

ENERGETYKA JĄDROWA W SKRÓCIE

Adam Rajewski
Zakład Termodynamiki
Instytut Techniki Ciepłej PW



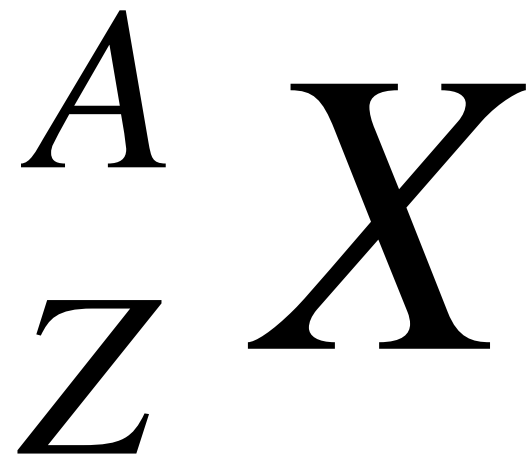
SKĄD TA ENERGIA?

$$E = mc^2$$



JĄDRO ATOMOWE

- Z protonów
- N neutronów
- $A = Z + N$



ILE WAŻY JĄDRO?

- Z protonów
- N neutronów

$$M = N \cdot m_n + Z \cdot m_p$$

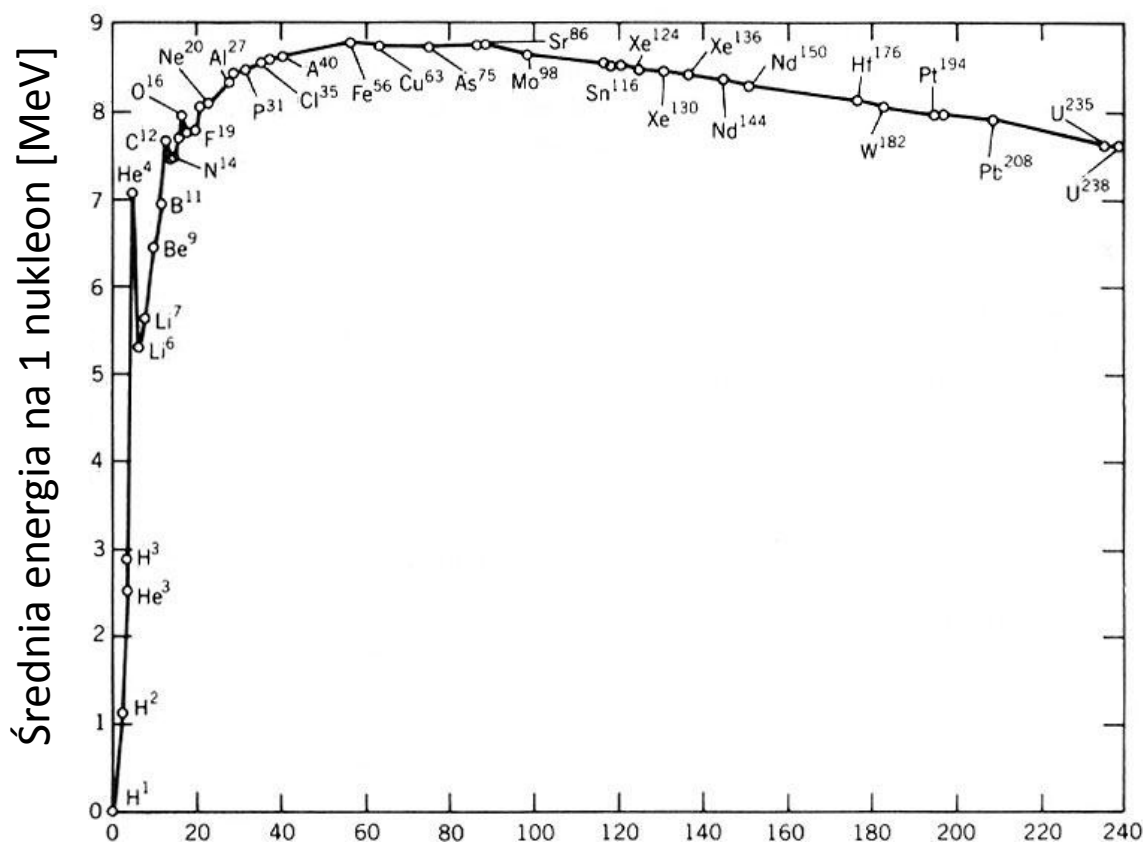
$$M < N \cdot m_n + Z \cdot m_p$$

**Defekt
masy**

$$\Delta m = \frac{E_w}{c^2}$$

**Energia
wiązania**

ENERGIA WIĄZANIA



Liczba nukleonów w jądrze (liczba masowa)

IZOTOPY ROZSZCZEPIALNE

U-233

U-235

Pu-239

Pu-241



IZOTOPY RODNE

Th-232 → U-233

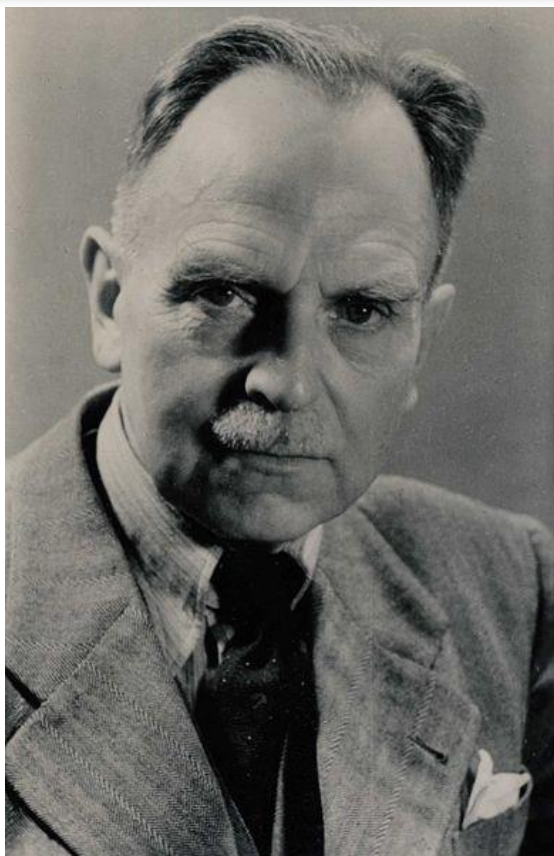
U-234 → U-235

U-238 → Pu-239

Pu-238 → Pu-239

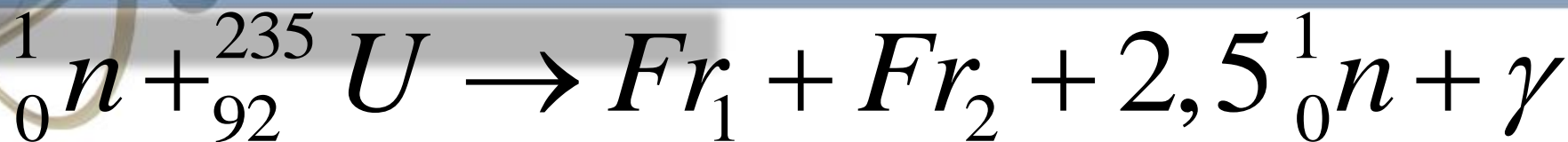
Pu-240 → Pu-241

JAK ROZBIĆ JĄDRO ATOMOWE?

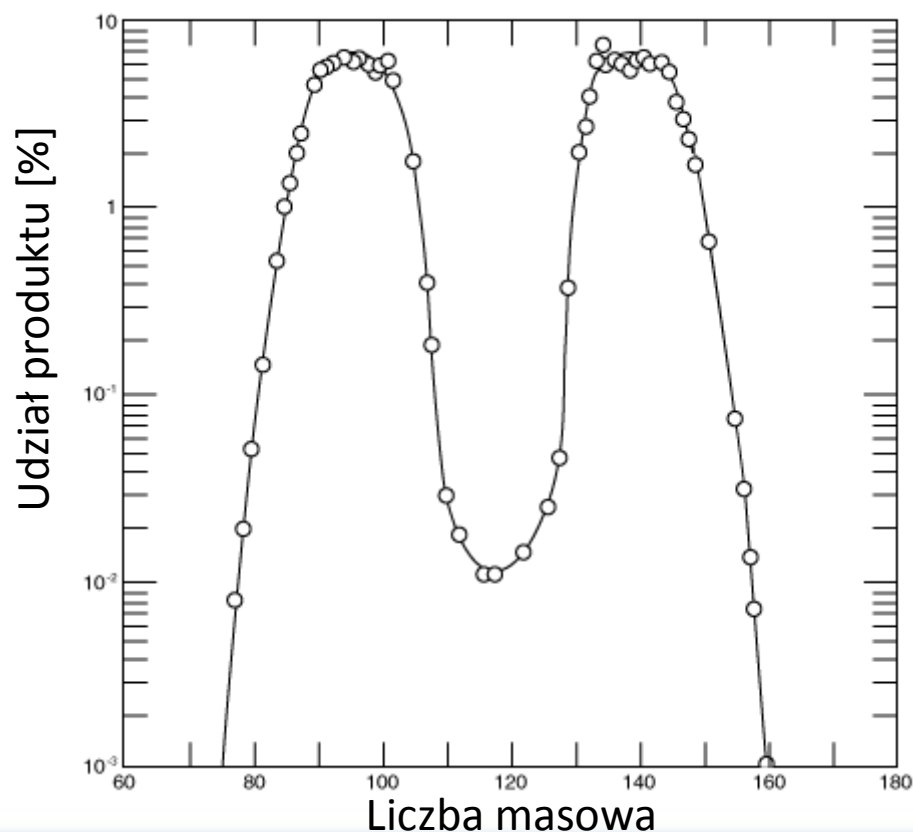


- Otto Hahn (1879-1968)
- 17 grudnia 1938 – pierwsze potwierdzone rozszczepienie jądra uranu
- 15 listopada 1945 – nagroda Nobla w dziedzinie chemii

ROZSZCZEPNIENIE URANU



Rozszczepienie U-235 neutronami termicznymi



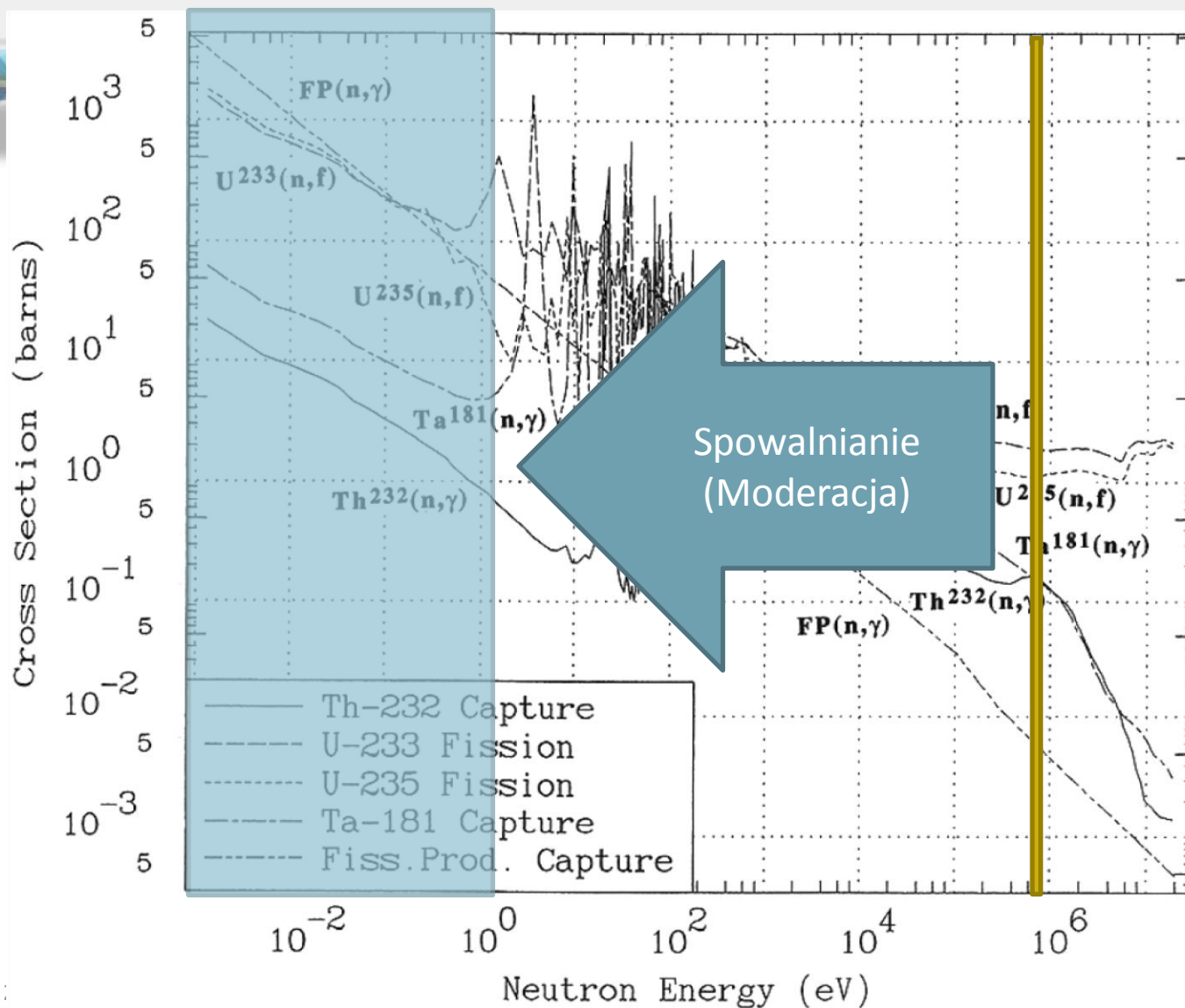
GDZIE TA ENERGIA?



