



WSPÓŁCZESNE TECHNOLOGIE JĄDROWE W ENERGETYCE ¹

prof. dr hab. inż. Jacek Marecki / Politechnika Gdańska

1. WPROWADZENIE

Do awangardowych dziedzin nauki i techniki, mających również duże znaczenie dla gospodarki, należą współczesne technologie energetyczne, dotyczące źródeł energii elektrycznej. Wśród nich renesans przeżywają obecnie elektrownie jądrowe, których budowę planuje się w wielu krajach świata, w tym także w Polsce.

Z licznych opracowań wykonanych w ostatnich latach i prezentowanych na różnych konferencjach krajowych i międzynarodowych, organizowanych m.in. przez Komitet Prognoz „Polska 2000 Plus” i Komitet Problemów Energetyki PAN, wynikały wnioski o konieczności budowy elektrowni jądrowych w Polsce. Przedstawiano w nich argumenty przemawiające za rozpoczęciem programu rozwoju energetyki jądrowej w Polsce nie tylko ze względów energetycznych, lecz również ekonomicznych i ekologicznych.

W celu zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego kraju konieczna jest budowa nowych elektrowni systemowych, które umożliwią pokrycie przewidywanego wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną w sposób racjonalny z punktu widzenia:

- energetycznego – a więc przy wykorzystaniu dostępnych zasobów i zwiększeniu dywersyfikacji źródeł energii pierwotnej
- ekonomicznego – a więc przy minimalnych zdyskontowanych kosztach wytwarzania energii
- ekologicznego – a więc przy spełnieniu obowiązujących w Unii Europejskiej wymagań prawnych oraz przy uwzględnieniu prognozowanych opłat za emisję CO₂.

Rozwój technologii wytwarzania energii elektrycznej jest oczywiście związany z ewolucją podstawowych urządzeń energetycznych, którymi w elektrowniach jądrowych są reaktory. W związku z tym w artykule przedstawiono:

- charakterystykę głównych grup współczesnych reaktorów energetycznych z punktu widzenia stosowanego w nich paliwa jądrowego, moderatora i chłodziwa
- zestawienie rodzajów reaktorów eksploatowanych obecnie w czynnych elektrowniach jądrowych na świecie z podaniem łącznej mocy elektrycznej, zainstalowanej w poszczególnych grupach reaktorów
- wyniki najnowszych porównań ekonomicznych elektrowni systemowych, przewidzianych do uruchomienia ok. 2030 r., a więc: elektrowni jądrowych z reaktorami wodnymi ciśnieniowymi, elektrowni opalanych węglem kamiennym lub brunatnym oraz elektrowni gazowo-parowych opalanych gazem ziemnym.

2. PROGNOZY ROZWOJU ENERGETYKI JĄDROWEJ W XXI WIEKU

Ocenia się, że do roku 2050 ludność świata wzrośnie do ok. 10 miliardów, przy czym prawie cały przyrost nastąpi w krajach rozwijających się. W związku z tym światowe zapotrzebowanie na energię elektryczną może

¹ Artykuł stanowi zmienioną wersję referatu wygłoszonego na sesji plenarnej konferencji naukowo-technicznej pt. „Współczesne technologie i urządzenia energetyczne”, która odbyła się w Krakowie w dniach 15–17 września 2010.

