

BEZPIECZEŃSTWO DOSTAW PALIWA DLA ELEKTROWNI JĄDROWYCH W UNII EUROPEJSKIEJ

JACEK KANIEWSKI

Dlaczego podejmujemy ten temat?

Zakładając, że po roku 2020 zaczną być w Polsce uruchamiane pierwsze bloki elektrowni jądrowych, paliwo do nich będzie musiało być dostarczane prawie do końca tego stulecia, jako że okres eksploatacji elektrowni jądrowych dla nowoczesnych jednostek III generacji określa się na 60 lat. Zależnie od scenariusza światowego rozwoju energetyki jądrowej i służącego jej przemysłu cyklu paliwowego, zakładając produkcję na poziomie 2004 roku i wykorzystanie już zidentyfikowanych źródeł uranu, oszacowano że może on być dostępny dla energetyki jądrowej przez okres od 85 do co najmniej 5000 lat [1]. Pierwsza liczba odnosi się do przypadku otwartego cyklu paliwowego z reaktorami lekkowodnymi (LWR), zaś druga – do cyklu paliwowego z reaktorami powielającymi na neutronach przedkich z multi-recyklingiem. Dalsze wykorzystanie uranu i plutonu zawartego w wypalonym paliwie w przypadku reaktorów lekkowodnych (mono-recykling) oczywiście także może mieć pozytywny wpływ na przesunięcie w czasie horyzontu wyczerpania zasobów naturalnych, przyczyniając się nawet do 20% oszczędności uranu¹. Obecnie, po wielu latach zastoju rozpoczęły się również bardziej intensywne poszukiwania nowych zasobów uranu i sposobów jego pozyskiwania, a prognozy dotyczące nowych złóż są optymistyczne. Zatem, analizując kwestie bezpieczeństwa dostaw paliwa dla elektrowni jądrowych można zakładać, że nawet w odległej perspektywie czasowej, w przypadku dynamicznego wzrostu liczby elektrowni

¹ Przerób wypalonego paliwa i recykling uranu oraz plutonu ma obecnie miejsce we Francji, Japonii i Rosji.

jądrowych, paliwa dla światowej energetyki jądrowej nie zabraknie przy spełnieniu warunków, o których będzie mowa w tym artykule.

Niektórzy mają jednak wątpliwości czy energetyka jądrowa może zapewnić Polsce bezpieczeństwo energetyczne, skoro wobec braku wystarczających złóż własnych trzeba będzie importować uran. Wątpliwości takie należy próbować wyjaśniać kompleksowo, oceniając całokształt czynników mogących mieć wpływ na bezpieczeństwo dostaw paliwa reaktorowego. Należy także zapoznać się z warunkami sprzyjającymi bezpieczeństwu dostaw jakie wypracowano przez dziesięciolecia w Unii Europejskiej (UE), jak również wspomnieć o unijnym programie samopodtrzymywalnej energetyki jądrowej (*sustainable nuclear energy*)², który ma zapewnić znacznie lepsze wykorzystanie uranu niż dotychczas. Warto też przeanalizować co się działo i dzieje na rynku paliwa jądrowego, co może powodować zakłócenia na tym rynku, jak on na nie reaguje i co czynią obecnie różne kraje by zapewnić sobie paliwo jądrowe. A więc – jakie elementy składają się na bezpieczeństwo dostaw paliwa jądrowego i czego można się w tej materii spodziewać, biorąc szczególnie pod uwagę, że Polska jest członkiem Unii Europejskiej? Moim zamierzeniem jest próba odpowiedzi na te pytania jako uzupełnienie cennej publikacji Państwowej Agencji Atomistyki [1].

² W dokumentach dotyczących ochrony środowiska słowo *sustainable* tłumaczy się jako zrównoważony (rozwój). W odniesieniu jednak do energetyki bardziej pasuje słowo *samopodtrzymywalna*, ponieważ chodzi o to, że w przypadku mających znaleźć szerokie zastosowanie reaktorów powielających, po ich pierwszym załadowaniu będą one produkować paliwo dla ich dalszej eksploatacji.

Problem bezpieczeństwa dostaw w ramach jądrowego cyklu paliwowego

Na początek kilka wyjaśnień co to jest paliwo jądrowe. Dla znawców tego tematu będą to truizmy, tym niemniej warto podkreślić, że w odróżnieniu od kopalnych paliw organicznych (węgiel, ropa, gaz), paliwo jądrowe to wysoko przetworzony produkt. Uran pierwotny³ uzyskiwany jest na ogół w kopalniach (podziemnych lub odkrywkowych) lub metodą ługowania na miejscu (*in situ leaching* – ISL). Wydobyta w kopalni ruda uranowa⁴ (fot. 1) jest mielona na miejscu (*mining and milling*), a następnie przetwarzana w koncentrat uranowy zwany „yellow cake” (fot. 2), o zawartości około 70% uranu, który stanowi już artykuł handlowy, ale przed załadowaniem do reaktora musi zostać poddany wielu dalszym operacjom w kolejnych stadiach jądrowego cyklu paliwowego. W przypadku reaktorów lekkowodnych (PWR, BWR, WWER i ich nowszych generacji)⁵ wykorzystujących niskowzbożony uran (LEU) są nimi:

- konwersja 1 (od oczyszczenia koncentratu z wszelkich pochłaniających neutrony domieszek, poprzez „jądro czyste” U_3O_8 , aż do otrzymania fazy UF_6),
- wzbogacanie izotopowe uranu do wymaganej zawartości izotopu U-235 (między 2,5 i 5% masy całkowitej uranu),
- konwersja 2 do stadium UO_2 i wytwarzanie paliwa reaktorowego. UF_6 dostarczany jest w specjalnych pojemnikach, tzw. cylindrach (fot. 3).

Wytwarzanie paliwa polega na prasowaniu, spiekaniu i szlifowaniu ceramicznych pastylek

³ Pomijam w tych rozważaniach sprawę możliwości wykorzystania w jądrowym cyklu paliwowym toru. Z toru 232 można w reaktorze otrzymać rozszczepialny uran 233, również nadający się do wykorzystania w paliwie jądrowym. Taki wariant produkcji paliwa możliwy jest szczególnie w przypadku reaktorów typu CANDU.

⁴ Obecnie opłacalne jest wydobycie rud o zawartości nie mniejszej niż 0,2% uranu, ale np. kanadyjskie kopalnie mogą dostarczać rud o zawartości nawet 20% U. W przyszłości dolny próg może zostać obniżony.

⁵ Ograniczamy się tutaj jedynie do cyklu paliwowego dla reaktorów lekkowodnych, zakładając że w warunkach polskich mają one największe szanse zastosowania. Reaktory kanadyjskie typu CANDU wykorzystujące uran naturalny nie wymagają jego wzbogacania, ale za to potrzebna jest do nich ciężka woda. Fakt, że pracują one na uranie naturalnym jest zaletą w przypadku, gdy kraj ma własne kopalnie uranu (np. Kanada, Rumunia). Budowa wówczas takich reaktorów ma sens pod warunkiem, że wybuduje się także zakłady produkcji paliwa i zakłady produkcji ciężkiej wody i przez to uzyska się pełną niezależność od importu (warunek ten spełniły ww. kraje).

⁶ Sześćfluorek uranu po podgrzaniu w autoklawach przechodzi do stanu gazowego, co umożliwia poddanie go procesowi wzbogacania izotopowego w zakładach dyfuzyjnych lub ultrawirówkowych.



Fot. 1. Ruda uranu



Fot. 2. Koncentrat uranowy – yellow cake



Fot. 3. Cylindry z UF_6 , model 48y

z UO_2 , którymi wypełnia się rurki ze stopu cyrkonowego, a następnie montuje je w „kasety” paliwowe (fot. 4). Operacje te należą do tzw. otwartego cyklu paliwowego i są przeprowadzane w następujących zakładach przemysłu jądrowego cyklu paliwowego: zakład konwersji 1, zakład wzbogacania izotopowego i zakład produkcji paliwa (wraz z konwersją 2). W przypadku zastosowania paliwa uranowo-plutonowego (*mixed oxide* – w skrócie MOX) lub ponownego wykorzystania uranu zawartego w wypalonym paliwie (po jego uprzednim wzbogaceniu), w cyklu paliwowym potrzebny jest



Fot. 4. Kasety paliwowe typu PWR w EJ Graffenrheinfeld (źródło: Helmut F.Albrecht/Rainer Kiedrowski. Kernenergie in Deutschland. Ein Bildatlas/Ullstein)

jeszcze zakład przerobu wypalonego paliwa (*reprocessing*), w którym z wyładowanego z reaktora wypalonego paliwa odzyskuje się zarówno uran, jak i pluton. MOX otrzymuje się przez zmieszanie w odpowiednich proporcjach UO_2 i PuO_2 . W tych przypadkach mamy do czynienia z zamkniętym cyklem paliwowym.

W przypadku reaktorów powielających przerób wypalonego paliwa i odzysk z niego wytworzonego w reaktorze plutonu jest warunkiem sensowności całego przedsięwzięcia.

Tak więc, by móc załadować paliwo jądrowe do reaktora trzeba po pierwsze zapewnić sobie zaopatrzenie w uran w postaci koncentratu⁷, a po drugie – wymienione wyżej usługi przemysłu jądrowego cyklu paliwowego. Ponadto, ponieważ jak zobaczymy dalej, kopalnie uranu, usługi cyklu paliwowego i elektrownie jądrowe są z reguły znacznie od siebie oddalone, szczególnie koncentrat uranowy i UF_6 są transportowane często na znaczne odległości. Z powyższego wynika, że na bezpieczeństwo dostaw paliwa jądrowego do elektrowni jądrowych składają się następujące trzy czynniki „techniczno-handlowe”:

1. pewność dostaw uranu,
2. dostęp do usług przemysłu jądrowego,
3. bezpieczeństwo i pewność transportu.

Jeżeli kontrakt na dostawy dotyczy gotowego paliwa jądrowego to rozróżnienie pierwszych dwóch czynników nie ma zastosowania. Jest to jednak przypadek w UE szczególny⁸. Czynniki o charakterze politycznym i legislacyjnym, choć mogą także wywierać wpływ na bezpieczeństwo dostaw, nie będą w tym artykule szerzej adresowane.

