

Stefan CHWASZCZEWSKI*

Gospodarka wypalonym paliwem reaktorów energetycznych — technologie, ekonomika, środowisko**

SŁOWA KLUCZOWE: reaktor jądrowy, paliwo jądrowe, paliwo MOX, elektrownie jądrowe, uran

Wprowadzenie

W opracowywanych prognozach pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną w Polsce w XXI wieku pojawiają się elektrownie jądrowe. Dążenie społeczeństwa Polski do zrównania poziomu życia z pozostałymi społeczeństwami Unii Europejskiej wymusi przyrost zapotrzebowania na energię elektryczną. Polska nie będzie oazą szczególnie „energooszczędnych”, niespotykanych w innych krajach technologii, aby osiągnąć przy dwukrotnie mniejszym wykorzystaniu energii elektrycznej porównywalny z naszymi sąsiadami dochód na mieszkańca. Bez wykorzystania energii jądrowej trudno będzie osiągnąć ponad dwukrotny przyrost produkcji energii elektrycznej przy spełnieniu wymagań ochrony środowiska, dywersyfikacji rodzaju surowców energetycznych i zachowaniu rozsądnych kierunków importu surowców energetycznych.

Jednym z podstawowych problemów podnoszonych przez społeczeństwo i media jako argument przeciw wykorzystaniu energetyki jądrowej jest rzekomo nierozwiązany problem zagos-

* Prof. dr hab. — Instytut Energii Atomowej, Otwock-Świerk.

** Praca była publikowana w Materiałach XIII Konferencji z cyklu „Zagadnienia surowców energetycznych w gospodarce krajowej” pt.: Funkcjonowanie kompleksu paliwowo-energetycznego w świetle Prawa Energetycznego oraz nowych przepisów ochrony środowiska.

Recenzował prof. dr hab. inż. Roman NEY

podarowania wypalonego paliwa. Czy rzeczywiście jest to technicznie nierozwiązywalny problem? Czy rzeczywiście wypalone paliwo musi być izolowane od środowiska przez miliony lat? Jakie są koszty prowadzenia gospodarki wypalonym paliwem z reaktorów energetycznych i jakie są konsekwencje ekologiczne tej gospodarki. Na te pytania postaram się odpowiedzieć w artykule.

1. Charakterystyka wypalonego paliwa reaktorów energetycznych nowej generacji

Przedstawione w niniejszej pracy analizy zostaną przeprowadzone dla elektrowni jądrowych z reaktorami wodnymi (ciśnieniowymi lub wrzącymi) nowej generacji. Sejm RP, na posiedzeniu 9 listopada 1990 roku przyjął Uchwałę w sprawie założeń polityki energetycznej Polski do 2010 roku, w której czytamy: „Za podstawowe kierunki polityki energetycznej kraju Sejm uważa: ... W zakresie elektroenergetyki ... możliwość budowy elektrowni jądrowych wyłącznie przy wykorzystaniu nowych generacji reaktorów zapewniających efektywność ekonomiczną i bezpieczeństwo ekologiczne”. Dokument określający wymagania techniczne, ochrony środowiska, jak również wymagania ekonomiczne nowej (następnej) generacji reaktorów energetycznych, zostały opracowane przez organizacje eksploatujące w krajach Europy elektrownie jądrowe i przedstawione w dokumencie EUR — European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants (European Utility... 1995). Elektrownie jądrowe spełniające wymagania EUR zostały uruchomione w Japonii — ABWR. Opracowywane są nowe konstrukcje reaktorów energetycznych nowej generacji: Westinghouse opracowuje bloki energetyczne z reaktorami AP-600 i AP-1000, Konsorcjum KWU-Siemens i Framatom opracowuje blok energetyczny z reaktorem EPR, firma ABB-Atom i GE prowadzi prace nad blokiem BWR-90 i BWR-90+. W okresie, gdy wystąpi potrzeba budowy w Polsce elektrowni jądrowej, producenci będą mogli dostarczyć jądrowe bloki energetyczne nowej generacji.

Wymagania dokumentu EUR (European Utility... 1995) określają charakterystyki paliwa jądrowego stosowanego w reaktorach energetycznych nowej generacji. Reaktory te powinny być przystosowane do wykorzystania paliwa UO_2 oraz paliwa typu MOX¹, przy czym reaktor powinien być przystosowany do pracy z 50% paliwa MOX. Pluton — ze względu na właściwości neutronowe — nie jest optymalnym paliwem jądrowym reaktorów wodnych, dlatego obiekt wykorzystujący paliwo MOX musi być odpowiednio przystosowany do tego paliwa.

Dokument EUR określa wymagania wielkości wypalenia paliwa jądrowego stosowanego w reaktorach nowej generacji. Zarówno reaktor, jak i paliwo powinno umożliwić osiągnięcie średniego wypalenia co najmniej 55 GWdni/tHM², w przypadku paliwa MOX wypalenie co najmniej 41 GWdni/tHM² (tab. 1).

¹ Paliwo MOX — Mixed Oxygen fuel — paliwo, w którym jest wykorzystywany pluton z przerobu paliwa uranowego.

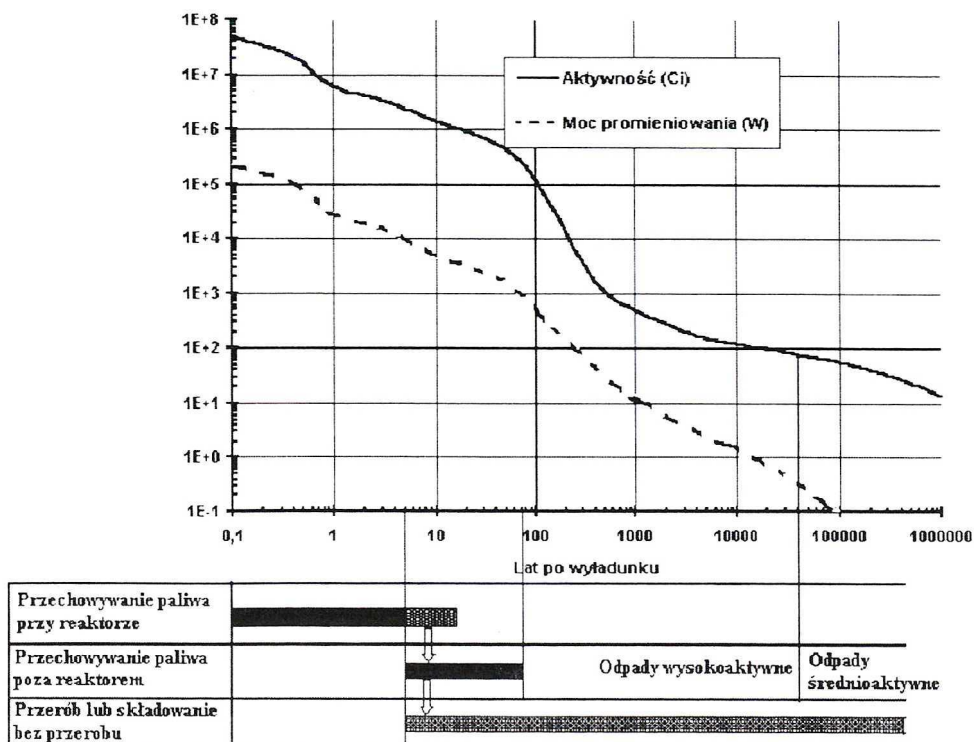
² tHM — tons of Heavy Metal (ton ciężkich metali) oznacza zawartość aktywności w paliwie: w świeżym paliwie uranowym jest to zawartość uranu w paliwie, w świeżym paliwie MOX — zawartość uranu i plutonu, w wypalonym paliwie — zawartość aktywności i pierwiastków o liczbie atomowej Z większej niż 81 (ołów, bizmut, polon, astat, radon) powstających w wyniku rozpadu radioaktywnego aktywności.

