

POWRÓT ROZWOJU ENERGETYKI JĄDROWEJ NA ŚWIECIE

MIROSŁAW DUDA

Świat stoi obecnie wobec konfrontacji ciągle rosnącego zapotrzebowania na energię z wyczerpującymi się zasobami ropy i gazu oraz coraz bardziej odczuwalnym efektem cieplarnianym, za który w dużej części odpowiedzialne jest spalanie organicznych paliw kopalnych. Efekt cieplarniany utrudni wykorzystanie dużych jeszcze zasobów węgla kamiennego, gdyż w coraz większym stopniu jego spalanie obciążone będzie kosztami szkód w środowisku naturalnym, spowodowanych emisją zanieczyszczeń do atmosfery, głównie CO₂. Widocznym efektem wyczerpujących się zasobów paliw węglowodorowych jest wzrost ich cen na rynku światowym. Jednocześnie okazuje się, że realność budzących duże nadzieje planów wykorzystania odnawialnych źródeł energii jest wątpliwa w zderzeniu bądź z ich niewielkimi zasobami (energetyka wodna) bądź z wysokimi kosztami, jeśli sięga się po bardziej wyrafinowane technologie, zwłaszcza fotowoltaikę. Mogą też generować problemy ekologiczne lub eksploatacyjne (energetyka wiatrowa).

Konieczność powrotu do rozwoju energetyki jądrowej na świecie była wielokrotnie wskazywana podczas obrad XX Światowego Kongresu Energetycznego w Rzymie [1]. W swoim wystąpieniu na plenarnej sesji Kongresu prezes francuskiego koncernu Areva Anne Lauvernon stwierdziła, że świat czeka trzecia rewolucja energetyczna, a energetyka jądrowa będzie nieuchronnie jej wyznacznikiem.

Przewidywane problemy z globalnym zbilansowaniem zapotrzebowania i dostaw energii powodują konieczność weryfikacji negatywnego stosunku do energetyki jądrowej, spowodowanego w dużym stopniu syndromem katastrofy czarnob-

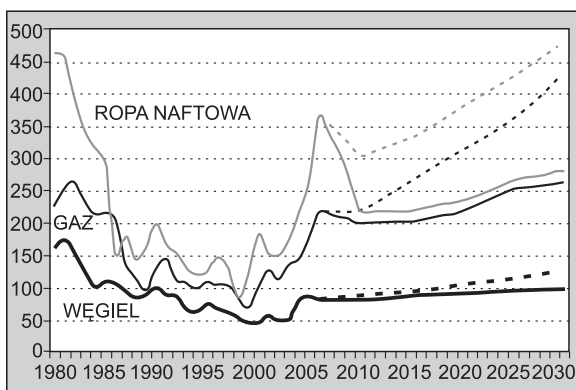
ylskiej, który w wielu krajach zahamował rozwój tej technologii. Niektóre kraje europejskie podjęły decyzje o stopniowym wycofywaniu elektrowni jądrowych z eksploatacji (np. Belgia, Niemcy, Szwecja), a w Austrii, w wyniku referendum doszło nawet do odstąpienia od uruchomienia elektrowni gotowej do eksploatacji. W USA, już po awarii w Three Mile Island w 1979 r., drastycznie wzrosły wymagania Jądrowej Komisji Regulacji (NRC – Nuclear Regulatory Commission). Spowodowało to wzrost kosztów i wydłużenie okresu budowy oraz wycofanie zleceń na nowe elektrownie jądrowe, również z powodu pojawienia się dostępu do tanich w owym czasie dostaw ropy i gazu. Nie uległ natomiast istotnemu spowolnieniu rozwój energetyki jądrowej w krajach Azji (Chinach, Japonii, Indii i Korei Południowej) oraz Rosji.

Mimo tych trudności rozwojowych, energetyka jądrowa odgrywa znaczną rolę w zaopatrzeniu świata w energię. Obecnie na świecie [2] w eksploatacji znajduje się 435 reaktorów w elektrowniach jądrowych o mocy netto 367 GW, które w 2005 r. wytworzyły 2 626 TWh energii elektrycznej, co stanowi ok. 16% globalnej produkcji tego nośnika energii. W latach 2003-2006 r. uruchomiono czternaście nowych jednostek jądrowych, a z eksploatacji wycofano również 14 bloków jądrowych, w tym aż 12 w Wielkiej Brytanii ze starymi reaktorami chłodzonymi gazem. W sumie moc zainstalowana EJ w 2006 r. zmniejszyła się o 806 MW. Udział produkcji energii elektrycznej w EJ utrzymywał się przez ostatnie lata na podobnym poziomie, przede wszystkim dzięki temu, że przez ostatnie 15 lat stale wzrastała dyspozycyjność EJ (w 2005 roku wyniosła średnio 81%)

Dlaczego renesans energetyki jądrowej?

