

Energetyka konwencjonalna odnawialna i jądrowa

Wykład 13 - 15 stycznia 2019

Zygmunt Szefliński

Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów

szef@fuw.edu.pl

<http://www.fuw.edu.pl/~szef/>

Cykl paliwowy

Paliwa jądrowego nie robi się bezpośrednio z rudy uranowej w stanie naturalnym.

Wytwarzanie ciepła z rozszczepień jąder atomów wymaga przygotowania materiału rozszczepialnego w cyklu, który składa się z szeregu etapów technologicznych. Cykl paliwowy zależy od rodzaju zastosowanego reaktora i od doboru kombinacji rud rozszczepialnych i paliworodnych.

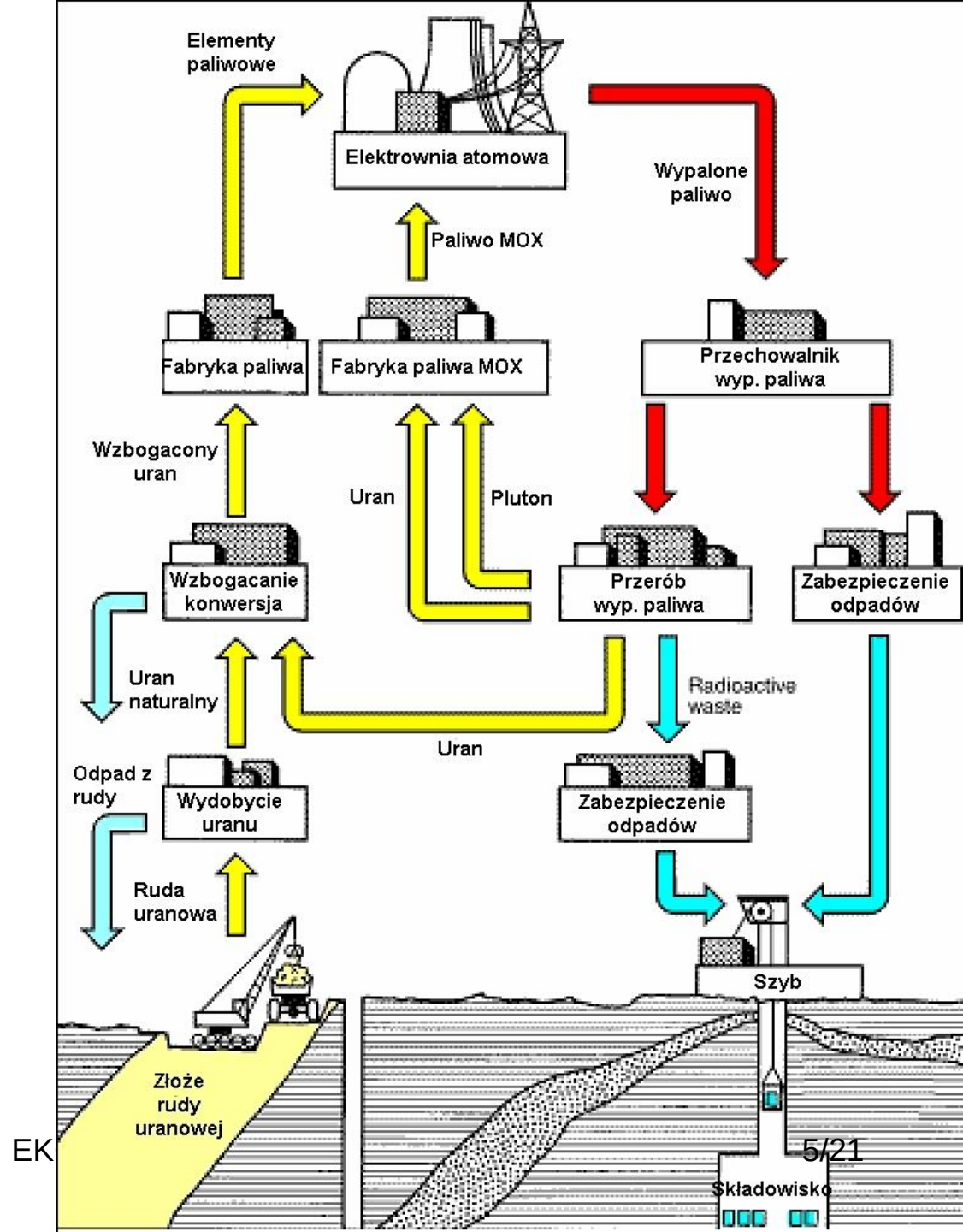
Etapy wspólne dla wszystkich typów reaktorów

- ☐ wydobywanie rudy materiału rozszczepialnego;
- ☐ oczyszczanie i zwiększanie stężenia rudy;
- ☐ wytwarzanie paliwa i montaż zestawów paliwowych;
- ☐ napromieniowanie paliwa w reaktorze;
- ☐ tymczasowe przechowywanie paliwa wypalonego;
- ☐ recykling paliwa wypalonego, w tym przerób wstępny;
- ☐ gospodarka odpadami promieniotwórczymi.

Wykorzystanie uranu i plutonu w cyklu zamkniętym

Uran i pluton są ponownie wykorzystywane w reaktorze po etapie przerobu wstępnego i po wyprodukowaniu nowego paliwa (tzw. paliwa MOX). Na odpady promieniotwórcze składają się aktynowce mniejszościowe, produkty rozszczepienia oraz produkty aktywacji (powstające na skutek aktywacji materiałów koszulek i materiałów konstrukcji zestawów2 paliwowych). Odpady promieniotwórcze są kondycjonowane, tymczasowo przechowywane i przeznaczone do zeskładowania. Taki wariant wybrały między innymi Francja, Japonia i Rosja.

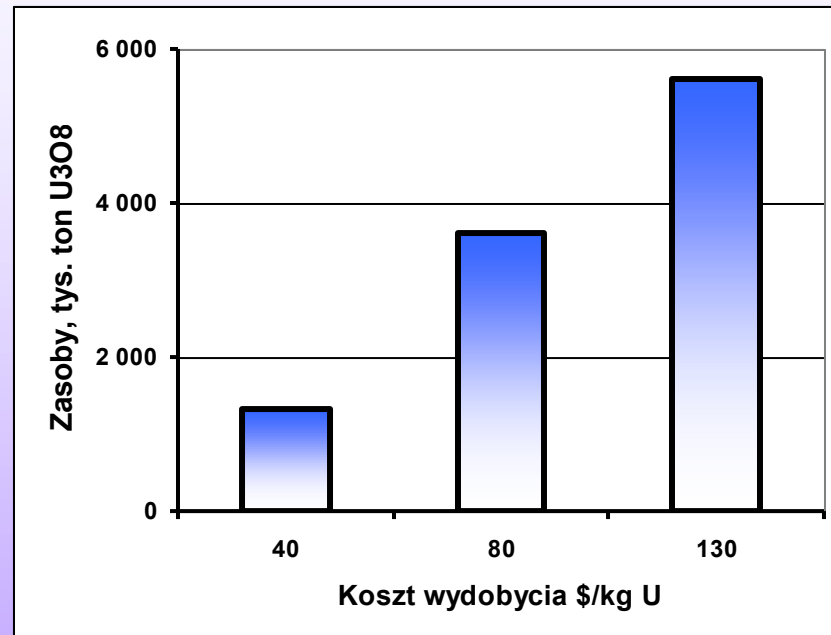
Cykl paliwowy reaktorów PWR i BWR



Wydobycie uranu

Światowe rozpoznane zasoby uranu - mln ton U_3O_8

	<80 \$/kgU	<130 \$/kgU
Australia	1,074	1,910
Kazachstan	0,662	0,957
Kanada	0,439	0,532
Poł. Afryka	0,298	0,369
Namibia	0,213	0,287
Rosja	0,158	0,218
Brazylia	0,143	0,309
USA	0,102	0,355
Uzbekistan	0,093	0,153
Pozostali	0,480	0,526
Ogółem	3,622	5,834



Zasada wzbogacania

Aby można było uruchomić reaktor wodny, w paliwie musimy zwiększyć zawartość izotopu U 235, która w uranie naturalnym wynosi 0,7 %, do poziomu 3-5 %. Mówi się o wzbogacaniu uranu w izotop rozszczepialny.

