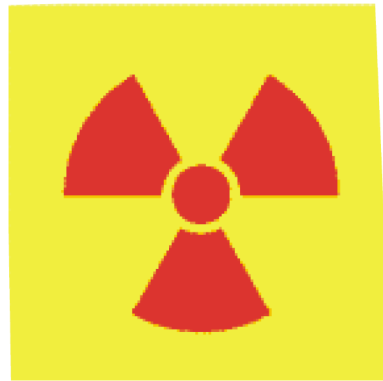


Odpady promieniotwórcze w energetyce jądrowej



Maciej Misiura

Opiekun: dr Przemysław Olbratowski

8.03.2011

Plan prezentacji

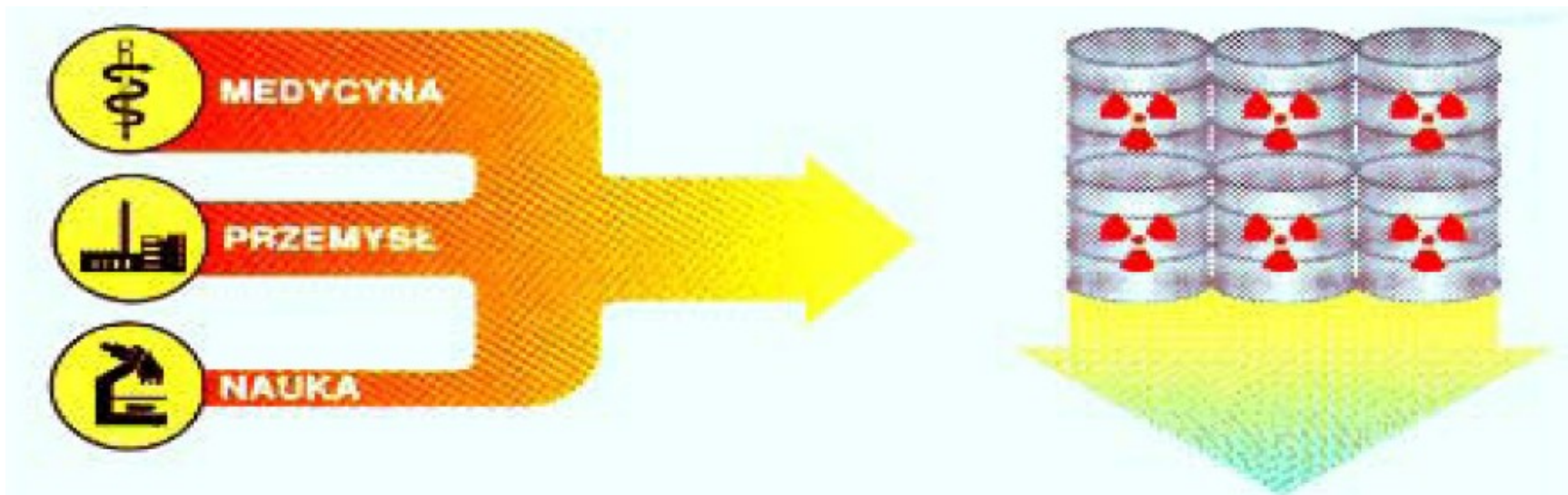
1. Wstęp – co to są odpady promieniotwórcze?
2. Skąd biorą się odpady promieniotwórcze?
3. Podział odpadów promieniotwórczych.
4. Co można zrobić z odpadami promieniotwórczymi?
 - składowanie (pojęcia wityfikacji i bitumizacji),
 - spalanie i transmutacja paliwa.
5. Reaktor naturalny w Gabonie.
6. Transport odpadów promieniotwórczych, incydenty z odpadami.
7. Energetyka konwencjonalna vs. jądrowa w kontekście odpadów.
8. Podsumowanie.

Bibliografia.

Wstęp

Odpady promieniotwórcze – wszelkie substancje i przedmioty o podwyższonej radioaktywności powstałe na skutek działalności człowieka, które nie są przeznaczone do dalszego użytku.

- źródłem odpadów promieniotwórczych są nie tylko elektrownie jądrowe, ale również
 - **medycyna** (np. znaczniki radioaktywne),
 - **przemysł** (np. sprawdzanie poziomu cieczy w nieprzezroczystych pojemnikach),
 - **nauka** (np. napromieniowane tarcze).
- w **energetyce jądrowej**, na niej skupia się to seminarium: produkty spalania paliwa jądrowego oraz inne substancje



Elektrownia jądrowa – nie tylko wypalone paliwo

Inne odpady promieniotwórcze pochodzące z ośrodka jądrowego:

- Elementy konstrukcyjne, takie jak zbiornik reaktora – duży problem przy demontażu,
- Zawory, części pomp, filtry wody w obiegach pierwotnych,
- Filtry powietrza (pierwiastki promieniotwórcze unoszone przez powietrze),
- Wyposażenie pracowni naukowych,
- Pojemniki, buty, fartuchy – wszystko co miało kontakt z materiałem promieniotwórczym,
- Ewentualnie materiały biologiczne, jeżeli na terenie elektrowni prowadzone są również badania w medycynie.

Są to głównie materiały niskoaktywne, stosunkowo łatwe w przechowywaniu i transporcie.

Główny problem – wypalone paliwo jądrowe.



Wyburzanie elektrowni.

Szkodliwość rozpadów promieniotwórczych zależy od
- **aktywności** (liczba jąder razy odwrotność czasu życia).

→ Pośrednia zależność od czasu życia i ilości pierwiastka.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{- prawo rozpadu promieniotwórczego}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad \text{- średni czas życia} \quad t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2.$$

- czas połowicznego rozpadu

$$A(t) = \left| \frac{dN(t)}{dt} \right| = -\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{dN_0 e^{-\lambda t}}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N(t)$$

Zanikanie aktywności w czasie takie samo jak w prawie rozpadu promieniotwórczego.

Szkodliwość materiału dla organizmów żywych zależy również od rodzaju emitowanego promieniowania (alfa, beta, gamma) i sposobu wniknięcia do organizmu.

Powstawanie odpadów promieniotwórczych w energetyce jądrowej.

Ważny komentarz:

Świeże paliwo składa się głównie z U238 oraz U235 (kilka procent). Nuklidy te podlegają rozpadowi α , ale z długim czasem życia (odpowiednio: 4.5 mld lat, 700 mln lat. Czyli świeże paliwo charakteryzuje niska radioaktywność, na tyle, że można by dotykać je gołymi rękoma!

Pierwiastki promieniotwórcze powstają dopiero w trakcie pracy reaktora.

„yellow cake”

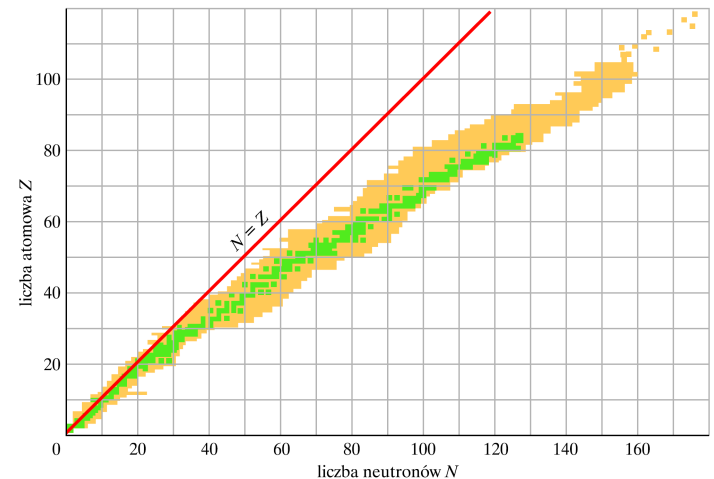


Powstawanie odpadów promieniotwórczych w energetyce jądrowej.

Co może stać się z nuklidem, jeżeli pochłonie on neutron?

- Wywołana neutronami reakcja rozszczepienia, w której powstają neutrononadmiarowe fragmenty rozszczepienia.
- Wychwył neutronów, również prowadzący do jąder neutrononadmiarowych.
(zatrucie reaktora)

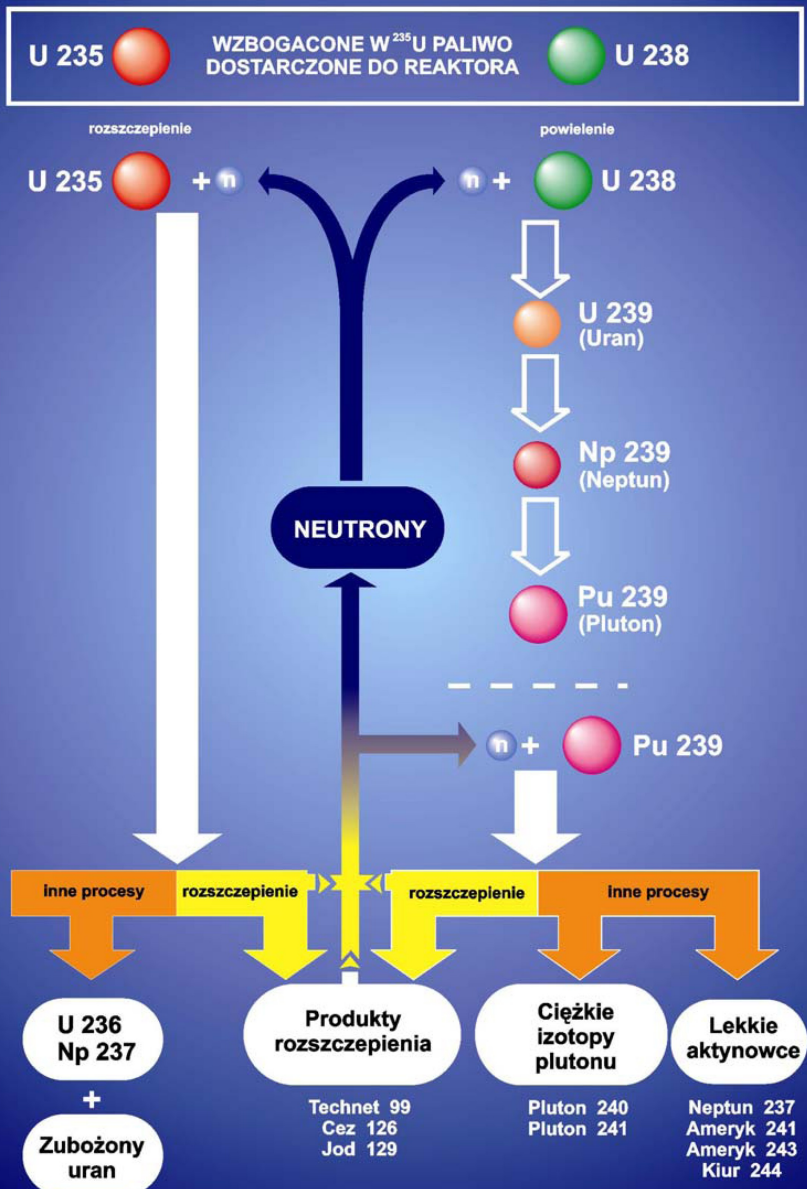
Jądra neutrononadmiarowe przesuwają się w stronę ścieżki stabilności dzięki emisji neutronów lub rozpadowi β^- .



Naturalnie powstają dwie grupy odpadów:

- **Lekkie aktynowce** – z sekwencji wychwyłów i rozpadow beta składników paliwa,
- **Produkty rozszczepienia** – z sekwencji rozszczepień i rozpadow beta.

POWSTAWANIE ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH W REAKTORZE

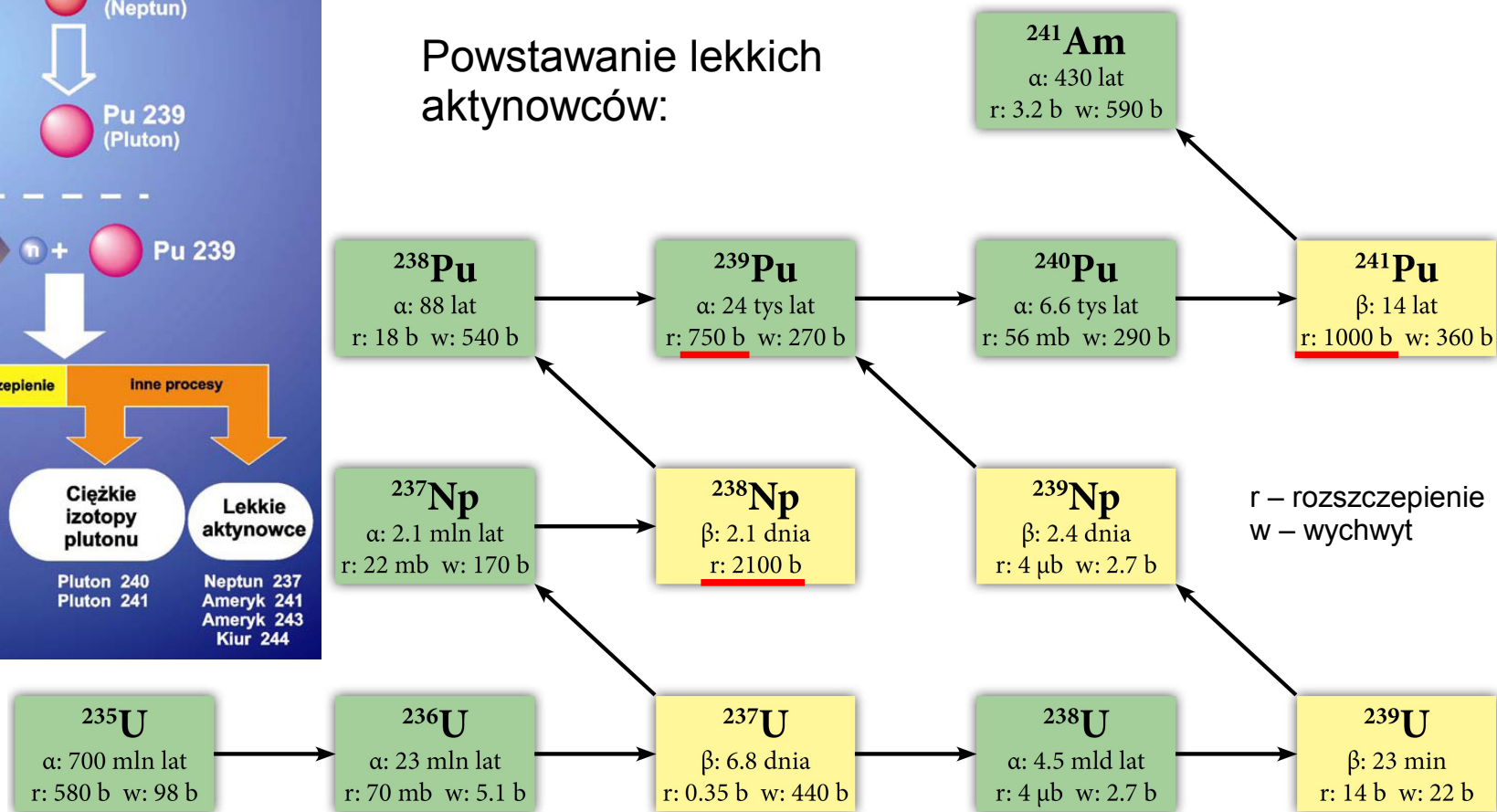


→ Dwie grupy odpadów promieniotwórczych: lekkie aktynowce i produkty rozszczepienia.

→ Pu^{239} – możliwy do wykorzystania jako paliwo (Pu^{241} oraz Np^{237} – wbrew pozorom nie).