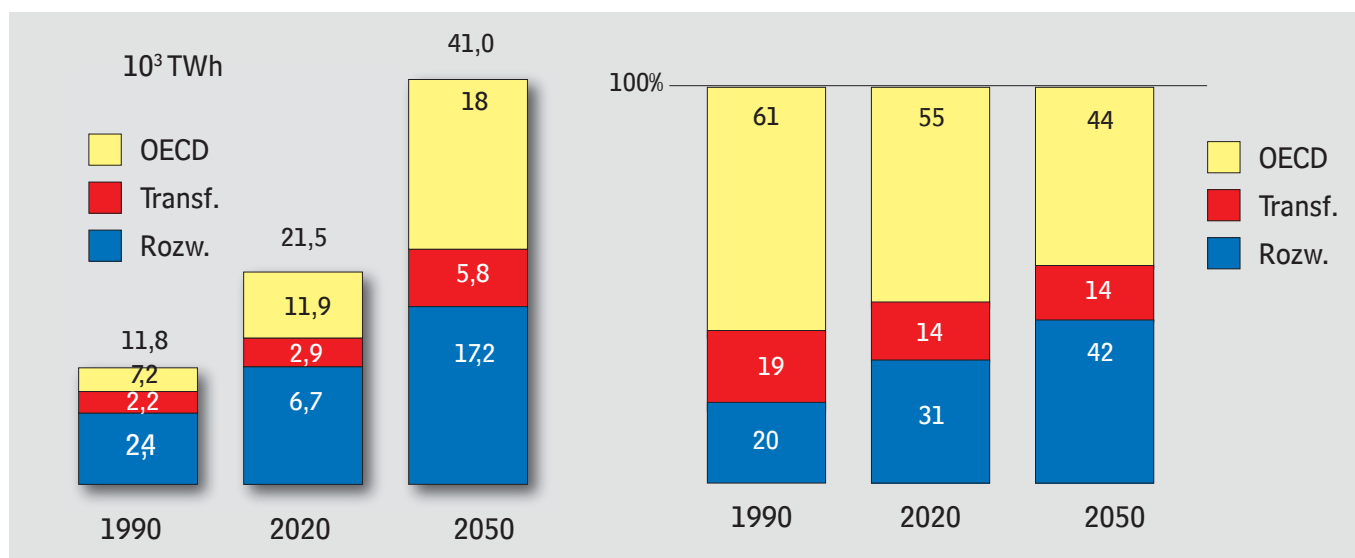
Streszczenie

W artykule rozpatrzono możliwości wykorzystania współczesnych technologii jądrowych w elektrowniach. Podano prognozy rozwoju energetyki jądrowej na świecie do roku 2050. Przedstawiono udziały poszczególnych rodzajów reaktorów w łącznej mocy zainstalowanej w czynnych elektrowniach jądrowych. Przewidziano, że w pierwszej polskiej elektrowni jądrowej będą pracowały

reaktory jądrowe jednego z trzech następujących rodzajów: lekkowodne ciśnieniowe typu PWR, lekkowodne wrzące typu BWR lub ciężkowodne typu CANDU. Podano wyniki analiz porównawczych kosztów wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych oraz w elektrowniach spalających paliwa organiczne: węgiel kamienny, węgiel brunatny albo gaz ziemny.

ulec podwojeniu w stosunku do stanu z roku 2010. Nie ulega bowiem wątpliwości, że energia w ogóle, a energia elektryczna w szczególności stanowi dobro należące do podstawowych potrzeb człowieka zarówno w krajach uprzemysłowionych, jak i we wzrastającym stopniu w krajach rozwijających się.

Na rys. 1 i 2 przedstawiono wyniki prognozy zużycia energii elektrycznej na świecie do 2050 roku, opracowanej w Międzynarodowym Instytucie Stosowanej Analizy Systemów (IIASA) i zaprezentowanej na jednym z kongresów Światowej Rady Energetycznej (World Energy Council) [1]. Przewiduje się, że światowe zużycie energii elektrycznej w 2050 roku wyniesie ok. 40 PWh (40 miliardów MWh), co oznaczałoby 3,5-krotny wzrost w porównaniu ze stanem z roku 1990.



