

*Streszczenie: W pierwszej części artykułu omówiono historię pierwszych trzech generacji elektrowni jądrowych na podstawie przeglądu wielu źródeł literaturowych. Przedstawiono proces zmian technologicznych zmierzający do zapewnienia w coraz większym stopniu bezpieczeństwa pracy tych elektrowni. Opisano większe awarie elektrowni jądrowych.*

*Słowa kluczowe: elektrownie jądrowe, zmiany technologiczne, trzy generacje EJ*

Zbigniew Przedpełski  
*Energoekspert Sp. z o.o.*

## **Droga do elektrowni jądrowych czwartej generacji<sup>1</sup>** **Część pierwsza**

Początek generacji energii elektrycznej w wyniku reakcji rozszczepienia jądra atomowego datować można na dzień 20 grudnia 1951 r., kiedy to na obszarze *National Reactor Testing Station*, położonej w niewielkiej odległości od miejscowości Idaho Falls<sup>2</sup>, zaświeciły się o godzinie 13:50 cztery żarówki o mocy 200 W każda. W tym celu wykorzystano pierwszy w świecie reaktor powielający EBR I, skonstruowany przez, przeniesiony w tym celu do Idaho, zespół specjalistów z *Argonne National Laboratory* i wybudowany w latach 1949 – 1951 przez *Bechtel Corporation*.

Pierwszą elektrownię jądrową podłączoną do sieci publicznej uruchomiono w 1954 r. w Obnińsku – położonym nieco ponad 100 km od Moskwy, pierwszym radzieckim miasteczku naukowym. Była w stanie oddać do sieci elektrycznej jedynie 5 MW, dlatego też za pierwszą komercyjną elektrownię jądrową uważana jest brytyjska elektrownia *Calder Hall*, której pierwszy blok o mocy elektrycznej 50 MW z chłodzonym gazem i moderowanym grafitem reaktorem typu MAGNOX, został zsynchronizowany z siecią 27 sierpnia 1956 r., zaś uroczyste otwarcie przez królową Elżbietę II miało miejsce 17 października 1956 r. [1].

Wydarzenia te zapoczątkowały okres dynamicznego rozwoju energetyki jądrowej. W ciągu następných trzydziestu lat liczba czynnych reaktorów systematycznie wzrastała, zaś moc elektryczna zainstalowana w tego typu elektrowniach przekroczyła 300 GW. Celowość i opłacalność tych inwestycji znalazła potwierdzenie podczas pierwszych kryzysów naftowych w latach 1973 i 1979. Energia elektryczna wyprodukowana w elektrowniach atomowych stała się

---

<sup>1</sup> Artykuł stanowi zmienioną wersję opracowania sporządzonego na potrzeby wewnętrzne firmy *Energoekspert Katowice*. Poruszone w nim zagadnienia, wynikające z przeglądu źródeł wymienionych w spisie literatury, mogą stanowić materiał pomocniczy do prowadzonej w kraju dyskusji o koniecznej modernizacji polskiej energetyki. W dobie coraz bezpieczniejszych rozwiązań technologii wytwarzania i użytkowania energii jądrowej, jej powszechność będzie stwarzała dostępność nie tylko dużych rozwiązań systemowych, ale również rozproszonych źródeł lokalnych małej mocy.

<sup>2</sup> Idaho Falls, miasto w hrabstwie Bonneville, stan Idaho, USA

konkurencyjna ekonomicznie, a w państwach, w których zdecydowano się dokonać znacznych inwestycji (Francja, Szwecja), uzyskano na długie lata źródła taniej energii elektrycznej.

Okres dynamicznego rozwoju elektrowni jądrowych przerywany był nadchodzącymi od czasu do czasu wiadomościami o mniej lub bardziej poważnych awariach, związanych z funkcjonowaniem obiektów jądrowych. W 1957 r. doszło do pożaru stosu atomowego *Windscale Pile 1*, którego głównym zadaniem była produkcja plutonu na potrzeby brytyjskiego programu zbrojeniowego. Urządzenie zbudowano zaniedbując wiele podstawowych wymogów bezpieczeństwa, począwszy od samej zasady działania – użycia podtrzymującego procesy utleniania powietrza do chłodzenia grafitowego rdzenia, po niedostatek przyrządów pomiarowych, co uniemożliwiało właściwy nadzór nad całokształtem procesów zachodzących w reaktorze.

Gdy 10 października 1957 r. obsługa zauważyła pożar grafitu, nie wiedzano nawet jak go ugasić. Zwiększenie przepływu powietrza chłodzącego podsycało tylko pożar. Użycie do gaszenia sprowadzonego z pobliskiej elektrowni *Calder Hall* dwutlenku węgla również nie przyniosło oczekiwanego rezultatu. Ostatecznie zdecydowano się na zalanie reaktora wodą, co początkowo budziło obawy ze względu na możliwość wybuchu wodoru [2]. Nie ulega wątpliwości, że doszło do poważnego radioaktywnego skażenia okolicznych terenów, przede wszystkim izotopami jodu 131, polonu 210 i cezu 137 [3].

Na podkreślenie zasługuje fakt, że wiele dokumentów, związanych z dochodzeniem powypadkowym oraz oceną radiacji, zostało opublikowanych dopiero ponad 20 lat po zdarzeniu.



Rys. 1. EJ *Three Mile Island*

Kolejnym poważnym zdarzeniem była awaria drugiego bloku elektrowni *Three Mile Island*, gdzie 28 marca 1979 r., po wybiciu turbiny i zatrzymaniu pomp zasilających głównego obiegu, nastąpiło włączenie awaryjnego systemu chłodzącego. Operator nie zwrócił uwagi na fakt, że zawory odcinające na obu

pętlach obiegu pozostawały w stanie zamkniętym, po przeprowadzonym dwa dni wcześniej teście awaryjnego systemu chłodzenia. Na domiar złego zawór zabezpieczający przed nadmiernym wzrostem ciśnienia w stabilizatorze ciśnienia nie zamknął się po uprzednim otwarciu, umożliwiając odpływ czynnika chłodzącego z obiegu. Zdezorientowani włączającymi się alarmami operatorzy popełnili wiele błędów, jak np. okresowe zmniejszenie przepływu w awaryjnym systemie chłodzenia rdzenia. W pięć minut po wybiciu turbiny parametry wewnątrz reaktora osiągnęły punkt nasycenia i rozpoczął się proces formowania pęcherzyków pary i stopniowego obniżania się poziomu wody do około dwóch trzecich wysokości rdzenia reaktora. Końcowym efektem wspomnianego ciągu zdarzeń było wyemitowanie chmury radioaktywnych izotopów, w tym przede wszystkim jodu 131 [4,5].

Oficjalnie awaria nie spowodowała ofiar w ludziach, chociaż niektóre źródła wskazują na zwiększenie częstości zachorowań na raka płuc i białaczkę [6,7], jednakże różnią się w ocenie przyczyn tych zachorowań [8].