W oparciu o gazowy UF_6 , w zakładzie wzbogacania metodą rozdzielania izotopowego wytwarza się z jednej strony uran wzbogacony (około 16 % początkowej objętości wsadu UF_6 , przy wzbogaceniu w U 235 do 3,5 %), a z drugiej strony uran zubożony (około 84 % objętości wsadu UF_6).

Wzbogacanie - wirówki

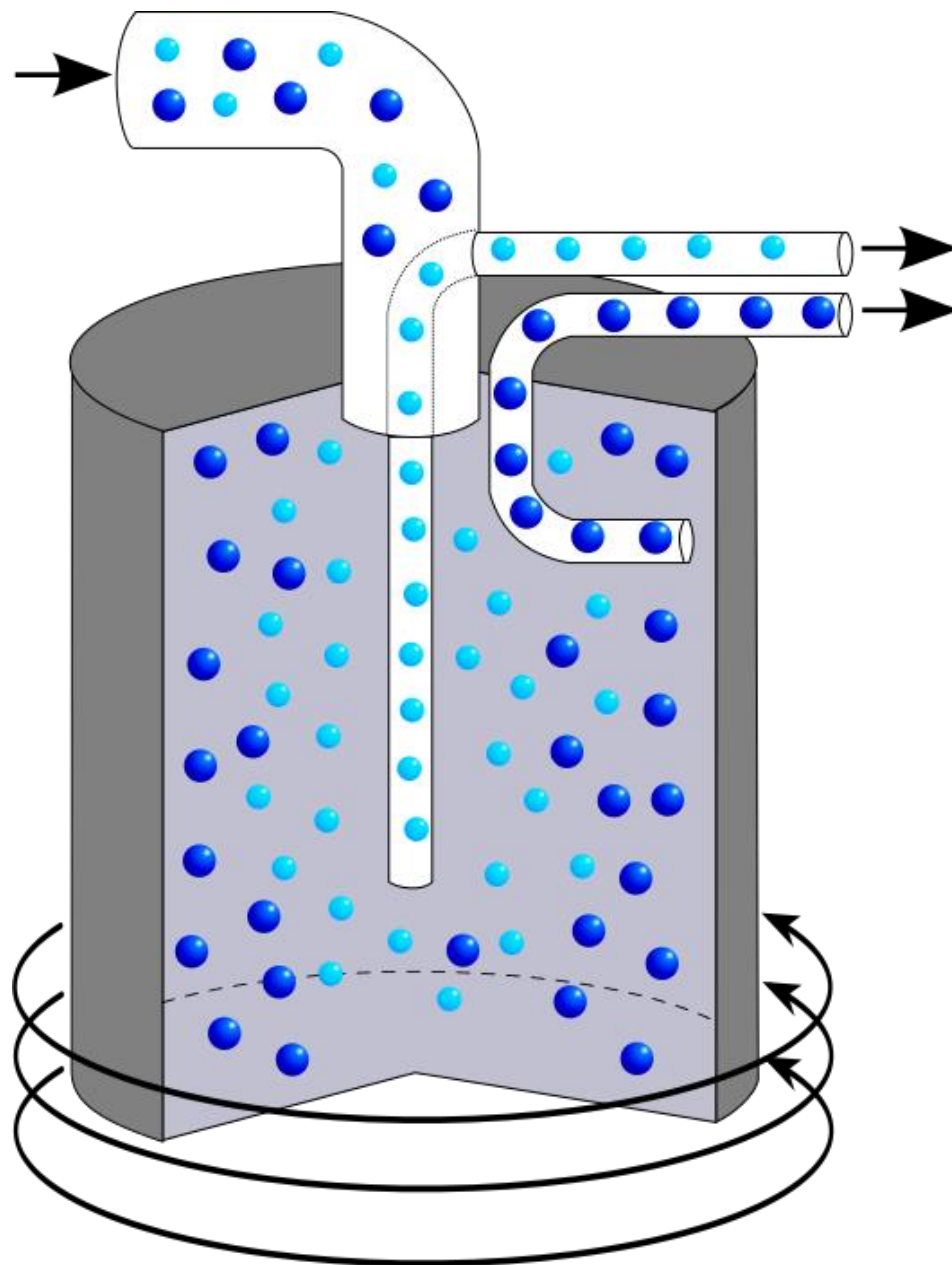
Metoda wirówkowa jest technologią sprawdzoną od ponad trzydziestu lat w Holandii, w Niemczech i w Wielkiej Brytanii. Ostatnio metoda ta rozwinęła się dzięki postępowi technologii materiałów kompozytowych.

Proces wymaga znacznie mniejszej liczby stopni rozdziału, aby osiągnąć poziom wzbogacenia porównywalny z wynikami dyfuzji gazowej.

Rozdzielanie izotopów następuje w wirujących z dużą prędkością pojemnikach cylindrycznych zawierających UF₆. Pod wpływem siły odśrodkowej, cząstki cięższe zbierają się na obwodzie, podczas gdy lżejsze migrują do środka, powodując rozdzielenie się izotopów.

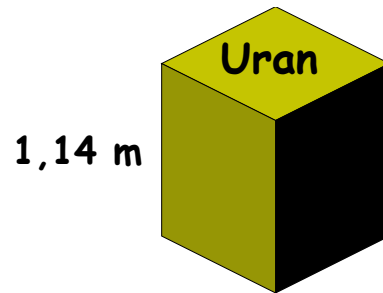
Wirówka wzbogacająca

Schemat wirówki
do rozdzielania
izotopów UF_6



Ile jest wypalonego paliwa na jednostkę wytworzonej energii?

Reaktor PWR:
2,5 tony/TWh
1,25 m³/TWh

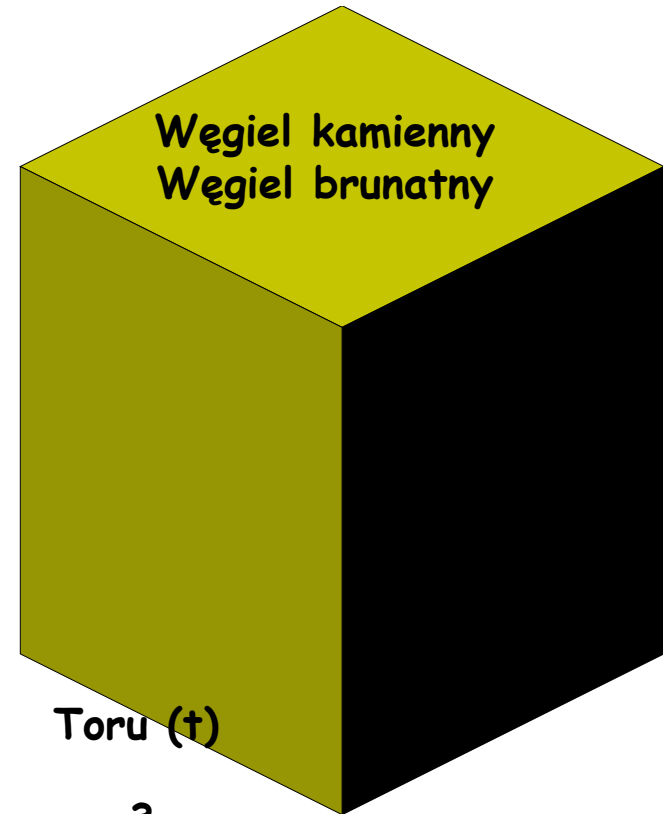


Reaktor BWR:
3 tony/TWh
1,5 m³/TWh

Reaktor HTGR:
<1,5 tony/TWh
<0,7 m³/TWh

Wypalone paliwo i odpady promieniotwórcze,

40 m w.k.
90 m w.b.