Na bezpieczeństwo energetyczne w elektroenergetyce mają normalnie wpływ: bezpieczeństwo zapewnienia paliwa dla elektrowni oraz w jakimś stopniu także poziom jego cen. W przypadku energetyki jądrowej koszty paliwa mają jednak stosunkowo bardzo niski udział w kosztach generacji energii elektrycznej w porównaniu z jej wytwarzaniem przy wykorzystaniu kopalnych paliw organicznych. Cytując za [1] – dla przykładu: podwojenie ceny uranu zwiększą koszt paliwa dla reaktorów lekkowodnych o 26%, a koszt elektryczności o 7%. Jest to ogromna zaleta energetyki jądrowej gwarantująca stabilność i przewidywalność cen energii elektrycznej – warunek niezakłóconego rozwoju społeczno-gospodarczego.

Postanowienia Traktatu Euratom dotyczące zapewnienia dostaw paliwa jądrowego. Agencja Dostaw Euratomu

Państwa, które tworzyły w 1957 roku załątki obecnej Unii Europejskiej, zawierając Traktat Ustanawiający Europejską Wspólnotę Energii Atomowej (Traktat Euratom) pomyślały już wówczas o zapewnieniu bezpieczeństwa dostaw w odniesieniu do zaopatrzenia w uran i dostępu do usług cyklu paliwowego [2].

Sprawie zaopatrzenia w paliwo jądrowe został poświęcony cały rozdział VI pt. „Dostawy” zawarty w dziale II (część merytoryczna) Traktatu Euratom [3]. Art. 52 postanawia, że materiały jądrowe będą udostępniane w ramach wspólnej polityki dostaw na zasadzie równego dostępu do źródeł tych materiałów (rud, materiałów wyjściowych i specjalnych materiałów rozszczepialnych). Artykuły 67-69 Traktatu dotyczą kwestii cen, które w przypadku dostaw wewnętrznych muszą być ustalone w wyniku równoważenia dostaw względem popytu z jednakowym traktowaniem wszystkich użytkowników. Aby urzeczywistnić te cele, już w 1960 roku powołano do życia działającą w ramach struktur

⁷ Kupuje się koncentrat, który ma zawartość od 70 do 90% U_3O_8 – natomiast ceny uranu podaje się dla uranu w postaci U_3O_8 tj. produktu już oczyszczonego.

⁸ Dotyczy to obecnie dostaw gotowego paliwa z Federacji Rosyjskiej do reaktorów znajdujących się w niektórych „nowych” państwach członkowskich i częściowo w Finlandii.

Komisji Agencją Dostaw Euratomu (*Euratom Supply Agency – ESA*)⁹. Zgodnie z art. 52, ust. 2 Traktatu, Agencja ma prawo opcji w odniesieniu do rud, materiałów wyjściowych i specjalnych materiałów rozszczepialnych wytwarzanych w ramach terytorium państw członkowskich oraz wyłączne prawo na zawieranie kontraktów w kwestiach dostaw takich materiałów pochodzących zarówno z wewnątrz, jak i z zewnątrz Wspólnoty. To ostatnie prawo m.in. umożliwi Agencji wgląd w kontrakty, niezbędny do dokonywania analiz rynkowych, formułowania zaleceń oraz do przygotowywania prognoz. Warto w tym miejscu także wspomnieć o artykułach 70-72 Traktatu przewidujących możliwość udzielenia pomocy finansowej dla programów poszukiwania rud uranu na terytoriach państw członkowskich oraz możliwość tworzenia zapasów komercyjnych i na wypadek zagrożenia dostaw. Nieco więcej informacji dotyczących powyższych spraw można znaleźć w [4], a przede wszystkim w samym Traktacie.

Ogólnie biorąc do zadań ESA należą: monitorowanie rynku uranu i usług cyklu paliwowego, opracowywanie odpowiednich zaleceń i wsparcie użytkowników w razie problemów związanych z kontraktami, zapewnienie niezbędnej ekspertyzy (informowanie Wspólnoty), oraz gdyby taka konieczność zaistniała – tworzenie zapasów uranu. Środkami dla realizacji tych zadań są: stosowanie procedur administracyjnych wymaganych przez Traktat Euratom, współpraca w ramach jej Komitetu Doradczego (w tym zapewnienie łączności między Komisją i przemysłem jądrowym) oraz odpowiednie interakcje w ramach EU (między jej organami). ESA w istocie odgrywa znaczącą rolę w sprawach bezpieczeństwa dostaw zarówno analizując sytuację na rynku [5] oraz mając możliwość wpływania na decyzje zakupowe użytkowników z UE, jak i stwarzając na forum jej Komitetu Doradczego warunki dla wzajemnej wymiany informacji między przedstawicielami użytkowników, a także dla ich kontaktów z przedstawicielami przemysłu jądrowego cyklu paliwowego UE. Każde państwo członkowskie, a więc i Polska, ma swoich przedstawicieli w Komitecie Doradczym ESA.

W roku 2005 Komitet Doradczy zatwierdził przygotowany w jego ramach (przez specjalnie powołaną grupę roboczą) raport z wnioskami pt. „Analiza dostępności paliwa jądrowego na poziomie EU z perspektywy bezpieczeństwa jego dostaw” [6].

⁹ Działalność Agencji jest określona Statutem Agencji Dostaw Euratomu (Dz. U. WE nr L 41/15 z 15.02.2008 r.). ESA ma status instytucji użyteczności publicznej, osobowość prawną i szerokie uprawnienia w sprawie materiałów jądrowych dysponowanych lub wytwarzanych w obrębie terytorium państw członkowskich.

Praca nad raportem została podjęta w 2003 roku w związku ze wzrostem zaniepokojenia sytuacją na rynku paliwa jądrowego. W raporcie przedstawiono m.in. szczegółową listę możliwych przyczyn pierwotnych (*root causes*), ewentualnych zagrożeń dotyczących bezpieczeństwa dostaw paliwa do elektrowni jądrowych, przy czym wyodrębniono trzy grupy ryzyka:

- zakłócenia w dostawach,
- możliwe błędy handlowe i techniczne,
- problemy natury politycznej i legislacyjnej.

Lista ta stanowi dobrą wskazówkę dla prowadzenia w procesie przygotowań do budowy elektrowni jądrowych w Polsce pogłębionych analiz sytuacji w omawianej dziedzinie.

Podejście do kwestii bezpieczeństwa energetycznego w przypadku elektrowni jądrowych w UE

Jak wykazano wyżej, Agencja Dostaw Euratomu spełnia ważną rolę śledzenia i analizowania rynku, zarówno uranu jak i usług cyklu paliwowego oraz przygotowuje odpowiednie raporty z zaleceniami.

W odniesieniu do pierwszego elementu bezpieczeństwa – zapewnienia dostaw uranu, ESA zaleca obecnie działania na rzecz podniesienia bezpieczeństwa energetycznego w szczególności poprzez:

1. dywersyfikację kierunków dostaw uranu,
2. utrzymywanie odpowiedniego poziomu rezerw własnych uranu i optymalne wykorzystywanie możliwości rynkowych dla zwiększenia tych rezerw,
3. dążenie do pokrywania zapotrzebowania na uran, na ile to możliwe, w drodze zawierania kontraktów długoterminowych (wieloletnich).

O spełnieniu pierwszego z tych zaleceń będzie mowa w następnym rozdziale.

Drugie z zaleceń jest spełniane w UE praktycznie od 2006 r., od kiedy ilości uranu dostarczane go przewyższają ilości paliwa załadowanego do reaktorów [5]. Jednak negatywny wpływ na bezpieczeństwo zaopatrzenia elektrowni jądrowych w paliwo może mieć liberalizacja rynku energii elektrycznej, ponieważ powoduje ona stałą presję na zmniejszanie kosztów przez koncerny energetyczne [6]. Jak dotąd nie istnieją żadne formalne wymagania w ramach UE, które wymuszałyby utrzymywanie zapasów (w przeciwieństwie do obowiązkowych rezerw ropy i gazu), ale nie jest wykluczone, że takie wymagania zostaną sformułowane. Nie było także dotąd potrzeby tworzenia przez ESA wspólnych zapasów uranu.

Jeśli chodzi o zalecenie trzecie, to z danych za 2006 rok wynika, iż kontrakty wieloletnie (tj. na okres ponad 12 miesięcy) stanowią ponad 92% wszystkich kontraktów [5].

Drugi element bezpieczeństwa – dostęp do usług przemysłu jądrowego jest zapewniony przez to, że znacząca część usług w zakresie konwersji, wzbogacania izotopowego uranu i wytwarzania paliwa jest realizowana w zakładach przemysłu jądrowego UE. O przemyśle tym będzie mowa dalej. Według ESA ważnym środkiem dla zagwarantowania tego bezpieczeństwa jest zapewnienie warunków niezbędnych dla utrzymania się na rynku unijnego przemysłu cyklu paliwowego w jego wszystkich stadiach, co wymaga reagowania w przypadku pojawienia się nadmiernej konkurencji o charakterze nie-wolnorynkowym, zdolnej do praktyk dumpingowych.

Trzeci element bezpieczeństwa – pewność i bezpieczeństwo transportu nie znajduje się bezpośrednio w polu zainteresowania statutowego ESA. Czynniki ten ma jednak także istotny wpływ na dostawy uranu i dostęp do usług, zwłaszcza w przypadku transportu interkontynentalnego, i jako taki był także zaadresowany we wspomnianym wyżej raporcie specjalnej grupy roboczej Komitetu Doradczego ESA.

Źródła dostaw paliwa jądrowego na świecie i sytuacja na rynku uranu

Omówmy na początek kierunki światowych dostaw surowca wyjściowego (koncentratu uranowego) do produkcji paliwa jądrowego z tzw. „źródeł pierwotnych”. W tabeli 1 podano liczby mówiące o produkcji uranu naturalnego w świecie w latach 2005-2006.

