

ROZWÓJ TECHNOLOGICZNY W ENERGETYCE JĄDROWEJ I JEGO WPŁYW NA ZAPOTRZEBOWANIE NA SUROWCE ROZSZCZEPIALNE

DEVELOPMENT IN NUCLEAR ENERGY POWER TECHNOLOGIES AND ITS EFFECT ON FISSILE MATERIALS DEMAND

ANDRZEJ G. CHMIELEWSKI¹

Abstrakt. W artykule w skrócie omówiono informacje dotyczące światowych zasobów surowców rozszczepialnych, w świetle rozwoju technologicznego energetyki jądrowej. Wskazano też na możliwości wykorzystania toru i podkreślono rolę zamkniętego cyklu paliwowego w dalszym rozwoju energetyki jądrowej. Przedstawiono także możliwości uzyskiwania uranu z surowców ubogich w ten pierwiastek.

Słowa kluczowe: uran, tor, światowe zasoby pierwiastków rozszczepialnych.

Abstract. Data regarding worldwide fissile elements reserves from the point of view of nuclear technology development are presented in the paper. The possibilities of thorium application as a fissile fuel and role of closed cycle (fuel reprocessing) in the further nuclear power development are discussed as well. The possibility of low grade ore and waste streams for uranium recovery is presented finally.

Key words: uranium, thorium, fissile elements worldwide reserves.

WSTĘP

Powszechnie wiadomo, że rozwój energetyki jądrowej jest konieczny z punktu widzenia bezpieczeństwa energetycznego świata i ochrony środowiska naturalnego. Koszt produkcji energii elektrycznej w elektrowni jądrowej 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 elektrowniach opalanych węglem, natomiast w elektrowniach opalanych gazem koszt paliwa w jeszcze większym stopniu wpływa na cenę produktu finalnego (Chmielewski, 2008).

Niektóre kraje utworzyły organizację nazwaną Global Nuclear Energy Partnership (GNEP²) (Chmielewski i in.,

2008), 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 (Euroatom..., 2007; OECD – NEA & IAEA, 2005).

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

Rozwój nowych generacji reaktorów – IV generacji na neutronach prędkich – z zamkniętym cyklem paliwowym

¹ Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Warszawa oraz Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej

² GNEP utworzyły następujące kraje: Australia, Bułgaria, Chiny, Francja, Ghana, Węgry, Japonia, Jordania, Kazachstan, Litwa, Polska, Rumunia, Rosja, Słowenia, Ukraina i Stany Zjednoczone

pozwole na lepsze wykorzystanie uranu naturalnego, zwiększając stokrotnie produkcję energii elektrycznej z jednostki paliwa. Po wprowadzeniu nowych technologii reaktorowych zasoby uranu pozwolą na produkcję energii elektrycznej z wykorzystaniem reaktorów jądrowych przez tysiące lat.

Obecnie w reaktorach jądrowych jest wykorzystywany jedynie uran, jednak w reaktorach CANDU i reaktorach konstruowanych specjalnie dla takich zastosowań, paliwem może być też tor. Zawartość toru w skorupie ziemskiej jest trzykrotnie większa 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 toro-

wym, atom toru (Th-232) po wychwycie neutronu staje się rozszczepialnym izotopem uranu (U-233).

W ciągu kilku najbliższych dziesięcioleci nastąpi znaczący postęp w wykorzystaniu uranowych paliw tlenkowych i mieszanych uranowo-plutonowych paliw tlenkowych (MOX) w reaktorach LWR. Pozwoli to na ustabilizowanie cen paliwa jądrowego i utrzyma konkurencyjność cen elektryczności produkowanej w reaktorach jądrowych. Priorytetem na skalę światową w zakresie prac badawczych są: opracowanie metody uzyskiwania uranu ze źródeł ubogich; zamknięty cykl paliwowy, pozwalający na wykorzystanie pozostałego w paliwie uranu i wytworzonego w reakcjach plutonu; wytwarzanie paliwa MOX; ekstrakcja toru z rud i przygotowanie paliw na bazie tego pierwiastka.

