

# REAKTORY JĄDROWE NOWEJ GENERACJI

Stefan Chwaszczewski  
Instytut Energii Atomowej, Otwock-Świerk



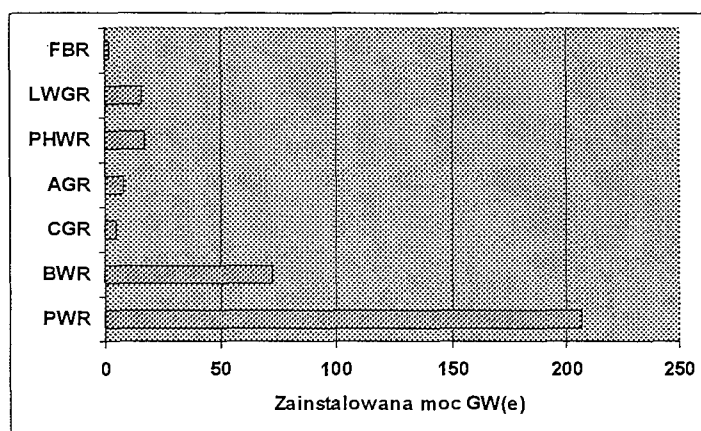
## 1. ENERGETYKA JĄDROWA XX WIEKU

Pierwszy reaktor jądrowy – czy też pierwsze reaktory jądrowe – były dziełem przyrody. Przed ponad dwoma miliardami lat izotopowy skład uranu naturalnego stwarzał w odpowiednich warunkach możliwości powstania samopodtrzymującej się reakcji łańcuchowej rozszczepienia. Naturalny uran zawierał wtenczas ponad 3% rozszczepialnego izotopu U-235 i przy określonych warunkach środowiskowych taki układ mógł charakteryzować się współczynnikiem mnożenia większym od jedności. Przypuszcza się, że taki „naturalny” reaktor powstał w Oklo, w Gabonie. Świadczy o tym zmniejszona zawartość U-235 w uranie wydobywanym w kopalniach uranu w tej miejscowości. Różnica ta, jak się przypuszcza – może wynikać z wykorzystania rozszczepialnego izotopu U-235 w okresie działania tego naturalnego reaktora jądrowego.

Po ponad dwóch miliardach lat człowiek powtórzył eksperyment przyrody. **Pierwszy reaktor jądrowy skonstruowany przez człowieka** został uruchomiony 2 grudnia 1942 roku w Chicago. Fakt ten zmienił obraz i historię świata. Reaktor był stymulatorem niezwykłej w dziejach świata rewolucji naukowej, technicznej i kulturowej. Tajemnice budowy atomu, odkrycia nowych pierwiastków, chemia jądrowa i radiacyjna, wykorzystanie technik jądrowych w medycynie, wreszcie energetyka jądrowa – ten gwałtowny rozwój nauki i techniki został zapoczątkowany właśnie poprzez ten fakt.

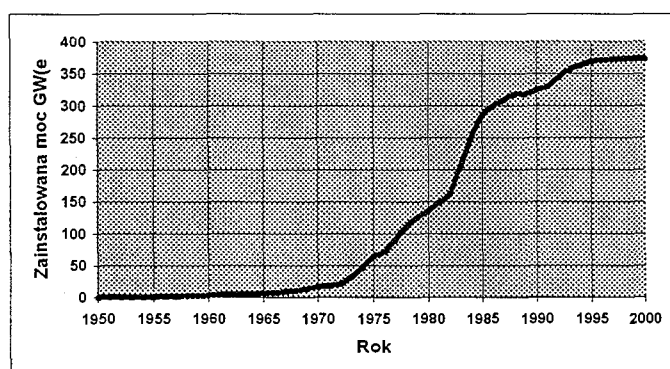
Wykorzystanie reaktorów jądrowych do wytwarzania energii elektrycznej rozpoczęło się dopiero po dziesięciu latach. Pierwsze próby wykorzystania energii cieplnej wytworzonej w reaktorze jądrowym wykonano w USA w 1952 roku. W 1955 roku, w Obnińsku pod Moskwą uruchomiono pierwszy, doświadczalny reaktor energetyczny. Reaktor ten o mocy 5 MW(e) był protoplastą reaktorów kanałowych, wrzących z grafitowym moderatorem nazwanych dalej RBMK - LWGR (Light Water cooled Graphite moderated Reactor). W 1956 roku, w Wielkiej Brytanii uruchomiony został pierwszy blok energetyczny z jądrowym źródłem energii cieplnej: **Calder Hall**, reaktor z moderatorem grafitowym chłodzonym gazem – reaktor określony skrótem GCR (Gas-Cooled, graphite moderated Reactor). Reaktor ten znajduje się obecnie w eksploatacji i posiada zezwolenie na eksploatację do 2006 roku.

W okresie od 1960 prowadzono prace nad różnymi konstrukcjami reaktorów energetycznych. Obecnie, tylko kilka z nich wytrzymało próbę czasu. Najwięcej zbudowano reaktorów wykorzystujących wodę jako moderator i chłodziwo: reaktory wodne ciśnieniowe – PWR (Pressurized Water Reactor) lub WWER (Wodo Wodjanoj Energeticzeskiej Reaktor) i wrzące – BWR (Boiling Water Reactor). Następnym w kolejności zmniejszającego się wykorzystania jest reaktor konstrukcji kanadyjskiej – CANDU – PHWR (Pressurized Heavy Water moderated and cooled Reactor). Dorównują mu zainstalowaną mocą reaktor RBMK – LWGR (Light Water cooled Graphite moderated Reactor). Pozostałe typy to reaktory z chłodziwem gazowym: GCR (Gas Cooled, graphite moderated Reactor) i AGR (Advanced Gas cooled graphite moderated Reactors). Zbudowano również kilka przemysłowych reaktorów powielających na neutronach prędkich chłodzonych ciekłym sodem. Część z nich została wyłączona z eksploatacji. Histogram mocy zainstalowanej w różnych typach reaktorów pod koniec lat dziewięćdziesiątych jest przedstawiony na rysunku 1.



**Rys. 1. Udział różnych typów reaktorów w wytwarzaniu energii elektrycznej w końcu XX wieku.**

Od 1960 roku obserwuje się gwałtowny rozwój energetyki jądrowej. Procesowi temu sprzyjał bardzo szybki rozwój zapotrzebowania na energię elektryczną w rozwiniętych krajach świata. Na rysunku 2 przedstawiono wykres wzrostu mocy elektrowni jądrowych[1].