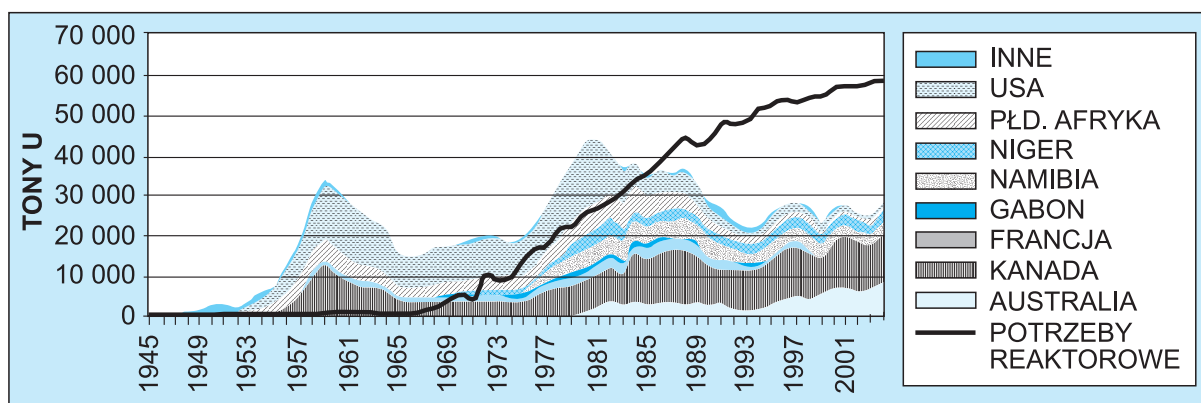
Tabela 1. Produkcja uranu ze źródeł pierwotnych w roku 2005 i 2006 (źródło: Euratom Supply Agency Annual Report 2006)

	Produkcja w roku 2005 (tony uranu)	Produkcja w roku 2006 (tony uranu)	Udział w roku 2006 [%]	Zmiana w stosunku do 2005 roku
Kanada	11 628	9 862	24,9	- 15,2
Australia	9 516	7 602	19,2	- 20,1
Kazachstan	4 329	5 283	13,4	+22,0
Niger	3 093	3 431	8,7	+10,9
Rosja	3 325	3 300	8,3	- 0,8
Namibia	3 148	3 067	7,8	- 2,6
Uzbekistan	2 300	2 260	5,7	- 1,7
USA	1 020	1 618	4,1	+58,6
Ukraina	800	800	2,0	0,0
Chiny	769	769	1,9	0,0
RPA	674	534	1,3	- 20,8
Czechy	400	360	0,9	- 10,0
Inne	719	681	1,7	- 5,3
RAZEM	41 722	39 567	100,0	- 5,2

Jak widać w tabeli 1, dwie trzecie dostaw w skali globalnej pochodzi z Kanady, Australii, Kazachstanu i Nigru. Pięciprocentowy spadek produkcji globalnej nie oznacza trendu, lecz jedynie wskazuje na przejściowe trudności¹⁰.

W samej UE uran wydobywany jest w niewielkich ilościach i zużywany na potrzeby krajowe. Import uranu pierwotnego wynosi blisko 100%. W średniej perspektywie czasowej istnieją jednak szanse na większe jego wydobycie w tym rejonie. Poszukiwania, niektóre rokujące powodzenie, prowadzone są w Finlandii, na Węgrzech, w Portugalii, Słowacji, Hiszpanii i Szwecji.

Ogólnie, w świecie zachodnim do połowy lat 80-tych XX wieku produkcja pierwotna uranu była wyższa od zapotrzebowania (rys.1) [7]. Jednak zahamowanie budowy nowych elektrowni jądrowych spowodowało, że wcześniejsze prognozy



Rys. 1. Zapotrzebowanie i produkcja uranu w Świecie Zachodnim w latach 1945-2004 (źródło: World Nuclear Association)

¹⁰ W roku 2007 produkcja globalna wzrosła o ponad 4%. Nowe szczegółowe dane obejmujące rok 2007 będą podane w ESA Annual Report 2007, który ukaże się w lecie bieżącego roku.

zapotrzebowania na uran zostały zachwiane i produkcja uranu zaczęła spadać lub wahać się wokół ustalonego poziomu. Pojawił się niedobór, który był uzupełniany z zapasów lub dostawami z innej części świata. Gdy produkcja zaczęła znów wzrastać – pod koniec lat 90-tych pojawił się na rynku uran pochodzący z demontażu głowic jądrowych w ramach uruchomionego w 1997 roku programu „Megatony na megawaty”¹¹ w następstwie porozumienia START II. W konsekwencji wstrzymano inwestowanie lub w niewielkim tylko stopniu inwestowano w rozwój kopalń uranu uznając ich rozbudowę w danej chwili za nieopłacalną. W rezultacie produkcja pierwotna uranu kilka lat temu wynosiła jedynie nieco ponad 60% światowego zapotrzebowania [1, 9].

W roku 2005 wystąpił stosunkowo silny wzrost cen uranu. Oprócz czynnika podaży i popytu oraz wzrostu cen paliw organicznych, wpływ miały z pewnością także spadki wydobywania w Kanadzie i Australii wywołane czynnikami losowymi¹². Ponadto, w 2003 roku rosyjski agent handlowy Tenex oświadczył, że nie będzie więcej dostarczał uranu pośrednikowi GNSS (*Globe Nuclear Services & Supply*) ani w postaci U_3O_8 , ani UF_6 z uranem naturalnym [10]. Obecnie Rosja, której produkcja uranu nie pokrywa własnego zapotrzebowania, jest zainteresowana jedynie sprzedażą gotowego paliwa ze względu na posiadanie znacznych nadwyżek mocy produkcyjnych w zakładach cyklu paliwowego.

Różnica między popytem i podażą uranu była (i będzie mniej więcej do połowy następnej dekady) pokrywana z tzw. „źródeł wtórnych”. Są nimi obecnie:

- materiał pochodzący z programu „Megatony na megawaty”,
- materiał pochodzący z wzbogacania uranu zubożonego – pozostałości (*tails*),
- obniżenie zawartości U-235 w pozostałościach powodujące zmniejszenie uranu naturalnego poddawanego wzbogacaniu (*enrichment underfeeding*),
- materiał z recyklingu po przerobieniu wypalonego paliwa w odpowiednich zakładach w UE: pluton stosowany w paliwie MOX, a także uran wzbogacany lub mieszany z rosyjskim HEU

¹¹ Program ten, potocznie zwany w USA „HEU deal”, uruchomiono na mocy porozumienia USA-Rosja z 1993 r. Dotyczy on przekazywania wysokowzbogaconego uranu (HEU) z demontowanych głowic jądrowych na cele cywilne poprzez jego wymieszanie (*blending*) z uranem zubożonym (DU) i sprowadzenie do kategorii uranu niskowzbogaconego (LEU) do zastosowania w elektrowniach jądrowych.

¹² W pierwszym przypadku były one spowodowane przez pożar w jednej z kopalni w kwietniu 2003 r., w drugim przez

z rozmontowywanych głowic (operacje dokonywane w Rosji).

Materiał pochodzący z programu „Megatony na megawaty” trafia do zakładów konwersji w Kanadzie, Francji i w Niemczech. Jest on kupowany od Rosji, ale pochodzi w rzeczywistości z USA, które na podstawie umowy z Rosją z roku 2001 zwracają jej naturalny UF_6 w zamian za wzbogacony (pochodzący z HEU), płacąc w ten sposób jedynie za wartość wzbogacenia.

Trzeba się liczyć z zakończeniem dostaw uranu z programu „Megatony na megawaty” około roku 2013, bowiem aktualna umowa USA-Rosja wygaśnie wówczas. Możliwa jest jednak także kontynuacja dostaw na zmienionych zasadach. Ponieważ normalnie rynki uranu muszą mieć wiarygodne prognozy z wyprzedzeniem około pięciu lat, to obecny rok może przynieść ważne decyzje w kwestii jego zapewnienia dla elektrowni jądrowych na najbliższą dekadę i później.

Materiał w postaci pozostałości z wcześniejszych procesów wzbogacania w UE, czyli uran zubożony do 0,35% zawartości U-235, jest wzbogacany do poziomu uranu naturalnego w Rosji. Pozostałości z tego procesu mają już zawartość tylko 0,2 % U-235.

Perspektywy dotyczące światowej podaży uranu pierwotnego w średnim horyzoncie czasowym można uznać za optymistyczne. W latach 2002-2006 wzrosła produkcja uranu trzeciego i czwartego co do wielkości producenta: Kazachstanu i Nigru. Z pewnością szczególnie w przypadku Kazachstanu, który ma bardzo bogate złoża uranu, wzrost ten będzie przebiegał dynamicznie, ponieważ ma tam miejsce wychodzenie z dramatycznego spadku wydobywania w następstwie rozpadu ZSRR, przyspieszane znacznymi inwestycjami kapitałowymi i zaangażowaniem konsorcjów światowych. Informacje ze stycznia 2008 roku wskazują, że Kazachstan planuje 5-krotnie zwiększyć produkcję uranu do 2018 roku. Oprócz UE jest nim zainteresowanych także szereg innych państw. Planuje się również znaczny wzrost wydobywania uranu w Australii i Kanadzie [8].

Jeśli chodzi o Rosję, to jej własne zasoby, pomimo zwiększanych inwestycji i poszukiwań nowych złóż, nie będą wystarczające do zaspokojenia potrzeb tego kraju. Przewiduje się, że około 2015 roku 30% potrzeb będzie tam pokrywanych w drodze importu, głównie z państw byłego ZSRR. Obecnie wydobywanie lub poszukiwanie złóż na potrzeby Rosji ma miejsce w Kazachstanie, Uzbekistanie, Kirgizji, Armenii i Mongolii. Działa tam jednak intensywnie także szereg zachodnich firm z obszaru euro-atlantycznego oraz Japonia i Południowa Korea [8].

Japonia jest całkowicie zależna od importu uranu. W celu zapewnienia krajowi większej niezależności w zaopatrzeniu, japońska Agencja Zasobów Naturalnych i Energii subsydiuje w połowie koszty poszukiwań uranu prowadzonych przez prywatne kompanie. Są one prowadzone w sześciu-siedmiu miejscach w różnych krajach, w tym w Australii, Kanadzie i Kazachstanie [8].

Chiny rozwijają energetykę jądrową w takim tempie, że zapotrzebowanie na uran wzrośnie w tym kraju siedmiokrotnie do roku 2020, a po tym roku będzie konieczny jego import. Rząd chiński zachęca kompanie uranowe do inwestowania i rozwijania zdolności produkcyjnych za granicą. Możliwe kierunki tej ekspansji to Australia i Południowa Afryka. Obecnie Chiny wydobywają uran w regionie Sinkiang i w Mongolii Wewnętrznej. Prowadzi się też badania nad możliwością wyłukiwania uranu z popiołów węglowych, w których jego zawartość waha się w granicach 123-142 ppm. Popioły z trzech elektrowni węglowych mogłyby dostarczyć około 100 ton uranu rocznie [8].