Kolejnym niechlubnym dniem w historii energetyki atomowej był dzień 27 kwietnia 1986 r., kiedy to pracownicy szwedzkiej elektrowni w Forsmark wykryli zwiększony poziom radiacji oraz obecność na ubraniach cząstek promieniotwórczych. Jak się później okazało było to spowodowane chmurą radioaktywną powstałą po wybuchu wodoru i następującym po nim pożarze czwartego bloku, w położonym w odległości ok. 1100 km Czarnobylu. Była to jedyna dotychczas katastrofa, której przyznano 7. stopień w Międzynarodowej Skali Wypadków Nuklearnych [9], porównywalna jedynie z katastrofą z 1957 r. w położonym na Uralu sowieckim zakładzie przeróbki zużytego paliwa jądrowego *Majak*, katastrofą ujawnioną opinii publicznej w 1974 r., po wydaleniu Żorca Miedwiediewa ze Związku Radzieckiego [10].

O ile awaria w *Three Mile Island* była punktem zwrotnym w historii amerykańskiej energetyki atomowej (w latach 1970-1978 udział energii jądrowej w ogólnej produkcji energii elektrycznej w Stanach Zjednoczonych wzrósł z 2,4 do 12,5%, po następnych 30 latach wynosi ok. 20% - dane EIA), tak katastrofa czarnobylska stanowiła prawdziwy wstrząs w Europie. Następujący kryzys zaufania społecznego do energetyki jądrowej skutkował znacznym ograniczeniem budowy nowych elektrowni. Z wyjątkiem bloku 5 elektrowni w Kursku, którego budowy nie ukończono do dziś (w budowie od 1980 r.), w b. Związku Radzieckim oficjalnie wstrzymano budowę dalszych reaktorów RBMK.

W wielu państwach europejskich podjęto decyzje o zaprzestaniu rozwoju energetyki jądrowej (Austria, Dania, Niemcy, Polska), przy czym w niektórych po przeprowadzeniu ogólnonarodowego referendum (Szwecja, Włochy). Nastąpiła stagnacja przyrostu mocy zainstalowanej w obiektach energetyki atomowej. Budowa nowych reaktorów jądrowych skoncentrowała się przede wszystkim w państwach azjatyckich: Japonii, Korei Południowej, Indiach, a przede wszystkim Chinach, które z początkiem XXI w. weszły w stadium intensywnego rozwoju energetyki jądrowej planując w najbliższym czasie budowę kilkudziesięciu reaktorów.

Wiele bardziej lub mniej poważnych awarii, zakończonych wielką katastrofą w Czarnobylu spowodowało, że dostrzeżono konieczność istotnych udoskonaleń w konstrukcji reaktorów energetycznych. O ile pierwsze reaktory były konstrukcjami, w stosunku do których z powodzeniem można użyć określenia: „prototypowe”, o tyle późniejsze konstrukcje były uważane za jedne z najbardziej niezawodnych urządzeń stworzonych przez człowieka, zaś ich konstruktorzy określali prawdopodobieństwo poważnej awarii jako jedno zdarzenie na wiele dziesiątek tysięcy reaktorolat. Katastrofy w *Three Mile Island* oraz Czarnobylu przyczyniły się do radykalnej rewizji tych poglądów, uzmysławiając z jednej strony skalę skutków i możliwych konsekwencji awarii, z drugiej strony zawodność czynnika ludzkiego. Przypadki stosunkowo poważnych awarii, podczas których doszło do przegrzania rdzeni (oprócz wcześniej opisanych częściowo stopiono rdzenie: wspomnianego EBR 1, w szwajcarskiej elektrowni w Lucens, w Bohunicach na terenie obecnej Słowacji, we Francji w St. Laurent i wielu innych, dwa poważne wypadki miały też miejsce w kanadyjskich laboratoriach w Chalk-River), prowadziły do nieuchronnego wniosku, że nie można czekając na kolejne, mniej lub bardziej tragiczne zdarzenia, kontynuować rozwoju konstrukcji z założenia skomplikowanych i wymagających w stanach awaryjnych szybkiej i bezbłędnej reakcji obsługi, od poprawności której mógł

zależć los dziesiątek, a nawet setek tysięcy ludzi.



Rys. 2. Francuska elektrownia atomowa

Dostrzeżono konieczność stworzenia urządzeń bezpieczniejszych o rzędy wielkości, w których uszkodzenie rdzenia będzie teoretycznie możliwe w jednym przypadku na miliony reaktorolat. Powstałe pod koniec XX w. konstrukcje reaktorów przeznaczonych do elektrowni atomowych były znacznie bezpieczniejsze od poprzednich, co uzyskano dzięki powszechnej cyfryzacji obwodów automatyki [11] i zostały zaliczone do tzw. reaktorów trzeciej generacji.

W przyjętym bowiem podziale generacji reaktorów do pierwszej generacji zaliczono reaktory prototypowe z lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych ubiegłego stulecia, takie jak: reaktor (powielający, wodny ciśnieniowy) pierwszej amerykańskiej elektrowni atomowej w Shippingport z 1957 r., uruchomiony w 1960 r. reaktor Dresden 1 (wodny wrzący) - pierwszej amerykańskiej elektrowni atomowej będącej inwestycją prywatną oraz wspomniane *Magnox* - umożliwiające produkcję plutonu do zastosowań militarnych, chłodzone gazem konstrukcje angielskie z lat pięćdziesiątych, w pojedynczych przypadkach pracujące do dziś.

Ignalina

Drugą generację stanowią, najczęściej pozostające obecnie w eksploatacji, różnego typu reaktory wielkich elektrowni komercyjnych budowane począwszy od lat siedemdziesiątych XX wieku (wodne: ciśnieniowe i wrzące, zaawansowane chłodzone gazem, kanadyjskie CANDU – napędzane potencjalnie dowolnym paliwem, najczęściej niewzbogaconym uranem i wykorzystujące ciężką wodę w charakterze moderatora).

Trzecia generacja była rozwijana od lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia. Zalicza się do niej: zaawansowane reaktory wodne wrzące ABWR (konstrukcja *General Electric Hitachi*, uruchomiona po raz pierwszy w 1996 r. w Kashiwazaki-Kariwa w Japonii) i zaawansowane reaktory wodne ciśnieniowe APWR (konstrukcja *Mitsubishi Heavy Industries Ltd.*, zakontraktowana dla elektrowni *Tsuruga*, uruchomienie po roku 2015) oraz konstrukcje, które nie doczekały się materialnej realizacji, tj. AP-600 (projekt *Westinghouse Electric Company*, ostatecznie certyfikowany przez NRC w 1999 r., niezrealizowany) oraz reaktor wodny ciśnieniowy System 80+ (zaprojektowany przez *Combustion Engineering* na rynek koreański i zarzucony po wykupieniu *Combustion Engineering* przez *ALSTOM* i *Westinghouse Electric Company*). Konstrukcje te są bezpieczniejsze od klasycznych reaktorów z XX wieku. Uzyskano to dzięki zarówno wspomnianej przepaści technologicznej w dziedzinie jakości układów automatyki, jak i dzięki dodatkowym systemom zabezpieczeń, a także ze względu na stały postęp jakościowy i ulepszenia technologii wytwarzania.

