

Prof. dr hab. Zdzisław Celiński
Przewodniczący Komitetu Energetyki Jądrowej SEP

Energetyka jądrowa w świecie¹⁾ (stan obecny i perspektywy)

Część I

Energetyka jądrowa wytwarza dzisiaj około 16% energii elektrycznej produkowanej w świecie. Jest ona podstawowym lub jednym z podstawowych źródeł energii elektrycznej w wielu krajach rozwiniętych.

Sejm RP, podejmując uchwałę 9 listopada 1990 roku o założeniach polityki energetycznej Polski do roku 2010, wymienia możliwość budowy elektrowni jądrowych nowych generacji zapewniających bezpieczeństwo i efektywność ekonomiczną.

Podstawowym jednak warunkiem wprowadzenia opcji jądrowej do rozważań jest stale uzupełniana wiedza o stanie i tendencjach rozwojowych energetyki jądrowej na świecie. Ma się do tego przyczynić niniejszy artykuł.

Aktualny stan energetyki jądrowej

W końcu 2002 roku pracowało w świecie 441 jądrowych reaktorów energetycznych (tab. 1) o sumarycznej mocy elektrycznej zainstalowanej ponad 358 tys. MW. Wyprodukowały one ponad 2574 TWh energii elektrycznej, co stanowi ok. 16% całkowitej światowej produkcji energii elektrycznej. Procentowy udział energii elektrycznej wyprodukowanej w elektrowniach jądrowych w ogólnej produkcji energii elektrycznej przekroczył w 9 krajach – 40%, w 13 krajach – 30% a w 20 krajach – 20% (tab. 1). W 15 krajach członkowskich UE, do której w roku 2004 wstępuje Polska, udział ten wynosił 34%.

Energetyka jądrowa zebrała od początku swojego istnienia ogromne doświadczenia eksploatacyjne, w sumie ponad 11 000 reaktorolat. W żadnym z dominujących w świecie reaktorów typu LWR („lekkowodnych” – PWR i BWR) nie zdarzyła się awaria, która by pociągnęła za sobą śmierć lub poważne uszkodzenia zdrowia kogoś z personelu lub okolicznej ludności.

W końcu roku 2002 znajdowały się w budowie 32 bloki jądrowe o mocy elektrycznej ok. 27 tys. MW.

¹⁾ Niniejszy artykuł stanowi część pierwszą raportu o współczesnej energetyce jądrowej. Część druga zostanie zamieszczona w następnym numerze *Energetyki* (Redakcja).

Tabela 1

Reaktory energetyczne w świecie
(stan na 01.01.2003 r.) [1]

Kraj	Produkcja energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych w 2002 r.		Reaktory pracujące		Reaktory w budowie	
	% udział ^{*)}	TWh	liczba	MW	liczba	MW
Litwa	80,12	12,90	2	2 370		
Francja	77,97	415,50	59	63 073		
Słowacja	65,41	17,95	6	2 408	2	776
Belgia	57,32	44,74	7	5 760		
Bułgaria	47,30	20,22	4	2 722		
Szwecja	45,75	65,57	11	9 432		
Ukraina	45,66	73,38	13	11 207	4	3 800
Słowenia	40,74	5,31	1	676		
Armenia	40,54	2,09	1	376		
Szwajcaria	39,52	25,69	5	3 200		
Korea Płd.	38,62	113,13	18	14 890	2	1 920
Węgry	36,14	12,79	4	1 755		
Japonia	34,47	313,81	54	44 287	3	3 696
Niemcy	29,85	162,25	19	21 283		
Finlandia	29,81	21,44	4	2 656		
Hiszpania	25,76	60,28	9	7 574		
Czechy	24,54	18,74	6	3 468		
W. Brytania	22,43	81,08	31	12 252		
Taiwan	20,53	33,94	6	4 884	2	2 700
St.Zj.Am.Płn.	20,34	780,10	104	98 230		
Rosja	15,98	129,98	30	20 793	3	2 825
Kanada	12,32	70,96	14	10 018		
Rumunia	10,33	5,11	1	655	1	655
Argentyna	7,23	5,39	2	935	1	692
Płd.Afryka	5,87	11,99	2	1 800		
Meksyk	4,07	9,35	2	1 360		
Holandia	4,00	3,69	1	450		
Brazylia	3,99	13,84	2	1 901		
Indie	3,68	17,76	14	2 503	7	3 420
Pakistan	2,54	1,80	2	425		
Chiny	1,43	23,45	7	5 318	4	3 275
Iran					2	2 111
Korea Płn.					1	1 040
R A Z E M		2 574,17	441	358 661	32	26 910

^{*)} Procentowy udział elektrowni jądrowych w ogólnej produkcji energii elektrycznej.

Zmiany w ostatnich latach

Stale rośnie średni współczynnik dyspozycyjności bloków jądrowych – w roku 2001 osiągnął wartość 83,4% (w 2000 – 82,1%, w 1991 – 74,2%).

W wielu krajach nie zwiększając liczby pracujących bloków jądrowych podwyższono znacznie produkcję energii elektrycznej w wyniku zwiększenia współczynnika dyspozycyjności oraz podwyższania nominalnej mocy zainstalowanej bloków.

Na przykład w USA przy pracujących 104 blokach jądrowych zwiększono moc zainstalowaną (*uprating*) w latach 2000–2002 o 819 MW, a produkcję energii o 27 TWh; w Niemczech w tym samym okresie (19 bloków jądrowych) zwiększono moc o 161 MW, a produkcję energii o blisko 3 TWh; we Francji (59 bloków) zwiększono produkcję energii o ponad 20 TWh.