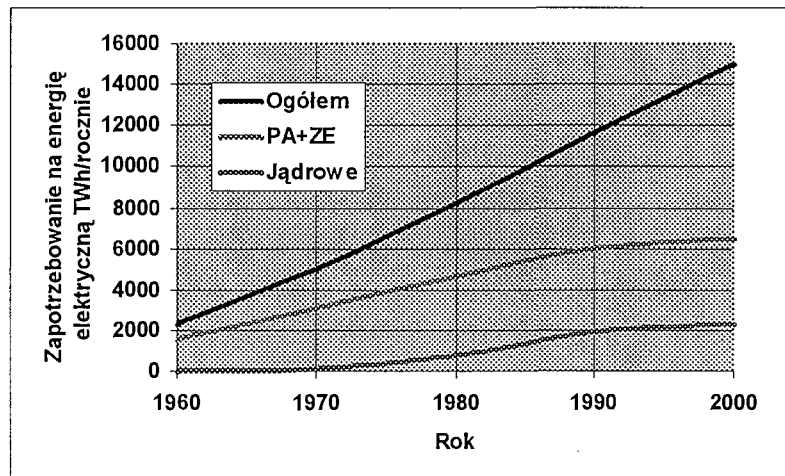


**Rys. 2. Moc elektrowni jądrowych w poszczególnych latach.**

Tak szybkiemu przyrostowi mocy zainstalowanej w elektrowniach jądrowych w latach 1970 – 1990 sprzyjał rozwój zapotrzebowania na energię elektryczną w rozwiniętych krajach Ameryki Północnej i Zachodniej Europy. Niewątpliwie stymulatorem rozwoju energetyki jądrowej był wyścig zbrojeń atomowych: przemysł energetyki jądrowej wykorzystywał technologie opracowane dla potrzeb militarnych. Najwięcej elektrowni jądrowych zbudowano w Ameryce Północnej i w krajach Zachodniej Europy. W krajach tych zbudowano elektrownie jądrowe o łącznej mocy 239 GW(e), w porównaniu do 46,5 GW(e) w byłych krajach RWPG i 61,6 GW(e) w krajach wschodniej Azji – w tym 53 GW(e) w Japonii i Korei Południowej [1].

Pod koniec lat osiemdziesiątych gwałtowny przyrost zapotrzebowania na energię elektryczną w krajach rozwiniętych uległ zahamowaniu. Na rysunku 3 przedstawiono wykres zapotrzebowania na energię elektryczną w latach 1960 – 2000 ogółem, na świecie, w tym w krajach Ameryki Północnej w Zachodniej Europy – (AP+ZE) [2], [3]. Na tym tle przedstawiono produkcję energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych. Z wykresu tego

wynika jasno, że energetyka jądrowa „odtworza” zapotrzebowanie na energię elektryczną w rozwiniętych krajach świata. Z wykresu wynika, że rozwój potencjału wytwórczego elektroenergetyki następuje w rozwijających się krajach, i rozwój ten opiera się głównie na elektrowniach konwencjonalnych. Zapotrzebowanie na energię elektryczną w świecie do 2000 roku wzrasta liniowo, średnio o 320 TWh rocznie. Jeśli nie zdarzą się globalne katastrofy to tendencja ta będzie tendencją stałą.



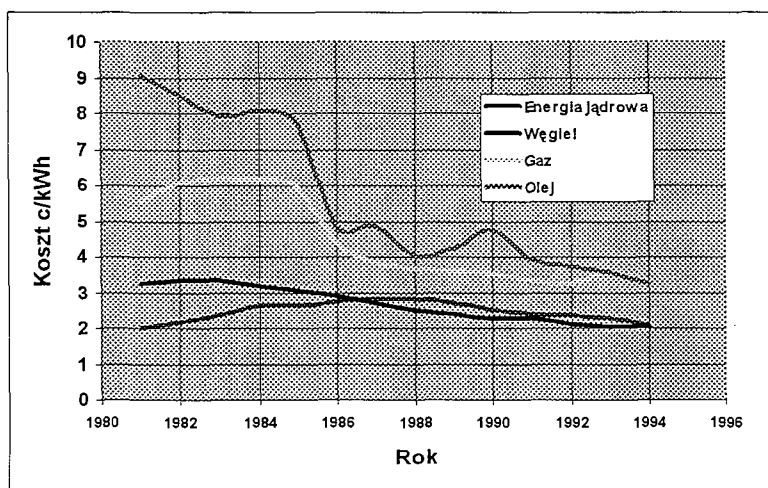
**Rys. 3. Zapotrzebowanie na energię elektryczną w latach 1960 – 1970 ogółem, w tym zapotrzebowanie na energię elektryczną w krajach Północnej Ameryki i Zachodniej Europy (PA+ZE) i produkcja energii elektrycznej z elektrowni jądrowych.**

Należy sobie zadać pytanie dlaczego produkcja energii elektrycznej z paliw jądrowych jedynie „odtworza” mniej więcej na poziomie dwudziestu kilku procent zapotrzebowanie na energię elektryczną w rozwiniętych krajach świata. Dlaczego energetyka jądrowa nie zastępuje emitującej szkodliwe substancje energetyki węglowej. Dlaczego elektrownie jądrowe nie są budowane w krajach rozwijających się? Dlaczego reszta świata bardzo ostrożnie podchodzi do tego źródła energii?

Przyczyn jest kilka. Postaram się je wymienić bez próby uszeregowania wg ważności:

**Sprzeciw społeczny.** Niewątpliwie głównym źródłem oporów społecznych jest militarne pochodzenie energetyki jądrowej. Ale nie tylko. Z zadziwiającym upodobaniem prasa, radio i telewizja donoszą o wszelkich kłopotach energetyki jądrowej. Informacje o awarii reaktora energetycznego w Harisburgu zajmowały przez wiele dni pierwsze stronicie prasy i pierwsze doniesienia w dziennikach radiowych i telewizyjnych. Doniesienia o katastrofie w elektrowni jądrowej Czarnobyl wykreowały obraz apokalipsy atomowej -pomimo, że historia cywilizacji XX wieku zna gorsze w skutkach katastrofy przemysłowe. Wypadek jądrowy w zakładach produkcji paliwa Tokai - Mura w Japonii i śmierć dwóch pracowników tych zakładów był eksponowany przez tygodnie na pierwszych stronach prasy, radia i telewizji a wypadki w kopalniach węgla, w których w Polsce w 2000 roku poniosło śmierć ponad 20 osób zasługują tylko na wzmiankę. Na tym tle są przedstawiane wizje zgubnego wpływu promieniowania na środowisko, na zdrowie i życie ludzi. Obawy te są wspomagane przez środowiska naukowe dążące do ustalenia coraz niższych dopuszczalnych poziomów promieniowania.

**Względy ekonomiczne.** Koszt wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych zrównał się z kosztami wytwarzania energii elektrycznej z elektrowni zasilanych węglem. Orientacyjny wykres zmian kosztów wytwarzania energii elektrycznych jest przedstawiony na rysunku 4 [4]. Ciągłe rosnące wymagania bezpieczeństwa, ochrony obiektów energetyki jądrowej podnoszą koszty wytwarzania w nich energii elektrycznej. Z drugiej strony rozwój technologii elektroenergetyki na paliwach konwencjonalnych, dostępność gazu zwiększa konkurencyjność konwencjonalnych źródeł energii elektrycznej. Demonopolizacja oraz prywatyzacja przemysłu wytwórczego elektroenergetyki dodatkowo zmniejsza konkurencyjność energetyki jądrowej - preferowane są przedsięwzięcia o szybkim zwrocie kapitału nie prowadzące do sprzeczności społecznych.