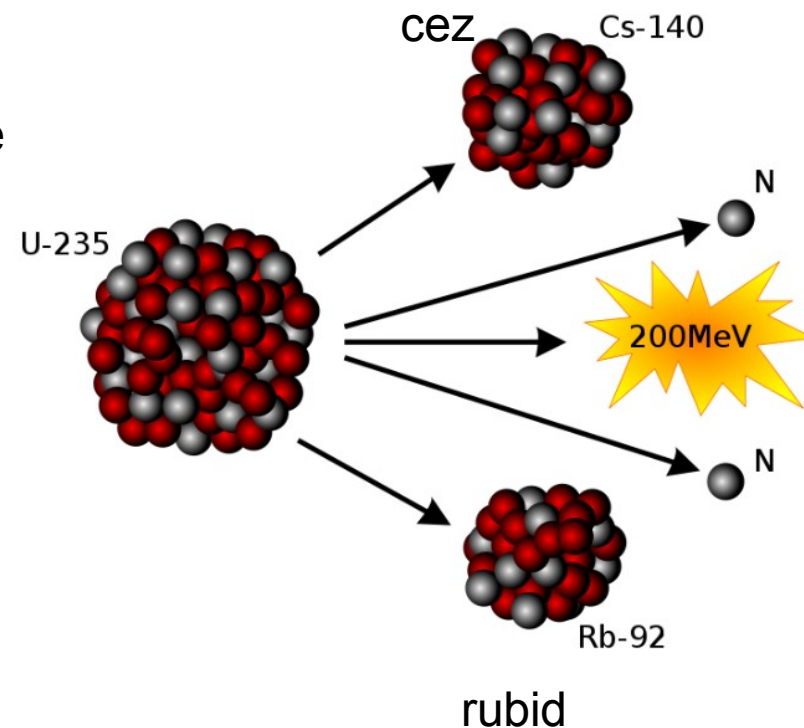
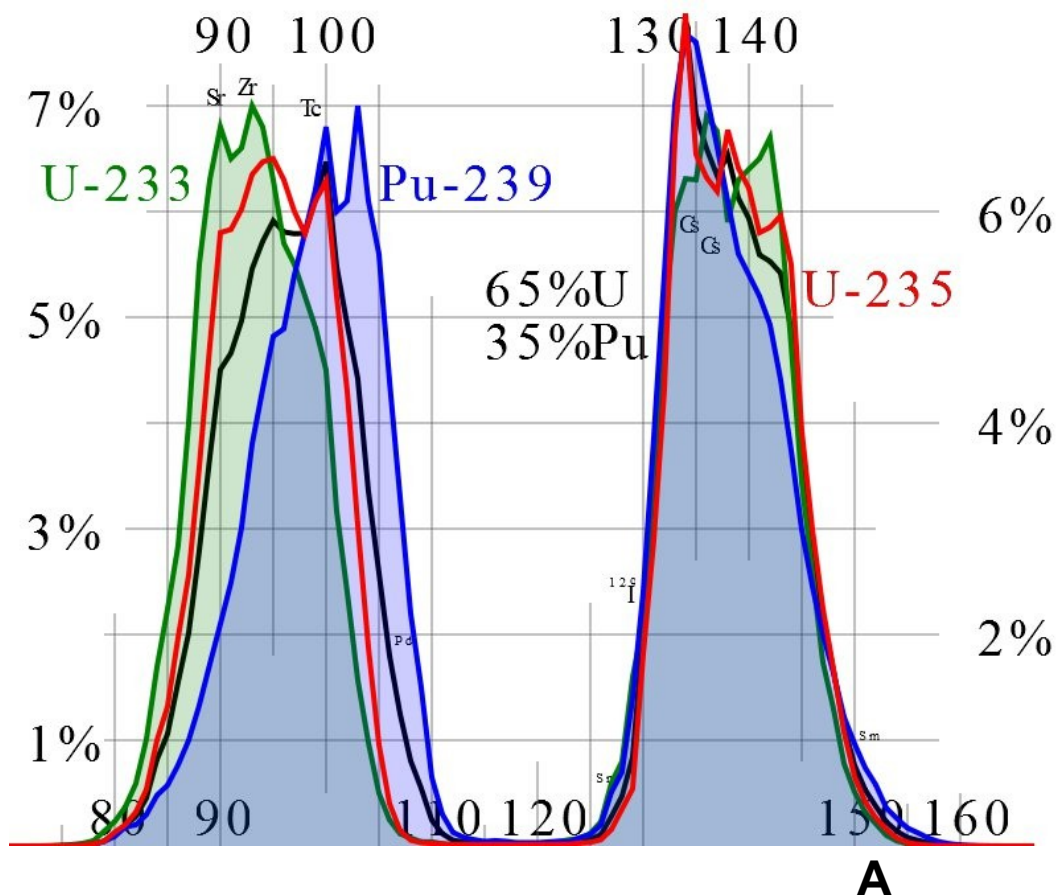


Powstawanie lekkich aktynowców:



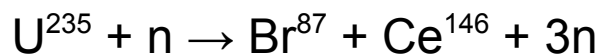
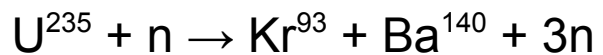
Kilka słów o procesie rozszczepienia.

- Po zderzeniu z neutronem jądro rozpada się na dwie części, emitując kilka neutronów.
- Produkty rozpadu z uranu i plutonu mają masy atomowe rzędu kilkadziesiąt – sto-kilkadziesiąt.



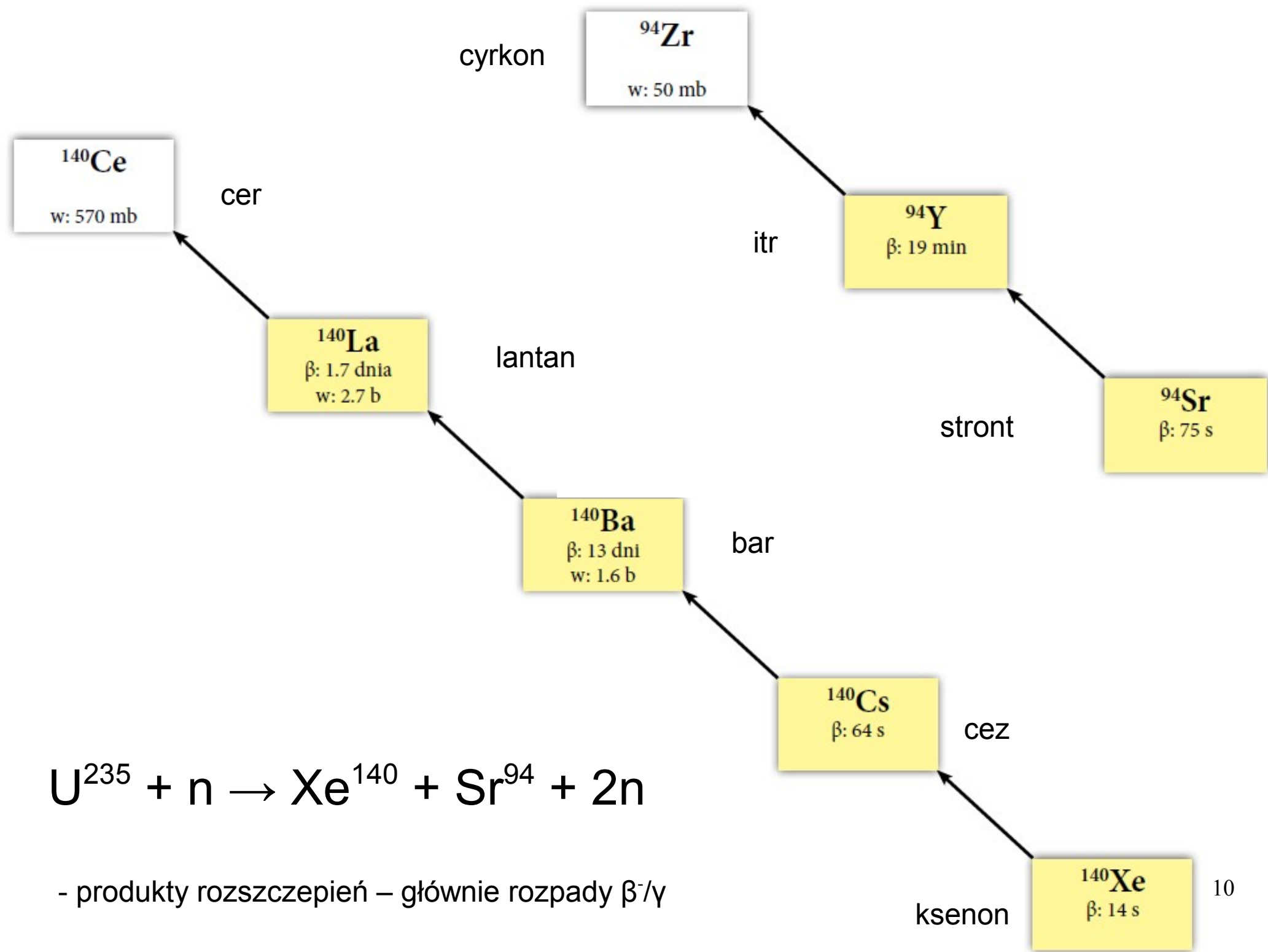
Sr⁹⁰ – 6%
Cs¹³⁷ – 6.2%
Tc⁹⁹ – 6%

→ przykłady reakcji rozszczepień:



krypton, bar
brom, cer
ksenon, stront

Produkty rozszczepienia
podlegają zazwyczaj
rozpadowi β^- .



- produkty rozszczepień – głównie rozpady β/γ

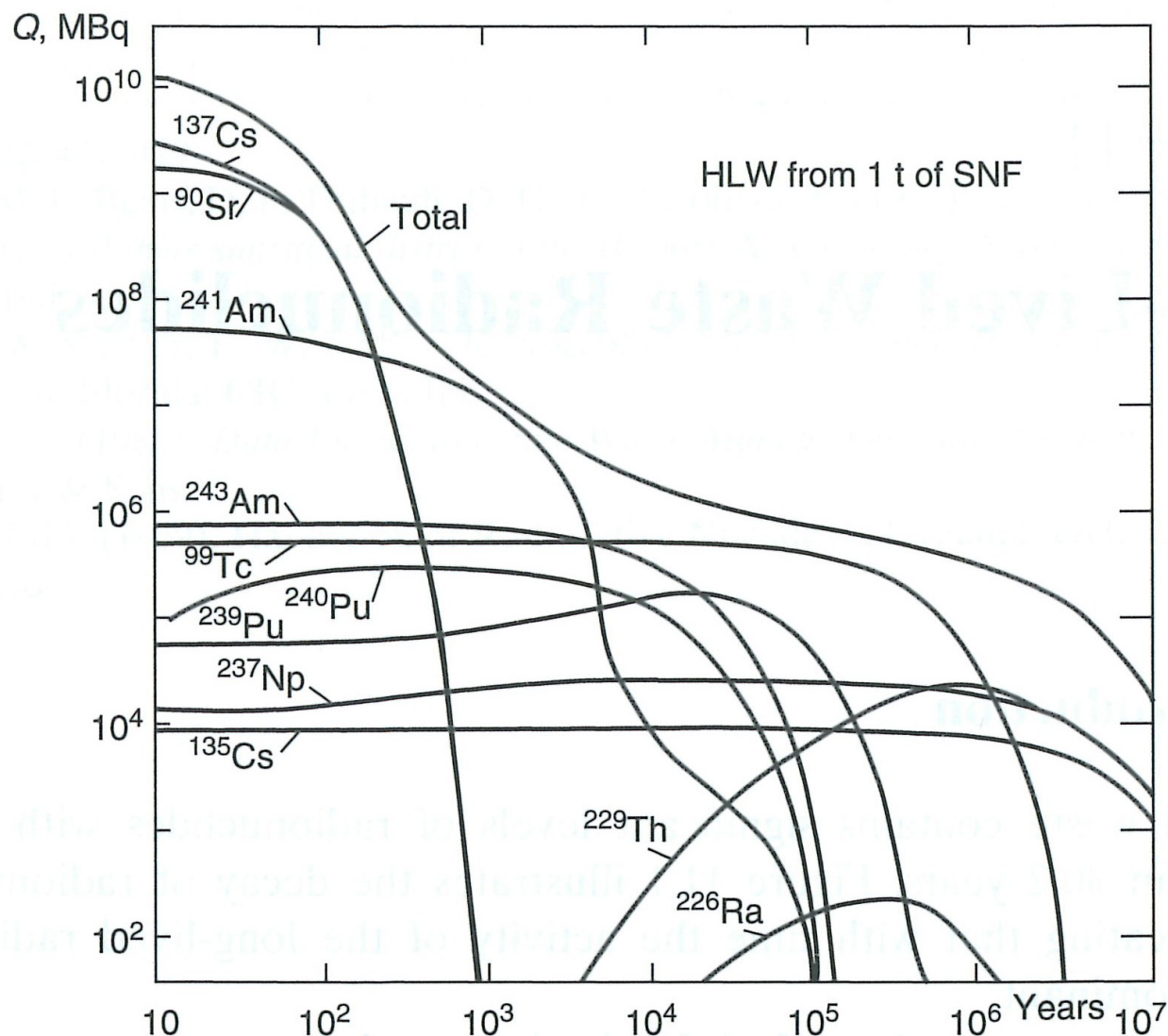
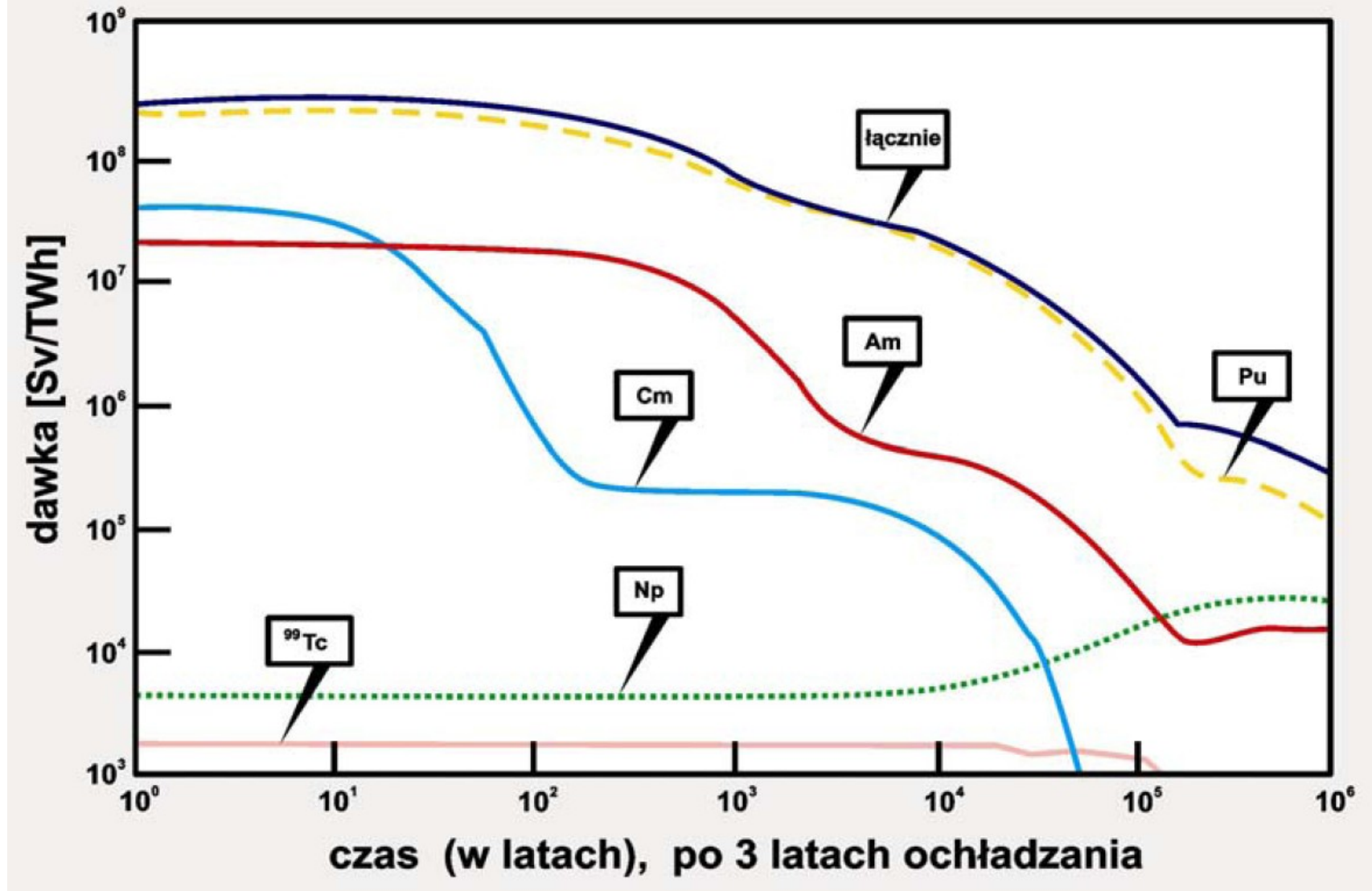


Figure 11.1: Activity of radionuclides in HLW from the reprocessing of SNF with time after reprocessing.