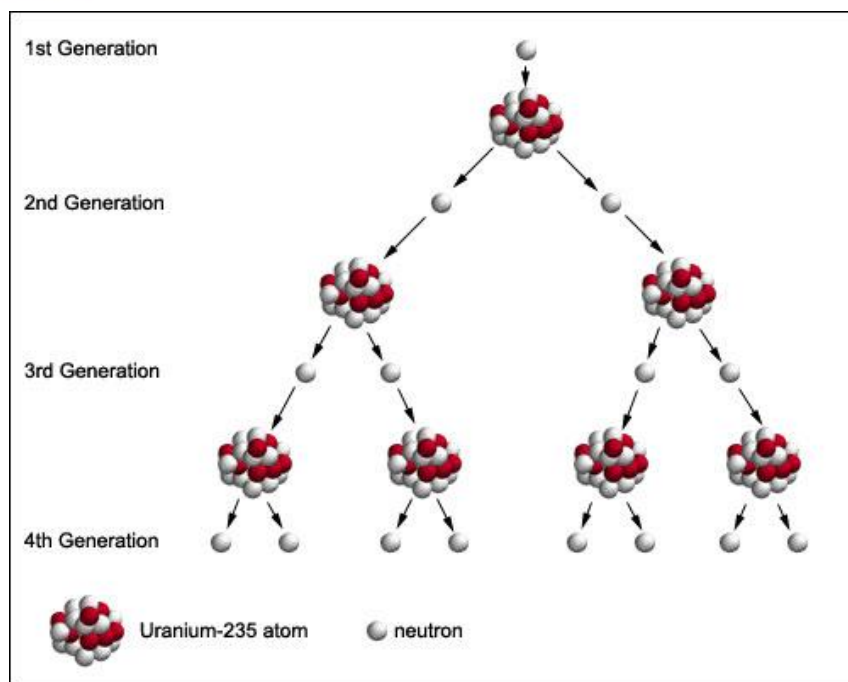
„A single atom is such a small thing that to talk about its energy in joules would be inconvenient. But instead of taking a definite unit in the same system, like 10^{-20} J, [physicists] have unfortunately chosen, arbitrarily, a funny unit called an electronvolt (eV) ... I am sorry that we do that, but that's the way it is for the physicists.”

R. Feynman (1961)

ENERGIA NEUTRONU



REAKCJA ŁAŃCUCHOWA



- Masa krytyczna
- „Gospodarka” neutronowa
 - Spowalnianie
 - Zawracanie



CZYM SPOWALNIAĆ?

- Moderator idealny:
 - Niska masa atomowa
 - Dobrze odbija neutrony
 - Nie pochłania neutronów



STOSOWANE MODERATORY

Wodór (prot – ^1H)

- W formie wody
- Pochłania sporo neutronów – wymaga wzbogacenia uranu

Deuter (^2H , ^2D)

- W formie ciężkiej wody
- Umożliwia stosowanie uranu naturalnego
- Drogi

Węgiel

- Na ogół w postaci grafitu
- Umożliwia (czasami) stosowanie uranu naturalnego

Beryl

- Drogi
- Toksyczny

Lit (^7Li)

- W formie fluorku litu

ODBIERANIE ENERGII

- W skali mikro – energia kinetyczna
- W skali makro – ciepło
- Odbieranie energii = chłodzenie reaktora
- Chłodziwo:
 - Duża pojemność cieplna
 - Nieagresywne chemicznie
 - Niepochłaniające neutronów

STOSOWANE CHŁODZIWA

Powietrze

- Pierwsze reaktory badawcze, mała moc

Woda

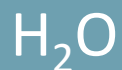
- Tania
- Może służyć jednocześnie za moderator
- Może pracować w obiegu roboczym elektrowni
- Pochłania stosunkowo dużo neutronów

Dwutlenek węgla

Hel

- Drogi
- Nie reaguje z niczym
- Może pracować w reaktorach wysokotemperaturowych
- Może pracować w obiegu roboczym elektrowni

STOSOWANE MODERATORY I CHŁODZIWA



- Reaktory PWR, BWR, WWER
- Ta sama woda jest chłodziwem i moderatorem



- Reaktory CANDU (Kanada)



- Reaktory GCR, AGR – już nieprodukowane



- Reaktory RBMK – w tym Czarnobyl-4

STEROWANIE REAKCJĄ

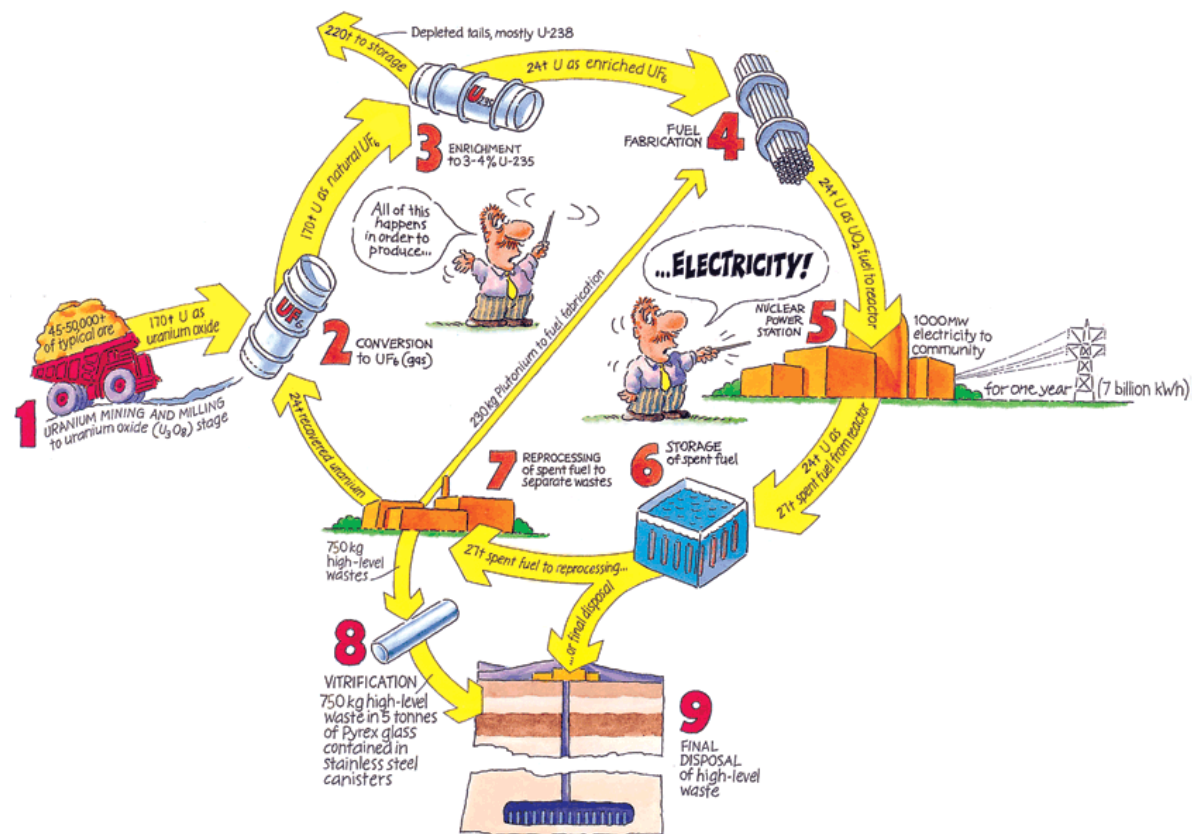


- Pręty regulacyjne
 - Wsuwane do rdzenia
 - Wykonane z materiału silnie pochłaniającego neutrony (np. bor)
- Dodatek kwasu borowego do chłodziwa
- Regulacja natężenia przepływu wody (moderatora) przez rdzeń (reaktory BWR)

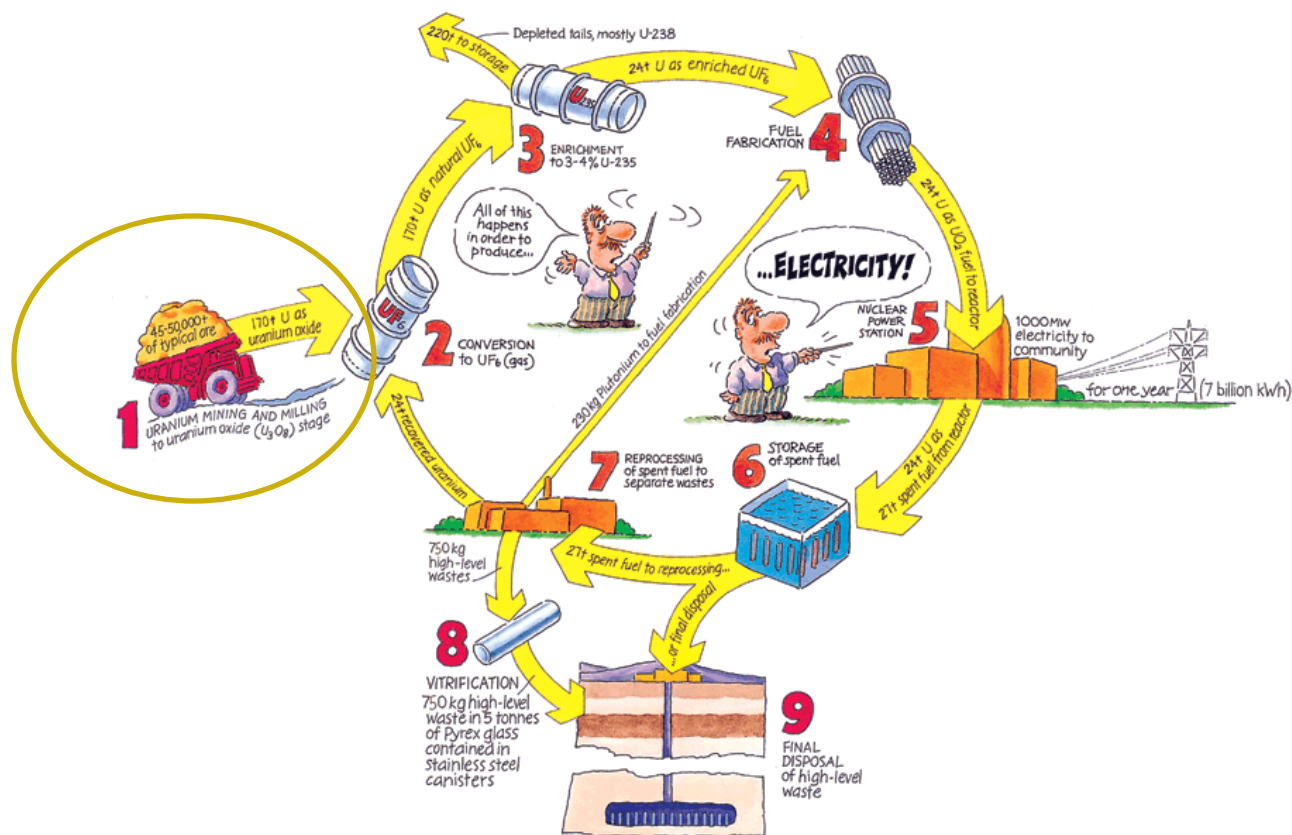
WYKORZYSTYWANE PALIWA:

- Uran-235
 - Na ogół w postaci UO_2
 - Wydobywany ze źródeł naturalnych
 - Na ogół wzbogacony do 4-5% U-235
- MOX – Mixed Oxide Fuel
 - Mieszanina tlenków uranu i plutonu
 - Pluton z recyklingu wypalonych elementów paliwowych
 - Pluton z rozebranych głowic jądrowych