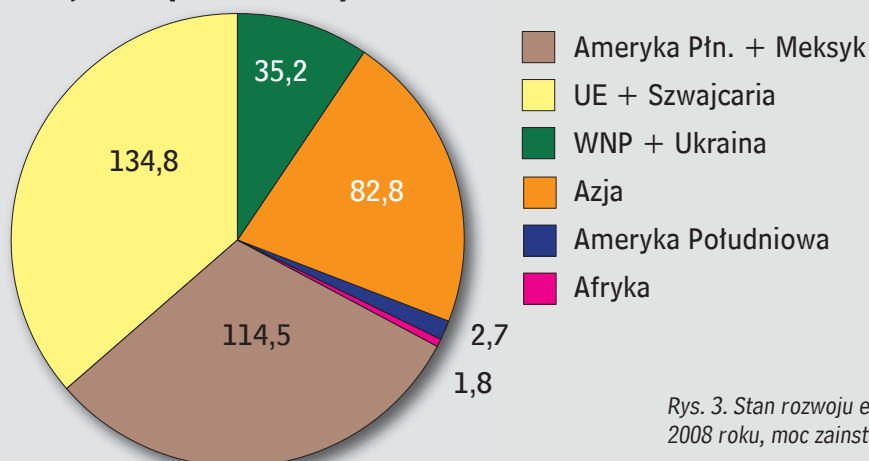
Rys. 1. Prognoza zużycia energii elektrycznej na świecie, wg [1]

Rys. 2. Prognoza struktury zużycia energii elektrycznej na świecie (%), wg [1]

Istotny udział w rozwoju będzie miała zapewne energetyka jądrowa. W publikacjach z ostatnich lat, które zreferowano m.in. w pracach [2–5], podkreśla się następujące okoliczności charakterystyczne dla jądrowych technologii energetycznych:

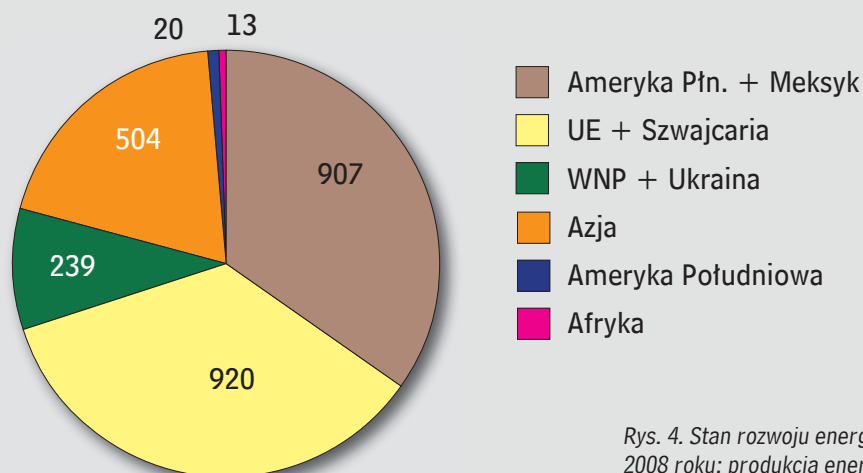
- istnienie szerokiej bazy surowcowej uranu i w miarę potrzeb toru, które nie posiadają innych zastosowań pozaenergetycznych
- wysokie bezpieczeństwo dostaw ze względu na łatwość tworzenia wieloletnich strategicznych zasobów paliw
- praktycznie zerowy poziom wydzielania do środowiska dwutlenku węgla (CO₂) i innych szkodliwych substancji
- stabilność kosztów produkcji energii elektrycznej ze względu na to, że koszt paliwa jądrowego stanowi tylko ok. 5% łącznych kosztów wytwarzania energii.

Łączna moc elektryczna zainstalowana w elektrowniach jądrowych 371,8 GW (438 bloków)



Rys. 3. Stan rozwoju energetyki jądrowej na świecie w końcu 2008 roku, moc zainstalowana w elektrowniach, wg [6]

Produkcja energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych: 2603 TWh (17,7% produkcji światowej)



Rys. 4. Stan rozwoju energetyki jądrowej na świecie w końcu 2008 roku: produkcja energii elektrycznej, wg [6]

Na rys. 3 i 4 przedstawiono stan rozwoju energetyki jądrowej na świecie w końcu 2008 roku, według danych statystycznych opublikowanych przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej w roku 2009 [6]. Łączna moc elektryczna, zainstalowana w 438 blokach eksploatowanych w elektrowniach jądrowych na świecie, wynosiła wówczas 371,8 GW, z czego 134,8 GW przypadało na kraje Unii Europejskiej i Szwajcarię. Udział tych elektrowni w światowej produkcji energii elektrycznej wynosił w 2008 roku 17,7%, a w wyżej wymienionych krajach europejskich – ok. 37%.