Sześć nowych bloków jądrowych przyłączono do sieci w 2000 roku, 3 w 2001 roku i 6 w 2002 roku:

- 2000: Indie: *Kaiga-1, Rajasthan-3, Rajasthan-4*
Pakistan: *Chasnupp*
Brazylia: *Angra-2*
Czechy: *Temelin-1*
- 2001: Japonia: *Onagawa-3*
Korea Płd.: *Yonggwang-5*
Rosja: *Rostów-1*
- 2002: Chiny: *Ling Ao-1, Ling Ao-2, Qinshan 2-1, Qinshan 3-1*
Czechy: *Temelin-2*
Korea Płd.: *Yongwan-6*

Wycofano z eksploatacji 3 bloki jądrowe w 2000 roku oraz 4 w 2002 roku:

- 2000: Ukraina: *Czarnobyl-3*
W. Brytania: *Hinkley Point A-1, Hinkley Point A-2*
- 2002: Bułgaria: *Kozłoduj-1, Kozłoduj-2*
W. Brytania: *Bradwell-A, Bradwell-B*.

W roku 2002 rozpoczęto budowę siedmiu nowych bloków jądrowych: sześciu w Indiach oraz jednego w Korei Płd.

Dzisiaj, jak i w najbliższej przyszłości budowa nowych bloków jądrowych będzie się koncentrować w Azji. Z 32 bloków jądrowych w budowie (p. tab. 1), 19 zlokalizowanych jest w Chinach, obu Koreach, na Tajwanie, w Japonii i Indiach. Siedemnaście z 26 ostatnio uruchomionych bloków przypada na Daleki Wschód i Azję Płd.

W Europie Zachodniej znajduje się 146 bloków jądrowych. Ostatni blok przyłączono do sieci we Francji w 1999 roku (*Civaux-2*).

Zainstalowana moc w elektrowniach jądrowych w najbliższych latach pozostanie prawdopodobnie na obecnym poziomie pomimo prób niektórych kręgów politycznych wyłączania ich z eksploatacji (Niemcy, Szwecja). Wzrost mocy nastąpi jedynie w Finlandii, gdzie zapadła już decyzja o budowie reaktora dużej mocy (prawdopodobnie typu PWR).

Typy reaktorów energetycznych

W tabeli 2 zestawiono dane na temat pracujących i znajdujących się w budowie reaktorów energetycznych wg ich typów.

Tabela 2

Reaktory energetyczne wg typów [2]

Typ reaktora	W eksploatacji		W budowie	
	liczba bloków	moc el. w MW	liczba bloków	moc el. w MW
PWR	214	201 298	8	8 144
WWER	50	32 926	10	8 310
BWR	90	78 017	1	1 067
ABWR	2	2 630	4	5 329
GCR	12	2 484	0	0
AGR	14	8 380	0	0
FBR	3	1 039	0	0
RBMK	17	12 589	1	925
PHWR	38	19 150	8	3 135
HWWLWR	1	148	0	0
RAZEM	441	358 661	32	26 910

Reaktory moderowane lekką wodą i chłodzone wodą pod ciśnieniem (w wykonaniu firm zachodnich oznaczane jako reaktory typu PWR, a w wykonaniu rosyjskim – WWER) szeroko rozpowszechnione w całym świecie stanowią dominujący dzisiaj typ reaktora. Mają one ponad 65-procentowy udział w wytwarzaniu energii elektrycznej przez energetykę jądrową.

Drugą grupę reaktorów moderowanych i chłodzonych lekką wodą, ale w tym przypadku wodą wrzącą, stanowią reaktory typu BWR oraz ich ulepszona wersja ABWR. Razem, określane czasem jako reaktory lekkowodne (LWR) – chłodzone i moderowane zwykłą („lekką”) wodą, mają ponad 87-procentowy udział w produkcji energii elektrycznej w energetyce jądrowej.

Reaktory lekkowodne zebrały bardzo duże doświadczenia eksploatacyjne (ponad 9000 reaktorolat), począwszy od roku 1957, kiedy to uruchomiono pierwszą elektrownię z reaktorem tego typu w Shippingport, USA. Już wcześniej od 1955 roku tego typu reaktory używane były do napędu amerykańskich łodzi podwodnych. Reaktory LWR okazały się konstrukcjami niezwykle bezpiecznymi, gdyż w czasie blisko pół wieku ich eksploatacji, w szeregu mniejszych i większych awarii, jakie się wydarzały (największa z nich w *Three Mile Island* – 1979) nie było śmiertelnych ofiar ani też nikt z personelu elektrowni, ani z jej otoczenia nie doznał uszczerbku na zdrowiu.

Reaktory typu WWER pracują prawie wyłącznie w krajach b. ZSRR oraz w krajach b. tzw. obozu socjalistycznego. Wyjątek stanowią 2 bloki WWER pracujące w Finlandii.

Reaktory chłodzone gazem (CO₂) GCR oraz ich ulepszona wersja AGR pracują dzisiaj wyłącznie w Wielkiej Brytanii.

Reaktory powielające na neutronach prędkich FBR pracują jedynie (po jednym bloku) w Rosji, Francji i Japonii, raczej jako jednostki demonstracyjne.

Reaktory kanałowe z moderatorem grafitowym chłodzone wrzącą wodą RBMK (typu czarnobylskiego) pracowały poprzednio jedynie na terenie b. ZSRR. Z uwagi na niższe parametry bezpieczeństwa nie mogły być eksportowane za granicę ZSRR.