Przyjmując efektywność wykorzystania paliwa jądrowego w elektrowni jądrowej 11 600 kJ/kW·h, na produkcję 1 TW·h energii elektrycznej niezbędne jest wytworzenie w reaktorze 134,4 GWdni energii cieplnej. Oznacza to, że do wytworzenia 1 TW·h energii elektrycznej należy wykorzystać około 2,5 tHM w paliwie na bazie dwutlenku uranu lub 3,28 tHM w paliwie MOX.

TABELA 1. Objętość wypalonego paliwa po wytworzeniu 1 TW·h energii elektrycznej [m³]

	PWR	BWR
Paliwo UO ₂	1,25	1,50
Paliwo MOX	1,64	1,97

Wyładowane z reaktora energetycznego paliwo jest źródłem promieniowania jonizującego dużej intensywności oraz związanej z tym promieniowaniem energii cieplnej, dlatego jest ono przechowywane w basenie wodnym, w którym woda stanowi jednocześnie chłodziwo oraz osłonę przed promieniowaniem jądrowym. W miarę upływu czasu po wyładowaniu paliwa z reaktora intensywność promieniowania jądrowego oraz moc wytwarzanej energii cieplnej maleje. Na rysunku 1 przedstawiono zanik aktywności i mocy źródeł ciepła w porcji paliwa, która została



Rys. 1. Zmiany w czasie aktywności i mocy cieplnej przemian jądrowych w porcji wypalonego paliwa, z którego wytworzono 135 GWdni energii cieplnej (1 TW·h energii elektrycznej)

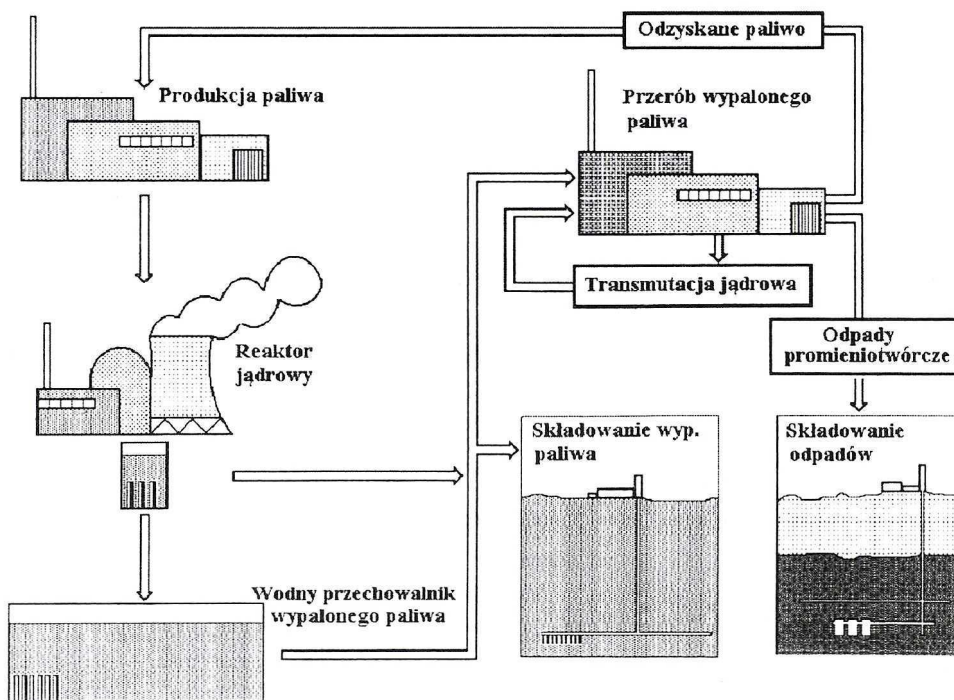
wykorzystana do wytworzenia 1 TW·h energii elektrycznej. Bezpośrednio po wyładowaniu z reaktora w wypalonym paliwie jest generowana moc cieplna 1 MW. Po upływie 5 lat moc cieplna wytwarzana w paliwie zmniejsza się o dwa rzędy wielkości i wypalone paliwo może być transportowane w specjalnych pojemnikach zapewniających odpowiednie chłodzenie paliwa oraz osłonę środowiska i personelu przed promieniowaniem jonizującym. Zgodnie z wymaganiami dokumentu EUR, baseny wodne dla przechowywania wypalonego paliwa przy reaktorze powinny umożliwić przechowywanie paliwa uranowego z 10-letniego okresu eksploatacji reaktora, natomiast paliwa MOX z 15-letniego okresu eksploatacji reaktora.

Po tym okresie wypalone paliwo musi być wywiezione z terenu elektrowni jądrowej. W praktyce światowej wykorzystywane są dwie technologie postępowania z wypalonym paliwem:

1) tzw. otwarty cykl paliwowy, w którym wypalone paliwo jest przeznaczone do składowania — bez przerobu i po odpowiednim zabezpieczeniu — w głębokich formacjach geologicznych; rozwiązanie takie jest przewidziane do stosowania w Szwecji, Kanadzie, Finlandii;

2) tzw. zamknięty cykl paliwowy, w którym paliwo jest przerabiane chemicznie. Odzyskany pluton jest wykorzystany do produkcji — ze świeżym uranem lub uranem odzyskanym z wypalonego paliwa — do wytworzenia paliwa typu MOX; wysokoaktywne odpady powstałe z przerobu wypalonego paliwa i produkcji paliwa MOX poddawane są procesowi zeszkliwiania i przechowywane celem ostatecznego ich składowania w głębokich formacjach geologicznych.

Gospodarka wypalonym paliwem reaktorów energetycznych przedstawiona jest schematycznie na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat gospodarki wypalonym paliwem reaktorów energetycznych

2. Technologie postępowania z wypalonym paliwem reaktorów energetycznych

2.1. Składowanie nieprzerobionego wypalonego paliwa w głębokich formacjach geologicznych

Technologia ta przewiduje składowanie odpowiednio zabezpieczonego wypalonego paliwa w głębokich formacjach geologicznych. Wypalone paliwo, po wyładowaniu z reaktora energetycznego jest przechowywane w basenach wodnych przez kilkadziesiąt lat, okres niezbędny do zmniejszenia generacji ciepła w wypalonym paliwie do poziomu umożliwiającego odbiór ciepła przez materiał formacji geologicznej, w której będzie umieszczone wypalone paliwo. Istnieją również przesłanki ekonomiczne uzasadniające możliwie długie przechowywanie wypalonego paliwa przed jego ostatecznym składowaniem. Ten aspekt technologii będzie przedstawiony poniżej.