Surowiec	Ilość na 1 TWh(t)	Odpad (t)	Uranu (t)	Toru (t)
Uran	23	3		
Węgiel kamienny	400 k	100 k	~1	~3
Węgiel brunatny	1500 k	900 k	~2	~6

Produkcja paliwa i jego wykorzystanie w elektrowni

*Pastyłki paliwowe
(fot. Foronuclear)*



Nazwa "paliwo", mimo iż jest prawidłowa, to jednak niezbyt trafna w języku polskim, ponieważ sugeruje spalanie, a paliwo jądrowe nie ulega procesowi spalania (czyli utleniania) w reaktorach, jak np. benzyna w silnikach samochodowych. "Spalanie" lub "wypalanie" paliwa jądrowego oznacza wykorzystywanie go w reaktorach do przeprowadzania reakcji rozszczepień jąder atomowych aż do momentu, kiedy zabraknie jąder nadających się do rozszczepienia.

Paliwo jądrowe

Paliwo jądrowe to umieszczony w specjalnych pojemnikach (zwykle prętach lub kulach) związek chemiczny, zawierający określone ilości izotopu rozszczepialnego jakiegoś pierwiastka, zwykle U-235. Najczęściej jest to tlenek uranu UO_2 . W tym wypadku pierwiastkiem który można rozszczepiać jest uran (a konkretnie jego izotop U-235).

Po konwersji i wzbogaceniu UF_6 zamieniany jest w tlenek uranu UO_2 (ponowna konwersja). Ze sproszkowanego UO_2 wypieka się w temperaturze ponad 1400°C pastylki o przeciętnej długości 1,5 cm i średnicy 1 cm, które umieszcza się w cyrkonowych rurkach zwanych koszulkami.

Zestawy paliwowe



15.I.2019

EKOJ - Wykład 13

**Zestawy paliwowe (fot.
Fornuclear)** 13/21

Zestaw paliwowy

Wypełniona i szczelnie zamknięta koszulka określana jest mianem pręta paliwowego. Kilkadziesiąt, a nawet kilkaset takich prętów wraz z prętami regulacyjnymi tworzy tzw. zestaw paliwowy (inaczej "wiązka paliwowa"), który umieszczany jest w reaktorze i umożliwia produkcję energii dzięki reakcji rozszczepienia jąder atomowych.

W reaktorach PWR każdy zestaw paliwowy (jest ich 100-200) liczy z reguły 179-264 prętów paliwowych. W takim zestawie znajduje się miejsce na wsunięcie wiązki prętów regulacyjnych. Długość zestawu paliwowego to ok. 4 m. W reaktorach BWR pręty regulacyjne mają kształt krzyża i są wsuwane od dołu do góry (odwrotnie niż w PWR).

Wypalone paliwo

Po osiągnięciu projektowego wypalenia paliwa (zwykle okres 3-6 lat) pręty paliwowe są wyjmowane z reaktora i umieszczane na kilka lat w basenie z wodą (tzw. mokry przechowalnik wypalonego paliwa). Zużyte pręty zawierają bardzo duże ilości silnie promieniotwórczych produktów rozpadu jąder które wydzielają stosunkowo duże ilości ciepła. Złożenie ich do basenu z wodą i przechowywanie przez dłuższy czas (od kilku do kilkudziesięciu lat) powoduje, że ich aktywność drastycznie spada a z czasem wydzielane są też coraz mniejsze ilości ciepła. Woda w basenie pełni rolę chłodziwa, które uniemożliwia samoistne przegrzanie się zużytych prętów.

Wypalone paliwo jądrowe

Zawiera najczęściej wzbogacony w różnych formach fizyko-chemicznych: jako ciało stałe (tlenek, węgiel, stop metaliczny, metal; w postaci prętów, pastylek itp.), w postaci lub jako gaz . Drugim materiałem wykorzystywanym jako paliwo jądrowe jest izotop plutonu ^{239}Pu . Rodzaj paliwa dopasowany jest do danego typu reaktora.

W czasie eksploatacji paliwa jądrowego w reaktorze wzrasta w nim ilość produktów rozszczepienia i aktywacji, aż do poziomu uniemożliwiającego przebieg reakcji rozszczepienia z odpowiednią wydajnością, wymuszające wymianę paliwa jądrowego. Paliwo jądrowe wydobyte z reaktora nazywa się wypalonym (jest to najbardziej radioaktywna postać paliwa jądrowego), paliwo takie przechowuje się w elektrowni atomowej, po kilku latach, poddaje się je procesowi oczyszczenia w celu ponownego wykorzystania.

Wypalone paliwo - basen



Po osiągnięciu projektowego wypalenia paliwa (zwykle okres 3-6 lat) pręty paliwowe są wyjmowane z reaktora i umieszczane na kilka lat w basenie z wodą (tzw. mokry przechowalnik wypalonego paliwa). Zużyte pręty zawierają bardzo duże ilości silnie promieniotwórczych produktów rozpadu jąder które wydzielają stosunkowo duże ilości ciepła. Złożenie ich do basenu z wodą i przechowywanie przez dłuższy czas (od kilku do kilkudziesięciu lat) powoduje, że ich aktywność drastycznie spada a z czasem wydzielane są też coraz mniejsze ilości ciepła. Woda w basenie pełni rolę chłodziwa, które uniemożliwia samoistne przegrzanie się zużytych prętów.

Przerób paliwa

Paliwo transportuje się do zakładu przerobu wypalonego paliwa, gdzie oddziela się produkty rozszczepienia nie nadające się do ponownego użytku od plutonu (w czasie pracy każdego reaktora z U-238 powstają pewne ilości plutonu, przede wszystkim Pu-239) i resztek uranu, które można ponownie wykorzystać jako paliwo jądrowe (w wypalonym paliwie znajduje się 93% U-238, 1% U-235, 1% plutonu (różne izotopy) i 4% produktów rozszczepienia, co oznacza że prawie całe wypalone paliwo nadaje się do wtórnego przerobu).

Przerób wypalonego paliwa określa się też angielskim słowem *reprocessing*. *Reprocessing* polega na rozpuszczaniu w kwasie koszulek z pastylkami paliwowymi, a następnie rozseparowaniu wszystkich składników (łącznie z materiałem z którego były wykonane koszulki).

Zakłady przerobu paliwa

Uran i pluton kierowane są z powrotem do zakładu produkcji paliwa, produktu rozszczepienia klasyfikuje się jako odpady i wysyła do składowiska ostatecznego głęboko pod ziemią.

Obecnie na świecie pracuje 5 dużych zakładów zajmujących się przerobem paliwa:

1. Sellafield w Wielkiej Brytanii (zakłady THORP - *Thermal Oxide Reprocessing Plant*)
2. La Hague we Francji
3. Ozersk w Rosji (zakłady Majak pod Czelabińskiem)
4. Rokkasho w Japonii
5. Kompleks przemysłowy w Indiach, zajmujący się przerobem paliwa z indyjskich reaktorów ciężkowodnych AHWR

Wypalone uranowe pręty z reaktora Maria jadą do Rosji

21.09.2012

"W ostatnich dniach z Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Świerku pod Otwockiem wywieziono 60 wypalonych elementów paliwa jądrowego" - poinformowało Narodowe Centrum Badań Jądrowych, do którego należy reaktor jądrowy Maria. Te elementy to zużyte pięcio- i sześciorurowe uranowe zestawy paliwowe.