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 130 USD/kg na 5,5 mln ton; dla porównania – w roku 2005 zasoby te oceniano na 4,7 mln ton (Euratom..., 2008). Nierozpoznane zasoby, o których istnieniu można wnioskować z budowy struktur geologicznych, są szacowane na 10,5 mln 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 przedstawiono na figurze 1, a wahania cen tego surowca w latach 1980–2008 na figurze 2 (OECD – NEA & IAEA, 2005).

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

ton uranu. Zestawienie tych zasobów dla wybranych krajów świata przedstawiono w tabeli 1.

W przyszłości wykorzystanie plutonu uzyskiwanego z przerobu paliwa w reaktorach na neutronach termicznych, w paliwach mieszanych MOX i wprowadzenie reaktorów powielających na reaktorach prędkich wielokrotnie zwiększy potencjał energetyczny zasobów uranu, którego (przy obecnym tempie zużycia) wystarczy wtedy na co najmniej 3000 lat (Euratom..., 2008; inne źródła oceniają ten okres jako jeszcze dłuższy).

Uran jest przekształcany w UF₆, 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.

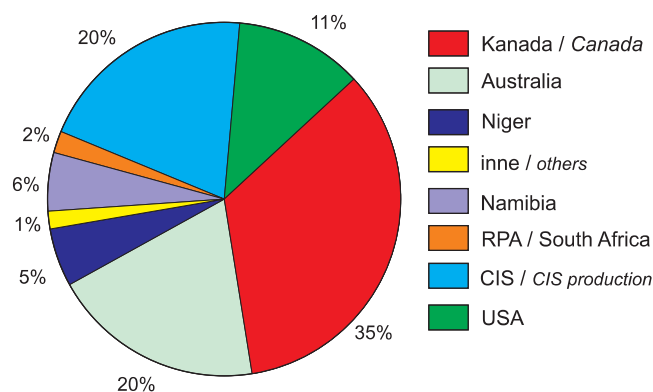


Fig. 1. Przewidywane dostawy uranu na rynek światowy w latach 1997–2020 wg krajów pochodzenia (dane MAEA)

Predicted uranium supply for the years 1997–2020 by countries of delivery (IAEA data)

Tabela 1

Zasoby uranu w fosforytach
Uranium resources in phosphates

Kraj	Zawartość uranu [mln t U]
Morskie	
Maroko	6,90
USA	1,20
Meksyk	0,15
Jordania	0,10
Inne	0,65
Razem	9,00
Organiczne	
Kazachstan	0,12
Rosja	
Razem	0,12
Razem wszystkie kategorie	9,12

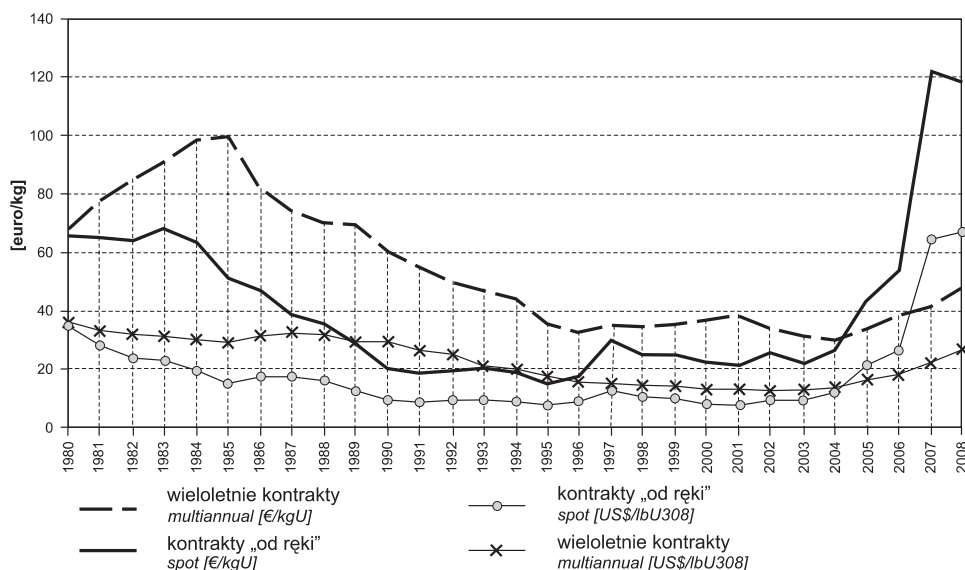


Fig. 2. Średnie ceny uranu przy zakupach opartych na kontraktach wieloletnich i zakupach doraźnych (w odniesieniu do U_3O_8) (wg ESA Annual Report, 2008)