Indie odczuły w ostatnich latach deficyt uranu, z powodu którego były zmuszone do zmniejszenia generacji energii elektrycznej w swoich elektrowniach jądrowych, a nawet do wyłączeń kilku z nich. Powodem tego był silny rozwój energetyki jądrowej, któremu nie towarzyszyło wystarczające inwestowanie w wydobycie własnego uranu i nastąpiły opóźnienia w uruchamianiu nowych kopalń. Jednocześnie import był praktycznie niemożliwy ze względu na to, że kraj ten nie jest stroną Układu o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej i obejmowały go ograniczenia ustanowione w ramach Grupy Dostawców Jądrowych (Nuclear Suppliers Group – NSG). Jednak w roku 2006 USA uznały de facto, że Indie są mocarstwem jądrowym i zawarły z nimi porozumienie umożliwiające dostawy jądrowe usuwając w ten sposób przeszkody polityczne także dla innych krajów-dostawców. Jednocześnie Indie znacznie zwiększyły inwestycje w swoje kopalnie i poszukiwania nowych złóż, a jest tam wiele dobrych lokalizacji [8].

Światowe wydatki na poszukiwania nowych zasobów wzrosły w latach 2002-2005 ze 130 do 200 milionów USD [9]. Jest to wzrost znaczący, nawet uwzględniając spadek w tym czasie wartości dolara. Oprócz wcześniej wymienionych państw UE oraz byłego ZSRR, poszukiwania są prowadzone lub rozpoczynane w wielu innych krajach, o których była mowa, a także w krajach nie posiadających energetyki jądrowej np. w Jordani i czy Myanmar (Birma). W przypadku odkrycia nowych złóż na efekty trzeba będzie czekać wiele lat ze względu na skomplikowane procedury dotyczące badań lokalizacji z punktu widzenia ochrony

środowiska¹³ oraz bezpieczeństwa (czynnik legislacyjny). Można jednak sądzić, że za lat kilkanaście będzie eksploatowanych wiele nowych kopalni uranu, ponieważ w inwestycje i poszukiwania zaangażowane są liczne kompanie dysponujące zarówno kapitałem, jak i know how.

Usługi w zakresie konwersji

Istnieje na świecie pięć głównych firm zajmujących się konwersją 1 (uranu naturalnego). Są nimi:

- **w Unii Europejskiej** Comurhex we Francji (zakład w Malvesi z konwersją do UF₄ i w Pierrelatte z dalszą konwersją do UF₆) oraz BNFL w Anglii (zakład w Springfield w hrabstwie Lancashire). Istnieje także zakład NUKEM w Niemczech, jednak o stosunkowo niewielkich zdolnościach produkcyjnych;
- **w Ameryce Północnej** Cameco w Kanadzie, w stanie Ontario (zakład w Blind River z konwersją do UO₃ i w Port Hope z dalszą konwersją do UF₆) oraz Honeywell International w USA w Metropolis, stan Illinois;
- **w Federacji Rosyjskiej** Federal Agency for Atomic Energy – FAAE (poprzednio Minatom) z zakładami w Angarsku, Tomsku i Irkucku.

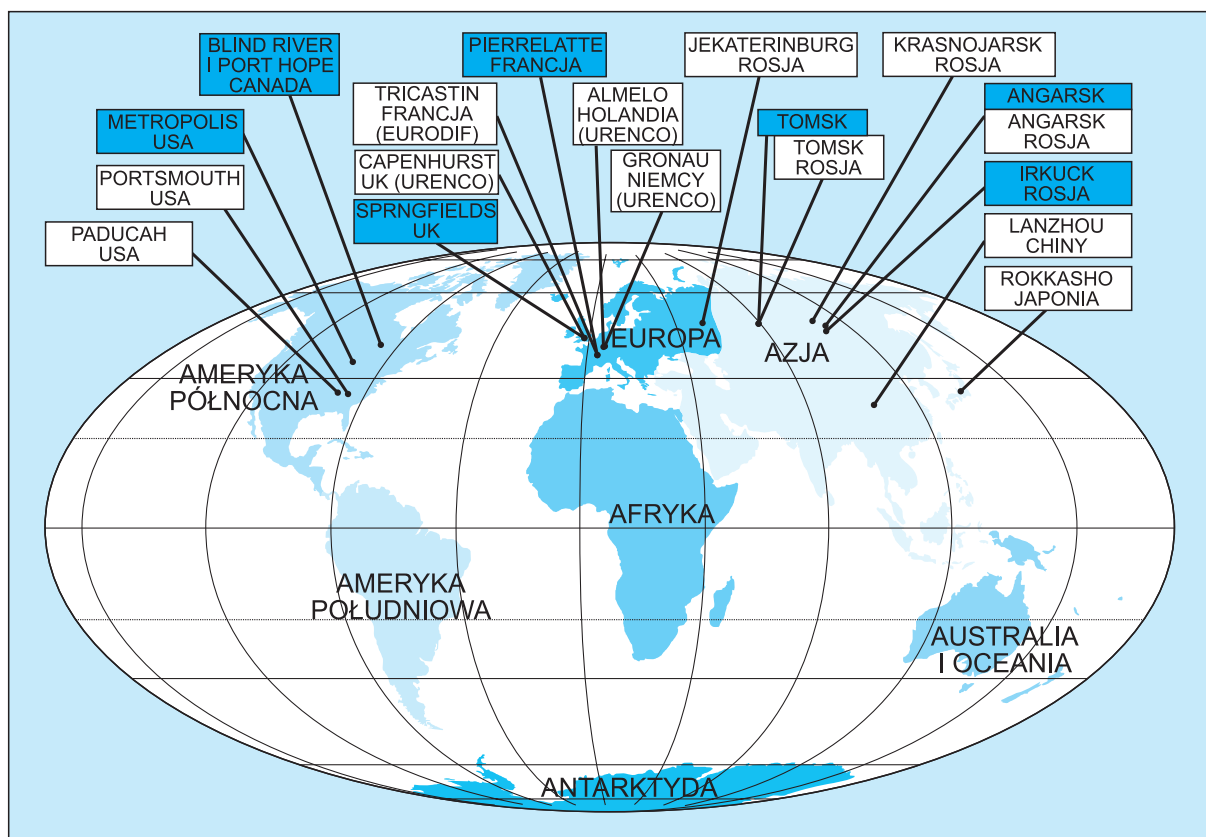
Rozkład geograficzny zakładów konwersji 1 na świecie ukazuje rys. 2. Maksymalne zdolności produkcyjne tych zakładów, bez zakładów rosyjskich, wynoszą około 52 000 tU/rok, zaś produkcja – praktycznie ok. 36 000 tU/rok (dane dla 2004 r.). Zdolności produkcyjne Rosji ocenia się na 10 000-20 000 tU/rok, ale w roku 2003 produkcja była rzędu 4 500 tU [10]¹⁴.

Na mniejszą skalę (choć z perspektywą silnego wzrostu) konwersja jest prowadzona w Chinach, a na znacznie mniejszą w Argentynie, Indiach, Brazylii i Południowej Korei, także w Rumunii (tu przetwarza się własny uran z przeznaczeniem do reaktorów typu CANDU). W przypadku Rumunii produktem wyjściowym nie jest UF₆ lecz UO₂, ponieważ nie ma potrzeby wzbogacania uranu.

Agentem handlowym dla firmy Honeywell w USA jest ConverDyn i ta nazwa pojawia się częściej w publikacjach. Firma Comurhex we Francji wchodzi w skład koncernu AREVA. Z kolei firma rosyjska FAAE jest dostawcą zajmującym się eks-

¹³ W przypadku krajów-stron Konwencji z Aarhus wymagane konsultacje społeczne mogą powodować znaczne wydłużenie procesu wydawania zgody na budowę i eksploatację kopalni.

¹⁴ Dla ilustracji można podać, że reaktor lekkowodny o mocy 1000 MW(e) potrzebuje rocznie 150-175 tU.



Rys. 2. Rozkład geograficzny zakładów konwersji 1 (kolor) i zakładów wzbogacania (biały)

portem, jednak nie oferuje usług w zakresie konwersji, a jedynie sprzedaje je w gotowym paliwie, które eksportuje.

Zapotrzebowanie na UF_6 jest obecnie pokrywane tylko w części w drodze konwersji uranu pierwotnego, którego udział, jak wyżej stwierdzono, wynosi około 60%. Bilansowanie podaży i popytu jest dokonywane z uwzględnieniem UF_6 i UF_6e (ekwiwalentnego). Ekwiwalentny UF_6 to materiał pochodzący z wymienionych w poprzednim rozdziale źródeł wtórnych.

W ostatnich latach również na rynku usług konwersji doszło do pewnych zakłóceń. Zakład Honeywell w USA miał w 2003 roku problemy natury eksploatacyjnej, wskutek czego wystąpiła dłuższa przerwa w produkcji połączona ze znacznym, choć czasowym, jej spadkiem po ponownym uruchomieniu. Natomiast zakład BNFL w Springfields, który miał w 2006 roku zostać wyłączony z powodu wycofywania z eksploatacji reaktorów MAGNOX, został uratowany dla UE dzięki zleceniom Cameco. Jednocześnie, jak już wspomniano, zaprzestano dostaw bezpośrednich rosyjskiego UF_6 i zmalały możliwości pożyczania sobie tego materiału. Wszystko razem spowodowało różnice cenowe usług konwersji w USA i w UE dla kontraktów krótkoterminowych. Wyciągnięto jednak wnioski, że pierwotne zdolności produkcyjne muszą zostać zwiększone, zarówno ze względu

na niebezpieczeństwo jakie się wiąże z małymi marginesami¹⁵, jak też z uwagi na fakt, że ilości UF_6 ekwiwalentnego będą maleć, zaś potrzeby rosnąć, wraz z budową nowych bloków elektrowni jądrowych. Obecnie planowana jest ekspansja zakładów konwersji w USA i Francji [10].