"Dziś paliwo z reaktorów odbiera jego producent. W przypadku polskiego badawczego reaktora Maria wysyłane jest ono do Rosji"

Transmutacja jądrowa

- ❑ Transmutacja jądrowa, to po prostu przemiana jądrowa, albo reakcja jądrowa
- ❑ Określenie „transmutacja” stosuje się obecnie do procesów, w których długożyciowy izotop promieniotwórczy ulega przemianie na izotop stabilny, albo na krótkożyciowy
- ❑ Transmutacji dokonuje się zazwyczaj po to, aby zmniejszyć „toksyczność odpadów radioaktywnych”, tzn. wytworzyć produkty o istotnie krótszym czasie zaniku i zmniejszyć ryzyko i koszty przechowywania odpadów radioaktywnych

Transmutacja jądrowa

Radiotoksycznością określamy wielkość dawki efektywnej, którą otrzymuje człowiek po wchłonięciu jednostki masy lub aktywności określonego izotopu.

Jednostki:

Sv/g,

Sv/Bq

Sc/Ci

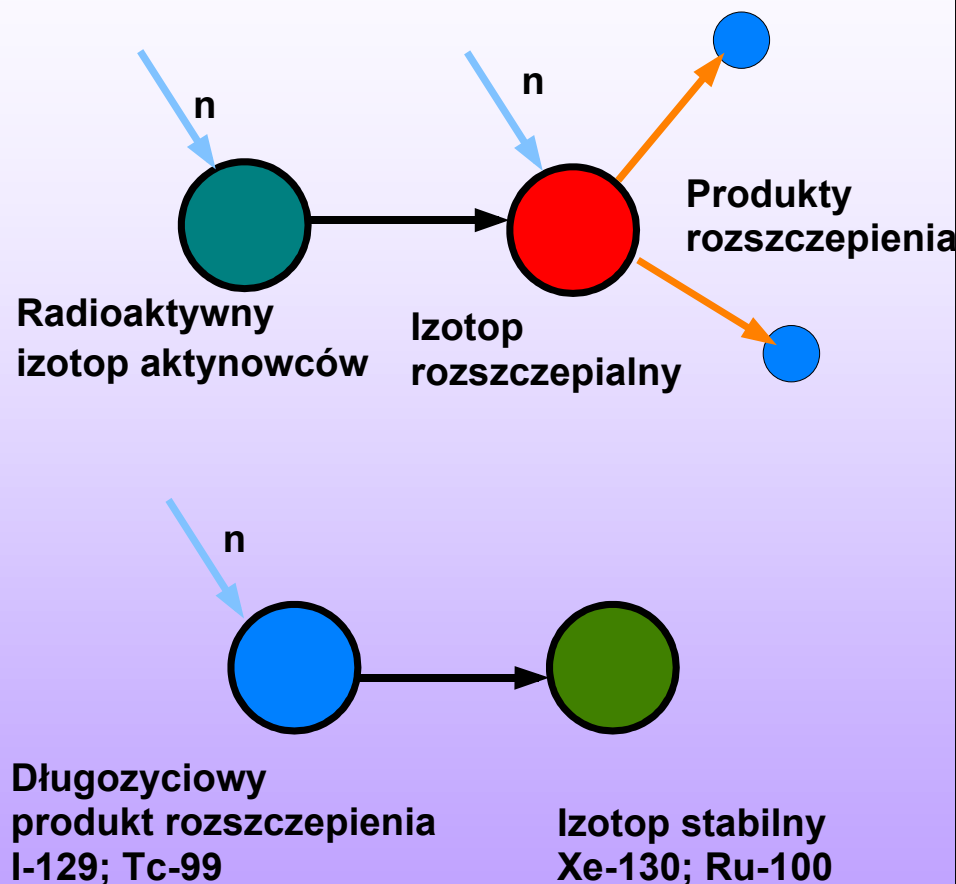
Transmutacja jądrowa

Najbardziej uciążliwe składniki wypalonego paliwa to tzw. aktynowce mniejszościowe (*minor actinides*), pierwiastki cięższe od uranu i plutonu (aktynowców większościowych), powstające w paliwie jądrowym w czasie jego wypalania. Najwięcej jest izotopów ameryku, kalifornu i kiuru. Z energetycznego punktu widzenia są one bezużyteczne – nie ulegają rozszczepieniu. Przy tym są długożyciowe i silnie promieniotwórcze, wymagają więc długoterminowego składowania.

Ideą podziału i transmutacji aktynowców jest przekształcenie ich do formy bardziej przyjaznej dla środowiska np. do izotopów krótkożyciowych lub o niższej radiotoksyczności. Cały proces prowadzi do skrócenia czasu, w którym odpady są silnie promieniotwórcze – z setek tysięcy do setek lat.

Transmutacja jądrowa

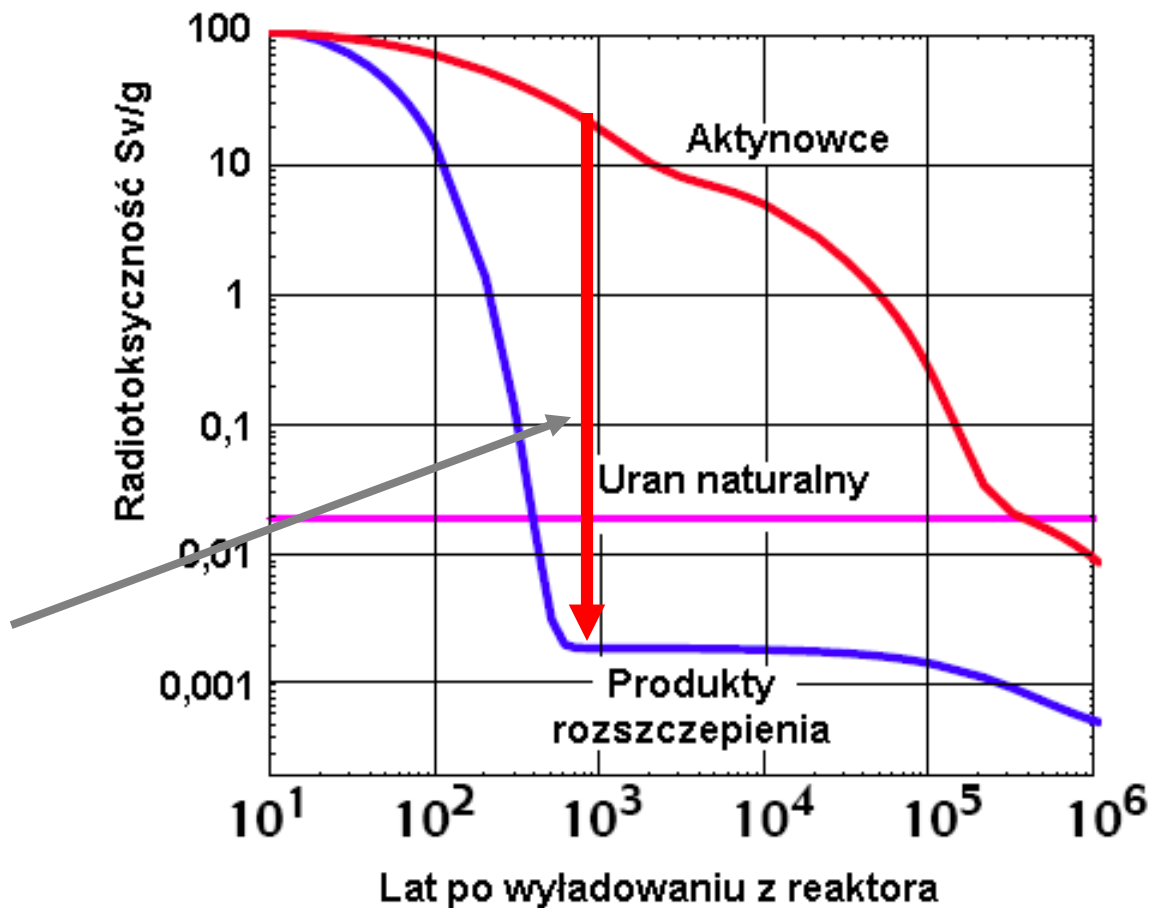
Proces transmutacji pogarsza bilans neutronów w reaktorze. Dlatego przewiduje się zastosowanie podkrytycznych reaktorów współpracujących ze spalacyjnym źródłem neutronów, tzw. ADS: Accelerator Driven System



