

Stefan CHWASZCZEWSKI*

Technologie energetyki jądrowej w XXI wieku

STRESZCZENIE. Wzrastające zapotrzebowanie świata na energię, a w szczególności na energię elektryczną wymaga rewizji technologii energetyki jądrowej, jako perspektywicznego źródła energii. W tym kontekście niniejsza publikacja przedstawia analizę, na ile energetyka jądrowa wpisuje się w cele zrównoważonego rozwoju oraz jaki może mieć udział w nim. Jakkolwiek obecne reaktory na neutronach termicznych mogą pokryć zapotrzebowanie na energię w horyzoncie wielu dziesiątków lat, jednakże długoterminowe potrzeby mogą być pokryte poprzez wprowadzenie do systemów energetyki jądrowej innowacyjnych technologii, włączając reaktory powielające. Ważnym celem rozwoju innowacyjnych systemów energetyki jądrowej powinna być ochrona środowiska, efektywność wykorzystania zasobów paliw jądrowych jak również aspekt socjalno – polityczny, jakim jest proliferacja.

SŁOWA KLUCZOWE: energetyka jądrowa, reaktory energetyczne, reaktory powielające, uran, tor

Wprowadzenie

Rozwój ekonomiczny społeczeństw i związany z nim rozwój technologii charakteryzuje się coraz większym zapotrzebowaniem na energię i surowce energetyczne umożliwiające wytworzenie tej energii. Zasoby surowców energetycznych stały się surowcami strategicznymi, do których dostępność umożliwia utrzymanie określonego poziomu życia, a w rozwijających się społeczeństwach warunkuje ich rozwój ekonomiczny.

* Prof. dr hab. — Instytut Energii Atomowej POLATOM, Otwock-Świerk; e-mail: sch@cyf.gov.pl

Dlatego XXI wiek charakteryzuje się dążeniem społeczeństw do zapewnienia sobie dostępu do zasobów paliw i energii. Nierównomierny rozkład zasobów surowców energetycznych – w większości przypadków poza największymi konsumentami energii – oraz dążenie słabo rozwiniętych krajów do zrównania poziomu życia z rozwiniętymi krajami świata, będzie powodować rozwinięcie rywalizacji o dostęp do energii i surowców energetycznych. W tej sytuacji ważnym przesłaniem jest promowanie zrównoważonego zarządzania surowcami energetycznymi i ich efektywnego wykorzystania.

Trzeba sobie zdać sprawę z ograniczoności światowych zasobów kopalnych surowców energetycznych, wykorzystywanych w obecnie stosowanych technologiach. Współczesne technologie przetwarzania surowców energetycznych na energię użyteczną (finalną) charakteryzują się znacznym okresem czasu, jaki jest poświęcany na odpowiednie techniczne dopracowanie technologii i osiągnięcie przez nią konkurencyjności w gospodarce rynkowej. Jednocześnie, okres wykorzystania obiektów wynosi kilkadziesiąt lat: np. elektrowni węglowych około 40 lat, elektrowni jądrowych – 60 lat. Inwestując w obiekty energetyki węglowej w latach 2010–2020 musimy mieć świadomość, że będą one eksploatowane do lat pięćdziesiątych. Inwestując w elektrownię jądrową uruchomioną w roku 2020 musimy sobie zdawać sprawę, że będzie ona eksploatowana do roku 2080. Jaka będzie dostępność surowców energetycznych i ich ceny w drugiej połowie XXI wieku w sytuacji szybkiego rozwoju opóźnionych ekonomicznie społeczeństw i wzrastającego ich „apetytu” na surowce energetyczne i energię.

Nie zaprzeczam, że drogę wyjścia widzę w wykorzystaniu energii jądrowej. Technologia ta, z dużym prawdopodobieństwem, wykorzystana będzie nie tylko do wytwarzania energii elektrycznej, lecz również do zasilania energią cieplną procesów technologicznych i ogrzewania. Zakładam, że większość rozwiniętych krajów świata sięgnie po to źródło energii.

Dla lepszego zrozumienia dalszej części tekstu należy przypomnieć kilka definicji używanych tu pojęć:

- ✧ Reaktory na neutronach termicznych to reaktory, w których reakcje rozszczepienia zachodzą przy oddziaływaniu neutronów o energiach zbliżonych do energii ruchu termicznego atomów lub molekuł. Reaktory te wykorzystują do spalniania neutronów rozszczepieniowych do energii termicznej tzw. „moderator”, którym może być zwykła woda – H_2O , ciężka woda – D_2O , grafit lub beryl.
- ✧ LWR – *Light Water Reactor* – reaktory wykorzystujące jako chłodziwo i moderator (spalniacz) neutronów wodę – H_2O , w odróżnieniu od „ciężkiej” wody – D_2O . Reaktory te obejmują reaktory ciśnieniowe (PWR – *Pressurized Water Reactor* lub WWR – *Wodno-Wodny Reaktor Energetyczny*) i reaktory wodne wrzące (BWR – *Boiling Water Reactor*).
- ✧ PHWR – *Pressurized Heavy Water Reactor*, reaktory wykorzystujące jako moderator ciężką wodę. CANDU jest firmową nazwą tych reaktorów.
- ✧ Reaktory III generacji – reaktory o unowocześnionych konstrukcjach opracowanych z uwzględnieniem nowego podejścia do zagadnień bezpieczeństwa jądrowego. Zestaw wymagań dla reaktorów energetycznych budowanych w Europie jest zawarty w dokumencie *European Utility Requirements*.