- produkty rozszczepień – głównie rozpady β^-/γ , duża aktywność we wczesnym okresie, głównie Cs^{137} (30.1 lat), Sr^{90} (29 lat), Tc^{99} (210000 lat)
- lekkie aktynowce – rozpady α , dłuższe czasy życia, większa dawka



β, γ 34,000 TBq/t

$\left[\begin{array}{l} 10,000 \text{ }^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}, 6\,600 \text{ }^{90}\text{Sr}/^{90\text{Y}} \\ 5700 \text{ }^{241}\text{Pu} \end{array} \right.$

Po 3 latach od wyjęcia z reaktora

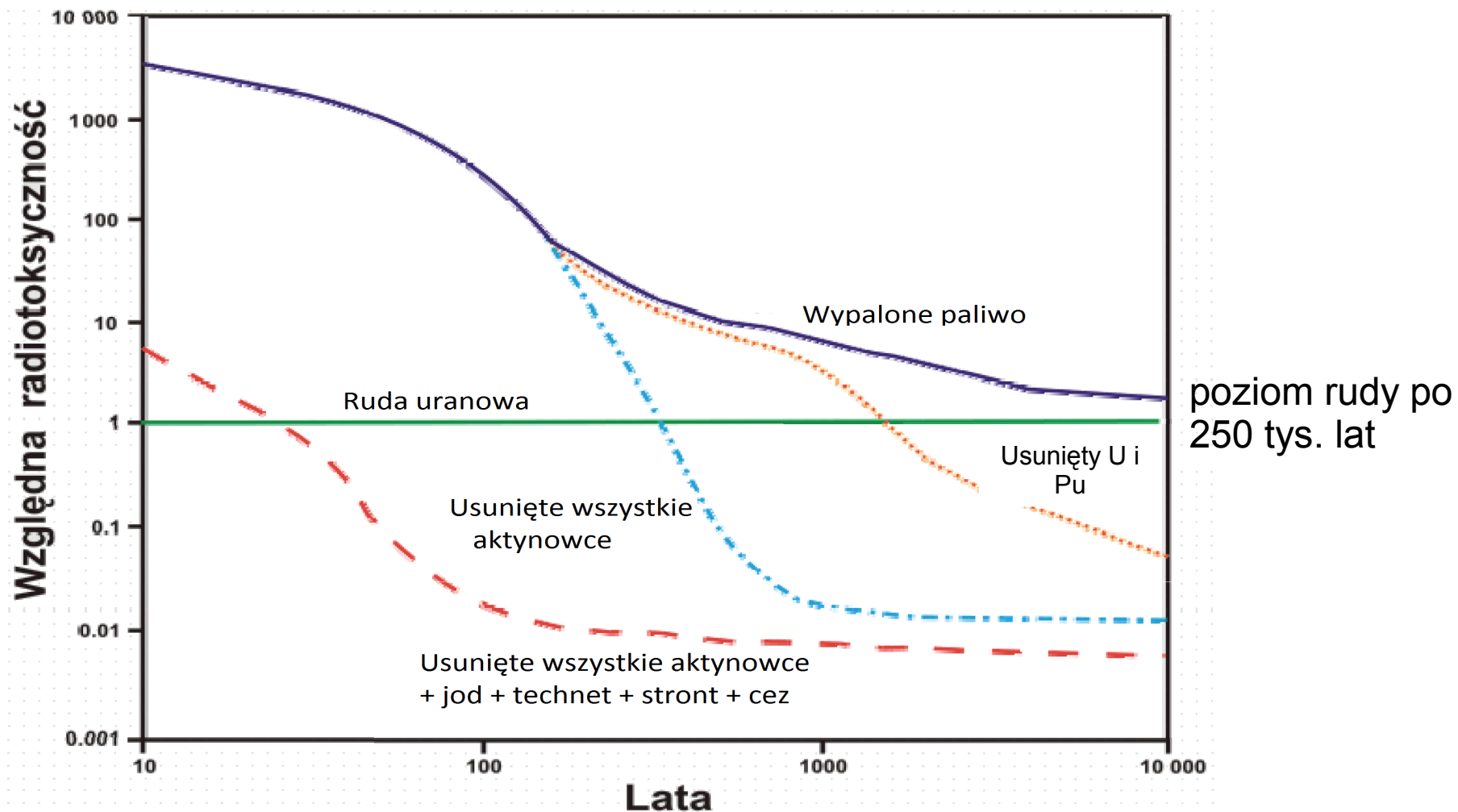
α 600 TBq/t

Największy problem –
lekkie aktywnowce.

Equivalent effective dose

$\left[\begin{array}{l} \text{FP} \rightarrow 10^{-11} \text{ to } 10^{-9} \text{ Sv/Bq} \\ \text{Actinides } \alpha \rightarrow 10^{-7} \text{ to } 10^{-6} \text{ Sv/Bq} \end{array} \right.$

Zmiana toksyczności paliwa w czasie.



Możliwe rozwiązanie – składowanie odpadów, oczekiwanie na zmniejszenie ich toksyczności.

Praktyczny przykład:

1 t paliwa w 3-letniej pracy reaktora PWR o mocy 1 GW.

(w reaktorze o takiej mocy jest ok 80 t paliwa)

Skład „świeżego” paliwa:

- 3.3% U^{235} (33kg)
- reszta: U^{238}

Zużycie pierwiastków w trakcie 3 lat pracy:

25 kg U^{235} oraz 24 kg U^{238} .

W wypalonym paliwie pozostaje odpowiednio:

8 kg U^{235} oraz 943 kg U^{238} .

Dodatkowo:

- fragmenty rozszczepień (35 kg):

- z U^{235} (20.2 kg)
- z Pu^{239} (11.3kg)
- z Pu^{241} (1.8kg)
- z U^{238} (1.7kg)

- 8.9 kg mieszaniny izotopów Pu,

- 4.6 kg U^{236}

- 0.5 kg Np^{237}

- 0.12 kg Am^{241}

- 0.04 kg Cm^{244}

A
K
T
Y
W
N
O
W
C
E



Blok o mocy 1GW.

Powstawanie odpadów promieniotwórczych - podsumowanie.

W odpadach promieniotwórczych możemy znaleźć:

- **produkty rozszczepienia**: rozpady β^- , γ , wysoka aktywność, ale zazwyczaj krótki okres rozpadu Cs, Tc, Sr (wysokoaktywne w początkowej fazie składowania)
- **lekkie aktynowce** (z wychwyty neutronu): głównie rozpad α , wysoka aktywność, długi czas rozpadu (wyjątek np. Pu²⁴¹)
Głównie: Am, Cm, Np, Pu

Główny problem w kontekście długiego przechowywania odpadów – lekkie aktynowce.

Odpady promieniotwórcze w energetyce jądrowej powstają także w innych procesach technologicznych niż spalanie paliwa:

- przerabianie rudy uranowej na produkt handlowy nadający się do użycia w elektrowni jądrowej: po procesie mielenia, w którym należy z rudy wyekstrahować minimalne zawartości uranu, pozostają promieniotwórcze odpady, których ilość jest porównywalna z ilością wydobytego materiału,

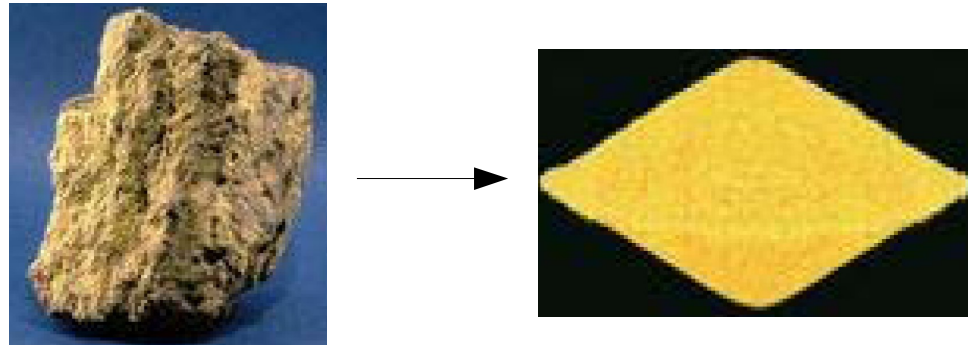


Table 9.4: NFC Front end waste generation (m³/GW year)

Stage	Waste type	Quantity
UF ₆ conversion	Liquids, solids	50
UF ₆ enrichment	Gaseous, liquids, solids	25
UO ₂ fabrication	Liquids, solids	75
MOX fabrication	Liquids	5.6

Niska aktywność.

- proces wzbogacania uranu w U²³⁵ powoduje powstanie zubożonego uranu (wykorzystanie uranu zubożonego jako balastów do łodzi, samolotów, oraz w pociskach artyleryjskich)

Podział odpadów promieniotwórczych (nie tylko dla energetyki jądrowej):

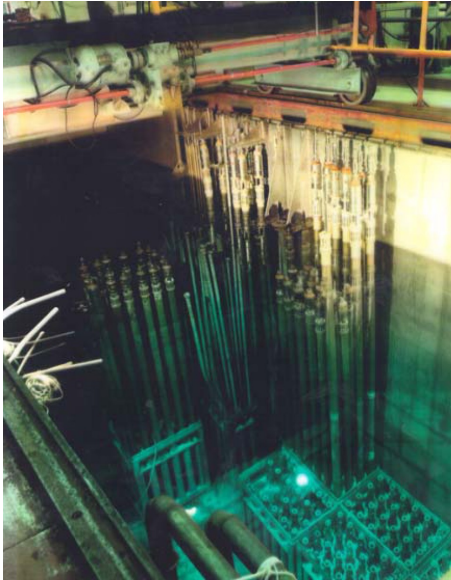
(w literaturze angielskojęzycznej)

- **odpady wysokoaktywne HLW** (High-Level Waste), do tej kategorii zalicza się m.in. przetworzone paliwo z reaktorów jądrowych oraz z produkcji broni jądrowej. Duża elektrownia rocznie produkuje 25-30 ton takich odpadów.
- **odpady pośrednioaktywne ILW** (Intermediate Level Waste) – średnia aktywność
- **odpady niskoaktywne LLW** (Low-Level Waste), z elektrowni takim odpadem będzie grafit.

Table 9.3: Classification of radioactive waste in Russia

Category of waste	Specific radioactivity (Bq/g)		
	Beta radionuclides	Alpha radionuclides	Transuranic* radionuclides
Low level	Less than 10^3	Less than 10^2	Less than 10
Intermediate level	More than 10^3 but less than 10^7	More than 10^2 but less than 10^6	More than 10 but less than 10^5
High level	More than 10^7	More than 10^6	More than 10^5

*Transuranic radionuclides have atomic numbers of 93 or greater



- przykład odpadów wysokoaktywnych w Polsce –
odpady z reaktora Maria w Świerku

- Dwa czynniki decydujące o problematyczności odpadów: koncentracja i czas życia
- Granica długożyciowe-krótkożyciowe: czas połowicznego rozp. = 30.2 lat
- Czasami wyróżnia się również nuklidy o średniej długości czasu życia, wówczas granica wynosi 210'000 lat.

Co można zrobić z odpadami promieniotwórczymi?

- **Przechowywać** w bezpiecznych składowiskach aż aktywność substancji zmniejszy się do akceptowalnego poziomu (przy czym w przypadku długożyciowych pierwiastków może to oznaczać składowisko ostateczne).
- **Przetwarzać** zużyte paliwo, tak aby nadawało się do ponownego użycia, lub przetwarzać tak, aby zwiększył się udział krótkożyciowych pierwiastków w substancji. Pojęcia transmutacji, spalania odpadów promieniotwórczych.



Można zdefiniować ogólne zasady przy przechowywaniu oraz przetwarzaniu odpadów promieniotwórczych:

- Rozdzielanie (segregowanie) odpadów np. na ciekłe i nadające się do rozdrobnienia i sprasowania,
- Zmniejszenie objętości zajmowanej przez odpady,
- Zestalenie i pakowanie w sposób zapewniający stabilność chemiczną i fizyczną,
- Izolowanie odpadów od człowieka i środowiska naturalnego przez np. składowanie w odpowiednich strukturach geologicznych.

