

CYKL PALIWOWY: OTWARTY CZY ZAMKNIĘTY CZY TO WYSTARCZY ?

Stefan Chwaszczewski

Instytut Energii Atomowej POLATOM

W obecnie eksploatowanych reaktorach energetycznych, w procesach rozszczepienia jądrowego wykorzystywane jest około 0,6% uranu wydobywanego ze środowiska. Do wytworzenia 1 TWh energii elektrycznej potrzebne jest około 23 tony uranu naturalnego. W procesie wzbogacania powstaje ponad 20 ton tzw. „zubożonego uranu”. W paliwie jądrowym z masą uranu około 2,5 tony, rozszczepieniu ulega około 120 kg materiału rozszczepialnego. Pozostała masa paliwa stanowi długożyciowy odpad promieniotwórczy lub jest kierowana do przerobu chemicznego, w którym z wypalonego paliwa wydzielany jest chemicznie (a więc nie ma w nim rozdzielenia izotopów) uran, pluton, pozostałe transuranowce i produkty rozszczepienia. Odzyskane w ten sposób około 28 kg plutonu, w którym znajduje się około 65% izotopów rozszczepialnych plutonu, pozwoli wytworzyć w nowym paliwie MOX¹ dodatkowo około 0,15 TWh energii elektrycznej. Nie jest to mało, ale problemem jest tu koszt przerobu chemicznego oraz koszt wytworzonego paliwa MOX, w porównaniu z kosztem uzyskania świeżego paliwa uranowego. Do chwili obecnej koszty wytworzenia paliwa MOX – w przypadku nowo wybudowanych zakładów przerobu chemicznego i wytwarzania paliwa MOX – są wyższe od kosztów uzyskania ekwiwalentnych ilości świeżego paliwa uranowego. Procedura ta jest opłacalna tylko w przypadku zaadaptowania do tych celów militarnych zakładów przerobu wypalonego paliwa i militarnych zakładów z technologią plutonową. Dlatego na świecie tylko 40% wypalonego paliwa jest poddawane przerobowi chemicznemu.