We wspomnianej prognozie IIASA [1] przewiduje się, że w scenariuszu uwzględniającym wysokie wymagania ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju nastąpi wzrost mocy zainstalowanej w elektrowniach jądrowych do ok. 1120 GW w 2050 roku, co oznaczałoby trzykrotny wzrost w stosunku do stanu obecnego. Przewidywania te opierają się na założeniu, że rozwój energetyki jądrowej nastąpi głównie w krajach eksploatujących obecnie elektrownie jądrowe lub planujących ich budowę.

Do krajów tych dołączy wkrótce Polska, w której po okresie gorącej dyskusji na temat potrzeby rozwoju energetyki jądrowej, przedstawionej m.in. w referacie grupy polskich specjalistów na kongresie Światowej Rady Energetycznej w roku 2007 [4], przechodzi się obecnie do realizacji programu rządowego. Istnieje więc realna szansa na to, że do roku 2030 powstaną w Polsce co najmniej dwie elektrownie jądrowe o mocy po 1500–1600 MW.

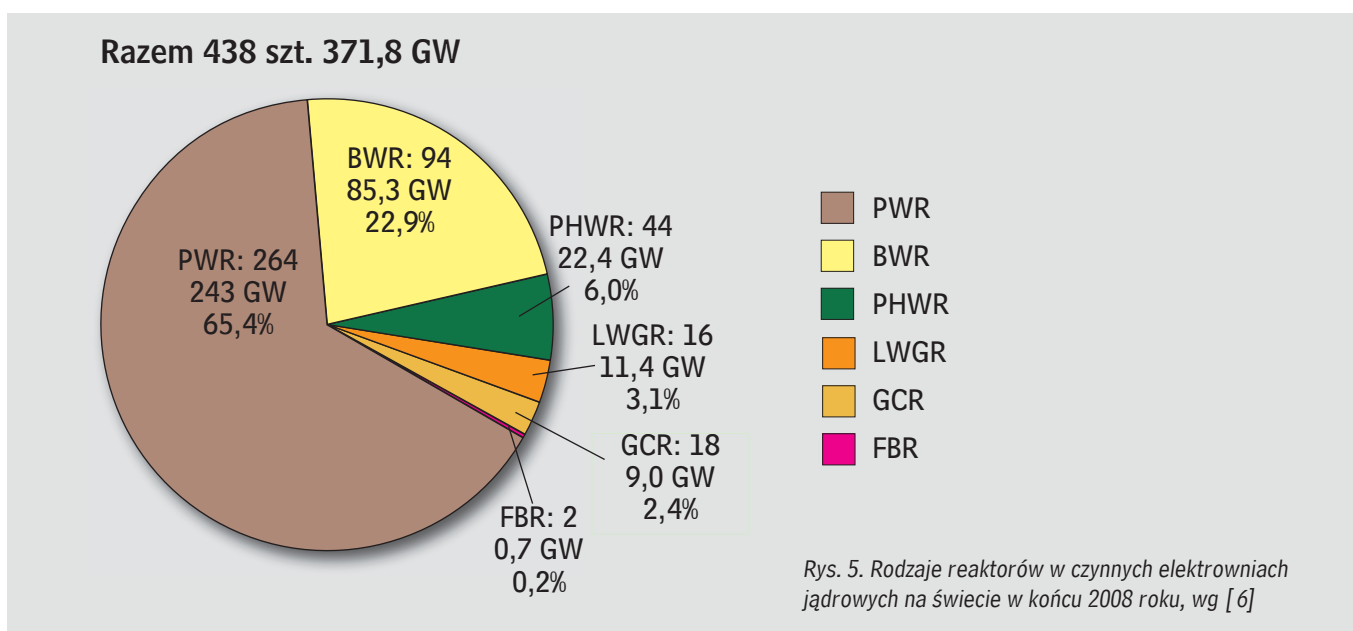
3. RODZAJE TECHNOLOGII JĄDROWYCH W ENERGETYCE

Przedmiotem prac studialnych i dyskusji oraz postępowania przetargowego będzie wkrótce sprawa wyboru rodzaju technologii energetycznej, czyli typu reaktora i urządzeń pomocniczych dla pierwszej polskiej elektrowni jądrowej. W związku z tym przypomniano główne rodzaje jądrowych reaktorów energetycznych, opisane m.in. w pracy [7]. W tab. 1 podano powszechnie stosowane, angielskie oznaczenia tych reaktorów, pochodzące przeważnie od rodzajów moderatora i chłodziwa.

