



Material informacyjny

opracowany przez Departament Energii Jądrowej

Ministerstwa Energii

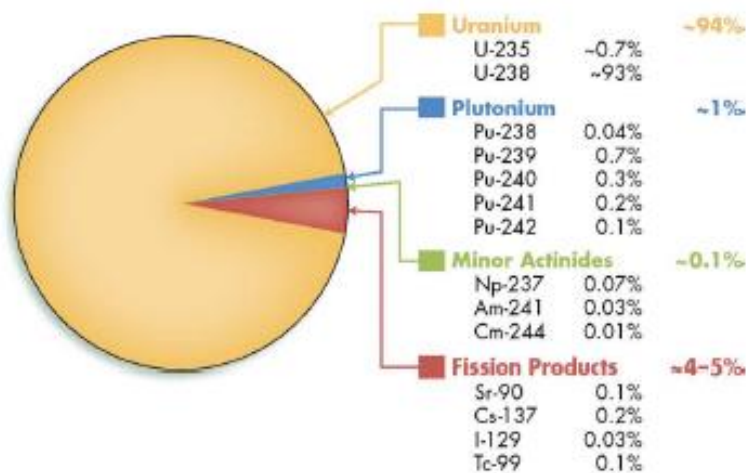
Czerwiec 2017

WYPALONE PALIWO JĄDROWE – DO RECYKLINGU?

Wypalone paliwo jądrowe po wyładowaniu z reaktora stanowi odpad promieniotwórczy, składowany następnie w specjalnych warunkach. Jednak może być ono także traktowane jako surowiec wtórny, zawierający znaczne ilości niewykorzystanej energii.

WYPALONE PALIWO

Wypalone paliwo wyładowane z reaktora jądrowego jest mieszaniną różnych izotopów, które nie



były obecne w świeżym paliwie, lecz powstały w wyniku procesów zachodzących w trakcie pracy reaktora. Paliwo w swojej zasadniczej masie (94%) składa się z tych samych materiałów co przed wypaleniem, czyli głównie z **uranu**. Pozostałe 4-5% procent masy to **produkty rozszczepienia** (*Fission Products* - FP) powstałe w wyniku reakcji rozszczepienia izotopów U-235 i Pu-239 oraz **pluton** wytworzony z U-238 (1%). Produkty rozszczepienia mają czas połowicznego zaniku (rozpadu) krótszy niż 90 lat (z wyjątkiem 7 izotopów).

Rys. 1. Typowy skład wypalonego paliwa w reaktorach PWR pracujących na paliwie UO_2

W wypalonym paliwie znajdują się również aktywnowce¹ - głównie

¹ **Aktywnowce** (An) - grupa pierwiastków chemicznych wydzielona z układu okresowego. Ich nieoficjalny wspólny symbol to An. Grupa ta liczy 15 metali: aktyn (Ac), tor (Th), protaktyn (Pa), uran (U), neptun (Np.), pluton (Pu), ameryk (Am), kiur (Cm), berkel (Bk), kaliforn (Cf), einstein (Es), ferm (Fm), mendelew (Md), nobel (No), lorens (Lr). Wszystkie aktywnowce są promieniotwórcze. Praktycznie tylko tor, protaktyn i uran występują w skorupie ziemskiej, ponieważ ich okres połowicznego zaniku jest rzędu wieku Ziemi. Śladowe ilości neptunu i plutonu można znaleźć w rudach uranu. Są one prawdopodobnie produktem oddziaływania prędkich neutronów pochodzących z promieniowania kosmicznego na jądra uranu. Aktywnowce położone w układzie okresowym za uranem to tzw. transuranowce.

Mniejsze (pomniejsze) **aktywnowce** (*Minor Actinides* – MA) – pierwiastki z grupy aktywnowców z wyłączeniem uranu i plutonu, które nazywane są **głównymi aktywnowcami** (*Major Actinides*). Do najważniejszych z nich należą: neptun-237, ameryk-241, 243, kiur-242 do 248 i kaliforn-249 do 252.

