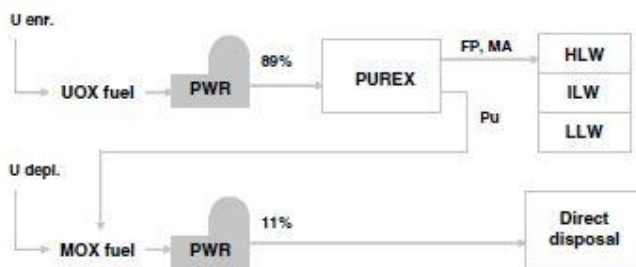


## Paliwo jądrowe wielokrotnego użytku

Raz wyprodukowane paliwo jądrowe nawet po wysłużeniu przydzielonego mu czasu w reaktorze posiada ogromne pokłady niewykorzystanej energii. Możliwości jej odzyskania stają się z roku na rok coraz szersze, ze względu na mnogość badań prowadzonych w wielu krajach świata. Daje to sposobność do efektywnego recyklingu napromieniowanego już paliwa, który jest konieczny, by zapewnić zrównoważony rozwój energetyki jądrowej. Problem nie jest nowy, jednak wydaje się, że świat nie stara się wystarczająco - do 2030 roku szacowana ilość składowanego na świecie wypalonego paliwa osiągnie 400 tys. t, a potencjalna ilość energii możliwej do odzyskania z tych zasobów wynosić będzie ok. 8 bilionów toe. Wprowadzając w Polsce energetykę jądrową, nasz kraj będzie musiał zająć stanowisko, czy dokładać materii do światowych zasobów odpadów jądrowych, czy zdecydować się na bardziej zrównoważone energetycznie rozwiązanie, pozwalające jednocześnie zagospodarować długożyciowe składniki wypalonego paliwa oraz chroniące przed proliferacją.

### Mixed Oxide Fuel



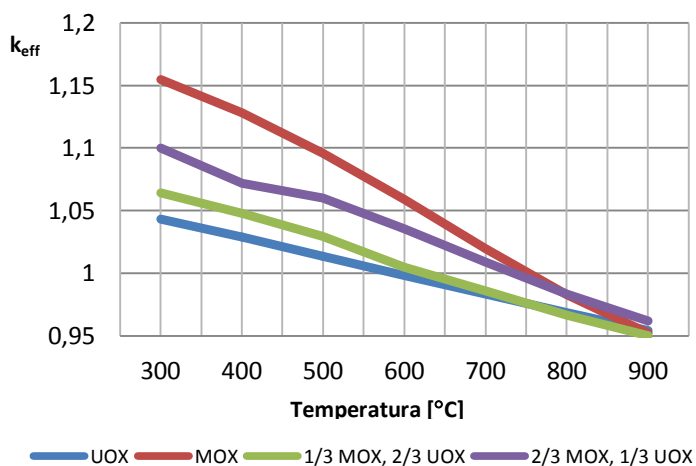
Rysunek 1 Schemat cyklu paliwowego uwzględniającego recykling wypalonego paliwa[2]

Zdecydowanie najpowszechniejszą formą spożytkowania energii drzemiącej w wypalonym paliwie (żeby nie powiedzieć że jedyną, która przyjęła się w praktycznym zastosowaniu na świecie) jest jego przeróbka z separacją uranu i plutonu od reszty materii. W rzeczy samej, recykling taki (Rys.1) zapewnia oszczędności w wykorzystaniu uranu naturalnego na poziomie 20%

