

Cykl paliwowy reaktorów jądrowych lekkowodnych

Marcin Buchowiecki

Zakład Fizyki Molekularnej, Uniwersytet Szczeciński

1. Wstęp

W związku z rozwojem polskiej energetyki jądrowej ważnym zagadnieniem jest zapewnienie dostaw paliwa dla reaktora jądrowego oraz postępowanie ze użytym paliwem jądrowym. Oba te zagadnienia są etapami tzw. cyklu paliwowego obejmującego cały cykl życia paliwa jądrowego (uranu w odpowiedniej formie), który składa się kolejno z:

1. wydobywania (poprzedzonego identyfikacją złóż) i przeróbki rud uranu,
2. produkcji paliwa jądrowego i umieszczenia go w elementach paliwowych,
3. procesów zachodzących w reaktorze,
4. czasowego składowania zużytego paliwa,
5. recyklingu (etap opcjonalny),
6. postępowania z odpadami radioaktywnymi.

Wszystkie te etapy są wspólne dla dowolnego typu reaktora jądrowego, jednak wszystkie reaktory proponowane Polsce (np. francuskiej firmy AREVA) należą do grupy reaktorów, w których chłodziwem oraz spowalniczem neutronów jest lekka woda (H_2O). Lekką wodę odróżnia się od ciężkiej (D_2O), w której atomy „zwykłego” wodoru (1H) są zastąpione atomami deuteru – cięższego izotopu wodoru. Spowalnianie neutronów jest kluczowym zjawiskiem w działaniu reaktora, ponieważ rozszczepienie uranu, będące zjawiskiem generującym energię w reaktorze w postaci ciepła, wymaga neutronów o odpowiedniej energii tzw. neutronów termicznych.

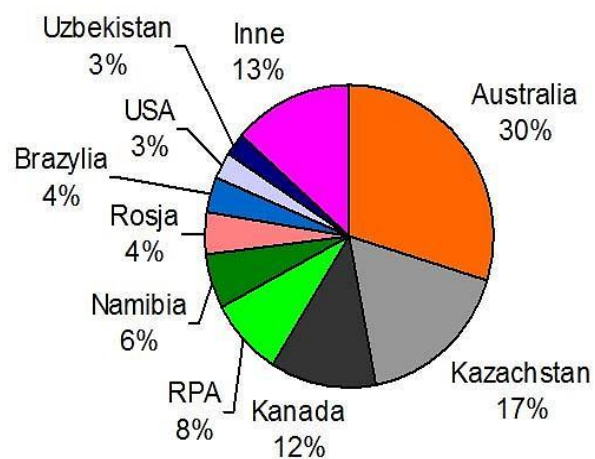
2. Zasoby uranu i produkcja żółtego ciasta (*yellow cake*)

Uran jest metalem i podobnie jak większość innych metali występuje w przyrodzie w postaci tlenków. Głównymi rudami uranu są uraninit (rys. 1) oraz blenda uranowa (zwana też smolistą ze względu na wygląd podobny do smoły). Uran jest pierwiastkiem dość rozpowszechnionym w skorupie ziemskiej (2–3 gramy na tonę) – jest go 40 razy więcej niż srebra i 500 razy więcej niż złota. Ogromne ilości uranu, które szacuje się na miliardy ton zawarte są w wodzie oceanicznej, jednak ze względu na niską koncentrację pozyskiwanie uranu z tych zasobów nie jest obecnie opłacalne.



Rys. 1. Uraninit z kopalni w Kowarach

Wydobycie danych zasobów uranu jest zdeterminowane czynnikami ekonomicznymi. Z tego powodu eksploatowane są stosunkowo bogate złoża w krajach o dużych zasobach. Największe zasoby uranu posiadają następujące kraje: Australia, Kazachstan i Kanada (rys. 2). W Polsce także występuje uran, ale w ilościach znacznie mniejszych niż w wyżej wspomnianych krajach i nie opłaca się go obecnie wydobywać, gdyż kupno paliwa jest tańsze. Krajowy uran wydobywano do 1973 roku – dzisiaj można zwiedzać kopalnię uranu w Kowarach (Sudety).



Rys. 2. Kraje o największych zasobach uranu na świecie

Przy okazji omawiania zasobów uranu pojawia się kwestia dostaw paliwa i pytanie, na jaki czas wystarczą zidentyfikowane oraz niezidentyfikowane jeszcze zasoby. Wiele z krajów będących w posiadaniu znaczących zasobów uranu jest dla Polski bezpiecznymi partnerami, co jest ważne w kontekście szeroko dyskutowanego w kraju problemu bezpieczeństwa energetycznego. Według danych szacunkowych komisji Parlamentu Europejskiego z 2008 roku, znane zasoby uranu wystarczą na 300 lat. Polskie zasoby rozpoznane i prawdopodobne prof. H.M. Prasser (ETH, Szwajcaria) oszacował na ponad 600 lat dla mocy reaktorów równej 1000 MW.

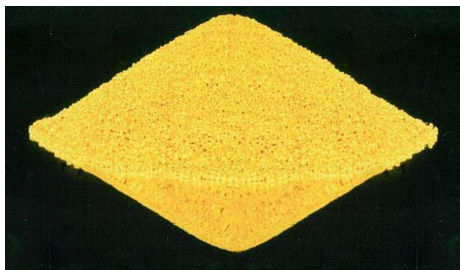
Ponadto ciągle odkrywane są nowe złoża, a rozwój technologii zapewni dostawę paliwa dla całego świata na co najmniej kilka tysięcy lat. Reaktory IV generacji (zbiorecza nazwa dla kilku rozwijanych obecnie typów reaktorów jądrowych) będą mogły wykorzystywać zużyte paliwo z reaktorów obecnie eksploatowanych oraz pozostały z procesu wzbogacania zubożony uran (patrz część 3 artykułu). Innym dodatkowym źródłem paliwa mogą być zasoby niekonwencjonalne, czyli o bardzo niskiej zawartości uranu oraz takie, dla których uran jest produktem ubocznym (wydobycie miedzi, fosforanów, węgla).

Warto także wspomnieć, że ewentualna kontynuacja obecnego trendu wzrostowego cen paliwa jądrowego (spowodowanego zwiększającym się popytem) nie jest zagrożeniem, ponieważ cena paliwa jest bardzo niewielką częścią kosztu energii z elektrowni jądrowej. Jeżeli przyjąć cenę energii na 15 gr/kWh, to koszt paliwa wynosi około 0,5 gr/kWh.

Obecnie działają kopalnie odkrywkowe, podziemne oraz takie, w których rudę uranu wymywa się czynnikiem rozpuszczającym. Pewną ilość uranu uzyskuje się też jako produkt uboczny w kopalniach miedzi i srebra (np. w Australii).

Po wydobyciu rudy uranu pierwszym etapem jest oddzielenie rudy sterylnej (zawierającej znikome ilości uranu). Sam uran nie wykazuje istotnej promieniotwórczości jednak produkty jego rozpadu wykazują znaczącą promieniotwórczość, dzięki temu można odnaleźć złoża uranu badając radioaktywność na powierzchni ziemi. Pojawia się jednak zagadnienie ochrony radiologicznej pracowników kopalni, przykładowo kopalnia musi być odpowiednio wentylowana, tak aby usunąć radioaktywny gaz radon.

Kolejnym etapem jest kruszenie i mielenie rudy aż do uzyskania zawiesiny wodnej w celu uwolnienia minerału zawierającego uran. Następnie zawiesinę poddaje się obróbce zwanej koncentracją – tlenki uranu wymywa się, otrzymany roztwór oczyszcza i otrzymuje się produkt końcowy tzw. *yellow cake* (żółte ciasto, rys. 3). *Yellow cake* jest postacią uranu zdatną do transportu – jest to substancja stała koloru żółtego (głównie mieszanina tlenków uranu), która dzięki procesowi oczyszczenia z izotopów innych pierwiastków nie wykazuje istotnego poziomu promieniotwórczości.

Rys. 3. *Yellow cake*

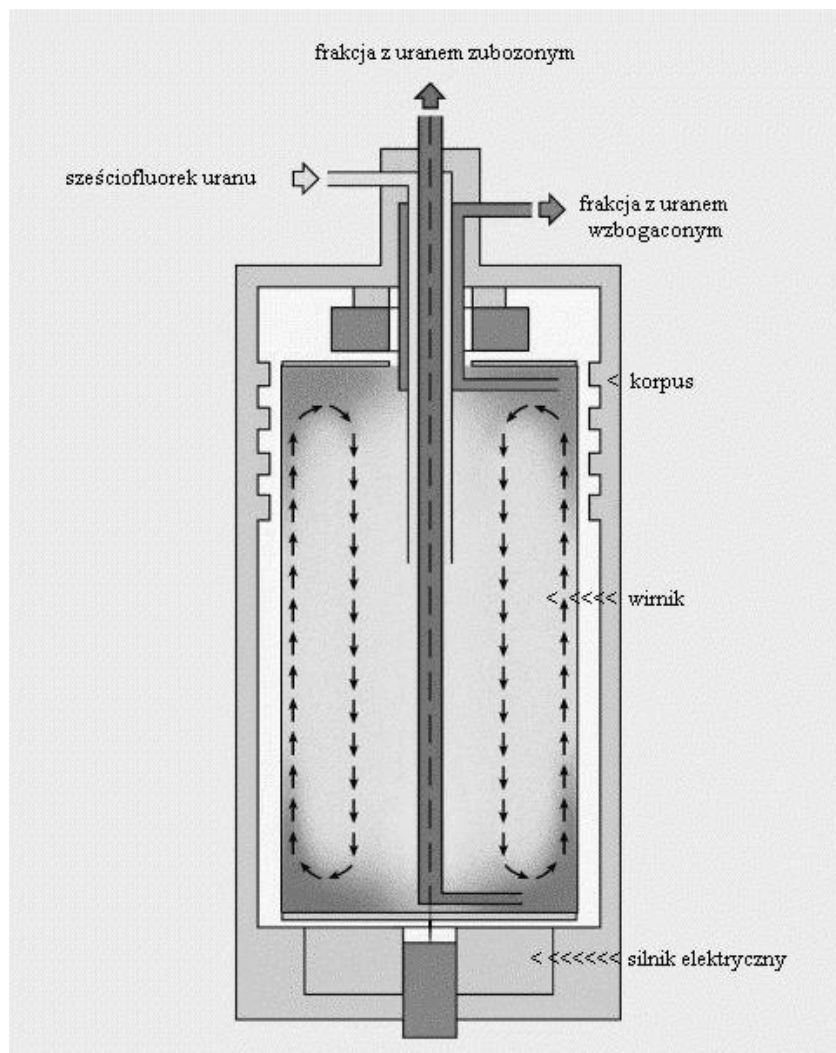
3. Produkcja paliwa jądrowego

Yellow cake jest produktem wyjściowym do wytwarzania paliwa jądrowego. Zawiera on głównie izotop 238 uranu (U^{238}), podczas gdy materiałem rozszczepialnym jest uran 235 (U^{235}), którego zawartość w uranie naturalnym to ok. 0,7%. W reaktorach lekkowodnych używa się uranu wzbogaconego do ok. 4% aby zapewnić samorzutne podtrzymanie reakcji łańcuchowej rozpadu jąder uranu.

Proces wzbogacania przebiega w fazie gazowej, dlatego musi być poprzedzony konwersją uranu do odpowiedniej formy, którą jest sześćfluorek uranu (UF_6). Jest on bezbarwnym ciałem stałym przechodzącym w stan gazowy w temperaturze $56^{\circ}C$. Konwersja jest procesem dwuetapowym – najpierw w procesie hydrofluorynacji pod działaniem wodoru i fluorowodoru w temperaturze $500^{\circ}C$ otrzymuje się czterofluorek uranu (UF_4 , zielone ciało stałe), a następnie w temperaturze $1500^{\circ}C$ przeprowadza się dalszą fluorynację do UF_6 pod działaniem gazowego fluoru. Największe zakłady konwersji do UF_6 znajdują się w Rosji, USA, Kanadzie oraz Francji.

UF_6 poddaje się wzbogacaniu wykorzystując niewielką różnicę w masach cząsteczki zawierającej izotop U^{235} i U^{238} . Jako, że jest to ciągle cząsteczka o takim samym składzie chemicznym, nie ma możliwości wykorzystania metod chemicznych. Większość uranu wzbogaca się używając wirówek o prędkości obrotowej rzędu dziesiątek tysięcy obrotów na minutę. Proporcjonalna do masy cząsteczki siła odśrodkowa sprawia, iż większa koncentracja rozszczepialnego lżejszego izotopu występuje bliżej osi wirówki, natomiast cięższy izotop gromadzi się głównie bliżej obwodu wirówki (uran zubożony). Niezwykle duże siły niezbędne podczas wirowania ze względu na bardzo małą różnicę mas wymuszają produkcję wirówek z materiałów znacznie bardziej wytrzymałych niż stal, takich jak włókno węglowe. Poza prędkością wirowania, problemem jest to, że przy osi wirówki skąd powinien być pobierany wzbogacony gaz jego ilość, ze względu na działanie siły odśrodkowej, jest bliska zera, wymusza to konieczność pobierania go w pewnej odległości od jej osi. Wirówki mają postać długich cylindrów, w celu wykorzystania zjawiska konwekcji. Dzięki gra-

dientowi temperatury wytwarzanemu przez silnik znajdujący się na dole wirówki, w górnej jej części jako chłodniejszej gromadzi się gaz o większej gęstości i stąd jest właśnie pobierany wzbogacony produkt (rys. 4a). Z wirówki otrzymujemy produkt wzbogacony w niewielkim stopniu, co powoduje, że proces ten należy wielokrotnie powtarzać aż do uzyskania żądanego stopnia wzbogacenia. Wymusza to konstrukcje zestawów wielu sprzężonych ze sobą wirówek (rys. 4b). Z procesu wzbogacenia pozostaje uran zubożony do zawartości 0,2–0,3% U235. Największe zakłady wzbogacające uran znajdują się w Rosji, Francji oraz USA.



Rys. 4a. Budowa wirówki do wzbogacania UF_6



Rys. 4b. Zestaw sprzężonych wirówek

Ostatnimi etapami produkcji paliwa są konwersja sześćfluorku UF_6 do dwutlenku uranu UO_2 (pod działaniem wody i wodoru) i produkcja ceramicznych pastylek przez spiekanie w temperaturze $1700^\circ C$. Jako paliwo stosuje się uran w postaci UO_2 ze względu na obojętność chemiczną względem wody i powietrza. Cylindryczne pastylki o wysokości 10 mm i średnicy 8 mm umieszcza się w szczelnie zaspawanych prętach paliwowych, które z kolei jako część tzw. elementów paliwowych tworzą rdzeń reaktora jądrowego (rys. 5).



Rys. 5. Element paliwowy reaktora lekkowodnego

Jako ilustrację kaloryczności paliwa jądrowego można przytoczyć fakt, że jedna pastylka o masie ok. 5 g jest równoważna energetycznie tonie węgla. Ze względu na tak dużą wydajność, ilość paliwa zużywanego przez elektrownię jądrową jest wielokrotnie mniejsza niż przez elektrownię konwencjonalną, czego konsekwencją jest niewielka ilość zużytego paliwa, które trzeba poddawać obróbce i następnie składować.

4. Zużyte paliwo jądrowe

W reaktorze jądrowym znajduje się ok. 100 ton uranu (przy mocy 1300 MW), z czego jedną trzecią lub jedną czwartą wymienia się corocznie na nowe paliwo. Ilość zużytego paliwa jest zatem bardzo niewielka objętościowo, szczególnie biorąc pod uwagę dużą jego gęstość.

W trakcie pracy reaktora jądrowego w paliwie pojawiają się izotopy wielu pierwiastków chemicznych, z których pewna ich ilość jest promieniotwórcza. Zatem zużyte paliwo jest silnie promieniotwórczą mieszaniną, która powinna być poddana odpowiedniej przeróbce i ewentualnemu recyklingowi do innego rodzaju paliwa zwanego MOX (Mixed OXides – mieszane tlenki). Paliwo bezpośrednio wyjęte z reaktora ma temperaturę ponad 100°C i umieszczane jest w basenie wypełnionym wodą niedaleko reaktora. W basenie tym paliwo chłodzi się i zmniejsza swoją radioaktywność do momentu, gdy bezpieczny stanie się jego transport, proces ten jest długotrwały gdyż w paliwie tym ciągle zachodzą reakcje rozpadu jąder.

Gdy zużyte paliwo nie jest poddawane recyklingowi jest ono uważane za odpad i przed ostatecznym zabezpieczeniem poddawane jest chłodzeniu przez dziesiątki lat. W tej sytuacji cykl paliwowy nazywamy otwartym (postępują tak np. Finlandia, Szwecja i USA). Jeżeli paliwo będzie poddane procesowi recyklingu, chłodzi się je przez kilka lat przed dalszą przeróbką, a cykl paliwowy nazywamy zamkniętym (postępują tak np. Rosja, Francja i Japonia).

W chwili obecnej całe światowe zapotrzebowanie na przeróbkę paliwa pokrywa pięć fabryk znajdujących się we Francji, Rosji, Wielkiej Brytanii, Japonii oraz Indiach. Postępowanie ze zużytym paliwem zostanie omówione na przykładzie francuskiego zakładu znajdującego się na półwyspie La Hague w Normandii.

Pręty paliwowe po wyjęciu z basenu (rys. 6) cięte są na około 35-milimetrowe kawałki, które rozpuszcza się w kwasie azotowym. Jeżeli uran i pluton mają być odzyskane, oddziela się je w procesie technologicznym zwanym PUREX (Plutonium – URanium Extraction). Pozostałość po ekstrakcji poddaje się zeszkleniu – mieszanie ze szkłem następuje w temperaturze 1700°C, uzyskaną mieszaninę wlewa się do kanistrów, chłodzi i na koniec sprawdza zanieczyszczenie powierzchni. W tej formie odpady są przechowywane i transportowane (rys. 7).



Rys. 6. Basen z pojemnikami do przechowywania zużytego paliwa (All about nuclear energy, AREVA)



Rys. 7. Przeladunek pojemnika ze zużytym paliwem w porcie w Cherbourgu (All about nuclear energy, AREVA)

Zakład w La Hague zajmuje się także przechowywaniem francuskich odpadów radioaktywnych, w przypadku przerobu paliwa pochodzącego z innych

krajów przerobione paliwo odsyłane jest do zleceniodawcy (z usług tego zakładu korzystają np. Niemcy).

Jeżeli zużyte paliwo ma być poddane recyklingowi w celu uzyskania paliwa MOX odzyskany uran i pluton przesyła się do fabryki produkującej MOX. Dwie fabryki Melox w Marcoule (Francja) w roku 2006 pokryły 85% światowego zapotrzebowania na MOX. Paliwo MOX jest mieszaniną 93% dwutlenku uranu (UO_2) i 7% dwutlenku plutonu (PuO_2), a element paliwowy MOX jest taki sam jak dla paliwa uranowego (UOX) – także procesy zachodzące w reaktorze są podobne. Uran do produkcji tego paliwa może być naturalny, zubożony z procesu wzbogacania lub odzyskany podczas przerobu zużytego paliwa. Eksperyment w La Hague dowiódł, że zużyte paliwo MOX można ponownie poddać procesowi recyklingu.

Pojemnik do przewozu paliwa widoczny na rys. 7 podczas przeładunku w porcie w Cherbourgu (Francja) wykonany jest ze stali oraz posiada warstwę ekranującą promieniowanie. Ciekawostką jest, że ze względu na ciężar paliwa niektóre pojemniki okazują się za ciężkie do transportu po drogach i muszą być przewożone koleją lub drogą wodną. Pojemniki takie przechodzą rygorystyczne testy na wypadek nieprzewidzianych zdarzeń. Są to próby wytrzymałościowe podczas spadku swobodnego pojemnika z wysokości 9 m, spadku na stalowy pręt z wysokości 1 m, wytrzymałości na ogień o temperaturze $800^{\circ}C$ przez 30 minut oraz zanurzenie w wodzie na głębokość 200 m (podobne testy przechodzą pojemniki w innych krajach).

W Polsce istnieje już składowisko odpadów radioaktywnych (nisko- i średnioaktywnych) w Różanie (www.zuop.pl), ponieważ odpady powstają z eksploatacji reaktorów badawczych, zastosowań medycznych oraz przemysłowych i niezależnie od budowy elektrowni jądrowej potrzebne będzie nowe składowisko (także dla odpadów wysokoaktywnych). Jest to zatem dobry moment do przeanalizowania losów odpadów z polskiej elektrowni jądrowej. Zużyte paliwo z elektrowni jądrowej będzie mogło być wykorzystane w przyszłości w reaktorach IV generacji a odpady, zgodnie z planami krajów o długim doświadczeniu z energetyką jądrową, powinny być składowane w specjalnych składowiskach głęboko pod powierzchnią ziemi. Działające już składowiska tego typu istnieją w Skandynawii, a wiele kolejnych jest w fazie testów lub też w trakcie procesu zatwierdzania do użytku.

Źródła:

Rys. 1 – <http://www.atom.edu.pl/index.php/ej-w-polsce/wczoraj/wydobycie-uranu-zaklady-r-1.html>

Rys. 2 – <http://elektrownia-jadrowa.pl/Zasoby-i-wydobycie-uranu-w-Polsce-i-na-swiecie.html>

Rys. 3 – <http://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Plik:Yellowcake.jpg&filetimestamp=20050727063248>

Rys. 4a, b – <http://www.atom.edu.pl/index.php/technologie/cykl-paliwowy/konwersja-i-wzbogacanie.html>

Rys. 5 – <http://www.atom.edu.pl/index.php/technologie/cykl-paliwowy/produkcja-paliwa-i-recykliacja.html>