W dokumencie EUR (European Utility... 1995) określono wymóg zapewnienia objętości na przechowanie wypalonego paliwa uranowego w obiektach przy reaktorze z 10-letniego okresu eksploatacji reaktora. Jest to basen, który technologicznie może być połączony drogą wodną ze zbiornikiem reaktora w okresie przeładunków paliwa reaktorowego. Basen ten jest umieszczony w szczelnej obudowie reaktora, co ogranicza jego objętość. Po okresie przechowywania w zbiorniku przyreaktorowym, wypalone paliwo powinno być przeniesione do pozareaktorowego przechowalnika wypalonego paliwa. Możliwe są tu dwa rozwiązania: budowa centralnego przechowalnika wypalonego paliwa — tak jak to rozwiązano w Szwecji³ — lub budowa przechowalników poza szczelną obudową reaktora na terenie elektrowni. Do tych rozwiązań opracowane są odpowiednie urządzenia transportowe: pojemniki transportowe, transportery drogowe i specjalne statki do transportu wypalonego paliwa, odpadów promieniotwórczych i materiałów jądrowych.³

Dotychczas na świecie nie zbudowano ani jednego przemysłowego składowiska wypalonego paliwa w głębokich formacjach geologicznych. Fakt ten jest interpretowany przez sceptyków energetyki jądrowej jako brak rozwiązań technicznych w gospodarce wypalonym paliwem w energetyce jądrowej. Nie jest to prawdą, gdyż technologie zamykania elementów paliwowych w pojemnikach oraz technologie umieszczania tych pojemników w głębokich formacjach geologicznych są opracowane. Zbudowane są podziemne laboratoria badawcze, w których analizowane są warunki składowania wypalonego paliwa w głębokich formacjach geologicznych.

Po pierwsze, dopiero po 2000 roku upłynie 40—50-letni okres składowania najstarszego wypalonego paliwa z elektrowni jądrowych, po drugie — jak każde przedsięwzięcie — budowa i eksploatacja składowiska wypalonego paliwa jest poddana rygorom ekonomicznym, z których wynika, że koszt składowania jednostki wypalonego paliwa będzie tym mniejszy, im więcej będzie wypalonego paliwa i im później taka operacja zostanie przeprowadzona. Eksploatator elektrowni pobiera opłatę na gospodarkę wypalonego paliwa w momencie jego wypalania, im

³ Rozwiązanie takie w Szwecji jest możliwe, gdyż zastosowano tu transport morski wypalonego paliwa. Zarówno elektrownie jądrowe, jak i przechowalnik paliwa są zlokalizowane na wybrzeżu morskim i posiadają wyspecjalizowane porty oraz specjalny statek do transportu paliwa. Trudno jest organizować blokadę transportu morskiego.

później zatem zacznie wydawać te fundusze, tym więcej skorzysta na lokatach bankowych i efektywnie operacja ta będzie tańsza. A więc obecna sytuacja odpowiada wszystkim zainteresowanym — sceptycy posiadają argumenty, przeciwnicy organizują protesty, przedsiębiorstwa eksploatujące elektrownie nie inwestują w kosztowne inwestycje na składowisko i składowanie, a naukowcy dostają fundusze na badania. Wszystkie te sytuacje wynikają z faktu, że koszty przechowywania wypalonego paliwa są niewspółmiernie małe w porównaniu z kosztami ostatecznego składowania. Musimy jednak pamiętać, że dopuszczalny okres składowania wypalonego paliwa w okresowych przechowalnikach kończy się w następnym dziesięcioleciu. Prowadzone są prace, których celem jest uruchomienie takich składowisk w okresie 2005—2020.

2.2. Przerób wypalonego paliwa i wykorzystanie plutonu w paliwie typu MOX

Przerób wypalonego paliwa polega na chemicznym wydzieleniu uranu i plutonu, który może być wykorzystany następnie do wytworzenia nowych elementów paliwowych oraz odpowiednim zabezpieczeniu pozostałych aktywności i produktów rozszczepienia (w większości przypadków przez zeszkliwienie). W ten sposób z wypalonego paliwa są oddzielane pierwiastki będące materiałem jądrowym, a pozostałe składniki są traktowane jako wysokoaktywne odpady promieniotwórcze, ale nie będące materiałem jądrowym.

Wydzielony z wypalonego paliwa pluton posiada 80% zawartość Pu-239 i jest po zmieszaniu w odpowiedniej proporcji z paliwem uranowym stosowany jako składnik w paliwie typu MOX. W paliwie tym stosuje się odpowiednią dla kampanii paliwowej mieszaninę UO_2 i PuO_2 . Zawartość plutonu w paliwie typu MOX zazwyczaj jest równa 4,5% (biorąc pod uwagę, że w wyładowanym paliwie zawartość rozszczepialnego izotopu w Pu-239 osiąga 80%, wzbogacenie paliwa w rozszczepialny izotop osiąga ok. 3,5%).

Tylko kilka krajów świata rozporządza przemysłowymi instalacjami przerobu wypalonego paliwa. Instalacje przerobu wypalonego paliwa z reaktorów wodnych (ciśnieniowych i wrzących) posiadają:

- ◆ Francja (La Hague),
- ◆ Wielka Brytania (THORP),
- ◆ Japonia (Tokai i w przyszłości Rokkashomura),
- ◆ Rosja (RT-1 i RT-2).

Wszystkie te zakłady wykorzystują przemysłowo sprawdzoną moką technologię przerobu wypalonego paliwa, tzw. metodę PUREX. Wypalone paliwo jest mechanicznie rozdrobniane i oddzielone od materiałów konstrukcyjnych (koszulek, elementów kaset paliwowych itp.). Sam materiał paliwa jest rozpuszczany we wrzącym kwasie azotowym. W procesie tym powstaje wodny roztwór soli azotanowych. Za pomocą roztworu trójbutylofosforanu w rozcieńczalnikach parafinowych przeprowadza się ekstrakcję uranu i plutonu z wodnego roztworu soli azotanowych. Uran i pluton przechodzą do fazy organicznej, natomiast produkty rozszczepienia pozostają w fazie wodnej. Za pomocą odpowiednich urządzeń ekstrakcyjnych (mieszalnik — odstojnik, kolumny pulsacyjne, ekstraktory wirówkowe) następuje oddzielenie fazy organicznej od fazy wodnej.

W kolejnych stopniach przerobu przeprowadza się ekstrakcję plutonu, a następnie uranu, poprzez płukanie fazy organicznej rozcieńczonym kwasem azotowym. Najszybciej rozpuszcza się w kwasie azotowym pluton tworząc azotan plutonu i azotan uranylu. Poszczególne fazy procesu są powtarzane wielokrotnie, aby uzyskać produkt końcowy o wysokim stopniu czystości.

Otrzymany azotan plutonu jest przerabiany na dwutlenek plutonu. Azotan uranylu jest przerabiany na sześćiofluorek uranu. W takim stanie materiały te są gotowe do produkcji paliwa. Zakłady wytwarzające paliwo MOX działają w Belgii, Francji, Niemieckiej Republice Federalnej, Japonii i Wielkiej Brytanii.