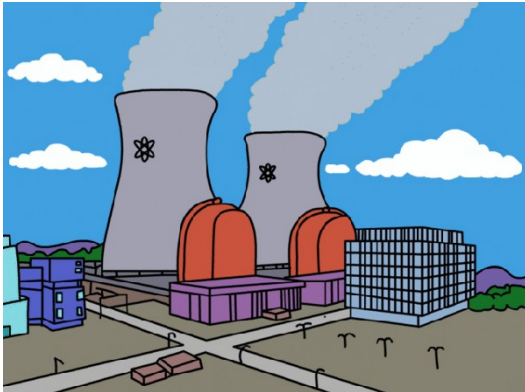
Obecnie opracowano jeszcze bardziej wyrafinowane, bezpieczne i trwałe reaktory będące ewolucją wcześniejszych konstrukcji, takie jak: AP1000 i APR 1400 (*Westinghouse*) oraz EPR (europejska kooperacja: *Areva Nuclear Power, EdF i Siemens*, na rynek amerykański oznaczona US EPR). W procesie certyfikacji przez U.S. Nuclear Regulatory Commission obecnie znajdują się projekty: AP 1000+ (*Westinghouse Electric Company*), ESBWR (*GE- Hitachi Nuclear Energy*), U.S. EPR oraz U.S. APWR (*Mitsubishi Heavy Industries Ltd.*). Ponadto podobny poziom i klasę reprezentuje reaktor niecertyfikowany w Stanach Zjednoczonych, moderowany ciężką wodą ACR (*Atomic Energy of Canada Ltd.*). Ich wspólną cechą jest wielkość, umożliwiającą realizację bloków o mocy elektrycznej w przedziale pomiędzy 1000 a 1700 MW.



Rys. 4. Odpadowe materiały radioaktywne

Dostrzeżono rolę tzw. bezpieczeństwa pasywnego przejawiającą się w dążeniu do zapewnienia bezpieczeństwa reaktora bez potrzeby podjęcia działań przez obsługujący personel i zadziałania systemów awaryjnych zasilanych prądem przemiennym, w przypadku konieczności awaryjnego wyłączenia reaktora spowodowanego np. utratą czynnika chłodzącego, przynajmniej przez określony, stosunkowo długi okres czasu, konieczny dla przeprowadzenia dogłębnej analizy sytuacji awaryjnej i jej przyczyn oraz spokojnego zaprogramowania i realizacji niezbędnych działań zabezpieczających. Przykładem są konstrukcje AP-1000 i ESBWR z naturalnym obiegiem czynnika chłodzącego, w których zastosowano wydajne grawitacyjne układy chłodzenia awaryjnego, co powoduje, że w razie utraty czynnika chłodzącego możliwe jest utrzymanie reaktora bez konieczności zasilania z generatorów awaryjnych i interwencji operatora nawet przez okres 72 godzin [12]. Z tego powodu AP-1000 jest pierwszym certyfikowanym w Stanach Zjednoczonych reaktorem tzw. generacji III+. Nieustannie zwiększające się światowe zapotrzebowanie energii elektrycznej, w warunkach aktywnie rozwijanej polityki przeciwdziałania zmianom klimatycznym zmusza do zrewidowania poglądów na strukturę przyszłych źródeł energii. Niemożność, na obecnym etapie, zaspokojenia pełnych potrzeb energetycznych ze źródeł odnawialnych, w połączeniu z niedostatecznym rozwojem czystych technologii węglowych, w aspekcie istotnych ograniczeń dopuszczalnych emisji dwutlenku węgla powoduje konieczność powrotu do energetyki atomowej [13]. Na nieodległy renesans tej energetyki wskazuje również wspomniany chiński program rozwoju obejmujący budowę kilkudziesięciu reaktorów oraz budowa nowych obiektów w krajach, takich jak Francja i Finlandia, w których nie były obserwowane większe protesty społeczne. Także w Szwecji zrewidowano poglądy na podjęte niegdyś decyzje i w chwili obecnej planuje się utrzymanie produkcji w trzech elektrowniach jądrowych

zlokalizowanych na jej obszarze. Wreszcie, z ekonomicznego punktu widzenia, na spodziewany rozwój energetyki jądrowej wskazuje astronomiczna kwota 5,4 miliarda dolarów, zapłacona przez japońską *Toshiba Group* w 2006 r. za zakup *Whestinghouse Electric Company* – jednego z największych na świecie producentów reaktorów.



Rys. 5. Elektrownia jądrowa wg sławnej rodziny Simpsonów

Obecnie w samych Stanach Zjednoczonych złożono wnioski o licencje na budowę bloków jądrowych w elektrowniach: *Fermi* (1 blok ESBWR), *Callaway* (1 blok US EPR), *Nine Mile Point* (1 blok US EPR), *Grand Gulf* (1 blok ESBWR), *River Bend* (1 blok ESBWR), *Comanche Peak* (2 bloki US APWR), *South Texas* (2 bloki ABWR), *Vogtle* (2 bloki AP-1000), *Bellefonte* (2 bloki AP-1000), *Virgil C. Summer* (2 bloki AP-1000), *Levy County* (2 bloki AP-1000), *Turkey Point* (2 bloki AP-1000), *William States Lee III* (2 bloki AP-1000), *Shearon Harris* (2 bloki AP-1000), *North Anna* (1 blok ESBWR), *Calvert Cliffs* (1 blok US EPR) i *Bell Bend* (1 blok US EPR).

#### LITERATURA

- [1.] H. Kragh: "Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century"; Princeton University Press, Princeton NJ 1999.
- [2.] "A revised transcript of the proceedings of the Board of Enquiry into the Fire of Windscale Pile No 1" UKAEA, London 1989.
- [3.] J. Crick, G. S. Linsley: "An Assessment of the Radiological Impact of the Windscale Reactor Fire, October 1957"; International Journal of Radiation Biology Vol. 46 Issue 5 p. 479-506, London 1984.
- [4.] Walker J. S.: "Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective"; University of California Press, Berkeley 2004.
- [5.] Kemeny J. G. et al: "Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island: The need for change: the legacy of TMI"; U.S. Government Printing Office, Washington DC 1979.
- [6.] Hatch M.C. , Wallenstein S., Beyea J., Nieves J. W., Susser M.: Cancer rates after the Three Mile Island nuclear accident and proximity of residence to the plant. American Journal of Public Health vol. 81: nr 6: p. 719-724 (1991).