W chwili obecnej 15 reaktorów (po modernizacji systemów bezpieczeństwa) pracuje na terenie Rosji, a 2 bloki, każdy o nominalnej mocy 1500 MW, pracują w elektrowni *Ignalina* na Litwie. Chociaż przeszły one gruntowną modernizację systemów bezpieczeństwa w celu dostosowania do standardów zachodnich, to pracują na obniżonej mocy do 1300 MW. Nie planuje się nigdzie budowy nowych reaktorów tego typu.

Reaktory ciężkowodne, chłodzone i moderowane ciężką wodą pod ciśnieniem PHWR, często zwane reaktorami typu CANDU (opracowanego i produkowanego przez przemysł kanadyjski), pracują obecnie w wielu krajach: Kanadzie, Indiach, Korei Płd., Argentynie, Pakistanie, Rumunii.

Typ ten jest szczególnie atrakcyjny dla krajów rozwijających się, gdyż paliwo oparte na uranie naturalnym nie wymaga kosztownego procesu wzbogacania. Do tej grupy należy również reaktor typu HWLWR – reaktor wrzący, chłodzony lekką wodą i moderowany ciężką wodą. Jedyń egzemplarz tego typu reaktora pracuje w Japonii.

Energetyka jądrowa w krajach sąsiadujących z Polską

Polska otoczona jest krajami, które z wyjątkiem Białorusi mają mniej lub bardziej rozwiniętą energetykę jądrową.

Niemcy

W Niemczech pracuje 19 bloków jądrowych w 14 elektrowniach (14 reaktorów typu PWR i 6 – BWR). Moc bloków waha się od 357 MW (*Obrigheim*, 1969) do 1450 MW w ostatnio uruchamianych (koniec lat 80.) blokach. Udział elektrowni jądrowych w wytwarzaniu energii elektrycznej utrzymuje się na poziomie ok. 30% (resztę uzyskuje się z: węgla kamiennego – 30%, węgla brunatnego – 20%, gazu ziemnego – 6%, elektrowni wodnych – 5%).

Energetyka jądrowa stała się w Niemczech w latach 90. obiektem kontrowersji politycznych. W wyniku tego jej rozwój został zahamowany (ostatnia elektrownia jądrowa uruchomiona została w roku 1989). Rządząca do 1998 r. koalicja chadecko-liberalna była pozytywnie nastawiona do energetyki jądrowej, partia socjaldemokratyczna – niechętnie, Zieloni – wręcz wrogo. Gdy w roku 1998 doszła do władzy koalicja: socjaldemokrati-Zieloni, jednym z pierwszych postulatów było możliwie jak najszybsze zamknięcie elektrowni jądrowych. Nie było to łatwe na bazie istniejącego prawa – wymagałoby wypłacenia właścicielom elektrowni olbrzymich odszkodowań i znalezienia zastępczych źródeł zaopatrzenia w energię elektryczną. Po długich pertraktacjach zawarto porozumienie.

Przyjęto średni okres eksploatacji elektrowni jądrowej – 32 lata, po osiągnięciu którego elektrownie będą wyłączone. Średni okres eksploatacji pracujących elektrowni wynosi dzisiaj ok. 20 lat. Operowanie uśrednionym okresem eksploatacji pozwala na wcześniejsze zrezygnowanie z małych, mniej ekonomicznych elektrowni na rzecz przedłużenia pracy najbardziej sprawnym, nowoczesnym elektrowniom. Sytuacja polityczna w Niemczech wskazuje na duże prawdopodobieństwo wygrania następných wyborów przez opozycję chadecką, która już zapowiedziała, że wszystkie te porozumienia odnośnie do przedwczesnego zamykania elektrowni jądrowych, porozumienia motywowane ideologicznie, a szkodliwe dla gospodarki, będą anulowane. Niezależnie od tych kontrowersji politycznych przemysł niemiecki spokojnie pracuje wspólnie z francuskim nad opracowaniem projektu wspólnego reaktora EPR (European Power Reactor).

Szwecja

W czterech elektrowniach (*Barsebeck*, *Forsmark*, *Oskarshamn*, *Ringhals*) pracuje obecnie 11 bloków jądrowych (8 typu BWR i 3 typu PWR) o mocach od 465 MW (uruchomione w 1972 roku) do 1200 MW (z 1985 roku). Wszystkie położone nad brzegiem morza wykorzystują do chłodzenia wodę morską.

W roku 1980, po ogólnonarodowym referendum nt. przyszłości energetyki jądrowej w Szwecji, parlament podjął decyzję o zamknięciu do roku 2010 wszystkich 12 bloków jądrowych. Decyzję tę jako nierealną inny parlament unieważnił w roku 1997, ale zdecydował o bezwarunkowym wyłączeniu w roku 1998 (po ok. 25-letniej eksploatacji) pierwszego bloku w elektrowni *Barsebeck* (położona naprzeciw Kopenhagi, po drugiej stronie cieśniny Oresund) o mocy 600 MW oraz drugiego, bliźniaczego bloku w roku 2001, ale pod warunkiem, że zredukowana moc zostanie zrekomensowana oszczędnościami w zużyciu energii oraz zastąpiona mocą z nowych, oddanych w tym czasie do użytku, źródeł odnawialnych. Decyzję podjęto mimo wyników sondaży opinii publicznej wskazujących na 65-procentowe poparcie utrzymania w ruchu elektrowni jądrowych dopóki są opłacalne i pracują bezpiecznie. Okazało się później, że ubytek mocy wywołany wyłączeniem pierwszego bloku musiał zostać skompensowany głównie importem energii z duńskich elektrowni węglowych.