CYKL PALIWOWY



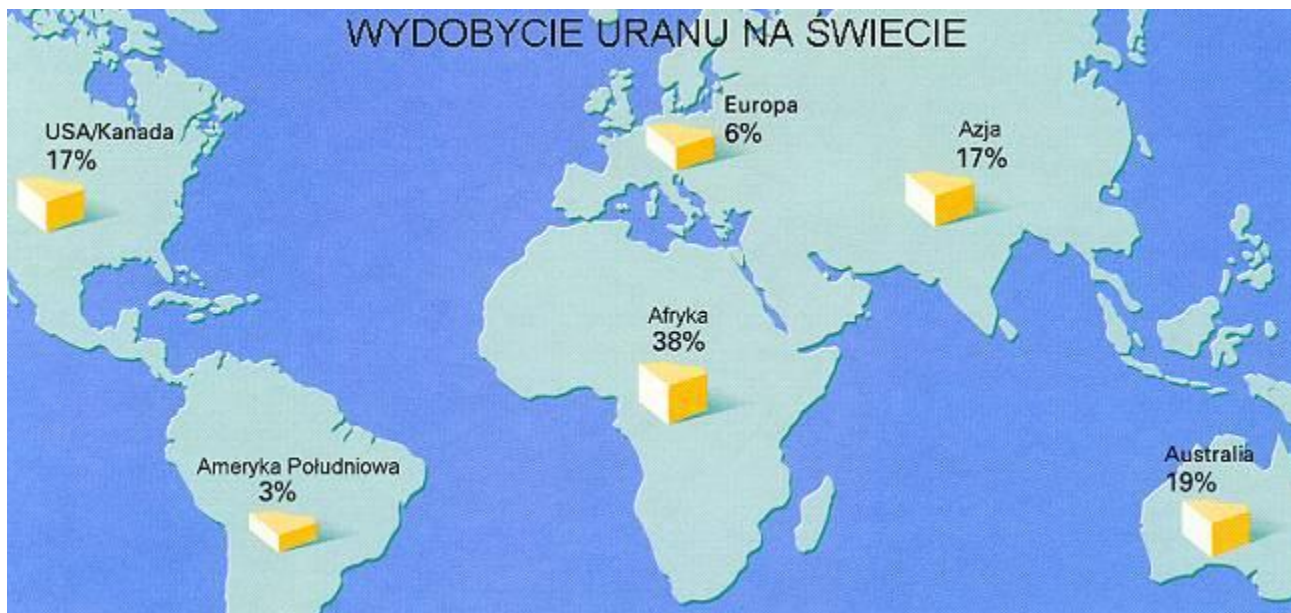
WYDOBYCIE RUDY URANU



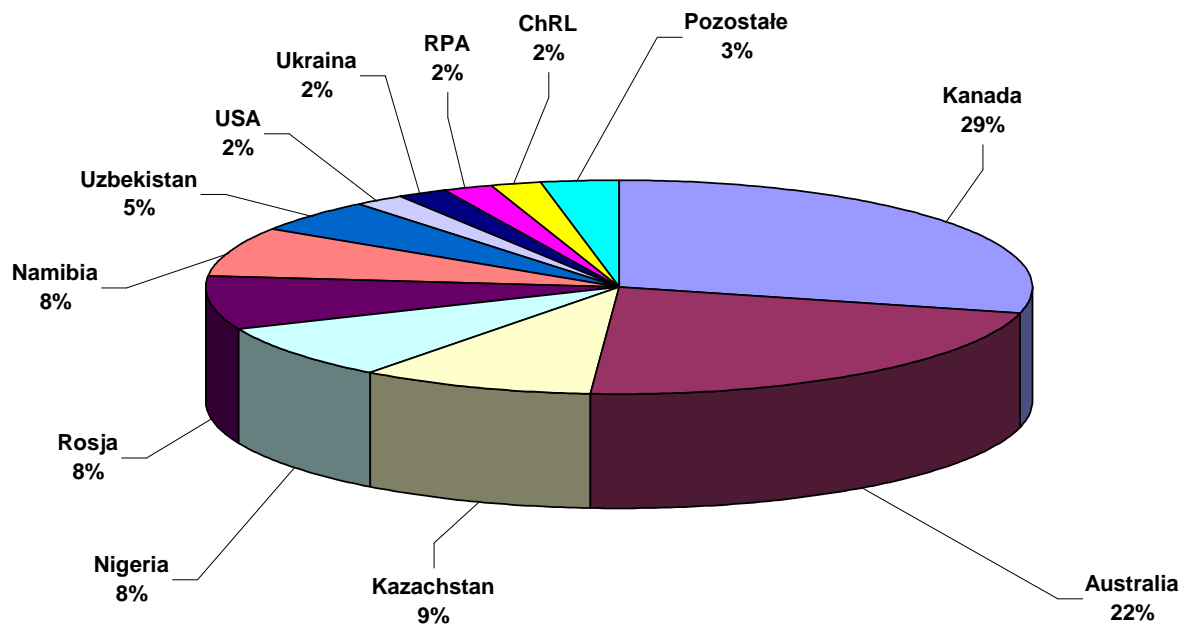
WYDOBYCIE RUDY URANU



WYDOBYCIE URANU



WYDOBYCIE URANU



RUDY URANU



Uraninit – UO_2



Skłodowskit – $\text{Mg}(\text{UO}_2)_2(\text{HSiO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$



Karnotyt – $\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$



Autunit- $\text{CaO}(\text{UO}_3)_2\text{P}_2\text{O}_5 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

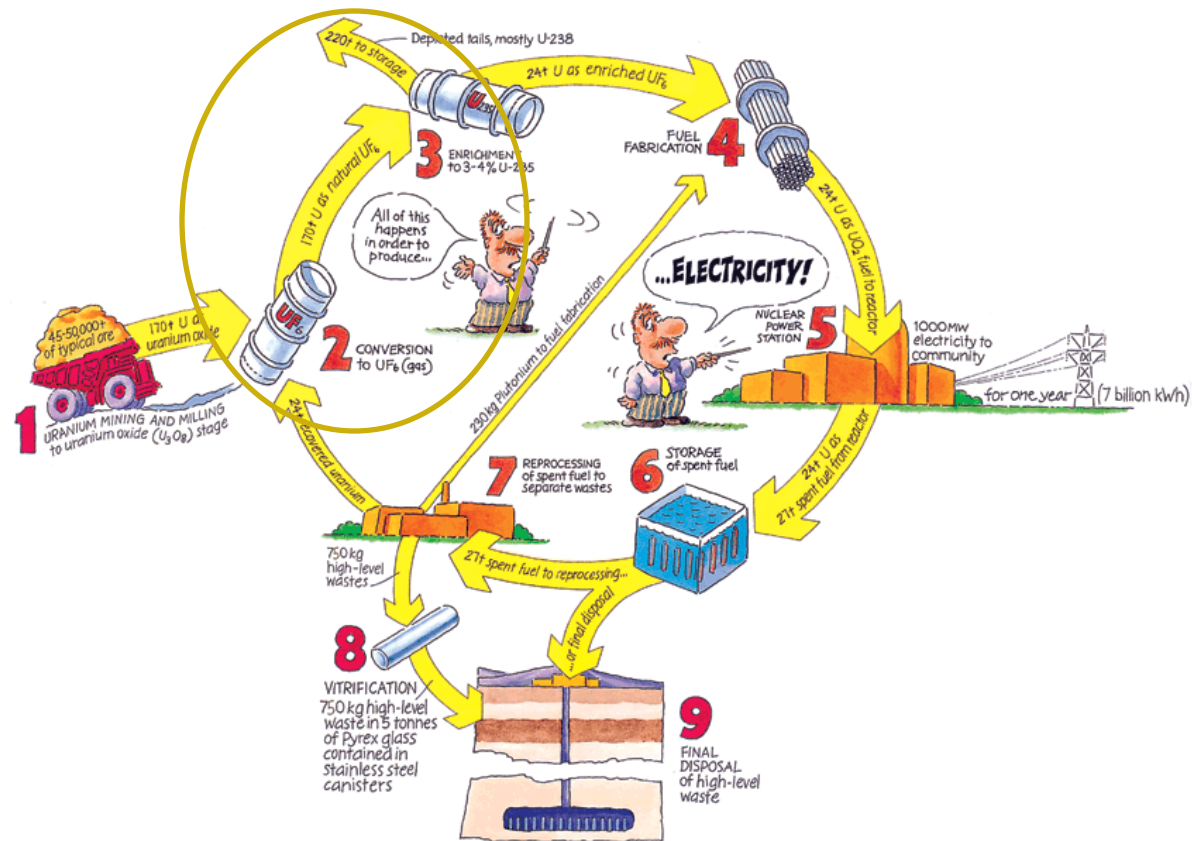
Przykładowe minerały uranu

YELLOWCAKE



- Koncentrat uranowy
- $\sim 80\%$ U_3O_8
- Stabilny chemicznie

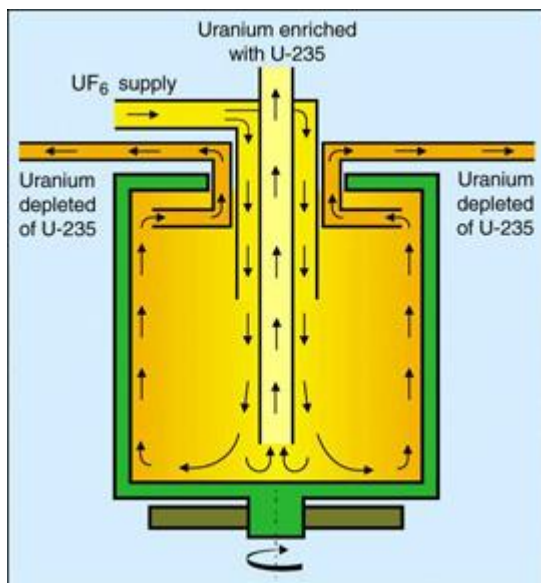
WZBOGACANIE URANU



WZBOGACANIE URANU

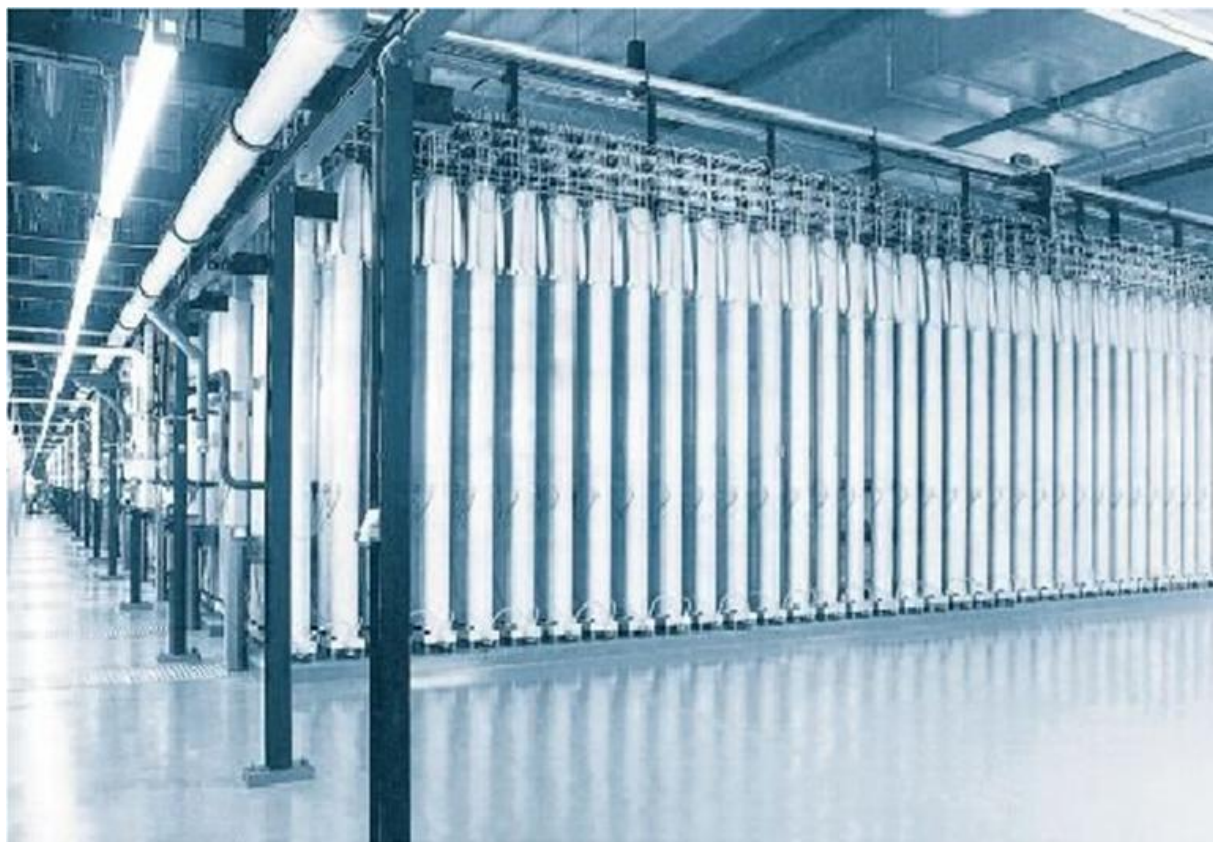
- Uran naturalny zawiera tylko 0,72% U-235
- Dla większości reaktorów potrzeba 3-4% U-235
- Wzbogacanie = zwiększanie zawartości U-235 w ogólnej masie uranu
- Metody fizyczne – oparte o różnicę mas
- Wzbogacanie prowadzone w postaci gazowej UF₆