Ze wstępnych analiz wynika, że eksploatowane i budowane obecnie reaktory na neutronach termicznych: lekkowodne – LWR lub ciężkowodne – PHWR (CANDU) III generacji, wykorzystujące nieco ponad 0,6% wydobywanego ze środowiska surowca energetycznego, nie zapewnią długoletniego, zrównoważonego rozwoju energetyki jądrowej. Niezbędne będzie opracowanie technologii bardziej efektywnego wykorzystania rozszczepialnego izotopu U235, jak również sięgnięcie do zasobów energetycznych zawartych w paliworodnych izotopach: U238 i Th232.

1. Światowe zasoby kopalnych organicznych surowców energetycznych

Do zasobów kopalnych, organicznych surowców energetycznych świata zaliczyłem trzy główne: węgiel (kamienny, bitumiczny, sub-bitumiczny i brunatny), ropę naftową i gaz. Wg [1] udokumentowane zasoby tych paliw (węgiel, ropa naftowa i gaz) wynoszą około **680 Gtoe**. Wielkość tych zasobów jest przedstawiona w tabeli 1:

TABELA 1. Światowe, udokumentowane zasoby kopalnych organicznych surowców energetycznych

TABLE 1. Assured resources of mineral organic energy-raw materials in the world

Surowiec	Zasoby	Energia
Węgiel w tym: antracyt i bitumiczny sub-bitum. i brunatny	429 299 mln ton 416 667 mln ton	352 Gtoe*
Ropa	1 316 mld bar.	180 Gtoe
Gaz	176 000 mld m ³	148 Gtoe
Razem		680 Gtoe

* Podawane w niniejszej pracy jednostki energii (Gtoe) oznaczają pierwotną energię cieplną. 1 Gtoe = 4,19 10¹⁹ J.

Źródło: [1]

Zdaję sobie sprawę, że przedstawiony przegląd jest przeglądem orientacyjnym, gdyż odkrywane są coraz to nowe złoża węgla, ropy, gazu, a udoskonalane technologie umożliwiają dostęp do złóż, uważanych wcześniej za niedostępne lub zbyt drogie w eksploatacji. Jednakże nawet dwukrotne zwiększenie przedstawionych powyżej zasobów nie zmienia, w zasadniczy sposób, wyników przedstawionych poniżej analiz.

Wykorzystanie wymienionych powyżej organicznych surowców energetycznych w świecie rośnie w tempie 1,8% rocznie [2]. W 2005 roku wykorzystano 9,246 Gtoe tych surowców. Wg [2] ich wykorzystanie w 2030 r. osiągnie poziom 14,5 Gtoe rocznie. W tej sytuacji, już w drugiej połowie XXI wieku wystąpią trudności z dostępem do organicznych surowców energetycznych.

Oczywiście, jak przedstawiłem powyżej, okres ten jest wielkością orientacyjną. Odkrycie nowych złóż, dostęp do złóż dotychczas nieopłacalnych w eksploatacji, wykorzystanie energii odnawialnej może przedłużyć okres dostępności do kopalnych surowców. Ale nowe technologie, np. technologia CCS, w której proces oddzielenia, transportu i zatłaczania CO₂ będzie wymagać wykorzystania od 25 do 40% więcej paliwa w przypadku węgla, lub 11–22% w przypadku gazu [3] mogą spowodować znaczne skrócenie tego okresu. Bez odpowiedniego przygotowania się do nowej sytuacji należy spodziewać się – mimo zwiększenia efektywności energetycznej urządzeń przetwarzania i wykorzystania energii, wykorzystania energii odnawialnej – wzrostu napięć gospodarczych, politycznych i społecznych związanych ze wzrostem cen konwencjonalnych surowców energetycznych oraz ich dostępnością.

Wyjściem z tej sytuacji może być energetyka jądrowa. Jednakże wykorzystanie obecnie opracowanych technologii energetyki jądrowej bazującej głównie na jedynym, istniejącym w przyrodzie izotopie rozszczepialnym – U235 – nie zapewni wytwarzania niezbędnej dla rozwoju społeczeństw energii na odpowiednio długi okres: setek lub nawet tysięcy lat. Niezbędne będzie sięgnięcie do wykorzystywanego dotychczas w niewielkim stopniu izotopu U238 oraz toru, jako materiałów paliworodnych.

W perspektywie setek lat można mieć nadzieję na wykorzystywanie termojądrowych źródeł energii. Jednakże, w istniejących instalacjach termojądrowych, dotychczas nie uzyskano dodatniego bilansu energetycznego. Budowany kosztem dziesiątków miliardów Euro eksperymentalny reaktor termojądrowy – ITER – nie daje pewności uzyskania dodatniego bilansu energetycznego, a jego koszt budowy na długi okres eliminuje tę technologię z grona ekonomicznie konkurencyjnych źródeł energii.