Mean uranium prices based on multiannual and spot contracts (calculated for U_3O_8) (ESA Annual Report, 2008)

ZASOBY TORU

Tor jest obecny w małych stężeniach w większości skał, w głębie jego stężenie wynosi ok. 6 ppm. Występuje on w wielu minerałach, np. w monazytcie (minerał, w skład którego wchodzi ziemie rzadkie i tor (Ce, La, Pr, Nd, Th, Y) PO_4), występuje 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 długo żyjącym izotopem rozszczepialnym. Cykl torowy nie jest jeszcze realizowany w sposób komercyjny (reaktor tego typu pracuje w Indiach), ale jest atrakcyjny z uwagi na fakt, że w wypalonym paliwie zawartość plutonu jest znacznie niż-

sza w porównaniu z cyklem uranowym. Wydana w roku 2005 IAEA – NEA Red Book ocenia zasoby bogatych rud torowych na 4,5 mln ton. Ponad 70% tych zasobów znajduje się w Brazylii, Turcji, Indiach i Egipcie (Unak, 2000). Bardzo intensywne prace nad rozwojem cyklu torowego są prowadzone w Indiach i w innych krajach świata, takich jak Kanada, a także Polska. W Polsce Instytut Energii Atomowej i Instytut Chemii i Techniki Jądrowej realizują projekt „Analiza efektów wykorzystania toru w jądrowym reaktorze energetycznym”, oceniając możliwość wykorzystania tego pierwiastka na podstawie obliczeń modelowych i naświetlania próbek torowych w reaktorze Maria.

ZŁOŻA UBOGIE W URAN

Uran jest pospolitym składnikiem skorupy ziemskiej, tak w niej rozprzestrzenionym, jak cyna czy cynk. Występuje w licznych skałach i wodzie morskiej. Dla porównania stężeń tego pierwiastka w rudach o różnym stopniu wzbogacenia oraz innych surowcach, przedstawiono ich zestawienie w tabeli 2. Obecnie cena uranu jest niska (fig. 2), ale w chwili znacznego wzrostu cen tego surowca, opłacalne pod względem ekonomicznym może się okazać pozyskiwanie uranu z surowców ubogich w ten pierwiastek i z odpadów.

Uran występuje również w węglu (Okulski, Stala-Szługa, 2009) i w rudach miedzi. W roztworach z ługowania miedzi jego zawartość wynosi od 1 do 40 ppm, a jego wydobywanie będzie wkrótce opłacalne. Wyoming Mineral Corpora-

tion (WMC), należące do Westinghousea, w latach siedemdziesiątych XX wieku 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, a lądowe typu organicznego – do 600 ppm. Bilans zasobów mineralnych świata jest publikowany w wielu wydawnictwach cyklicznych, np. w *Bilansie gospodarki surowcami mineralnymi Polski i świata*, wydawanym przez Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN (Ney, Smakowski, 2007), w których można znaleźć bardziej szczegółowe analizy dotyczące zasobów różnych rud i pierwiastków użytecznych pod względem gospodarczym.