**Rys. 4. Orientacyjne zmiany kosztów wytwarzania energii elektrycznej z różnych paliw w okresie od 1981 do 1994 roku.**

**Ograniczenia polityczne.** Problemy energetyki jądrowej są często i chętnie wykorzystywane w walce politycznej. Widać to na przykładzie Szwecji, Austrii i obecnie Niemiec.

Wszystkie te czynniki spowodowały znaczne zmniejszenie zainteresowania energetyką jądrową w rozwiniętych krajach Ameryki i Europy. Bez wprowadzenia finansowych mechanizmów ochrony środowiska przed uwolnieniami szkodliwych substancji z elektrowni konwencjonalnych (opłaty za emisję), bez wprowadzenia mechanizmów ochronnych surowców organicznych, bez przystosowania samej energetyki jądrowej do nowych warunków nie należy oczekiwać rychłego renesansu energetyki jądrowej. W obecnych uwarunkowaniach prognozowany jest zwiększający się udział gazu, paliw ciekłych w strukturze paliw pierwotnych. Paliw, których zasoby są ograniczone i które są bezcennym surowcem chemicznym. Spalanie tych surowców w paleniskach elektrowni, w sytuacji dostępu do olbrzymich zasobów paliw jądrowych, z których można tylko wytwarzać energię elektryczną jest marnotrawstwem wobec przyszłych pokoleń. Bez wykorzystania energetyki jądrowej nie wyobrażam sobie rozwoju ludzkości. Kiedy ludzkość zrozumie te uwarunkowania – to już inna sprawa. Oby jak najszybciej.

## 2. REAKTORY NOWEJ (NASTĘPNEJ) GENERACJI

Energetyka jądrowa sama z siebie nie jest zdolna do rozwiązania wszystkich wymienionych powyżej problemów, które rzutują na perspektywy jej zastosowania. Jednakże część z nich powinna być przedmiotem prac rozwojowych, konstrukcyjnych i technologicznych energetyki jądrowej. Są to następujące zagadnienia:

- Zapewnienie bezpieczeństwa jądrowego i radiologicznego na wszystkich etapach eksploatacji i likwidacji obiektów energetyki jądrowej włącznie z obiektami cyklu paliwowego i gospodarki odpadami promieniotwórczymi. Bezpieczeństwo to powinno być zapewnione zarówno w warunkach normalnej eksploatacji jak również w sytuacjach awaryjnych.
- Utrzymanie przy tak wysokich wymaganiach bezpieczeństwa jądrowego, ochrony radiologicznej oraz ochrony fizycznej konkurencyjnych kosztów wytwarzania energii elektrycznej.
- Dostarczenie odpowiednich argumentów dla przekonania opinii społecznej o zaletach rozwoju energetyki jądrowej.

Sytuacja na rynku producentów urządzeń energetyki jądrowej nie napawa zbytnim optymizmem. W 1999 roku prowadzono budowę 37 bloków elektrowni jądrowych, w tym rozpoczęto budowę siedmiu nowych jądrowych bloków energetycznych[1] Uruchomiono cztery nowe jądrowe bloki energetyczne a wyłączono z eksploatacji dwa bloki. W tej liczbie prowadzono budowę tylko czterech jądrowych bloków energetycznych w krajach, gdzie znajduje się rozwinięty przemysł wytwórczy energetyki jądrowej. Rządy Stanów Zjednoczonych, Wielkiej Brytanii, Francji i Niemiec stopniowo wycofywały się z dotacji budżetowych do opracowań nowych rozwiązań konstrukcyjnych reaktorów energetycznych, finansując prace nad poprawą bezpieczeństwa działających elektrowni i prace nad technologiami postępowania z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem. W tej sytuacji zrozumiałym jest spowolnienie rozwoju konstrukcji wymagających znacznych nakładów na prace badawcze a oparcie konstrukcji nowych bloków energetyki jądrowej na wykorzystaniu nowych technologii oraz dotychczasowych doświadczeń z eksploatacji reaktorów energetycznych. Korzystając ze zgromadzonych doświadczeń, przedsiębiorstwa, które przygotowują się do negocjacji nowych kontraktów na budowę elektrowni jądrowych wspólnie z konstruktorami i producentami jądrowych bloków energetycznych przygotowali wymagania techniczne na elektrownie jądrowe „następnej generacji” (next generation) tzw. *Utility Requirements* [5]. Biorąc pod uwagę dotychczasowe doświadczenia eksploatacyjne, jako perspektywiczny typ reaktora energetycznego następnej generacji przyjęto reaktor z wodnym moderatorem i wodnym chłodziwem: reaktory ciśnieniowe i wrzące.

Pojawiły się następujące dokumenty z tej serii:

1. **EPRI Utility Requirements Document (URD)** – dokument, w którym na bazie dotychczasowych doświadczeń wynikających z eksploatacji elektrowni jądrowych w USA sformułowano wymagania dla konstrukcji ulepszonych reaktorów lekkowodnych ALWR (*advanced light water reactor*). Wymagania te zostały opracowane przez EPRI – (*Electric Power Research Institute*). Dokument URD określa:
  - Bazę normatywną dla opracowania konstrukcji nowych elektrowni uzgodnioną z Dozorem Jądrowym USA – NRC (Nuclear Regulatory Commission), włączając w to zestaw sytuacji awaryjnych, które powinny być uwzględnione przy analizach bezpieczeństwa obiektu.
  - Zestaw wymagań standaryzacji konstrukcji obiektu oraz
  - Zestaw wymagań technicznych, które wykorzystane przez inwestora dla opracowania konstrukcji bloku, licencjonowania i budowy.

Opracowany w 1990 roku dokument zawierający ponad 14 000 szczegółowych wymagań był wykorzystany do opracowania konstrukcji kilku jądrowych bloków energetycznych. Do chwili obecnej dokument URD doczekał się siedmiu edycji.

2. **European Utility Requirements Document (EUR)**[6] jest dokumentem opracowanym przez *Agrupacion Electrica para el Desarrollo Tecnologico Nuclear DTN* (Hiszpania), *Electricite de France* (Francja), *ENEL* (Włochy), *KEMA Nederland BV* (Holandia), *Nuclear Electric* (Wielka Brytania), *Tractebel* (Belgia) i *Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke* (Niemcy). Prace zostały rozpoczęte w 1992 roku i pierwsza edycja EUR pojawiła się w r. 1994 a pod koniec 1995 druga edycja tego dokumentu. Dokument ten przede wszystkim ustala jednolite zasady bezpieczeństwa obiektu oraz określa standardy konstrukcji umożliwiające licencjonowanie obiektu w krajach, których organizacje uczestniczyły w opracowaniu dokumentu.
3. **Japanese Utility Requirement Document (JURD)** określa bazę normatywną i standardy, którym powinny odpowiadać jądrowe bloki energetyczne budowane w Japonii. Dwa jądrowe bloki energetyczne: ABWR Kashiwazaki – Kariva bloki Nr 6 i 7 zostały opracowane na bazie JURD.
4. **Korean Utility Requirements Document (KURD)** i
5. **Taiwan Power Company Requirements Documents (TPCRD)** bazują w zasadzie na dokumencie EPRI URD i określają bazę normatywną reaktorów wodnych budowanych w Korei i Tajwanie.