Krytykę ze strony OECD wywołało zastępowanie czystych ekologicznie źródeł energii źródłami zanieczyszczającymi atmosferę i emitującymi CO₂. We wrześniu 2000 roku premier Szwecji bezterminowo odłożył decyzję zamknięcia drugiego bloku. Wyłączenie pierwszego bloku kosztowało szwedzkich podatników ok. 600 mln USD – sumę, którą rząd musiał skompensować straty poniesione przez firmę – właściciela elektrowni.

Sondaż opinii publicznej przeprowadzony w roku 2000 na południu Szwecji wykazał, że 86% zapytanych było za dalszą eksploatacją obu bloków. Również 88% Szwedów i 73% Duńczyków nie obawiało się awarii w tych reaktorach [11].

Finlandia

Cztery bloki jądrowe eksploatowane są w dwóch elektrowniach: *Loviisa* (2xWWER-440) i *Olkiluoto* (2xBWR 870 MW). W wyniku szeregu działań modernizacyjnych powiększono nominalną moc reaktorów BWR o 17%, a WWER-440 o 10% (do 488 MW netto). Obie elektrownie przez wiele lat miały najwyższe współczynniki dyspozycyjności wśród reaktorów energetycznych.

W związku ze wzrostem zapotrzebowania na energię elektryczną i koniecznością zwiększenia mocy wytwórczych wykonano wiele studiów porównawczych między różnymi opcjami wytwarzania. Wzięto w nich pod uwagę: elektrownie jądrowe, elektrownie gazowe pracujące w kombinowanym cyklu gazowo-parowym, kondensacyjne elektrownie węglowe, kondensacyjne elektrownie opalane torfem. Obliczono, że najniższe koszty wytwarzania (2.23 eurocentów/kWh) uzyskuje się w elektrowni jądrowej, najwyższe (3.13 eurocentów/kWh) w elektrowni spalającej torf. W roku 2002 zapadła decyzja budowy piątego bloku jądrowego. Do producentów reaktorów wysłano zaproszenia do składania ofert na reaktor lekkowodny o mocy 1000–1600 MW. Oddanie bloku do eksploatacji planuje się na rok 2009.

Rosja

W eksploatacji znajduje się obecnie 10 elektrowni jądrowych z 30 reaktorami. W budowie znajdują się 2 bloki WWER-1000 (*Balakowo-5*, *Kalinin-3*) oraz jeden RBMK (*Kursk-5*). Podjęto decyzję o podwojeniu do roku 2030 produkcji energii elektrycznej przez elektrownie jądrowe ze 129 TWh w roku 2000 do 270–300 TWh. Planuje się budowę reaktora nowej generacji WWER-640 w Sosnowym Borze pod Petersburgiem oraz trzech bloków WWER-1000 (*Rostów-2*, *Kalinin-3*, *Nowoworoneż-6*).

W dalszej perspektywie (po roku 2005) planuje się podjęcie budowy na Uralu dwóch reaktorów prędkich BN-800. Jednym z motywów tych decyzji jest chęć zmniejszenia wysokiego udziału gazu w produkcji energii elektrycznej (ok. 73% w części europejskiej Rosji). Szereg elektrowni pracujących w podstawie obciążenia opalanych jest gazem. Przyczyną tego jest nieracjonalność cen gazu na wewnętrznym rynku – są one sześciokrotnie niższe od cen światowych [11].

Elektrownie jądrowe w Rosji pracują ze stosunkowo niskim współczynnikiem obciążenia (0,6–0,7), czego główną przyczyną są trudności finansowe (odbiorcy zalegają z opłatami za energię, elektrownia za dostarczane paliwo, pracownicy otrzymują wynagrodzenie z opóźnieniem). Rozważane są plany budowy pływających elektrowni jądrowych o niewielkiej mocy (35 MW) przeznaczonych do zasilania nadmorskich rejonów płn.-wsch. Rosji oddalonych od sieci elektroenergetycznych. Przemysł energetyczny Rosji jest dostawcą reaktorów i paliwa reaktorowego do wielu krajów. Poza zawartymi już kontraktami na budowę bloków jądrowych w Iranie, Indiach i Chinach prowadzone są rozmowy na dostawę elektrowni jądrowych do Kazachstanu, Indonezji, na Kubę.

W roku 2000 pojawiła się propozycja budowy wspólnie z przemysłem japońskim dużej elektrowni jądrowej (12 000 MW) we wschodniej Syberii, nastawionej na dostawę energii elektrycznej do Japonii.

W końcu roku 2000 przyjęto ustawę dopuszczającą import paliwa wypalonego, jego przerób i magazynowanie powstałych odpadów promieniotwórczych na terenie Rosji. Jest to bardzo atrakcyjna propozycja dla zagranicznych eksploatatorów elektrowni.

W roku 1998 podpisano w Moskwie porozumienie o współpracy z USA w wykorzystaniu w elektrowniach jądrowych plutonu z likwidowanych głowic jądrowych. Przewidywano zagospodarowanie po ok. 50 ton plutonu w każdym z krajów. Pluton jest używany do produkcji paliwa reaktorowego typu MOX (mieszanina tlenków uranu i plutonu). Paliwo tego typu jest coraz powszechniej wykorzystywane w reaktorach energetycznych. Produkowane na skalę przemysłową jest dzisiaj tylko we Francji (*Caradache*, *Marcoule*), Wielkiej Brytanii (*Sellafield*) i Belgii (*Dessel*). Przewiduje się budowę w Rosji zakładu produkcji paliwa MOX.

