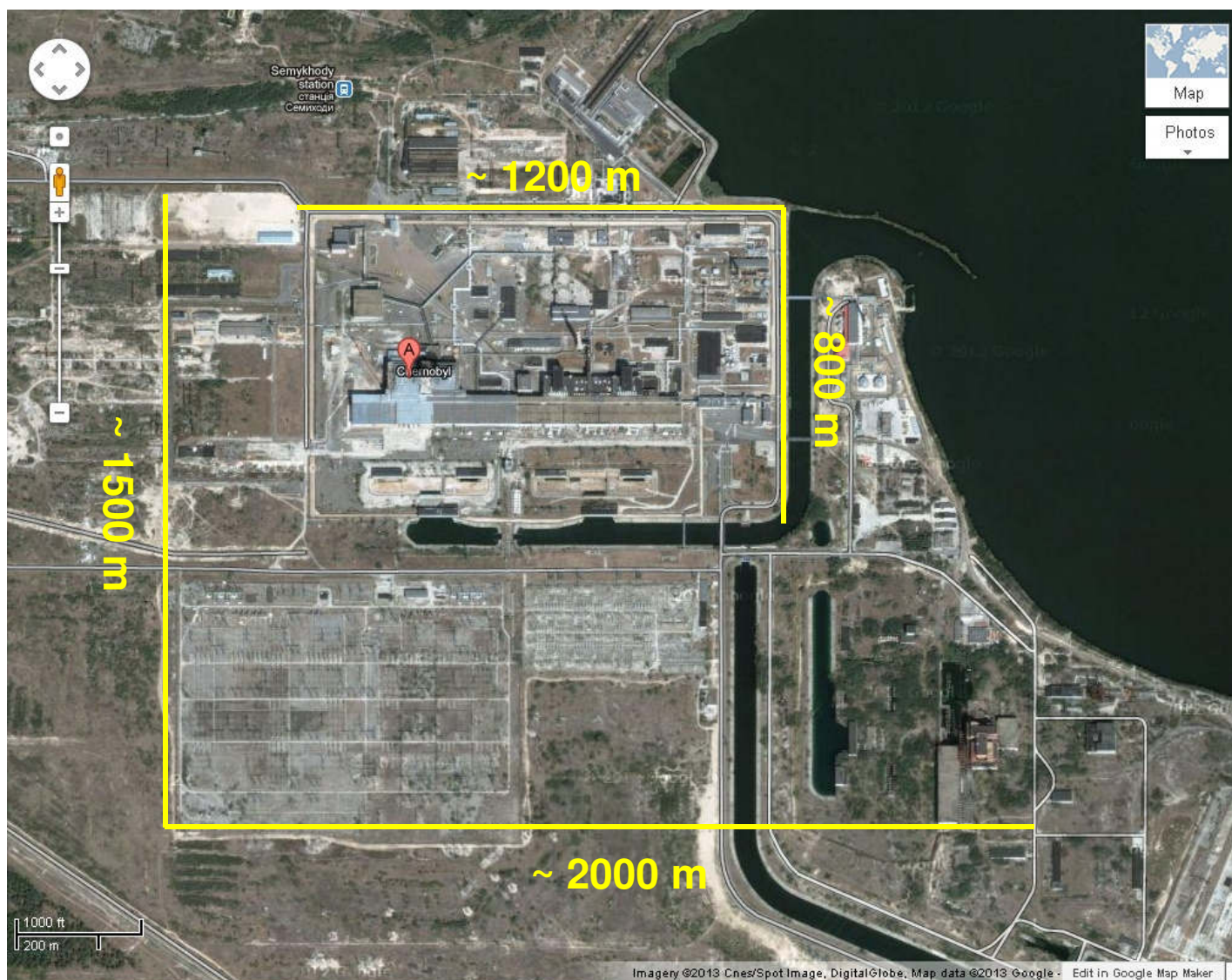
W praktyce w elektrowniach jądrowych częściej ulegają awarii elementy części niejądrowej (np. rozgrzane i rozpędzone łopatki turbin, uszczelki poddane wysokim ciśnieniom pary). Część reaktorowa jest wysoce niezawodna.