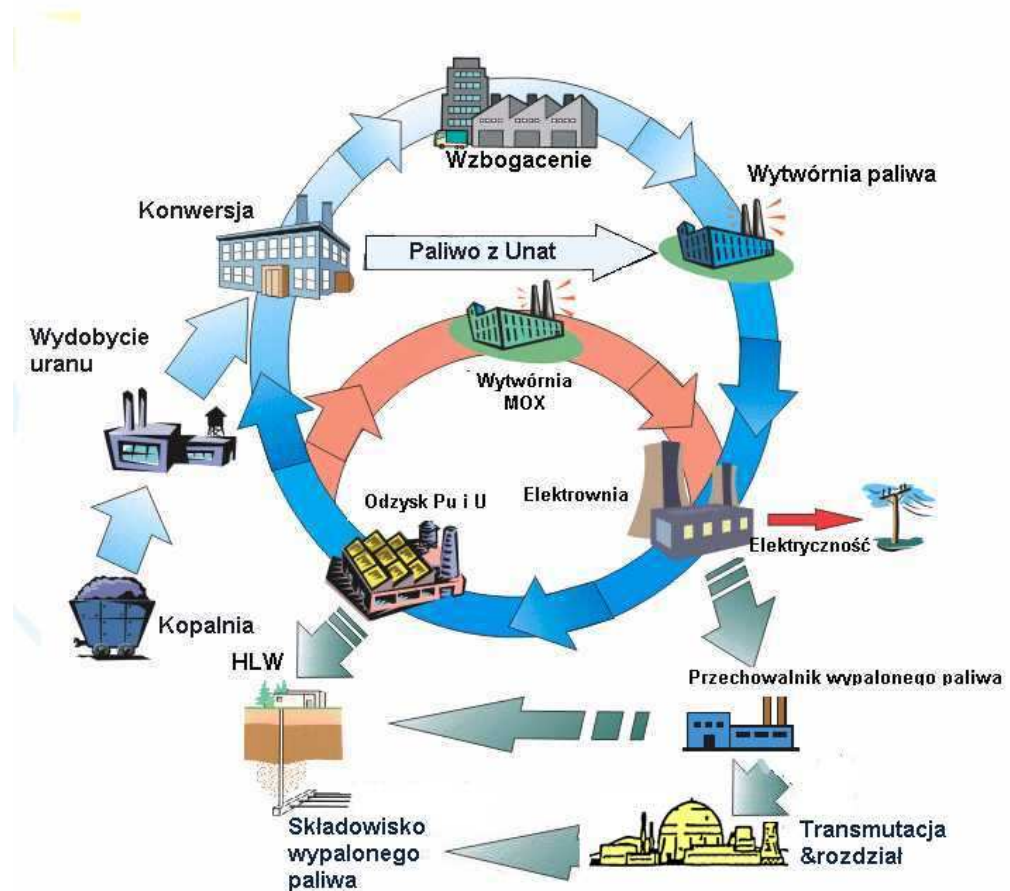
To byłaby najprostsza odpowiedź na zagadnienie przekazane w pierwszej części tytułu. Ale taka odpowiedź jest niewystarczająca. Gdyby można było doprowadzić do rozszczepienia wszystkie atomy transuranowców znajdujących się w wypalonym paliwie, z którego obecnie wytwarza się 1 TWh energii elektrycznej, uzyskano by dodatkowo około 18 TWh energii elektrycznej. Doprowadzenie do rozszczepienia wszystkich atomów uranu znajdujących się w 25 tonach uranu naturalnego (ilość uranu naturalnego niezbędna obecnie do wytworzenia 1 TWh energii elektrycznej – dla porównania, obecnie rocznie w Polsce wytwarzane jest około 150 TWh energii elektrycznej) pozwoliłoby uzyskać około 208 TWh!!! Ponieważ znamy procesy fizyczne pozwalające rozszczepić praktycznie wszystkie atomy uranu, trzeba przyznać, że obecna technologia reaktorów energetycznych jest niezwykle mało efektywna, żeby nie powiedzieć, że trwoniemy zasoby paliw jądrowych. Niejako wzorcową technologią może być przykład reaktora na stopionych solach uranu i toru, w którym chłodziwem jest ciekłe paliwo podlegające ciągłemu procesowi oczyszczania z produktów rozszczepienia. W reaktorze takim (prototyp reaktora na stopionych solach uruchomiono w latach sześćdziesiątych w USA) rozszczepieniu ulegają jądra U235, Pu239 i Pu241 wytworzone w cyklu U-Pu oraz jądra izotopu U233 wytworzonego w cyklu Th-U.

Dodatkowym aspektem sprawy jest fakt, że wytworzone w rezultacie rozszczepień radioaktywne produkty bardzo szybko ulegają rozpadowi, i po 500 – 1000 latach mogą być traktowane, jako odpady nieradioaktywne.

¹ Paliwo MOX – Mixed OXide fuel – paliwo wytworzone z dwutlenku plutonu otrzymanego w wyniku przerobu wypalonego paliwa zmieszane w odpowiedniej proporcji z dwutlenkiem uranu.

Jakie są zatem obecne technologie postępowania z wypalonym paliwem. Izotopy znajdujące się w wypalonym paliwie charakteryzują się długimi okresami rozpadu – rzędu dziesiątków tysięcy lat – a dodatkowo są alfa promieniotwórcze czyli wysoce radiotoksyczne².