W roku 1999 kilka firm zachodnich (z USA, Kanady, Niemiec i Francji) podpisało umowy o zakupie uranu o wzbogaceniu w U-235 do 5%, pochodzącego z rozcieńczenia w rosyjskich zakładach 500 ton wysokowzobogaconego uranu uzyskanego z demontażu głowic jądrowych.

Litwa

W elektrowni *Ignalina* na Litwie pracują dwa reaktory typu RBMK o mocy nominalnej po 1500 MW.

Były to dwa prototypy reaktorów RBMK tej wielkości – moc nominalna innych reaktorów RBMK wynosiła 1000 MW. Obecnie oba pracują na zmniejszonej do 1300 MW mocy. Elektrownia produkuje powyżej 80% energii elektrycznej wytwarzanej na Litwie, z czego ok. 50% jest eksportowane do krajów b. ZSRR (Rosja, Łotwa, Estonia).

W początku lat 90. wprowadzono szereg modyfikacji w celu podniesienia poziomu bezpieczeństwa pracy elektrowni. Rząd litewski chciał utrzymać eksploatację elektrowni do roku 2020 zgodnie z projektowanymi założeniami eksploatacyjnymi.

W ramach negocjacji o członkostwo Litwy w UE, w roku 1999 ugiął się pod naciskiem UE i zgodził się na zamknięcie bloku 1 w roku 2005, a bloku 2 w roku 2009 (odpowiednio po 21 i 22 latach eksploatacji). Warunkiem realizacji porozumienia jest uzyskanie przez Litwę pomocy w finansowaniu kosztów likwidacji elektrowni i innych kosztów z nią związanych.

Aby wykorzystać istniejącą na terenie elektrowni infrastrukturę, której wartość – jak się ocenia – może stanowić ok. 25% nakładów na budowę nowej elektrowni, podjęto studia (wspólnie z Łotwą i Estonią) nad możliwością budowy na tym terenie elektrowni jądrowej z reaktorem o mocy 1000–1600 MW (w nieformalnych dyskusjach wysuwana jest idea włączenia Polski do tego przedsięwzięcia).

Białoruś

Jedyny z sąsiadów Polski nie dysponujący elektrownią jądrową. Ostatnio władze białoruskie wykazują wzmożone zainteresowanie budową elektrowni jądrowej z reaktorami typu WWER. Wytypowano wstępnie trzy możliwe lokalizacje we wschodniej Białorusi. Władze białoruskie poszukują źródeł finansowania budowy pierwszej elektrowni.

Ukraina

Na Ukrainie pracuje 13 bloków jądrowych w czterech elektrowniach. Dwa najstarsze reaktory (w elektrowni *Równno*) uruchamiane w początku lat 80. to WWER-440, pozostałe to WWER-1000. W budowie znajdują się 4 reaktory WWER-1000 (3 w elektrowni *Chmielnicki*, jeden w elektrowni *Równno*). W elektrowni w Czarnobylu, w której wydarzyła się w roku 1986 największa w dziejach energetyki jądrowej awaria, ostatni z reaktorów RBMK (w bloku nr 3) został definitywnie wyłączony w 2000 r. Trwają prace studialne nad metodą umocnienia „sarkofagu” i sposobu finansowania tego przedsięwzięcia („składka” międzynarodowa).

Ukraina zdecydowanie stawia na utrzymanie wysokiego (dzisiaj powyżej 45%) udziału energetyki jądrowej w produkcji energii elektrycznej również w przyszłości. Głównym argumentem jest niska jakość węgla i wysokie koszty jego wydobycia. Ukraina nawiązuje współpracę z rządami krajów rozwiniętych i koncernami międzynarodowymi mającą na celu pomoc w wyborze optymalnego typu reaktora, który zastąpi wycofywane za kilkanaście lat wyeksploatowane już reaktory.

Słowacja

W elektrowni *Bohunice* pracują 4 reaktory WWER-440 uruchamiane w latach 1978–1985. W czasie pertraktacji o członkostwo UE naciskała na szybkie wycofanie reaktorów z eksploatacji. Rząd słowacki, po wydatkowaniu 200 mln USD na ich modernizację, był innego zdania. Po obopólnych ustępstwach uzgodniono, że dwa najstarsze bloki zostaną wyłączone w latach 2006–2008 (tj. po 25 latach eksploatacji). Budowę elektrowni *Mochovce* (4 bloki jądrowe WWER-440) rozpoczęto w 1983 r. i przerwano w 1993 r. ze względu na brak funduszy na jej dokończenie. Przygotowania do podjęcia budowy w połowie lat 90. napotkały gwałtowne protesty Austrii (powoływanie komisji ekspertów i kontreksperatów). Po modernizacji projektu budowę pierwszego bloku zakończono w 1998 r., a drugiego w 2000 r. Trwają dyskusje nad zakończeniem zaawansowanej w ok. 30% budowy bloków 3 i 4.