Polska, w przypadku podjęcia decyzji o budowie elektrowni jądrowych ze względu na swoje położenie geograficzne powinna opierać się na wymaganiach EUR [6]. Wymagania te zostały opracowane dla – jak to zostało określone w teście dokumentu – dla reaktorów następnej generacji (next generation). Jednakże, jak to zostanie pokazane poniżej, reaktory te w pełni odpowiadają określeniu podanym w Uchwale Sejmu RP z dnia 9 listopada 1990 roku: „w sprawie założeń polityki energetycznej Polski do 2010 roku” w której czytamy: „*Za podstawowe kierunki polityki energetycznej kraju Sejm uważa:.....W zakresie elektroenergetyki ..... możliwość budowy elektrowni jądrowych wyłącznie przy wykorzystaniu nowych generacji reaktorów zapewniających efektywność ekonomiczną i bezpieczeństwo ekologiczne*”. W zakresie bezpieczeństwa ekologicznego dokument EUR stawia następujące wymagania:

*Nr 1.3.4.3. Uwolnienia do atmosfery w przypadku awarii projektowych:*

*Zakłada się:*

- (1) brak potrzeby podejmowania jakichkolwiek akcji poza strefą 800 m,*
- (2) ograniczone skutki ekonomiczne.*

*Nr 1.3.4.4. Uwolnienia do atmosfery w przypadku awarii ciężkich:*

- (1) brak potrzeby podejmowania natychmiastowych akcji poza strefą 800 m,*
- (2) brak potrzeby podejmowania jakichkolwiek akcji poza strefą 3 km od reaktora,*
- (3) brak konieczności podejmowania długoterminowych akcji poza strefą 800 m.*

W odniesieniu do zdarzeń zewnętrznych, reaktor energetyczny zgodnie z wymaganiami EUR powinien być odporny na:

- trzęsienia ziemi;
- falę uderzeniową od eksplozji ładunku wybuchowego;
- upadek samolotu;
- inne zdarzenia zewnętrzne właściwe dla danego rejonu (huragan, powódź itp.).

Dokument EUR określa dopuszczalne prawdopodobieństwo uszkodzenia rdzenia na mniejsze niż  $10^{-5}$  na rok oraz prawdopodobieństwo mniejsze niż  $10^{-6}$  na rok przy uwolnieniach

substancji promieniotwórczych przekraczającymi dopuszczalny poziom. Reaktor powinien być umieszczony w podwójnej obudowie bezpieczeństwa.

Dokument EUR definiuje parametry bloku określające jego ekonomikę. Wielkość bloku od 600 MW(e) do 1500 MW(e). Koszt inwestycji w przeliczeniu na 1 kW nie powinien być większy niż 1100 ECU(wg cen 1995 roku). Okres eksploatacji bloku nie mniej niż 60 lat. Dyspozycyjność bloku nie mniejsza niż 87%. Reaktor powinien być przystosowany do pracy z 50% załadunkiem paliwa MOX. Średnie wypalenie paliwa UO<sub>2</sub> do 55 GWdni/tU a maksymalne do 60 GWdni/tU. W przypadku paliwa MOX<sup>1</sup> średnie wypalenie 41 GWdni/tHM i 45 GWdni/tHM odpowiednio.

Przedstawione powyżej parametry są możliwe do uzyskania dzięki standaryzacji rozwiązań, prefabrykacji elementów wyposażenia elektrowni, zastosowania nowych materiałów, cyfrowych układów sterowania. Wysokie wielkości wypalenia uzyskuje się poprzez stosowanie wypalających się truczyn w paliwie, starannym projektowaniu kampanii paliwowej i wytwarzaniu paliwa dla zadanej kampanii paliwowej. Produkowane paliwo posiada zmienne wzbogacenie wzdłuż osi umożliwiające uzyskanie równomiernego rozkładu wydzielanej mocy i w konsekwencji wysokich wypaleń.

W oparciu o przygotowane wymagania w wiodących organizacja prowadzone są prace nad nowymi rozwiązaniami reaktorów energetycznych. W tabeli 1 przedstawiono ewolucyjne konstrukcje reaktorów lekkowodnych następnej generacji znajdujących się w różnych stadiach opracowań. W dalszej części opracowania przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne poszczególnych obiektów.

**Tabela 1. Opracowywane ewolucyjne konstrukcje reaktorów lekkowodnych następnej generacji.**

Nazwa	Typ	Moc MW(e)	Dostawca konstruktor	Stan
ABWR	BWR	1 300	GE, Hitachi/Toshiba	Działający
BWR 90	BWR	1 200	ABB Atom	Projekt
System 80+	PWR	1 350	ABB – CE	Projekt
EP 1000	PWR	1 000	Westinghouse, Genesi	Wstępny
EPR	PWR	1 500	NPI	Wstępny
VVER	PWR	1 000	Atomenergoexport	Wstępny
APWR	PWR	1 300	Westinghouse, Mitsubishi	Koncepcja
Sizewel C	PWR	1 250	NNC (UK)	Koncepcja
SWR 1000	PWR	1 000	Siemens	Koncepcja
AP-600	PWR	600	Westinghouse	Projekt
MS-600	PWR	600	Mitsubishi	Projekt
VVER-640	PWR	640	Atomenergoeksport	Projekt
HSBWR	BWR	600	Hitachi	Wstępny
AC-600	PWR	600	Chiny (CNNC)	Koncepcja

Stadia opracowań: Koncepcja → Wstępny (projekt) → Projekt (produkcyjny) → Działający (reaktor).

<sup>1</sup> Paliwo MOX jest wytwarzane z wykorzystaniem plutonu uzyskanego z przerobu wypalonego paliwa UO<sub>2</sub>.

### 3. KIERUNKI ROZWOJU LEKKOWODNYCH REAKTORÓW ENERGETYCZNYCH NOWEJ GENERACJI

W sytuacji ograniczonych zamówień na nowe jądrowe bloki energetyczne, wycofania dotacji państwowych na opracowanie zupełnie nowych konstrukcji rozwój technologii reaktorów następnej (nowej) generacji był prowadzony w dwóch kierunkach ewolucyjnych:

1. Polepszenia parametrów ekonomicznych budowy i wykorzystania reaktora energetycznego oraz polepszenie jego cech bezpieczeństwa poprzez:
  - (a) opracowanie nowej technologii wytwarzania i wykorzystania paliwa jądrowego;
  - (b) zmiany konstrukcji rdzenia reaktora;
  - (c) zmiany w konstrukcji zbiornika reaktora, pierwotnego obiegu chłodzenia reaktora i stosowanych w tych układach materiałach;
  - (d) zastosowaniu cyfrowych układów sterowania i zabezpieczeń,
2. Ograniczenia skutków ewentualnej awarii reaktora poprzez:
  - (a) zastosowanie specjalnej konstrukcji do utrzymania i schłodzenia roztopionego paliwa w przypadku zniszczenia zbiornika reaktora,
  - (b) zastosowanie układów awaryjnego chłodzenia rdzenia reaktora i zbiornika reaktora zmniejszających skutki awarii w układzie reaktora
  - (c) zastosowanie układów redukujących wodór w budynku reaktora
  - (d) zastosowanie układów redukujących wzrost ciśnienia w budynku w przypadku rozerwania pierwotnego układu chłodzenia reaktora,
  - (e) zastosowanie odpowiedniej konstrukcji obudowy bezpieczeństwa.