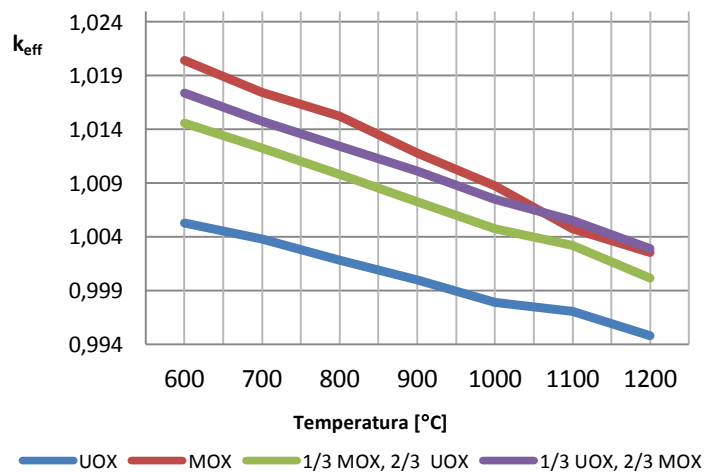
i w większości przypadków omija kosztowny proces wzbogacania uranu. Przerób wypalonego paliwa uranowego w paliwo MOX (*ang. Mixed OXide Fuel*) poprzedza krótkie składowanie w celu obniżenia emitowanego ciepła powyłączeniowego, zaś po całym procesie materiałami odpadowymi są aktywnocze mniejszościowe (*ang. MA, Minor Actinides*) tj. neptun, ameryk, kiur, a także produkty rozszczepienia. Typowym składem paliwa MOX jest mieszanka PuO<sub>2</sub> i UO<sub>2</sub> o zawartości izotopów plutonu na poziomie 4-10%, z czego przynajmniej 65% Pu to izotopy rozszczepialne: <sup>239</sup>Pu oraz <sup>241</sup>Pu. Uran natomiast to najczęściej zubożony materiał pochodzący z zakładów wzbogacania. Kasety MOX, w ilości średnio 1/3 wszystkich kaset, ładuje się do rdzenia razem z zestawami paliwowymi zawierającymi UOX.

### Cechy eksploatacyjne paliwa MOX

Nawet jeśli recykling wypalonego paliwa jest możliwy, kwestią najistotniejszą całego przedsięwzięcia jest analiza czy nowe paliwo daje się łatwo zaaplikować do obecnie stosowanych



Rysunek 2 Zależność efektywnego współczynnika mnożenia neutronów od temperatury chłodziwa [oprac. wł.]



Rysunek 3 Zależność  $k_{eff}$  od temperatury paliwa dla różnych składów paliwa jądrowego [oprac. wł.]

o dużej zawartości plutonu dosyć gwałtownie reagują obniżeniem współczynnika mnożenia neutronów, co prowadzi do relatywnie szybkiej zmiany stanu. Podobnie ma się sytuacja ze zmianą

Skład paliwa jądrowego	Fracja neutronów opóźnionych [%]
UOX	0,673
1/3 MOX, 2/3 UOX	0,536
2/3 MOX, 1/3 UOX	0,457
MOX	0,312

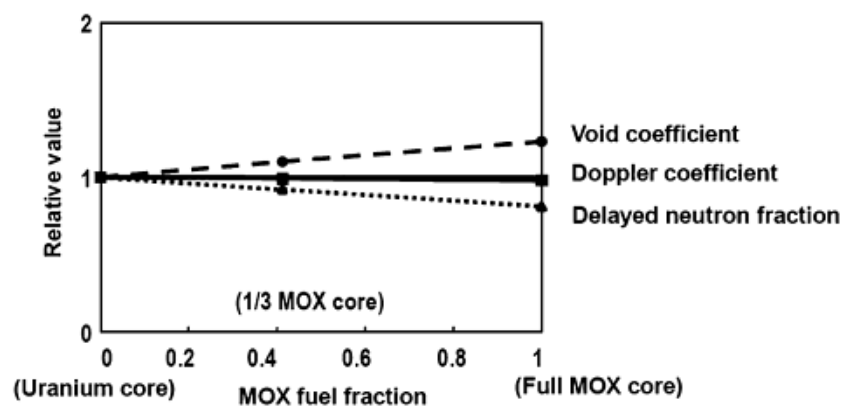
Tabela 1 Frakcje neutronów opóźnionych dla różnych składów paliwa jądrowego [oprac. wł.]