Czechy

Cztery bloki z reaktorami WWER-440 włączone do sieci w latach 1985–1987 pracują z powodzeniem w elektrowni *Dukovany*. W elektrowni *Temelin*, w pobliżu granicy z Austrią, pierwszy blok jądrowy z reaktorem WWER-1000 rozpoczął komercyjną eksploatację w marcu 2002 roku,

budowa drugiego bliźniaczego bloku została w tymże roku zakończona. Budowa tej elektrowni była w roku 2000 przyczyną kryzysu politycznego między Czechami a Austrią protestującą przeciwko jej uruchomieniu tak blisko granicy austriackiej. Kryzys z pomocą Parlamentu Europejskiego został zażegnany. Sondaż czeskiej opinii publicznej wykazał 45-procentowe poparcie dla uruchomienia drugiego bloku, przy 25% głosów przeciwnych. W 1993 roku rozpoczęto budowę składowiska paliwa wypalonego w głębokich pokładach geologicznych — oddanie do użytku planuje się na rok 2065. Z uwagi na znaczny import energii pierwotnej oraz przewidywanie konieczności znacznego jego zwiększenia w następnych dziesięcioleciach, rozważana jest budowa w przyszłości kolejnych dwóch bloków jądrowych w *Temelinie* [8].

Energetyka jądrowa w krajach Dalekiego Wschodu

Chiny

Chiny realizują intensywny program rozwoju energetyki jądrowej. Motywacją jest dążenie do zahamowania dalszego wzrostu zużycia węgla, a użycie gazu (importowanego w postaci ciekłej) jest zbyt kosztowne. Plany chińskie przewidują, że w roku 2010 wystąpi zapotrzebowanie na nowe moce w chińskim systemie elektroenergetycznym w wysokości 20 GW, a w roku 2020 w wysokości 50 GW. Część tych mocy dostarczą elektrownie jądrowe. Informacje z Komisji Planowania wskazują, że do roku 2010 w kilku prowincjach zamierza się podjąć budowę ok. 30 bloków jądrowych.

Rozpoczął się wyścig zachodnich koncernów producentów reaktorów do rynku chińskiego. Od lat znajdują się one w sytuacji kryzysowej z uwagi na zahamowanie rozwoju energetyki jądrowej w Europie Zachodniej i USA. W chwili obecnej pracuje w Chinach 7 reaktorów: 6 typu PWR oraz 1 typu CANDU 720 MW; 3 z nich uruchomiono w 1994 roku, 4 w roku 2002. *Framatome* dostarczyła 4 elektrownie po 990 MW, 2 o mocach 300 MW i 640 MW wyprodukowały firmy chińskie, reaktor typu CANDU dostarczyła firma kanadyjska. W budowie znajdują się 4 reaktory (chiński, kanadyjski i 2 rosyjskie). Na budowę nowych reaktorów składa oferty szereg innych firm dotychczas niezaangażowanych na rynku chińskim (głównie z powodu anulowanego dopiero w roku 1997 zakazu eksportu urządzeń elektrowni jądrowych do Chin, wydane go przez Kongres USA). Będą to firmy: *ABB-CE* oferująca reaktor PWR w Systemie 80+; *General Electric* — reaktor ABWR; *Westinghouse* — reaktor AP 1000; *NPI (Framatome + Siemens)* — reaktor EPR 1750. Rosja realizuje zawarte kontrakty na rozbudowę zakładów wzbogacania izotopowego uranu.

Obok rozwoju energetyki jądrowej Chiny angażują się coraz bardziej w prace badawcze nad reaktorami IV generacji. W 2000 roku uruchomiono doświadczalny reaktor wysokotemperaturowy o mocy 10 MW. W roku 1997 zatwierdzono projekt budowy doświadczalnego reaktora prędkiego o mocy 65 MW.

Japonia

Japonia jest potęgą jądrową na Dalekim Wschodzie. Pracują tam 54 reaktory o łącznej mocy 44 GW, w tym 29 reaktorów typu BWR, 23 – PWR, 1 – FBR i 1 – HWR. Pierwsze w świecie bloki III generacji reaktorów uruchomione zostały w Japonii w elektrowni *Kashiwazaki Kariwa* w latach 1996 i 1997 (reaktory typu ABWR, 1356 MW). Elektrownia ta z siedmioma blokami o łącznej mocy netto 7995 MW jest największą elektrownią jądrową na świecie. Przeprowadzone w roku 1999 porównania kosztów produkcji energii elektrycznej dla różnego typu elektrowni wykazały, że najtaniej produkowana jest energia elektryczna w elektrowni jądrowej. Gaz jest stosunkowo drogi, gdyż importowany z Zatoki Perskiej w postaci skroplonej.

W roku 2002 rząd Japonii zatwierdził plany budowy 9–12 nowych bloków jądrowych do roku 2010, co przyniesie wzrost produkcji energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych o 30% (udział elektrowni jądrowych w produkcji energii elektrycznej wzrośnie z 34 do 40%). Licencje zakupione w USA pozwoliły przemysłowi japońskiemu na uruchomienie produkcji reaktorów i urządzeń do reaktorów lekkowodnych III generacji. W budowie znajduje się zakład przerobu paliwa wypalonego oraz produkcji paliwa MOX pozwalającego na wykorzystanie plutonu odzyskanego z paliwa wypalonego. W 1998 roku uruchomiono pilotowy reaktor typu HTR o mocy 30 MW z moderatorem grafitowym, chłodzony helem (temperatura helu na wylocie – 950°C).