Usługi w zakresie wzbogacania izotopowego uranu

Usługi w zakresie wzbogacania izotopowego stanowią ze względów politycznych najbardziej wrażliwy element cyklu paliwowego. Chodzi tu o międzynarodowe porozumienia w zakresie nierozprzestrzeniania broni jądrowej i kwestie postrzegania przez niektóre państwa własnej suwerenności lub bezpieczeństwa. Z tego względu i z uwagi na zaawansowaną technologię, mają więc one charakter strategiczny. Głównymi firmami oferującymi te usługi są:

- w Unii Europejskiej: francuski Eurodif należący do firmy AREVA oraz angielsko-holendersko-niemieckie Urenco z zakładami w Capenhurst, Almelo i Gronau,

¹⁵ W skali globalnej te marginesy nie są małe, na co wskazują liczby podane wyżej. Uwaga w tekście dotyczy firm Comurhex i ConverDyn. W przypadku UF_6 duże znaczenie mają jednak problemy natury logistycznej.

- w **Federacji Rosyjskiej**: Tenex z zakładami w Tomsku, Angarsku i Krasnojarsku na Syberii,
- w **USA**: USEC Inc. sprzedająca usługi zakładów w Portsmouth i Paducah.

Za wyjątkiem USEC i firmy AREVA stosują one technologię ultrawirówkową. Na świecie istnieją jeszcze komercyjne zakłady wzbogacania w Chinach (CNNC) i Japonii (JNFL) [11]. Rozkład geograficzny zakładów wzbogacania na świecie pokazuje rys. 2.

Francja (firma Eurodif) obecnie rozbudowuje swoje zdolności produkcyjne w tym zakresie, w ramach *joint venture* z firmą Urenco, przez budowę w Tricastin nowego zakładu wzbogacania Georges Besse II o zdolności 7500 tSWU/a¹⁶. Pełną zdolność produkcyjną zakład ten ma osiągnąć około 2018 roku. W okresie późniejszym przewiduje się możliwość zwiększenia zdolności do 11000 tSWU/a¹⁷. W Niemczech przewiduje się zwiększenie zdolności zakładu Urenco w Gronau do 4500 tSWU/a [9]. Także i w USA została wydana licencja na budowę i uruchomienie około 2010 roku w stanie Ohio nowego zakładu wzbogacania o zdolności 3500 tSWU/a, a w stanie Nowy Meksyk będą budowane przez Urenco zakłady wzbogacania o zdolności 3000 tSWU/a (pod firmą LES). Wskazuje to na fakt, że wzbogacanie uranu znalazło się ponownie w centrum zainteresowania (po latach zastoju w budowie nowych reaktorów energetycznych). Odgrywa tu rolę jednak i inny czynnik: nowe inwestycje we Francji i w USA idą w kierunku stosowania wydajnych i energooszczędnych technologii ultra-wirówkowych, które zużywają około 50 razy mniej energii elektrycznej niż technologie dyfuzyjne.

¹⁶ SWU jest jednostką tzw. pracy rozdzielczej i ma wymiar masy uranu. Oznacza się ją także podając obok jednostkę masy: kgU lub tU, która jest 1000 razy większa. Jednostka jest określona wzorem matematycznym przedstawiającym sumę „produktu” (wzbogaconego uranu) i pozostałości (tails) minus wsad uranu, który ma być wzbogacany, przy czym te składniki pomnożone są przez obliczone dla każdego z nich współczynniki, tzw. „funkcje wartościujące” mogące teoretycznie przybierać wartości od zera do nieskończoności według symetrycznej krzywej logarytmicznej. Jest to jednostka wymyślona, która od ponad 60 lat doskonale charakteryzuje wkład energii w proces wzbogacania i dlatego jest stosowana przy zamawianiu i rozliczaniu usług wzbogacania. Dla zakładu: do wyprodukowania 1 kg uranu wzbogaconego do 3% (dolna wartość wzbogacania dla reaktorów lekkowodnych) potrzeba 4 kg SWU i 6 kg uranu naturalnego przy założeniu, że uran zawarty w pozostałościach zostanie zubożony do 0,25% U-235.

¹⁷ Nowy zakład ma stopniowo przejmować produkcję od dotychczasowego zakładu działającego w oparciu o droższą technologię dyfuzji gazowej.

Interesujący jest fakt, że obecnie 5500 tSWU stanowiące połowę zapotrzebowania rocznego USA pochodzi z Rosji, ale nie z normalnych usług wzbogacania, które mogłyby dostarczać Rosja ze względu na wysokie moce produkcyjne, lecz z programu „Megatony na megawaty”. Z końcem tego programu, w roku 2013 i wobec nikłych szans na jego powtórzenie, USA będą musiały zapewnić sobie równoważną produkcję w nowych zakładach lub import usług wzbogacania [12].

Kilka innych krajów także znajduje się na różnych etapach wdrażania technologii wzbogacania, niestety niektóre z nich nie są stronami *Układu o nierozprzestrzaniu broni jądrowej (NPT)* i odpowiednich porozumień z MAEA lub, jak w przypadku Iranu, stwarzają problemy będąc stronami tego układu.

Obecnie zdolności produkcyjne komercyjnych zakładów wzbogacania działających na świecie wynoszą 45 150 - 45 650 tSWU/a, w tym w Krajach UE – 17 100 tSWU/a¹⁸[11]. UE, USA i Rosja łącznie dostarczają 95% usług wzbogacania na świecie. Liczby te opierają się na danych odnoszących się do lat 2000-2004. Przy obecnych rozmiarach energetyki jądrowej na świecie istnieją nadwyżki zdolności produkcyjnych. Zapowiadana budowa dużej liczby nowych bloków jądrowych i odchodzenie od technologii dyfuzyjnych, a także wzrost cen uranu (prowadzący do większej separacji U-235 w procesie wzbogacania) i koniec programu „Megatony na megawaty” będą z pewnością przyczyniać się do ekspansji usług rosyjskich w dziedzinie wzbogacania.

Dywersyfikacja dostaw uranu i usług przemysłu jądrowego w Unii Europejskiej

Tabela 2, sporządzona na podstawie danych sprzed kilku lat, przedstawionych w [13] i częściowo zaktualizowanych przez autora w oparciu o inne źródła, ukazuje obraz dywersyfikacji dostaw uranu oraz dostępu do usług cyklu paliwowego w przypadku poszczególnych państw członkowskich UE. W tabeli nie rozróżniono, ze względu na brak danych, poszczególnych państw-dostawców z dawnego ZSRR, którymi mogły być: Rosja, Kazachstan, Uzbekistan lub Ukraina. Nie pokazano w niej także dwóch istotnych w ciągu ostatniego dziesięciolecia źródeł wtórnych uranu, a mianowicie programu „Megatony na megawaty” oraz odzysku uranu w drodze wzbogacania pozostałości. Źródła te w ostatnich latach zaspokajały

¹⁸ W 2006 r. na potrzeby użytkowników z UE w europejskich zakładach wzbogacania wykonano pracę 11400 tSWU (wg informacji prywatnej). Dla ilustracji można podać, że do rocznego przeładunku reaktora o mocy 1000 MW(e) potrzeba około 100 tSWU.

w znaczącym stopniu zapotrzebowanie na uran w Unii Europejskiej. Nie uwzględniono także produkcji paliwa typu MOX. Paliwo to jest wytwarzane obecnie jedynie przez firmę Melox we Francji i BNFL w UK. Zakłady Belgonucleaire w Belgii, które wcześniej również je produkowały, zostały zamknięte w 2006 roku [14].

Tabela 2. Dywersyfikacja dostaw w jądrowym cyklu paliwowym państw UE

Uran	Państwa korzystające														
Australia	F	UK	D	S	E	B	SF								
Chiny	F		D			B	SF								
Dawny ZSRR/ Rosja	F	UK	D	S	E		SF	CZ	SK	H	BG		SLO	LT	
Kanada	F	UK	D	S	E	B	SF						SLO		
Namibia	F	UK		S	E										
Niger	F		D	S	E	B	SF	NL							
Portugalia	F		D		E										
RPA	F	UK	D		E	B									
USA		UK	D	S		B	SF						SLO		
Własny	F				E			CZ		H	BG	RO			
Reprocessing, UE	F	UK	D			B									

Konwersja 1

BNFL (UK)		UK	D	S	E	B		NL							
Cameco (Kanada)		UK	D	S	E	B			CZ						
CNU (Rumunia)													RO		
Comurhex (Francja)	F		D	S	E	B			CZ						
Converdyn (USA)	F		D	S	E	B								SLO	
Tenex (Rosja)	F	UK	D	S	E		SF	CZ	SK	H	BG				LT

Wzbogacanie

Eurodif (Francja)	F		D	S	E	B									
Tenex (Rosja)	F	UK	D	S	E	B	SF	CZ	SK	H	BG	SLO	LT		
Urenco (D,NL,UK)	F	UK	D	S	E	B	SF	NL	CZ						
USEC (USA)	F	UK	D	S	E	B		NL	CZ				SLO		

Produkcja paliwa

ABB Atom (Szwecja)	F		D	S	E	B	SF								
ANF Siemens (Niemcy)	F	UK	D	S	E	B	SF	NL							
BNFL (UK)		UK				E	SF	NL							
ENUSA (Hiszpania)	F		D	S	E	B	SF								
FBFC (Francja, Belgia)	F		D	S	E	B									
General Electric (USA)			D		E										
TVEL (Rosja)									CZ	SK	H	BG		LT	
Nuclearelectrica (Rum.)															
SPC (USA)	F		D			B									
Westinghouse (USA)				S					CZ					SLO	

Rys. 3. ukazuje aktualne kierunki dostaw koncentratu uranu do Unii Europejskiej. Dostawcami (nie licząc niewielkiej produkcji wewnętrznej) jest faktycznie co najmniej 9 państw leżących na pięciu kontynentach. Kierunki pokazane na rysunku nie muszą być kierunkami fizycznych dostaw, ponieważ zakupiony koncentrat może wędrować najpierw do zakładu konwersji 1, stamtąd do wzbogacania, a następnie do zakładu wytwarzającego właściwe paliwo, lub w przypadku Rosji pochodzić np. z USA, jak to już wyjaśniono wcześniej.