EJ St.Alban (Francja) (2x 1335 MW_e)



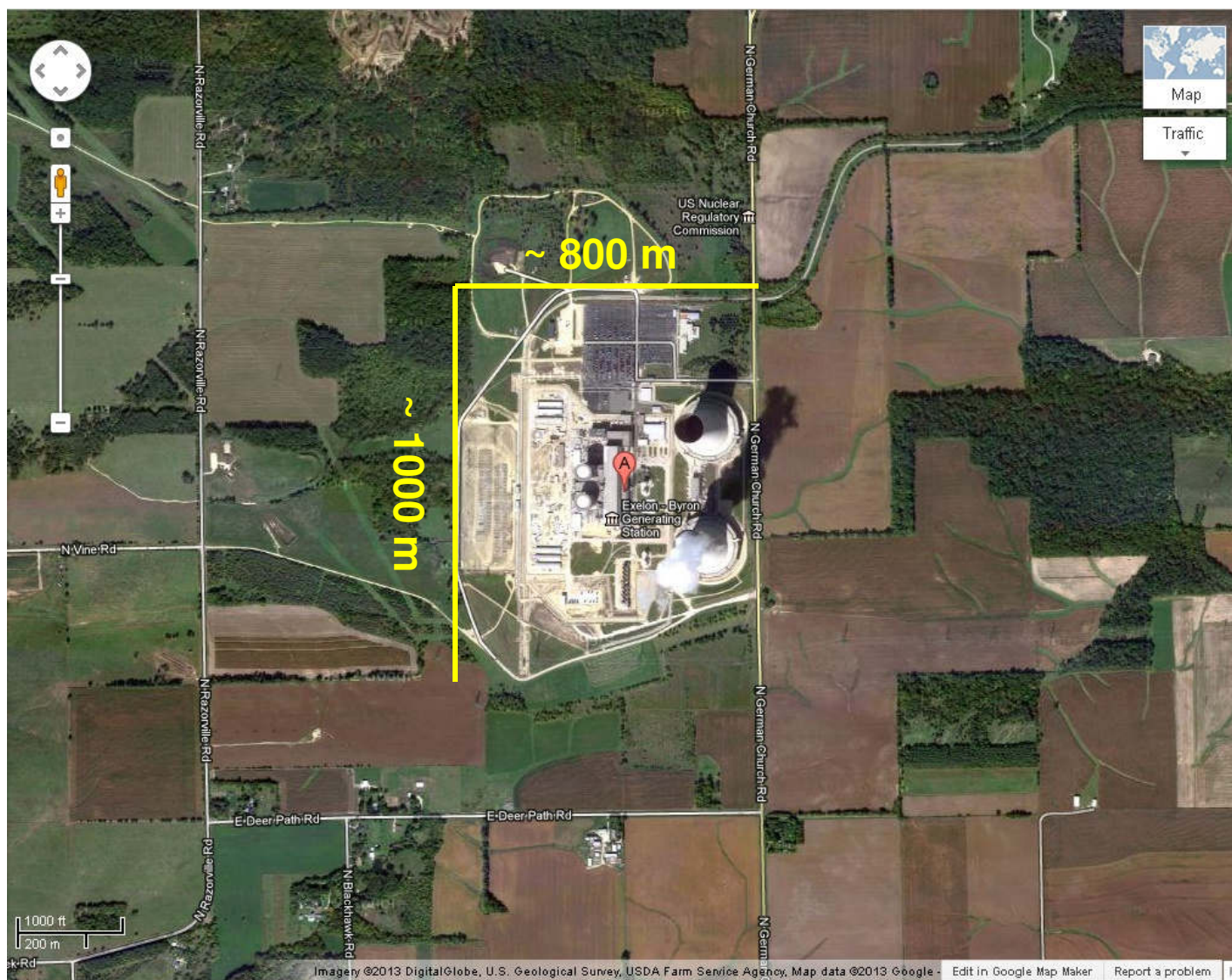
Dział Edukacji i Szkoleń, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk, WWW: www.ncbj.gov.pl

EJ Czarnobyl (Ukraina) ($4 \times 1000 \text{ MW}_e$)