Nie muszą dodawać, że konstrukcje te są odporne na zewnętrzne sytuacje wymienione w dokumencie EUR, takie jak:

- trzęsienia ziemi;
- falę uderzeniową od eksplozji ładunku wybuchowego;
- upadek samolotu;
- inne zdarzenia zewnętrzne właściwe dla danego rejonu (huragan, powódź itp.).

Pomimo trudnej sytuacji w zakresie budowy elektrowni jądrowej przemysł ten doprowadził do uruchomienia w Japonii dwóch jądrowych bloków energetycznych z reaktorami, które odpowiadały wymogom dokumentu **JURD reaktorów ABWR w Elektrowni Jądrowej Kashiwazaki Kariwa** [1], [5]

Poniżej przedstawiono niektóre z zastosowanych rozwiązań.

#### 3.1. Technologia wytwarzania i wykorzystania paliwa jądrowego

Zarówno zachowanie wysokiego poziomu bezpieczeństwa jądrowego jak i uzyskanie wysokich wskaźników ekonomicznych elektrowni jądrowej zależy w znacznym stopniu od zachowania się paliwa w rdzeniu reaktora jądrowego. Wysokie wypalenie wyładowanego z reaktora paliwa – zakładane w EUR powyżej 50 GWdni/tU – pozwala na zmniejszenie składowej paliwa w kosztach wytwarzania energii przez reaktor. Niezawodność pracy paliwa – to nie tylko bezpieczeństwo jądrowe i radiologiczne pracy reaktora energetycznego, lecz również i dyspozycyjność elektrowni, co niewątpliwie posiada wpływ na cenę wytwarzanej energii elektrycznej. Dlatego konstrukcja elementów paliwowych, rodzaj wykorzystanych materiałów i technologia eksploatacji paliwa w reaktorze posiada pierwszoplanowe znaczenie w konstrukcji reaktorów nowej generacji. Kierunki udoskonalania paliwa jądrowego można określić następująco:

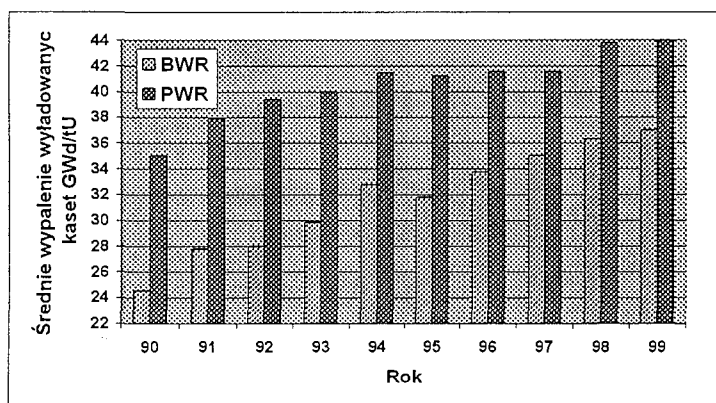
- wykorzystanie nowoczesnych materiałów i technologii do wytwarzania prętów paliwowych i kaset paliwowych: nowe stopy cyrkonu, spawanie końcówek prętów paliwowych wiązką elektronów w próżni, zastosowanie elastycznych układów



dystansujących pręty paliwowe w kasecie oraz zastosowanie nowoczesnych technik kontroli jakości produkcji;

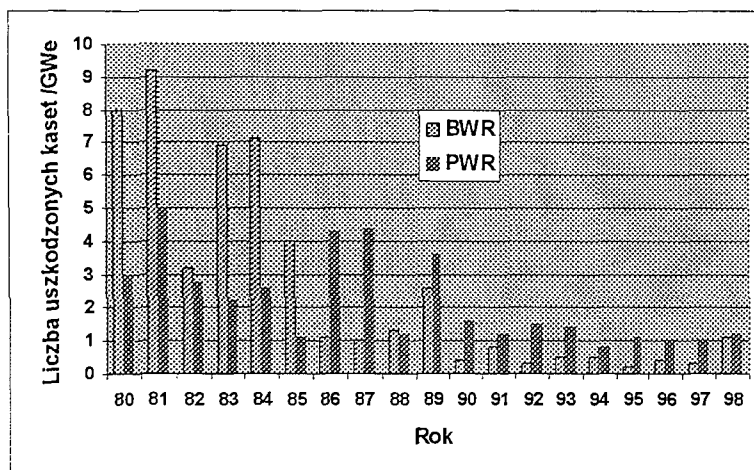
- wprowadzenie zmiennego wzbogacenia w elementach paliwowych wzdłuż wysokości rdzenia. Technologia ta umożliwia uzyskanie równomiernego rozkładu generowanej mocy w rdzeniu;
- zastosowanie w konstrukcji kasety wypalających się truczyn takich jak  $Gd_2O_3$ ,  $Er_2O_3$  lub  $B_4C$  dla skompensowania wypalenia izotopów rozszczepialnych w paliwie oraz zatrucia reaktora produktami rozszczepienia. Rozwój technologii wprowadzenia zmiennej zawartości wypalających się truczyn w przestrzeni kasety;
- rozwój technik diagnostyki stanu paliwa w trakcie eksploatacji w rdzeniu reaktora jak i w okresie przeładunków. Konstrukcja rozbieralnej kasety paliwowej umożliwiającą wymianę uszkodzonego pręta paliwowego w kasecie;
- rozwój metod planowania kampanii paliwowej reaktora energetycznego: konstrukcja optymalnej konfiguracji rdzenia reaktora, dobór rozkładu wzbogacenia paliwa w kasecie, dobór rodzaju i rozkładu zawartości wypalających się truczyn w elementach paliwowych kasety. W praktyce sprowadza się to do wytworzenia kasety paliwowej dla danego reaktora, zadanej pozycji w rdzeniu oraz zadanego programu eksploatacji reaktora.

Prowadzone prace zaowocowały w polepszeniu parametrów eksploatacyjnych nowego paliwa jądrowego w reaktorach LWR w Stanach Zjednoczonych[7]. Na rysunku 5 przedstawiono wzrost średniego wypalenia wyładowywanych z energetycznych reaktorów jądrowych w USA kaset paliwowych w miarę rozwoju technologii wytwarzania i eksploatacji paliwa jądrowego.



**Rys. 5. Średnie wypalenie paliwa jądrowego wyładowanego w poszczególnych latach z reaktorów energetycznych w USA [7].**

Biorąc pod uwagę, że wyniki te uzyskano w zbudowanych w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych reaktorach energetycznych osiągnięcia te są wyłącznie wynikiem rozwoju technologii budowy i wykorzystania paliw jądrowych. Również statystyka uszkodzeń kaset paliwowych - przedstawiona na rysunku 6 - pokazuje wzrastającą ich niezawodność. Wyniki te, uzyskane w reaktorach zbudowanych w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych w USA świadczą o postępie w rozwoju technologii wytwarzania i eksploatacji paliwa reaktorów LWR oraz o osiągalności postawionych w EUR parametrów dotyczących wielkości wypalenia i niezawodności pracy paliwa jądrowego.