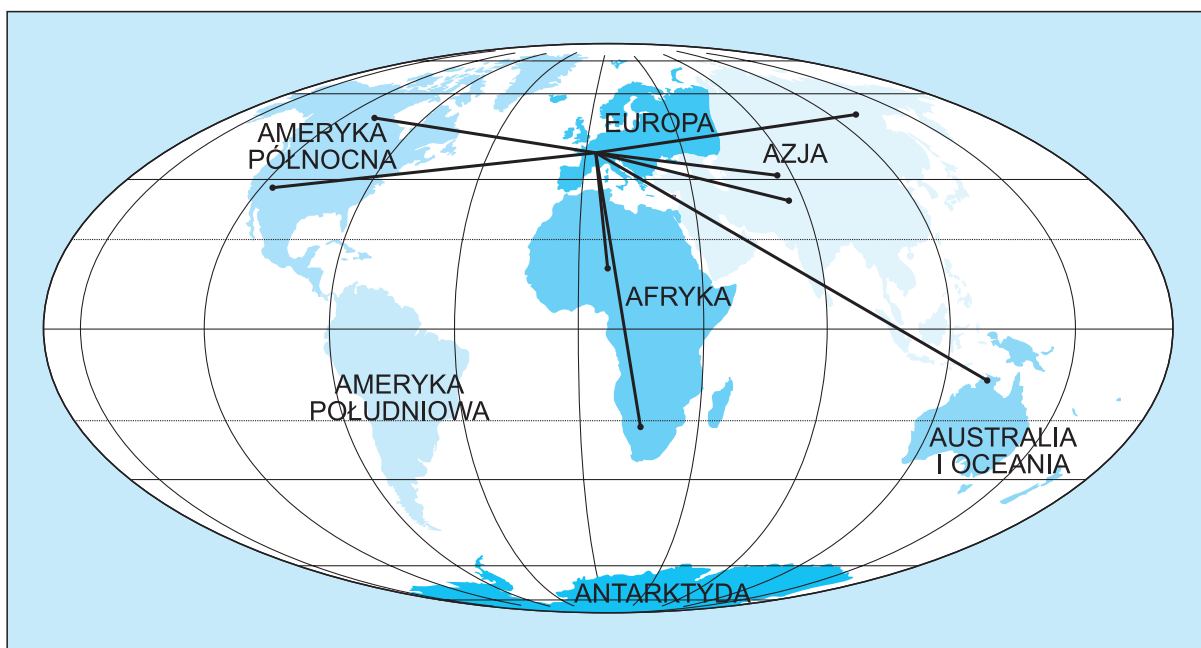
Warto w tym miejscu wspomnieć raz jeszcze, że ogromnym potencjałem, dysponuje Kazachstan, którego produkcja obecnie szybko wzrasta (w 2006 r. w porównaniu z 2005 r. produkcja wzrosła o 22%). Mając na uwadze, iż państwo to stanowi bardzo istotne źródło dla dostaw w przyszłości, zostało podpisane w grudniu 2006 r. odpowiednie porozumienie o współpracy w pokojowym wykorzystaniu energii jądrowej między Euratomem i Kazachstanem [5]¹⁹.

Istnieje obecnie 7 producentów uranu pośród państw obecnej UE (Bułgaria, Czechy, Francja, Hiszpania, Portugalia, Rumunia i Węgry), ale dane ESA za 2006 rok [5], odnoszące się do UE-25 wskazują jedynie na Czechy jako dominującego wewnętrznego producenta, który wytwarza zdecydowaną większość wkładu wewnątrz unijnego, ocenianego na około 2% potrzeb. Czeska produkcja jednak się zmniejsza. Cytowany dokument nie mówi jeszcze nic o Rumunii, która wraz z Bułgarią jest członkiem UE dopiero od 2007 roku. Rumunia wydobywa uran wyłącznie na własne potrzeby.

Odzysku uranu w drodze przerobu wypalonego paliwa dokonują tylko nieliczne kraje UE wysyłające w tym celu swoje wypalone paliwo do zakładów we Francji (Cogéma, La Hague) oraz UK (BNFL w Sellafield).

Jak już widzieliśmy, w krajach UE obecny jest silny przemysł usług cyklu paliwowego, działający w warunkach ostrej konkurencji wewnętrznej oraz zewnętrznej. Szczególnie narażony na zewnętrzną konkurencję, co do której są podejrzenia, że nie działa na zasadach wolnorynkowych, jest przemysł wzbogacania izotopowego. W celu ochrony przemysłu jądrowego UE od 1994 roku obowiązuje tzw. „Deklaracja z Korfu” regulująca import usług jądrowych tak, by zapewnić dostawcom w ramach UE dominujący 80 procentowy

¹⁹ Podobne porozumienia zawarto wiele lat temu z USA, Australią i Kanadą. Jednym z ważniejszych powodów ich zawierania z krajami-dostawcami uranu jest konieczność bilateralnego uregulowania kwestii nieproliferyacyjnych związanych z obrotem materiałami jądrowymi, których definicje podaje art.197 Traktatu Euratom.



Rys. 3. Rozkład geograficzny źródeł dostaw uranu dla Unii Europejskiej

udział na rynku wewnętrznym [15]. Jeśli chodzi o elektrownie jądrowe, to większość operatorów zawiera kontrakty oddzielnie na dostawy uranu oraz na poszczególne usługi (konwersji 1, wzbogacania, wytwarzania zespołów paliwowych), co umożliwia kontrolę wykonania postanowień tej deklaracji. Utrudniają natomiast tę kontrolę zamówienia kompletnych dostaw paliwa z Rosji. Nie ma to jednak istotnego wpływu na *status quo* wypracowany wcześniej w odniesieniu do członków UE składającej się z 15 państw. Sprawa importu z Rosji, której przemysł cyklu paliwowego zdobył mocną pozycję na rynku, wymaga uregulowania specjalną umową bilateralną Euratom-Rosja. Komisja Europejska podjęła kroki w tym kierunku.

Usługi w zakresie konwersji 1 zamawiane są na terenie UE we Francji i Wielkiej Brytanii, podczas gdy Rumunia posiada zakład na własne potrzeby, oraz poza UE – w Kanadzie i USA. Rosyjskie usługi w zakresie konwersji są, jak już powiedziano wyżej, dostarczane jedynie w postaci gotowego paliwa.

Usługi wzbogacania użytkownicy z UE zamawiają na terenie UE w firmach Eurodif oraz Urenco, a także poza nią – w USA (USEC) i jak wspomniano wyżej – w Rosji (TENEX).

W roku 2006 udział zakładów wzbogacania UE w całości dostarczonych tego rodzaju usług dla użytkowników w krajach UE wyniósł 71%, zaś udział USA tylko 2%. Natomiast udział Rosji wyniósł 27%, co w sposób widoczny przekracza limit z Korfu. Powodem tego jest import gotowego paliwa przez kilka nowych państw członkowskich oraz wzbogacanie pozostałości.

Usługi na potrzeby odbiorców w zakresie wytwarzania paliwa świadczy w UE aż dziesięć zakładów, z czego sześć na terytorium Unii, trzy w USA i jeden w Rosji.

Pomimo, iż w krajach UE istnieje przemysł jądrowy obejmujący wszystkie fazy cyklu paliwowego od konwersji 1 do przerobu wypalonego paliwa, to, jak widzieliśmy, koncerny energetyczne zamawiają usługi w zakresie konwersji, wzbogacania i wytwarzania paliwa także poza granicami Unii. Decydują o tym zasady wolnego rynku. Analiza tabeli 2 pokazuje, że znaczna dywersyfikacja kierunków dostaw ma miejsce w przypadku „starych” państw członkowskich (sprzed 1 maja 2004 r.).

Przewidywane roczne zapotrzebowanie UE-25 na uran i usługi wzbogacania w okresie od 2007 do 2017 roku wynosi nieco mniej niż 20 000 tU i nieco ponad 14 000 tSWU. W rzeczywistości, uwzględniając przerób wypalonego paliwa, liczby te mogą być niższe odpowiednio o ok. 10 i 6,5% [5]. Jeśli chodzi o zapotrzebowanie na uran, to jest to około połowa rocznego światowego wydobycia w roku 2006.

Niezawodność transportu

W przypadku elektrowni jądrowych z reaktorami lekkowodnymi nie istnieje potrzeba dostaw ciągłych paliwa. Przeładunku tych reaktorów dokonuje się raz na 1-1,5 roku, a świeże paliwo dostarcza się z odpowiednim wyprzedzeniem. Zapewnia to tym elektrowniom ogromną autonomię, w odróżnieniu od np. elektrowni opalanych węglem, które

praktycznie każdego dnia muszą mieć dowieszone paliwo. Trzeba jednak powiedzieć, że dostawy paliwa jądrowego do Europy, począwszy od koncentratu uranowego aż do gotowych zespołów paliwowych, mogą się wiązać z bardzo długimi trasami, także międzykontynentalnymi (rys. 2 i 3).

Transport jest więc ważnym ogniwem w łańcuchu zaopatrzenia w paliwo jądrowe, zwłaszcza w związku ze stadiami konwersji 1 i wzbogacania uranu. Między Ameryką i Europą transportuje się głównie cylindry zawierające UF_6 . Nowe regulacje dotyczące transportu oraz niechęć wielu portów i armatorów do przyjmowania UF_6 jako cargo są zjawiskami zdecydowanie niekorzystnymi [6]. Ogólnie biorąc, zapewnienie niezakłóconego transportu jest sprawą szczególnie ważną i delikatną, także ze względu na możliwe akcje przeciwników energetyki jądrowej. Nie jest jednak zamierzeniem autora wchodzenie w szczegóły tych spraw, a jedynie ich zaznaczenie. Warto natomiast przy tej okazji zauważyć, że niezależnie od oczywistych działań dla zapewnienia niezawodności transportu, m.in. poprzez optymalizacje logistyczne ograniczające transport do niezbędnego minimum, stosowanie zasad ochrony fizycznej i nieujawnianie tras przewozowych tam, gdzie to jest możliwe podejmuje się działania w celu ograniczenia samego transportu.