- [7.] Wing S., Richardson D., Armstrong D., Crawford-Brown D.: „A reevaluation of cancer incidence near the Three Mile Island nuclear plant: The collision of evidence and assumptions.“; Environmental Health Perspectives, vol. 105: p. 52-57, Washington 1997.
- [8.] Hatch M. Susser M., Beyea J.: “Comments on "A reevaluation of cancer incidence near the Three Mile Island nuclear plant"“; Environmental Health Perspectives, vol 105: p. 12, Washington 1997.
- [9.] Mould R. F.: “Chernobyl Record: The Definitive History of the Chernobyl Catastrophe“; CRC Press, Boca Raton FL 2000.
- [10.] Medvedev Z. A.: “Nuclear Disasters in the Urals“; W. W. Norton & Company, New York NY 1979.
- [11.] Snell V.G., Howieson J.Q.: “Chernobyl – A Canadian Perspective“; AECL Mississauga 1999.
- [12.] Hinds D. Maslak C.: „Next Generation Nuclear Energy: The ESBWR“; Nuclear News January 2006.
- [13.] Beckjord E. S. et al: „The Future of Nuclear Power – an interdisciplinary MIT Study“; Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 2003.

*Streszczenie: W części drugiej artykułu omówiono rozwiązania techniczne elektrowni jądrowych IV generacji mających zmienić energetykę dotychczasową poprzez wprowadzenie rozwiązań umożliwiających wprowadzenie elektrowni rozproszonych zblizonych w maksymalnie możliwym stopniu do centrów odbiorów energii elektrycznej, łatwych w eksploatacji i zużywających bardzo mało paliwa.*  
*Słowa kluczowe: elektrownie jądrowe IV generacji*

Zbigniew Przedpełski  
*Energoekspert Sp. z o.o.*

## **Droga do elektrowni jądrowych czwartej generacji<sup>1</sup>** **Część druga<sup>2</sup>**

Dostrzegając konieczność zapewnienia energii dla 10 miliardowej ludności świata, spodziewanej w 2050 r., zawiązano Międzynarodowe Forum IV Generacji (ang. - Generation IV International Forum) – organizację utworzoną przez dziewięć państw: Argentynę, Brazylię, Kanadę, Francję, Japonię, Koreę Płd., Republikę Południowej Afryki, Stany Zjednoczone i Wielką Brytanię. W 2002 r. opublikowano „Mapę drogową technologii dla IV generacji nuklearnych systemów energetycznych”. W dokumencie tym określono podstawowe cele rozwijania nuklearnych systemów energetycznych, w tym:

- zapewnienie zrównoważonego wytwarzania energii, umożliwiającego osiągnięcie celów w zakresie ograniczenia zanieczyszczeń powietrza, promocji oraz efektywnego wykorzystania paliw dla światowej produkcji energii za pomocą systemów, których użytkowanie będzie możliwe w długoterminowym horyzoncie czasowym,
- poprawę zarządzania odpadami nuklearnymi poprzez minimalizację ich ilości, zwłaszcza w zakresie ładunku wymagającego składowania długoterminowego, w celu poprawy stanu zdrowia publicznego i środowiska naturalnego,
- uzyskanie wyraźnej przewagi nad innego rodzaju źródłami energii, w zakresie kosztów całego cyklu życia, a więc: budowy, eksploatacji i dekontaminacji obiektu, a także kosztów: wydobycia, produkcji, przetwarzania i składowania paliwa
- uzyskanie poziomu ryzyka finansowego porównywalnego do innych inwestycji energetycznych,

---

<sup>1</sup> Artykuł stanowi zmienioną wersję opracowania sporządzonego na potrzeby wewnętrzne firmy *Energoekspert Katowice*. Poruszone w nim zagadnienia, wynikające z przeglądu źródeł wymienionych w spisie literatury mogą stanowić materiał pomocniczy do prowadzonej w kraju dyskusji o koniecznej modernizacji Polskiej Energetyki. W dobie coraz bezpieczniejszych rozwiązań technologii wytwarzania i użytkowania energii jądrowej, jej powszechność będzie stwarzała dostępność nie tylko dużych rozwiązań systemowych, ale również rozproszonych źródeł lokalnych małej mocy.

<sup>2</sup> Część pierwsza artykułu zamieszczona jest w numerze kwietniowym *Energetyki* z roku 2010

- uzyskanie przewagi nad innymi systemami w dziedzinie bezpieczeństwa i niezawodności eksploatacji,
- bardzo niskie prawdopodobieństwo i ograniczone skutki ewentualnego stopienia rdzenia,
- brak potrzeby udzielania pomocy zewnętrznej w przypadku awarii,
- nieatrakcyjność z punktu widzenia możliwości kradzieży materiałów przydatnych do produkcji broni i zwiększona odporność fizyczna na akty terroryzmu.

Ponieważ dokument został przyjęty już po wydarzeniach z 11 września 2001 r., jest rzeczą oczywistą, że ostatni z wymienionych celów został tylko wymieniony jako ostatni, w rzeczywistości będąc rozumiany jako jeden z najważniejszych [1].

Zasadniczą ideą przyświecającą tworzeniu systemów czwartej generacji jest uczynienie ich dostępnymi przed rokiem 2030, kiedy to większość z obecnie eksploatowanych elektrowni atomowych zakończy swoją działalność. Międzynarodowy program badań i rozwoju w tym zakresie powinien zapewnić postęp i skutkować wdrożeniem nowoczesnych rozwiązań, umożliwiając wykorzystanie zalet energii nuklearnej przez wiele następnych dziesięcioleci. Obecnie członkami wyżej wymienionego Generation IV International Forum są, poza wcześniej wymienionymi: Szwajcaria, Chiny, Rosja i Unia Europejska, reprezentowana przez Euratom.

W ramach Forum prowadzi się obecnie kilkanaście projektów badawczych, których wejście w stadium demonstracyjne spodziewane jest w latach 2015-2020 i późniejszych. Jako perspektywiczne kierunki poszukiwań uznano następujące typy reaktorów:

- GFR - reaktory chłodzone gazem z neutronami prędkimi – celem jest uzyskanie helu o jak najwyższej temperaturze na wyjściu z reaktora, o mocy termicznej rzędu 2400 MW; w ramach europejskiego 7 Programu Ramowego deklaruje się budowę demonstracyjnego reaktora ALLEGRO;
- LFR - reaktory chłodzone stopami ołowiu z neutronami prędkimi, budzą nadzieję, jako reaktory powielające umożliwiające „dopalanie” wszelkich aktywności z wypalonego paliwa jądrowego, rozwijane są dwa projekty:
  - amerykański SSTAR – mały, szczelny, autonomiczny i łatwy do transportu reaktor, umożliwiający generację 20 MWe mocy elektrycznej, przy sprawności 44% w