Rys. 6. Statystyka uszkodzeń kaset paliwowych w reaktorach LWR: średnia ilość uszkodzonych kaset paliwowych rocznie w przeliczeniu na GWe zainstalowanej mocy w poszczególnych latach w elektrowniach jądrowych USA [7].

### 3.2. Technologia budowy i wykorzystania rdzenia reaktora

Dzięki rozwojowi technologii wytwarzania paliwa oraz postępowi prognozowania kampanii paliwowej możliwym było znaczne zmniejszenie nierównomierności gęstości generowanej w rdzeniu reaktora mocy cieplnej. W reaktorach eksploatowanych w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych współczynnik nierównomierności rozkładu gęstości mocy, definiowany jako stosunek gęstości mocy generowanej w najbardziej energetycznie obciążony obszar rdzenia do średniej gęstości mocy w rdzeniu osiągał wartość 1,45 w PWR i 1,6 w BWR. Obecnie, dzięki nowym technologiom wytwarzania elementów paliwowych, nowoczesnym technologiom projektowania konfiguracji rdzenia i procedurom eksploatacji reaktora udało się obniżyć ten współczynnik do 1,1 dla PWR i 1,25 dla BWR.

Jednocześnie, w nowych konstrukcjach wodnych reaktorów energetycznych zmniejszono średnią gęstość mocy w rdzeniu reaktora - średnio o 20 - 25%. W reaktorach wodnych ciśnieniowych średnia gęstość mocy została obniżona nawet do 70 kW/dcm<sup>3</sup> - w porównaniu z 90 - 100 kW/dcm<sup>3</sup> w dotychczas budowanych reaktorach. W reaktorach wrzących średnią gęstość mocy obniżono do 48 kW/dcm<sup>3</sup>. Obniżenie średniej gęstości mocy w rdzeniu z jednoczesnym wyrównaniem nierównomierności rozkładów gęstości mocy powoduje znaczne obniżenie maksymalnej gęstości mocy w rdzeniu reaktora. W reaktorach wodnych ciśnieniowych osiągnięto zmniejszenie maksymalnej gęstości mocy o prawie 60 %, w reaktorach wrzących o prawie 50 %. Zmiany te wpłyną niewątpliwie na zwiększenie niezawodności pracy paliwa w rdzeniu reaktora oraz umożliwią przedłużenie kampanii paliwowej reaktora - bez przeładunku paliwa - nawet do dwóch lat. Wiąże się jednak ze zwiększeniem objętości rdzenia reaktora i w konsekwencji zbiornika reaktora.

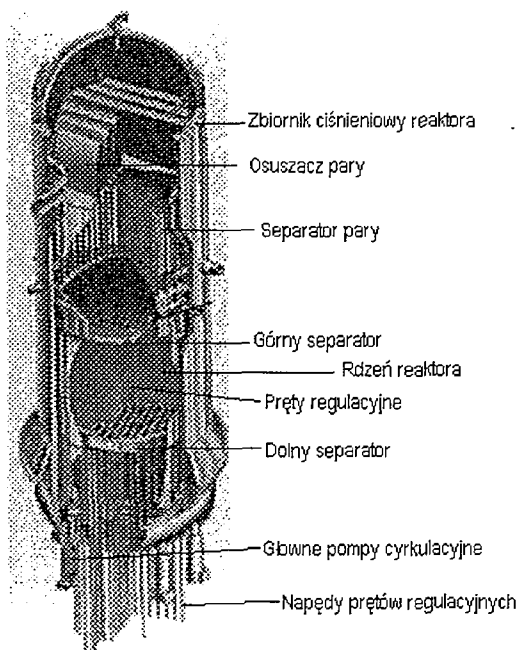
W opracowanych konstrukcjach w większym stopniu wykorzystano wypalające się truczyny, takie jak Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lub B<sub>4</sub>C. Zmniejszono się tym samym zakres zmian kompensacji wypalenia paliwa w rdzeniu przy pomocy zmiany koncentracji kwasu borowego w chłodziwie reaktora. Zmiany te umożliwiły zaprojektowanie kampanii paliwowych w reaktorach LWR nowej generacji ze znacznym średnim wypaleniem wyładowanego paliwa: od 38 GWdni/tU do 65 GWdni/tU. W pierwszym uruchomionym reaktorze nowej generacji - reaktorze ABWR 6 bloku Kashiwazaki Kariwa, blok 6 średnie wypalenie wypalonego paliwa przekracza poziom 50 GWdni/tU [5].

### 3.3. Zbiornik reaktora i pierwotny obieg chłodzenia reaktora

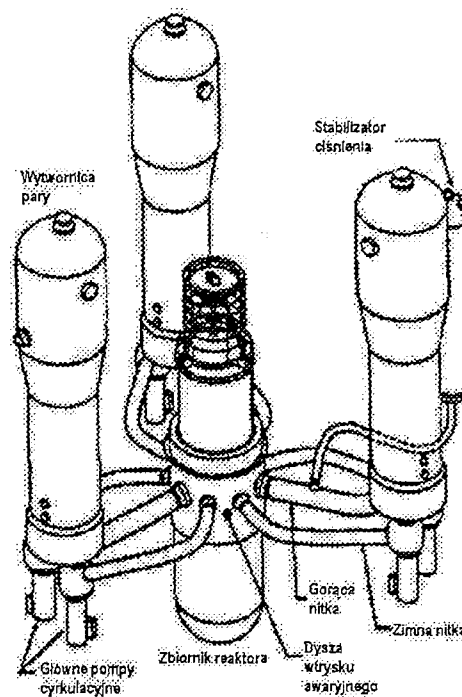
Zgodnie z wymaganiami EUR, zbiornik reaktora powinien zachować swoje właściwości przez cały okres pracy elektrowni, tj. przez okres co najmniej 60 lat. Podstawowym problemem, który występuje przy tak długim okresie eksploatacji materiału zbiornika reaktora jest radiacyjne utwardzenie metalu, a w szczególności, te obszary zbiornika, które znalazły się w strefie spawania. Pod wpływem neutronów materiał zbiornika reaktora zmienia właściwości objawiające się wzrostem temperatury, przy której materiał ten przechodzi ze stanu kruchego w stan plastyczny. W budowanych w latach siedemdziesiątych konstrukcjach reaktorów wodnych ciśnieniowych, w szczególności reaktorów WWER -440 model W230 po kilkunastu latach eksploatacji temperatura przejścia materiału zbiornika ze stanu kruchego do stanu plastycznego osiągała wartość około 138 °C [8]. -w przypadku EJ Lovissa oraz około 180 °C w pierwszym bloku EJ Grajswald [9]. Dla usunięcia tego zjawiska w reaktorach tych przewidziano wygrzanie zbiornika w temperaturze kilkuset stopni Celsjusza, w której wywołane neutronami wady struktury materiału są eliminowane. W elektrowni jądrowej Lovissa, na granicy rdzenia reaktora zostały umieszczone makiety kaset, tworzące ekran zmniejszający strumień neutronów oddziaływujących na zbiornik reaktora. W nowych konstrukcjach reaktorów, między rdzeniem a zbiornikiem reaktora jest umieszczony ekran stalowy, który jednocześnie spełnia rolę reflektora, poprawiającego bilans neutronów w rdzeniu.