reaktorów. Biorąc pod uwagę fakt, że skład izotopowy paliwa MOX różni się od paliwa uranowego, należy się spodziewać, że jego działanie będzie także zmienione. Do zbadania tych różnic wpływających na stabilność reaktora, użyjemy uproszczonego modelu reaktora lekkowodnego, sporządzonego w posługującym się metodą Monte Carlo kodzie MCNP przez autorkę artykułu. Jako pierwszy wskaźnik porównawczy weźmy reakcję układu załadowanego kasetami MOX oraz UOX na zmianę temperatury chłodziwa. Wiemy, że pożądane jest tutaj ujemne sprzężenie zwrotne – czyli powolny spadek intensywności rozszczepień, bodźcem którego jest wzrost temperatury, mogący np. świadczyć o awarii. Łatwo jest wywnioskować z wykresu na Rys. 2, że przy wystąpieniu w wodzie wysokich temperatur, każde paliwo zawierające domieszkę MOX reaguje obniżeniem współczynnika mnożenia neutronów, co powoduje powrót do poprzedniej temperatury. Elementem odróżniającym MOX od paliwa uranowego jest jednak to, że paliwa

obniżeniem współczynnika mnożenia temperatury paliwa, przedstawioną na Rys.3. Współczynnik  $k_{eff}$  spada tym szybciej, im więcej kaset MOX zawiera rdzeń. Efektem tego jest z jednej strony bardzo pożądane działanie w sytuacjach podniesienia temperatury układu (np. przy celowym lub przypadkowym spadku ciśnienia), ale jednocześnie relatywnie trudne staje się wyłączenie reaktora, gdy podczas obniżania się temperatury, reaktywność rdzenia przyjmuje dodatnie wartości.

Na stabilność reaktora duży wpływ ma także frakcja neutronów opóźnionych, emitowanych z produktów rozszczepienia. W przeciwieństwie do neutronów natychmiastowych, które tworzą się w czasie mniejszym niż  $10^{-14}$ s już podczas podziału jądra, neutrony opóźnione pojawiają się po czasie większym niż 0.05s, sięgającym nawet minuty, jednak są także wliczane w bilansie pokolenia. Odpowiednio duża frakcja neutronów opóźnionych pozwala na zmianę mocy w łagodny sposób, z dojściem do pełnej intensywności rozszczepień tym źródłem, a więc i do żądanej mocy, z kilkusekundowym opóźnieniem. Jeśli reaktor działałby tylko na neutronach natychmiastowych (lub gdy frakcja neutronów opóźnionych byłaby znikomo mała), każda zmiana reaktywności skutkowałaby bardzo szybką zmianą mocy, co czyniłoby reaktor praktycznie niesterowalnym. Posługując się wcześniej wspomnianym modelem, w Tabeli 1 przedstawione zostały przybliżenia wartości frakcji neutronów opóźnionych dla paliw o różnej zawartości MOX. Zauważyć można łatwo, iż paliwo MOX ma ok. dwa razy mniejszą frakcję neutronów opóźnionych niż paliwo UOX. Efektem tego jest mniejszy margines bezpieczeństwa ograniczający dozwolone zmiany reaktywności.

Kolejnym parametrem eksploatacyjnym jaki należałoby przytoczyć jest tzw. współczynnik przestrzeni parowych określający wpływ pustych obszarów w przestrzeni między paliwem a moderatorem, np. pęcherzyków pary wodnej, gdy reaktor zbliża się do wrzenia. Jak można zaobserwować na poniższym Rys.4, zawartość MOXu, paliwa o zmienionym



Rysunek 4 Współczynnik przestrzeni parowych [4]

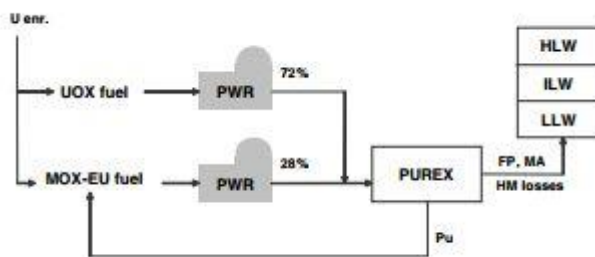
składzie izotopowym, podnosi wartość tego współczynnika, co w praktyce oznacza mniejszą zdolność wygaszania reakcji przy pojawieniu się pary wodnej w zbiorniku reaktora (np. podczas awarii reaktora związanej niekontrolowanym wrzeniem chłodziwa). Nie jest to jednak poziom powodujący zagrożenie, a przy modyfikacji stosunku moderatora do paliwa w reaktorze, różnice te są minimalne.