- obiegu Braytona, z wykorzystaniem dwutlenku węgla o parametrach nadkrytycznych i
- europejski ELSY – chłodzony czystym ołowiem reaktor, umożliwiający wytworzenie 600 MW mocy elektrycznej, tworzony przez konsorcjum siedemnastu podmiotów europejskich i dwóch koreańskich;
  - SFR - reaktory chłodzone sodem z neutronami prędkimi – rozważane są urządzenia o temperaturze czynnika chłodzącego na wylocie z reaktora w przedziale 500-550°C, zapewniające uzyskanie mocy elektrycznej w przedziale od 50 do 1500 MW, z wodą lub dwutlenkiem węgla, jako czynnikiem roboczym obiegu wytwarzającego energię elektryczną;
  - SCWR - reaktory chłodzone wodą wytwarzające parę o parametrach nadkrytycznych, tj o ciśnieniu powyżej 22,1 MPA i temperaturze powyżej 374°C, co umożliwi uzyskanie zdecydowanie wyższych sprawności wytwarzania energii elektrycznej w obiegu Clausiusa-Rankine'a, rozważane są dwie koncepcje – z naczyniem ciśnieniowym i z rurami ciśnieniowymi – w Kanadzie konstruowany jest reaktor CANDU-SCWR, z rurkami ciśnieniowymi, pracujący w spektrum neutronów termicznych, zdolny do wytworzenia pary o ciśnieniu 25 MPa i temperaturze powyżej 625°C; rozwijany przez Euratom HPLWR ma dostarczać parę o ciśnieniu 25 MPa i temperaturze powyżej 500°C, Japończycy lansują dwa projekty (jeden z neutronami termicznymi, drugi z neutronami prędkimi) z ciśnieniową obudową reaktora, wreszcie w Korei trwają prace nad koncepcją rdzenia umożliwiającego osiągnięcie mocy elektrycznej 1400 MW;
  - VHTR – chłodzone gazem reaktory wysokotemperaturowe, w których temperatura wylotowa czynnika chłodzącego przekracza 900°C (celem jest zbliżenie się do 1000°C) i może być wykorzystana w wysokotemperaturowych procesach technologicznych, na przykład do skojarzonego wytwarzania wodoru i energii elektrycznej, przy czym wódór ma być wytwarzany w procesie termochemicznym lub wysokotemperaturowej elektrolizy, zaś energia elektryczna będzie wytwarzana za pomocą turbiny gazowej pracującej w klasycznym obiegu Braytona;
  - MSR - reaktory ze stopioną solą, w których paliwo jądrowe w postaci fluorków uranu, plutonu i toru rozpuszczone jest w mieszaninie, pełniących rolę chłodziwa, fluorków metali takich jak: sól, cyrkon, lit czy beryl, osiągając

stan krytyczny w trakcie przepływu przez grafitowy rdzeń, pełniący rolę moderatora neutronów; urządzenia operują w spektrum od neutronów termicznych do prędkich, mogą być stosowane do zużywania plutonu i dopalania innych odpadów w cyklu przeróbki wypalonego paliwa jądrowego z reaktorów lekko wodnych [2].

Co ciekawe, ostatni z opisywanych typów reaktora nie należy do nowych. Badania reaktorów z paliwem w postaci ciekłej były prowadzone w Narodowym Laboratorium w Oak Ridge, począwszy od roku 1953, początkowo w ramach programu zastosowania energii nuklearnej do napędu samolotu bombowego (the Aircraft Reactor Experiment) [3]. Obecnie najciekawsza konstrukcja reaktora chłodzonego stopioną solą, oznaczona jako PB-AHTR (Pebble Bed Advanced High Temperature Reactor) powstaje pod kierunkiem naukowców z Wydziału Inżynierii Nuklearnej Uniwersytetu Kalifornii w Berkeley i stanowi połączenie technologii MSR z technologią tzw. Pebble Bed (z ang. dosłownie: złożę otoczków). W ogólnym przypadku stosowane są dwa rodzaje rdzeni reaktorów VHTR: z bloków grafitowych (ang.: prismatic block core) i wymieniony pebble bed. Pebble Bed, zwany dalej złożem kul, jest pomysłem niemieckim wygenerowanym pod koniec lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia, w trakcie tworzenia Ośrodka Badań Nuklearnych Północnej Nadrenii-Westfalii w Jülich (obecne Forschungszentrum Jülich GmbH), gdzie w 1967 r. uruchomiono doświadczalny reaktor AVR, w którym do 1988 r. badano różne rodzaje paliw, osiągając temperatury czynnika chłodzącego na wylocie osiągające 990°C [4].

Badania te legły u podstaw uruchomionego w latach siedemdziesiątych projektu budowy wysokotemperaturowego reaktora zasilanego torem: THTR (Thorium High Temperature Reactor). Jako paliwo zastosowano kuliste elementy paliwowe z grafitu o średnicy 60 mm, zawierające wewnętrzną matrycę grafitową o średnicy 50 mm, w której umieszczono tysiące elementów tzw. paliwa BISO, czyli drobnych ziarenek zawierających: wzbogacony do 93% U 235 uran w postaci dwutlenku uranu i tor Th 232 w formie dwutlenku toru, pokrytych trójwarstwową strukturą specjalnego tworzywa węglowego. Każdy z 675 tysięcy opisanych elementów paliwowych (pierwotnie w Jülich mieścił 100000 elementów paliwowych), stanowiących rdzeń chłodzonego helem reaktora, zawierał: 192g grafitu, 1,032g wysokowzbogaconego uranu i 10,2g toru. Kuliste elementy paliwowe były systematycznie przemieszczane oraz uzupełniane w trakcie pracy reaktora, przy czym większość z nich podlegała recyrkulacji.

Reaktor nie wymagał zatem przerw na uzupełnianie paliwa. Stan krytyczny osiągnięto 13 września 1983 r., zaś 16 listopada 1985 r. zsynchronizowano z siecią turbogenerator o mocy 307 MW, zasilany parą o parametrach: 180 bar i 530°C. Elektrownia przepracowała 16410 godzin produkując 2891000 MWh energii elektrycznej do chwili przeglądu, rozpoczętego 29 września 1988 r.

Z przyczyn, natury ekonomicznej, związanych z niską dyspozycyjnością obiektu spowodowaną problemami technicznymi z aparatem rozładującym elementy paliwowe, na udoskonalenie którego brakowało pieniędzy, projekt porzucono i 1 września 1989 r. podjęto decyzję o przystąpieniu do rozbiórki obiektu [5], która dotychczas pochłonęła około 400 mln euro [6]. Opisana *Elektrownia Atomowa Schmehausen*, znana była ponadto z największej wówczas w świecie chłodni kominowej o wysokości 146 m. Zastanawiającym jest, dlaczego w literaturze polskiej można znaleźć informacje, jakoby reaktor THTR „z różnych powodów, głównie politycznych” nie został uruchomiony [7].

Mimo, że w oficjalnych dokumentach Międzynarodowego Forum IV Generacji dopuszcza się w linii bazowej obie koncepcje rdzeni dla reaktorów wysokotemperaturowych, rdzeń ze złożem kul najwyraźniej wzbudza obecnie większe zainteresowanie – projekt takiego reaktora opracowywany jest również przez specjalistów z Massachusetts Institute of Technology. W dziedzinie paliwa dla reaktorów wysokotemperaturowych w najbliższym czasie wspierane będą badania nad ulepszeniem paliwa TRISO, m.in. poprzez zastosowanie warstwy węgla cyrkonu, co jeszcze wzmocni jego odporność temperaturową [8]. Ponadto w Argonne National Laboratory prowadzone są badania nad paliwem QUADRISO. Obecnie w ramach współpracy koordynowanej przez Międzynarodowe Forum IV Generacji większe środki niż na rozwój technologii jądrowych wydatkuje się na program badań w zakresie technologii przemysłowego otrzymywania wodoru. Wskazuje to na znaczenie rozwoju technologii reaktorów wysokotemperaturowych i pokładane w niej nadzieje na rozwiązanie wielu problemów energetycznych.