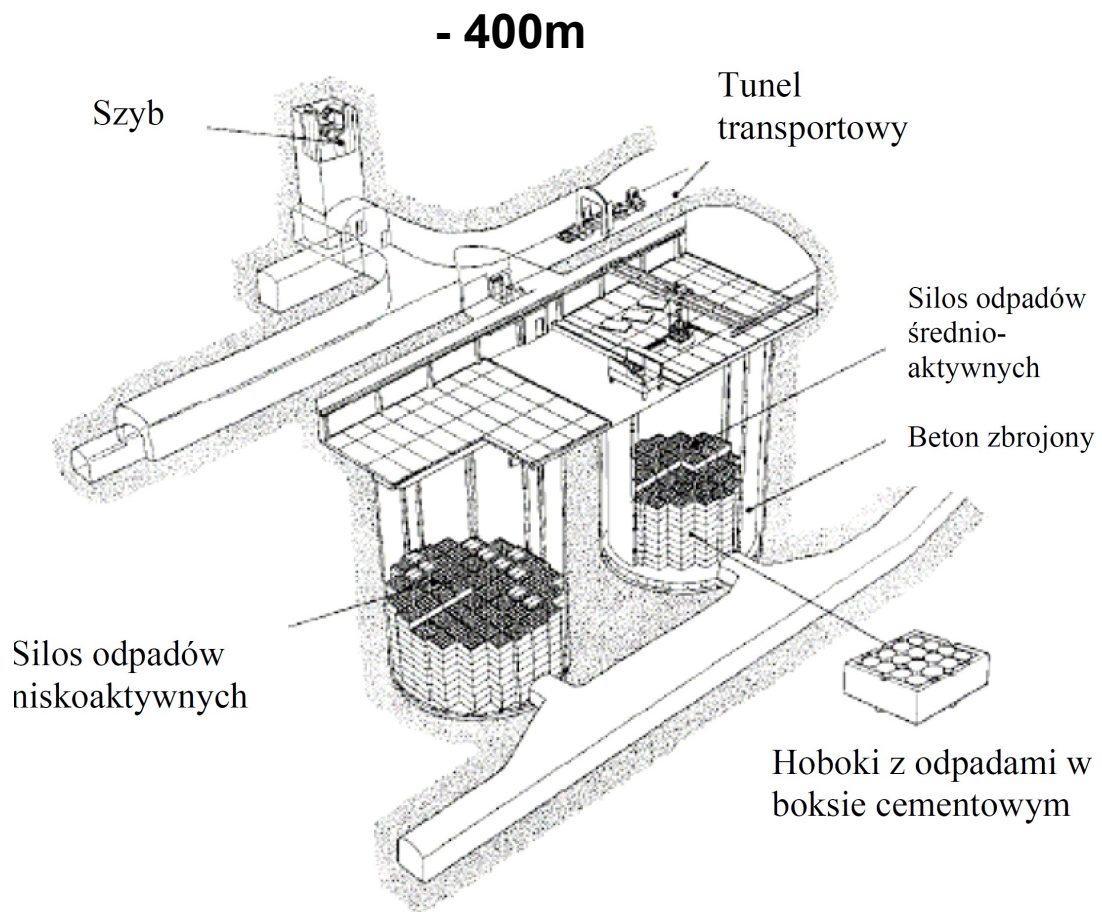
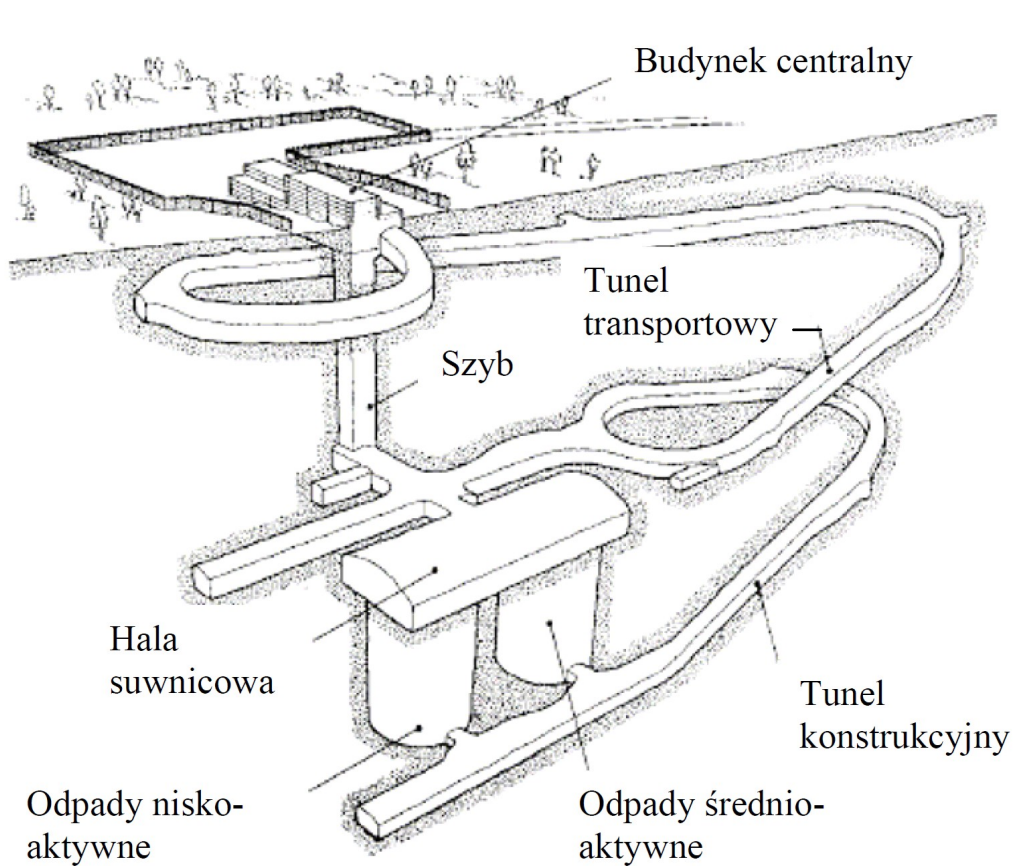


Przechowywanie (składowanie) odpadów promieniotwórczych.

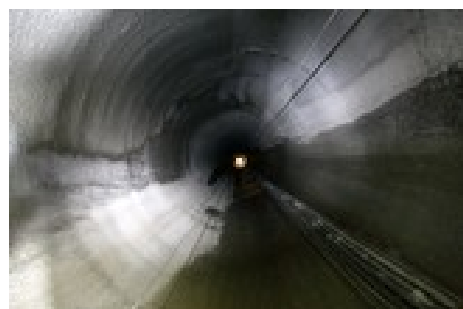
→ **Zapobieganie rozprzestrzenieniu pierwiastków przez:**

- Tworzenie trudno rozpuszczalnych związków, które mają wiązać odpady promieniotwórcze,
- Materiał wiążący zapobiegający rozsypaniu, rozproszeniu, wymywaniu substancji promieniotwórczych. Spoiwem wiążącym może być np. cement, asfalt lub masa ceramiczna.

- **Opakowanie odpadów** – zabezpiecza je przed uszkodzeniami mechanicznymi, działaniem czynników atmosferycznych i przede wszystkim przed kontaktem z wodą.
- **Struktura geologiczna terenu** – teren asejsmiczny, niezatapialny (np. przez powodzie), mało przydatny gospodarczo, poziom wód gruntowych musi być kilkanaście metrów poniżej poziomu składowiska.
- **Betonowa konstrukcja składowiska** – dodatkowe zabezpieczenie odpadów przed działaniem warunków atmosferycznych, takich jak deszcz (i ewentualne wymywanie odpadów).
- **Bitumiczna warstwa impregnująca** – zabezpiecza np. pojemniki przed działaniem korozji przez wody opadowe.



Przykład podziemnego składowiska odpadów VJL w Olkiluoto w Finlandii.
(w budowie, 2012)



Postępowanie z odpadami wysokoaktywnymi:

- **witryfikacja** – zatapianie w szkłe, wynikiem tego procesu jest powstanie trwałych i łatwych do przechowywania cylindrów o strukturze szkliva – wysoka odporność na wodę i działania mechaniczne



Ilość materiałów/
życie jednego człowieka

- w praktyce takie cylindry nie mają kontaktu z wodą, umieszczamy je w pojemniki miedziane (zapewniające odporność na działanie chemiczne różnych pierwiastków) oraz w żeliwne, zapewniające odporność na działanie sił zewnętrznych

Zatapianie odpadów w bitumieniu.

- Zatapianie odpadów w substancji, z której wytwarzany jest np. asfalt.
- Technika odpowiednia do substancji rozpuszczalnych w wodzie.
- Umieszczanie odpadów w roztopionym bitumieniu, odpady są wiązane, gdy bitumen stygnie.
- Bitumen znajduje się np. w okolicach naturalnego reaktora Oklo w Gabonie (temat będzie rozwinięty w dalszej części seminarium).
- Zalety – nierozpuszczalność w wodzie, niska dyfuzja wody, powolne starzenie, dość niski koszt wytworzenia.



Bitumen.

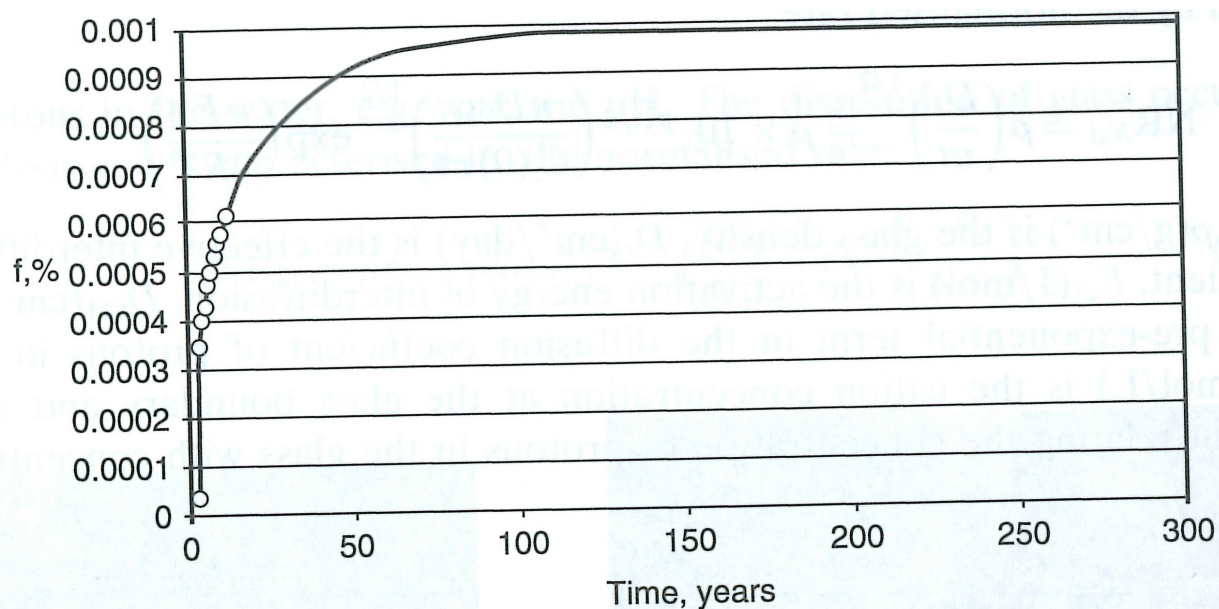
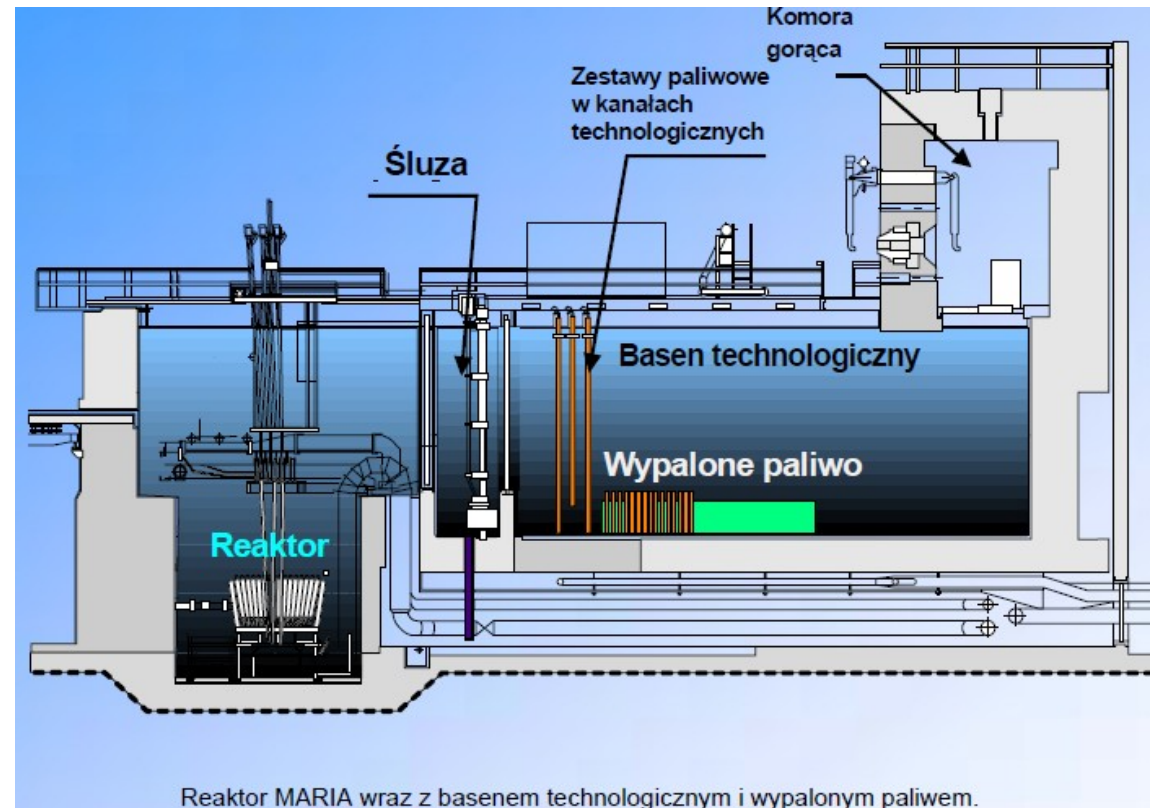
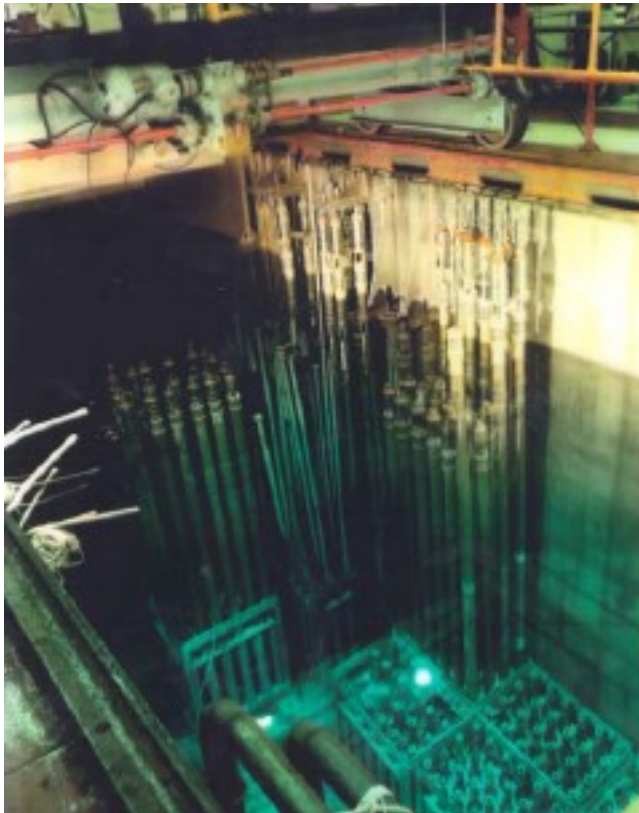


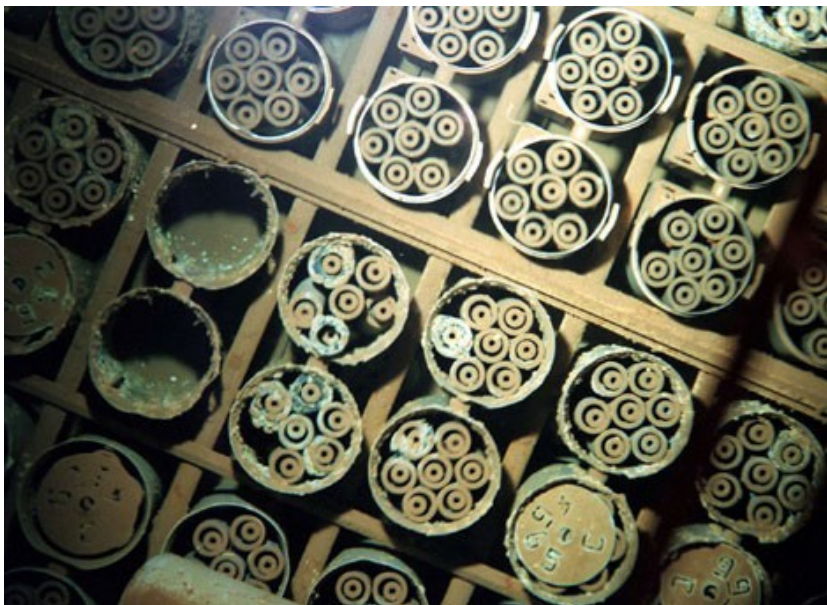
Figure 20.3: Calculated (line) and measured (circles) percentage (f) of radionuclides released from bituminised radioactive waste with time under conditions of near-surface disposal.