Jako odpad promieniotwórczy w procesie przerobu wypalonego paliwa otrzymuje się roztwór produktów rozszczepienia w kwasie azotowym. Po odzysku kwasu azotowego i odparowaniu wody powstaje koncentrat zawierający azotany produktów rozszczepienia. Przy przerobie wypalonego paliwa, po 5-letnim okresie schładzania po wyładunku z reaktora ocenia się, że aktywność produktów rozszczepienia zawartych w odpadach po przerobie porcji paliwa, z której uzyskano 1 TW·h energii elektrycznej wynosi około 250 kCi. Odpady te zajmują objętość około 250 dcm³ i ważą około 600 kg. Są to odpady zakwalifikowane do kategorii **wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych generujących znaczne ilości ciepła**. Odpady te są obecnie przechowywane w przechowalnikach, aby w przyszłości, po odpowiednim zabezpieczeniu mogły być umieszczone w głębokich formacjach geologicznych.

Oprócz zeszkliwionych, wysokoaktywnych odpadów zawierających produkty rozszczepienia, w procesie przerobu wypalonego paliwa, z którego wytworzono 1 TW·h energii elektrycznej pozostaje:

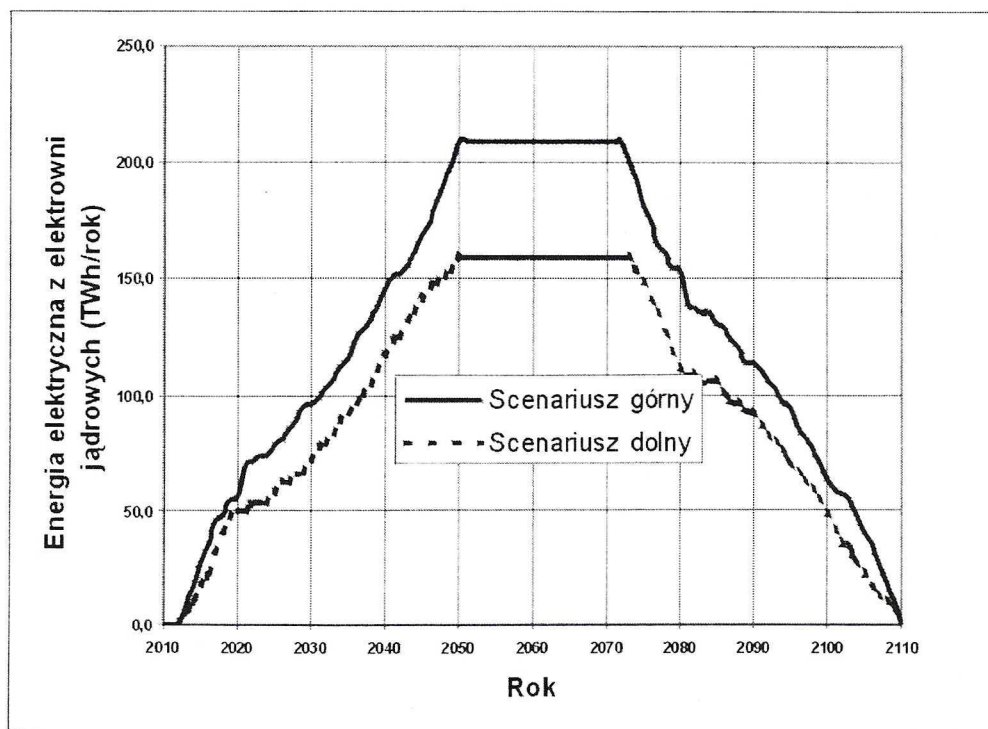
- ◆ około 2,4 tony uranu, z około 1-procentową zawartością U-235 o aktywności kwalifikującej ten materiał jako odpad średnioaktywny, jednak ze względu na wytwarzane promieniowanie alfa oraz kontaminację plutonem jest traktowany jako odpad wysokoaktywny, przeznaczony do składowania w głębokich formacjach geologicznych. Planuje się powtórne wykorzystanie uranu z przerobu w produkcji paliwa MOX. W tym przypadku do zagospodarowania jako odpad pozostaje około 900 kg uranu;
- ◆ około 800 kg cyrkonu z układu konstrukcji kaset paliwowych. Ze względu na wysoką aktywność, substancja ta również jest zaliczana do wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych i jest przeznaczona do składowania w głębokich formacjach geologicznych. Rozważa się recykling cyrkonu i jego wykorzystanie do wytwarzania paliwa MOX, jednakże, ze względu na trudności przy obróbce materiałów aktywnych recykling cyrkonu nie jest stosowany.

Przy okazji przerobu wypalonego paliwa i stosowania w paliwie MOX otrzymanego plutonu, należy wspomnieć o procesach transmutacji jądrowej, w których zamierza się w znacznej mierze zmniejszyć ilość i aktywność odpadów promieniotwórczych uzyskiwanych przy produkcji energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych. Zasadą transmutacji jest wykorzystanie reakcji jądrowych wywoływanych neutronami, a także innymi cząstkami jądrowymi w celu przekształcenia długożyciowych izotopów promieniotwórczych znajdujących się w wypalonym paliwie, w krótkożyciowe lub stabilne izotopy promieniotwórcze. Takim procesem transmutacji jest „spalanie” plutonu w reaktorze jądrowym, w którym długożyciowe, niezwykle toksyczne izotopy plutonu zostają zamienione na produkty rozszczepienia rozpadające się po kilkuset latach składowania. Podobnie rozważa się zastosowanie procesów transmutacji do innych substancji radioak-

tywnych znajdujących się w wypalonym paliwie, wykorzystując reaktorowe układy podkrytyczne z akceleratorami cząstek jako spallacyjnymi źródłami neutronów. Jednakże do zastosowania przemysłowego tej technologii pozostaje długa droga.

3. Ekonomia gospodarki wypalonym paliwem reaktorów energetycznych

Analizy kosztów gospodarki wypalonym paliwem reaktorów energetycznych w Polsce zostały przeprowadzone dla opracowanych w PSE S.A. i Instytucie Energetyki scenariuszy rozwoju zapotrzebowania na energię elektryczną wytworzoną z paliw jądrowych do 2050 roku (Kwiatkowski 1997; Jastrzębski i in. 1998). W wyniku przeprowadzonych analiz, uwzględniając tendencje zmian cen różnych surowców energetycznych, możliwości ich zakupu oraz wzrastające wymagania ochrony środowiska, oceniono, że zapotrzebowanie na dostawę energii elektrycznej z elektrowni jądrowych wystąpi w Polsce w 2013 roku i osiągnie w roku 2050 poziom 156 TW·h rocznie w scenariuszu dolnym i 210 TW·h rocznie w scenariuszu górnym. Uzyskana zależność jest zilustrowana wykresem przedstawionym na rysunku 3 w zakresie do 2050 roku. Ponieważ wiarygodność prognoz zapotrzebowania na energię elektryczną w horyzoncie czasowym ponad 50-letnim jest niewielka, jak również mogą się pojawić nowe, nieznane obecnie źródła energii



Rys. 3. Wykres produkcji energii elektrycznej w systemie elektrowni jądrowych przewidzianych do uruchomienia w Polsce do 2050 roku dla scenariusza dolnego i górnego

i surowce energetyczne, dalszą prognozę produkcji energii w elektrowniach jądrowych utworzono przyjmując następujące założenia (Chwaszczewski i in. 1997):

- ◆ analizą objęto system elektrowni jądrowych uruchomionych do 2050 roku;
- ◆ czas pracy każdej elektrowni jądrowej jest równy 60 lat. Po tym okresie następuje wyłączenie elektrowni jądrowej z eksploatacji.