Transuranowce (TRU) – pierwiastki promieniotwórcze o liczbach atomowych większych niż 92. Należą do nich aktywnowce położone za uranem, o liczbach atomowych 93 - 103 (neptun, pluton, ameryk, kiur, berkel, kaliforn, einstein, ferm, mendelew, nobel, lorens). Praktycznie nie występują w przyrodzie i są otrzymywane w drodze sztucznych przemian jądrowych.



transuranowce (TRU) - które powstają w wyniku kolejnych wychwytyń neutronów w uranie oraz szeregu rozpadów promieniotwórczych. W odróżnieniu od produktów rozszczepienia większość aktywnowców ma czas połowicznego zaniku od 100 do 10 mln lat.

Spośród transuranowców szczególne znaczenie posiadają **pluton** i **mniejsze** (pomniejsze) **aktywnowce** (*Minor Actinides* – MA) - głównie neptun (Np), ameryk (Am) i kiur (Cm), które są α – promieniotwórcze i charakteryzują się bardzo długim okresem połowicznego zaniku. Ilość MA w wypalonym paliwie rośnie wraz ze stopniem jego wypalenia (ze względu na dłuższy czas oddziaływania neutronów na uran), jest także wyższa w wypalonym paliwie MOX.

Paliwo	UO ₂	UO ₂	MOX	MOX
Stopień wypalenia [GWd/t]	33	60	33	60
Okres chłodzenia [lata]	5	5	3	3
Zawartość MA [kg/rok/GWe]	22,2	26,3	77,9	78,0

Tab. 1. Zawartość MA w wypalonym paliwie w reaktorze PWR w zależności od stopnia wypalenia i rodzaju paliwa

Aktywnowce				Okres połowicznego zaniku	Produkty rozszczepienia			
²⁴⁴ Cm	²⁴¹ Pu	²⁵⁰ Cf	²⁴³ Cm	10-30 lat	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	⁸⁵ Kr	
²³² U		²³⁸ Pu		60-90 lat			¹⁵¹ Sm	
	²⁴⁹ Cf	²⁴² Am		141-351 lat	żaden produkt rozszczepienia nie ma okresu połowicznego zaniku w zakresie od 100 lat do 200 tys. lat			
	²⁴¹ Am		²⁵¹ Cf	431-898 lat				
²⁴⁰ Pu	²²⁹ Th	²⁴⁶ Cm	²⁴³ Am	5-7 tys. lat				
	²⁴⁵ Cm	²⁵⁰ Cm	²³⁹ Pu	8-24 tys. lat				
	²³³ U	²³⁰ Th	²³¹ Pa	32-160 tys. lat				
		²³⁴ U		211-290 tys. lat	⁹⁹ Tc		¹²⁶ Sn	⁷⁹ Se
²⁴⁸ Cm		²⁴² Pu		340-373 tys. lat				
	²³⁷ Np			1-2 mln lat	⁹³ Zr	¹³⁵ Cs		
²³⁶ U			²⁴⁷ Cm	6-23 mln lat		¹⁰⁷ Pd	¹²⁹ I	
²⁴⁴ Pu				80 mln lat	>7%	>5%	>1%	>0,1%
²³² Th		²³⁸ U	²³⁵ U	0,7-12 mld lat	udział produktów rozszczepienia			

Tab. 2. Okresy połowicznego zaniku dla typowego składu izotopowego wypalonego paliwa

Wypalone paliwo stanowi zasadniczy udział w odpadach promieniotwórczych. Obecność w nim produktów rozszczepienia (FP) oraz transuranowców (TRU - głównie Pu i MA) decyduje zasadniczo o radiotoksyczności tych odpadów i o konieczności ich izolowania od otoczenia. Przez pierwsze kilkadziesiąt lat dominujące znaczenie mają FP, natomiast pluton i MA odpowiadają za radiotoksyczność i generację ciepła w późniejszym okresie. Pewien wkład do wspomnianej radiotoksyczności wnoszą również długożyciowe produkty rozszczepienia takie jak: jod (I)



i technet (Tc) oraz krótkożyciowe takie jak: stront (Sr) i cez (Cs). Mniejsze aktywnowce i produkty rozszczepienia stanowią **niewielki procent całkowitej masy rozładowanego paliwa**.