WIRÓWKI DO WZBOGACANIA URANU

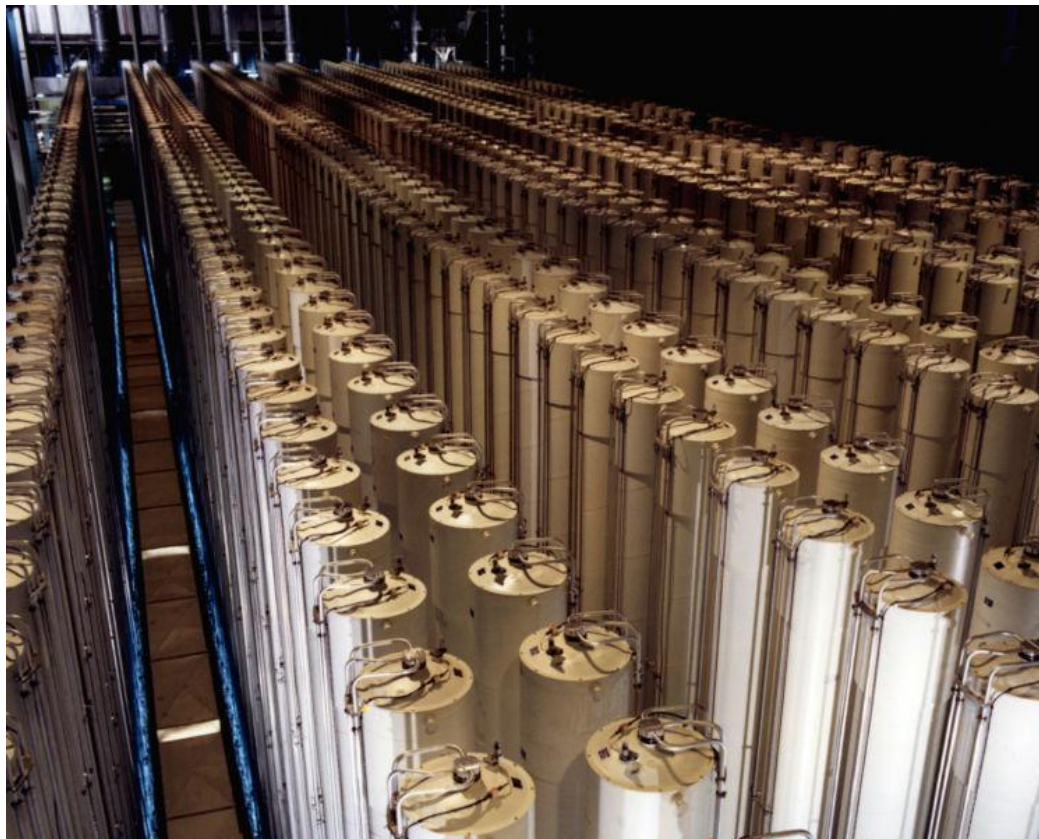


- Wykorzystanie różnicy mas izotopów (235 lżejszy od 238)
- Lżejszy U-235 koncentruje się w rejonie osi wirówki
- Dla wzbogacenia konieczne wielokrotne wirowanie – kaskada wirówek

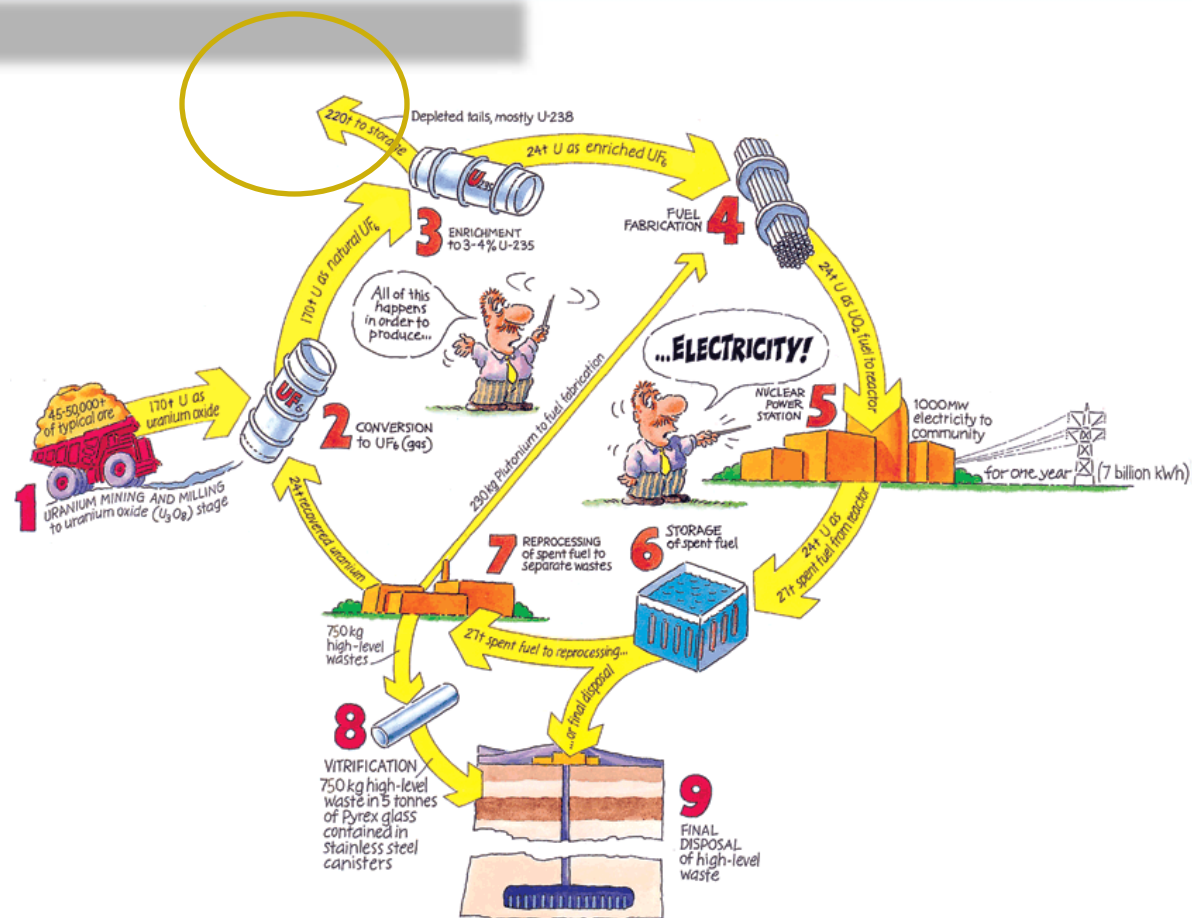
KASKADA WIRÓWEK



KASKADA WIRÓWEK

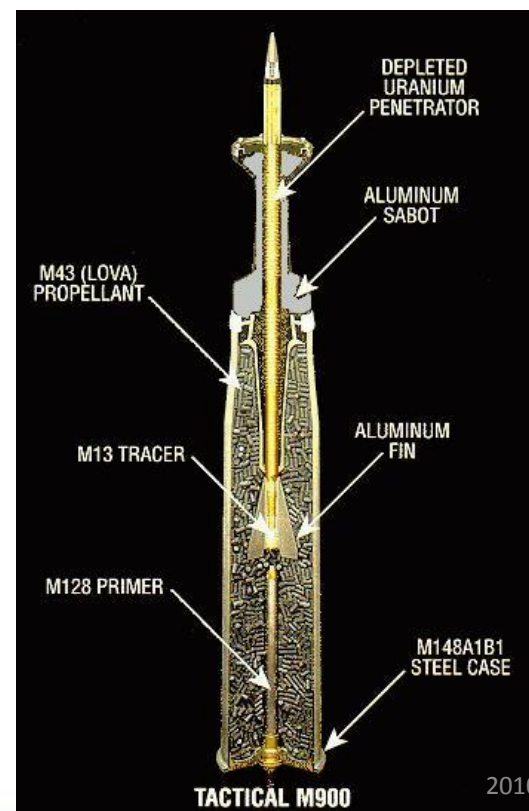


A CO Z RESZTĄ?

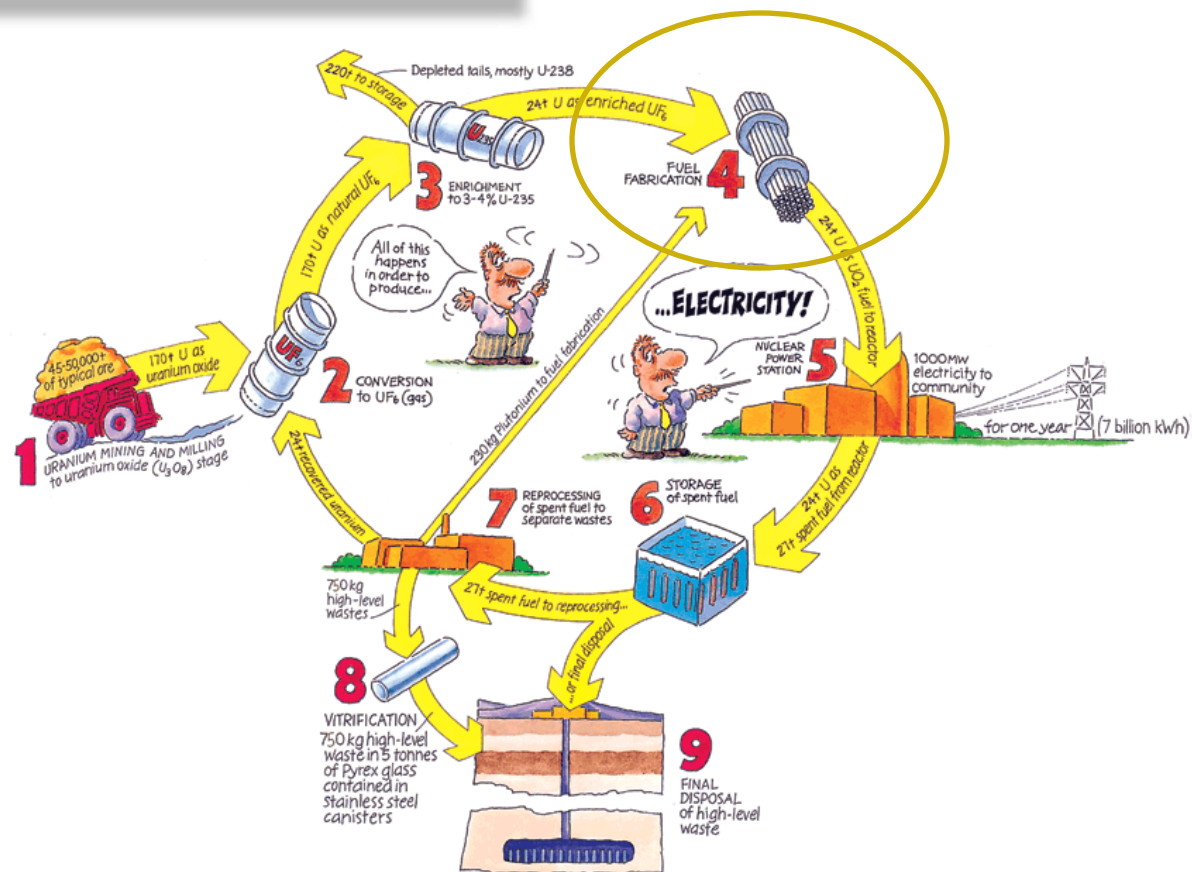


ZASTOSOWANIA URANU ZUBOŻONEGO

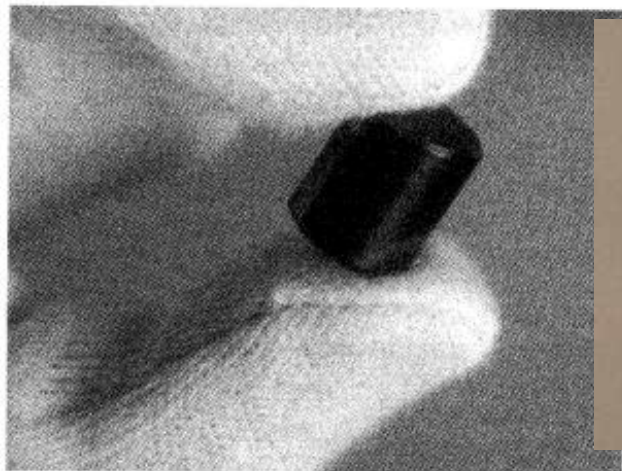
- Osłony przeciwradiacyjne (np. w medycynie)
- Barwnik
- Przeciwwagi w samolotach
- Pancerze
- Pociski przeciwpancerne



PRODUKCJA PALIWA

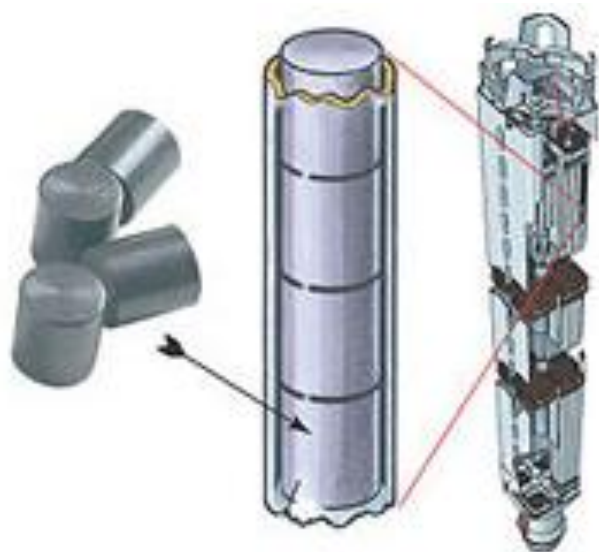


PALIWO JĄDROWE – PASTYLKI UO₂



O olbrzymiej koncentracji paliwa świadczy fakt iż trzymana w ręku pastylka o masie **10g** może posłużyć do wyprodukowania **600 kWh** energii elektrycznej. Stanowi to ok. **¼ rocznego zużycia** energii elektrycznej **przez jedno gospodarstwo domowe w Polsce**.