Uzyskany w taki sposób wykres rocznej produkcji energii elektrycznej w tak zdefiniowanym systemie elektrowni jądrowych jest przedstawiony na rysunku 3. Wytworzona w tym systemie elektrowni jądrowych energia elektryczna wynosi około 9500 TW·h w scenariuszu dolnym i 12 500 TW·h w scenariuszu górnym. Dla porównania, dotychczas wytworzona w Polsce energia elektryczna nie przekracza wielkości 4000 TW·h.

W prognozach kosztów gospodarki wypalonym paliwem przeanalizowano dwa warianty:

- 1) składowanie wypalonego paliwa bez przerobu w głębokich formacjach geologicznych,
- 2) przerób wypalonego paliwa, wykorzystanie plutonu do wytworzenia paliwa MOX, a następnie składowanie wypalonego paliwa MOX w głębokich formacjach geologicznych oraz przechowywanie i składowanie odpadów radioaktywnych powstałych przy przerobie wypalonego paliwa i produkcji paliwa MOX.

W wariantcie 1 przeanalizowano dwie opcje postępowania:

- ◆ budowy centralnego przechowalnika wypalonego paliwa o pojemności 5000 tHM, a po jego zapelnieniu rozpoczęcie procesu ostatecznego składowania w głębokich formacjach geologicznych,
- ◆ budowy kolejno trzech przechowalników wypalonego paliwa o pojemności 5000 tHM każdy, uruchomienie procesu składowania w głębokich formacjach geologicznych dopiero po zapelnieniu tych trzech przechowalników.

W przeprowadzonych analizach uwzględniono koszty: budowy i eksploatacji przechowalników wypalonego paliwa, transportu, budowy zakładu zamykania wypalonego paliwa w pojemnikach przeznaczonych do ostatecznego ich składowania, budowy składowiska w głębokich formacjach geologicznych, zamykania paliwa w pojemnikach i ich składowania, zamknięcia składowiska, likwidacji zakładu zamykania paliwa w pojemnikach oraz likwidacji przechowalników wypalonego paliwa.

W wariantcie 2 przyjęte rozwiązania i okres ich realizacji wynikały z technologii procesu przerobu wypalonego paliwa. Założono 5-letni okres przechowywania wypalonego paliwa w przyreaktorowych przechowalnikach, następnie przewóz wypalonego paliwa do zakładu przerobu (poza granicami Polski), przerób, wytworzenie paliwa MOX, transport paliwa MOX do Polski, transport do Polski odpadów, gospodarka wypalonym paliwem MOX (przechowalnik 5000 tHM), następnie zamykanie w pojemnikach paliwa MOX i jego składowanie w głębokich formacjach geologicznych, a także, do czasu uruchomienia składowiska, przechowywanie wysokoaktywnych, zeszkliwionych odpadów promieniotwórczych, radioaktywnego uranu i cyrkonu, które po odpowiednim zabezpieczeniu będą również składowane w głębokich formacjach geologicznych. Wiąże się to z koniecznością budowy, eksploatacji i następnie likwidacji odpowiednich przechowalników. Po zakończeniu eksploatacji wszystkie obiekty zostaną zlikwidowane, co uwzględniono w odpowiednich kosztach.

Analizy ekonomiczne przeprowadzono przy założeniu trzech stóp dyskonta: 0, 5 i 10%. Wykorzystano znaną relację umożliwiającą wyznaczenie zdyskontowanych kosztów określonej składowej w kosztach wytworzenia produktu:

$$K = \frac{\sum_{i=0}^{i=m} \frac{E_i}{(1+p)^i}}{\sum_{i=0}^{i=n} \frac{P_i}{(1+p)^i}}$$

gdzie: E_i — nakłady na rozpatrywaną działalność w i -tym roku,
 P_i — wytworzona w i -tym roku energia elektryczna w systemie elektrowni jądrowych,
 $i = 0$ — rok rozpoczęcia eksploatacji elektrowni jądrowej,
 $i = m$ — rok zakończenia wszelkiej działalności związanej z gospodarką wypalonym paliwem,
 $i = n$ — rok zakończenia eksploatacji elektrowni jądrowej,
 p — stopa dyskonta.

Analizy przeprowadzono dla poziomu cen 1998 roku przy przeliczniku 1 USD = 3,5 zł w odniesieniu do sprzedanej energii elektrycznej zakładając, że 15% wytworzonej energii jest wykorzystane na potrzeby własne oraz straty przy przesyłaniu. W analizie wariantu przerobu wypalonego paliwa uwzględniono również oszczędność w kosztach zakupu paliwa uranowego, które zostało zastąpione paliwem MOX. Wyniki przeprowadzonych na podstawie danych literaturowych (Bairiot, Vandenberg 1989; Central Interim...; Chantoin, Finucane 1993; Chwaszczewski 1997; Cost analysis... 1994; Jones 1987; Kunsh, Van Steenberghe, Decreasing 1987; Nuclear energy... 1993) analiz przedstawiono w tabeli 2.

TABELA 2. Zdyskontowane koszty gospodarki wypalonym paliwem wytworzenia 1 kW·h energii elektrycznej [zł]

Stopa dyskontowa	Scenariusz dolny			Scenariusz górny		
	0%	5%	10%	0%	5%	10%
Reaktory LWR bez przerobu wypalonego paliwa						
Wariant z 1 przechwalnikiem	3,345	3,314	2,917	3,431	3,512	2,964
Wariant z 3 przechwalnikami	4,652	2,113	2,128	4,291	2,239	1,823
Reaktory LWR z MOX						
Bez uwzględnienia oszczędności uranu	11,866	10,178	9,654	11,540	10,107	9,432
Z oszczędnością uranu	8,839	7,558	7,426	8,513	7,486	7,205

Oczywiście, przedstawione wyniki można traktować tylko jako oszacowania. Jednakże, na ich podstawie mogą być sformułowane pewne wnioski:

1. Koszt gospodarki wypalonym paliwem reaktorów energetycznych stanowi niewielką część kosztów wytworzenia energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych. Przy poziomie kosztów wytworzenia 1 kW·h w elektrowniach jądrowych na poziomie 0,02—0,04 USD (0,07—0,14 zł) koszty gospodarki wypalonym paliwem stanowią 3—6% w cyklu otwartym i 7—10% w cyklu zamkniętym przy wykorzystaniu paliwa MOX. Przy zwiększaniu stopy dyskonta kapitału koszt gospodarki wypalonym paliwem zmniejsza się.

2. Przy obecnych cenach paliwa jądrowego nieopłacalny jest przerób wypalonego paliwa. Zysk na zamianie paliwa uranowego paliwem MOX nie kompensuje nakładów na przerób wypo-

lonego paliwa uranowego, składowanie wypalonego paliwa MOX oraz wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych powstałych w wyniku przerobu.

3. Już przy stopie dyskonta 5% opłaca się możliwie długo przetrzymywać wypalone paliwo w przechowalnikach (nawet ponosząc nakłady na ich budowę, eksploatację i likwidację), tak aby opóźnić konieczność budowy składowiska wraz z zakładem zamykania wypalonego paliwa w pojemnikach oraz zgromadzić możliwie dużą ilość wypalonego paliwa i przeprowadzić proces składowania w możliwie krótkim czasie.