Niemniej jednak ponieważ są źródłem promieniowania to w przypadku ich uwolnienia do otoczenia przedstawiają zagrożenie dla organizmów żywych. Radioaktywność wypalonego paliwa maleje z czasem i dopiero po upływie kilku tysięcy lat stanie się równa aktywności rudy, z której to paliwo wyprodukowano. W okresie tym istnieje więc konieczność izolacji odpadów promieniotwórczych od biosfery np. w stabilnych głębokich formacjach geologicznych.

Izotop	Okres połowicznego zaniku
Kiur-244 (^{244}Cm)	18 lat
Stront-90 (^{90}Sr)	29 lat
Cez-137 (^{137}Cs)	30 lat
Ameryk-241 (^{241}Am)	430 lat
Pluton-239 (^{239}Pu)	24 000 lat
Technet-99 (^{99}Tc)	213 000 lat
Neptun-237 (^{237}Np)	2 100 000 lat
Jod-129 (^{129}I)	16 000 000 lat

Tab. 3. Okresy połowicznego zaniku dla głównych składników wypalonego paliwa

POSTĘPOWANIE Z WYPALONYM PALIWEM

Neutrony o niskich energiach kinetycznych (0,25 meV) nazywane są neutronami termicznymi. Są one najbardziej efektywne w wywoływaniu rozszczepień w uranie i plutonie (U i Pu mają bardzo duży przekrój czynny na rozszczepienie neutronami termicznymi). Neutrony prędkie mają energię kinetyczną kilka milionów razy większą od termicznych (>2MeV). Wszystkie neutrony uwalniane podczas reakcji rozszczepienia są początkowo neutronami prędkimi. W obecnych elektrowniach jądrowych materiał zwany moderatorem (najczęściej zwykła woda) jest wykorzystywany do spowolnienia prędkich neutronów. Wyzwalane one są podczas rozszczepienia U lub Pu do energii termicznej - niezbędnej do podtrzymywania łańcuchowej reakcji rozszczepienia - która generuje ciepło wykorzystywane następnie do produkcji prądu elektrycznego.

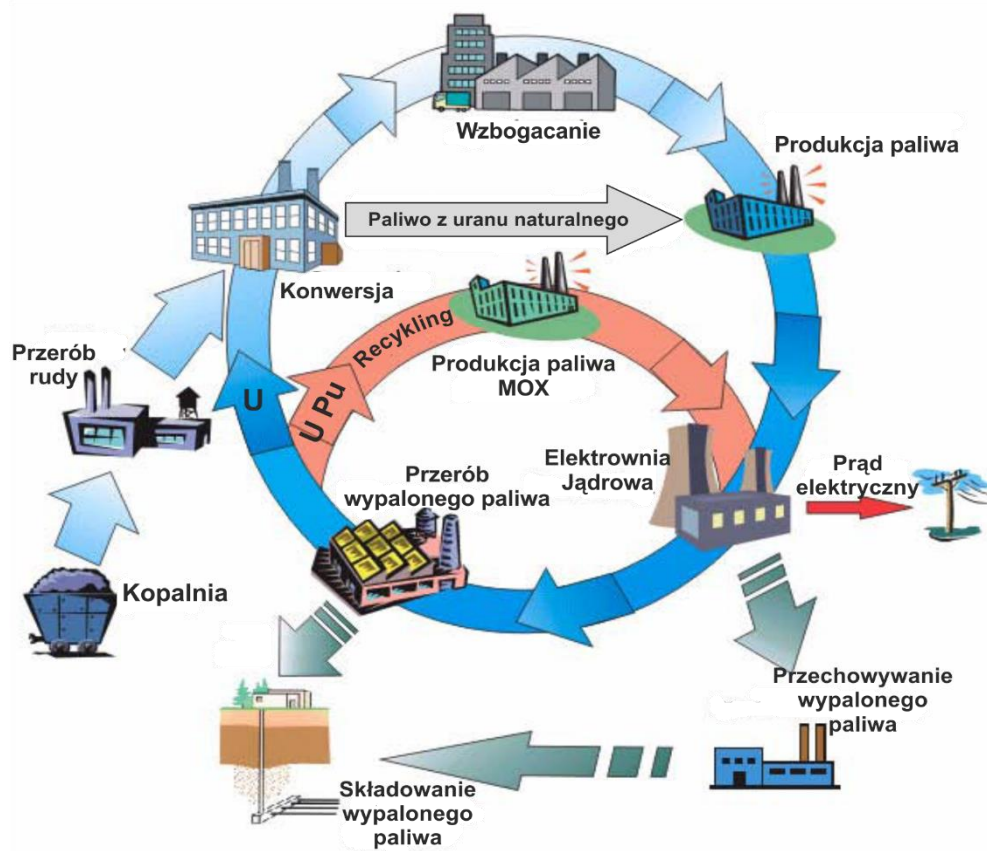
Neutrony prędkie są mniej efektywne od neutronów termicznych do wywoływania rozszczepień w uranie i plutonie. Mogą jednak być wykorzystywane do inicjowania takich rozszczepień w **szerszej gamie izotopów** (istnieją takie izotopy, które są rozszczepialne wyłącznie przez neutrony prędkie a nie są rozszczepialne przez neutrony termiczne). **Reaktor prędkie** jest reaktorem, który nie zawiera moderatora i pracuje na neutronach prędkich (rozszczenia wywoływane są przez neutrony prędkie a nie termiczne).