2. Energetyka jądrowa – obecnie stosowane technologie reaktorów energetycznych

Niestety, bez poważnych zmian w tej technologii, energetyka jądrowa nie zapewni ludności świata na długi okres (setki lub tysiące lat) dostępności do stosunkowo taniej energii jądrowej. Obecnie, zidentyfikowane zasoby uranu RAR+IR (RAR – Reasonably Assured Resources, IR – Inferred Resources) wynoszą **5,5 mln ton**, przy kosztach wydobycia <130 USD/kgU, natomiast zasoby prognostyczne PR (Prognosticated Resources) i zasoby przypuszczalne SR (Speculative Resources) w tej samej cenie wydobycia są oceniane na około **7,6 mln ton** [4]. Stosując budowane obecnie jądrowe bloki energetyczne

LWR (PWR i BWR) wykorzystujące paliwo jądrowe o wzbogaceniu około 4% i głębokości wypalenia około 45 GWdni/tU, to zidentyfikowane zasobów uranu naturalnego (RAR+IR) umożliwią wytworzenie około **65 Gtoe** energii cieplnej (pierwotnej). Zasoby prognostyczne oraz zasoby przypuszczalne (PR+SR) umożliwią dostarczenie dodatkowo **90,5 Gtoe** energii cieplnej. Zestawienie energetycznych zasobów paliw jądrowych jest przedstawione w tabeli 2. Nie są to wielkości małe uwzględniając fakt, że udział energii jądrowej w światowym bilansie paliw pierwotnych w roku 2005 wynosił 6,3% [4]. Jednakże zasoby te nie stwarzają realnej szansy na zapewnienie światu bezpieczeństwa energetycznego w perspektywie kilkuset lat, w warunkach kurczących się zasobów kopalnych paliw organicznych oraz wzrastających ograniczeń w emisji szkodliwych substancji do środowiska.

Prawdą jest, że obecnie zapotrzebowanie na paliwo jądrowe ekonomicznie uzasadnia eksploatację złóż o wysokiej zawartości uranu. W przypadku zwiększenia zapotrzebowania na uran można sięgnąć do złóż, w których wydobywanie uranu jest droższe i bez znaczącego wpływu na koszt wytwarzanej w elektrowniach jądrowych energii, zasoby energetyczne uranu będą odpowiednio większe. Ocenia się, że dwukrotny wzrost cen paliw jądrowych zwiększy koszt wytwarzanej w reaktorze energetycznym energii o około 4%.

Jednakże nie zmienia to faktu, że w obecnie stosowanych technologiach energetyki jądrowej, wykorzystującej zaledwie nieco ponad 0,6% energii zawartej w wydobywanym ze środowiska energetycznym surowcu jądrowym, zasoby surowców jądrowych są wykorzystywane niezwykle nieefektywnie, nawet można stwierdzić, że jest to gospodarka rabunkowa.

Jakie są technologiczne możliwości zmiany obecnej sytuacji? Można nakreślić następujące kierunki rozwoju technologii energetyki jądrowej:

1. Wykorzystanie perspektywicznych technologii wzbogacania paliwa uranowego.

Znaczne zwiększenie ilości uzyskanego U235 z uranu naturalnego oraz uzyskanie dodatkowych ilości U235 z zubożonego uranu staje się możliwe dzięki rozwojowi technologii wykorzystania laserów w procesach wzbogacania. Prowadzone są prace nad technologią AVLIS (*Atomic Vapor Laser Isotope Separation*) [5], w której w wysokiej temperaturze pary uranu są napromieniane wiązką laserową o długości fali odpowiadającej energii jonizacji izotopu U235. Zjonizowane atomy U235 są następnie wychwytywane poprzez pole elektryczne. Trudnością zastosowania tej technologii jest precyzja w ustawieniu częstotliwości światła w wiązce laserowej, tak, aby jonizacji ulegały tylko atomy izotopu U235. Różnica długości fali jest tu bardzo mała: U235 ulega jonizacji wiązką światła o długości fali 502,73 nm, natomiast U238 – 502,74 nm.

Pewną modyfikacją powyższej metody jest technologia SILEX (*Separation of Isotopes by Laser EXcitation*) [6]. Technologia ta polega na napromienianiu gazowej fazy UF₆ wiązką lasera, o długości fali powodującej dysocjację UF₆ z atomem U235 na UF₅. UF₅ jest fazą stałą i tym samym łatwą do oddzielenia od fazy gazowej. Według najnowszych doniesień, technologia SILEX została dopracowana do takiego stanu, że będzie wdrażana do przemysłowego wzbogacania uranu przez koncern HITACHI. Przemysłowe wykorzystanie tej technologii spotkało się z gwałtownym sprzeciwem organizacji Greenpeace, gdyż umożliwia w stosunkowo prosty sposób uzyskanie militarnego uranu o dużym wzbogaceniu.

Możliwość redukcji ilości U235 w uranie zubożonym, w procesie wzbogacania, skutkuje zwiększeniem efektywności wykorzystania uranu naturalnego do wytworzenia w obecnie

eksploatowanych reaktorach LWR energii elektrycznej. O ile obecnie wykorzystywane technologie wzbogacania (np. wirówki) wymagają wydobycia ze środowiska ok. 23 ton uranu naturalnego na wytworzenie 1 TWh energii elektrycznej, to przy zastosowaniu technologii SILEX wielkość tę oceniam na 18 ton uranu naturalnego. Zastosowanie tej technologii pozwala na zwiększenie zidentyfikowanych zasobów uranu (RAR+IR) o około **17 Gtoe**, a zasobów przypuszczalnych (PR+SR) o około **22 Gtoe**. Zasoby U235 odzyskane z posiadanego zubożonego uranu (1,6 mln ton) oceniam na **8,7 Gtoe**.