Ograniczenie transportu bywa możliwe w drodze stosowania metody zwanej „*Transportswapping*” tj. zamiany (*swapping*) materiału między różnymi partnerami [16]. Jest ona unikalnym rozwiązaniem specyficznym dla przemysłu jądrowego, polegającym na zamianie pomiędzy użytkownikami UF_6 zawierającego uran naturalny, który jest materiałem wyjściowym dla wzbogacania izotopowego. Materiał ten podlega w zakładach wzbogacania procedurze kwalifikacyjnej obejmującej sprawdzenie, czy spełnia on tzw. wymagania Amerykańskiego Stowarzyszenia Badań Materiałów (*American Society for Testing Materials – ASTM*). Największe komercyjne zakłady wzbogacania na świecie (USEC w USA, Urenco i Eurodif w Europie i TENEX w Rosji), jak również największe zakłady konwersji 1 (Comurhex we Francji, BNFL w Wielkiej Brytanii, Cameco w Kanadzie i Converdynam w USA) respektują specyfikacje ASTM, co sprawia, że materiał należący do różnych użytkowników, a spełniający te wymagania, jest fizycznie wzajemnie zamienny. Tak więc, jeżeli np. jeden użytkownik kierując się zasadami wolnego rynku zakupił uran w Kanadzie i tam zamówił konwersję, zaś wzbogacanie zamówił w Europie, a inny użytkownik ma materiał w Europie, a kon-

trakt na wzbogacanie w USA, to dla ograniczenia przewozu transatlantyckiego mogą oni zamienić się materiałem. Nie jest to jednak takie proste jak by mogło wynikać z przytoczonego przykładu, ponieważ obrót międzynarodowy materiałami jądrowymi podlega wielorakim przepisom i ograniczeniom wynikającym zarówno z porozumień międzynarodowych, jak i prawa krajowego. W samej UE podlega on, jak było wcześniej powiedziane, m.in. nadzorowi Agencji Dostaw Euratomu. Powstały jednak wyspecjalizowane międzynarodowe biura konsultingowe, które załatwiają tego rodzaju sprawy zamiany materiału zmniejszając skutecznie koszty i ryzyko transportu.

Inny przykład ograniczania transportu przez dokonywanie odpowiednich operacji księgowych opiera się na porozumieniu z 2001 roku dotyczącym programu „Megatony na megawaty”. USEC z ramienia rządu USA kupuje od Rosji uran niskowzbożony i sprzedaje go elektrowniom jądrowym. Jednocześnie USEC, Tenex i Converdynam zgodnie z porozumieniem, współpracują przy zwrocie do Rosji naturalnego UF_6 . W rzeczywistości USEC, posiadając strategiczne zapasy naturalnego UF_6 , umożliwia za pośrednictwem odpowiednich operacji przeksięgowanie tego materiału przez rosyjski Tenex na rzecz wskazanych zachodnich agentów handlowych, bez potrzeby fizycznego przekazywania materiału via Rosja.

Transport materiałów jądrowych wymaga profesjonalizmu, będącego warunkiem jego bezpieczeństwa, oraz umiejętności załatwienia skomplikowanych operacji formalnych. Dlatego przewozami tych materiałów zajmują się wyspecjalizowane firmy, których w UE nie brakuje.

Międzynarodowe inicjatywy dotyczące zapewnienia paliwa jądrowego w dalszej przyszłości

W związku z powiększaniem się liczby państw zainteresowanych budową energetyki jądrowej i związanych z nią obiektów jądrowego cyklu paliwowego pojawiły się nowe inicjatywy zmierzające do maksymalnego ograniczenia ryzyka proliferacji w zakresie uzyskania zdolności do posiadania broni jądrowej. Należą do nich propozycje tworzenia międzynarodowych centrów przemysłu jądrowego „wrażliwego” z punktu widzenia proliferacji (chodzi tu głównie o wzbogacanie izotopowe i przerób wypalonego paliwa). Z przystąpieniem do takich centrów podlegających stałej międzynarodowej lub ponadnarodowej kontroli miałyby się wiązać korzyści w postaci gwarantowanych dostaw pa-

liwa jądrowego²⁰ lub usług jądrowego cyklu paliwowego, pod warunkiem, że przystępujący kraj zrezygnuje z rozwijania u siebie takich wrażliwych elementów tego cyklu [17]. Autorami najnowszych inicjatyw lub programów w tym zakresie są USA, Unia Europejska, MAEA, Federacja Rosyjska i Japonia.

Z polskiego punktu widzenia interesujące są, mające wiele wspólnego pod względem technologicznym, programy USA i UE. Zarówno amerykański program globalnego partnerstwa w dziedzinie energii jądrowej (*Global Nuclear Energy Partnership – GNEP*) [18], jak i unijny program „Platforma Technologiczna Samopodtrzymywalnej Energetyki Jądrowej” (*Sustainable Nuclear Energy Technology Platform, SNE-TP*) [19] zakładają m.in. opracowanie nowych reaktorów powielających na neutronach prędkich (IV generacji) oraz nowej technologii dla przerobu wypalonego paliwa, umożliwiającej recykling uranu i plutonu, a także innych aktywności²¹ powstałych w reaktorze. Planuje się, że można będzie w ten sposób zaoszczędzić znaczne ilości paliwa pierwotnego (reaktory na neutronach prędkich z multi-recyklingiem będą potrzebowały do 100 razy mniej uranu pierwotnego w porównaniu z reaktorami lekkowodnymi), jak również osiągnąć cele nieproliferyjne dzięki temu, że pluton nie byłby dostępny jako oddzielnie wydzielony materiał (program USA), oraz że zawarte w wypalonym paliwie aktywności uległyby transmutacji w reaktorze zmniejszając ilość wysokoaktywnych i długożyciowych odpadów promieniotwórczych. Kraje biorące udział w programie USA i wyrzekające się własnego wzbogacania uranu oraz przerobu wypalonego paliwa miałyby zapewnione przez to państwo paliwo do swoich reaktorów.

Polska zgłosiła swój udział w programie GNEP we wrześniu 2007 r., natomiast w chwili pisania tego artykułu nie była jeszcze stroną w programie unijnym SNE-TP. Został on ogłoszony również we wrześniu 2007 roku. Trzeba w tym miejscu podkreślić, że Unia Europejska (Euratom) posiadająca najpotężniejszy przemysł jądrowy na świecie oraz

bogate doświadczenie technologiczne i zaplecze naukowo-badawcze, ma wszelkie predyspozycje do tego, by jej program okazał się skuteczny. Oprócz wspomnianych wyżej programów USA i UE, w roku 2001 podjęta została współpraca międzynarodowa dotycząca IV generacji reaktorów (*Generation IV International Forum – GIF*), w tym reaktorów na neutronach prędkich. Bierze w niej udział 12 państw oraz Euratom²². A więc UE jest także zaangażowana we współpracę międzynarodową w tej problematyce. Nowa technologia przewidziana tymi programami może być osiągalna najwcześniej w trzeciej dekadzie tego wieku, po czym należy oczekiwać jej stopniowego wdrażania. Pluton odzyskany z wypalonego paliwa z reaktorów lekkowodnych może zostać wykorzystany w reaktorach na neutronach prędkich²³. Rys. 4. ukazuje zakładaną w programie skalę czasową tych zmian w UE według francuskiego scenariusza, przy założeniu niemal stałego poziomu generacji energii elektrycznej [20]²⁴. Reaktory generacji III (III plus) a następnie IV będą zastępować wysłużone jednostki II generacji. W niektórych przypadkach będzie miało miejsce także wydłużanie okresu eksploatacji tych ostatnich.

Uwagi końcowe

Rynek uranu i cyklu paliwowego podlegał od zahamowania rozwoju energetyki jądrowej z początkiem lat 80-tych XX wieku do obecnych sygnałów dotyczących jej „renesansu” zakłóceniom spowodowanym różnymi czynnikami. Analiza obecnej i niedawnej sytuacji na tym rynku wskazuje, że obserwowane perturbacje nie miały istotnego wpływu na zaopatrzenie elektrowni jądrowych w paliwo w krajach będących stronami NPT, co potwierdza wysoką odporność energetyki jądrowej na takie problemy. Zakłócenia na rynku uranu i usług w zakresie konwersji 1 spowodowały adekwatną reakcję przemysłu jądrowego i rządów zainteresowanych państw. Informacje o tych zakłóceniach zostały przedstawione w tym artykule, aby pokazać że energetyka jądrowa nie jest na nie wrażliwa, pod warunkiem utrzymywania pewnych zapasów UF₆ zapewniających jej działanie przez czas niezbędny dla uruchomienia nowej produkcji

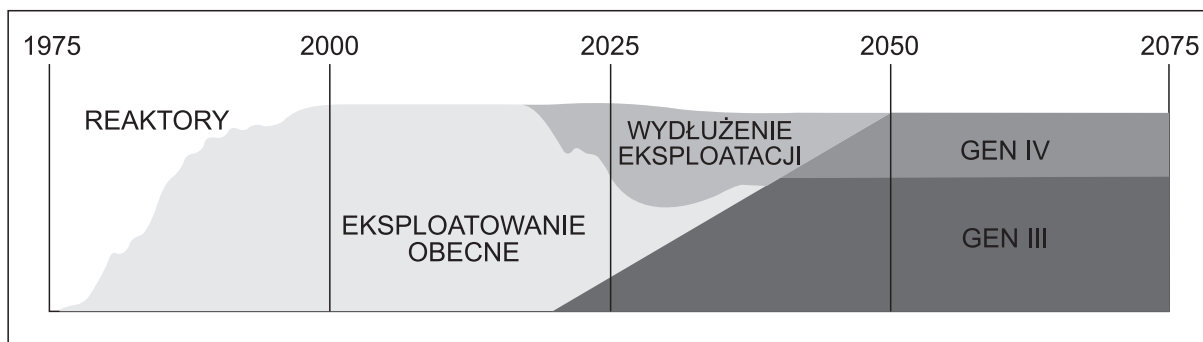
²⁰ Już w latach 70-tych XX wieku powołany został w ramach działalności Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej specjalny Komitet Zapewnienia Dostaw (*Committee of Assurances of Supply – CAS*). Celem jego było wypracowanie zasad współpracy międzynarodowej w dziedzinie jądrowej, która by prowadziła do uniwersalizacji Układu o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej z zagwarantowaniem, że nie spowoduje to ograniczenia dostępu do paliwa jądrowego państw przystępujących do tego układu. Prace te jednak nie doprowadziły wówczas do osiągnięcia postulowanych celów.