Tabela 2**Zawartość uranu w różnych rudach i surowcach**

Uranium concentration in different ores and natural materials

Rodzaj rudy/surowca	Zawartość uranu [ppm U]
Bogate rudy	200 000
Rudy	20 000
Ubogie rudy	1 000
Bardzo ubogie rudy	100
Granit	4–5
Skały osadowe	2
Skorupa ziemna (średnio)	2,8
Woda morska	0,003

W procesie produkcji kwasu fosforowego uran przechodzi do roztworu (Suman Kumar Singh i in., 2009) i jest bezproduktywnie rozsiewany z nawozami fosforowymi po po-

lach. Na świecie istnieje ok. 400 fabryk kwasu fosforowego wykorzystujących tzw. mokry proces (zawartość U 40–300 g na tonę roztworu), w których potencjalnie można by odzyskiwać 4–11 tys. ton uranu rocznie. W latach siedemdziesiątych XX wieku w USA zbudowano 8 instalacji do odzyskiwania uranu z kwasu fosforowego; podobne instalacje istniały w Kanadzie, Hiszpanii, Belgii, Izraelu i na Tajwanie. W Polsce, Politechnika Wrocławska we współpracy z Instytutem Chemii i Techniki Jądrowej (projekt kierowany przez prof. H. Góreckiego) zbudowała instalację pilotową w Zakładach Chemicznych Police.

Woda morska zawiera 3,3 ppb uranu, a ogólne zasoby sięgają 4 miliardów ton uranu, tzn. są o 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 mln 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.

WNIOSKI

Zasoby uranu na świecie mogą zabezpieczyć potrzeby ludzkości na okres tysięcy lat, jednak niezbędny jest rozwój prac poszukiwawczych, wydobywczych i hydrometalurgii w zakresie przerobu rud ubogich w ten pierwiastek oraz przerobu zużytego paliwa jądrowego. Potrzebę dalszych poszukiwań pierwiastków rozszczepialnych i analizy możliwości ich pozyskiwania z surowców ubogich widzą kraje, które postawiły na szybki rozwój energetyki jądrowej, np. Chiny (Yang Guang i in., 2010). Polska, w świetle podjętej

decyzji o budowie pierwszej elektrowni jądrowej w roku 2020, powinna również prowadzić prace dotyczące możliwości uzyskiwania pierwiastków rozszczepialnych ze źródeł światowych i krajowych.

Pracę zrealizowano w ramach projektu POIG.01.01.02-14-094/09 „Analiza możliwości pozyskiwania uranu dla energetyki jądrowej z zasobów krajowych”, wykonywanego przez konsorcjum w składzie Instytut Chemii i Techniki Jądrowej – Państwowy Instytut Geologiczny (PIG–PIB).

LITERATURA

- CHMIELEWSKI A.G., 2008 — Nuclear fissile fuels worldwide reserves. *Nukleonika*, **53**, 2: 11.
- CHMIELEWSKI A.G., DELPECH M., LOAEC C., 2008 — Nuclear fuels world wide resources. GNEP, Cherbourg, Francja. EUROATOM Supply Agency, Annual Report. 2007.
- EURATOM Supply Agency, Annual Report. 2008. http://www.theesa.com/about/ESA_2008_AR.pdf.
- NEY R., SMAKOWSKI T. (red.), 2007 — Bilans gospodarki surowcami mineralnymi Polski i świata 2001–2005. Wyd. Inst. GSMiE PAN, Kraków.
- OECD – NEA & IAEA, 2005 — Uranium: Resources, production and demand. 2005. <http://www.nea.fr/ndd/uranium/welcome.html>
- OKULSKI T., STALA-SZLUGA K., 2009 — Występowanie pierwiastków promieniotwórczych w węglach kamiennych pochodzących z GZW, w skałach przywęglowych, w wodach kopalnianych oraz w odpadach. *Gosp.Sur. Miner.*, **25**, 1: 5.
- SUMAN KUMAR SINGH, DHAMI P.S., TRIPATHI S.C., DAKSHINAMOORTHY A., 2009 — Studies on the recovery of uranium from phosphoric acid medium using synergistic mixture of (2-Ethyl hexyl) Phosphonic acid, mono (2-ethyl hexyl) ester (PC88A) and Tri-n-butyl phosphate (TBP). *Hydrometallurgy*, **95**: 170.
- UNAK T., 2000 — What is potential use of thorium in the future energy production technology? *Prog. Nuclear Energy*, **37**, 1–4: 137.
- YANG GUANG, HUANG WENJIE, 2010 — The status quo of China's nuclear power and the uranium gap solution. *Energy Policy*, **38**: 966.