PALIWO JĄDROWE



Dwutlenek uranu



Pastyłki paliwowe



Pręty paliwowe



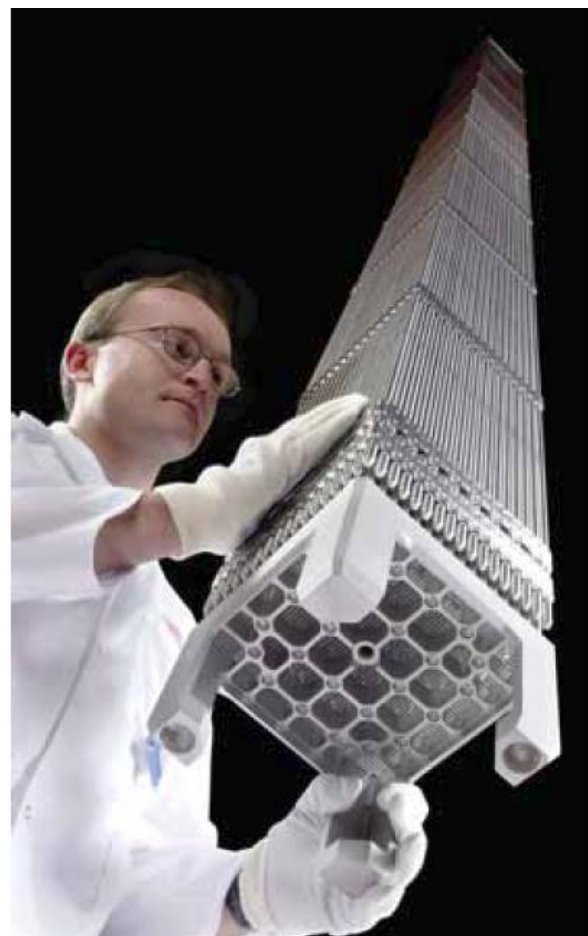
Kasety paliwowe



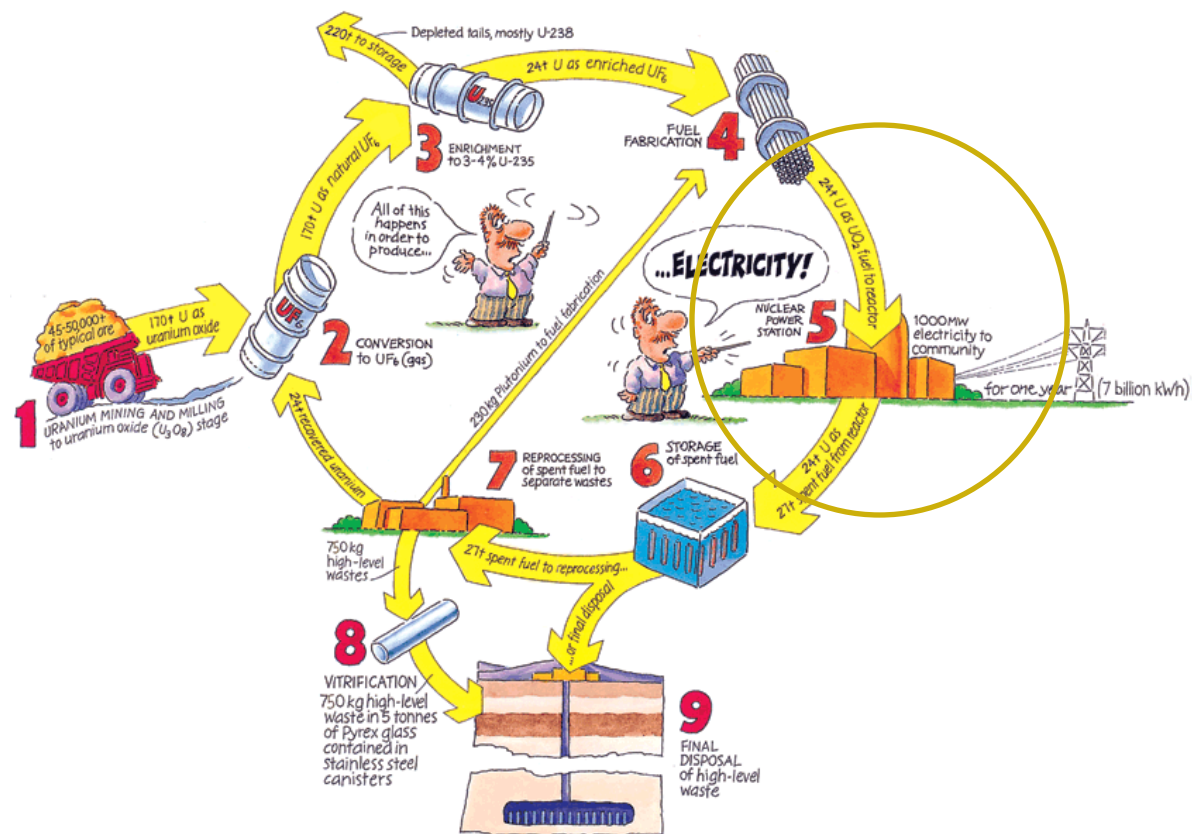
KASETA PALIWOWA



Source: Babcock and Wilcox Company

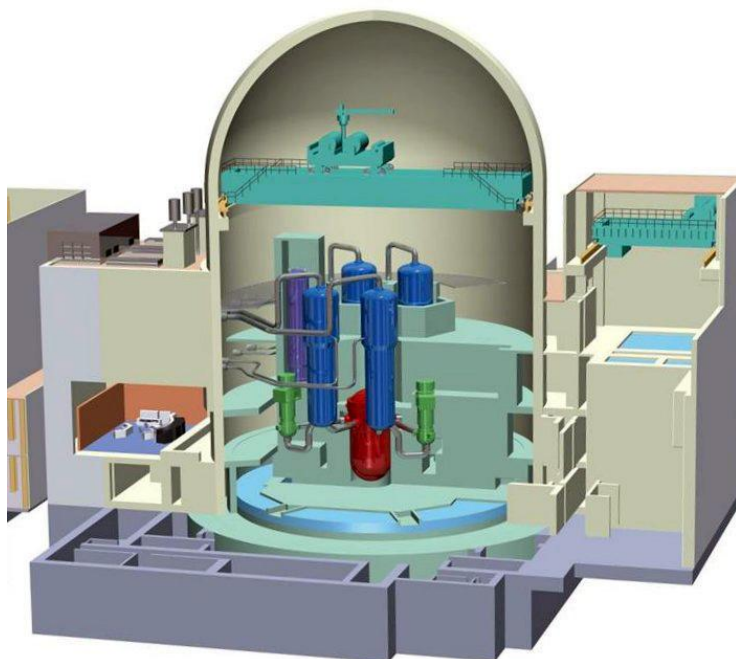


WYKORZYSTANIE PALIWA



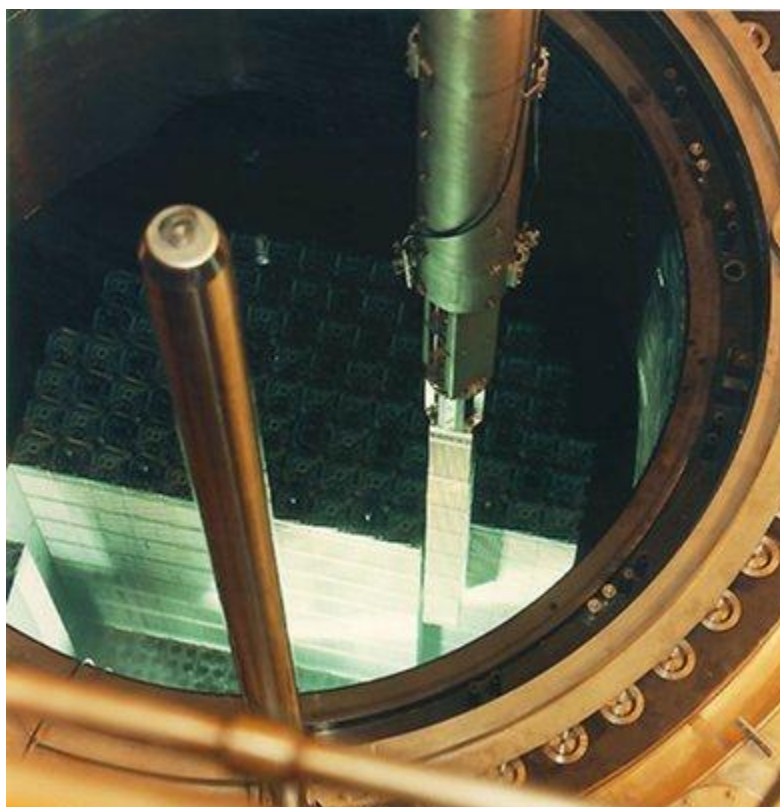
REAKTOR JĄDROWY

Typical Pressurized Water Reactor

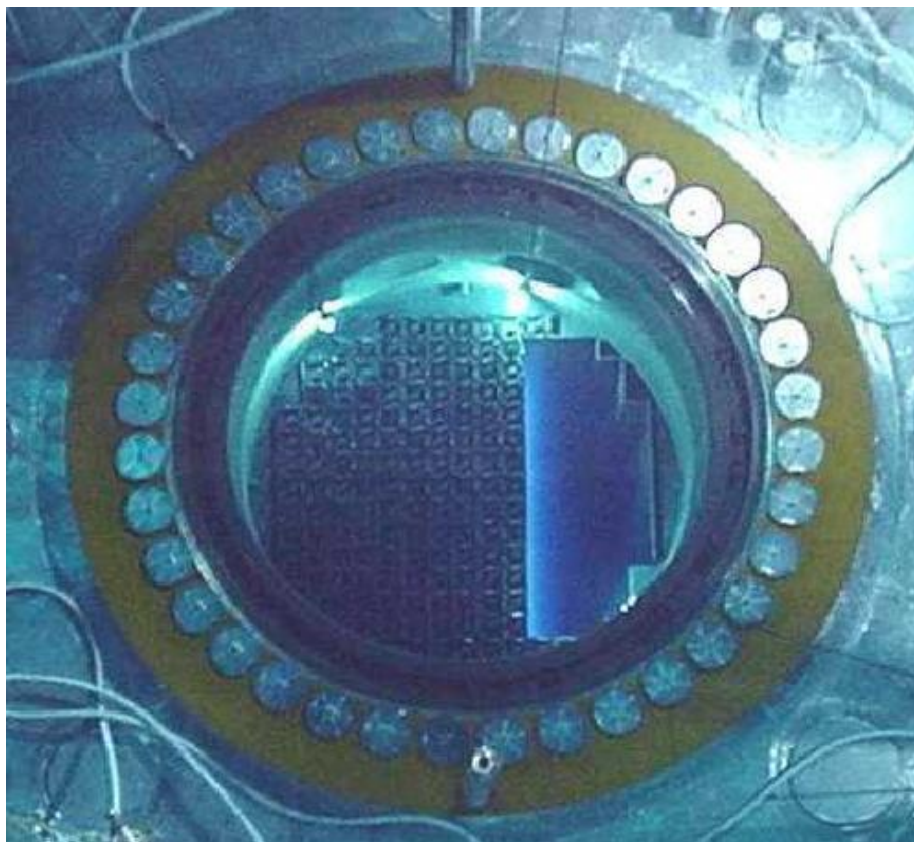


Source: U.S. Nuclear Regulatory Commission

REAKTOR JĄDROWY



REAKTOR JĄDROWY



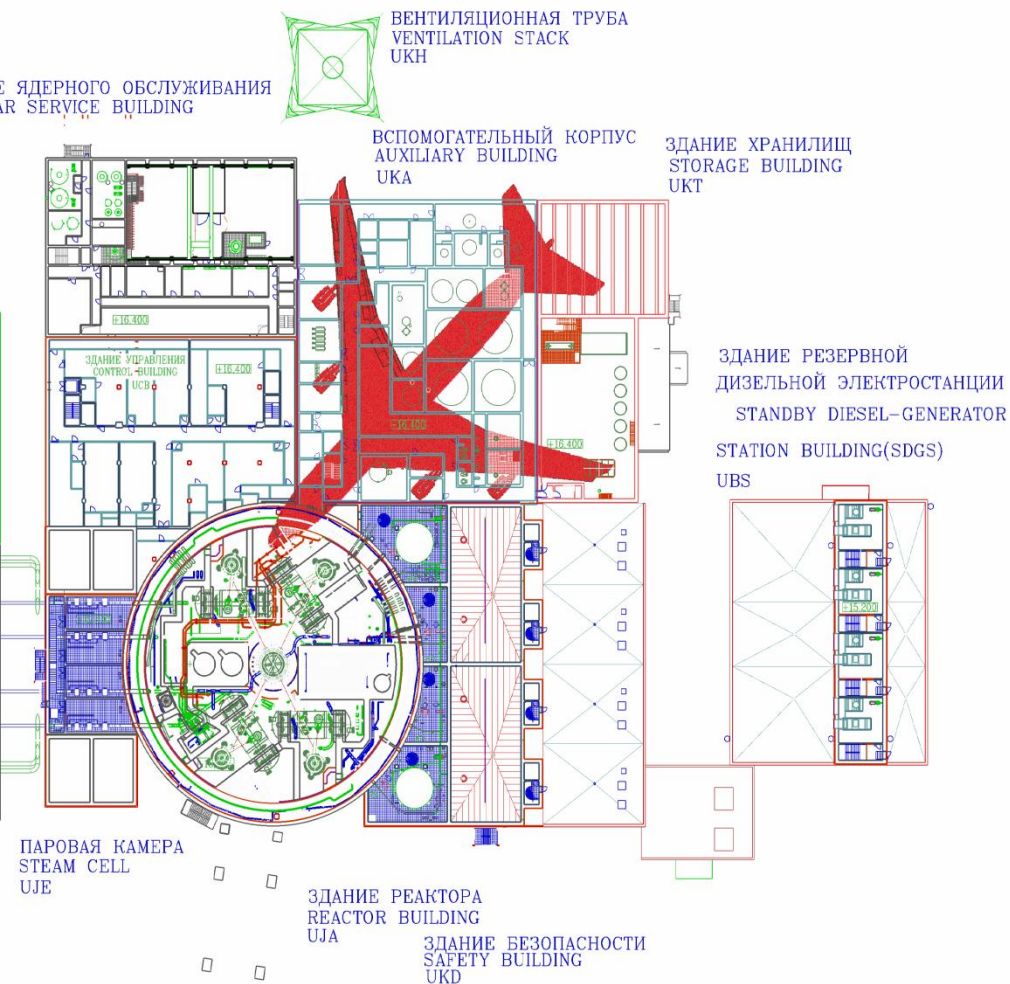
REAKTOR JĄDROWY



PRACA REAKTORA

- Reakcja zachodzi wewnątrz pastylek