²¹ Aktywności to 15 pierwiastków o liczbach atomowych od 90 do 103. Spośród nich tor, protaktyn, uran i neptun występują w przyrodzie, inne, w tym pluton, powstają w reaktorze w wyniku bombardowania neutronami.

²² Stronami GIF są następujące państwa: Australia, Brazylia, Chiny, Francja, Japonia, Kanada, Republika Korei Południowej, Republika Południowej Afryki, Rosja, Szwajcaria, UK i USA.

²³ 50 lat pracy reaktora lekkowodnego może dostarczyć plutonu wystarczającego do uruchomienia reaktora prędkiego [20].

²⁴ W rzeczywistości reaktory generacji III zaczną wchodzić do eksploatacji wcześniej, niż by to wynikało z rysunku (Finlandia i Francja – ok. 2010 i 2012 r.).



Rys. 4. Przewidywane zmiany w strukturze eksploatacji reaktorów energetycznych w XXI wieku (źródło: EDF, ENC, 2002)

lub uruchomienia źródeł wtórnych. Znamionym faktem jest, że zakłócenia na rynku uranu w ostatnich latach nie mają wpływu na zamówienia nowych reaktorów na świecie, także w samej UE.

W krótkim horyzoncie czasowym pojawiają się zapewne nowe relacje między cenami uranu oraz wzbogacania spowodowane wzbogacaniem z obniżeniem poziomu U-235 w pozostałościach. W drugiej dekadzie naszego stulecia mogą pojawić się trudności związane z ograniczeniem dopływu uranu ze źródeł wtórnych („Megatony na megawaty”). Ewentualna niepewność co do zdolności wzbogacania w UE może dotyczyć końca drugiej dekady, gdy wraz z uruchamianiem produkcji w nowym, ultrawirówkowym zakładzie Eurodifu będzie wycofywany z eksploatacji dotychczasowy – dyfuzyjny (podobny proces może mieć miejsce w USA). Ze względu na potencjał Rosji, podaż usług wzbogacania nie powinna jednak zmaleć, tym bardziej, że w interesie firm europejskich nie leży wpuszczanie obcego partnera na rynek. Nowe inwestycje w energooszczędne technologie ultrawirówkowe i wycofywanie z eksploatacji zakładów opartych o technologie dyfuzyjne będą sprzyjały stabilizacji cen SWU na rozsądnym poziomie.

W średniej perspektywie czasowej, interesującej nas z punktu widzenia zapowiadanej budowy i oddania do eksploatacji elektrowni jądrowych w Polsce, zakłócenia, o których wyżej była mowa w zasadzie nie powinny mieć miejsca. Opiera się to na założeniu, że energetyka jądrowa w świecie będzie się rozwijać w sposób przewidywalny pociągając za sobą zdecydowane działania w zakresie zwiększenia wydobycia uranu i zapewnienia usług cyklu paliwowego. Przyczynią się do tego: intensyfikacja eksploatacji istniejących kopalń rud uranu i poszukiwań nowych złóż oraz inwestycje w przemysłach konwersji 1 i wzbogacania. Powraca się także do możliwości pozyskiwania uranu jako produktu ubocznego, np. przy wytwarzaniu nawozów fosforowych, a w dalszej perspektywie – nawet pozyskiwania go z popiołów węglowych (Chiny), co warto jest, być może, rozważenia także w polskich warunkach. Można się natomiast

spodziewać, że na dotychczasowych rynkach uranu świata zachodniego coraz większych zakupów będą dokonywać silnie rozwijające energetykę jądrową Chiny i Rosja, które dotąd zaspokajały swoje potrzeby we własnym regionie. W warunkach globalizacji, wolnego rynku i dużego zróżnicowania dostawców z różnych regionów świata, na ceny uranu i usług będą w sposób normalny wpływać głównie konkurencja dostawców i popyt, a także udział źródeł wtórnych, choć w jakimś stopniu może i ceny kopalnych paliw organicznych. Krótkoterminowych zakłóceń dostaw nie można jednak wykluczać i dlatego mogą się pojawić dążenia do tworzenia zapasów. Powinny to być nawet zapasy obowiązkowe i zapewne prędzej czy później Komisja Europejska do tego doprowadzi.

W przypadku Polski będącej stroną odpowiednich układów, konwencji i porozumień międzynarodowych w dziedzinie jądrowej, nie ma przeszkód politycznych w kwestii dostaw paliwa jądrowego i usług cyklu paliwowego. Ponadto, jako członek UE, w ramach ogólnych porozumień między Euratomem i krajami będącymi największymi dostawcami uranu, Polska będzie miała możliwość jego importu z tych kierunków i dywersyfikacji dostaw (o ile nie poprzestanie na udziale w programie GNEP kosztem współpracy w ramach UE – w takim przypadku uzależnilibyśmy się od jednego dostawcy). Decydując się na dostawcę reaktorów jądrowych pożądane byłoby dokonanie takiego wyboru, by nie uzależniać się od monopolistycznego dostawcy paliwa, mimo iż na początku mogłoby się to wydawać wygodne lub tańsze. Dywersyfikacja dostaw zawsze będzie istotnym czynnikiem bezpieczeństwa.

Nie należy się obawiać dzisiaj o bezpieczeństwo zaopatrzenia polskich elektrowni jądrowych w paliwo, jeżeli będziemy korzystać z możliwości wypracowanych w Unii Europejskiej. Trzeba jednak przygotowując się do budowy elektrowni jądrowych aktywnie śledzić sytuację na rynku uranu i usług cyklu paliwowego. Powinno się przy tym korzystać możliwie szeroko z ekspertyz Agencji Dostaw Euratomu i odpowiednich organizacji

światowych (MAEA, OECD/NEA) oraz z możliwości udziału w odpowiednich długofalowych przedsięwzięciach w ramach UE (szczególnie SNE-TP). Obserwowanie rynku uranu i usług cyklu paliwowego w najbliższych latach może dostarczyć z dużym wyprzedzeniem istotnej wiedzy w interesującym nas temacie odporności na ewentualne perturbacje na rynku paliwowym przyszłej polskiej energetyki jądrowej w jej początkowym okresie.

Niezależnie od wszystkiego, idąc za przykładem niektórych państw członkowskich UE, warto pomyśleć o dalszych poszukiwaniach ewentualnych zasobów uranu na terytorium Polski (obecne szacunki istniejących zasobów rzędu 7500 tU mogą być zaniżone), a także o zapewnieniu sobie poprzez inwestycje kapitałowe udziału w produkcji istniejących, rozbudowywanych lub nowobudowanych kopalń za granicą. Dla poszukiwań złóż uranu na własnym terytorium można uzyskać wsparcie finansowe zgodnie z odpowiednimi postanowieniami Traktatu Euratom.

W perspektywie połowy obecnego stulecia można liczyć na to, że zapotrzebowanie na uran pierwotny będzie się stabilizować, oraz że po wprowadzeniu do eksploatacji reaktorów powielających IV generacji znajdzie się na rynku w odpowiednich ilościach paliwo wtórne pochodzące z recyklingu. Energetyka jądrowa będzie się wówczas stawać energetyką samopodtrzymywalną na wiele kolejnych stuleci. Sytuacja w tym względzie w Unii Europejskiej będzie zależała od sukcesów w realizacji europejskiego programu SNE-TP, programu GIF oraz w jakiejś mierze – amerykańskiego programu GNEP.

*Jacek Kaniewski
były radca do spraw
Integracji Europejskiej prezesa PAA*

Literatura

1. Stan i tendencje rozwojowe energetyki jądrowej na świecie w latach 2003-2006. Państwowa Agencja Atomistyki, grudzień 2007 r.
2. Jacek Kaniewski. 50 lat Euratomu. Cele i okoliczności jego powstania. *Postępy Techniki Jądrowej*. Vol.50 Z.2, Warszawa 2007
3. Treaties establishing the European Communities, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1987 (autor opierał się na wersji angielskojęzycznej Traktatu Euratom)
4. Jacek Kaniewski. Regulacje prawne Unii Europejskiej dotyczące bezpieczeństwa dostaw paliwa jądrowego i rola Agencji Dostaw Euratomu. *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna*, nr 1(71)/2008. Państwowa Agencja Atomistyki
5. Euratom Supply Agency Annual Report 2006
6. Analysis of the Nuclear Fuel Availability at EU Level from a Security of Supply Perspective. Task Force on Security of Supply. Final Report of the Task Force, February 2005
7. World Nuclear Association (za pośrednictwem Australian Uranium Association www.uic.com.au)
8. WISE Uranium Project (www.wise-uranium.org)
9. Uranium 2005: Resources, Production and Demand. „Red Book” NEA/OECD i IAEA
10. Julian Steyn i Thomas Maede, Energy Resources International. Fuel Review: conversion. Increasing in importance. (Feature, 31 August 2004) *Nuclear engineering Int.* (www.neimagazine.com)
11. A. Makhijani, L.Chalmers, B.Smiths: Uranium Enrichment. Just Plain Facts to Fuel an Informed Debate on Nuclear Proliferation and Nuclear Power. Institute for Energy and Environmental Research, 15 October 2004 (www.ieer.org)
12. Clark Beyer. Russia's Future Role in the U.S. Enrichment Market. World Nuclear Association Annual Symposium 2005. (<http://world-nuclear.org/sym/2005/beyer/htm>)
13. Country Nuclear Fuel Cycle Profiles. Technical Reports Series No.404, IAEA, Vienna, 2001
14. Belgonucleaire Annual Report 2005 (opublikowany w maju 2006 r.)
15. The United Kingdom Parliament. Trade in Nuclear Materials. Letter from Stephen Timms MP, Minister of Energy, E-Commerce and Postal Services, Department of Trade and Industry to the Chairman. 15 December 2003 (www.publications.parliament.uk)
16. The Nuclear Fuel Cycle, Environmental Product Declarations EPD January 2004. Vattenfall
17. Multilateral approaches to the nuclear fuel cycle. Expert Group Report to the IAEA Director General, Vienna, 22 February 2005, INFIRC/640
18. Global Nuclear Energy Partnership Strategic Plan. U.S. Department of Energy. GNEP-167312, Rev.0, January 2007
19. Sustainable Nuclear Energy Technology Platform. (www.snetp.eu)
20. The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform. A Vision Report. Directorate-General for Research, Euratom, EUR 22842