W opracowaniu wykonanym przez Chwaszczewskiego i in. na zlecenie Państwowej Agencji Atomistyki przeprowadzono również ocenę kosztów składowania odpadów promieniotwórczych powstałych w wyniku eksploatacji i likwidacji zdefiniowanego powyżej systemu elektrowni jądrowych. Koszt gospodarki odpadami promieniotwórczymi kształtuje się na poziomie 1 zł/MW·h, natomiast koszt likwidacji elektrowni jądrowej w przeliczeniu na 1 MW·h wytworzonej energii elektrycznej silnie zależy od stopy dyskonta i jest przedstawiony w tabeli 3. Koszt likwidacji elektrowni jądrowych w odniesieniu do sprzedanej energii elektrycznej nie zależy od wielkości systemu.

TABELA 3. Zdyskontowane koszty likwidacji elektrowni jądrowych na 1 MW·h wytworzonej energii elektrycznej [zł]

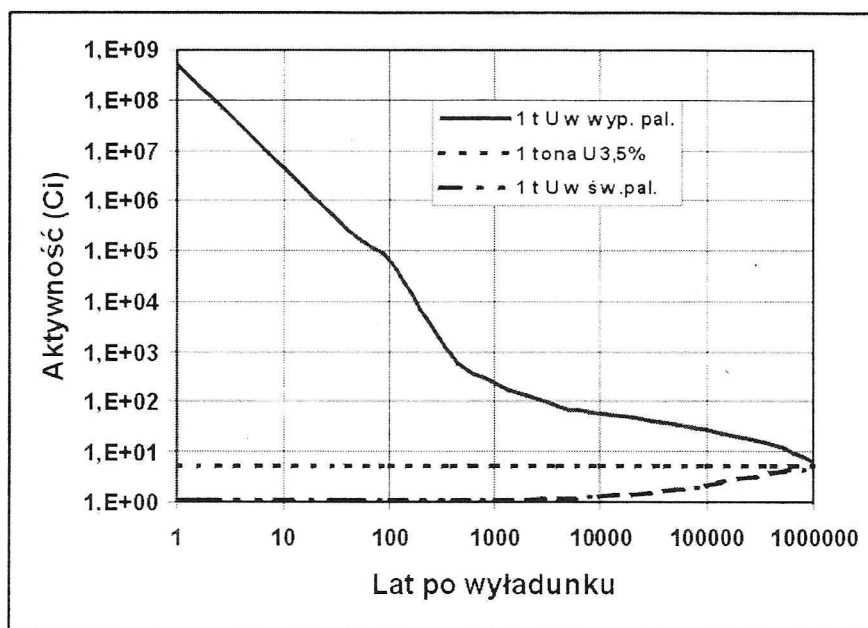
Stopa dyskontowa	0%	5%	10%
Koszt [zł/MW·h]	2,304	0,214	0,014

3.1. Wypalone paliwo w środowisku

Przedstawione na rysunku 1 wykresy są deprymujące. Wypalone paliwo zachowuje wysoką aktywność przez okres setek tysięcy lat! Jednakże, gdy porównamy aktywność wypalonego paliwa z naturalną aktywnością uranu zastosowanego do jego wytworzenia — uranu, który znajduje się przecież w środowisku naturalnym, obraz zmienia się zasadniczo. Na rysunku 4 przedstawiono wykres zmian aktywności wypalonego paliwa oraz aktywność uranu wykorzystanego do wytworzenia tego paliwa, wyznaczone za pomocą programu ORIGEN (Bell 1973; Croff 1983).

Jak wynika z przedstawionego wykresu, po 1000-letnim okresie składowania wypalonego paliwa jego aktywność jest porównywalna z aktywnością uranu wykorzystanego do jego wytworzenia. A przecież ten uran został wydobyty ze środowiska naturalnego.

Sceptycy wykorzystania energetyki jądrowej twierdzą, że uran w środowisku naturalnym znajduje się w głębokich formacjach geologicznych i jest przez naturę doskonale zabezpieczony. Nie jest to pełna prawda. Wydobywając węgiel wydobywamy i uran znajdujący się w tym surowcu w ilości od 2 do 7 gramów w tonie. Wydobyte 400 000 ton węgla (a taka ilość jest potrzebna do wytworzenia 1 TW·h energii elektrycznej) wydobywamy od 0,8 do 2,8 tony uranu, a więc ilość porównywalną z uranem niezbędnym do wytworzenia 1 TW·h energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych. Stąd się przecież biorą radioaktywne wody kopalniane, radon w kopalniach itp. Technologie zabezpieczenia wypalonego paliwa są jednak bardziej wyrafinowane niż technologie zabezpieczenia popiołów i pyłów elektrownianych, nie mówiąc już o hałdach kopalnianych.

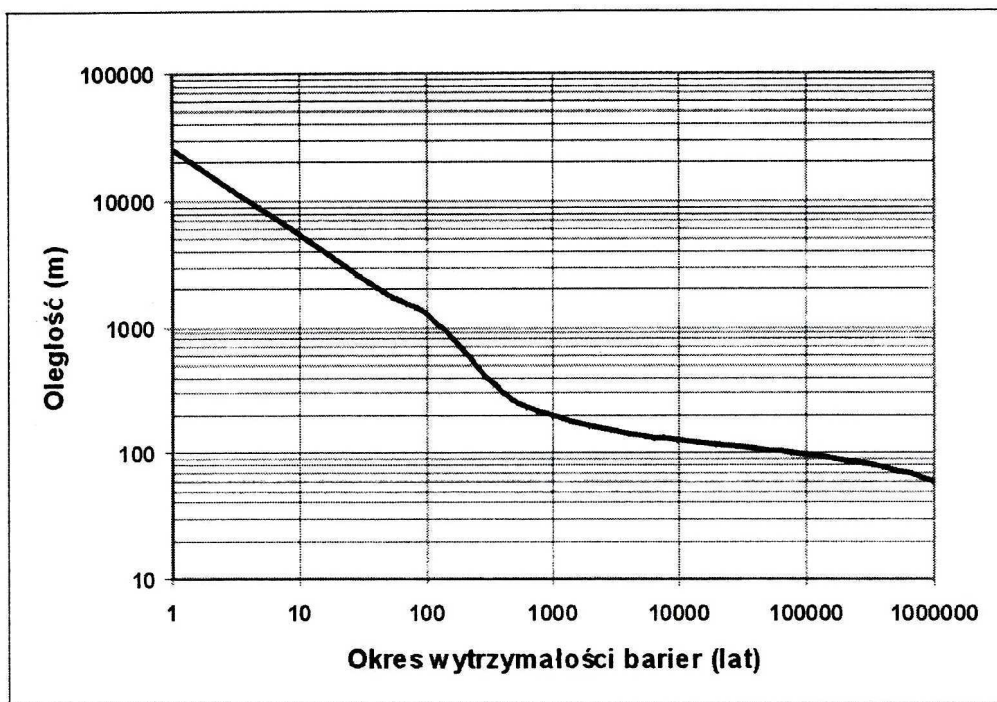


Rys. 4. Zanik aktywności tony uranu o wzbogaceniu 3,5%, w którym wytworzono 30 GWdni energii cieplnej w porównaniu z toną uranu o wzbogaceniu 3,5% powstającym w równowadze z produktami rozpadu* oraz jednej tony czystego uranu, który w procesie składowania wytwarza produkty rozpadu