- Radioaktywne produkty są zatrzymywane wewnątrz pastylek
- Bariery bezpieczeństwa:
 - Struktura pastylki
 - Ścianka elementu paliwowego
 - Szczelny obieg wody chłodzącej (pierwotny)
 - Obudowa bezpieczeństwa (zbrojony sprężony beton)
- Ciepło jest odprowadzane przez ścianki elementów paliwowych do wody

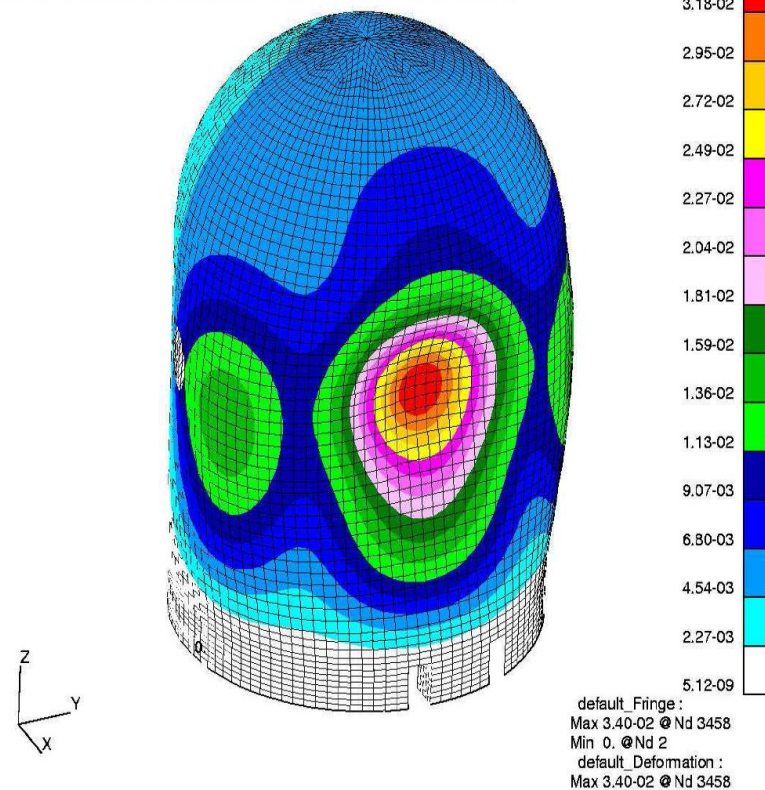
OBUDOWA BEZPIECZEŃSTWA



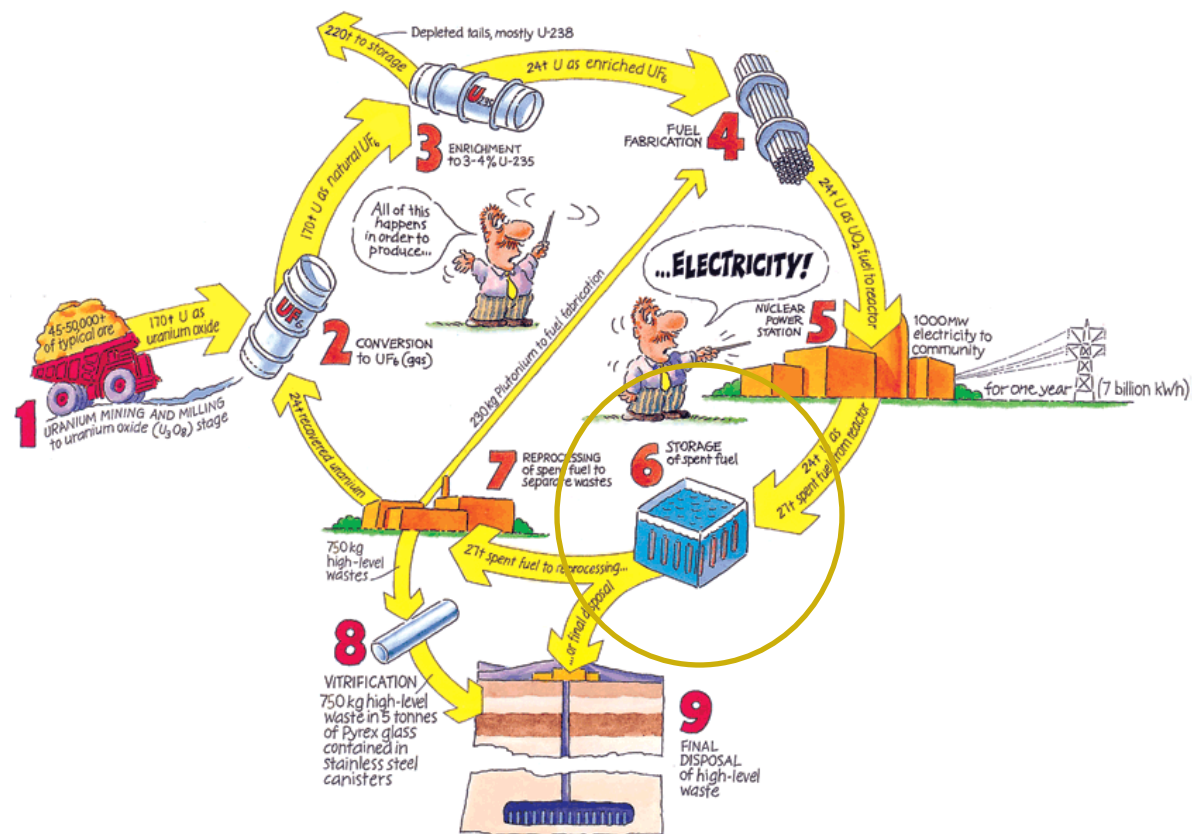
MSC/PATRAN Version 7.6

Fringe: AIRCRAFT_3, Time=0.206: Displacements, Translational-(NON-LAYERED) (MAG)

Deform: AIRCRAFT_3, Time=0.206: Displacements, Translational-(NON-LAYERED)