Gdy jądro atomu wychwytuje neutron i nie ulega rozszczepieniu może stać się mniej stabilne i przekształcić w inny pierwiastek chemiczny w następstwie rozpadu promieniotwórczego (α , β , γ lub innego). W reaktorze jądrowym powstają w ten sposób długożyciowe izotopy sztucznych pierwiastków takie jak np.: neptun-237 (^{237}Np - okres połowicznego zaniku 2,1 mln. lat), pluton-239 (^{239}Pu - 24000 lat) i ameryk-243 (^{243}Am - 7400 lat). Wszystkie te izotopy są promieniotwórcze i **niektóre z nich – szczególnie pluton - mogą być wykorzystane następnie jako paliwo jądrowe**. Z uwagi na ich długi okres połowicznego zaniku oraz toksyczność stanowią one istotną część wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych, które przez to muszą być przez długi okres izolowane od otoczenia.



Istnieją trzy opcje postępowania z wypalonym paliwem po jego rozładunku i przeniesieniu do tymczasowych mokrych przechowalników znajdujących się na terenie elektrowni jądrowej:

- Bezpośrednie składowanie w głębokich warstwach geologicznych (cykl otwarty).
- Przerób w celu odzyskania uranu oraz plutonu zawartego w wypalonym paliwie i ponowne wykorzystanie tych pierwiastków do produkcji nowego paliwa jądrowego (MOX i ERU) wykorzystanego w reaktorach termicznych (cykl półzamknięty).
- Przerób w celu odzyskania uranu, plutonu oraz mniejszych aktywności i ponowne wykorzystanie tych pierwiastków jako paliwo dla reaktorów prędkich (cykl zamknięty).



Rys. 2. Schemat ideowy jądrowego cyklu paliwowego

Składowanie

Wiele krajów opracowało plany przechowywania odpadów wysokoaktywnych w stabilnych skalnych formacjach na głębokości kilkuset metrów. Zaawansowane są badania w Szwecji i Finlandii, gdzie parlamenty zaaprobowwały tego rodzaju rozwiązania technologiczne. Odpady wysokoaktywne będą tam składowane w szczelnych pojemnikach ze stali borowej, umieszczonych w miedzianych kontenerach otoczonych gliniastym bentonitem.

W 2003 r. pojawiła się także koncepcja KE utworzenia międzynarodowego składowiska odpadów wysokoaktywnych. W tym celu powstała organizacja ERDO zrzeszająca 14 państw, której zadaniem jest opracowanie studium wykonalności takiego projektu.