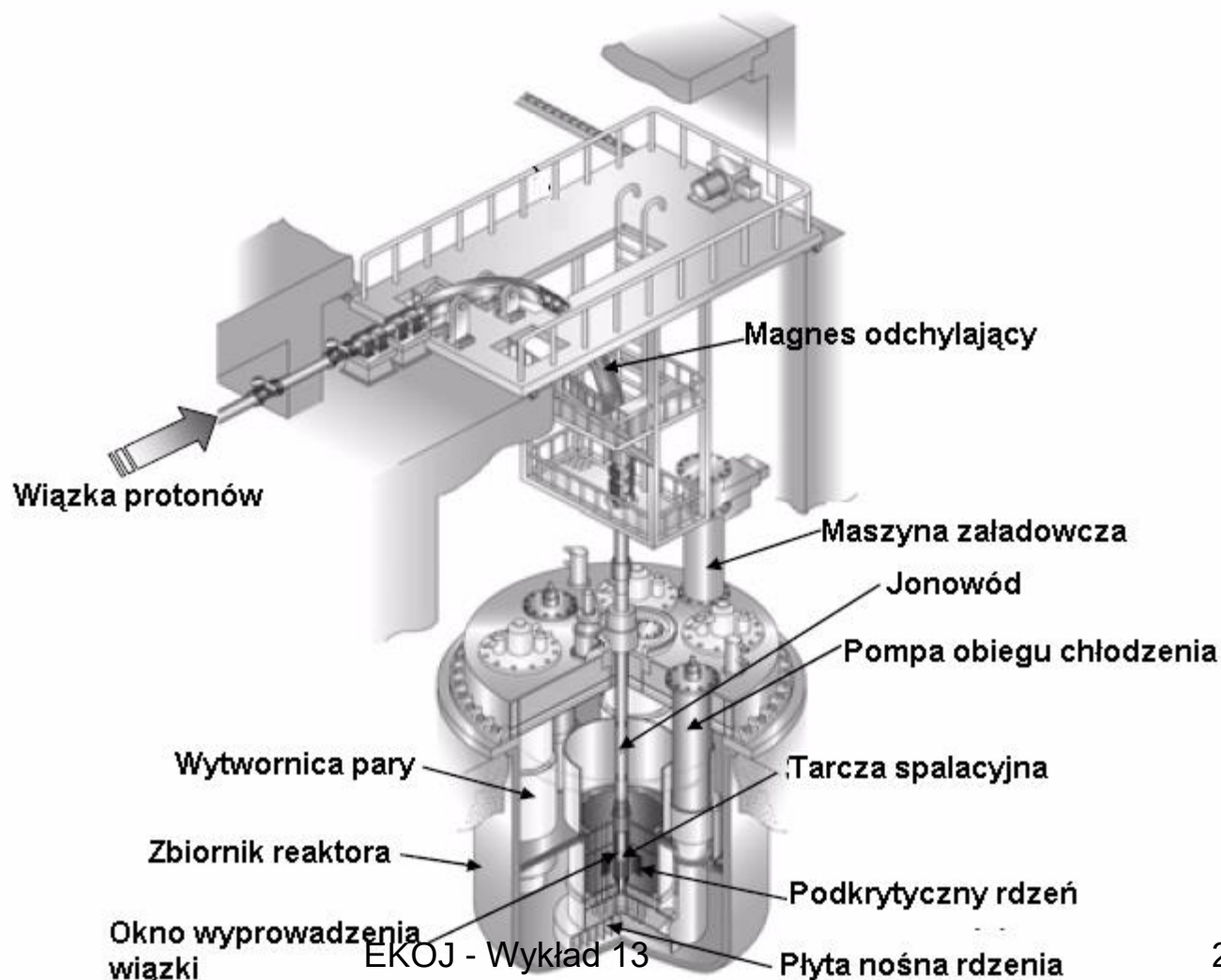
Idea transmutacji jądrowej



Doprowadzić do rozszczepienia jak największej ilości aktywności.
Otrzymujemy energię i zmniejszamy radiotoksyczność wypalonego paliwa