W liczącej się prognozie rozwoju zaopatrzenia świata w energię, sporządzonej w 2006 r. na okres do 2030 r. przez Międzynarodową Agencję Energetyczną (MAE) [3] przewiduje się, że globalne zapotrzebowanie na energię pierwotną wzrośnie do roku 2030 w scenariuszu referencyjnym o 53%, natomiast w efektywnościowym scenariuszu alternatywnym o 9,9% mniej. Zapotrzebowanie na energię elektryczną w skali globalnej w scenariuszu referencyjnym ma wzrastać ze średniorocznym tempem 2,6%. W krajach rozwijających się wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną ma być znacznie wyższy. Najszybciej zużycie energii elektrycznej ma wzrastać w Indiach (5,4%) i w Chinach (4,9%). W scenariuszu alternatywnym wzrost zapotrzebowania globalnego na energię elektryczną ma być niższy o 12,2% dzięki przedsięwzięciom stymulującym wzrost efektywności użytkowania tej energii. Średnioroczny wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną w scenariuszu alternatywnym wyniesie 2,1%.

Mimo obecnie bardzo niestabilnego rynku węglowodorów, ceny ropy naftowej i gazu na rynku światowym mają ulec obniżeniu około 2010 r., a następnie będą wzrastać w tempie, które w scenariuszu pesymistycznym będzie bardzo wysokie (rys. 1).



Rys.1. Historia i prognoza cen nośników energii pierwotnej importowanych do Europy w €/toe wg prof. Caprosa [5]

Ceny energetycznego węgla kamiennego na rynku światowym będą również wzrastać w szybkim tempie, jednak znacznie niższym niż paliwa węglowodorowe.

Obecnie wszystko wskazuje na to, że bardziej prawdopodobna będzie prognoza wyższego wzrostu cen ropy i gazu ze względu na obniżające się zasoby. W skali globalnej wskaźnik **zasobów ropy naftowej** R/P¹, według renomowanych danych sta-

tystycznych BP [4], w ciągu ostatnich 30 lat utrzymywał się w granicach 27-43 lat. Obecnie wynosi on ok. 41 lat, co powinno być sygnałem ostrzegawczym, głównie dla polityków zajmujących się zagadnieniami gospodarczymi. Międzynarodowa Agencja Energetyczna uspokaja wprawdzie, że nie powinno być problemów z dostawami ropy w perspektywie do 2030 r., gdyż przewidywany wzrost cen uruchomi środki na niezbędne inwestycje w tym zakresie. Poważnym problemem są jednak koszty pozyskania i ceny ropy w dłuższej perspektywie, gdyż wystąpi potrzeba sięgnięcia po znacznie trudniejsze i mniej wydajne złoża roponośne (piaski i łupki bitumiczne).

Dla **gazu ziemnego** wskaźniki R/P są korzystniejsze niż dla ropy naftowej, aczkolwiek w ciągu ostatnich pięciu lat wartość R/P obniżyła się z poziomu ok. 70 do ok. 64 lat. Należy wziąć pod uwagę konieczność ponoszenia ogromnych nakładów na uruchomienie nowych złóż oraz budowę gazociągów transportowych przede wszystkim z Rosji do Europy i Azji.

Zasoby **węgla kamiennego i brunatnego** są bardzo duże na świecie. Wskaźnik R/P dla węgla kamiennego, który występuje w obrocie międzynarodowym wynosi obecnie ok. 195 lat. Węgiel brunatny nie występuje w obrocie międzynarodowym i nie poddaje się ocenie poprzez wskaźnik globalny. Jego wykorzystanie zależne jest od lokalnych zasobów i charakterystyk złóż.

Potencjał **energii odnawialnej** jest teoretycznie ogromny, gdyż wynika głównie z zasobów energii słońca. Jest jednak bardzo rozproszony i jego wykorzystanie wiąże się z koniecznością koncentracji, co pociąga za sobą wysokie koszty tej formy energii. Wykorzystanie zasobów energii rzek, pozostałych jeszcze do zagospodarowania energetycznego, zwłaszcza w Chinach, Ameryce Południowej i Afryce, wiąże się z ogromnymi nakładami inwestycyjnymi oraz długimi okresami budowy, co stanowi o wysokim ryzyku i czyni tego rodzaju przedsięwzięcia mało atrakcyjnymi dla potencjalnych inwestorów prywatnych. Dla elektroenergetyki znacznie prostsze jest wykorzystanie energii wiatru i biomasy, a w przyszłości także źródeł fotowoltaicznych. Wymagane są jednak dalsze prace w tym zakresie, które doprowadzą do technologii przemysłowych o akceptowalnych kosztach. Z tych względów udział energii odnawialnej jest i będzie w najbliższych dekadach niewielki – nawet, jeśli będą realizowane „ekologiczne” scenariusze rozwoju.