Postępowanie z wypalonym paliwem z reaktora.

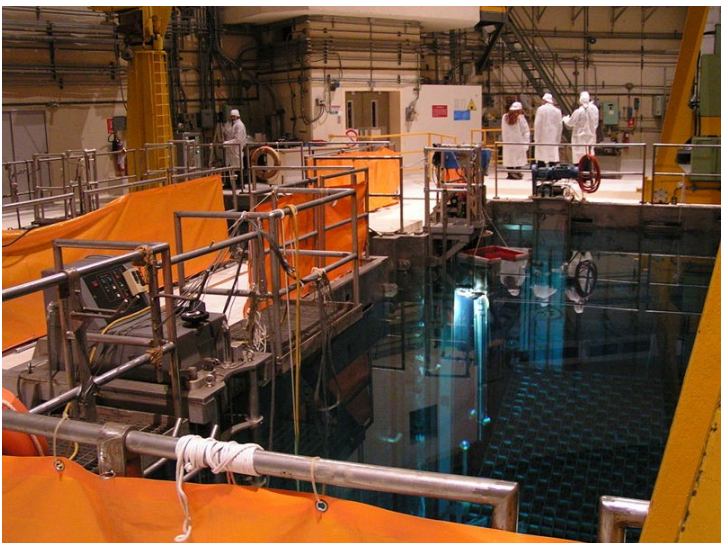
- Przechowywanie przez kilka lub kilkadziesiąt lat wypalonego paliwa w basenie reaktora lub na terenie elektrowni, aby rozpadły się krótkożyciowe nuklidy. Plusem takiego rozwiązania jest schładzanie paliwa przez wodę.
- Po tym okresie możliwe są dwie drogi → przechowywanie lub recykling paliwa.



Wypalone paliwo składowane w reaktorze Maria. Szczelność zbiorników jest sprawdzana przez²⁵ badanie wody otaczającej zużyte paliwo.



Spalone paliwo jądrowe przechowywane w jednej z elektrowni na terenie USA.



Basen na spalone paliwo.

Przy zagadnieniach przechowywania odpadów ważna jest akceptacja lokalnej ludności - NIMBY.

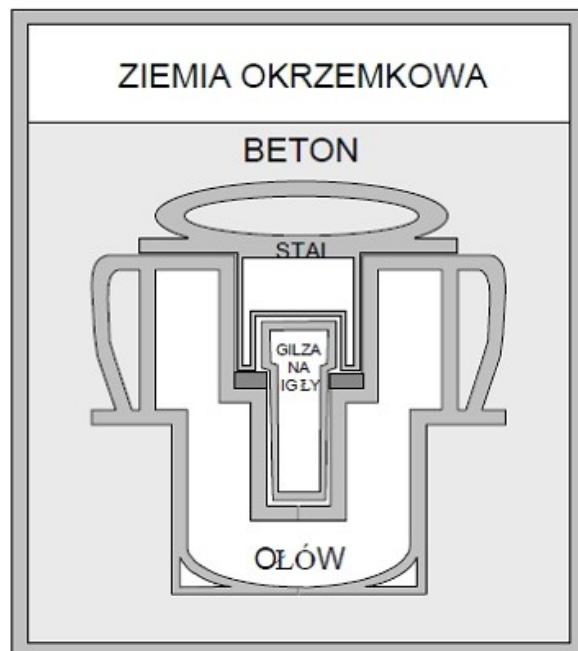
Cały czas nie istnieje tzw. ostateczne składowisko odpadów promieniotwórczych.

W Polsce przetwarzaniem odpadów promieniotwórczych zajmuje się Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych (ZUOP) w Świerku. Składowisko znajduje się w Różanie na Mazowszu (od 1961).

- Odpady nisko- i średnio-aktywne, zamknięte źródła promieniowania, ciekłe odpady (np. z rektora Maria). Ok 40% przechowywanych odpadów pochodzi z ośrodka w Świerku, pozostałe głównie z ośrodków medycznych. Często przetwarzane są również wycofane z użytku czujki dymu.
- Przechowywanie odpadów - Centralna Składowica Odpadów Promieniotwórczych (CSOP) w Różanie. Także przetwarzanie odpadów, np. zatapianie ich w asfalcie (do 2001, później cementowanie), zatapianie w żywicy, prasowanie odpadów promieniotwórczych



Prasowanie odpadów stałych.



Pojemnik na źródła radowe:
- zatapianie igieł w
szklanych ampułkach,
następnie zamykanie z
hermetycznym pojemniku.



Demontaż czujek dymu.

Przykładowe ceny:

Ciekłe: odpady niskoaktywne 2025zł/1m³, odpady wysokoaktywne 6148zł/1m³

1 czujka dymu – 71zł, 1 źródło (do 400Bq) – 140zł, pranie skażonej odzieży 111zł/1kg

Składowisko odpadów w Różanie:

- Różan nad Narwią, ok. 90 km od Warszawy na terenie dawnego fortu wybudowanego przez Rosjan w 1905 roku (zalety: grube ściany, fosa – dzisiaj zabetonowana).
- Pokłady gliny stanowiące barierę dla odpadów, wody gruntowe kilkanaście metrów pod składowiskiem.



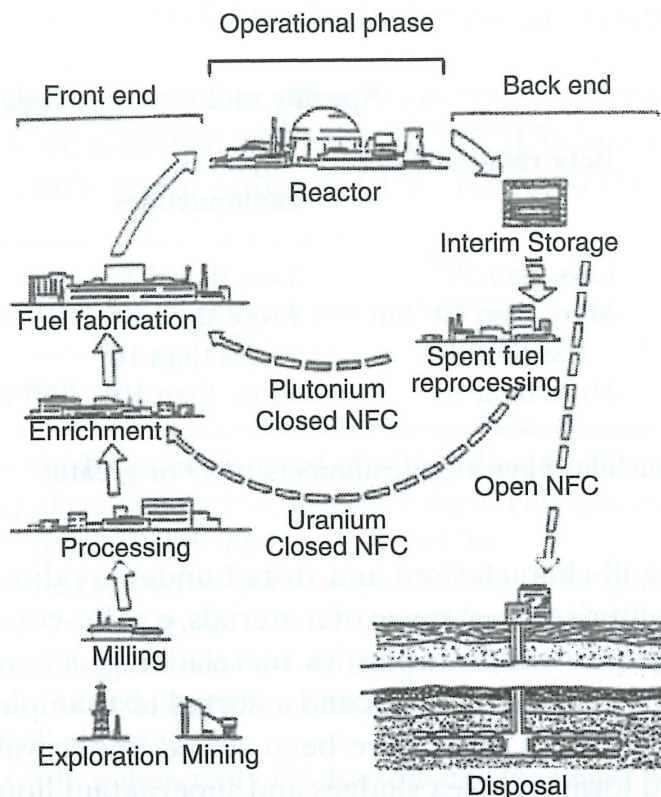
Przechowywanie odpadów promieniotwórczych w Polsce a powstająca elektrownia.

- Składowisko w Różanie zaczyna się zapełniać (zbierane tam są odpady z ostatnich 50 lat), do tego nie jest dostosowane do przyjmowania odpadów wysokoaktywnych, które powstawałyby w cyklu paliwowym pracującej elektrowni.
- Konieczne jest zaplanowanie budowy nowego składowiska. Wytypowano 5 miejscowości (Łanięta, Damasławek, Kłodawa, Jarocin, Pogorzel). Decydujące znaczenie miało podłoże geologiczne: sole lub pokłady iłowe.
- Składowisko powinno być gotowe w 2020 (plany PAA).



Przetwarzanie wypalonego paliwa jądrowego.

- Zakładamy, że paliwo było przechowywane przez kilka-kilkadziesiąt lat w basenie reaktora, aby rozpadły się pierwiastki o najkrótszym czasie życia.
- Dalsze przechowywanie paliwa, to swoiste „marnowanie” energii uwięzionej w paliwie, w pracy reaktora „zużywana” jest niewielka ilość uranu, wytarzany jest ponadto Pu^{239} → prowadzi się próby przetwarzania paliwa, tak aby mogło być one nadal użyteczne w energetyce jądrowej. Samo składowanie jest również drogie – przechowywanie 1 kg odpadów kosztuje 800 dolarów.
- Cykl paliwowy – co się dzieje z paliwem od momentu wydobycia rudy do ostatecznego wykorzystania → ideał – zamknięty cykl paliwowy.

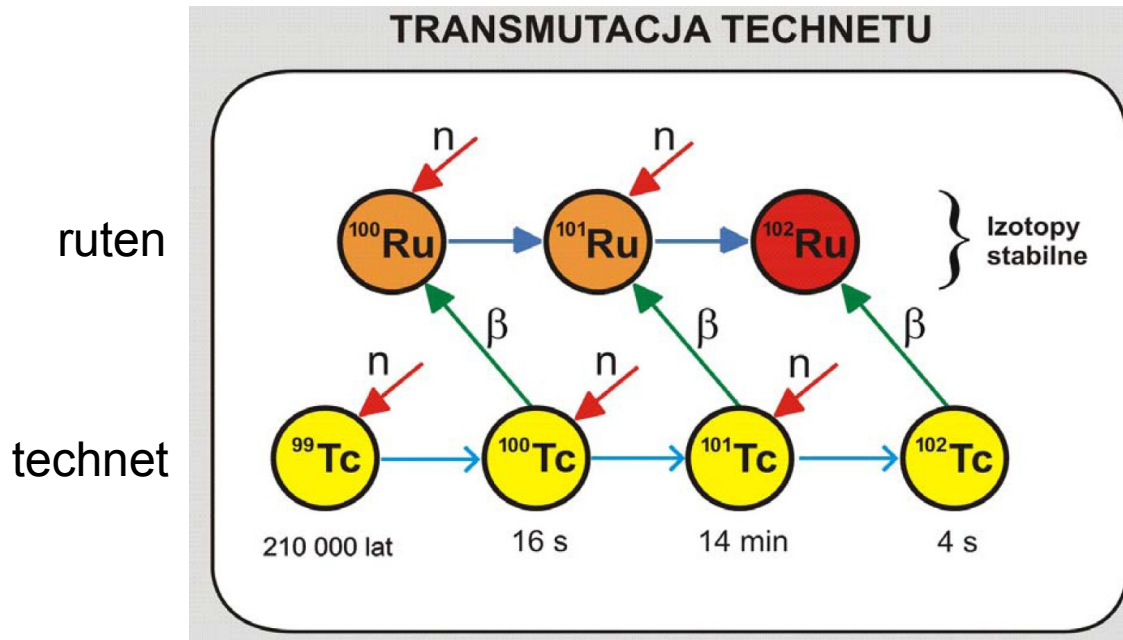


Warunek konieczny, aby cykl był zamknięty – przeprowadzenie recykliczacji.

Figure 9.3: Schematic of Closed and Open NFC.

Transmutacja i spalanie – procesy, które mają na celu przetworzenie pierwiastków promieniotwórczych na krótkożyciowe lub stabilne.

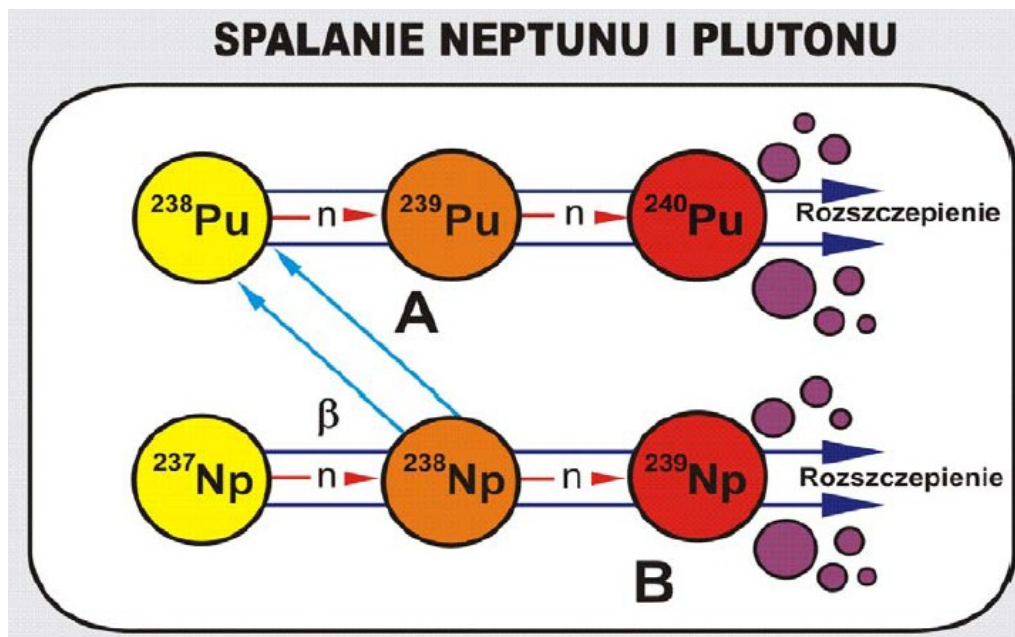
Transmutacja – proces, w którym w wyniku pochłonięcia neutronu pierwiastek przekształca się w nuklid stabilny. Przykład poniżej – transmutacja technetu w strumieniu wysokoenergetycznych neutronów do rutenu.



W wyniku transmutacji możliwa jest zamiana izotopu stabilnego na niestabilny, dlatego ważne jest oddzielenie składowych paliwa przed przeprowadzeniem procesu transmutacji.

Wymagany jest duży strumień szybkich neutronów – nie może to być zwykły reaktor PWR, konieczne jest stosowanie np. reaktora powielającego.

Spalanie zużytego paliwa – oczywiście nie w sensie utleniania, ale w sensie procesu rozszczepienia inicjowanego przez neutron. Nie wszystkie pierwiastki mogą być spalone w reaktorze typu PWR, np. neptun.



Paliwo MOX – paliwo zawierające tlenek plutonu, wytwarzane z Pu^{239} , obecnego w spalonym paliwie. Zaletą tego typu paliwa (oprócz wykorzystania odpadów promieniotwórczych) jest możliwość używania go w wielu typach reaktorów, jako alternatywa dla nisko wzbogaconego uranu 238, (zamiast UOX).

Co więcej, może ono powstawać z plutonu z wycofywanych z użytku bomb atomowych.

Wada – wysoka radioaktywność w procesie produkcji.

Przetwarzanie paliwa - efekty.

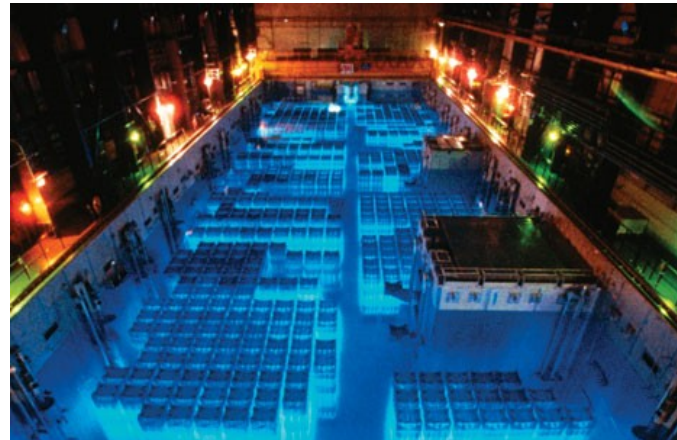
- 95% materiału zdatnego do użytku odzyskana (U i Pu),
- Objętość zmniejszona o czynnik 5,
- Radiotoksyczność zmniejszona o czynnik 10.