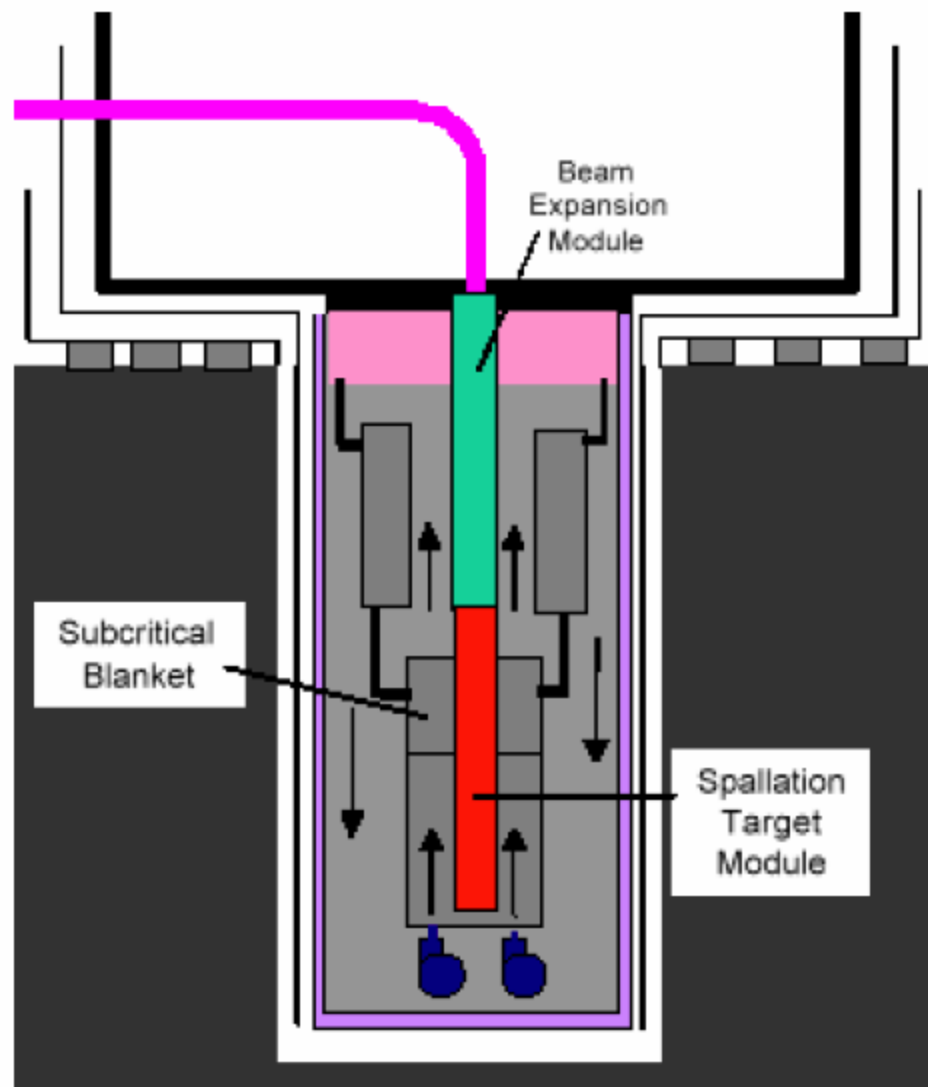


Schemat koncepcji reaktora do „wypalania” aktywności



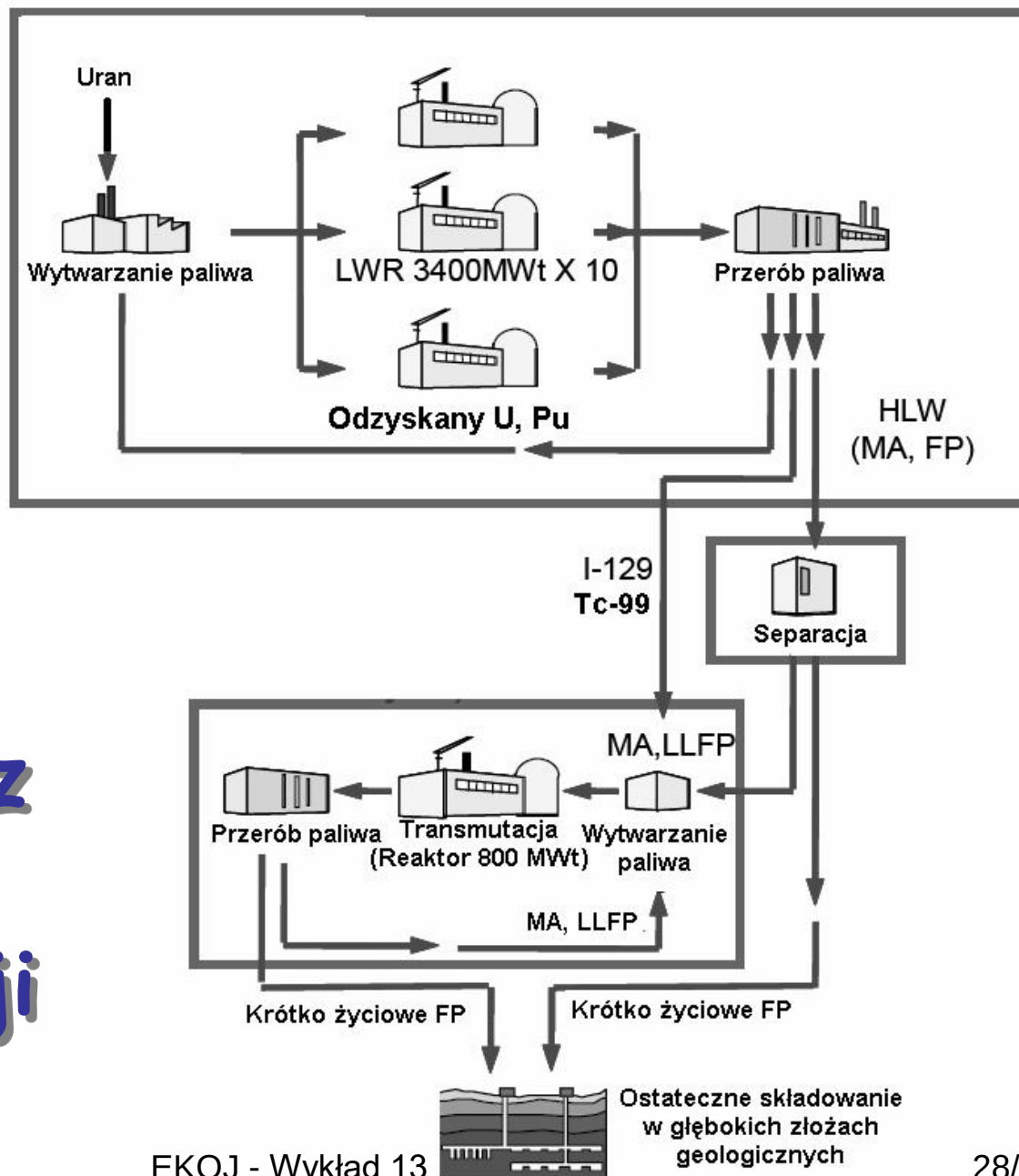
Accelerator Driven System (ADS)

Do inicjowania rozszczepienia w podkrytycznym płaszczu strumień neutronów dostarczany jest w reakcji spalacji wywoływanej w centralnej tarczy przez wiązkę protonów z zewnętrznego akceleratora protonów.