Kwestią oczekującą na rozwiązanie jest koncepcja sposobu ostatecznego składowania wypalonego paliwa, które nie podlegało przerobowi. Należy zastanowić się czy zapewnić możliwość



odzyskania w przyszłości zawartości składowanych odpadów. Są ku temu pewne racjonalne przesłanki – w szczególności jest możliwe, iż przyszłe pokolenia mogą uważać zgromadzone odpady za cenne surowce energetyczne. Jednakże warto zauważyć, że długotrwałe składowanie nieprzerobionego wypalonego paliwa może rodzić także obawy, iż zgromadzone paliwo może w przyszłości stać się źródłem plutonu do zastosowań wojskowych. Po wielu latach składowania aktywność produktów rozszczepienia zmaleje na tyle, iż możliwy będzie łatwiejszy dostęp do zgromadzonego paliwa. Ponadto niepożądana frakcja ^{240}Pu rozpada się o wiele szybciej niż ^{239}Pu więc z upływem czasu będzie maleć jej zawartość w wypalonym paliwie i przez to wzrastać jego przydatność do zastosowań wojskowych.

Państwo	Postępowanie z wypalonym paliwem	Obiekty, praktyczne działania
Belgia	Obecnie przerób następnie przejście do bezpośredniego składowania	Centralne składowisko odpadów w Dessel. Podziemne laboratorium uruchomione w 1984 w Mol Budowa składowiska rozpocznie się w 2035 r.
Chiny	Przerób	Centralne składowisko paliwa w Lan Zhou w prowincji Gansu. Wybór miejsca składowania do 2020 r. Podziemne laboratorium od 2020, składowanie od 2050 r.
Finlandia	Bezpośrednie składowanie	Program rozpoczęty w 1983 r. Agencja Posiva Oy utworzona w 1995 r. do zarządzania odpadami i opracowania technologii głębokiego składowania. Od 2004 r. budowa podziemnego laboratorium w Onkalo, składowisko ma być czynne od 2023 r.
Francja	Przerób	Podziemne laboratorium, badania w pokładach gliny i granitu. Parlament w 2006 r. zatwierdził politykę głębokiego składowania w pojemnikach z możliwością odzysku zawartości. Pokłady gliny w m. Bure przewidziane na składowanie od 2025 r.
Hiszpania	Bezpośrednie składowanie	Agencja ds. zarządzania odpadami ENRESA utworzona w 1984 r. Centralne przejściowe składowisko w Villar de Canas od 2016 r., badania nad głębokim składowaniem.
Indie	Przerób	Badania nad głębokim składowaniem odpadów wysokoaktywnych.
Japonia	Przerób	Podziemne laboratorium w m. Mizunami działające od 1996 r. Składowisko odpadów wysokoaktywnych w m. Rokkasho czynne od 1995 r., kolejne w m. Mutsu od 2018 r. Agencja ds. zarządzania odpadami utworzona w 2000 r., trwają prace nad wyborem do 2025 r. głębokiego składowiska z możliwością odzysku zawartości, uruchomienie w 2035 r.
Kanada	Bezpośrednie składowanie	Organizacja zarządzania odpadami (NWMO) utworzona w 2002 r. Potwierdzona polityka głębokiego składowania z możliwością odzysku zawartości. Badania lokalizacyjne rozpoczęte w 2007 r., przewidywany termin uruchomienia składowiska w 2035 r.
Korea Płd.	Bezpośrednie składowanie,	Program składowania odpadów zatwierdzony w 1998 r.



	starania o zgodę USA na przerób	Organizacja zarządzania odpadami (KRWM) utworzona w 2009 r. przekształcona w roku 2013 w KORAD. Planowana budowa centralnego przejściowego składowiska, w dalszej kolejności przerób.
Niemcy	Obecnie przerób następnie przejście do bezpośredniego składowania	Planowanie składowiska od 1973 r. Wykorzystywane komory w kopalniach soli w m. Ahaus i Gorleben. Głębokie składowanie w m. Gorleben po 2025 r.
Rosja	Przerób	Organizacja zarządzania odpadami (NO RAO) utworzona w 2012. Podziemne laboratorium w pokładach granitu i gnejsu w m. Krasnojarsk od 2015 r. może zostać przekształcone w składowisko odpadów po 2024. Poszukiwania miejsc na składowiska na płw. Kola, wiele działających składowisk przejściowych (Żeleznogorsk).
Szwajcaria	Przerób	Centralne przejściowe składowisko w ZL Wurenlingen czynne od 2001 r., mniejszy przechowalnik w Beznau. Podziemne laboratorium w m. Grimsel od 1993 r.
Szwecja	Bezpośrednie składowanie	Centralne przejściowe składowisko CLAB w Oskarshamn czynne od 1985 r. docelowo głębokie składowanie. Podziemne laboratorium badawcze w m. Aspo dla składowania odpadów wysokoaktywnych. Na centralne składowisko wybrano m. Forsmark.
USA	Bezpośrednie składowanie, możliwość zmiany decyzji	Od 1977 r. zakaz przerobu paliwa. Departament Energii odpowiedzialny za wypalone paliwo od 1998 r. zgromadził fundusz na pokrycie kosztów składowania w wysokości 40 mld \$. Zaawansowane badania i w 2002 r. decyzja o budowie składowiska w Yucca Mountain w Nowadzie – w 2009 r. wstrzymana. Możliwość uruchomienia centralnego przejściowego składowiska wypalonego paliwa.
Wlk. Bryt.	Przerób	Odpady wysokoaktywne pochodzące z przerobu są zeszkliwane i składowane w m. Sellafield.