* Uran w procesie rozpadu wytwarza szereg izotopów promieniotwórczych, tzw. szereg promieniotwórczy uranu. Dlatego aktywność całego szeregu promieniotwórczego uranu jest siedmiokrotnie większa niż czystego uranu

Oprócz uranu, w środowisku naturalnym znajdują się również i inne izotopy promieniotwórcze, takie jak potas (^{40}K) i tor. Według Strzeleckiego i in. (1994), średnio w Polsce, na powierzchni, w jednej tonie gleby znajduje się 0,8 gramów radioaktywnego potasu, 3,3 grama toru i 1,36 grama uranu. Promieniowanie tych izotopów powoduje, że mieszkaniec Polski jest poddany promieniowaniu naturalnemu i średnio w roku otrzymuje dawkę promieniowania 1,5 mSv (50% globalnej dawki 3,05 mSv) (Mały Rocznik... 1994). Przyjmując, że kryterium składowania wypalonego paliwa jest takie, aby jego aktywność po okresie gwarantowanej wytrzymałości barier inżynierskich była równa aktywności naturalnych izotopów w sześciennym bryle gleby o określonych wymiarach, można wyznaczyć charakterystyczne odległości pomiędzy składowanymi pojemnikami z wypalonym paliwem. Na rysunku 5 przedstawiono wykres zależności charakterystycznych wymiarów, które powinny być zachowane przy składowaniu 1 tHM w paliwie o wypaleniu 30 MWdni/tHM. Jak wynika z wykresu, decydującym okresem składowania wypalonego paliwa przy takim kryterium jest okres 1000 lat, w którym powinna być zapewniona trwałość barier inżynierskich. Doświadczenia inżynierskie oraz wykopaliska archeologiczne potwierdzają taką możliwość. Zwiększanie trwałości barier inżynierskich ponad 1000 lat nie przynosi większego efektu w określeniu warunków składowania.

Przedstawiona na rysunku zależność jest wyznaczona dla średniej zawartości izotopów promieniotwórczych na powierzchni gleby w Polsce. W okolicy Wałbrzycha wartości te osiągają poziom 7 gramów uranu i 10 gramów toru na tonę gleby. W tym przypadku warunki składowania wypalonego paliwa mogą być jeszcze łagodniejsze.



Rys. 5. Zależność charakterystycznej odległości od okresu wytrzymałości pojemnika z 1 toną HM w wypalonym do poziomu 30 GWdni paliwie jądrowym

I jeszcze jedna uwaga. Sceptycy wykorzystania energetyki jądrowej twierdzą, że wykorzystanie uranu do wytwarzania energii elektrycznej powoduje wytworzenie odpadów promieniotwórczych, zwiększających bilans radioaktywności środowiska. Nic bardziej mylącego. **Wykorzystanie uranu w reaktorach zmniejsza bilans radioaktywności środowiska!**

Do wytworzenia 1 T·Wh energii elektrycznej niezbędne jest rozszczepienie około 140 kg uranu (lub pochodnych uranu, w tym plutonu uzyskiwanego z U-238). Uran jest pierwiastkiem radioaktywnym i przy rozpadzie jednego atomu uranu jest wytwarzana energia promieniowania średnio 48,5 MeV (uwzględniając U-235 i U-238). Rozpad 140 kg uranu powoduje wytworzenie energii $2,638 \cdot 10^6$ GJ. Natomiast energia rozpadu wytworzonych w procesie rozszczepienia wymienionej powyżej ilości uranu produktów po wyładowaniu z reaktora (gros krótkożyciowych produktów rozszczepienia rozpada się w trakcie eksploatacji paliwa w reaktorze) wynosi $6,02 \cdot 10^3$ GJ, a energia rozpadu wytworzonych w procesie pracy reaktora aktywności wynosi $1,2 \cdot 10^5$ GJ. **W rezultacie, wytwarzając w reaktorze jądrowym energię elektryczną 1 TW·h ($1,1 \cdot 10^7$ GJ energii cieplnej), zmniejsza się bilans energii promieniowania w środowisku o $2,5 \cdot 10^6$ GJ!** Oczywiście, aktywność wyładowanego z reaktora wypalonego paliwa jest w okresie tysięcy lat większa niż aktywność bardzo wolno rozpadającego się uranu (dzięki czemu istnieje on jeszcze w przyrodzie). Jednakże w perspektywie milionów lat bilans tej operacji jest wyraźnie korzystny.

Podsumowanie

Przeprowadzone analizy pokazują, że technologie gospodarki wypalonym paliwem reaktorów jądrowych są w chwili obecnej dopracowane w stopniu zapewniającym bezpieczeństwo ludzi i środowiska. Brak działającego przemysłowo finalnego składowiska wypalonego paliwa i wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych nie wynika z braku technologii, ale raczej z przyczyn ekonomicznych. Wykorzystanie uranu w reaktorach jądrowych prowadzi do redukcji bilansu energii promieniowania jonizującego w środowisku.

Literatura

- BAIRIOT H., VANDENBERG C., 1989 — Use of MOX fuels. Nuclear Fuel Cycle in the 1990s and Beyond the Century: Some trends and Foreseeable Problems. IAEA Technical Report 305. Vienna.
- BELL M.J., 1973 — ORIGEN — the ORNL Isotope generation and depletion code. ORNL 4628, May. Central Interim Storage Facility for Spent Nuclear Fuel — CLAB. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- CHANTON P.M., FINUCANE J., 1993 — Plutonium as an energy source: Quantifying the commercial picture. IAEA Bulletin Vol. 35. No 3. September 1993, s. 38.
- CHWASZCZEWSKI S., 1997 — Koszty wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni jądrowej. Materiały XI Konferencji z cyklu: Zagadnienia surowców energetycznych w gospodarce krajowej, Zakopane 5—8 październik, s. 43.
- CHWASZCZEWSKI S. i in., 1998 — Analiza wariantowa bilansów unieszkodliwiania i składowania odpadów promieniotwórczych oraz wypalonego paliwa z reaktorów jądrowych nowej generacji (w przypadku podjęcia programu jądrowego w Polsce) w latach 2010—2100. Opracowanie wykonane na zlecenie Państwowej Agencji Atomistyki w ramach Strategicznego Programu Rządowego „Gospodarka odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem w Polsce”.
- Cost analysis methodology of spent fuel storage. IAEA Technical Report Series. No 361. Vienna 1994.
- CROFF G., 1983 — ORIGEN 2 a versatile computer code for calculating the nuclide compositions and characteristics of nuclear materials. Nuclear Technology V. 62 September 1983 s. 335.
- European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants. A document produced by DTN, Electricite de France, ENEL SpA, KEMA Nederland BV, Nuclear Electric, Tractebel and Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke. Revision B. November 1995.
- JASTRZĘBSKI A., KROCHMAŁSKI R., STANKIEWICZ S., 1998 — Rozwój podsystemu wytwarzania energii elektrycznej w horyzoncie 2050 roku z punktu widzenia perspektywy zapotrzebowania na jądrowe źródła energii. Warszawa luty 1998 r. Opracowanie wykonane na zlecenie Instytutu Energii Atomowej w ramach Strategicznego Programu Rządowego „Gospodarka odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem w Polsce”.
- JONES P.M.S., 1987 — The economics of the back end of the nuclear fuel cycle. Back End of the Nuclear Fuel Cycle: Strategies nad options. Proceedings of a Symposium, Vienna, 11—15 may 1987 IAEA, Vienna, s. 223.
- KUNSH P.L., VAN STEENBERGHE T.J., DECESSING A., 1987 — A multicriteria study on LWR fuel management in countries of the European Economics Community. Back End of the Nuclear Fuel Cycle: Strategies nad options. Proceedings of a Symposium, Vienna, 11—15 may, IAEA, Vienna, s 143.
- KWIATKOWSKI M., 1997 — Scenariusz rozwoju energetyki jądrowej w Polsce do 2020 roku. Warszawa, grudzień 1997 r. Opracowanie wykonane na zlecenie Instytutu Energii Atomowej w ramach Strategicznego Programu Rządowego „Gospodarka odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem w Polsce”.