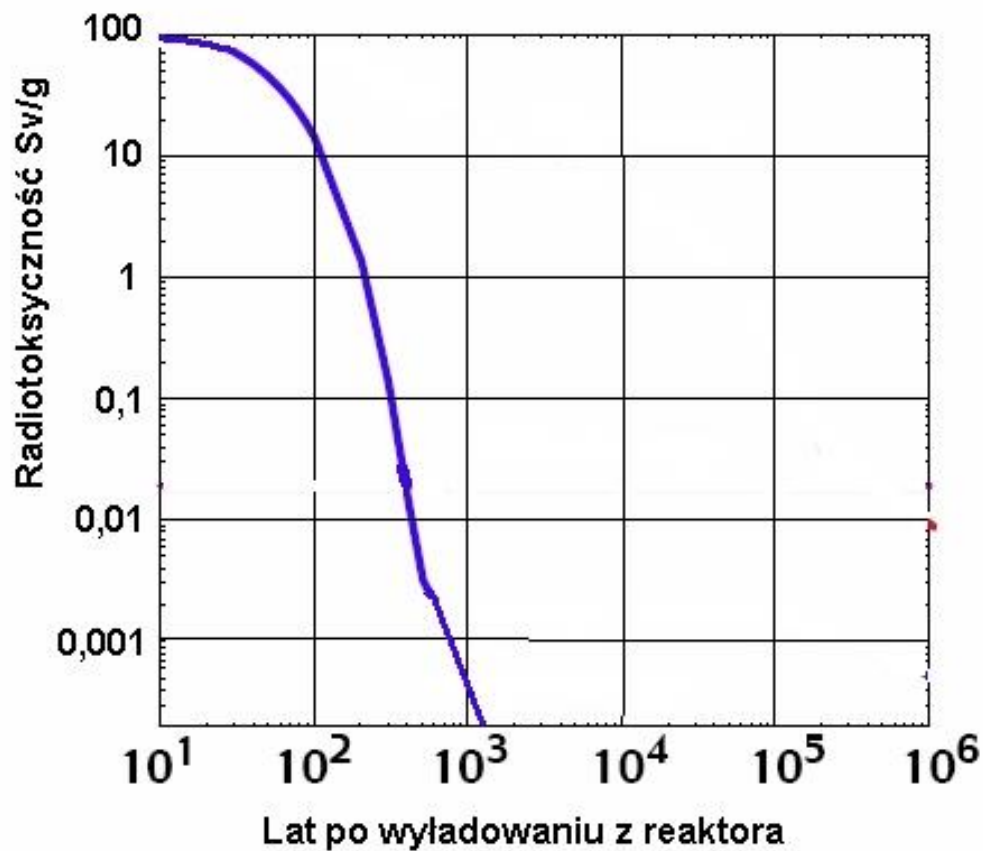




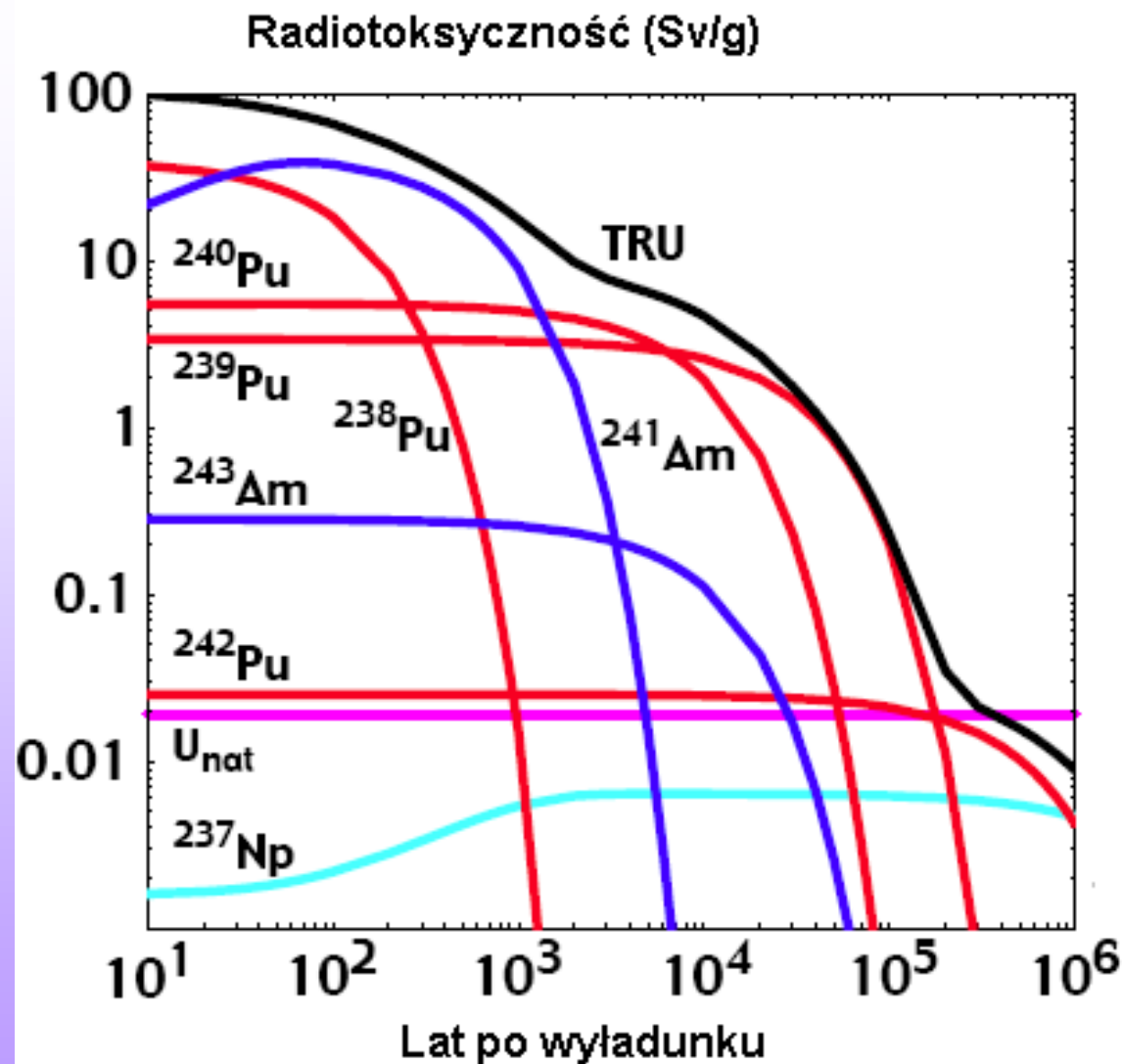
System elektrowni jądrowych z reaktorem transmutacji