Zakłady przerobu paliwa na świecie:

- Sellafield, Wielka Brytania
- La Hague, Francja
- Ozersk, Rosja (zakłady Majak pod Czelabińskiem)
- Rokkasho, Japonia
- kompleks przemysłowy w Indiach



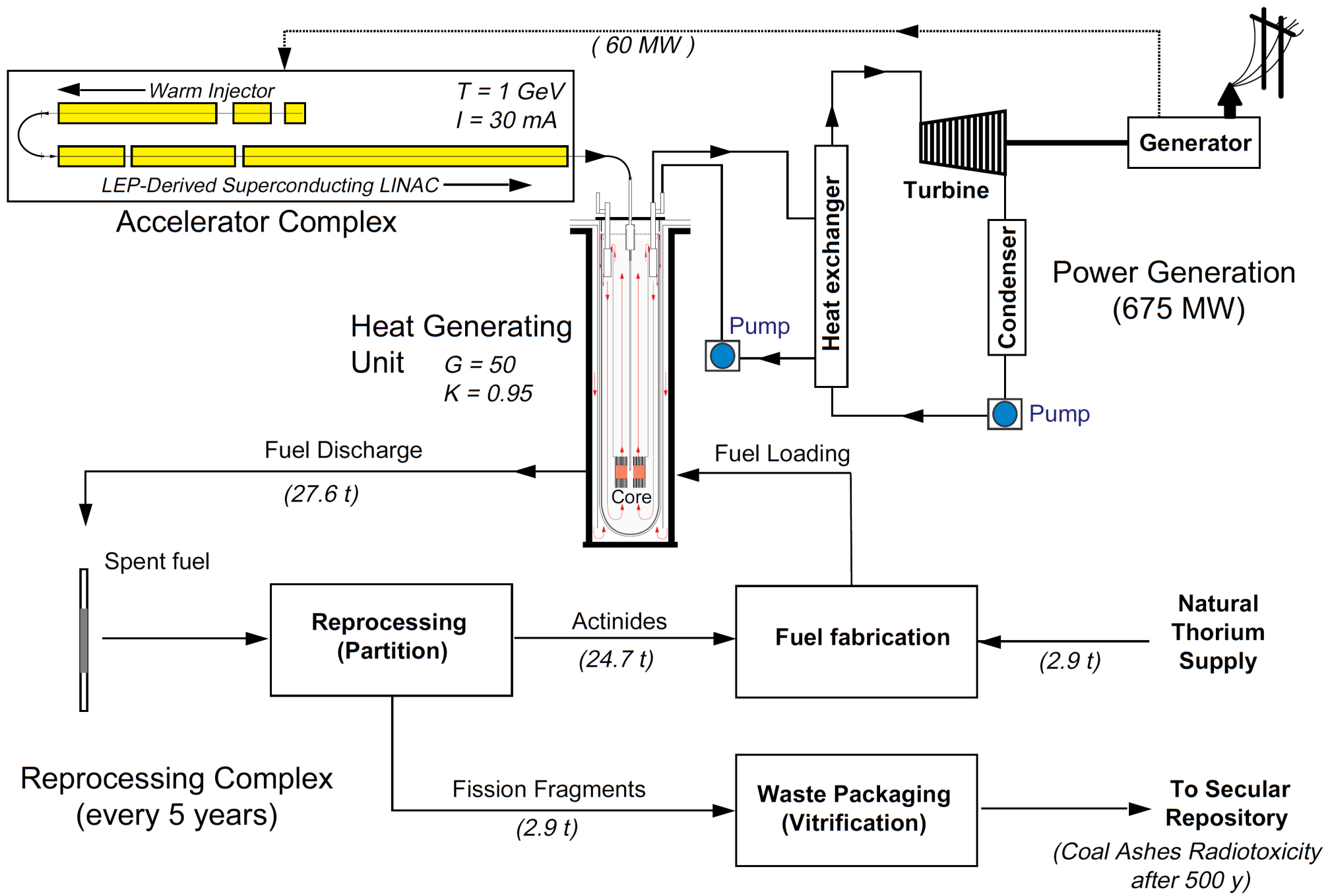
La Hague



Schładzanie odpadów.

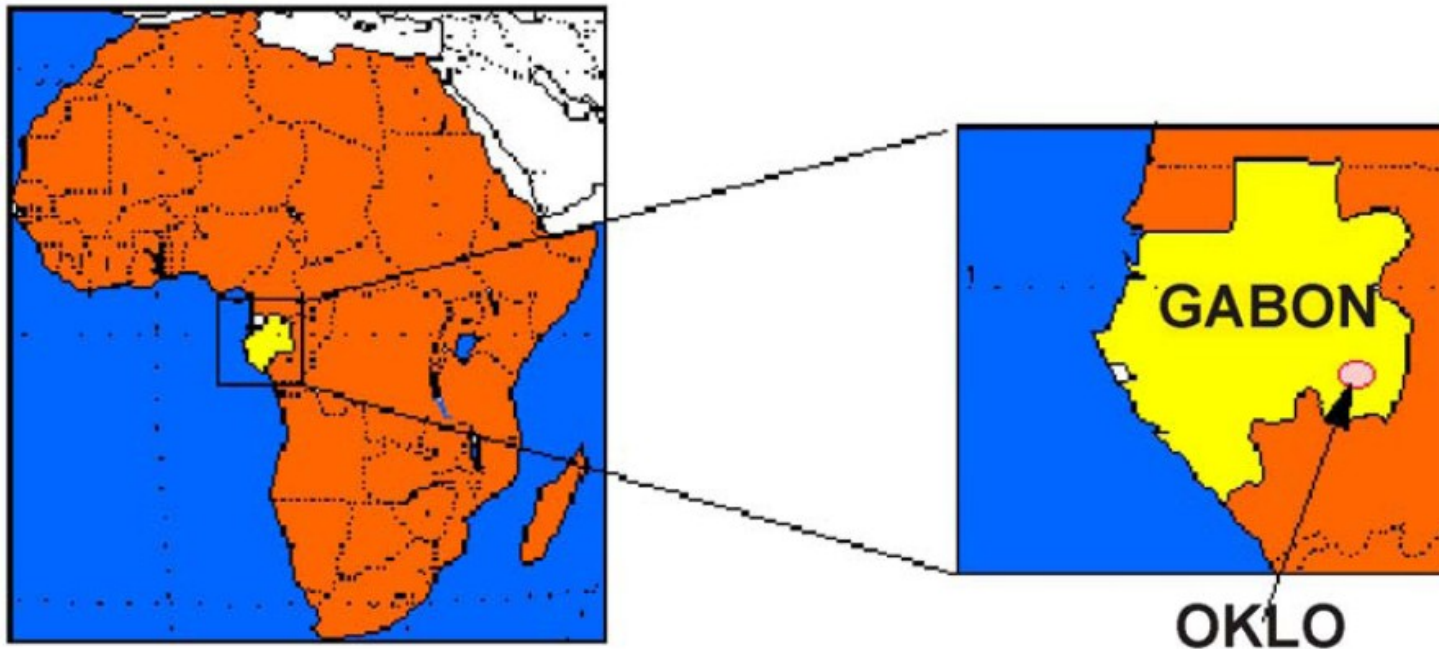
ADS – accelerator driven system, wzmacniacze energii.

- Wzmacniacz energii – system podkrytyczny, wykorzystujący wiązkę energetycznych cząstek do podtrzymywania reakcji rozszczepienia.
- Sterowanie reaktorem z wykorzystaniem wiązki protonów.
- Propozycja Carlo Rubbi – wykorzystać nadprzewodzący, liniowy akcelerator z LEP, możliwość wykorzystania także cyklotronów.
- Uderzenia protonami tarczę, np. ołownianą → produkcja prędkich neutronów.
- **Ołów** jest także moderatorem oraz transportuje ciepło wytworzone w reakcjach.
- Reakcje rozszczepienia, podobnie jak w „zwykłym” reaktorze, paliwem jest **tor**.
- Jeżeli paliwo zmieszamy z odpadami, zostaną one również wypalone.
- System podkrytyczny – można w każdej chwili wyłączyć reaktor.
- Wytwarzanie prądu, który zasila również akcelerator.
- Zmniejszenie radioaktywności odpadów.
- Brak produkcji Pu^{239} , który mógłby zostać wykorzystany do budowy bomby. (choć obecny jest U^{233})

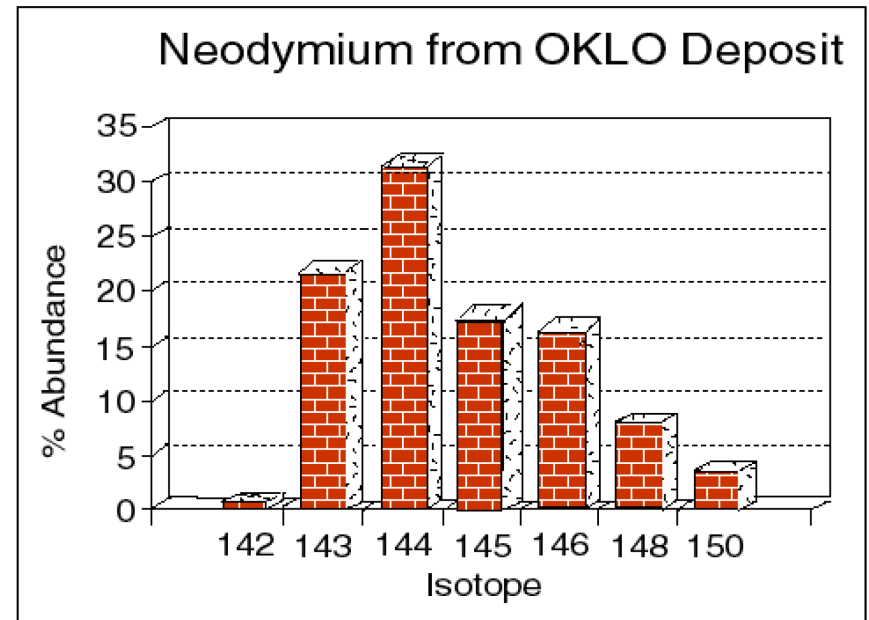
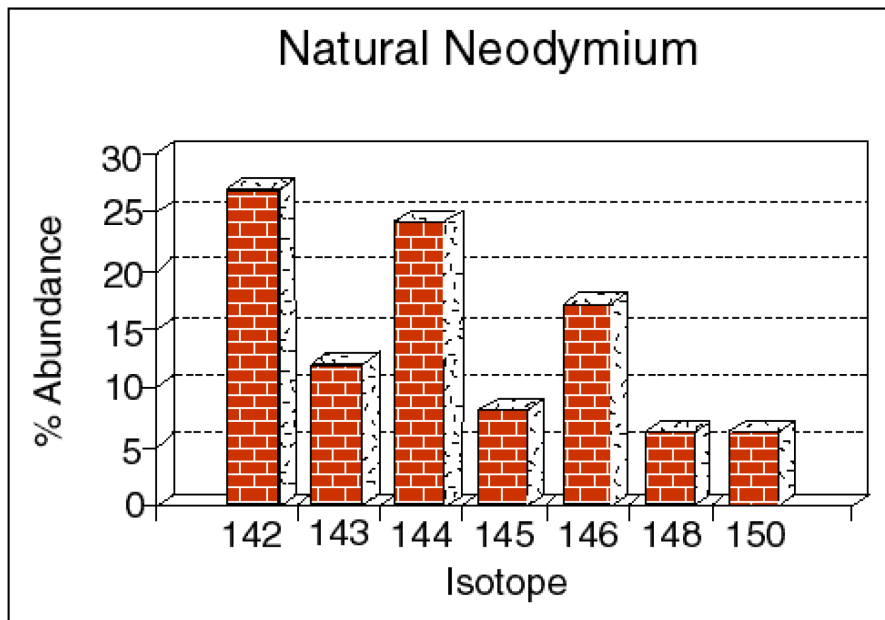


Reaktor naturalny w Gabonie

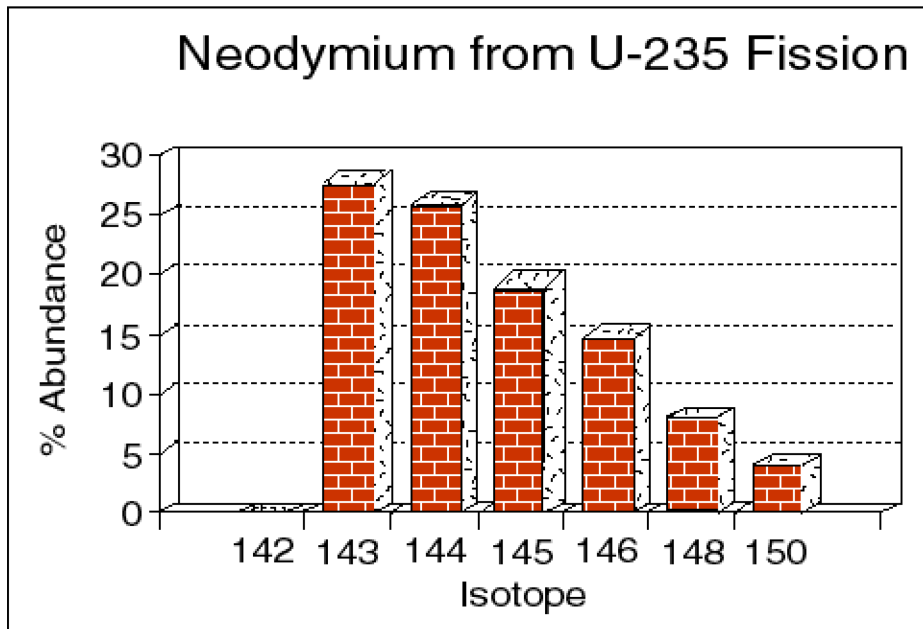
- Z promieniotwórczością spotykamy się wszędzie. Ale okazuje się, że w naturze istniał również działający reaktor jądrowy, będący źródłem ciepła.



- W latach 70-tych zauważono, że w okolicach Oklo zawartość uranu 235 jest niższą od pozostałych obszarów na Ziemi (0,7175(10)% zamiast 0,7202(6)%). Przypominało to wypalone paliwo z reaktora jądrowego. Kolejno znajdowano rudy z coraz mniejszą zawartością tego izotopu.
- Zaczęto interpretować to jako pozostałość po reaktorze działającym ok. 2 mld. lat temu.



→ Kolejnym argumentem za tą tezą był skład neodymu występującego na miejscu – brak było izotopu 142, a wzmocniona była obecność izotopów 143, 145, co jest charakterystyczne dla wypalonego paliwa po reakcjach rozszczepienia uranu ^{235}U .



Po wprowadzeniu poprawek na obecność naturalnego neodymu okazuje się, że skład izotopowy niemal idealnie pasuje do produktów rozszczepienia U^{235} .

- Naturalnym moderatorem była woda gruntowa.
- Odpowiednie wzbogacenie U235 było spowodowane różnymi czasami rozpadu U238 i U235, odpowiednie warunki (tj. wzbogacenie ok 3%) miały miejsce ok. 1.45 mld lat temu.
- Badając produkty rozpadu można oszacować moment, w którym reaktor przestał pracować. Można domniemywać, że reaktor pracował cyklicznie – woda – moderator, wyparowywała, zatrzymując reakcję i wracała, ponownie ją inicjując.

Jakie to ma znaczenie w kwestii odpadów promieniotwórczych?