Tymczasem w kolejce do certyfikacji w Stanach Zjednoczonych oczekują projekty reaktorów, z których niektóre, ze względu na ich techniczne zaawansowanie oraz przełomowość podejścia, wydają się spełniać kryteria zaliczenia do IV generacji reaktorów. Konstrukcje te nie są, jak dotychczasowe generacje I – III+, ewolucyjnymi formami wcześniej stosowanych w energetyce jądrowej reaktorów, lecz stanowią rozwinięcie technologii stosowanych

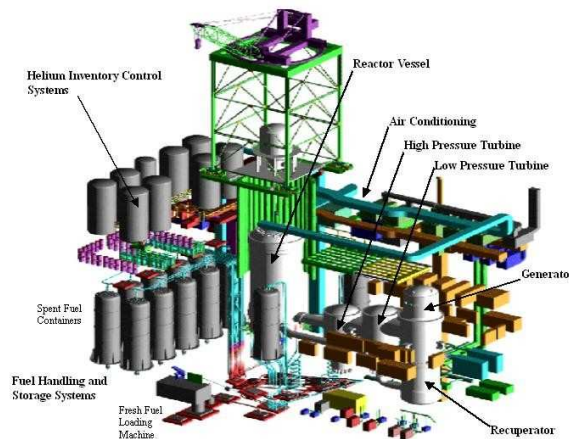
dotychczas na skalę eksperymentalną, a nawet stanowią całkowity przełom, ze względu na absolutne nowatorstwo i wykorzystanie niewdrożonych dotychczas patentów. Szczególną grupę stanowią zaawansowane małe reaktory z modułarną konstrukcją.

Na pozytywną certyfikację oczekują projekty: IRIS (*Westinghouse Electric Company*), PRISM (*GE Hitachi Nuclear Energy*), Nu-Scale (*Nu-Scale Power Inc.*), mPower (*Babcock Wilcox Company*), PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor Ltd.*), 4S (*Toshiba Corporation*) oraz Hyperion (*Hyperion Power Generation Inc.*). Eksperti Nuklearnej Komisji Regulacyjnej (US Nuclear Regulatory Commission) oczekują, że wnioski o ostateczne zatwierdzenie projektów i certyfikację personelu obsługi wpłyną, w przypadku części z tych przedsięwzięć, już w 2011 r.

- **IRIS** (International Reactor Innovative and Secure) jest wodnym reaktorem ciśnieniowym konstruowanym pod kierunkiem *Westinghouse Electric Company*. Jest to reaktor o mocy termicznej 1000 MW, umożliwiającej otrzymanie mocy elektrycznej 335 MW, ze spiralnymi wytwornicami pary, pompami czynnika chłodzącego i stabilizatorem ciśnienia umieszczonymi we wnętrzu jego obudowy. Paliwo, którego uzupełnianie wymagane jest co 3 do 3,5 roku, stanowi wzbogacony do 4,95% dwutlenek uranu.
- **PRISM** (Power Reactor Innovative Small Module) jest jednostką o mocy cieplnej 840 MW i elektrycznej 311 MW, chłodzoną ciekłym sodem, wyposażoną w pasywne układy bezpieczeństwa. Paliwo, w postaci metalicznej, wymaga uzupełnienia co 12 do 24 miesięcy.
- **Nu-Scale** to reaktor wodny ciśnieniowy zaprojektowany dla siłowni o mocy elektrycznej 40 MW, o naturalnym obiegu, w którym rdzeń reaktora i spiralne wytwornice pary umieszczono w jednej obudowie zatapianej w basenie z wodą. Paliwo wzbogacone do poziomu 4,95%, wymaga uzupełnienia co 2 lata. Konstrukcja powstała w Oregon State University przy początkowej współpracy specjalistów z *Idaho National Environment & Engineering Laboratory*. Opracowaną technologię przekazano w 2007 r. *Nu Scale Power Inc.* – firmie specjalnie utworzonej w celu wdrożenia i rozprzestrzenienia handlowego.
- **mPower** reaktor wodny ciśnieniowy z wytwornicami pary zabudowanymi w jednej obudowie z rdzeniem reaktora. Z reaktora o mocy termicznej 400 MW planuje się otrzymanie 125 MW mocy elektrycznej. Uzupełnianie

paliwa, którym jest wzbogacony do ok. 5% dwutlenek uranu będzie wymagane co około 5 lat. Jednostka modułarna wyposażona w wiele pasywnych układów bezpieczeństwa.

- **PBMR** (Pebble Bed Modular Reactor) jest projektem południowoafrykańskim. Chłodzona helem jednostka o mocy termicznej 400 MW i elektrycznej 165 MW, jest modułowym reaktorem chłodzonym helem z ciągłym uzupełnianiem paliwa, mogącym współpracować z turbiną gazową lub parową, a także dostarczać ciepła procesowego. Paliwo stanowią kuliste elementy paliwowe o średnicy 60 mm z których każdy zawiera kilkanaście tysięcy umieszczonych w matrycy grafitowej granulek składających się z ziarenka wzbogaconego do ok. 10% U 235 dwutlenku uranu o średnicy 0,5 mm, pokrytego kolejno warstwami: porowatego węgla o grubości 95µm, struktury węglowej podobnej do grafitu - tzw. węgla pirolitycznego o grubości 40µm, karborundu o grubości 35µm oraz jeszcze jedną warstwą węgla pirolitycznego o grubości 40µm – tzw. paliwo TRISO. Podobnie jak we wcześniej opisanych reaktorach niemieckich elementy paliwowe są stale uzupełniane w trakcie pracy reaktora, a także podlegają ciągłej recyrkulacji, przechodząc średnio piętnaście razy przez rdzeń, co umożliwi właściwe „wypalenie” paliwa.