Zanik aktywności odpadów radioaktywnych

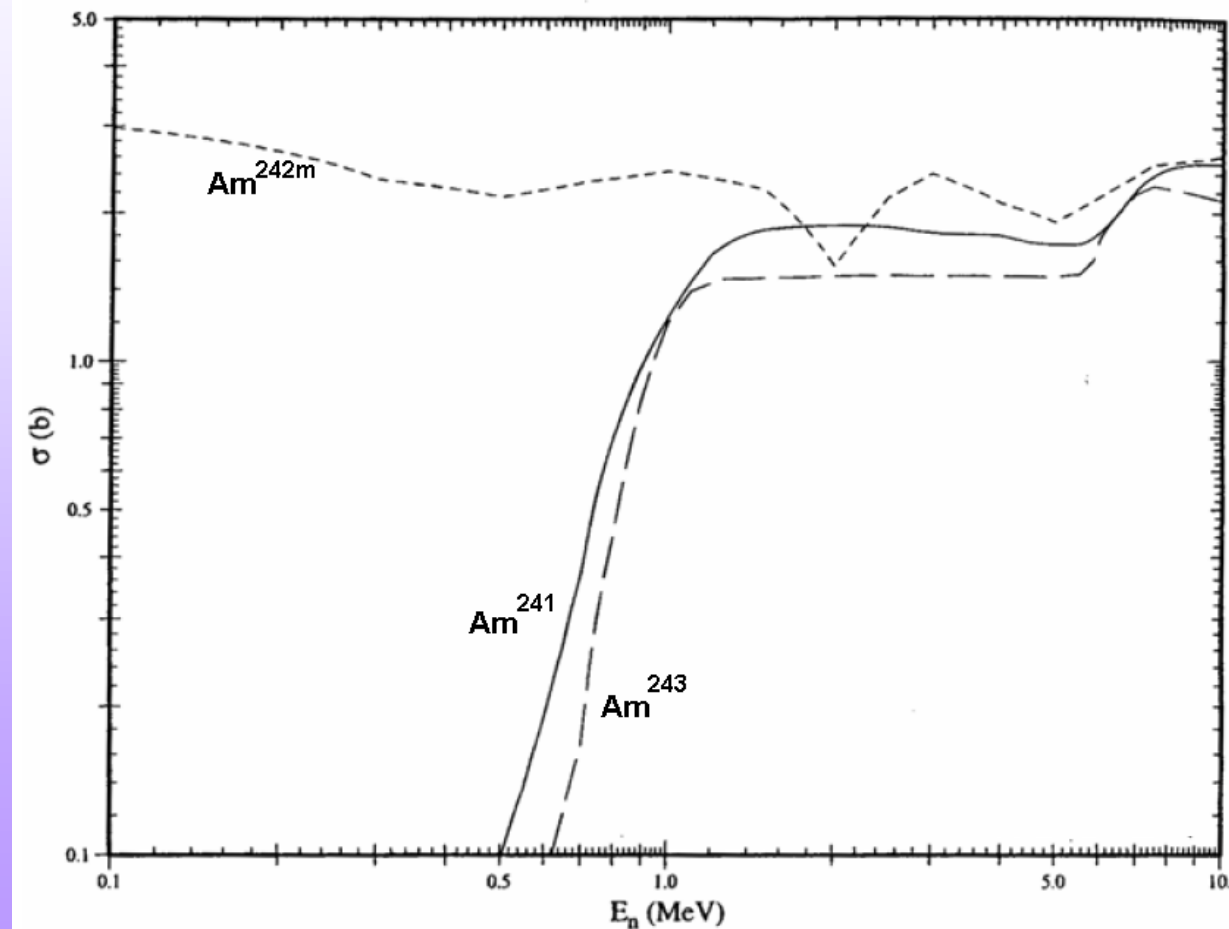


Składowe radiotoksy- czności wypalonego paliwa

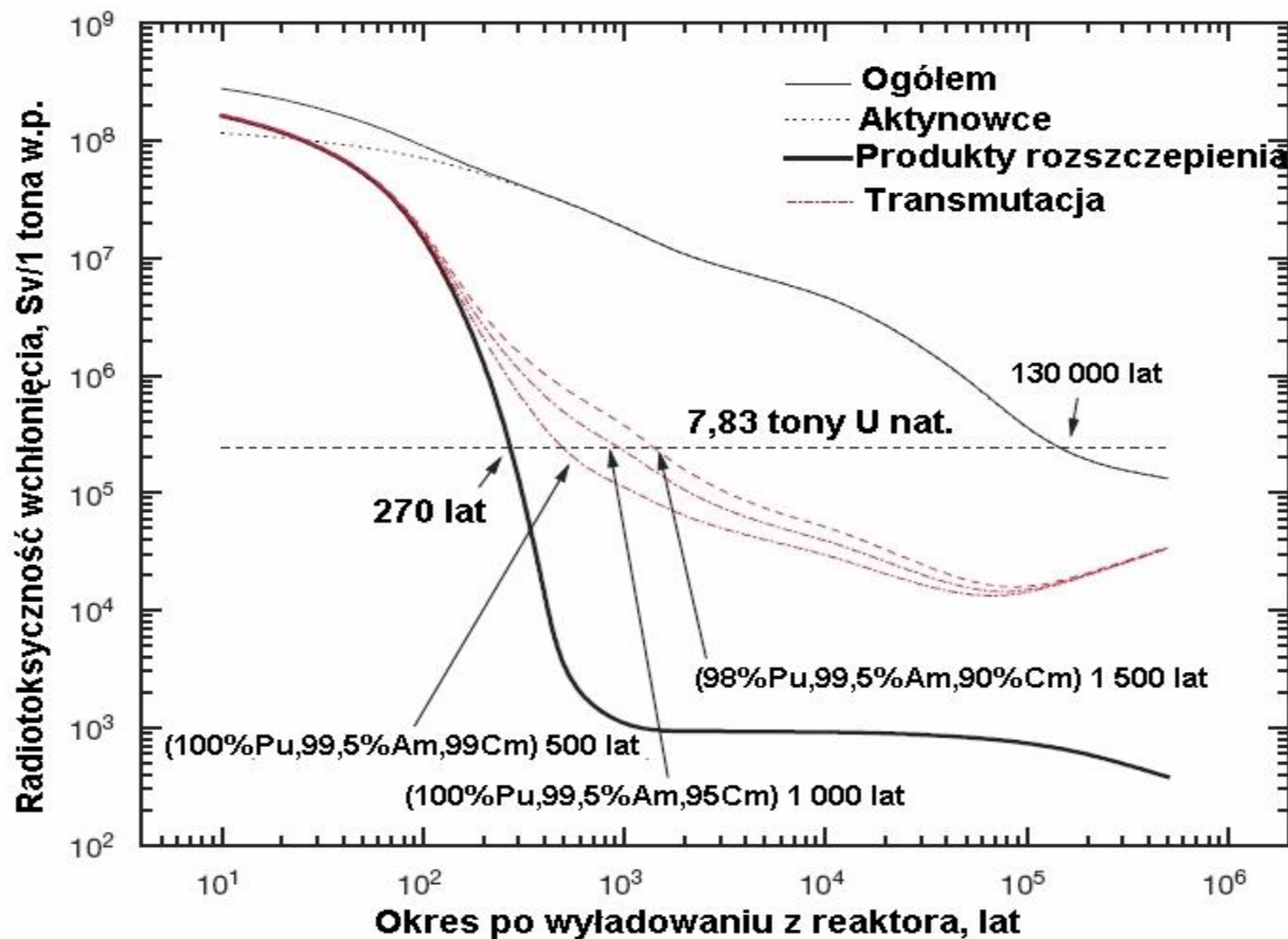


Transmutację prowadzi się naświetlając wypalone paliwo w reaktorze na neutronach prędkich

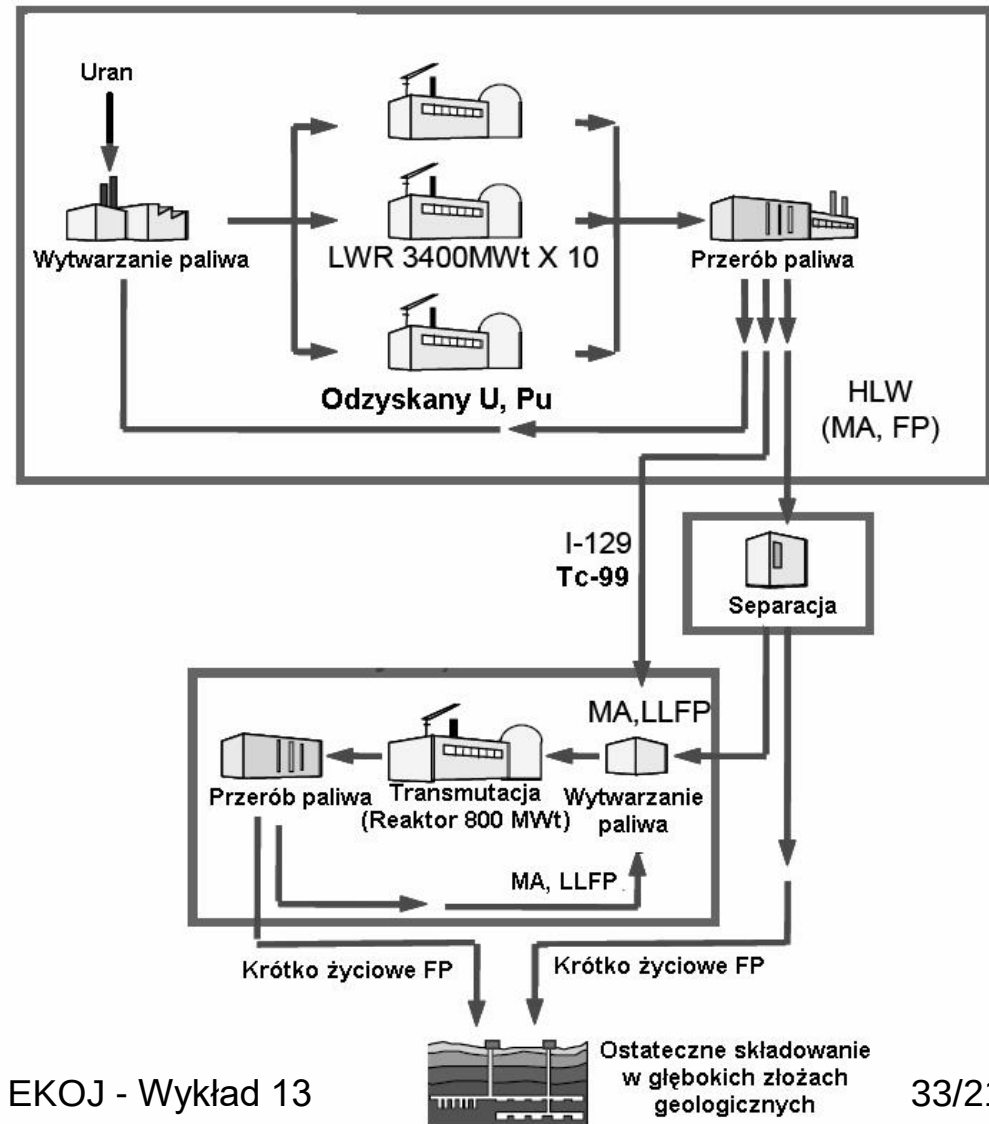
Większość izotopów aktynowców ulega rozszczepieniu neutronami dużych energii



Zmniejszenie radiotoksyczności w wyniku transmutacji.



System elektrowni jądrowych z reaktorem transmutacji



Odpady promieniotwórcze

Odpady z eksploatacji elektrowni jądrowej

- ❑ Odpady niskoaktywne - 50 m³ na GW(e) rocznie
- ❑ Odpady średnioaktywne 33 m³ na GW(e) rocznie
- ❑ Odpady niskoaktywne: dekontaminacja

Odpady średnioaktywne: zawartość filtrów
oczyszczania wody obiegu pierwotnego

Odpady - co robimy

Odpady niskoaktywne

- ☐ Odpady ciekłe - zatężane - odwrócona osmoza, wyparka beton, tworzywa sztuczne
- ☐ Odpady krótkożyciowe $T_{1/2} < 5$ lat przechowuje się na terenie elektrowni. Po 50 latach „chłodzenia” są to zwykłe odpady komunalne.
- ☐ Odpady pozostałe - są pakowane w hoboki a następnie transportowane na składowisko

Odpady średnioaktywne

1. Odpady ciekłe - zatężanie, zestalanie
2. Odpady stałe - prasowanie, zabezpieczanie w pojemnikach stalowych lub betonowych - składowanie

Likwidacja reaktora energetycznego

Moc reaktora 3 400 MWt - 1 000 MWe;

Okres pracy reaktora - 60 lat;

Okres „chłodzenia” po wyłączeniu - 10 lat.

Odpady niskoaktywne - 9 000 m³/GWe

Odpady średnioaktywne -1 000 m³/GWe

Koszt likwidacji

Stopa dyskonta	0%	5%	10%
Koszt, zł/MWh	2,30	0,214	0,014