Korea Południowa

Podobnie jak w Japonii rozwój elektroenergetyki w Korei Płd. oparto na energetyce jądrowej ze względów strategicznych (aby zapewnić niezależność energetyczną przy zupełnym braku własnych zasobów ropy, gazu oraz minimalnych zasobach węgla kamiennego), jak i ekonomicznych. Wydatki na import paliwa dla 12 pracujących elektrowni jądrowych w roku 1997 wyniosły 240 mln USD. W przypadku importu ciekłego gazu dla porównywalnej mocy elektrowni gazowych koszt paliwa wyniósłby 3,5 mld USD. Dostawcą pierwszych reaktorów PWR był *Westinghouse*, późniejszych – *ABB-CE* we współpracy z przemysłem koreańskim. Obecny park 18 reaktorów ma powiększyć się do roku 2015 o 12 nowych reaktorów, w tym 4 reaktory zmodyfikowane przez przemysł koreański (jako APR 1400) o mocy jednostkowej 1450 MW. Udział elektrowni jądrowych w ogólnej produkcji energii elektrycznej ma wzrosnąć z 38 do 44,5% w roku 2015.

Energetyka jądrowa w niektórych krajach rozwiniętych

Stany Zjednoczone

W elektrowniach jądrowych USA pracują obecnie 104 reaktory (25 typu BWR oraz 79 typu PWR) o sumarycznej mocy blisko 100 000 MW.

Procentowy udział elektrowni jądrowych w ogólnej produkcji energii elektrycznej stanowi ok. 20%. Liczba ta daje nieco wypaczony obraz zależności kraju od energetyki jądrowej, gdyż elektrownie jądrowe zlokalizowane są wybitnie nierównomiernie – skupione są głównie we wschodnich stanach – w niektórych z nich udział elektrowni jądrowych w produkcji elektryczności przekracza 50%. Z różnych względów [14] rozwój energetyki jądrowej w USA jest od wielu lat hamowany.

Po roku 1977 nie rozpoczęto w USA budowy żadnej elektrowni jądrowej. Ostatnią elektrownią, której budowę rozpoczęto w roku 1977, a oddano do eksploatacji w 1986 roku była *River Brent*, BWR, 1000 MW.

W roku 1996 oddano do eksploatacji ostatnią będącą w budowie (od 1972 roku !) elektrownię jądrową – *Watts Bar* z reaktorem PWR 1200 MW.

Wypowiedzi czołowych polityków amerykańskich (prezydenta Busha, wiceprezydenta Cheney'a) zaniepokojonych stanem energetyki amerykańskiej (blekauty, kryzys energetyczny w Kalifornii) wskazują na konieczność zwiększenia udziału energetyki jądrowej w produkcji energii elektrycznej.

Dużo uwagi poświęca się uproszczeniu procedur licencjonowania elektrowni jądrowych, zwiększeniu środków na podniesienie poziomu ich bezpieczeństwa, wprowadzeniu korzystnych dla energetyki jądrowej przepisów prawnych, zbudowaniu składowiska odpadów promieniotwórczych.

Ostatnio dokonano zasadniczego zwrotu w polityce wobec paliw reaktorowych zalecając podjęcie przerobu paliwa wypalonego (po 25 latach zakazu wprowadzonego przez prezydenta Cartera).

Przemysł amerykański jest głęboko zaangażowany w przygotowanie projektów nowych reaktorów, zarówno III jak i IV generacji.

Kluczowym zadaniem jest osiągnięcie ekonomicznej konkurencyjności, stąd wysiłki koncentrują się na obniżeniu nakładów inwestycyjnych. Urząd Dozoru Jądrowego (NRC) przedłuża licencję na eksploatację pracujących obecnie reaktorów lekkowodnych nawet do 60 lat. Przedłużenie takie można uzyskać ponosząc stosunkowo niewielkie nakłady inwestycyjne. Ocenia się je średnio na 150 USD/kW przy przedłużeniu na 10 lat, a 250 USD/kW przy przedłużeniu na 20 lat.

Wytworzył się rynek kupna-sprzedaży mniej lub więcej zamortyzowanych elektrowni jądrowych. Skupują je towarzystwa energetyczne eksploatujące już kilka elektrowni jądrowych, głównie od mniejszych towarzystw-właścicieli pojedynczych elektrowni. Przy eksploatacji kilku elektrowni zmniejszają się koszty przeglądów, napraw i obsługi.

W latach 1999–2000 zakupiono w USA osiem częściowo zamortyzowanych bloków jądrowych po cenie 423–590 USD/kW.

Znamienna jest zmiana nastawienia opinii publicznej do energetyki jądrowej. Ostatnie badania (lipiec 2003) wskazują na 64-procentowe poparcie energetyki jądrowej jako jednego ze źródeł energii elektrycznej, przy 31% przeciwników.

Energetyka francuska opiera się głównie na energetyce jądrowej. Powyżej 75% energii elektrycznej jest produkowane w elektrowniach jądrowych. Ponieważ moc elektryczna elektrowni jądrowych znacznie przewyższa poziom potrzebny do pokrycia obciążenia podstawowego w systemie elektroenergetycznym, opanowano pracę elektrowni jądrowych przy zmiennym obciążeniu (*load following*).

Francuski przemysł jądrowy (*Framatome*) wyspecjalizował się w produkcji reaktorów typu PWR (na licencji *Westinghouse'a*), które oferuje również na eksport do wielu krajów. Dzięki wytwarzaniu na potrzeby krajowe długich serii identycznych reaktorów (34 bloki o mocy jednostkowej ok. 900 MW oddane do użytku w latach 1979–1988, 20 bloków o mocy 1300 MW uruchamianych w latach 1986–1994 oraz 4 najnowsze bloki o mocach po 1450 MW włączone do sieci w latach 1996–1999) osiągnięto najniższe na świecie koszty produkcji reaktorów, jak również najniższe jednostkowe koszty produkcji energii elektrycznej. Dzięki temu energetyka francuska stała się głównym eksporterem energii elektrycznej w Europie Zachodniej.