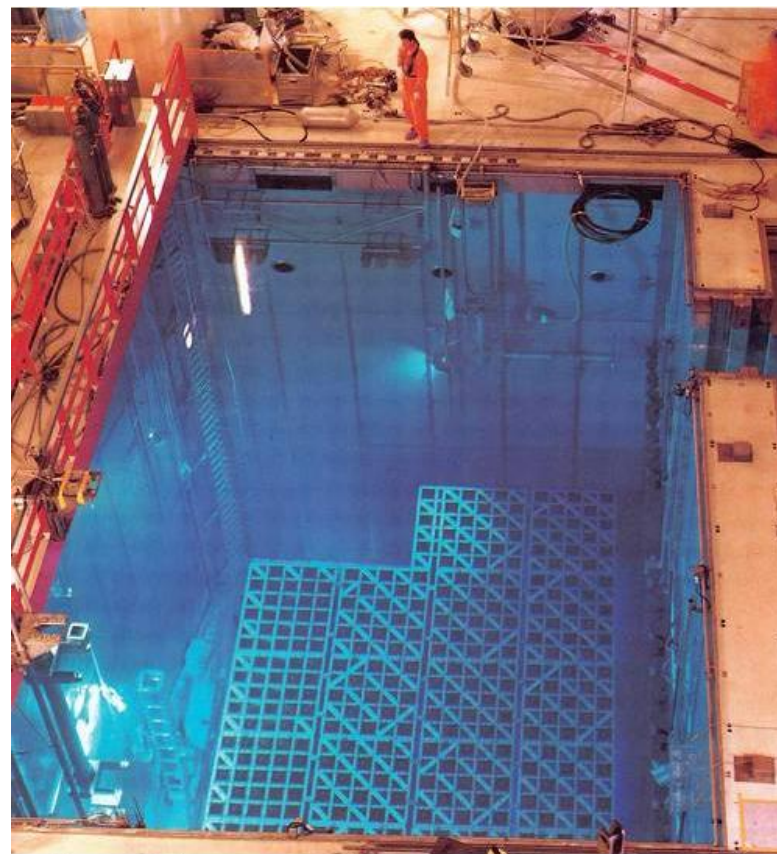


WYPALONE PALIWO

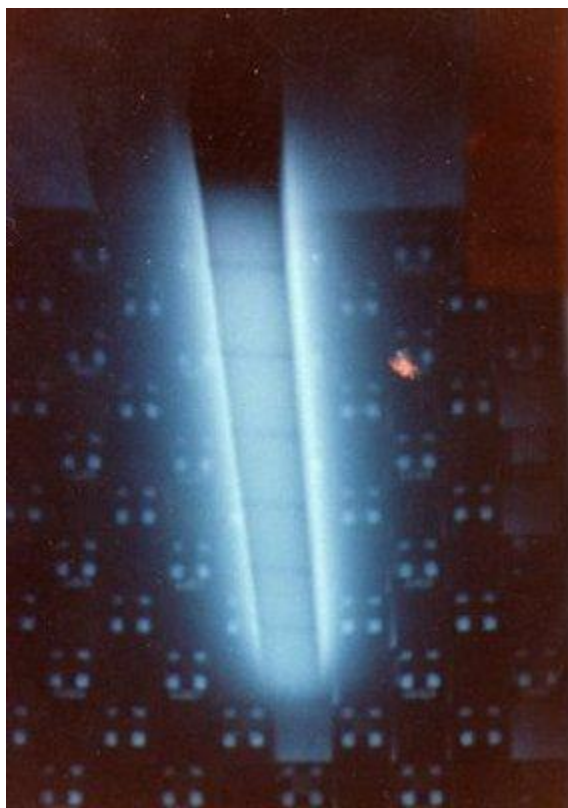


WYPALONE PALIWO

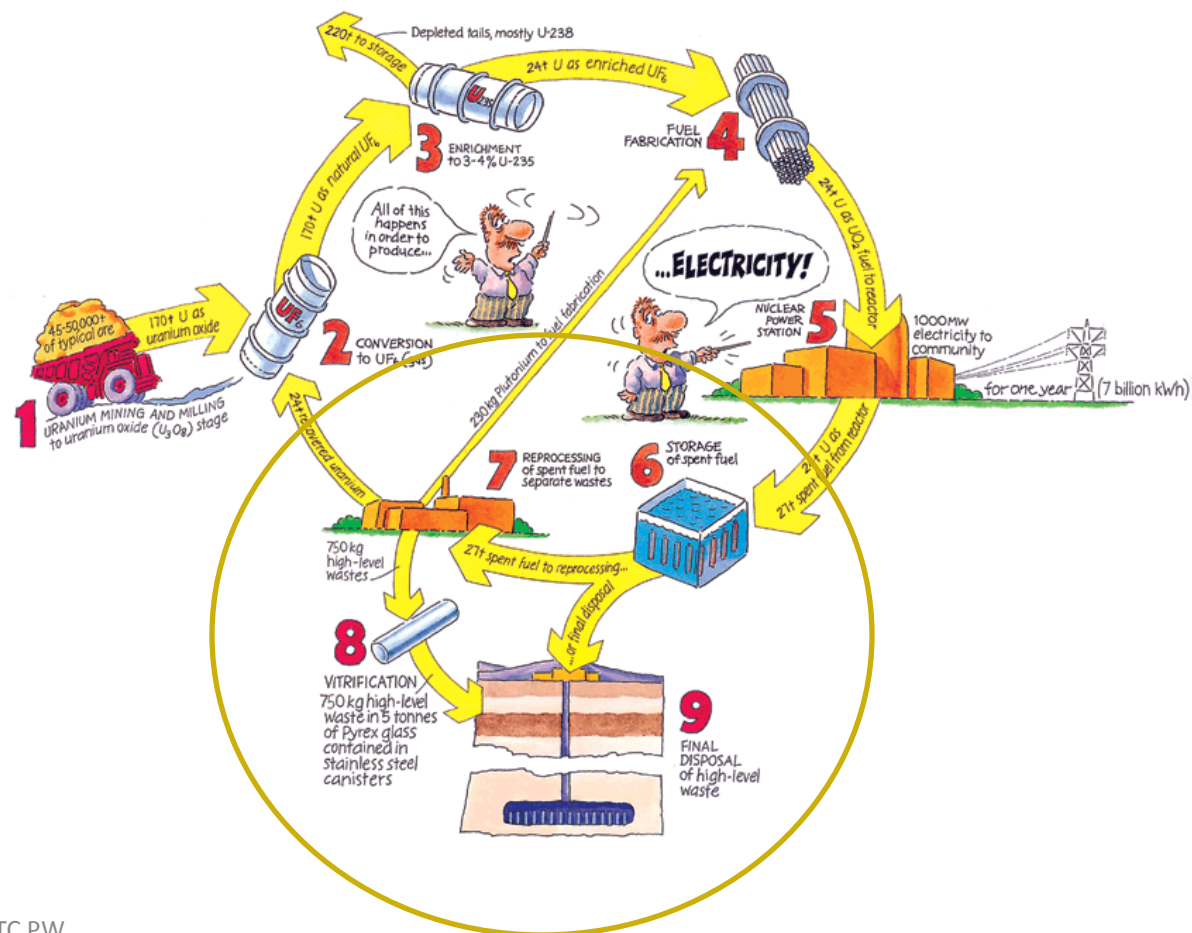
- Zużyte elementy paliwowe zawierają krótko i średniożyciowe produkty rozpadu, które dalej rozpadają się samorzutnie
- Muszą być chłodzone aż ich aktywność odpowiednio opadnie
- Składowanie w basenie przy reaktorze



WYPALONE PALIWO



WYPALONE PALIWO



TRANSPORT WYPALONEGO PALIWA



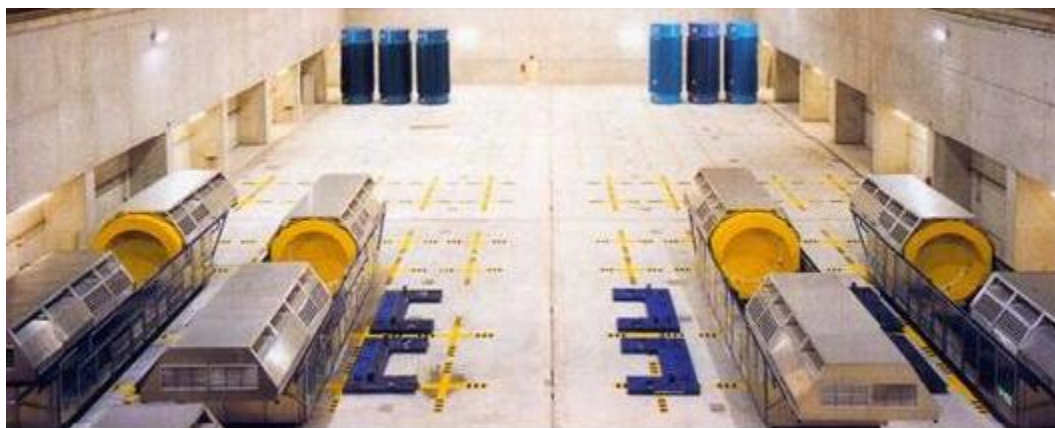
TRANSPORT WYPALONEGO PALIWA



TRANSPORT WYPALONEGO PALIWA



TRANSPORT WYPALONEGO PALIWA



„Spent nuclear fuel cask test” →
youtube.com

PRZETWARZANIE WYPALONEGO PALIWA

- W elementach paliwowych pozostaje pewna ilość niewykorzystanego U-235.
- W elementach paliwowych tworzy się Pu-239.
- Izotopy te można odzyskać i ponownie wykorzystać w procesie produkcji świeżego paliwa.

PRZETWARZANIE WYPALONEGO PALIWA



ODPADY RADIOAKTYWNE

Niskoaktywne

- Ściskane, stężane lub spalane
- Zacementowane w beczkach

Średnioaktywne

- Rozdrabniane
- Zacementowane w beczkach

Wysokoaktywne

- Stopione w bloki szklane

ILE ODPADÓW?

Elektrownia na węgiel brunatny

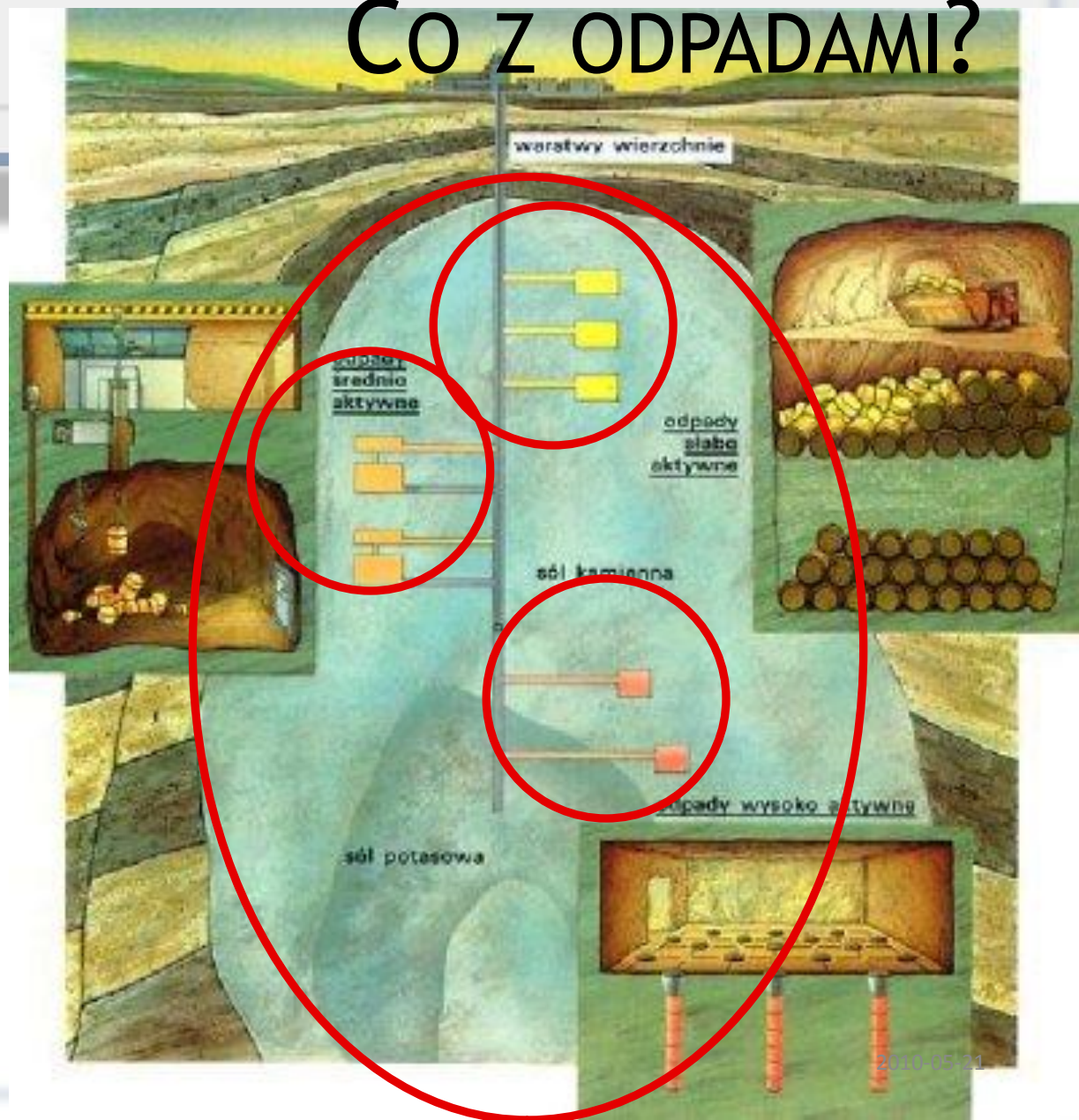
- 290 kg/s węgla
1040 ton na godzinę
25 000 ton na dzień
9 mln ton na rok
- ~3 mln ton popiołu na rok

Elektrownia jądrowa 1300 MW

- 30 ton paliwa na rok
- 55 tysięcy ton rudy na rok
- 30 ton zużytego paliwa na rok
- 4 m³ odpadu
wysokoaktywnego
- 60 m³ odp. średnioaktywnego
- 180 m³ odp. niskoaktywnego



Co z ODPADAMI?



BEZPIECZEŃSTWO

Ekstremalne wymogi projektowe

- Projekt musi uwzględniać środki zapobiegawcze dla najpoważniejszej fizycznie możliwej awarii
- Zabezpieczenia przed upadkami samolotów, dostępem osób niepowołanych itd..

Wybuch jądrowy jest fizycznie niemożliwy

- Zbyt małe wzbogacenie paliwa
- Zbyt mała energia neutronów (za wolny rozwój reakcji)

„Idiotoodporność”

- Systemy bezpieczeństwa niezależne od operatorów
- Systemy bezpieczeństwa oparte o zjawiska fizyczne, a nie o zawodną automatykę