Tab. 4. Przegląd polityki państw w zakresie postępowania z wypalonym paliwem

Jak widać z powyższego zestawienia większość państw nie podjęła zdecydowanej decyzji w sprawie ostatecznego składowania odpadów promieniotwórczych. Ma być ono składowane w głębokich pokładach geologicznych, a jednocześnie pozostaje otwarta opcja jego przerobu w przyszłości, jeśli będzie to uzasadnione ekonomicznie.

Przerób i odzyskiwanie uranu i plutonu

Wszystkie komercyjne zakłady przerobu paliwa stosują dobrze znaną i sprawdzoną metodę hydrometalurgicznego przerobu PUREX (*Plutonium URanium EXtraction*).

Uran po oczyszczeniu (RepU) przesyłany jest do zakładu konwersji po czym zostaje wzbogacony i trafia do zakładów produkujących z niego uranowe paliwo jądrowe (ERU).

Pluton kierowany jest bezpośrednio do zakładu produkcji paliwa i wraz z uranem (naturalnym lub zubożonym) tworzy paliwo MOX. Alternatywnie część odzyskanego uranu może pozostać razem z plutonem i oba te pierwiastki są przesyłane do produkcji paliwa MOX. Jest to tzw. proces COEX (*CO-EXtraction of actinides*). Zapobiega to sytuacji, w której pluton pozostaje osobno wydzielony



i mogłyby być wykorzystane do celów militarnych. W celu zwiększenia odporności proliferacyjnej prowadzi się obecnie badania nad innymi technologiami przerobu paliwa, które umożliwiłyby odzyskiwanie uranu i plutonu bez możliwości ich separacji i potencjalnego wykorzystania do celów militarnych.

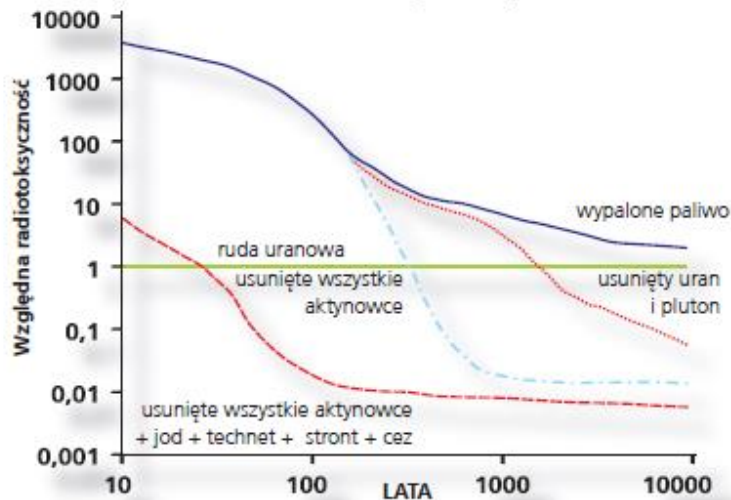
Przerób i odzyskiwanie uranu, plutonu i mniejszych aktywności