2. Zwiększenie współczynnika wykorzystania U238 w obecnie eksploatowanych i budowanych reaktorach energetycznych LWR. Nie cała energia wytwarzana obecnie w reaktorach energetycznych jest uzyskiwana z rozszczepienia U235. Część energii jest wytwarzana z rozszczepień plutonu powstałego w wyniku napromienienia U238 neutronami:



Reakcja ta jest nazywana cyklem U-Pu.

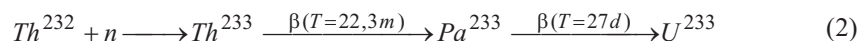
W wyniku przemian jądrowych, w działającym reaktorze, w każdej tonie paliwa generowane jest około 30 kg plutonu, z czego około 20 kg ulega rozszczepieniu w trakcie pracy reaktora. Tak więc, w obecnie eksploatowanych reaktorach energetycznych około 40% energii wytwarzane jest w rezultacie wykorzystania cyklu U-Pu.

Przy przerobie wypalonego paliwa wydzielany jest pluton reaktorowy (RGPu – *Reactor Grade Plutonium*), w którym znajduje się około 65% rozszczepialnych izotopów plutonu. Po połączeniu 6% plutonu otrzymanego w procesie przerobu wypalonego paliwa z uranem odzyskanym z wypalonego paliwa – z zawartością około 1% U235 – wytwarzane jest paliwo MOX¹. Wykorzystanie paliwa MOX zwiększa udział wykorzystania surowca uranowego o około 16%.

Ostatnio podjęto prace nad zwiększeniem współczynnika konwersji cyklu U-PU w reaktorach LWR. Przykładem może być tu praca [7], gdzie przedstawiono koncepcję reaktora BWR z technologią przerobu wypalonego paliwa, w których uzyskano w cyklu U-Pu współczynnik wykorzystania Unat nieco większy od 100%. Zwiększenie efektywności wytwarzania plutonu w cyklu U-Pu będzie skutkowało większą wydajnością wykorzystania paliwa uranowego. Nie jest to proste zadanie, gdyż wymaga zmian w konfiguracji rdzenia reaktora oraz dostosowania reaktora LWR do pracy z większą ilością plutonu w rdzeniu. Charakterystyki jądrowe plutonu – występowanie rezonansu przekroju czynnego na rozszczepienie w obszarze energii neutronów w reaktorach LWR – wymaga zastosowania większej liczby elementów regulacyjnych i pomiarowych w rdzeniu reaktora.

3. Wykorzystanie toru (Th232) jako materiału paliworodnego w obecnie eksploatowanych i budowanych reaktorach energetycznych LWR oraz PHWR (CANDU). Reakcja jądrowa, w której wyniku napromieniania toru neutronami powstaje rozszczepialny izotop U233 jest następująca:

¹ MOX – Mixed OXide fuel – paliwo składające się z mieszaniny dwutlenku uranu i dwutlenku plutonu.



Reakcja ta jest nazywana cyklem Th-U.

Tor jest pierwiastkiem występującym w ponad trzykrotnie większej koncentracji niż uran w skorupie ziemi. Udokumentowane zasoby toru są określone tylko na około 1,2 mln ton. Tak niska wartość wynika z niewielkiego zapotrzebowania przemysłu na ten pierwiastek. Przekrój czynny toru na realizację reakcji w cyklu Th-U jest czterokrotnie wyższy niż dla reakcji U-Pu. Wytworzony w wyniku reakcji Th-U rozszczepialny izotop U233 i w niewielkich ilościach U235 nie posiadają – tak jak pluton – rezonansu w obszarze energii neutronów termicznych. Dodatkowo, znaczny półokres rozpadu Pa233 (27 dni) powoduje, że wytwarzany U233 nie jest „spalany” prawie bezpośrednio po reakcji wychwytu neutronu przez jądro Th232, tak jak to zachodzi w reakcji wychwytu neutronu przez jądro U238 i wytworzenia Pu239.

Cykl Th-U był wykorzystywany do wspomaganie wytwarzania energii już w latach sześćdziesiątych XX wieku. Pierwsze próby były wykonane z doświadczalnym reaktorem wysokotemperaturowym AVR w RFN już w 1967 roku [8]. Następnie zrealizowano szereg testów i badań zarówno w reaktorach badawczych, jak i w reaktorach energetycznych. Prace te przerwano po awarii reaktora energetycznego w Czarnobylu, skutkującego znacznym ograniczeniem rozwoju energetyki jądrowej na całym świecie.

Jedynym krajem, który poważnie podjął prace nad wdrożeniem programu wykorzystania toru do wytwarzania paliw jądrowych są Indie. Wzrastające zapotrzebowanie na energię w tym kraju wymusiło szybki rozwój energetyki jądrowej. Ograniczone zasoby uranu i względnie duże zasoby toru w Indiach spowodowały rozpoczęcie programu badawczego oraz wdrożeniowego związanego z wykorzystaniem toru w energetyce jądrowej. Badania rozpoczęto przy wykorzystaniu reaktorów doświadczalnych KAMINI, CIRUS i DHRUVA [8]. Uzyskane wyniki pozwoliły na wytworzenie elementów paliwowych zawierających mieszaninę wzbogaconego uranu i toru i ich zastosowanie w reaktorach energetycznych PHWR (CANDU). Paliwo torowe zostało zastosowane w elektrowni jądrowej KAPRAKAR w blokach 1 i 2 (2 · 220 MWe), w elektrowni jądrowej KAIGA, w blokach 1 i 2 (2 · 220 MWe) oraz w elektrowni jądrowej RAJASTHAN, w bloku 2 (187 MWe) oraz w blokach 3 i 4 (2 · 220 MWe). Paliwo z udziałem toru wykorzystano w tych reaktorach również do wyrównania przestrzennego rozkładu wytwarzanej mocy. Według najnowszych informacji w reaktorach tych uzyskano około 75% wytwarzanej energii w cyklu Th-U.