¹ Wskaźnik R/P wyraża stosunek zasobów do obecnej produkcji danego rodzaju paliwa, co również określa prawdopodobny okres eksploatacji tych zasobów przy obecnym poziomie produkcji.

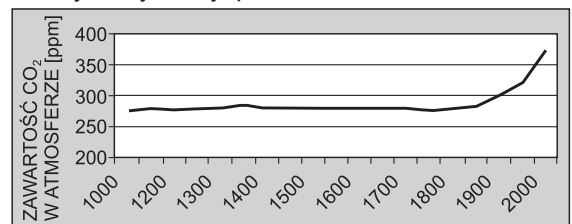
Tab. 1 Wystarczalność globalnych zasobów paliwa uranowego przeliczeniu na okresy możliwej produkcji energii elektrycznej wg MAEA

Cykl paliwowy	Okres możliwej produkcji energii elektrycznej w EJ o poziomie z 2004 r. przy wykorzystaniu tylko potwierdzonych zasobów konwencjonalnych uranu	Okres możliwej produkcji energii elektrycznej w EJ o poziomie z 2004 r. przy wykorzystaniu całkowitych zasobów konwencjonalnych uranu	Okres możliwej produkcji energii elektrycznej w EJ o poziomie z 2004 r. przy wykorzystaniu zasobów konwencjonalnych i niekonwencjonalnych
Cykl otwarty z wykorzystaniem tylko reaktorów termicznych	85	270	675
Cykl zamknięty z wykorzystaniem reaktorów powielających	5000-6000	16000-19000	0000-47000

Dostępność energii zawartej w **paliwie jądrowym** zależy od rozwoju technologii reaktorów jądrowych (tab. 1). Według Holgera [2] światowe zasoby rudy uranowej pozwalają na utrzymanie obecnego poziomu produkcji energii elektrycznej w EJ w cyklu otwartym, a więc przy wykorzystaniu tylko reaktorów termicznych przez okres 85 lat – jeśli się bierze pod uwagę tylko potwierdzone zasoby konwencjonalne. Oszacowane całkowite zasoby konwencjonalne uranu wydłużają ten czas do 270 lat. Eksploatacja zasobów niekonwencjonalnych, a więc zasobów uranu przede wszystkim w wodzie morskiej, umożliwi wydłużenie tego okresu do 675 lat. Zamknięcie uranowego cyklu paliwowego z odzyskiwaniem z paliwa wypalonego, przede wszystkim plutonu 239, jako paliwa dla reaktorów termicznych, oraz z wykorzystaniem potem reaktorów powielających, umożliwi w skali światowej wydłużenie okresu wykorzystania elektrowni jądrowych na ponad tysiąc lat. Dodatkowo duże możliwości stwarza wykorzystanie toru jako paliwa jądrowego. Zasoby tego pierwiastka nie są jeszcze w pełni rozeznane. Paliwo jądrowe jest zatem jedynym paliwem o praktycznie nieograniczonych zasobach.

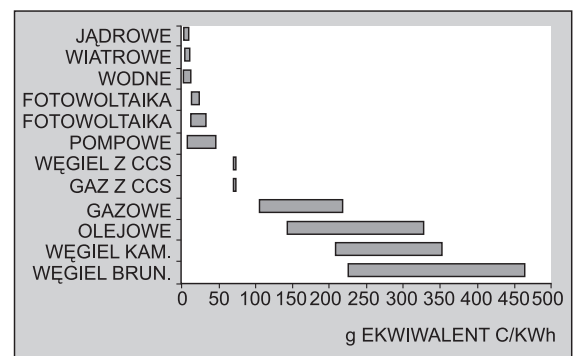
Jakość ekologiczna nośników energii pierwotnej nabiera ostatnio szczególnego znaczenia. Wpływa na to przede wszystkim zagrożenie, wynikające ze wzrastającej koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze, a zwłaszcza CO₂ (rys. 2). Wprawdzie istnieją kontrowersje wśród naukowców, w jakim stopniu efekt cieplarniany jest spowodowany działalnością człowieka i czy jesteśmy w stanie opanować efekt cieplarniany, uznaje się jednak dość powszechnie, że dalszy wzrost emisji CO₂, będący następstwem wykorzystania konwencjonalnych źródeł energii, może go znacznie przyspieszyć. Niestety, niezwykle trudno doprowadzić do spójnych działań państw na rzecz obniżenia emisji gazów cieplarnianych, gdyż jest to związane z zagrożeniem bezpieczeństwa energetycznego, zwłaszcza w skali lokalnej, chociaż efekt ten ma wymiar globalny. Z tego względu nie wszystkie kraje ratyfikowały Protokół z Kioto, m.in. nie uczyniły tego Stany Zjednoczone, a Chiny i Indie – mimo ratyfikacji Protokołu – nie zobowią-

zały się do redukcji emisji gazów cieplarnianych. Negatywne stanowisko tych krajów do dalszych ilościowych zobowiązań obniżenia emisji gazów cieplarnianych było podtrzymane na konferencji klimatycznej na wyspie Bali w 2007 r.