Ostatnim przytoczonym aspektem, będzie fakt, iż na granicach kaset UOX-MOX występuje skok mocy spowodowany przechodzeniem neutronów termicznych z rejonu uranowego na granicę rejonu MOX zawierającego stosunkowo więcej jąder rozszczepialnych neutronami o tych energiach. Rozwiązaniem tej kwestii jest stosowanie kaset o mniejszej zawartości plutonu na brzegach, co pozwala na łagodny wzrost mocy w zestawach plutonowych.

Nowo powstałe po recyklingu zużytej materii paliwo nie odbiega obecnie jakością wykonania od świeżego. Dobrym czynnikiem ilustrującym jest poziom wypalenia jakie osiąga w reaktorze, będący na poziomie paliwa uranowego. Jego nieco zmieniony skład izotopowy determinuje jednak warunki wymagające wzięcia pod uwagę na etapie projektowania paliwa, a następnie podczas operacji reaktora, co nie zmienia jednak faktu, że dzisiejszy rozwój technologii zmierza do umożliwienia budowy reaktora zasilanego wyłącznie paliwem MOX. Przykładem są tu EPR (ang. European Pressurized Reactor) oraz EC6 (ang. Enhanced CANDU 6), które mogą zawierać nawet 100% paliwa MOX.

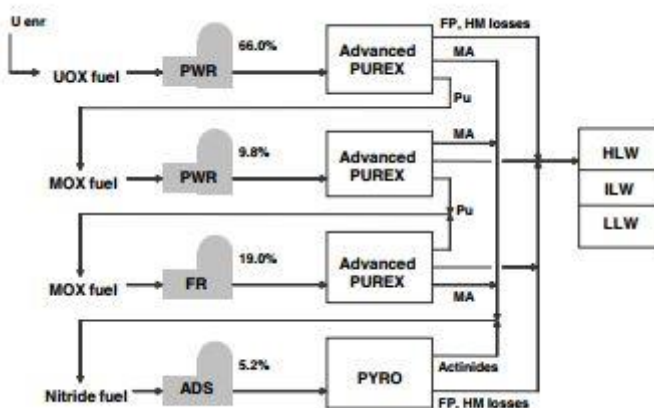
## Wielokrotne korzystanie z jednej porcji paliwa

Udowodnione zostało już że jednokrotny przerób paliwa nie sprawia większych trudności eksploatacyjnych. Jednak oczywistym jest fakt, iż po wyładunku paliwa MOX z reaktora, problem dalej nie jest rozwiązany – ponownie wypalone paliwo zawiera nadal dużą ilość plutonu, a do tego pewną ilość kłopotliwych aktywności. Jeśli takie paliwo uznane zostanie za materiał nadający się do dalszego przerobu, możemy wyróżnić kilka ścieżek postąpienia z nim w przyszłości. Z jednej strony przyczynią się one do zrównoważonego korzystania z materiałów rozszczepialnych i pełniejszego wykorzystania ich potencjału, a z drugiej strony zapewnią ochronę przed proliferacją.



Rysunek 5 Cykl paliwowy zakładający wielokrotny recykling MOX [2]

sposobem wykorzystania napromieniowanego MOXa wykazały że nie tylko przerób tego paliwa jest możliwy (mimo wyższych poziomów promieniowania gamma i neutronowego), ale także jego działanie w reaktorze nie sprawia problemów. Minusem tej strategii jest fakt, że długożyciowe aktywności traktowane są tu jako odpad, natomiast plusem : pluton jest w ciągłym obiegu, co redukuje jego poziom i minimalizuje ryzyko proliferacji.