Również i w cyklu Th-U prowadzone są prace nad zwiększeniem udziału toru w zwiększeniu efektywności wykorzystania paliw jądrowych. Przykładem może być analiza wykorzystania reaktora PWR do powielania paliwa w cyklu Th-U [9], gdzie uzyskano warunki dla CR ~ 1,03. Pojawiły się również analizy możliwości wykorzystania reaktorów ciężkowodnych do powielania paliwa w cyklu Th-U [10], gdzie uzyskano warunki dla CR ~ 1,048. Klasycznym przykładem reaktora wykorzystującego prawie w 100% energię zawartą w naturalnym uranie i torze jest reaktor na stopionych solach uranu i toru – MSR (MSR – *Molten Salt Reactor*). Doświadczalny reaktor MSR [11] został zbudowany i badany w latach 1964–1969. W reaktorze tym jako paliwo jądrowe oraz chłodziwo wykorzystywane są stopione sole uranu i toru (UF₄ i ThF₄). Dzięki zastosowaniu technologii usuwania –

w czasie pracy reaktora – produktów rozszczepiania z paliwa i zastosowaniu jednocześnie cyklu paliwowego U-Pu i Th-U reaktor ten wytwarza energię cieplną około 100 GWdni, wykorzystując około 50 kg uranu naturalnego i około 50 kg toru. Dzięki wysokiej temperaturze chłodziwa (około 800°C) energia ta jest wystarczająca do wytworzenia 1TW·h energii elektrycznej. W obecnie eksploatowanych reaktorach LWR i PHWR wytworzenie 1 TW·h energii elektrycznej wymaga wydobycia ze środowiska około 23 ton uranu naturalnego. To porównanie obrazuje obecną rozrzutność wykorzystania jądrowych surowców energetycznych. Reaktor ten wprawdzie nie wytwarza dodatkowych ilości paliw pozwalających na rozwój energetyki jądrowej, ale umożliwia eksploatację przy pełnym wykorzystaniu uranu naturalnego i toru.

Badania nad wykorzystaniem toru w reaktorach energetycznych typu PWR podjęto również w Instytucie Energii Atomowej POLATOM, który otrzymał finansowanie projektu POIG „Analiza efektów wykorzystania toru w jądrowym reaktorze energetycznym” [12]. Celem projektu jest poznanie zjawisk zachodzących w reaktorze po umieszczeniu w nim prętów z ThO₂. Jest to – jak mi obecnie wiadomo – jedyny w Polsce projekt badawczy POIG w zakresie energetyki jądrowej.

W wyniku przedstawionej powyżej nieefektywnej gospodarki jądrowymi surowcami energetycznymi pozostały znaczne ilości odpadów. Składowane jest około 1,6 mln ton uranu zubożonego, w którym znajduje się około 0,3% U235. W przechowalnikach znajduje się około 0,2 mln ton wypalonego paliwa, w którym znajduje się około 1700 ton plutonu reaktorowego – RGPu. W magazynach wojskowych znajduje się około 230 ton wysoko wzbogaconego uranu i 70 ton plutonu militarnego (MGPu – *Military Grade Plutonium*) gotowego do wykorzystania w reaktorach cywilnych. W wyniku reprocesingu wypalonego paliwa z reaktorów energetycznych zgromadzono około 320 ton plutonu RGPu. Całe szczęście, że wypalone paliwo z dotychczas eksploatowanych reaktorów energetycznych nie zostało ostatecznie składowane oraz jest dostępny zubożony uran pozostały po procesie wzbogacania. Albowiem w rozwijanych obecnie technologiach energetyki jądrowej przyjęto zasadę: „dzisiejsze odpady są paliwem jutra”[13].

Analizując zasoby energetyczne paliw jądrowych przy wykorzystaniu obecnie eksploatowanych i budowanych technologiach trzeba sobie zdać sprawę z istniejących ograniczeń. Laserowa technologia wzbogacania nie zostanie wprowadzona do działających obecnie zakładów wzbogacania paliwa. Mało prawdopodobny jest również pełny przerób chemiczny paliwa wypalonego wyładowywanego z reaktorów energetycznych – biorąc pod uwagę koszty oraz ograniczony obecnie potencjał techniczny (ok. 4000 ton rocznie). Istnieje ograniczona liczba reaktorów energetycznych przystosowanych do wykorzystania paliwa MOX. W tej sytuacji oceniam, że praktyczny potencjał paliw jądrowych jako energii pierwotnej przy wykorzystaniu 13,4 mln ton zasobów uranu naturalnego, na około 210 Gtoe. Nie jest to wielkość mała uwzględniając fakt, że udział energii jądrowej w światowym bilansie paliw pierwotnych w roku 2005 wynosił 6,3% [4]. Jednakże zasoby te nie stwarzają realnej szansy na zapewnienie światu bezpieczeństwa energetycznego na perspektywę kilkuset lat, nawet przy wykorzystaniu zasobów uranu o większych kosztach wydobycia.