Rys. 2. Historia koncentracji CO₂ [ppm] w atmosferze ziemskiej wg raportu IPCC² 2005

W świetle narastających obaw o skutki efektu cieplarnianego oraz konieczności rozwoju technologii o minimalnej emisji gazów cieplarnianych, przede wszystkim CO₂, energetyka jądrowa jawi się jako jedyna technologia o praktycznie zerowej emisji gazów cieplarnianych (rys. 3).



Rys. 3. Porównanie jednostkowych emisji gazów cieplarnianych rozmaitych technologii wytwarzania energii elektrycznej [3]

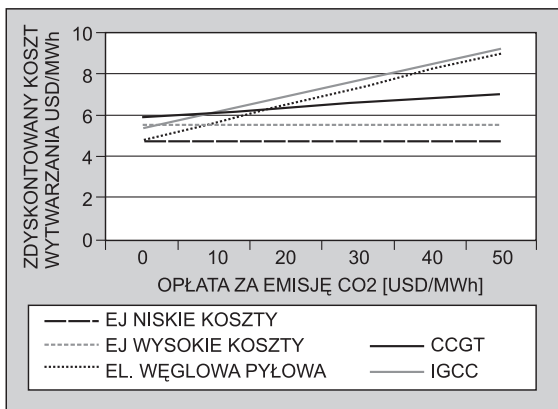
W perspektywie do 2030 r. **koszty wytwarzania energii elektrycznej** będą zależeć od rodzaju źródeł energii elektrycznej, ich sprawności i przede wszystkim od rodzaju stosowanych paliw. Dla elektrowni opalanych organicznymi paliwami kopalnymi, w których udział kosztów paliwa wynosi od 50% (elektrownie węglowe) do 70% (elektrownie gazowe), decydujący wpływ będą mieć ceny paliw oraz ceny opłat za emisję CO₂.

² Intergovernmental Panel on Climate Change.

Z porównania kosztów wytwarzania energii elektrycznej (rys. 4) wynika, że elektrownie węglowe będą nadal konkurencyjne kosztowo w odniesieniu do innych źródeł, **jeśli nie będą obowiązywać opłaty za emisję CO₂**. Już najniższe opłaty za emisję czynią elektrownie jądrowe konkurencyjne wobec wszystkich porównywanych źródeł (rys. 5). Praktycznie już dla opłat na poziomie 10 USD/t CO₂ energia z EJ jest najtańsza w odniesieniu do wszystkich innych źródeł, nawet przy założeniu wysokich kosztów wytwarzania w EJ.



Rys. 4. Porównanie kosztów wytwarzania energii elektrycznej [USD/MWh] w źródłach rozmaitych technologii bez uwzględnienia opłat za emisję CO₂ [2]



Rys. 5. Zależność kosztów wytwarzania energii elektrycznej od wysokości opłat za emisję CO₂ [3]

Oprócz kosztów wytwarzania energii ponoszonych przez elektrownie, wprowadza się do porównań różnych opcji energetycznych pojęcie tzw. **kosztów zewnętrznych**, które obejmują koszty zdrowotne, koszty szkód w środowisku naturalnym, w tym koszty powodowane przez efekt cieplarniany, oraz koszty możliwych awarii. Największy udział w kosztach zewnętrznych mają koszty zdrowotne. Według ocen eksperckich [6], koszty zewnętrzne powodowane przez energetykę węglową, nawet przy pominięciu kosztów zanieczyszczeń rzek przez ścieki z elektrowni węglowych i wodę zasoloną z kopalń węgla kamiennego, wy-

noszą dla Europy ok. 4,6 Euro/MWh. Dla energetyki jądrowej – na przykładzie Francji, Wielkiej Brytanii i Szwecji – koszty te są o dwa rzędy wielkości mniejsze.

Włączenie kosztów zewnętrznych do analiz porównawczych przez potencjalnych inwestorów będzie możliwe dopiero po ich internalizacji, a więc po wprowadzeniu stosownych opłat ekologicznych do ceny energii elektrycznej, co zostało zapoczątkowane przez wprowadzenie opłat za emisję CO₂, których wysokość jest określana w Europie na rynku uprawnień do emisji CO₂.

Charakterystyczną cechą energetyki jądrowej jest **niski udział kosztów paliwa** w całkowitych kosztach wytwarzania energii (do 15%) oraz **wysokie nakłady inwestycyjne na jednostkę mocy** (2000-2500 USD'05/kW netto), co może ograniczać tempo budowy takich źródeł. Jednak wysokie nakłady inwestycyjne będą również dotyczyć elektrowni węglowych z technologią wychwytywania i składowania CO₂ (Carbon Capture and Storage – CCS). Ocenia się, że będą one kształtować się na poziomie 1400-2000 USD'05/kW netto.