Produkty rozpadu przez ostatnie 2 mld lat nie przemieściły się – odpowiednie warstwy geologiczne (fosfłat glinu).



Transport odpadów promieniotwórczych.



- Transport odpadów niskoaktywnych – pojemniki typu A, wytrzymują standardowe wypadki, takie jak upadek z 9 m...
- Transport odpadów wysokoaktywnych – pojemniki typu B, przeprowadzany szereg testów, takich jak zderzenie ciężarówek, zderzenie pociągów (każdy 120km/h), pojemnik w ogniu przez 90 min i wiele innych...
- Pojemnik typu C – do transportu lotniczego, testowana katastrofa lotnicza...



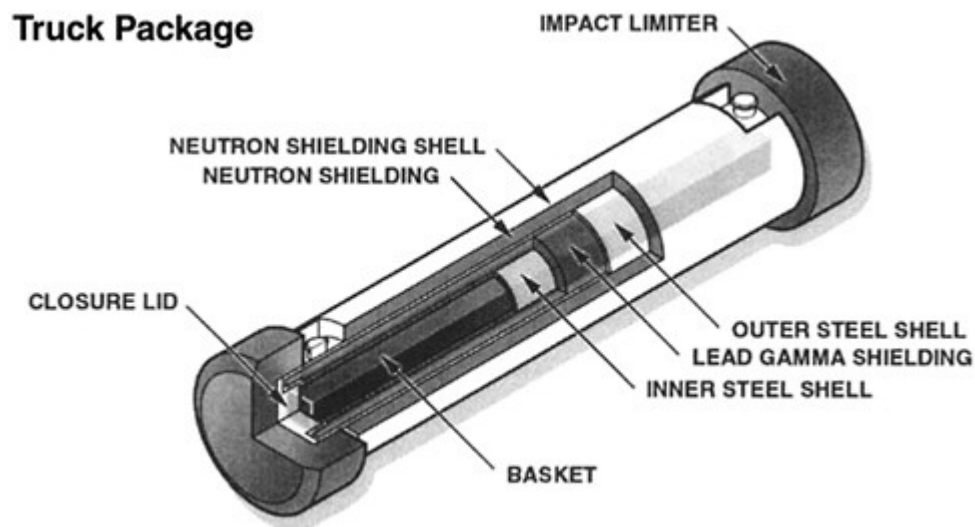
Crashtest, 160 km/h



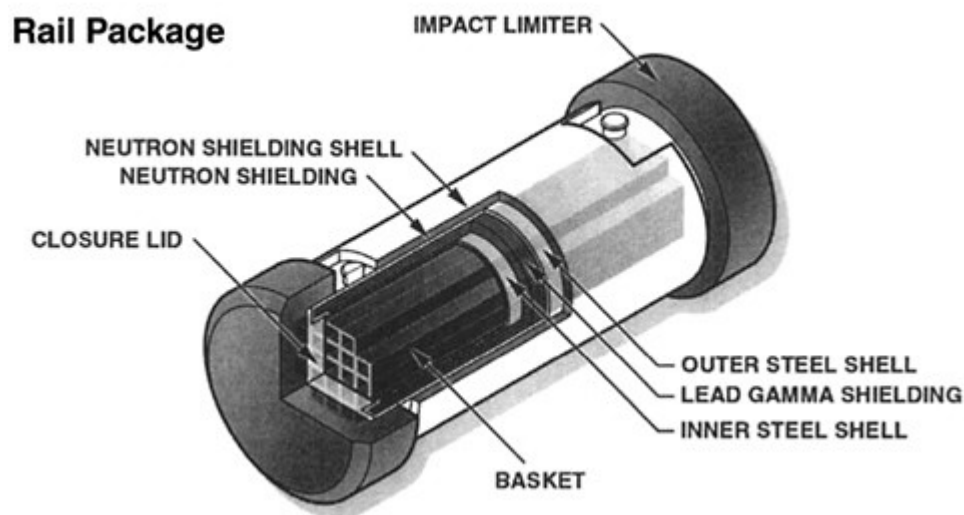
Pojemnik ładowany na statek

50 lat transportowania odpadów, nikt nie zginął na skutek napromieniowania.

Typ „B” pojemnika.



0.2-0.5 ton odpadów
Średnica 0.9 m, masa 28 ton



10-18 ton odpadów,
Rozmiary rzędu 2.5 m, masa 150 ton

Można transportować źródła o aktywności przekraczającej 37 PBq.

Dawki promieniowania w odległości 1 m od pojemnika nie mogą być większe niż 1 mSv/h.

Tomografia komputerowa klatki piersiowej – 10 mSv, zdjęcie RTG czaszki – poniżej 1 mSv.⁴²

Incydenty z odpadami promieniotwórczymi...

Jezioro Karachay – wg amerykańskiej administracji najbardziej skażone miejsce na Ziemi, skażenie porównywalne z katastrofą Czarnobylską, tylko skumulowane w jednym miejscu. Rosjanie od lat 50-tych wrzucają tam odpady radioaktywne.

W latach 60-tych jezioro w dużym stopniu wyschło, a na skutek rozszczelnienia zbiorników i wiatrów doszło do skażenia, które objęło 0.5 mln ludzi.



2008 – elektrownia Tricastin (Areva)

Podczas przelewania płynnego odpadu promieniotwórczego skażonego uranem ok. 75 kg substancji rozlało się, skażając teren, w tym dwie przepływające rzeki. Ok. 100 członków personelu zostało napromieniowanych małymi dawkami.



Elektrownia jądrowa vs konwencjonalna.

- W popiołach ze spalania węgla kamiennego/brunatnego również znajdują się metale ciężkie, takie jak promieniotwórcze uran i tor.
- Elektrownia 1 GW → ok 3 mln ton węgla/rok = 9 ton uranu, 22 ton toru, które znajdują się w popiele i jest rozpraszane w atmosferze.
- **Podczas wydobycia węgla uwalnia się gazowy radon (promieniotwórczy).**
- 360 MW Opole – 190 tys. ton popiołu i żużla, 45.5 tys. gipsu itp.;
- 350 MW Benzau (Szwajcaria) – <1.0 m³ wysokoaktywnych, 50m³ nisko- i średnio-akt.
- Porównywalny wpływ hałd popiołu do obecności składowiska promieniotwórczego.
- Względy estetyczne...



Elektrownia jądrowa.



Kopalnia węgla brunatnego.

TABELA 34. Porównanie elektrowni konwencjonalnej Opole z elektrownią jądrową Beznau o tej samej mocy netto

Parametry Elektrownia	Opole	Beznau
Typ bloku	BP-1150	PWR
Moc elektryczna	360 MW (brutto)	350 MW (netto)
Moc termiczna	925 MW	1130 MW
Woda zasilająca T/P	255°C/21,0 MPa	285°C/15,5 MPa
Para/woda na wyjściu z kotła/reaktora T/P	540°C/18,3 MPa	315°C/15,5 MPa 270°C/5,5 MPa
Ilość pary na turbinę	1150 t/h	2 × 1152 t/h
Ilość wytwornic pary	–	2 pionowe
Wysokość bloku	102 m	67,5 m
Powierzchnia zabudowy	96 ha (6 bloków)	6 ha (2 bloki)
Roczna ilość surowców (6500 h dla elektrowni Opole*)	1 000 000 t (węgiel) 32 500 t (mączka wap.)	39,5 t (wsad) 13,0 t (zużycie)
Roczna ilość odpadów (6500 h dla elektrowni Opole*)	<ul style="list-style-type: none"> • 190 000 t popiołu i żużla • 45 500 ton gipsu • 2 mln t CO₂ • 200 t CO • 3600 t NO_x • 3000 t SO₂ i SO 	<ul style="list-style-type: none"> • ≈ 0,8 m³ odpadów wysokoaktywnych • 50 beczek odpadów średnioaktywnych • 100 beczek odpadów niskoaktywnych
Obiekty i urządzenia specyficzne dla danego typu bloku	<ul style="list-style-type: none"> • rozbudowany układ transportu kolejowego • obiekty nawęglania • obiekty odpopielania • instalacja powietrza • instalacja spalin • instalacja odsiarczania • komin (250 m) 	<ul style="list-style-type: none"> • szczelny budynek reaktora • basen do przechowywania wypalonego paliwa • magazyn odpadów nisko- i średnioaktywnych • wytwornice pary
Zatrudnienie	• 1500 osób (4 bloki)	• 460 osób (2 bloki)

* Średni czas pracy bloku w konwencjonalnej elektrowni ciepłej wynosi 6500 godzin rocznie.

Podsumowanie.

- Odpady promieniotwórcze są jednym z głównych problemów współczesnej energetyki jądowej.
- Odpady powstają w trakcie pracy reaktora, można je podzielić na dwie grupy: lekkie aktynowce (pochodne uranu) oraz produkty rozszczepień.
- Możliwe są dwa postępowania z odpadami, jedno to przechowywanie, a drugie przerabianie, w tym wykorzystywanie plutonu i uranu w energetyce.
- Większość rozwiązań, takich jak składowiska, ma charakter tymczasowy – nie ma składowiska ostatecznego.
- Problem odpadów z elektrowni, także tych po jej wyłączeniu, powinien być rozważany już na etapie budowy elektrowni.

Dziękuję za uwagę.

Bibliografia.

- 1) Jezierski G., Energetyka jądrowa wczoraj i dziś, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
- 2) M. I. Ojovan, W.E. Lee., An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam 2005.
- 3) Włodarski J.: Składowanie odpadów promieniotwórczych, referat na sympozjum: Czysta i bezpieczna? Państwowy Zakład Higieny Warszawa, 11 marca 2005 r.
- 4) Portal edukacyjny <http://www.atom.edu.pl>, działy „Odpady promieniotwórcze” oraz „Czy mamy obawiać się odpadów z elektrowni jądrowych?”.
- 5) http://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive_waste i inne hasła z Wikipedii.
- 6) <http://www.elektrownieatomowe.info/> (część rysunków)
- 7) Meshik A., The workings of an ancient nuclear reactor, Scientific American, listopad 2005.
- 8) A. Hrynkiewicz, Energia. Wyzwanie XXI wieku, Wyd. UJ, Kraków 2002.
- 9) Going the Distance? The Safe Transport of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste in the United States (2006)

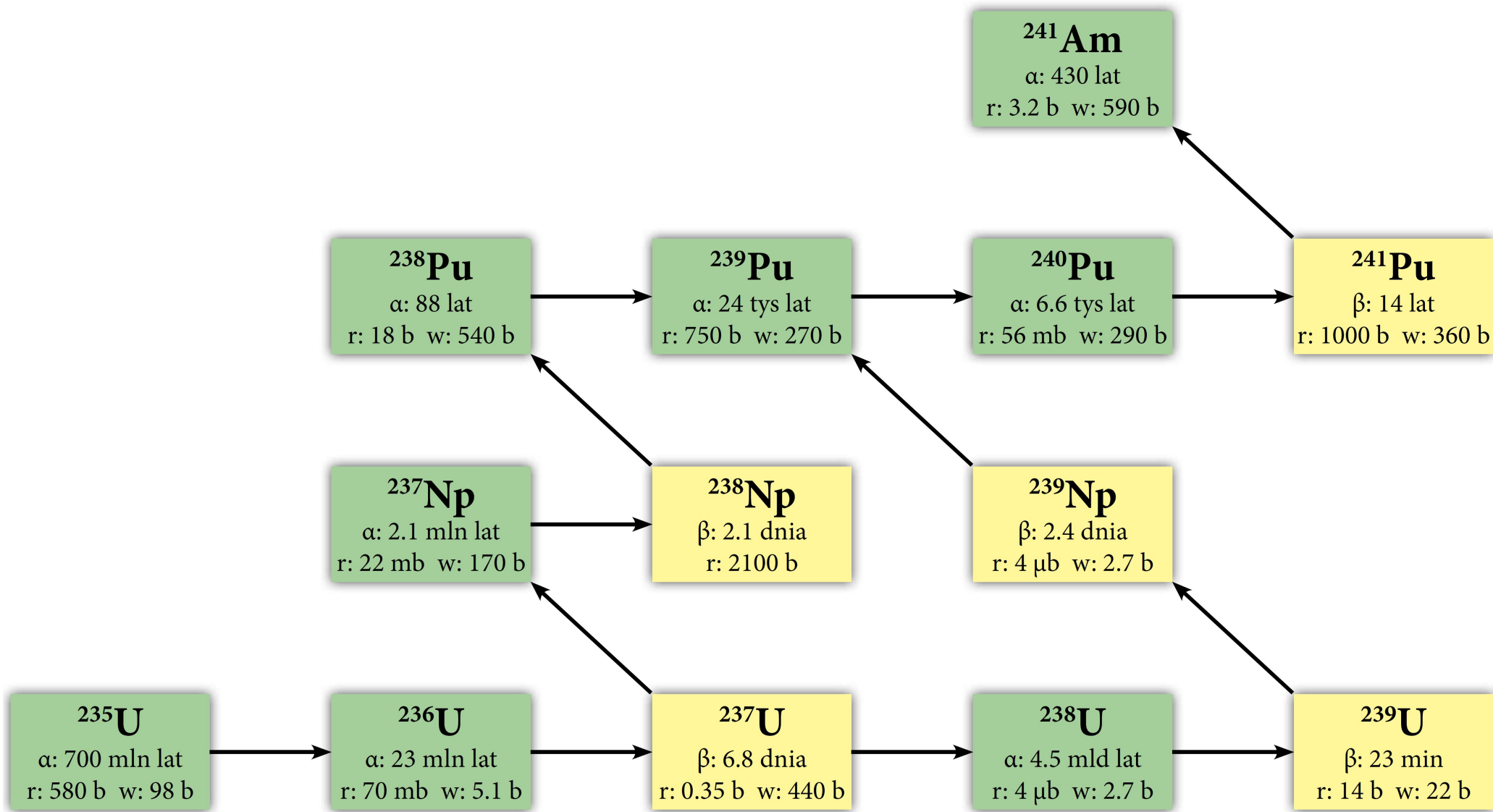
Back-up.