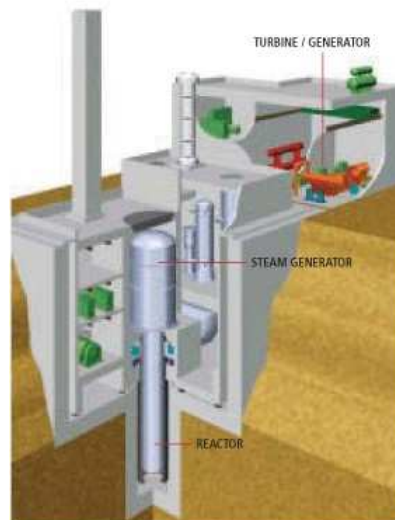


Rys. 1 Pebble Bed Modular Reactor

- **Toshiba 4S** (Super Safe, Small and Simple), to modułarna konstrukcja chłodzona sodem, mogąca dostarczać 30 MW mocy termicznej i 10 MW mocy elektrycznej, z paliwem w postaci stopu wzbogaconego do poziomu 19,9% U 235 uranu z cyrkonem. Najważniejszą cechą jest brak

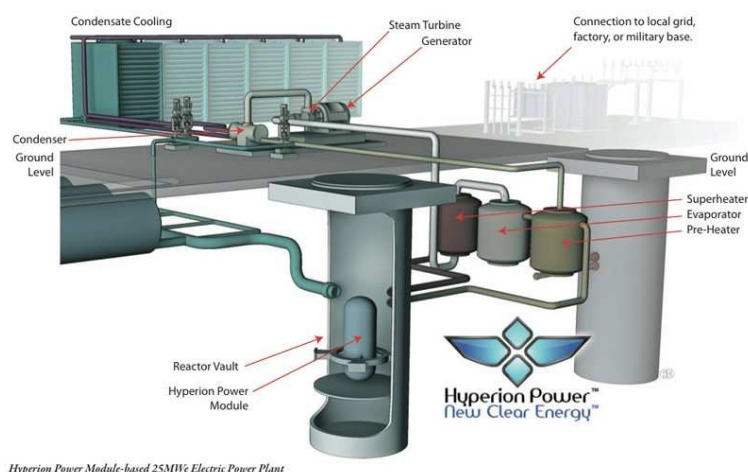


konieczności jakiegokolwiek uzupełniania paliwa – dostarczony reaktor zawiera zapas paliwa na trzydzieści lat planowanego funkcjonowania elektrowni. Projektowana jest też wersja o mocy termicznej 135 MWt, w której zapas paliwa wystarcza na 10 lat.



Rys. 2 Toshiba 4S

- **Hyperion** to umieszczany pod powierzchnią terenu reaktor o niewielkich gabarytach i mocy cieplnej 70 MW, umożliwiającej uzyskanie mocy elektrycznej 25 MW, chłodzony potasem. Zamiast uzupełniania paliwa przewiduje się wymianę, co 7 do 10 lat całej nierozbieralnej jednostki. Konstrukcja jest wdrożeniem patentu zgłoszonego w wyniku prac badawczych prowadzonych w Los Alamos National Laboratory.



Rys. 3 Hyperion Power Module o mocy elektrycznej 25MW

Dla ostatnich projektów lansuje się określenie „baterie atomowe”, ze względu na brak jakichkolwiek operacji z paliwem jądrowym w miejscu ich eksploatacji

(dotychczas takie określenie było stosowane w odniesieniu do urządzeń generujących energię elektryczną z ciepła powstającego w wyniku reakcji rozpadu promieniotwórczego). Bardziej zaawansowany jest projekt Toshiba, dla którego wybrano lokalizację pierwszej elektrowni w miejscowości Galena na Alasce. Najbardziej wyrafinowany technicznie wydaje się być Hyperion - bazujący na nietypowym paliwie reaktor, dostarczający energii dzięki bezpiecznemu, naturalnemu procesowi wytwarzania ciepła, zachodzącemu w otoczeniu wodoru o parametrach umożliwiających dysocjację paliwa w postaci wodorku uranu. Zależnie od odbieranej mocy, reaktor sam reguluje natężenie reakcji rozszczepienia, na podstawie zachodzących zjawisk fizycznych i chemicznych. To powoduje, że nie może on ulec stopieniu lub przegrzaniu. Konstrukcja jest pozbawiona elementów ruchomych i innych potencjalnych źródeł uszkodzeń. Z tego punktu widzenia nieco mniejsze zaufanie wydaje się wzbudzać konstrukcja Toshiba, sterowana za pomocą zespołu ruchomego reflektora neutronów, przesuwanego się w górę rdzenia średnio o ok. 1mm/tydzień, w celu równomiernego wykorzystania paliwa. Do napędu zespołu reflektora neutronów, jak również do napędu elektromagnetycznych pomp chłodziwa wymagana jest energia elektryczna [9]. W przypadku przerwy w jej dostawie wspomniany zespół reflektora neutronów pod wpływem siły grawitacji opada w dół reaktora, przerywając reakcję łańcuchową i wyłączając reaktor - dodatkowe zabezpieczenie stanowi pręt sterujący zlokalizowany wewnątrz rdzenia, w trakcie normalnej pracy w pełni wysunięty. Cały reaktor jest umieszczony pod powierzchnią terenu, w betonowym, izolowanym sejsmicznie budynku. Jednostka posiada samoregulujący się, pasywny system chłodzenia awaryjnego za pomocą obiegu powietrza, którego intensywność wzrasta ze wzrostem temperatury obudowy reaktora, zapewniając dostateczne odprowadzenie ciepła w razie awarii podstawowego układu chłodzenia [10].

Rewolucyjne cechy niektórych z wyżej wymienionych konstrukcji, takie jak wyjątkowo bezpieczne rozwiązania techniczne, modułowa konstrukcja oraz zmniejszenie o rzędy wielkości oferowanej mocy termicznej, w porównaniu do jednostek generacji III+ sprawiają, że niedługo możemy być świadkami pierwszych zastosowań reaktora IV generacji.

Przez cały okres recesji w budowie elektrowni jądrowych tworzone projekty coraz większych jednostek, wyposażonych w wyrafinowane systemy bezpieczeństwa. Doprowadziło to do wzrostu kosztów budowy elektrowni w

porównaniu do instalacji II generacji. Sprawa kosztów budowy i eksploatacji elektrowni jądrowych, a co za tym idzie całkowitych kosztów wyprodukowanej w nich energii elektrycznej wzbudza w ostatnich czasach wiele kontrowersji. Być może znaleźliśmy się w sytuacji, w której nikt nie wie ile wynoszą rzeczywiste koszty kapitałowe budowy, zwłaszcza, że przedsięwzięcia w tym zakresie są realizowane ze znacznymi opóźnieniami w stosunku do pierwotnie zakładanych harmonogramów [11]. W pracach studialnych zakładane są znacząco różniące się wskaźniki kosztu budowy elektrowni i obliczane są koszty wytworzenia energii zmieniające się w stosunku większym niż 1:4 [12].

W sporządzonym w ubiegłym roku studium w tym zakresie, naukowcy z Massachusetts Institute of Technology, bazując na kosztach obecnie prowadzonej budowy obiektów w Japonii i Korei oraz planowanych kosztach budowy nowych elektrowni w Stanach Zjednoczonych oszacowali wskaźnik kosztu konstrukcji, budowy i uruchomienia elektrowni na 4000 USD/kW mocy elektrycznej zainstalowanej, przy czym otrzymany wynik jest dwukrotnie większy niż w analogicznym opracowaniu sporządzonym sześć lat wcześniej [13]. Zważywszy, że elektrownie jądrowe buduje się obecnie przewidując 60-letni okres ich eksploatacji (w przypadku systemów IV generacji zakłada się 80-letni okres eksploatacji), nasuwa się pytanie: jaką dokładność mają szacunki kosztów rozbiórki i dekontaminacji tych obiektów? Jakiego rzędu błędem są obarczone? Czy w ogóle mają sens obliczenia ekonomicznej efektywności inwestycji dla tak odległych horyzontów czasowych? I wreszcie, jakim rzeczywistym ryzykiem obarczone są projekty w dziedzinie energetyki jądrowej? Istnieją opracowania wskazujące ograniczone możliwości realnej oceny działań biznesowych w zakresie energetyki jądrowej w aspekcie poziomu ryzyka z nią związanego [14].