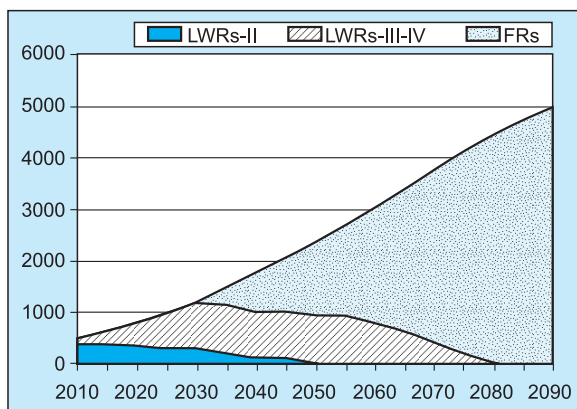
Perspektywy rozwoju jądrowych technologii wytwarzania energii

W rozwoju technologii jądrowego wytwarzania energii w XXI wieku, w skali globalnej można wyróżnić dwa etapy:

- etap otwartego cyklu paliwowego z dominacją reaktorów termicznych i kumulacją plutonu w paliwie wypalonym i jego stopniowym odzyskiwaniem w procesie przeróbki paliwa wypalonego;
- etap rozwoju reaktorów prędkich powielających, zapewniających paliwo jądrowe na długie lata eksploatacji EJ, co pozwoli na zastąpienie coraz trudniejszych do pozyskania organicznych paliw kopalnych.

Warunkiem rozwoju reaktorów prędkich (FBR – Fast Breeder Reactors) jest opanowanie ich bezpiecznej konstrukcji. W tym zakresie największe doświadczenia ma Rosja, Francja i Japonia. Analiza rozmaitych scenariuszy rozwoju jądrowego wytwarzania energii wykazuje [7] największe prawdopodobieństwo scenariusza z szybkim wzrostem EJ z reaktorami FBR po 2030 r. (rys. 5), który zapewnia najwyższe bezpieczeństwo dostaw energii elektrycznej, najniższe koszty wytwarzania przy spełnieniu wymogów bezpieczeństwa ekologicznego.

Konkretne perspektywy rozwoju technologii jądrowego wytwarzania energii elektrycznej są określone w strategii rozwoju energetyki jądrowej Japonii, opublikowanej w 2006 r. [8]. Podstawowym celem tej strategii jest zapewnienie udzia-



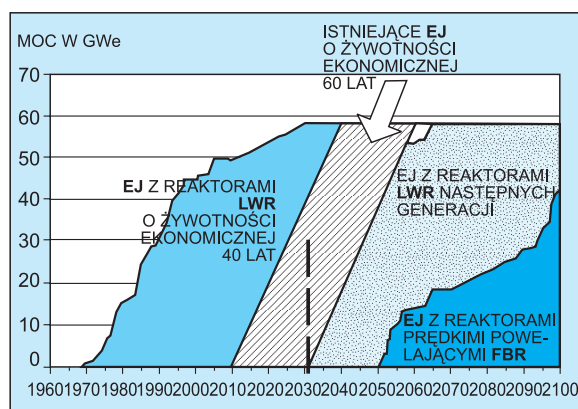
Rys. 6. Przewidywana struktura rozwoju mocy EJ w GW w XXI wieku w skali globalnej [7] (LWR reaktory lekkowodne kolejnych generacji, FBR – reaktory prędkie powielające)

tu energetyki jądrowej w Japonii na poziomie 30-40% całkowitej produkcji energii elektrycznej, z perspektywą wzrostu tego udziału po 2030 r.

Pierwszym etapem tej strategii jest maksymalne wykorzystanie istniejącego jądrowego potencjału wytwórczego energii elektrycznej (55 EJ o mocy 49580 MW), w tym zwiększenie żywotności ekonomicznej EJ z 40 do 60 lat (rys. 6). Drugi etap to sukcesywne oddawanie do eksploatacji EJ będących obecnie w budowie (13 EJ o mocy 17230 MW). Na tym etapie przewiduje się dokończenie budowy zakładu przeróbki paliwa wypalonego, aby zapewnić ekstrakcję rozszczepialnych pierwiastków i produkcję paliwa uzupełniającego wsady paliwowe typu MOX do reaktorów termicznych. Przewiduje się również budowę składowiska odpadów wysokoaktywnych.

Trzeci etap to szybki rozwój EJ z reaktorami prędkimi, które mają wejść do komercyjnej eksploatacji po 2050 r. Wtedy praktycznie Japonia uzyska niezależność od dostaw paliwa jądrowego z zagranicy.