hydrogen 1 H 1.0079																	helium 2 He 4.0026				
lithium 3 Li 6.941	beryllium 4 Be 9.0122															boron 5 B 10.811	carbon 6 C 12.011	nitrogen 7 N 14.007	oxygen 8 O 15.999	fluorine 9 F 18.998	neon 10 Ne 20.180
sodium 11 Na 22.990	magnesium 12 Mg 24.305															aluminium 13 Al 26.982	silicon 14 Si 28.086	phosphorus 15 P 30.974	sulfur 16 S 32.065	chlorine 17 Cl 35.453	argon 18 Ar 39.948
potassium 19 K 39.098	calcium 20 Ca 40.078	scandium 21 Sc 44.956	titanium 22 Ti 47.867	vanadium 23 V 50.942	chromium 24 Cr 51.996	manganese 25 Mn 54.938	iron 26 Fe 55.845	cobalt 27 Co 58.933	nickel 28 Ni 58.693	copper 29 Cu 63.546	zinc 30 Zn 65.39	gallium 31 Ga 69.723	germanium 32 Ge 72.61	arsenic 33 As 74.922	selenium 34 Se 78.96	bromine 35 Br 79.904	krypton 36 Kr 83.80				
rubidium 37 Rb 85.468	strontium 38 Sr 87.62	yttrium 39 Y 88.906	zirconium 40 Zr 91.224	niobium 41 Nb 92.906	molybdenum 42 Mo 95.94	technetium 43 Tc [98]	ruthenium 44 Ru 101.07	rhodium 45 Rh 102.91	palladium 46 Pd 106.42	silver 47 Ag 107.87	cadmium 48 Cd 112.41	indium 49 In 114.82	tin 50 Sn 118.71	antimony 51 Sb 121.76	tellurium 52 Te 127.60	iodine 53 I 126.90	xenon 54 Xe 131.29				
caesium 55 Cs 132.91	barium 56 Ba 137.33	57-70 *	lutetium 71 Lu 174.97	hafnium 72 Hf 178.49	tantalum 73 Ta 180.95	tungsten 74 W 183.84	rhenium 75 Re 186.21	osmium 76 Os 190.23	iridium 77 Ir 192.22	platinum 78 Pt 195.08	gold 79 Au 196.97	mercury 80 Hg 200.59	thallium 81 Tl 204.38	lead 82 Pb 207.2	bismuth 83 Bi 208.98	polonium 84 Po [209]	astatine 85 At [210]	radon 86 Rn [222]			
francium 87 Fr [223]	radium 88 Ra [226]	89-102 * *	lawrencium 103 Lr [262]	rutherfordium 104 Rf [261]	dubnium 105 Db [262]	seaborgium 106 Sg [266]	bohrium 107 Bh [264]	hassium 108 Hs [269]	meitnerium 109 Mt [268]	ununnium 110 Uun [271]	ununium 111 Uuu [272]	unubium 112 Uub [277]		ununquadium 114 Uuq [289]							

lanthanum 57 La 138.91	cerium 58 Ce 140.12	praseodymium 59 Pr 140.91	neodymium 60 Nd 144.24	promethium 61 Pm [145]	samarium 62 Sm 150.36	europium 63 Eu 151.96	gadolinium 64 Gd 157.25	terbium 65 Tb 158.93	dysprosium 66 Dy 162.50	holmium 67 Ho 164.93	erbium 68 Er 167.26	thulium 69 Tm 168.93	ytterbium 70 Yb 173.04
actinium 89 Ac [227]	thorium 90 Th 232.04	protactinium 91 Pa 231.04	uranium 92 U 238.03	neptunium 93 Np [237]	plutonium 94 Pu [244]	americium 95 Am [243]	curium 96 Cm [247]	berkelium 97 Bk [247]	californium 98 Cf [251]	einsteinium 99 Es [252]	fermium 100 Fm [257]	mendelevium 101 Md [258]	nobelium 102 No [259]

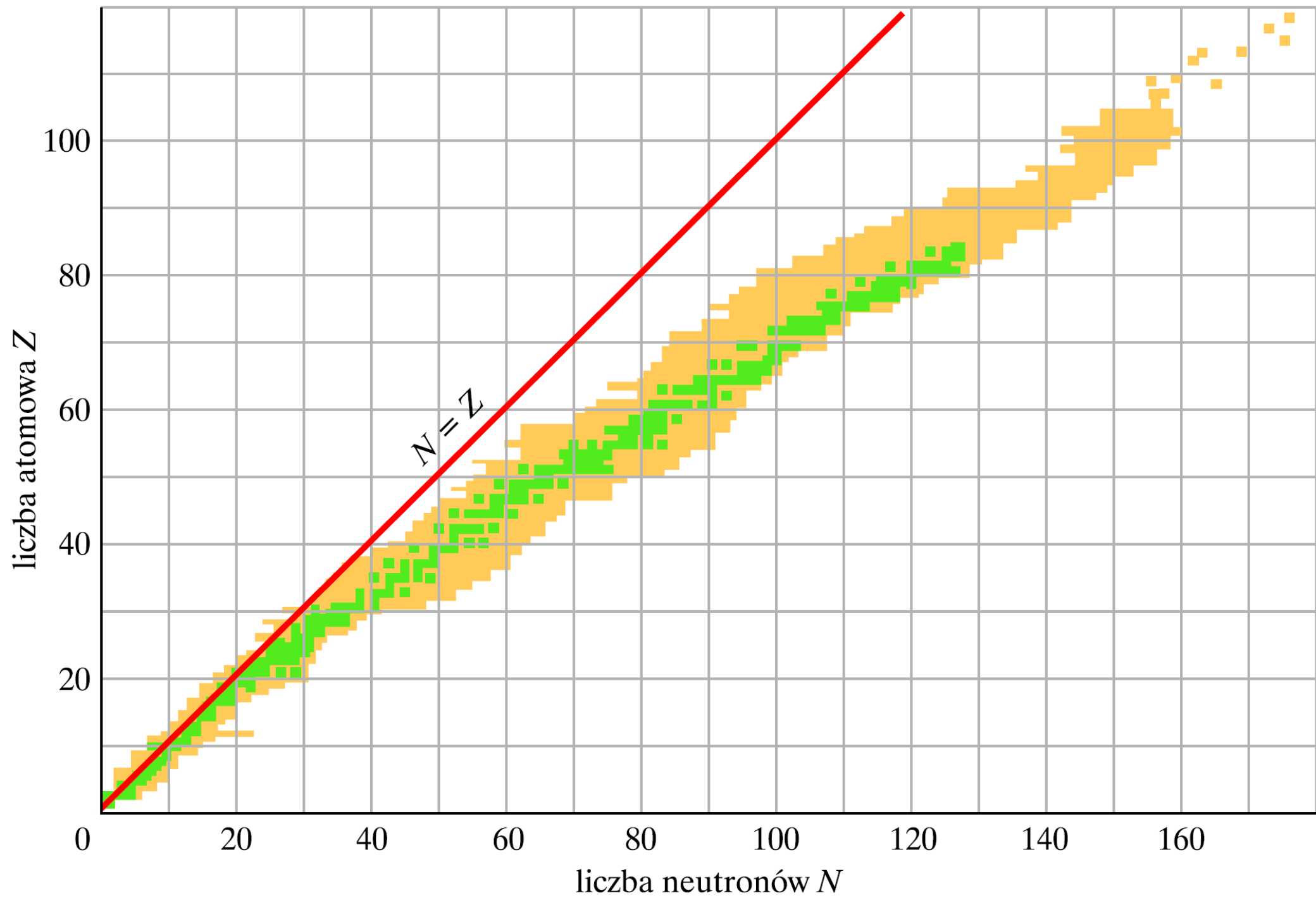
* Lanthanide series

** Actinide series



Aktynowce

	Cer	Praseodym	Neodym	Promet	Samar	Europ	Gadolin	Terb	Dyspros	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
58	Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
	Th	Protaktyn	Uran	Neptun	Pluton	Ameryk	Kur	Berkel	Kaliforn	Einstein	Ferm	Mendelew	Nobel	Lawrens
90	Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



Równoważnik dawki pochłoniętej, biologiczny równoważnik dawki, dawka równoważna[1], HT – pojęcie pochodne od dawki pochłoniętej. Jest to ilość energii, którą deponuje cząstka w materii żywej (tkance, organie) przez którą przechodzi, z uwzględnieniem skutków biologicznych wywołanych przez różne rodzaje promieniowania. Jednostką równoważnika dawki pochłoniętej jest Siwert (Sv)[2].

$$1 \text{ Sv} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ kg}}$$

Siwert jest względnie dużą jednostką – u człowieka już po przekroczeniu dawki skutecznej 1 Sv promieniowania gamma dla całego ciała może wystąpić ostry zespół popromienny, mogący prowadzić do śmierci.

Bekerel, Bq to jednostka miary aktywności promieniotwórczej w układzie SI (jednostka pochodna układu SI).

Próbka ma aktywność 1 Bq, gdy zachodzi w niej jeden rozpad promieniotwórczy na sekundę. Na przykład, jeśli dane ciało generuje 1000 cząstek alfa na sekundę poprzez rozpad alfa (i jednemu rozpadowi odpowiada emisja jednej cząstki alfa), to aktywność tego ciała jest równa 1000 Bq, czyli 1 kBq.

Miano bekerela to s⁻¹.

Starą jednostką aktywności promieniotwórczej jest kiur (Ci), odpowiadający aktywności 1 g radu-226. Jest to jednostka znacznie większa od Bq:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

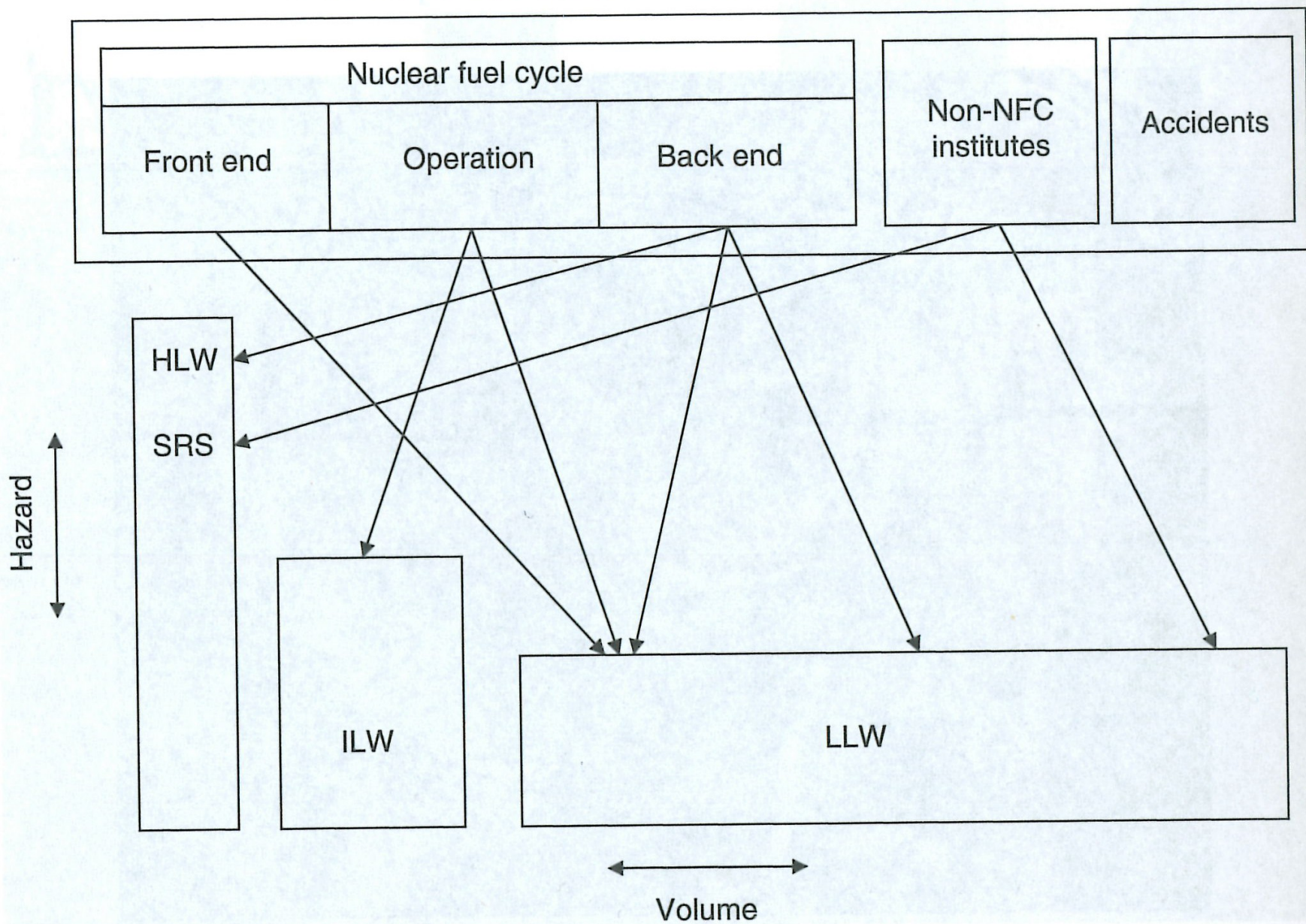


Figure 9.2: Main sources of radioactive waste. SRS are spent sealed radioactive sources.

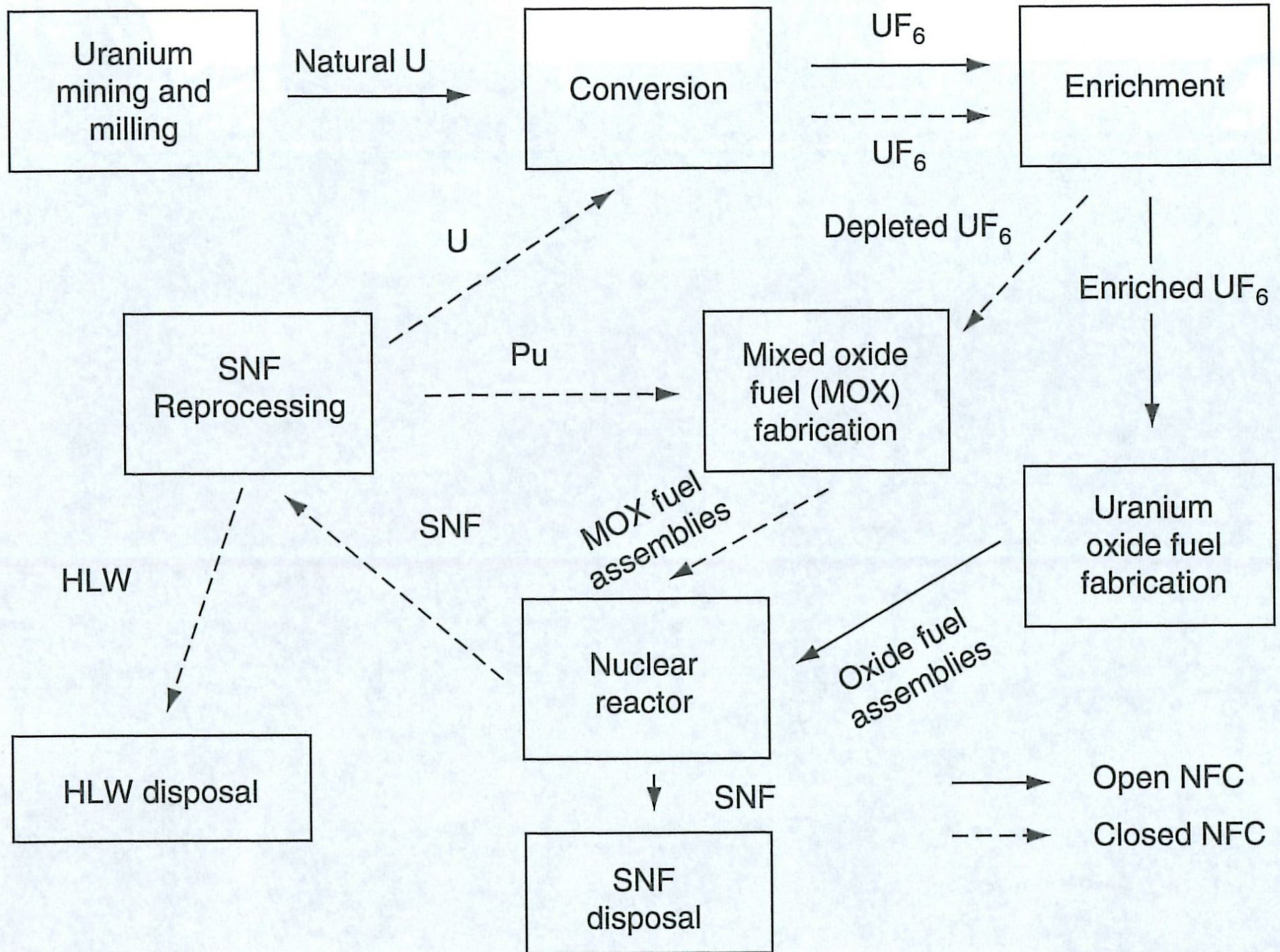


Figure 9.6: Schematic of NFC activities. SNF is Spent Nuclear Fuel.