Mały Rocznik Statystyczny, 1994 s. 40.

Nuclear energy and its fuel cycle in Japan: Closing the circle. IAEA Bulletin Vol. 35. No 3. September 1993, s. 34.

STRZELECKI R., WOŹKOWICZ S., SZEWCZYK J., LEWANDOWSKI P., 1994 — Mapa radioekologiczna Polski. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.

Streszczenie

Przeprowadzone analizy zbilansowania podaży i popytu na energię elektryczną w Polsce wskazują na konieczność wykorzystania po około 2020 roku jądrowych surowców energetycznych. Dążenie do zrównania poziomów życia społeczeństwa Polski ze społeczeństwami sąsiednich krajów Unii Europejskiej wymusi wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną. Kraj nasz nie będzie obszarem wykorzystania niespotykanych w innych krajach energooszczędnych technologii. Jednocześnie rosnące koszty wydobycia krajowego węgla przy rosnących wymaganiach ochrony środowiska wymuszą stosowanie czystych ekologicznie surowców energetycznych: gazu i paliw jądrowych. Uniezależnienie się od dostawców gazu i zmian cen tego surowca wymusi poważne rozważenie opcji energetyki jądrowej. Biorąc pod uwagę te aspekty, przeprowadzone w 1997 roku przez PSE SA i Instytut Energetyki analizy określiły zapotrzebowanie na produkcję energii elektrycznej z elektrowni jądrowych w 2050 roku w Polsce na 158 TW·h rocznie w scenariuszu dolnym i 209 TW·h rocznie w scenariuszu górnym. Wytworzenie takiej ilości energii elektrycznej wymaga uruchomienia elektrowni jądrowych o mocy 22 GW w scenariuszu dolnym i 29 GW w scenariuszu górnym. Zakładając 60-letni okres eksploatacji tych elektrowni jądrowych oraz współczynnik wykorzystania 85%, przeprowadzono analizy gospodarki wypalonym paliwem z tych reaktorów. Zgodnie z dokumentem EUR (European Utility... 1995) założono wykorzystanie w Polsce reaktorów wodnych nowej generacji, z wypaleniem paliwa uranowego do 55 GWdni na tonę uranu i 50 GWdni na tonę HM w paliwie MOX, z możliwością wykorzystania w reaktorze do 50% załadunku paliwa MOX. Przeanalizowano opcję składowania wypalonego paliwa w przechowalnikach, a następnie ich ostateczne składowanie w głębokich formacjach geologicznych. Przeanalizowano również opcję przerobu wypalonego paliwa i wykorzystania odzyskanego plutonu w paliwie MOX. Zakładając stały poziom cen przeprowadzono oszacowania kosztów gospodarki wypalonym paliwem w obu opcjach przy stopie dyskonta 0,5 i 10% w przeliczeniu na 1MW·h sprzedanej energii elektrycznej (wykorzystanie na potrzeby własne i poziom strat w sieci — 15%). Koszt gospodarki wypalonym paliwem bez przerobu wynosi od 2 do 4 zł/MW·h, natomiast w opcji przerobu wypalonego paliwa od 8 do 12 zł/MW·h (poziom cen 1998 rok). Wykazano, że wzrost stopy dyskonta prowadzi do zmniejszenia kosztów gospodarki wypalonym paliwem reaktorów energetycznych. W referacie przedstawiono wyniki analiz radioaktywności, energii promieniowania oraz radiotoksyczności wypalonego paliwa w porównaniu z naturalnymi pierwiastkami radioaktywnymi znajdującymi się w środowisku. Wykazano, że po 1000-letnim okresie „studzenia” wypalonego paliwa wielkości te są zbliżone do odpowiednich parametrów promieniowania naturalnego środowiska. Wykazano także — wbrew rozpowszechnionej opinii — że wykorzystanie uranu w reaktorze jądrowym zmniejsza bilans radioaktywności środowiska.

The management of the spent fuel from power reactors — technologies, economy and environment

KEY WORDS: nuclear reactor, nuclear fuel, Mox fuel, nuclear power plant, uranium

Summary

The analyses of the electric energy balance pursued in Poland show that after the year 2020 there will be necessity to use the nuclear fuel. The trend of the Polish society to achieve the living standard equivalent to the neighbouring EU country will cause an increase in demand of electric energy in Poland. It will be rather a small chance for applying in this country some extraordinary saving technologies. On the other hand, the rising cost of domestic coal production with increasing requirement of environmental protection in Europe will force applying the environmentally friendly energy raw materials — natural gas and nuclear fuel. To be independent on fuel supplier and on increase of fuel price one has to examine the nuclear power option in Poland. Taking into account these conditions the forecast for electricity consumption and nuclear fuel share for electricity production up to 2050 by Polish Electric Grid Company and Institute of Power Engineering have been performed. The nuclear power component in 2050 was estimated to be 158 TW·h per year in the lower scenario and 209 TW·h in upper scenario. The power to be installed is 22 GW in lower scenario and 29 GW in upper one. Assuming, that the life time of a new generation nuclear power plant will be 60 years and load factor 85% the management of spent fuel was analysed. In compliance with the European Utility Requirements for LWR Power Plant it has been assumed, that the new generation power plant with LWR reactor and the burnup 55 GWdays/tonne uranium fuel and 50 GWdays/tonne HM for the MOX fuel will be used in Poland. There can be utilised up to 50% of the MOX fuel in the power reactor fuel cycle. The analysis was performed for the open back end fuel cycle with various volume of the interim spent fuel storage. The closed fuel cycle was analysed for the fuel reprocessing, MOX fuel production and deep geological disposal of HLW (from reprocessing), MOX spent fuel as well as uranium and cerium from reprocessing procedure. The costs of open and closed spent fuel cycle management for discount rate 0%, 5% and 10% in constant prices in conversion to 1 MW·h of the sold energy were established. It was shown, that the cost of spent fuel management in open fuel cycle is between 2 and 4 zł per 1 MW·h of sold electric energy and for closed cycle from 8 to 12 zł per 1 MW·h of sold electric energy (it was assumed, that 15% of electricity production in NPP is used for internal use and grid losses). It was shown, that increase of the discount rate leads to decreasing spent fuel management costs. The analysis of the radioactivity, energy of radiation and radiotoxicity of spent fuel in comparison with natural radioactive elements was performed. It is shown, that after 1000 years deferral period the radiation parameters of the spent fuel are close to the environmental radiation. On the contrary to the widespread feeling it was shown, that the use of uranium in nuclear reactors decreased the radioactivity balance of the earth.