Wielkie nadzieje w skali globalnej pokłada się w rozwoju przyszłościowej generacji technologii jądrowych wytwarzania energii, a mianowicie **reaktorów wykorzystujących zjawisko fuzji jąder pierwiastków lekkich**. Wiele krajów uczestniczy w projekcie ITER, którego celem jest zbudowanie eksperymentalnej jednostki wytwórczej energii elektrycznej i przygotowanie budowy konstrukcji pilotowej, a następnie komercyjnej. Projekt realizowany jest w Cadarache (Francja), gdzie prowadzone są eksperymentalne prace nad opianowaniem przede wszystkim stabilnej plazmy w temperaturach umożliwiającą zapoczątkowanie i utrzymywanie reakcji termojądrowej oraz opracowanie i przetestowanie materiałów konstrukcyjnych wytrzymujących takie warunki. Uczestnikami badań są uczeni i inżynierowie



Rys. 6. Przewidywana struktura jądrowego wytwarzania energii elektrycznej w Japonii XXI w. [8]

z krajów Unii Europejskiej, reprezentowanej przez EURATOM, Japonii, Chin, Indii, Korei Południowej, Rosji i USA. Budżet projektu wynosi ok. 5 mld € na okres 20 lat. Ostrożnie przewiduje się, że komercyjna postać takiego reaktora powstanie pod koniec XXI wieku.

W najbliższej perspektywie budowane będą jednak przede wszystkim reaktory wodne ciśnieniowe typu PWR (Pressurized Water Reactor) III i IV generacji o znacznie podwyższonych parametrach bezpieczeństwa dzięki zastosowaniu tzw. pasywnych układów bezpieczeństwa. Francuska firma Areva oferuje reaktor dla bloku jądrowego 1600 MW (EPR) z czasem eksploatacji 60 lat. Amerykańska firma Westinghouse opracowała reaktory AP600 i AP1000, które mają być budowane w USA i Chinach. General Electric opracowała reaktor typu ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) o mocach od 1200 i 1500 MW. W Rosji rozwijane są reaktory typu WWER o mocy 1000 MW z perspektywą jej zwiększenia do 1600 MW. W Kanadzie opracowano nowe typy reaktorów Candu 6 i ACR 1000 o mocach 700 i 1000 MW, które są oferowane również w skali globalnej, zwłaszcza krajom, które mają dostęp do własnych złóż rudy uranowej. W RPA rozpoczęto budowę prototypowego reaktora wysokotemperaturowego chłodzonego gazem małej mocy ze złożem paliwa jądrowego w postaci sfer, który może znaleźć zastosowanie jako źródło energii w chemicznych procesach technologicznych.

Pozostają jednak jeszcze do rozwiązania niektóre problemy energetyki jądrowej. Należą do nich zagadnienia bezpiecznego składowania paliwa wypalonego, odpadów wysokoaktywnych oraz obrony przed atakami terrorystycznymi, a także nieprolifracji materiałów jądrowych. Nie są to jednak problemy, które mogą utrzymywać negatywne nastawienie do tej technologii, ponieważ trudność tych zagadnień jest często wyolbrzymiana.

Zamierzenia rozwoju energetyki jądrowej w niektórych krajach³

Od kilku lat rozpoczęły się w wielu krajach przygotowania do rewitalizacji energetyki jądrowej lub zintensyfikowania jej rozwoju [2, 10]. Znacząca zmiana polityki w odniesieniu do energetyki jądrowej ma miejsce w **USA**, gdzie w 2002 r. ogłoszono i podjęto realizację programu *Nuclear Power 2010*. W 2005 r. uchwalono Ustawę o nowej polityce energetycznej (EPACT 2005). W 2006 r. 10 firm energetycznych zgłosiło zamiar uzyskania nowych licencji na budowę i eksploatację EJ (tzw. COL – Construction and Operation License). W ustawie ENACT 2005 przewiduje się rozszerzenie o 20 lat ustawy *Price-Anderson Act*, która ogranicza odpowiedzialność za ewentualne szkody wyrządzone osobom trzecim do kwoty 10 mld USD. Dla pierwszych EJ o sumarycznej mocy 6000 MW przewidziano tzw. kredyt podatkowy w wysokości 1,8 US\$/kWh na okres 8 lat i gwarancje rządowe dla kredytów inwestycyjnych do 80%. Oprócz tego państwo będzie okazywać pomoc publiczną na pokrycie ewentualnego wzrostu kosztów wynikających z przedłużenia planowanych okresów budowy. Niezależnie będą obowiązywać uproszczone procedury uzyskiwania licencji na przedłużenie eksploatacji istniejących EJ.

We **Francji** dzięki energetyce jądrowej i wodnej, dostarczających odpowiednio 78% i 12% energii elektrycznej, udział importu w zużyciu energii pierwotnej wynosi około 50%. Firma Electricite de France rozpoczęła budowę EJ Flamanville z reaktorem wodnym ciśnieniowym o nazwie EPR (European Power Reactor) w oparciu o dostawy firmy Areva. U uruchomienie pierwszego bloku objętego nowym programem przewiduje się w 2012 r.