TABELA 2. Zasoby energetyczne paliw jądrowych – analizy własne na podstawie danych [4]

TABLE 2. Energy resources of nuclear fuels – author’s analysis with data [4]

Surowiec	Ilość	Zasoby energii pierwotnej				wykorzystanie
		technologie wzbogacania				
		dyfuzja i wirówki		laserowe (SILEX)		
		bez przerobu wyp. paliwa	z przerobem wyp. paliwa	bez przerobu wyp. paliwa	z przerobem wyp. paliwa	
Unat Zasoby udokumentowane (RAR+IR)	5,5 mln ton	58 Gtoe	68 Gtoe	75 Gtoe	87 Gtoe	
Unat Zasoby przewidywane (PR+SR)	7,6 mln ton	81 Gtoe	94 Gtoe	103 Gtoe	120 Gtoe	
Uran zubożony	1,6 mln ton			8,7 Gtoe		
Militarny U wysoko wzbogacony	230 ton					0,72 Gtoe
Militarny Pu	70 ton					0,15 Gtoe
Pu z reprocessingu	320 ton					0,65 Gtoe
U z reprocessingu	45 000 ton					0,51 Gtoe
Wypalone paliwo – wykorzystanie po reprocessingu Pu i U.	200 000 ton					2,08 Gtoe

3. Perspektywiczne technologie energetyki jądrowej

Dotychczasowe technologie wykorzystania cyklu paliwowego U-Pu jak i Th-U w reaktorach na neutronach termicznych, nie zmieniają zasadniczo sytuacji w zakresie zasobów energetycznych paliw jądrowych. W wymienionych powyżej przypadkach – oprócz technologii MSR – będzie wykorzystany uran wzbogacony, skutkujący powstawaniem znacznych ilości zubożonego uranu. W dotychczasowych technologiach reaktorów na neutronach termicznych nie osiągniemy znacznego postępu w wykorzystaniu paliw jądrowych.

Olbrzymie zasoby energetyczne energetyki jądrowej mogą się pojawić przy znacząco wyższym wykorzystaniu materiałów paliworodnych, takich jak izotop U238 i Th 232, jako materiałów paliworodnych w reaktorach powielających wykorzystujących cykl paliwowy U-Pu (1) lub Th-U (2), w których ilość rozszczepialnego materiału zawartego w wyładowanym z reaktora materiale jest większa od ilości zużytego rozszczepialnego materiału wykorzystanego w procesie eksploatacji tego reaktora. Stosunek ilości uzyskanego materiału rozszczepialnego do ilości materiału rozszczepialnego zużytego w procesie eks-

ploatacji jest nazwany współczynnikiem powielania (BR – *Breeding Ratio*). Reaktor powielający powinien posiadać współczynnik $BR > 1$. Reaktory te są zaliczane do następnej generacji – IV generacji reaktorów energetycznych.

Aby uzyskać współczynnik $BR > 1$, reaktor powinien wykorzystywać do realizacji łańcuchowej reakcji rozszczepienia neutrony prędkie o energiach rzędu setek keV, przy których prawdopodobieństwo powstania reakcji prowadzącej do wytworzenia izotopu rozszczepialnego U233, U235 lub Pu239 jest większe od prawdopodobieństwa rozszczepienia. Reaktory powielające na neutronach prędkich (FBR – *Fast Breeder Reactor*) były intensywnie rozwijane w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych oraz w początku lat osiemdziesiątych XX wieku, gdzie szybki rozwój energetyki jądrowej sugerował wyczerpywanie się zasobów paliw jądrowych. Budowano i eksploatowano reaktory powielające wykorzystujące cykl paliwowy U-Pu [15]. W USA eksploatowano reaktor ENRICO FERMI (1966–1972), w Anglii DOUNREAY DFR (1962–1977) i DOUNREAY PFR (1976–1994), w RFN reaktor KNK-II (1979–1991), w Federacji Rosyjskiej BN-600 (1980 – eksploatowany dotychczas), w Kazachstanie reaktor BN-350 (1973–1999), we Francji PHENIX (1973 – eksploatowany dotychczas) i SUPER PHENIX (1986–1998) oraz w Japonii MONJU (eksploatowany przez kilka miesięcy w 1995 roku). Z wymienionych powyżej reaktorów powielających tylko reaktor BN-600 jest eksploatowany ze współczynnikiem wykorzystania zainstalowanej mocy między 70 a 84% [15].

Reaktor powielający zawiera w centrum strefę zasilającą zestawioną z paliwa MOX zawierającego od 20 do 30% plutonu zmieszanego z uranem. Dookoła strefy zasilającej znajduje się strefa powielająca zestawiona z zubożonego uranu przy cyklu U-Pu lub toru w przypadku realizacji cyklu Th-U. Jako chłodziwo w tych reaktorach wykorzystywany jest ciekły metal – w dotychczas eksploatowanych reaktorach – ciekły sód. Istnieją projekty zastąpienia ciekłego sodu ołowiem lub eutektyką Pb-Bi. W opracowywaniu jest również reaktor powielający chłodzony gazem (helem).