W tym aspekcie opisane rozwiązania małych modułowych reaktorów mają niewątpliwe zalety. Koszty kapitałowe inwestycji mogą ulec poważnemu zmniejszeniu, dzięki dostosowaniu reaktorów do seryjnej produkcji oraz ułatwieniu i skróceniu procesów projektowania i budowy. Ponadto, w przypadku opisanych rozwiązań reaktorów zawierających zapas paliwa na cały okres eksploatacji tj.: Toshiba 4S, Hyperion i SSTAR, niewątpliwie nastąpi absolutnie rewolucyjne zmniejszenie kosztów eksploatacji, wywołane brakiem manipulacji z paliwem jądrowym oraz uproszczeniem i zmniejszeniem wymaganej obsługi – przewiduje się, że najliczniejszą grupą wśród pracowników elektrowni w Galena będą stanowili strażnicy, przy czym rola operatora zredukuje się do nadzoru, a

nie sterowania reaktorem. Z całą pewnością nieporównywalne będą też koszty rozbiórki i dekontaminacji takich elektrowni, polegające na odtransportowaniu reaktora w całości do wyspecjalizowanego zakładu przeróbki, z pozostawieniem na miejscu obiektu budowlanego poddającego się technologii normalnego wyburzenia, z zachowaniem konwencjonalnych przepisów prawa budowlanego, co zresztą nie pozostanie bez korzystnego wpływu, na jakość otaczającego środowiska naturalnego.

Ocena ekonomicznej efektywności takich inwestycji będzie możliwa przy zastosowaniu klasycznych narzędzi dynamicznego rachunku inwestycyjnego, z błędem porównywalnym do uzyskiwanego w wyniku oceny inwestycji w innych dziedzinach. Ponadto eksploatacja stosunkowo małych siłowni w warunkach generacji rozproszonej w pobliżu miejsc użytkowania energii, nie tylko zmniejszy koszty wymaganej rozbudowy infrastruktury przesyłowej, ale wpłynie na redukcję strat, a co za tym idzie kosztów przesyłu energii elektrycznej [15]. Radykalne zmniejszenie wielkości dostępnych reaktorów, w połączeniu z ich modułarną konstrukcją i możliwością seryjnej produkcji, umożliwi zastosowanie energetyki atomowej w miejscach, gdzie do tej pory energia elektryczna z sieci była niedostępna i musiała być wytwarzana w drogich generatorach indywidualnych, jak np. we wspomnianej miejscowości Galena. *Toshiba i Hyperion* planują ponadto wykorzystanie oferowanych reaktorów do wytwarzania pary w procesach eksploatacji piasków roponośnych. Według rozpowszechnianych informacji dla prasy, *Hyperion* zamierza w pierwszym etapie wyprodukować w trzech fabrykach 4 tysiące reaktorów, z których każdy będzie zdolny do wyprodukowania 27 MW mocy elektrycznej i będzie kosztował około 25 milionów dolarów. Obecnie w Stanach Zjednoczonych prowadzone są prace w zakresie niezbędnej zmiany podejścia przy certyfikacji tego typu reaktorów. Wiele wskazuje na to, że data uruchomienia elektrowni w miejscowości Galena z reaktorem *Toshiba 4S*, może być dniem technologicznego przełomu w energetyce jądrowej.

## LITERATURA

- [1]Lundquist A. D. et al: „Reliable, affordable and Environmentally Sound Energy for America’s Future – Report of National Energy Policy Development Group”; U.S Government Printing Office, Washington DC 2001.

- [2] Bouchard J. et al: „GIF 2008 Annual Report“; OECD Nuclear Energy Agency for The Generation IV International Forum, Issy-les-Moulineaux 2009.
- [3] MacPherson H. G.: “The Molten Salt Reactor Adventure“; Nuclear Science and Engineering: nr 90, p. 374-380, 1985.
- [4] Moormann R.: “A safety re-evaluation of the AVR Pebble bed reactor operation and its consequences for future HTR concepts“; Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek Verlag, Jülich 2008.
- [5] Bäumer R.: “Die Situation des THTR im Oktober 1989“; VGB-Kraftwerkstechnik 70. Jg., Heft 1, Jan. 1990, S. 8-14, 1990.
- [6] Dietrich G., Neumann W., Roehl N.: “Decommissioning of the thorium high temperature reactor (THTR 300)“; IAEA-TECDOC-1043 p. 9-15, Vienna 1997.
- [7] Celiński Z.: “Przewidywany rozwój energetyki jądrowej Generacje reaktorów energetycznych“ Energetyka nr 3, Katowice 2004.
- [8] Bouchard J. et al: „GIF 2008 Annual Report“; OECD Nuclear Energy Agency for The Generation IV International Forum, Issy-les-Moulineaux 2009.
- [9] Hattori S., Minato A.: “Meet Global Needs by 4S Plant“; ASME/JSME Nuclear Engineering Conference, Vol. 2, Tokyo 1993.
- [10] Hattori S., Minato A.: “Passive Safety Features in 4S Plant“; ASME/JSME Nuclear Engineering Conference, Vol. 1, Tokyo 1993.
- [11] Thomas S.: “AREVA et EDF: Perspectives commerciales et risques dans le secteur de l'énergie nucléaire“; Public Services International Research Unit (PSIRU) Business School University of Greenwich, 2009.
- [12] Thomas S., Bradford P., Froggatt A., Milborrow D.: “The Economics of Nuclear Power“; Greenpeace International, Amsterdam 2007.
- [13] Parsons J. E. et al: „Update of 2003 the Future of Nuclear Power – an interdisciplinary MIT Study“; Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 2009.
- [14] Thomas S.: “ENEL: Business prospects and risks in nuclear energy“; Public Services International Research Unit (PSIRU) Business School University of Greenwich 2009.
- [15] Buchta F.: „O bezpieczeństwie dostaw energii elektrycznej do odbiorców w warunkach rynkowych“; Energetyka Nr 6, Katowice 2008.

**Ponadto strony internetowe:** Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, Generation IV International Forum, International Energy Agency, US Department of Energy, US National Regulatory Commission, US Patent and Trade Mark Office, Energy Information Administration, Argonne National Laboratory, Idaho National Laboratory, Lawrence Livermore National Laboratory, Los Alamos National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, University of California Berkeley, Forschungszentrum Jülich GmbH, Atomic Energy of Canada Limited, Canadian Nuclear Safety Commission, miasta Obninsk, the Institute of Electrical and Electronic Engineers Inc.,

Hochtemperatur-Kernkraftwerk GmbH, Sellafield Ltd. i producentów reaktorów atomowych.