Schemat całego cyklu paliwowego jest przedstawiony na rysunku 1. Wydobyty ze środowiska uran podlega konwersji i wzbogaceniu. Istnieje jeszcze możliwość wykorzystania w niektórych typach reaktorów uranu naturalnego jako paliwa jądrowego (ACR, CANDU). Wzbogacony lub naturalny uran stanowi surowiec do wytwarzania paliwa jądrowego, wykorzystanego następnie w reaktorze energetycznym. Po „wypaleniu” w reaktorze energetycznym, paliwo jest przez okres kilku lat „chłodzone” w basenie wodnym, zlokalizowanym bezpośrednio przy reaktorze. Przez ten okres szereg izotopów promieniotwórczych w paliwie ulega rozpadowi. Znacznie zmniejsza się wielkość generowanej mocy cieplnej, umożliwiając wywóz paliwa w specjalnych pojemnikach osłonowych poza teren reaktora.



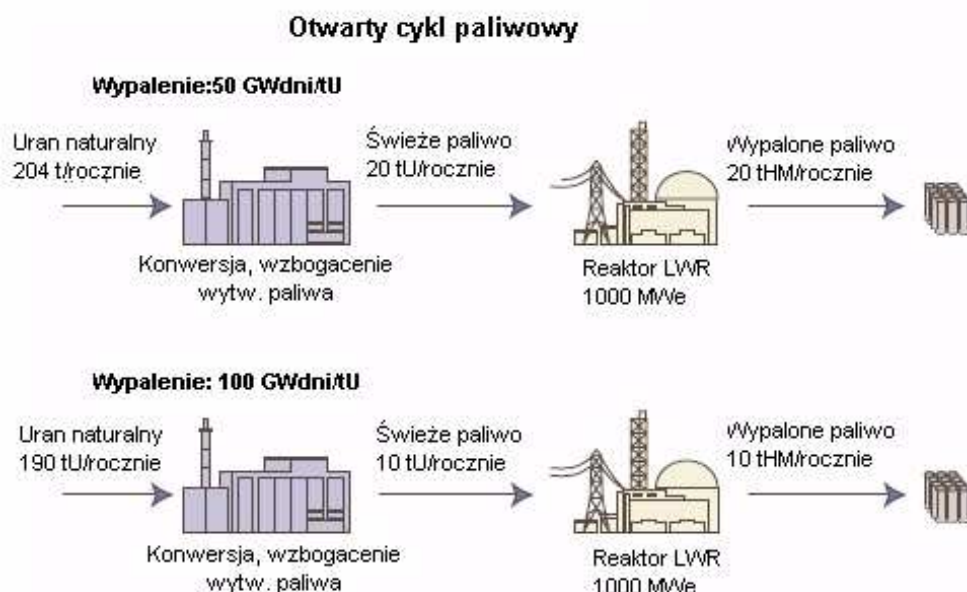
Rys. 1. Schemat cyklu paliwowego reaktorów jądrowych.

² Radiotoksyczność – wielkość dawki promieniowania otrzymana przez człowieka przy wchłonięciu jednostki masy lub jednostki aktywności izotopu promieniotwórczego.

Istnieje możliwość wykorzystania kilku scenariuszy postępowania z wypalonym paliwem:

- Ostateczne składowanie odpowiednio „schłodzonego” i zabezpieczonego paliwa w głębokich złożach geologicznych – tzw. otwarty cykl paliwowy, którego schemat przedstawiono na rysunku 2;
- Przerób wypalonego paliwa, wydzielenie z niego uranu i plutonu, wytworzenie paliwa typu MOX (Mixed OXide fuel) i wykorzystanie tego paliwa razem ze świeżym paliwem uranowym w reaktorze jądrowym – tzw. zamknięty cykl paliwowy z paliwem MOX, którego schemat przedstawiono na rysunku 3;
- Przerób wypalonego paliwa, wydzielenie uranu i plutonu oraz tzw. MA³ i wykorzystanie tych pierwiastków w paliwie dla reaktora na neutronach prędkich (wykorzystanie transmutacji jądrowej⁴) – tzw. cykl zamknięty z reprocessingiem aktywności. Schemat takiego postępowania z wypalonym paliwem pokazano na rysunku 4.

W celu porównania, ilości uranu naturalnego, świeżego paliwa, wypalonego paliwa, odpadów określono dla obiektu (obiektów) o mocy 1 000 MWe wytwarzających rocznie 8 TWh energii elektrycznej brutto.