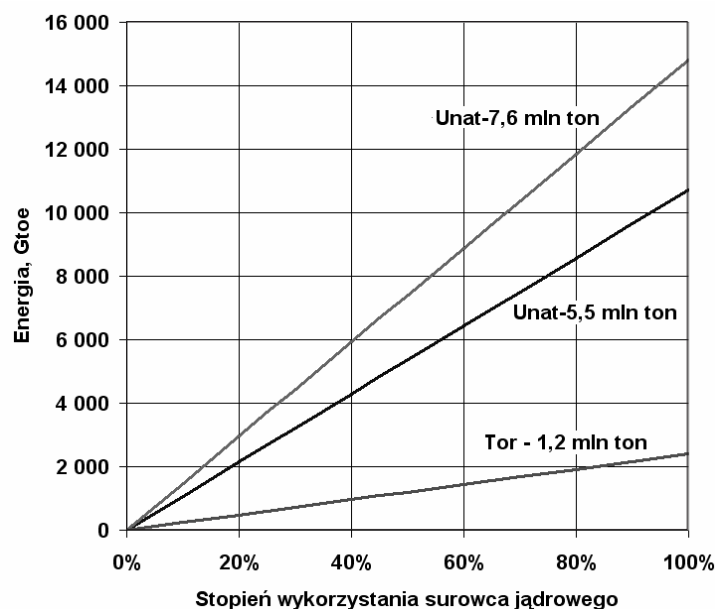
Współczynnik powielania – BR – jest ograniczony przez bilans neutronów w reaktorze. W procesie rozszczepienia powstaje średnio od 2,43 (dla U235) do 2,97 (dla Pu241) wtórnych neutronów. Dla podtrzymania reakcji rozszczepienia jeden z tych neutronów musi doprowadzić do rozszczepienia. A więc wymienione powyżej liczby są zmniejszone o 1. Następnym procesem zmniejszającym tę liczbę jest prawdopodobieństwo radiacyjnego wychwytu neutronu przez jądro izotopu rozszczepialnego. Biorąc pod uwagę procesy zachodzące w układach reaktorowych (ucieczka neutronów, absorpcja neutronów w materiałach konstrukcyjnych i w chłodziwie) współczynnik powielania nie bywa większy od 1,3. Reaktory te nie tylko umożliwiają znacznie efektywniejsze wykorzystanie surowców energetycznych, lecz również wytwarzanie paliwa dla nowo budowanych reaktorów, pozwalając na wzrost potencjału energetyki jądrowej.

Programy rozwoju reaktorów nowej, IV generacji są przedstawione w programowych dokumentach [14, 16]. Reaktory te zwiększą efektywność wykorzystania jądrowych surowców energetycznych, doprowadzą do minimalizacji ilości i szkodliwości wytwarzanych odpadów promieniotwórczych. Wymagana jest niezawodność i całkowite bezpieczeństwo tych reaktorów. Stosowany cykl paliwowy powinien uniemożliwiać wykorzystanie przetwarzanych materiałów jądrowych do celów militarnych i terrorystycznych.

Wśród przyjętych do rozwoju reaktorów IV generacji są reaktory powielające na neutronach prędkich: innowacyjna konstrukcja reaktora powielającego chłodzonego ciekłym sodem (SFR), reaktor powielający chłodzony ciekłym ołowiem lub eutektyką ołów-bismut (LFR) oraz reaktor powielający chłodzony gazem (GFR). W reaktorach tych, chłodziwo na wylocie reaktora posiada wysoką temperaturę: od 550°C do 800°C w reaktorach SFR i LFR oraz do 850°C w reaktorze GFR. Takie wysokie temperatury umożliwiają wytwarzanie energii elektrycznej z wysoką sprawnością, jak również służą do zasilania chemicznych procesów technologicznych, np. wytwarzania wodoru.

Jak przedstawiono powyżej, fizyka zjawiska ogranicza współczynnik powielania do wartości 1,3. Konstrukcją, która pozwoli zwiększyć współczynnik powielania jest reaktor podkrytyczny ze spalacyjnym źródłem neutronów, tzw. ADS – *Accelerator Driven System* [17]. Wiązka protonów o energii około 1 GeV wytwarzana w akceleratorze padając na tarczę z ciężkiego metalu (ołów, wolfram lub uran) generuje wysoko energetyczne neutrony. Przy takiej energii każdy proton powoduje powstanie około 40 wysokoenergetycznych neutronów o energii powyżej 10 MeV. Przy prądzie wiązki protonów 1 mA wytwarzane jest około $2,5 \cdot 10^{17}$ neutronów w sekundzie, które znacznie poprawiają bilans neutronów w reaktorze. Reaktor ten umożliwia wypalanie długożyciowych, radiotoksycznych aktynowców znajdujących się w paliwie w cyklu U-Pu: Am, Cm, Bk i Cf. Wszystkie izotopy tych pierwiastków ulegają rozszczepieniu pod działaniem neutronów o dostatecznie dużej energii.

Wykorzystanie reaktorów powielających na neutronach prędkich stwarza zupełnie nową perspektywę przed energetyką jądrową. Zasoby energetyczne paliw jądrowych – nawet tych o kosztach wydobycia 130 US\$/kg – są już liczone w tysiącach Gtoe. Na rysunku 1



Rys. 1. Zasoby energetyczne paliw jądrowych przy wykorzystaniu reaktorów powielających

Fig. 1. Energy resources of nuclear fuels with use of breeder reactors

przedstawione są zasoby energetyczne paliw jądrowych RAR+IR, PR+SR oraz rozpoznane zasoby toru w zależności od stopnia ich wykorzystania (strat przy przerobieniu, niedoskonałości reaktorów powielających itp.). Odnośnie toru, przyjęto tu wielkości zasobów udokumentowanych. W rzeczywistości zasoby toru w skorupie ziemskiej są około trzykrotnie większe od zasobów uranu. Takie technologie energetyki jądrowej pozwolą zapewnić bezpieczeństwo dostaw energii na setki lat. Energii przyjaznej środowisku, bez szkodliwych emisji, z minimalną ilością szkodliwych odpadów, które należy izolować od środowiska nie dłużej niż 500 lat.