Po okresie spowolnienia prac nad reaktorami prędkimi, spowodowanego polityką nieproliferaacji (możliwość produkcji plutonu dla celów wojskowych) obecnie następuje powrót do koncepcji takich reaktorów z uwagi na fakt, iż mogą one zostać wykorzystane do likwidacji zbędnego plutonu militarnego oraz wypalonego paliwa z reaktorów termicznych. Odbywa się to w zamkniętym cyklu paliwowym, w którym wypalone paliwo jest przerabiane za pomocą technologii pyroprocessingu w paliwo MOX, które z kolei zasila reaktor prędkie. Ponieważ energie neutronów w rdzeniu takiego reaktora są bardzo wysokie umożliwia to rozszczepianie (spalanie) transuranowców. Jednocześnie w strumieniu wysokoenergetycznych neutronów zachodzi proces transmutacji, czyli przekształcania długożyciowych nuklidów promieniotwórczych w wyniku pochłonięcia neutronu w nuklidy krótkożyciowe lub nawet stabilne (np. transmutacja ^{99}Tc w stabilny ^{102}Ru). Procesy te powodują zasadnicze zmniejszenie ilości wysokoaktywnych odpadów i czasu ich składowania.

Dla uzyskania lepszego efektu zmniejszenia aktywności odpadów promieniotwórczych proces transmutacji powinien być poprzedzony separacją krótkożyciowych lub stabilnych produktów rozszczepienia (*partitioning*), aby pod wpływem neutronów prędkich nie przekształciły się w izotopy długożyciowe.

W nowoczesnych projektach reaktorów prędkich nie występuje płaszcz z paliworodnego uranu. Cała produkcja i spalanie plutonu wraz z innymi transuranowcami odbywa się w rdzeniu reaktora przez co nie ma dostępu do plutonu. Także proces przerobu wypalonego paliwa przebiega w taki sposób, aby odzyskany pluton nie występował w czystej postaci, lecz w wysokoaktywnej mieszaninie z produktami rozszczepienia i innymi aktywnościami przez co nie ma możliwości jego wykorzystania do produkcji broni jądrowej.

Zastosowanie transmutacji w stosunku do mniejszych aktywności takich jak: Np, Am, Cm oraz niektórych długożyciowych produktów rozszczepienia: Tc-99, I-129, Cs-137, Sr-90 pozwoli zmniejszyć 1000-krotnie okres koniecznego składowania oraz 100-krotnie objętość odpadów promieniotwórczych. Usunięcie aktywności i długożyciowych produktów rozszczepienia mogłoby doprowadzić do sytuacji, w której **czas koniecznej separacji odpadów od otoczenia wynosiłby zaledwie kilkadziesiąt lat.**



Rys. 3. Zanik radioaktywności wypalonego paliwa jądrowego w zależności od przyjętej polityki gospodarowania odpadami promieniotwórczymi

W charakterze reaktora transmutacji przewiduje się zastosowanie reaktorów prędkich IV generacji lub reaktorów podkrytycznych sterowanych akceleratorem (*accelerator-driven reactor* - ADR).

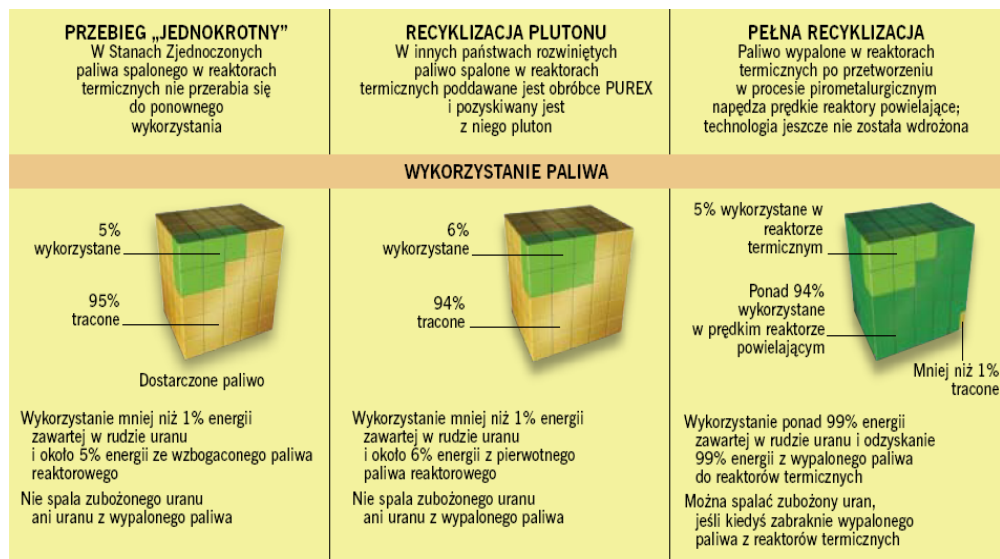
Efektywna transmutacja MA zachodzi w strumieniu neutronów prędkich. Ze względu na fakt, iż podczas rozszczepienia aktynowców powstaje mniej neutronów opóźnionych niż podczas rozszczepienia U-235 sterowanie reaktorem prędkim - w którym będzie zachodzić ten proces - jest utrudnione. W celu zachowania bezpieczeństwa zawartość MA w paliwie jest więc ograniczana do 5-6%. Wyższe zawartości aktynowców w paliwie stanowiłoby zagrożenie dla bezpieczeństwa pracy reaktora.