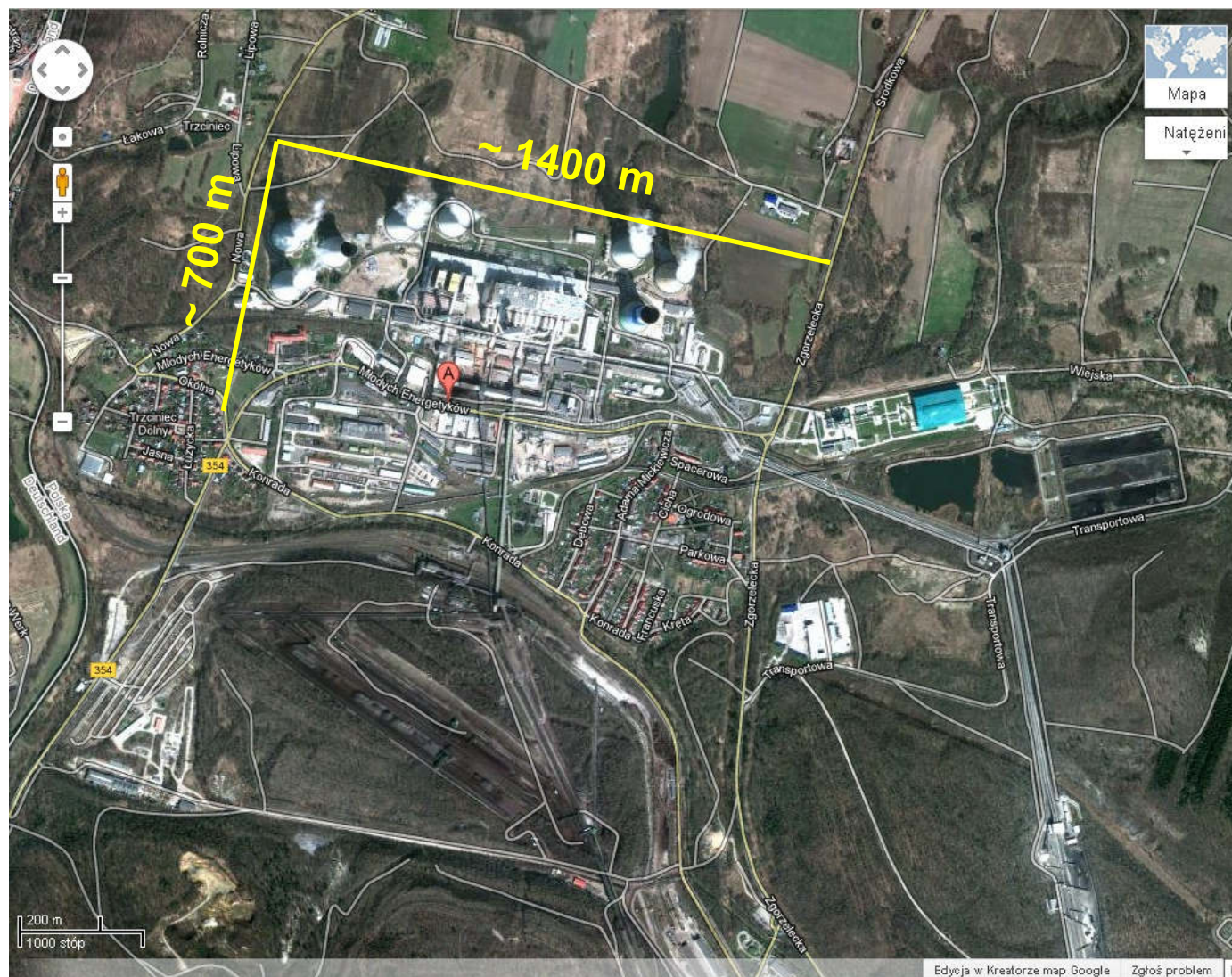
Dział Edukacji i Szkoleń, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk, WWW: www.ncbj.gov.pl

EJ Byron (USA) (2x 1168 MW_e)



Dział Edukacji i Szkoleń, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk, WWW: www.ncbj.gov.pl

El. Turów (Polska) (ok. 1900 MW_e)



Dział Edukacji i Szkoleń, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk, WWW: www.ncbj.gov.pl

EJ Penly (Francja) ($2 \times 1330 \text{ MW}_e$)



Dział Edukacji i Szkoleń, Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. A. Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk, WWW: www.ncbj.gov.pl

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.

Zatrudnienie w elektrowni jądrowej

Szacuje się, że we Francji 1 miejsce pracy w przemyśle jądrowym generuje następne 3 miejsca pracy w innych dziedzinach.

Pracownicy elektrowni wraz ze swoimi rodzinami muszą mieszkać w okolicy przez cały rok.

Załoga pierwszej polskiej elektrowni jądrowej będzie przez pewien czas szkolona na miejscu przez specjalistów z zagranicy – potrzebne będzie ich zakwaterowanie, wyżywienie i inne usługi, a w przyszłości być może wrócą jako turyści.

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 i 100 mSv jednorazowo

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.

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

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.

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.

Dziękuję z uwagę

Polecane źródła:

www.paa.gov.pl – Państwowa Agencja Atomistyki

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

en.wikipedia.org/wiki/Uranium_market – informacje na temat rynku uranu z odnośnikami do specjalistycznych stron internetowych (po angielsku)