Przemysł francuski (*Framatome*) wspólnie z niemieckim (*Siemens*) pracuje nad projektem reaktora EPR, który w przyszłości, po roku 2010, będzie zastępować wycofywane z pracy stare, wyeksploatowane elektrownie jądrowe. Reaktor EPR już teraz oferowany jest również na eksport (do Turcji, Chin, Finlandii, na Ukrainę). W latach 1999–2000 dyskutowano nad wyborem kierunków długofalowej polityki energetycznej Francji.

We wszystkich wariantach opracowań zleczanych przez rząd, energetyka jądrowa gra dominującą rolę również w dalszej przyszłości. Odnawialne źródła energii nie będą w stanie zastąpić energetyki jądrowej w ciągu najbliższych co najmniej 30–40 lat. Gaz nie może zdominować produkcji energii elektrycznej z wielu względów: jest surowcem importowanym, nie jest ekonomicznie konkurencyjny w elektrowniach pracujących w podstawie obciążenia, emituje CO₂, wahania jego ceny są nieprzewidywalne.

Jądrowy przemysł francuski zebrał duże doświadczenia w przerobieniu paliwa wypalonego. Ośrodki w La Hague i Marcoule pracują nie tylko na potrzeby francuskiej energetyki, ale również dla zlecceniodawców z innych krajów (Niemiec, Japonii). Odzyskiwany tu pluton używany jest do wytwarzania paliwa MOX. W Marcoule opanowano już w latach 60. technologię zeszkliwiania wysokoaktywnych odpadów powstających przy przerobieniu paliwa wypalonego. Zeszkliwione odpady zamknięte w metalowych, niekorodujących pojemnikach umieszczone będą w podziemnych, głębokich składowiskach wysokoaktywnych odpadów.

Wielka Brytania

Na 31 pracujących w W. Brytanii reaktorów, 16 to reaktory I generacji typu GCR (zwane w W. Brytanii reaktorami Magnox), 14 – reaktory typu AGR (ulepszony GCR) i tylko jeden reaktor typu PWR o mocy 1200 MW uruchomiony w Sizewell w roku 1995.

W grupie reaktorów GCR pracuje z powodzeniem do dzisiaj pierwsza w świecie zawodowa elektrownia jądrowa w Calder Hall.

Pierwszy blok uruchomiony w 1956 roku miał moc 60 MW. W roku 1996, w 40. „urodziny”, elektrownia uzyskała zgodę na eksploatację przez następne 10 lat. Reaktory GCR, od dawna zamortyzowane, wytwarzają wyjątkowo tanio energię elektryczną.

Trwa dyskusja w sferach decyzyjnych co do dalszego rozwoju elektroenergetyki. Nowe moce pokrywa się z elektrowni opalanych stosunkowo tanim gazem z własnych ujęć na Morzu Płn., przy których nowe elektrownie jądrowe nie są ekonomicznie konkurencyjne. Z drugiej strony zobowiązania ograniczania emisji CO₂ jak i wymagania racjonalnego różnicowania źródeł energii skłania do rozwijania również energetyki jądrowej. W 1994 roku uruchomiono zakład przerobu paliwa wypalonego (THORP – Thermal Oxide Reprocessing Plant), po okresie próbnym w roku 1997 uzyskał on licencję na eksploatację.

LITERATURA

- [1] Nuclear Technology Review – 2003 update. IAEA, Vienna, 2003
- [2] Country Nuclear Power Profile – 2002 Edition. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2003
- [3] Reference Data Series. International Atomic Energy Agency. No. 1, IAEA, Vienna, July 2002
- [4] World Energy Outlook 2002. International Energy Agency. OECD, Paris, 2002
- [5] Celiński Z.: Energetyka jądrowa. PWN, Warszawa 1991
- [6] Stan i tendencje rozwojowe energetyki jądrowej na świecie w latach 2001–2003. Państwowa Agencja Atomistyki, Warszawa, listopad 2003
- [7] Celiński Z.: Paliwa jądrowe. *Archiwum Energetyki* 1992, nr 2
- [8] Laudyn D.: Koszty produkcji energii elektrycznej w nowych elektrowniach podstawowych w Polsce w roku 2010. Seminarium „Energetyka jądrowa dla Polski”. Warszawa, 25–26 marca 1999
- [9] Celiński Z.: Nowa generacja elektrowni jądrowych. *Energetyka* 1997, nr 1
- [10] Reduction of Capital Costs of Nuclear Power Plants. NEA/OECD, Paris, 1998
- [11] Stan i tendencje rozwojowe energetyki jądrowej na świecie w latach 1999–2000. Państwowa Agencja Atomistyki, Warszawa, listopad 2001
- [12] Guindon S.: Status of Work Under Generation IV International Forum (GIF). International Conference on Innovative Technologies for Nuclear Fuel Cycles and Nuclear Power. Vienna, 23–26 June 2003. Proceedings, IAEA, Vienna
- [13] Mourougov V. M., Kupitz J.: Background and Structure of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO). International Conference on Innovative Technologies for Nuclear Fuel Cycles and Nuclear Power. Vienna, 23–26 June 2003. Proceedings, IAEA, Vienna
- [14] Celiński Z.: Energetyka jądrowa a społeczeństwo. PWN, Warszawa 1992
- [15] Reference Data Series. International Atomic Energy Agency. No. 1, IAEA, Vienna, July 2003