Izotop	Widmo neutronów	
	Termiczne	Prędkie
Np-137	3	27
Pu-238	7	70
Pu-239	63	85
Pu-240	1	55
Pu-241	75	87
Pu-242	1	53
Am-241	1	21
Am-242m	75	94
Am-243	1	23
Cm-242	1	10
Cm-243	78	94
Cm-244	4	33

Tab. 5. Prawdopodobieństwo transmutacji [%] w zależności od widma neutronów

Ponieważ systemy ADR są sterowane laserem, można w nich bezpiecznie zwiększyć zawartość aktynowców w paliwie (bez zagrożenia wystąpieniem nadkrytyczności) i dzięki temu są one bardziej wydajne w procesie zmniejszania radiotoksyczności odpadów promieniotwórczych.

Dzięki recyklingowi paliwa zasadniczo **poprawia się także bilans energetyczny cyklu paliwowego.**



Rys. 4. Wykorzystanie energii zawartej w rudzie uranu w reaktorach termicznych i prędkich

Zastosowanie reaktorów prędkich pozwoli wykorzystać ponad 99% energii zawartej w rudzie uranu i odzyskać 99% energii z wypalonego paliwa pochodzącego z reaktorów termicznych. W przyszłości można będzie w reaktorach takich spalać także zubożony uran powstający jako odpad w procesie wzbogacania. Dzięki wprowadzeniu reaktorów prędkich dostępne zasoby uranu (oraz toru) wystarczą na kilka tysięcy lat, co jest **kluczem do trwałego i zrównoważonego rozwoju naszej cywilizacji**.

Ułatwią one także rozwiązanie kwestii odpadów promieniotwórczych, który jest jednym z czynników ograniczających obecnie dalszy rozwój energetyki jądrowej na świecie.

Potencjalne korzyści, jakie niosą ze sobą reaktory prędkie doprowadziły do wzrostu zainteresowania rozwojem cyklu paliwowego opartego o ten rodzaj reaktorów. Są one przedmiotem badań w wielu krajach, które koordynowane są przez Międzynarodowe Forum Reaktorów IV Generacji (GIF). Do najbardziej zaawansowanych należą obecnie projekty reaktorów prędkich chłodzonych sodem, ołowiem/bismutem i ciekłymi solami oraz reaktory wysokotemperaturowe opracowywane w ramach następujących programów:

- PRISM, ARC-100 – US, Japonia.
- BN-600, 800 – Rosja;
- MBIR, SVBR, BREST – Rosja
- CEFR – Chiny;
- PFBR – Indie;
- KALIMER-600 – Rep. Korei;
- Astrid, Allegro, MYRRHA (ADR), Alfred – UE;

Większość projektów znajduje się dopiero w fazie prac badawczych, a ich komercyjne uruchomienie przewidywane jest na połowę bieżącego stulecia. Mogą one w przyszłości spełnić rolę technologii pośredniej (pomostowej) pomiędzy wprowadzanymi obecnie w energetyce ewolucyjnymi reaktorami pasywnymi Generacji III+ oraz fuzją jądrową.