Chiny, największy rozwijający się kraj świata, planują do roku 2020 czterokrotny wzrost PKB, dwu i półkrotny wzrost zapotrzebowania na energię pierwotną i dwukrotny wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną z obecnego poziomu zużycia na mieszkańca na poziomie 1200 kWh/cap. Do tego roku planuje się wzrost łącznej mocy zainstalowanej elektrowni jądrowych z 6,6 GW obecnie do 36-40 GW, tak aby ich udział w produkcji energii elektrycznej wyniósł 4% w roku 2020. Jest to niezwykle ambitny program, który może okazać się trudny w realizacji. Planuje się rozwój energetyki jądrowej w oparciu o reaktory wodne ciśnieniowe z szerokim zastosowaniem standaryzacji produkcji urządzeń, co przy długich

seriach produkcji reaktorów energetycznych może znacznie obniżyć koszty jednostkowe.

Obecny udział EJ w **Rosji**, w łącznej mocy systemu elektroenergetycznego wynosi 11,5% (21,7 GW), a w produkcji energii elektrycznej 16,5% (138,4 TWh), w tym w europejskiej części Federacji Rosyjskiej 21,5%. Planuje się w okresie do roku 2020 wzrost łącznej mocy zainstalowanej w elektrowniach jądrowych o 18-23 GW. Rosja, w zatwierdzonym ostatnio przez prezydenta Putina *Federalnym Programie Rozwoju Energetyki*, zamierza zwiększyć udział mocy jądrowej do 25% w roku 2030, w oparciu o sprawdzone w eksploatacji reaktory WWER 1000 z perspektywą zwiększenia mocy do 1500 MW. W ramach tego programu będą również rozwijane technologie reaktorów prędkich w oparciu o opanowany eksploatacyjnie typ reaktora BN 600. Rosja deklaruje przyjmowanie paliwa wypalonego z reaktorów termicznych, bądź to na przerób bądź długotrwałe przechowywanie w suchych przechowalnikach.

W **Indiach** zamierza się zwiększyć udział energetyki jądrowej w ogólnej produkcji energii elektrycznej z 3,3% w roku 2004 do 25% w roku 2050, co oznacza wzrost mocy zainstalowanej w elektrowniach jądrowych z 2,5 GW do 275 GW. W ramach programu rozwoju EJ przewiduje się kontynuowanie budowy rozwiniętych w Indiach termicznych reaktorów ciśnieniowych z uranem naturalnym, chłodzonych i moderowanych ciężką wodą. W tym czasie rozpoczęto budowę reaktora PFBR o mocy 470 MWe. W przyszłości zamierza się włączyć do cyklu paliwowego wykorzystywanie toru, którego bogate zasoby geologiczne występują w Indiach w pokładach piasków monocytowych. W ten sposób Indie chcą zaspokoić potrzeby swojego całego programu jądrowego, z ominięciem procesu wzbogacania uranu naturalnego.

Moc zainstalowana EJ w **Korei Południowej** wynosi obecnie 16,8 GW. Dostarczają one 40% energii elektrycznej. Konieczność obniżenia zależności od importowanej energii oraz przewidywany wzrost zużycia energii elektrycznej o 70% do roku 2020 powodują, że planowany jest dalszy rozwój energetyki jądrowej. Do roku 2015 zamierza się oddać do użytku 6 nowych bloków o mocy jednostkowej 1000 MW oraz dwa bloki nowszej generacji o mocy jednostkowej 1400 MW.

W **Republice Południowej Afryki** w ciągu dwudziestu lat planuje się w podwojenie mocy zainstalowanej w systemie elektroenergetycznym i osiągnięcie powszechnej elektryfikacji kraju. Intensywny program badawczo-rozwojowy realizowany w szerokiej współpracy międzynarodowej zmierza do opanowania technologii elektrowni jądrowej z reaktorem wysokotemperaturowym

³ Rozbudowane informacje na temat stanu obecnego i zamierzeń rozwojowych energetyki jądrowej w poszczególnych krajach świata można znaleźć w publikacji Państwowej Agencji Atomistyki [10].

z paliwem kulowym w łożu usypanym, chłodzonym helem, w EJ w modułach o mocy jednostkowej około 120 MW. Planuje się uruchomienie obiektu demonstracyjnego około roku 2010.

Na **Węgrzech** cztery bloki elektrowni jądrowej Paks dostarczają krajowi 40% energii elektrycznej. W latach 2013-2017 będzie upływał 30 letni okres ich projektowej eksploatacji. Badania prowadzone w okresie ostatnich pięciu lat umożliwiły decyzję o przedłużeniu ich bezpiecznej eksploatacji o 20 lat. W sytuacji dużej zależności kraju od importu energii, istotny udział EJ w produkcji energii elektrycznej uważany jest za bardzo ważny z punktu widzenia bezpieczeństwa energetycznego kraju.