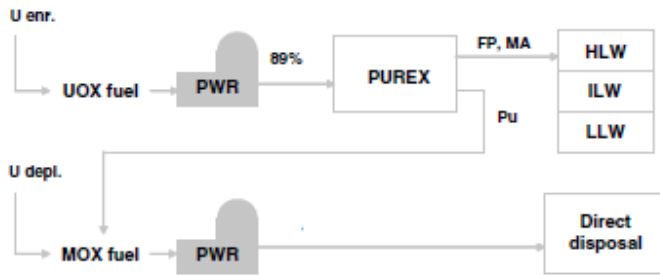


Rysunek 6 Cykl paliwowy zakładający wykorzystanie reaktorów FR i ADS [2]

sterowanego akceleratorem (*ang. Accelerator Driven System*). Układ ten umożliwi wypalenie paliwa, maksymalnie redukując ilość aktywności i domykając cykl paliwowy. Zastosowanie reaktora prędkiego ma także dodatkową korzyść – umożliwi wykorzystanie paliwa MOX składowanego przez dłuższy czas, w którym pewna frakcja plutonu zamieniła się w ameryk.

(a) Wielokrotny recykling paliw uranowo – plutonowych. Zakłada on przerób zużytego paliwa MOX-EU (zamiast zubożonego uranu, zastosowanie wzbogaconego), w połączeniu ze zużytym paliwem uranowym w celu „rozcieńczenia” Pu. Następnie pluton oddzielony od reszty składników staje się ponownie częścią paliwa MOX-EU i wraca do reaktora. Niemieckie doświadczenia z tym

(b) Rozwój zaawansowanego i efektywnego systemu wypalania plutonu i aktywności do odpadów w postaci produktów rozszczepienia. W tym przypadku podczas przerabiania zużytego paliwa, oprócz plutonu oddzielane są także aktywności. Pluton jest później wykorzystywany jako składnik MOX kolejny raz w reaktorze PWR oraz - po następnym przerobie - w reaktorze na prędkie neutrony (*ang. Fast Reactor*). Oddzielone MA stanowią natomiast paliwo reaktora



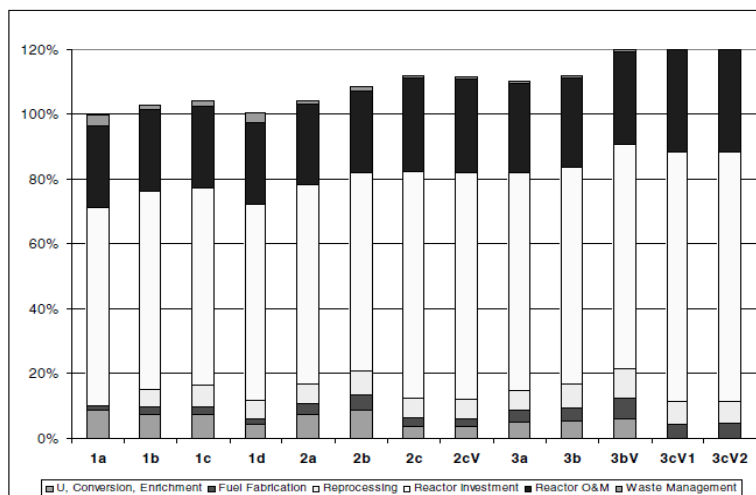
Rysunek 7 Cykl paliwowy zakładający wypalenie Pu i MA w neutralnej matrycy [oprac. wł.]

(c) Rozwój koncepcji neutralnych matryc (*ang. Inert Matrix Fuel*) do zastosowania z paliwem niezawierającym uranu. Matryce te posiadają wtopiony lub wbudowany materiał rozszczepialny (pluton, opcjonalnie aktywnocce) w celu minimalizacji produkcji świeżego plutonu z pochłoneń neutronów w  $^{238}\text{U}$ . Efektem byłaby destrukcja plutonu w ilości 90% lub większej

oraz eliminacja MA. Aplikacja owego paliwa mogłaby być kontynuacją cyklu po przerobieniu wypalonego paliwa MOX lub uranowego. Od ponad 20 lat kilka krajów na świecie (m.in. Kanada, Francja) bada warunki technologiczne i możliwości zastosowania owego paliwa.