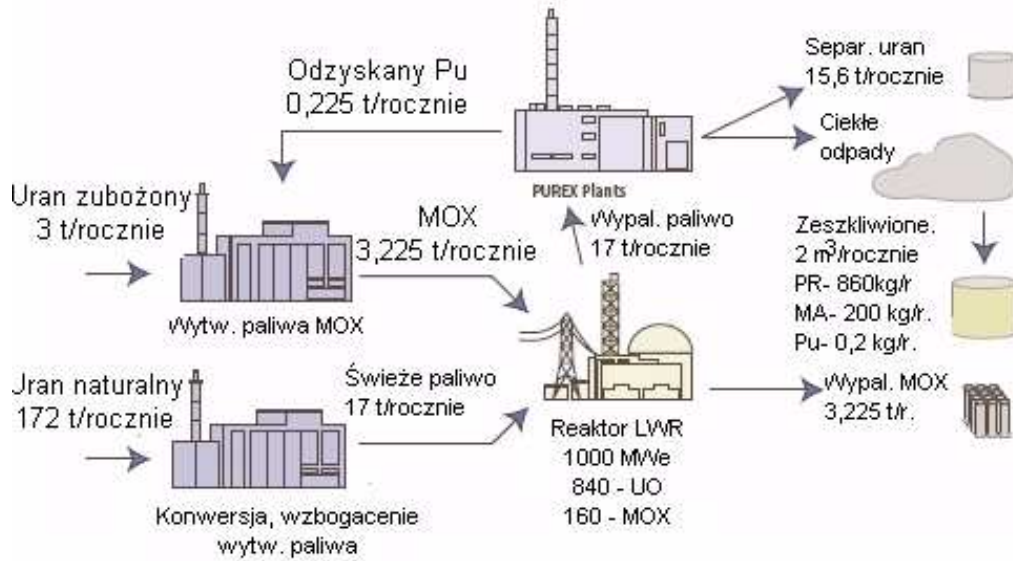


Rys. 2. Schemat otwartego cyklu paliwowego.

³ MA – Minor Actinide - aktywności mniejsze określają takie pierwiastki jak neptun, ameryk, kiur, bekerel, kaliforn, einstein i ferm.

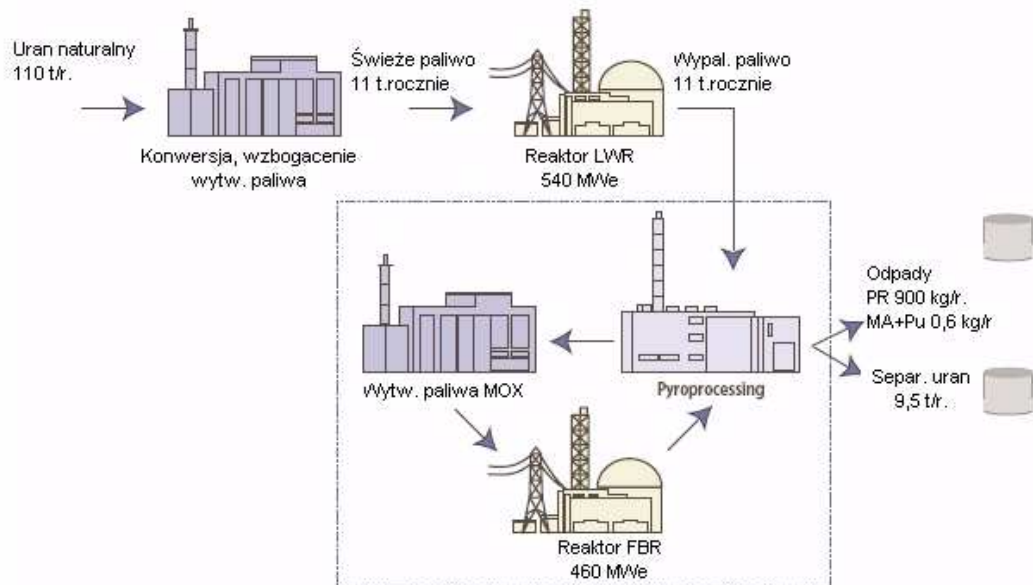
⁴ Transmutacja jądrowa – przemiany jądrowe wywołane neutronami, w których wyniku nierozszczepialne izotopy w wypalonym paliwie zostają przekształcone w izotopy rozszczepialne i następnie ulegają rozszczepieniu wytwarzając energię i produkty rozszczepienia.