EJ A ŚRODOWISKO

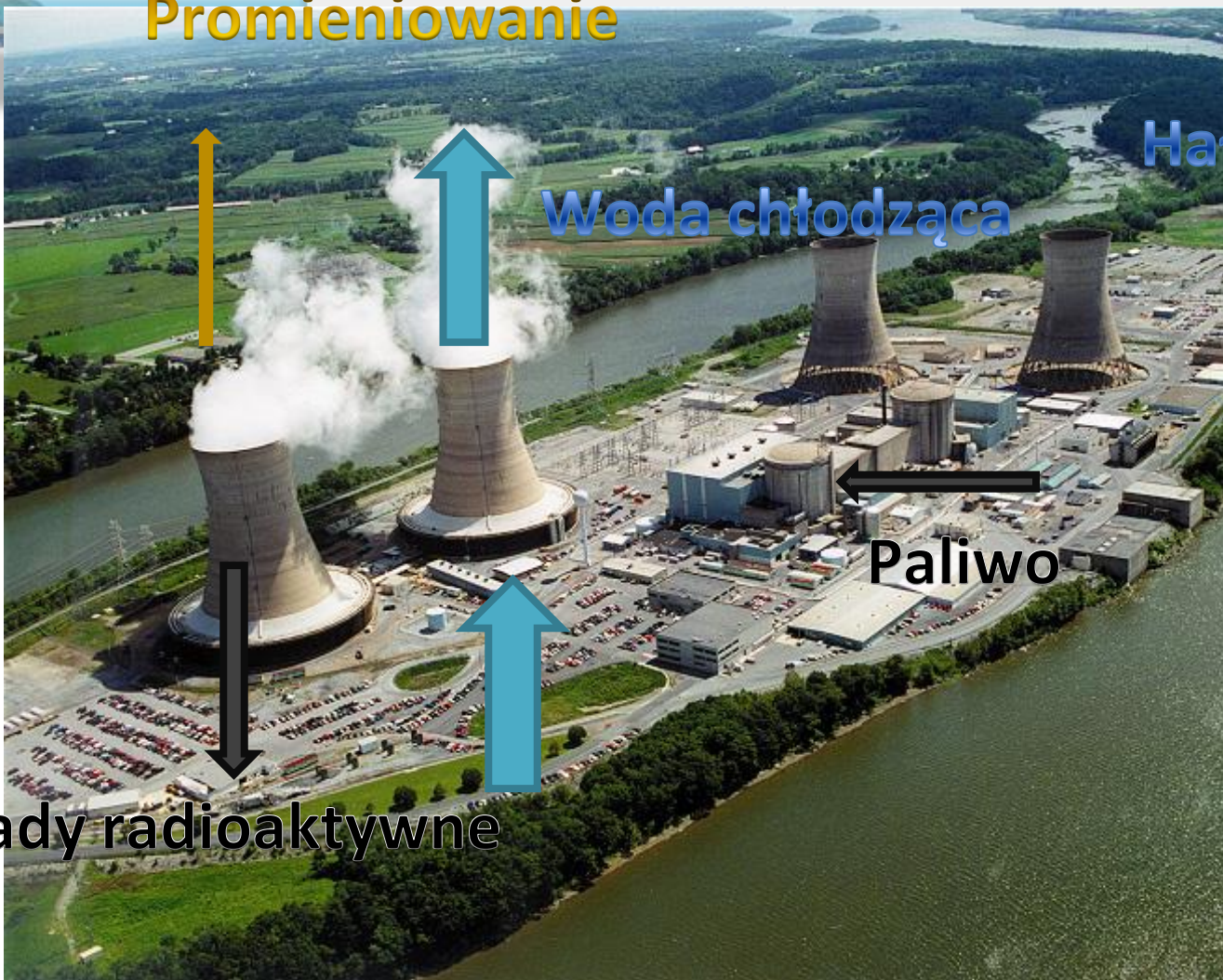
Promieniowanie

Hałas

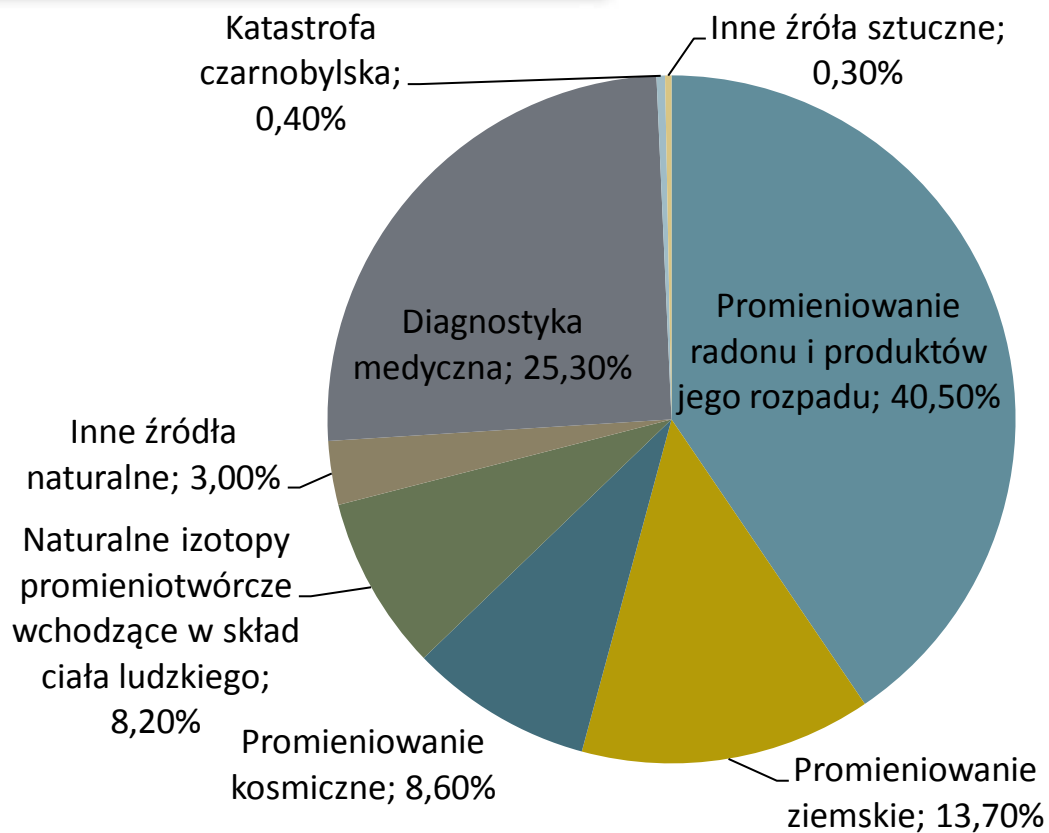
Woda chłodząca

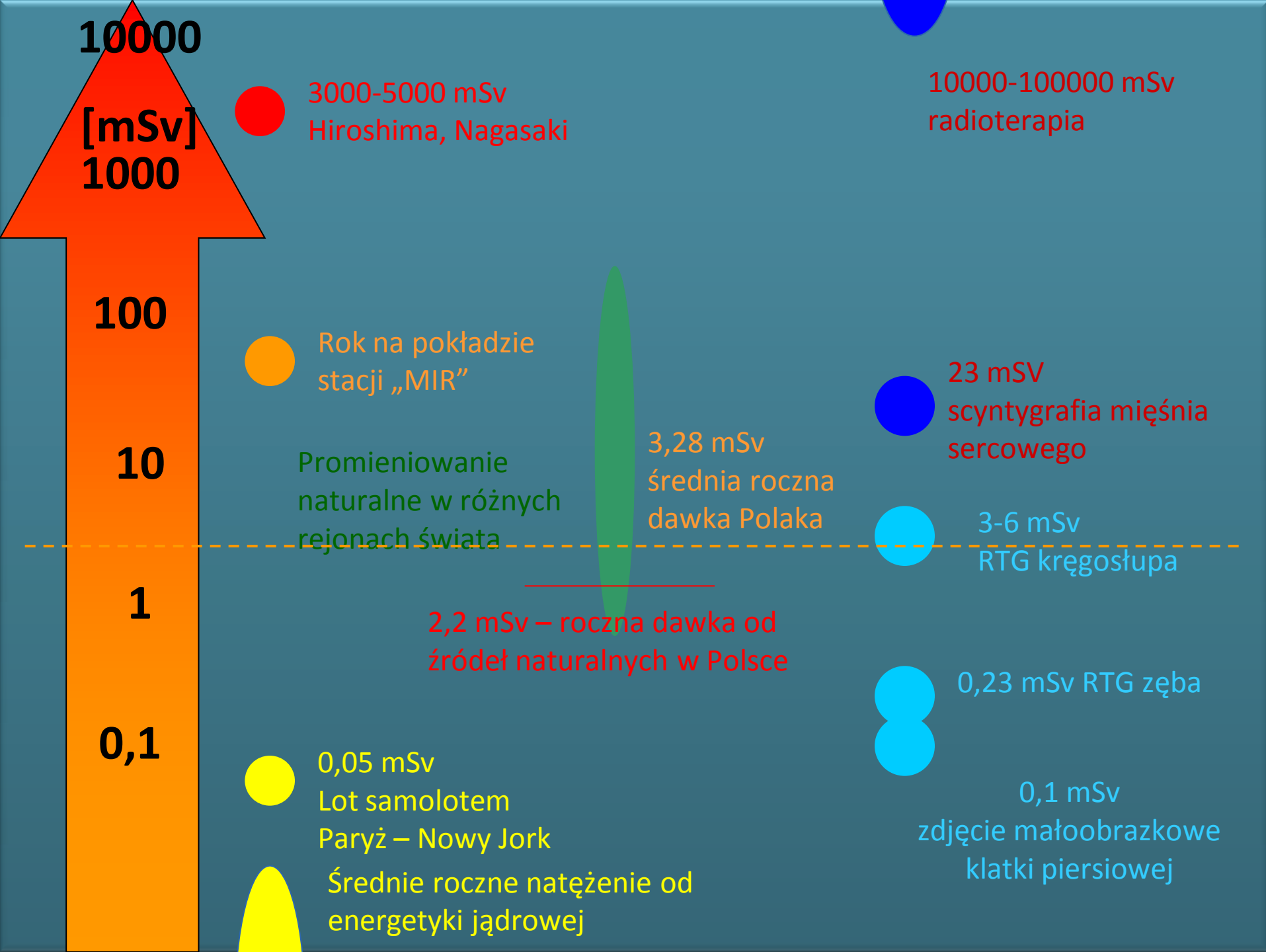
Paliwo

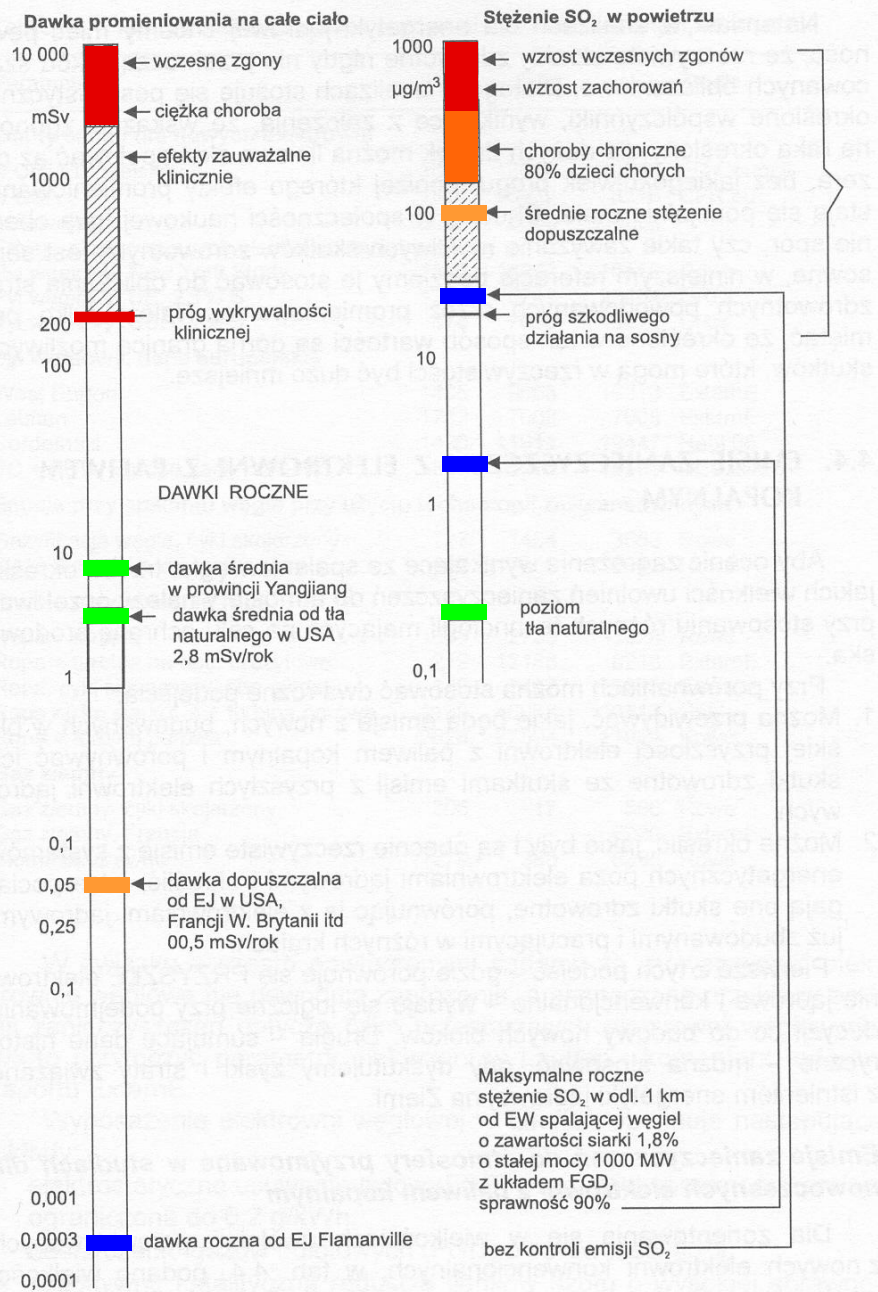
Odpady radioaktywne



ROCZNA DAWKA PROMIENIOWANIA







PODSUMOWANIE - ZALETY I WADY EJ



Zalety:

- Niski udział kosztów zmiennych (mała wrażliwość na ceny paliwa)
- Bardzo ograniczony wpływ na środowisko naturalne, brak emisji gazów szkodliwych
- Paliwo pozyskiwane z krajów stabilnych
- Wysoka niezawodność
- Niskie koszty zmienne w czasie eksploatacji



Wady:

- Wysoki koszt inwestycyjny
- Skomplikowana „utylicacja” zamkniętej EJ
- Problematyczna społecznie
- Mało elastyczna (niemożliwe szybkie zmiany mocy)
- Nie w pełni rozwiązany problem odpadów



DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ!