

NA JAK DŁUGO WYSTARCZY PIERWIASTKÓW ROZSZCZEPIALNYCH?

Andrzej Grzegorz Chmielewski
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Warszawa
Politechnika Warszawska, Warszawa

1. WSTĘP

Trywialnym jest stwierdzenie, że rozwój energetyki jądrowej jest konieczny z punktu widzenia bezpieczeństwa energetycznego świata i ochrony środowiska naturalnego. Koszt produkcji energii elektrycznej w EJ w dużej części jest pochodną kosztów inwestycyjnych i kosztów utrzymania ruchu. Koszt zakupu paliwa uranowego stanowi dzisiaj zaledwie 2% udziału w cenie energii elektrycznej uzyskiwanej z tego źródła. Dla porównania cena paliwa stanowi od 30 do 60% kosztów wytwarzania elektryczności w elektrowni opalanej węglem. W elektrowni opalanej gazem koszt paliwa w jeszcze większym stopniu wpływa na cenę produktu finalnego.

Niektóre kraje utworzyły organizację nazwaną Global Nuclear Energy Partnership (GNEP), która, wraz z International Atomic Energy Agency (IAEA) i Atomic Energy Agency (AEA – OECD), pracuje nad utworzeniem światowego systemu dostaw paliwa jądrowego z uwzględnieniem wszelkich aspektów nieprolifracji broni jądrowej. Podobne plany ma Sustainable Nuclear Energy Technology Platform Unii Europejskiej w której dostawami paliwa zarządza EUROATOM Supply Agency.

Nie możemy jednak spodziewać się, że uran będzie dostępny po obecnych cenach (w przeliczeniu na ceny roku 2000) przez dłużej niż 100 lat. Poszukiwane są zatem metody uzyskiwania uranu z surowców ubogich i odpadów.

Z drugiej strony rozwój nowych generacji reaktorów – IV generacji na neutronach prędkich – z zamkniętym cyklem paliwowym, pozwoli na lepsze wykorzystanie uranu naturalnego, zwiększając produkcję energii elektrycznej z jednostki paliwa stukrotnie. Po wprowadzeniu nowych technologii reaktorowych istniejące zasoby uranu pozwolą na produkcję energii elektrycznej z wykorzystaniem reaktorów jądrowych przez tysiące lat.

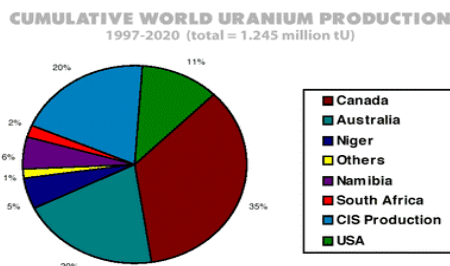
W dzisiejszych czasach w reaktorach jądrowych jest wykorzystywany jedynie uran, jednakże w reaktorach CANDU i reaktorach konstruowanych specjalnie dla takich zastosowań, paliwem może być też tor. Toru w skorupie ziemskiej jest trzy razy więcej niż uranu. Reaktory o dużej efektywności wykorzystania neutronów, takie jak CANDU, mogą pracować z wykorzystaniem cyklu torowego, po rozruchu z użyciem takich izotopów pierwiastków rozszczepialnych, jak U-235 i Pu-239. W reaktorze pracującym na cyklu torowym atom toru (Th-232) po wychwycie neutronu staje się rozszczepialnym izotopem uranu (U-233).

W czasie kilku najbliższych dziesięcioleci nastąpi znaczący postęp w wykorzystaniu uranowych paliw tlenkowych i mieszanych uranowo – plutonowych paliw tlenkowych (MOX) w reaktorach LWR. Ten postęp technologiczny pozwoli na ustabilizowanie cen paliwa jądrowego i utrzyma konkurencyjność cen elektryczności produkowanej w reaktorach jądrowych. W zakresie prac badawczych priorytety świata to uzyskiwanie uranu ze źródeł ubogich, zamknięty cykl paliwowy, wytwarzanie paliwa MOX, ekstrakcja toru z rud i przygotowanie paliw opartych o wykorzystanie tego pierwiastka.

2. ZASOBY URANU

Wydany w roku 2008 coroczny raport IAEA/IEA OECD "Uranium 2007: Resources, Production and Demand", znany jako Red Book, ocenia znane zasoby uranu, które mogą być eksploatowane przy kosztach niższych od USD 130/kg na 5,5 miliona ton. Dla porównania - w roku 2005 zasoby te oceniano na 4,7 miliona ton. Nie rozpoznane zasoby, o których istnieniu można wnioskować z budowy struktur geologicznych, oceniane są na 10,5 miliona ton.

Z analizy danych wynika, że rozpoznane zasoby uranu w eksploatowanych złożach, przy obecnym tempie ich wykorzystania (rok 2006 – 66 500 ton U/rok) starczą na 85 lat. Zestawienie krajów głównych producentów uranu przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Główni producenci uranu (IAEA).

Wszystkie konwencjonalne (bogate w uran) złoża wynoszące 16 872 700 tU pozwolą na zapewnienie dostaw paliwa uranowego przez 300 lat, jednakże to będzie wymagało nowych inwestycji. Dodatkowym źródłem uranu są fosforyty, złoża których nadające się do eksploatacji zawierają ok. 35 milionów ton uranu.

W przyszłości wykorzystanie plutonu uzyskiwanego z przerobu paliwa w reaktorach na neutronach termicznych, w paliwach mieszanych MOX i wprowadzenie reaktorów powielających na reaktorach prędkich zwiększą potencjał energetyczny obecnie znanych zasobów uranu 70 krotnie i starczy go wtedy na co najmniej 3000 lat, przy obecnym tempie zużycia.

Uran jest przekształcany w UF_6 a potem wzbogacany w U – 235; zakłady konwersji istnieją w Kanadzie, Francji, Wielkiej Brytanii, USA i Rosji. Potencjał przerobu uranu w Europie stanowi 25% potencjału światowego. Największymi producentami uranu wzbogaconego są Urenco i Atomenergoprom. Przerób zużytego paliwa jądrowego jest obecnie prowadzony jedynie w zakładach w La Hague we Francji.

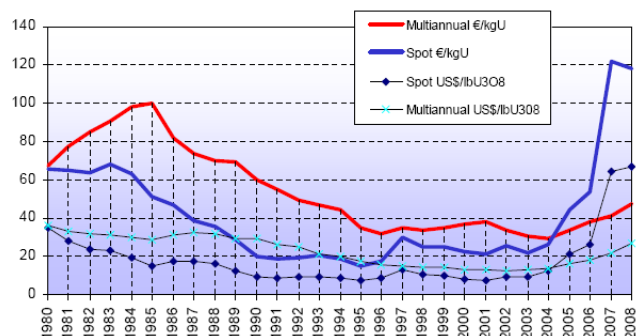
3. ZASOBY TORU

Tor jest obecny w małych stężeniach w większości skał, w glebie jest go ok. 6ppm. Występuje w wielu minerałach, monazyt (minerał zawierający ziemie rzadkie i tor (Ce, La, Pr, Nd, Th, Y) PO_4)), zawiera 6 – 12 % tlenku toru. Tor – 232 jest izotopem promieniotwórczym o czasie półrozpadu trzykrotnie dłuższym od czasu istnienia Ziemi. Sam Th – 232 nie jest izotopem rozszczepialnym ale w reakcji wychwytu spowolnionych neutronów wytwarza U – 233, który jest długożyciowym izotopem rozszczepialnym. Cykl torowy, nie jest jeszcze zrealizowany w sposób komercyjny (reaktor tego typu pracuje w Indiach), ale jest atrakcyjny z uwagi na fakt, że w wypalonym paliwie zawartość

plutonu jest znacznie niższa w porównaniu z cyklem uranowym. Wydana w roku 2005 IAEA-NEA "Red Book" ocenia zasoby bogatych rud torowych na 4,5 miliona ton.

4. ZŁOŻA UBOGIE W URAN

Uran jest pospolitym składnikiem skorupy ziemskiej, tak w niej rozprzestrzenionym jak cyna czy też cynk. Występuje w licznych skałach i wodzie morskiej. Obecnie ceny uranu są niskie co przedstawia rysunek 2. Ale w chwili gdy nastąpi znaczny wzrost cen tego surowca, ekonomiczne może się stać pozyskiwanie uranu z surowców ubogich i odpadów.



Rys. 2. Średnie ceny uranu przy zakupach opartych o kontrakty wieloletnie i zakupy doraźne (w odniesieniu do U_3O_8).

Tabela 1. Zawartość uranu w różnych rudach i surowcach.

Bogate rudy – 20% U	200 000 ppm U
Rudy – 2%U	20 000 ppmU
Ubogie rudy – 0,1%U	1 000 ppmU
Bardzo ubogie rudy – 0,01%U	100 ppmU
Granit	4-5 ppmU
Skały osadowe	2 ppmU
Skorupa ziemska (średnio)	2,8 ppmU
Woda morska	0,003 ppmU

Uran występuje też w węglu i w rudach miedzi. W roztworach z ługowania miedzi jest go od 1 do 40 ppm i jego wydobycie będzie wkrótce opłacalne. Wyoming Mineral Corporation (WMC), należące do Westinghousea, w latach siedemdziesiątych testowało instalację uzyskiwania uranu z roztworu z ługowania rud miedzi zawierającego ok. 5 ppm U i produkowało ok. 75 ton U_3O_8 rocznie. Fosforyty lądowe zawierają ok 50 - 200 ppm, morskie 6 - 120 ppm, lądowe typu organicznego do 600 ppm.

W procesie produkcji kwasu fosforowego U przechodzi do roztworu i dzisiaj jest bezproduktywnie rozsiewany z nawozami fosforowymi po polach. W świecie istnieje ok. 400 fabryk kwasu fosforowego opartych o mokry proces (zawartość U 40 -300 g na tonę roztworu) w których można by odzyskać 4 – 11 tysięcy ton uranu rocznie. W latach siedemdziesiątych w USA zbudowano 8 instalacji do odzysku uranu z kwasu fosforowego, podobne instalacje istniały w Kanadzie, Hiszpanii, Belgii, Izraelu i na Tajwanie. W Polsce, PWR we współpracy z ICHTJ (projekt kierowany przez Prof. Henryka Góreckiego) zbudowała instalację pilotową w ZCh Police.

Tabela 2. Zasoby uranu w fosforytach.

Przybliżona zawartość U w fosforytach	
Kraj	miliony t U
Morskie	
Maroko	6,9
USA	1,2
Meksyk	0,15
Jordania	0,1
Inne	0,65
<i>Razem</i>	9
Organiczne	
Kazachstan	0,12
Rosja	
<i>Razem</i>	0,12
Razem wszystkie kat.	9,12

Wreszcie, woda morska zawiera 3,3 ppb uranu, ogólne zasoby sięgają 4 miliardy ton uranu tzn. są tysiąc razy większe od zasobów zawartych w rudach tego pierwiastka. Przy mocy zainstalowanej w elektrowniach jądrowych 650GW_e, zasoby te zapewniłyby dostawy tego surowca przez 7 milionów lat. Japońscy naukowcy uzyskali w eksperymencie pilotowym 1 kg (NH₄)₂U₂O₇. Ocena ekonomiczna wskazuje, że jest możliwe uzyskanie uranu z wody morskiej w cenie ok. 800 USD/kg.

5. WNIOSKI

Zasoby uranu w świecie mogą zabezpieczyć potrzeby ludzkości na okres tysięcy lat, jednakże niezbędny jest rozwój prac poszukiwawczych, wydobywczych i hydrometalurgii w zakresie przerobu rud ubogich i przerobu zużytego paliwa jądrowego.

Literatura

- [1] A.G. Chmielewski, Nuclear fissile fuels worldwide reserves. Nukleonika, 53(2), 11 (2008)
- [2] A.G. Chmielewski, M. Delpech, C. Loaec, Nuclear fuels world wide resources. GNEP, Cherbourg, Francja (2008)
- [3] Euroatom Supply Agency, Annual Report, (2007)
- [4] OECD – NEA & IAEA, Uranium: Resources, Production and Demand (2005)
- [5] Euratom Supply Agency, Annual Report (2008)