Tab. 1. Podział jądrowych reaktorów energetycznych na rodzaje, wg [7]

Grupa reaktorów	Oznaczenia	Paliwo	Moderator	Chłodziwo
Lekkowodne ciśnieniowe	PWR (APWR) (WWER)	UO ₂ wzbogacone	lekka woda	lekka woda pod ciśnieniem
Lekkowodne wrzące	BWR (ABWR)	UO ₂ wzbogacone	lekka woda	lekka woda wrząca
Ciężkowodne	PHWR	UO ₂ naturalne lub wzbogacone	ciężka woda	ciężka woda pod ciśnieniem
Wodno-grafitowe	LWGR (RBMK)	UO ₂ wzbogacone	grafit	lekka woda
Gazowo-grafitowe	GCR (AGR) (HTGR)	uran naturalny lub UO ₂ wzbogacone	grafit	CO ₂ lub hel
Prędkie powielające	FBR	UO ₂ wzbogacone + PuO ₂	–	ciekły sód

Na rys. 5 przedstawiono natomiast udziały poszczególnych grup reaktorów w łącznej mocy zainstalowanej czynnych elektrowni jądrowych na świecie według danych MAEA z 2009 roku [6]. Okazuje się, że dominujący udział (ok. 65%) w energetyce światowej mają reaktory lekkowodne ciśnieniowe typu PWR (pressurised water reactors), których łączna moc elektryczna, zainstalowana w 264 blokach, wynosi 243 GW.



Na drugim miejscu znajdują się reaktory lekkowodne wrzące typu BWR (ang. *boiling water reactors*), których łączna moc wynosi 85,3 GW, co stanowi ok. 23%. Całkowita moc zainstalowana w blokach energetycznych z reaktorami lekkowodnymi obu rodzajów stanowi zatem ok. 88% mocy czynnych obecnie elektrowni jądrowych. Paliwem jądrowym w tych reaktorach jest uran wzbogacony w postaci dwutlenku uranu (UO₂), a moderatorem i chłodziwem – lekka woda (H₂O).

Trzecie miejsce pod względem łącznej mocy zainstalowanej i jej udziału w całkowitej mocy wszystkich elektrowni jądrowych na świecie zajmują reaktory ciężkowodne typu PHWR (ang. *pressurised heavy water reactors*). Ich łączna moc, wynosząca ponad 22 GW, stanowi obecnie 6% mocy całkowitej. Paliwem jądrowym może być w nich uran naturalny ze względu na lepsze własności jądrowe ciężkiej wody (D₂O) jako moderatora. Można jednak stosować w tych reaktorach uran lekko wzbogacony w postaci UO₂.

Wydaje się, że przy podejmowaniu decyzji w sprawie wyboru typu reaktora dla pierwszej polskiej elektrowni jądrowej oraz ewentualnie następnych elektrowni trzeba będzie dokładnie rozważyć wszystkie aspekty techniczne i ekonomiczne, związane z reaktorami należącymi do wyżej wymienionych trzech rodzajów. Mogą to być:



- reaktory lekkowodne ciśnieniowe typu PWR (APWR – *advanced pressurised water reactors*), oferowane przez firmę Westinghouse lub przez konsorcjum francusko-niemieckie (EPR – ewolucyjny reaktor wodny ciśnieniowy)
- reaktory lekkowodne wrzące typu BWR (ABWR – *advanced boiling water reactors*), oferowane przez firmę General Electric
- reaktory ciężkowodne typu PHWR, oferowane przez firmę Atomic Energy of Canada Ltd. pod nazwą CANDU (Canada Deuterium Uranium Reactor).