## Czy oszczędność paliwa to oszczędność pieniędzy?

Do kompletnej oceny tematu warto wspomnieć jeszcze koszty poszczególnych cykli. Jak można wywnioskować z wykresu (Rys.8), użytkowanie paliwa po recyklingu w reaktorze lekkowodnym



Rysunek 8 Relatywny całkowity koszt generacji obliczony na podstawie nominalnych wartości jednostkowych [2]

powszechnie użytkowanymi jednostkami oraz są bardziej wymagające technologicznie od reaktorów lekkowodnych. Warto jednak podkreślić, że ten układ, mimo że droższy, pozwala na efektywną destrukcję plutonu i MA. Kosztów cyklu paliwowego z wykorzystaniem IMF nie sposób jeszcze oszacować, gdyż zależy to od rodzaju użytej matrycy, nad której formą i składem badania nadal trwają.

## Wnioski

Jednokrotne przerabianie paliwa wypalonego jest obecnie rozpowszechnioną metodą zmniejszenia objętości odpadów wysokoaktywnych, stosowaną przez wiele krajów na świecie. Działanie paliwa MOX w reaktorze jest dobrze poznane, łatwo jest także przewidzieć je za pomocą prostych symulacji

(słupki 2a) niesie za sobą kilkuprocentowy wzrost kosztów w porównaniu z kosztami jednokrotnego wykorzystania paliwa (słupki 1a) – głównie ze względu na konieczność przeróbki paliwa. Większymi kosztami cechuje się cykl włączający reaktory prędkie i sterowane akceleratorem (3b). Odznaczającymi się elementami całkowitego kosztu są tu wydatki inwestycyjne oraz operowanie i konserwacja, prawdopodobnie dlatego, że reaktory te nie są

komputerowych. Jeśli chodzi jednak o wykorzystanie dalszych możliwości użytkowania tej materii jądrowej jako paliwa, nie jest to na razie szeroko aplikowane na świecie. Przyczyn tego należy szukać w niskich cenach świeżego surowca, a także w ograniczonej możliwości przerobowej obecnie działających zakładów recyklingu i produkcji MOX. Ograniczeniem mogą być także koszty inwestycyjne związane z kwestią budowy nowych jednostek wypalających pluton i MA, które byłyby najefektywniejsze w tych działaniach, mają one jednak tyle zalet, że należy się spodziewać ich rozwoju w najbliższej przyszłości.

## Literatura

- [1] IAEA Technological reports series no. 415, 2003 : *Status and advances in MOX fuel technology*, Wiedeń. Dostępny: <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/6562/Status-and-Advances-in-MOX-Fuel-Technology>
- [2] OECD Publications, *Advanced fuel cycles and radioactive waste management*. Dostępny: <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2006/5990-advanced-nfc-rwm.pdf>
- [3] John R. Lamarsh, Anthony J. Baratta, 2001: *Introduction to Nuclear Engineering*, New Jersey. ISBN 0-201-82498-1
- [4] Janne Wallenius, *Transmutation in Light Water Reactors*, Sztokholm. Dostępny : [www.neutron.kth.se/courses/transmutation/LWRtransmutation.pdf](http://www.neutron.kth.se/courses/transmutation/LWRtransmutation.pdf)
- [5] Youqi Zheng, Hongchun Wu, Liangzhi Cao, and Shizhuang Jia, *Economic 2012: Evaluation on the MOX Fuel in the Closed Fuel Cycle*. Dostępny: <http://www.hindawi.com/journals/stni/2012/698019/>
- [6] J.L. Kloosterman, *Multiple Recycling of Plutonium in Advanced PWRs*, Petten. Dostępny : [www.janleenkloosterman.nl/papers/klooster9803.pdf](http://www.janleenkloosterman.nl/papers/klooster9803.pdf)
- [7] Nuclear Regulatory Commission, *Glossary*. Dostępny : <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary.html>
- [8] Marc Arslan, *MOX fuel recycling. Present status and prospects*, Proceedings of the GLOBAL 2009 congress, Paryż
- [9] Marian Kielkiewicz, 1978: *Jądrowe reaktory energetyczne*, Warszawa. To/79074/WN