Na **Słowacji** występuje 90% zależność od importu paliw pierwotnych. Wyczerpane są możliwości budowy elektrowni wodnych oraz zamierzeń spełnienia wymogów Protokołu z Kioto. Jediną opcją ograniczenia importu paliw węglowodorowych jest rozwój energetyki jądrowej. Rząd podjął decyzję kontynuacji budowy bloków jądrowych Mochovce 3 i 4.

W **Rumunii** Towarzystwo Nuclearelectrica, utworzone z udziałem AECI z Kanady i Ansaldo z Włoch, zakończyło budowę drugiego bloku EJ Cernavoda. Obydwa bloki będą miały 18% udział w produkcji energii elektrycznej kraju. W roku 2004 rozpoczęto negocjacje z grupą potencjalnych inwestorów w sprawie dokończenia budowy trzeciego i czwartego bloku.

Po zakończeniu dwuletnich prac studialnych w **Bułgarii** wznowiono budowę bloku WWER 1000 w EJ Belene. Przewiduje się zakończenie budowy w roku 2011.

W roku 2004 rząd **Czech** zatwierdził politykę energetyczną kraju. Jednym z celów jest obniżenie obciążenia środowiska naturalnego i redukcja emisji CO₂ oraz ograniczenie zależności od importu energii pierwotnej. Realizacja tych celów przewiduje znaczny udział energetyki jądrowej w bilansie energetycznym kraju.

Narodowa strategia energetyczna **Litwy** zakłada, że zostanie ona krajem wykorzystującym paliwo jądrowe do produkcji energii elektrycznej, mimo zamknięcia EJ z reaktorem RBMK (typu czarnobylskiego) w Ignalinie. Trwają uzgodnienia dotyczące współpracy Polski, Łotwy i Estonii w budowie nowej EJ Ignalina.

Zamiast podsumowania

Wydaje się, że generalnie na świecie nie ma już wątpliwości, że energetyka jądrowa jest technologią wytwarzania energii elektrycznej, która może rozwiązać szereg problemów zapatrzenia świata

w energię. Dotyczy to przede wszystkim bezpieczeństwa dostaw energii w związku z wyczerpywaniem się zasobów paliw węglowodorowych, zagrożenia środowiska efektem cieplarnianym i wzrostu kosztów energii elektrycznej w związku z nieuchronnym wzrostem cen paliw węglowodorowych. Z tego powodu w wielu krajach obserwuje się renesans tej technologii, tym bardziej, że dotychczasowe doświadczenia eksploatacji wskazują na wysoki poziom bezpieczeństwa działania elektrowni jądrowych i niskie koszty wytwarzania energii elektrycznej w tego typu źródłach. Rozpoczął się swoisty wyścig krajów o dostęp do środków finansowych na kosztowne inwestycje w tym zakresie i dostęp do dostaw krytycznych elementów konstrukcji reaktorów. Istnieją poważne obawy, że Polska zbyt późno wystartuje do tego wyścigu z konsekwencjami trudnymi do wyobrażenia.

dr Mirosław Duda
Agencja Rynku Energii, Warszawa

Materiały referencyjne

1. Lauvernon Anne: "Nuclear Power must be more than a rich country's option", wystąpienie na XX Światowym Kongresie Energetycznym w Rzymie, 2007.
2. Hans – Holger Rogner and Alan McDonald, International Atomic Energy Agency (IAEA), "Nuclear Energy – Status and Outlook", referat na XX Światowym Kongresie Energetycznym w Rzymie, 2007.
3. World Energy Outlook 2006, International Energy Agency.
4. BP Statistical Review of World Energy, 2006.
5. Capros P., Hydrocarbons Outlook and Implications for Modelling and Analysis of Energy Prospects, National Technical University of Athens, Workshop Hydrocarbon Prospects and Energy Futures, European Commission Brussels, September 6-7, 2006.
6. Strupczewski A., Radović U.: „Koszty zewnętrzne wytwarzania energii elektrycznej w Polsce”, Biuletyn Miesięczny PSE nr 1, 2006.
7. Adamov E., Muraviev E., Orlov V., Dollezhal N.A. Research and Design Institute of Power Engineering, Russia, "Vision of Nuclear Power Options for XXI Century", referat na XX Światowym Kongresie Energetycznym w Rzymie, 2007.
8. Suzuki Yasuro, Ryosuke Yoshii, Current Status and Future Outlook of Nuclear Power Generation in Japan, referat na XX Światowym Kongresie Energetycznym w Rzymie, 2007.
9. Hay Jennifer, Spears Bill, France, "The ITER project — the road to fusion power", referat na XX Światowym Kongresie Energetycznym w Rzymie, 2007.
10. Stan i tendencje rozwojowe energetyki jądrowej na świecie w latach 2003-2006, publikacja Państwowej Agencji Atomistyki, Warszawa grudzień 2007.