Podsumowanie

Energetyka jądrowa oferuje znaczne zasoby paliw jądrowych umożliwiające zapewnienie bezpieczeństwa dostaw energii na setki, a nawet tysiące lat pod warunkiem rozwoju jej technologii. Przede wszystkim potrzebny jest rozwój obecnie wykorzystywanej technologii reaktorów na neutronach termicznych. Jednakże, zasadniczy postęp nastąpi w momencie wykorzystania reaktorów powielających, zdolnych do wytwarzania z materiałów paliworodnych takich jak U238 i Th232 izotopów rozszczepialnych Pu239 i U233. Kierunek ten potwierdza szereg dokumentów opracowanych przez międzynarodowe zespoły ekspertów [13, 14 i 16].

Zasadniczymi problemami są technologie materiałowe elementów reaktora, technologie wytwarzania paliw jądrowych oraz technologie przerobu tych paliw, gwarantujących niezawodność i bezpieczeństwo eksploatacji urządzeń przez zadany okres eksploatacji obiektów energetyki jądrowej. Prowadzone analizy obejmują konstrukcję i konfigurację samego reaktora zapewniającą bezpieczeństwo jądrowe obiektu.

Trzeba zadać sobie pytanie, czy Polska, wchodząca w opcję energetyki jądrowej będzie tylko zdana na kupno tych technologii – tak jak stwierdził Zespół Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, uzasadniając odmowę finansowania projektu związanego z energiką jądrową – czy powinniśmy aktywnie uczestniczyć w ich rozwoju, szkoląc kadry i rozwijając kompetencje w tych dziedzinach.

Literatura

- [1] US Energy Information Administration: World Estimated Recoverable Coal. December 31, 2005 and World Crude Oil and Natural Gas Reserves, January 1 2007.
- [2] World Energy Outlook 2007. International Energy Agency, Paris, 2008.
- [3] Carbon Dioxide Capture and Storage. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005.
- [4] Uranium 2007, Resources, Production and Demand. A Joint Report Nuclear Energy Agency OECD and International Atomic Energy Agency. OECD 2008.
- [5] BODANSKY D., 2004 – Nuclear Energy, Principles, Practices and Prospects. Springer (Science+Business) Media LLC.

- [6] Uranium Information Center Ltd, *Uranium enrichment*, Nuclear Issues Briefing Paper 33 (June 2003) <http://www.uic.com.au/nip33.htm>.
- [7] UCHIKAWA S. et al., 2007 – Conceptual Design of Innovative Water Reactor for Flexible Fuel Cycle (FLWR) and its Recycle Characteristics. *J. Nucl. Sci. Techn.*, 44, No 3, pp. 277–284.
- [8] Thorium Fuel Cycle – potential benefits or challenges, IAEA TECDOC 1450, Vienna May 2005.
- [9] PERMANA S., TAKAKI N., SEKIMOTO H., 2007 – Feasible Region of Design Parameters for Water Cooled Thorium Breeder Reactor. *J. Nucl. Sci. Techn.* 44, No 7, pp. 946–957.
- [10] PERMANA S., TAKAKI N., SEKIMOTO H., 2008 – Breeding Capability and Void Reactivity Analysis of Heavy-Water-Cooled Thorium Reactor. *J. Nucl. Sci. Techn.* 45, No. 7, pp. 589–600.
- [11] ROBERTSON R.C., SMITH O.L., BRIGGS R.B., BETTIS E.S., 1968 – Two-fluids Molten-Salt Breeder Reactor, Design Study (Status as of January 1, 1968). ORNL – 4528 August 1970 i inne, zawarte na stronie internetowej <http://www.energyfromthorium.com/pdf>.
- [12] Analiza efektów wykorzystania toru w jądrowym reaktorze energetycznym. Projekt POIG.01.03.01-00-076/08-00 www.iea.cyf.gov.pl.
- [13] Sustainable Nuclear Energy Technology Platform, Deployment Strategy Document. July 2009.
- [14] A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System, U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, December 2002.
- [15] Power Reactors Information System, IAEA (uaktualniany na bieżąco) <http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>.
- [16] Strategic Research Agenda, Sustainable Nuclear Energy Technology Platform, February 2009, www.snetp.eu.
- [17] Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles, Nuclear Energy Agency, OECD, 2002 <http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2002/nea3109-ads.pdf>.

Stefan CHWASZCZEWSKI

Technologies of nuclear power in XXI century

Abstract

The world-wide increasing energy demand in general, and electricity demand in particular, call for a re-evaluation of fission energy as a long-term energy source. In this context, a recent paper has investigated the extent to which nuclear energy is compatible with the goals of sustainable development, and how it can best contribute to them. Although present light water reactors (LWRs) are capable of covering the nuclear energy demand for many decades to come, there is a longer-term need for integrating advanced reactors, including breeder reactors, into the nuclear energy system. Important development goals for such advanced systems are environmental friendliness and resource efficiency, while accounting for socio-political concerns such as proliferation.

KEY WORDS: nuclear power, power reactor, breeding reactor, uranium, thorium