Zamknięty cykl paliwowy (wykorzystanie paliwa MOX)



Rys. 3. Schemat zamkniętego cyklu paliwowego z wykorzystaniem paliwa MOX.

Zamknięty cykl paliwowy - pełny recykling aktywności



Rys. 4. Schemat zamkniętego cyklu paliwowego z pełnym recyklingiem aktywności.

W tabeli 1 przedstawiono dla każdego z wymienionych powyżej cykli paliwowych ilość uranu naturalnego, ilość składowanych odpadów promieniotwórczych oraz okres niezbędnej izolacji odpadów od środowiska. Jako okres izolacji przyjęto czas, w jakim aktywność tych odpadów zrówna się z aktywnością uranu i pozostających w równowadze z nim produktów rozpadu. Należy nadmienić, że wszystkie te technologie gwarantują pełne bezpieczeństwo postępowania z wypalonym paliwem.

Tabela 1. Porównanie charakterystyk cykli paliwowych reaktorów energetycznych.

Typ cyklu paliwowego	Ilość Unat/1 TWh	Ilość odpadów/1TWh	Okres sklad.
Cykl otwarty (wypal. 50 GWd/tU)	25,5 ton	2,5 ton	130 000 lat
Cykl zamknięty z MOX	21,5 ton	0,535 ton	3 000 lat
Cykl zamknięty z reprocessingiem aktywnoców	13,7 ton	125 kg	500 lat
Reaktor na stopionych solach	50 kg Unat+50 kg Th	100 kg	500 lat

Dla porównania przedstawiono wynik analiz zapotrzebowania na naturalny uran i tor w koncepcji reaktora wykorzystującego stopione sole uranu i toru (fluorki uranu i toru) pracującego z ciągłym oddzielaniem z paliwa produktów rozszczepienia. Doświadczalny reaktor tego typu był zbudowany w USA, jednakże występujące w tym czasie problemy materiałowe spowodowały porzucenie tej technologii. Jednakże ta technologia jest rozpatrywana jako perspektywiczna technologia IV generacji reaktorów energetycznych.

Z przedstawionych w tabeli 1 informacji wynika, że w miarę stosowania bardziej wyrafinowanych cykli paliwowych zmniejsza się ilość wydobywanego ze środowiska uranu niezbędnego do wytworzenia jednostki energii elektrycznej (1 TWh), zmniejsza się ilość składowanych odpadów promieniotwórczych oraz skraca się okres izolacji odpadów od środowiska. Czynnikiem, który obecnie i w przyszłości zdeterminuje wybór określonej opcji postępowania z wypalonym paliwem jest ekonomika. Do momentu, w którym uran naturalny jest stosunkowo tani, a koszty wykorzystania bardziej zaawansowanych cykli paliwowych są znaczne, najbardziej ekonomicznie uzasadnioną opcją jest otwarty cykl paliwowy. Takie rozwiązanie zostało przyjęte przez Finlandię, w której jest budowane składowisko wypalonego paliwa.

Należy nadmienić, że obecnie przeważa już opinia, że składowane dziś wypalone paliwo może być w perspektywie rozwoju technologii energetyki jądrowej surowcem energetycznym. Dlatego, składowiska wypalonego paliwa buduje się tak, aby w przyszłości można było je wydobyć i po przerobie wykorzystać jako nowe paliwo jądrowe.