Zarówno zbiorniki reaktorów, jak i pozostałe elementy pierwotnych obiegów chłodzenia reaktorów wykonane są z niskostopowych stali węglowych. Wszystkie projektowane zbiorniki reaktorów, od wewnętrznej strony są platerowane stalą nierdzewną. W znacznej części projektowanych reaktorów wrzących nowej generacji, jak również w uruchomionym reaktorze - reaktorze ABWR (rys. 7)- pompy cyrkulacyjne są zblokowane z korpusem reaktora. W reaktorach PWR pompy cyrkulacyjne obiegu pierwotnego w większości rozwiązań są zblokowane z korpusem pionowych wytwornic pary, jak to pokazano na rysunku 8. Rozwiązania takie prowadzą do oszczędności miejsca w obudowie bezpieczeństwa oraz znaczną redukcją długości rurociągów obiegu pierwotnego.

Poziome wytwornice pary - będące niejako specjalnością rosyjską są proponowane w rozwiązaniach rosyjskich, i w jednej konstrukcji japońskiej: MS-600. W pozostałych konstrukcjach zastosowano pionowe wytwornice pary, z rurkami wykonanymi z inconelu. W wytwornicach tych zastosowano elastyczne separatory ustalające położenie rurek w wytwornicy pary. Konstrukcja ta, jak podobna konstrukcja w kasetach paliwowych, eliminuje pojawienie się uszkodzeń spowodowanych drganiami rurek w wytwornicy pary - lub prętów paliwowych w kasecie paliwowej - w miejscach styku z separatorami płytowymi starego typu.



**Rys. 7. Zbiornik reaktora ABWR. W dolnej części zbiornika zamontowane są główne pompy obiegu chłodzenia**



**Rys. 8. Jądrowy układ wytwarzania pary z reaktorem APWR. Przy wytwornicach pary zamontowane są pompy obiegu chłodzenia reaktora.**

### 3.4. System sterowania i zabezpieczeń reaktorów energetycznych nowej generacji [5]

Na przełomie lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych w systemach sterowania i zabezpieczeń reaktorów jądrowych pojawiła się technika cyfrowa. W miarę rozwoju technologii cyfrowej, jej niezawodności coraz większe obszary funkcji sterowania a następnie zabezpieczeń zostają powierzone systemom cyfrowym. W zbudowanym reaktorze nowej generacji - reaktorze ABWR - oraz w projektowanych reaktorach, system sterowania i zabezpieczeń reaktora oraz całego jądrowego bloku energetycznego jest oparty na technice cyfrowej z wykorzystaniem mikroprocesorów. Łączność ze sterownią lub z układami technologicznymi odbywa się przy pomocy rozproszonego systemu funkcjonalnych procesorów. Dlatego system sterowania i zabezpieczeń jest systemem decentralizowanym charakteryzującym się wzajemnym rezerwowaniem oraz fizycznym rozdzielaniem funkcji sterowania i zabezpieczeń. System zawiera oprogramowania samotestujące system zabezpieczeń.

Zastosowanie sieci seryjnej transmisji informacji znacznie redukuje okablowanie systemu oraz zabezpiecza przed interferencją w realizacji poleceń. Wykorzystując przemysłowo wytwarzane urządzenia cyfrowe oraz ich oprogramowanie unika się konieczności magazynowania znacznej liczby części zapasowych oraz umożliwia szybka wymianę podzespołów w razie ich uszkodzenia. System - dzięki auto diagnostyce - może być obsługiwany przez osobę nie posiadającą specjalnych kwalifikacji. Sterowanie reaktorem i blokiem energetycznym może w każdej chwili być przekazane do sterowni awaryjnej. Zastosowanie systemów cyfrowych oraz nowoczesnych systemów wizualizacji procesu pozwala nie tylko zmniejszyć wymiar sterowni, lecz jednocześnie umożliwia przekazanie operatorowi reaktora czy bloku znacznie przetworzonej informacji.

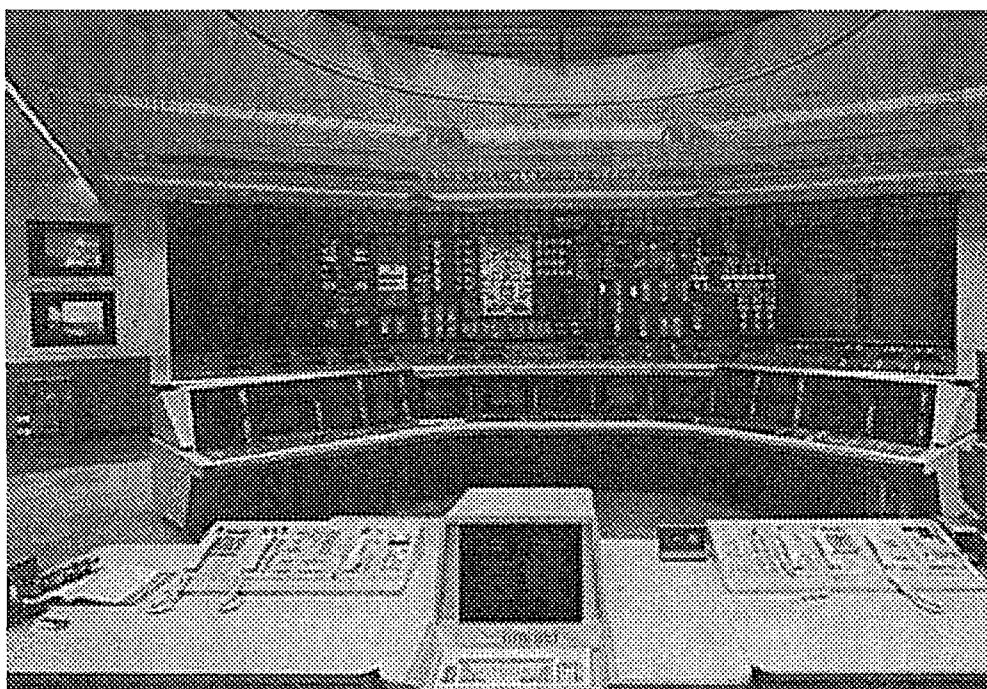
Wymienione powyżej atrybuty są właściwością każdego systemu sterowania cyfrowego. W odniesieniu do jądrowego reaktora energetycznego zastosowanie cyfrowych urządzeń sterowania i zabezpieczeń pozwala na wprowadzenie specjalistycznych funkcji zwiększających bezpieczeństwo obiektu i wpływających na ekonomikę wytwarzania w nim energii elektrycznej. Są to następujące funkcje:

- Diagnostyka stanu urządzeń obiektu umożliwiająca wczesne wykrycie ewentualnych uszkodzeń i stanów anomalnych.
- Optymalizacja wykorzystania paliwa jądrowego w rdzeniu reaktora: optymalizacja rozkładów gęstości mocy w rdzeniu, optymalne wykorzystanie paliwa jądrowego i wypalających się truczyn. Należy nadmienić, że bez wykorzystania cyfrowych układów zbierania i przetwarzania danych a następnie wykorzystania ich w sterowaniu reaktorem niemożliwe byłoby osiągnięcie tak znacznych poziomów wypalenia paliwa.
- Autonomiczne odstawianie reaktora w stanach awaryjnych. Systemy sterowania umożliwiają sterowanie wyłączeniem i schłodzeniem reaktora bez udziału operatora w sytuacjach anomalnych i awaryjnych. System w takich sytuacjach samodzielnie prowadzi obiekt przez pierwsze godziny po awaryjnym odstawieniu reaktora. Operator, uwolniony od bieżących obowiązków może odpowiedzialnie zaplanować dalsze postępowanie.