Istotne znaczenie mają przy tym analizy techniczno-ekonomiczne, w których bierze się pod uwagę zarówno nakłady inwestycyjne na budowę elektrowni, jak również wszystkie rodzaje kosztów rocznych, stałych i zmiennych, wewnętrznych i zewnętrznych. W przypadku elektrowni na paliwa organiczne, porównywanych z elektrowniami jądrowymi, do kosztów zewnętrznych zalicza się głównie koszty związane z uprawnieniami do emisji CO₂.

4. ASPEKTY EKONOMICZNE ROZWOJU ELEKTROWNI SYSTEMOWYCH

Jedną z najnowszych analiz porównawczych kosztów wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach różnego rodzaju przedstawił M. Duda w pracy [8], opartej na obliczeniach wykonanych w Agencji Rynku Energii w 2009 roku na zamówienie Ministerstwa Gospodarki. W pracy tej rozpatrzono kilkanaście rodzajów elektrowni przewidzianych do uruchomienia ok. 2020 roku i w latach późniejszych aż do roku 2050, a wśród nich następujące, szczególnie ważne elektrownie systemowe:

- elektrownie jądrowe z reaktorami lekkowodnymi ciśnieniowymi III generacji typu PWR na uran wzbogacony
- elektrownie kondensacyjne, spalające węgiel kamienny (WK) w kotłach pyłowych z instalacjami odsiarczania i odazotowania spalin oraz ewentualnymi dodatkowymi instalacjami do wychwytu i składowania CO₂ (CCS – *carbon capture and storage*)
- elektrownie kondensacyjne, spalające węgiel brunatny (WB) w kotłach pyłowych z instalacjami jak wyżej
- elektrownie gazowo-parowe, spalające gaz ziemny i pracujące w układzie kombinowanym (GTCC – *gas turbine combined cycle*) wraz z ewentualnymi instalacjami CCS.

W tab. 2 i na rys. 6 przedstawiono najważniejsze wyniki obliczeń cytowanych w pracy [8], które dotyczą elektrowni systemowych, przewidzianych do uruchomienia ok. 2030 roku. Obliczenia te były przeprowadzone w walucie euro z 2005 roku (€'05). Wynika z nich wyraźna konkurencyjność technologii jądrowej w stosunku do technologii opartych na spalaniu paliw ze względu na uprawnienia do emisji CO₂.

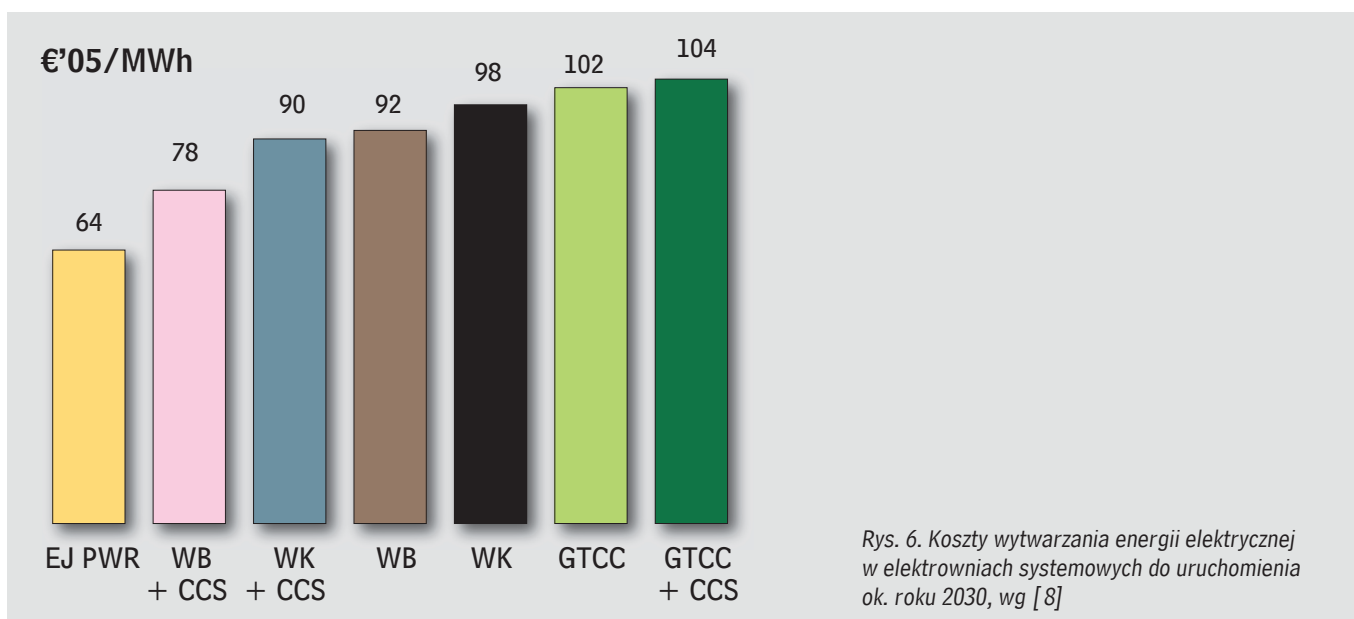
Pożądanym byłoby rozszerzenie powyższej analizy na inne rodzaje technologii, które mogą znaleźć zastosowanie w pierwszych polskich elektrowniach jądrowych. Należą do nich:

- elektrownie z reaktorami lekkowodnymi wrzącymi typu BWR (ABWR i podobne) na uran wzbogacony
- elektrownie z reaktorami ciężkowodnymi ciśnieniowymi typu PHWR na uran naturalny według technologii CANDU.

Wszechstronne analizy techniczno-ekonomiczne różnych rodzajów technologii jądrowych powinny w niedługim czasie doprowadzić do ostatecznego wyboru typu i dostawcy reaktorów dla pierwszej polskiej elektrowni jądrowej, której uruchomienie ma nastąpić ok. 2020 roku.

Tab. 2. Porównanie ekonomiczne elektrowni systemowych, przewidzianych do uruchomienia ok. roku 2030, wg [8]

Rodzaj elektrowni	Nakład inwestycyjny	Koszt energii w paliwie	Koszt wytwarzania energii
	€'05/kW	€'05/GJ	€'05/MWh
Jądrowe PWR	2900	0,8	64
Węglowe WK	1600	3,8	98
Węglowe WK + CCS	2400	3,8	90
Węglowe WB	1700	2,2	92
Węglowe WB + CCS	2500	2,2	78
Gazowo-parowe	800	11,2	102
Gazowo-parowe + CCS	1200	11,2	104



Rys. 6. Koszty wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach systemowych do uruchomienia ok. roku 2030, wg [8]

BIBLIOGRAFIA

1. Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond. 17th Congress of the World Energy Council, Special Session 2, Houston 1998.
2. Marecki J., Wójcik T., Perspektywy energetyki jądrowej w XXI wieku, [w:] Perspektywy awangardowych dziedzin nauki i technologii do roku 2010. Wyd. Komitet Prognoz „Polska 2000 Plus” przy Prezydium PAN, Warszawa 1999.
3. Marecki J., Duda M., Aspekty energetyczne, ekonomiczne i ekologiczne rozwoju elektrowni jądrowych, *Systems*, 2006, t. 11, nr 1/2.
4. Marecki J., Duda M., Kerner A., Why Should Poland Go Nuclear? 20th Congress of the World Energy Council, Rome 2007.
5. Program on Technology Innovation: Integrated Generation Technology Options. Electric Power Research Institute, 2008.
6. Nuclear Power Plants in the World. International Atomic Energy Agency, Vienna 2009.
7. Chwaszczewski S., Technologie jądrowe w XXI wieku. *Polityka Energetyczna*, 2009, t. 12, nr 2/2.
8. Duda M., Aspekty ekonomiczne rozwoju elektrowni jądrowych, *Spektrum*, 2010, nr 3/4.