Zastosowanie cyfrowego systemu informatycznego umożliwia przekazanie pełnej informacji o stanie obiektu do centrum monitoringu awaryjnego. Zgromadzeni tam eksperci mogą mając pełną informację o stanie obiektu oraz systemy do symulacji dalszego jego zachowania, mogą przekazać swoje sugestie operatorowi bloku - bez fizycznej obecności w sterowni. Unika się tym samym błędnych decyzji operatora, który onieśmielony obecnością w sterowni „ważnych osobistości” nie ma warunków na podejmowanie właściwych decyzji.

Widok sterowni nowoczesnego jądrowego bloku energetycznego z reaktorem ABWR jest przedstawiony na rys. 9.

Zastosowanie sterowania cyfrowego umożliwia zapis i odtworzenie pełnej historii eksploatacji obiektu. Razem z cyfrowym symulatorem sterowni obiektu i symulatorem bloku energetycznego umożliwia właściwy trening personelu.



Rys. 9. Sterownia jądrowego bloku energetycznego z reaktorem nowej generacji - ABWR.

### 3.5. Układy ograniczające skutki awarii i obudowa bezpieczeństwa reaktora

Wymienione powyżej zmiany konstrukcyjne prowadzą do znaczącego zmniejszenia prawdopodobieństwa wystąpienia awarii reaktora z których najgroźniejszą jest awaria w wyniku której nastąpi stopienie elementów rdzenia. Przeprowadzone przy pomocy analiz prawdopodobieństwa oceny wykazują, że prawdopodobieństwo uszkodzenia rdzenia reaktora jest mniejsze niż  $10^{-5}$  zdarzenia na reaktor na rok a prawdopodobieństwo uszkodzenia rdzenia reaktora wraz z uwolnieniem substancji promieniotwórczych poza pierwotny obieg chłodzenia jest mniejsze od  $10^{-6}$  zdarzenia na reaktor na rok. Ostatnią barierą zapobiegającą wydostaniu się radioaktywnych substancji do środowiska są układy ograniczające skutki awarii oraz obudowa bezpieczeństwa reaktora.

Po awariach reaktorów energetycznych w EJ TMI oraz w EJ Czarnobyl, w wyniku nowego podejścia do problematyki bezpieczeństwa jądrowego funkcje układów ograniczających skutki awarii oraz obudowy bezpieczeństwa reaktora zostały znacznie rozszerzone. W blokach energetycznych z reaktorami nowej generacji obudowa bezpieczeństwa musi zabezpieczać środowisko przed następstwami szeregu ciężkich awarii reaktorowych [10]:

- Rozerwanie zbiornika reaktora, uwolnienie znacznych ilości mieszaniny parowo wodnej o wysokiej temperaturze.
- Wyrzut z uszkodzonego zbiornika strumieniem pary stopionych elementów rdzenia reaktora.
- Nagrzanie obudowy strumieniem pary z uszkodzonego rdzenia reaktora.
- Wytworzenie wodoru i jego spalanie wewnątrz obudowy.
- Reakcja paliwa z chłodziwem w zbiorniku reaktora oraz poza reaktorem.
- Reakcja stopionego paliwa z betonem i możliwe przetopienie posadzek pomieszczeń pod zbiornikiem reaktora.

Jednocześnie obudowa bezpieczeństwa reaktora powinna zabezpieczyć reaktor przed następującymi zewnętrznymi zdarzeniami:

- Trzęsieniem ziemi - jako pierwszy element w szeregu układów zabezpieczających reaktor. Sama obudowa nie powinna ulec uszkodzeniu.
- Huraganem i nawałnicą z wyładowaniami atmosferycznymi.
- Fali uderzeniowej od pobliskiego wybuchu.
- Upadek samolotu bojowego - obudowa bezpieczeństwa wraz z osłoną biologiczną reaktora powinny zapewnić integralność pierwotnego obiegu chłodzenia reaktora.

Reasumując, układy ograniczające skutki awarii oraz obudowa bezpieczeństwa powinny umożliwić spełnienie przez jądrowy blok energetyczny - w przypadku ciężkiej awarii - warunków przedstawionych w dokumencie EUR:

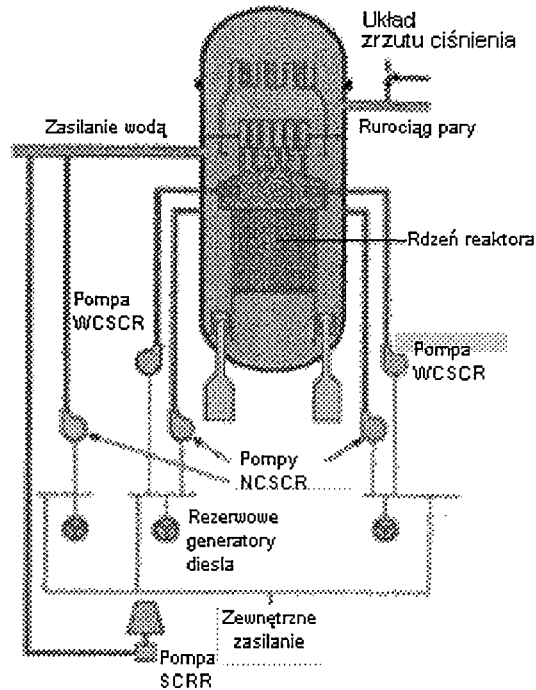
- (1) *brak potrzeby podejmowania natychmiastowych akcji poza strefą 800 m,*
- (2) *brak potrzeby podejmowania jakichkolwiek akcji poza strefą 3 km od reaktora,*
- (3) *brak konieczności podejmowania długoterminowych akcji poza strefą 800 m.*

Generalnie, układy ograniczające skutki awarii obejmują:

- System redukcji stężenia wodoru w obudowie bezpieczeństwa. W wyniku reakcji w wysokiej temperaturze cyrkonu lub paliwa z parą wodną jest generowany wodór, który w mieszaninie z tlenem może w wyniku wybuchu zniszczyć obudowę bezpieczeństwa. System prowadzi katalityczne łączenie wodoru z tlenem.
- System awaryjnego chłodzenia rdzenia reaktora w przypadku ucieczki chłodziwa z rdzenia reaktora. System ten powoduje iniekcję pod wysokim ciśnieniem wody do zbiornika reaktora.
- Systemu kontrolowanej redukcji nadmiernego ciśnienia w zbiorniku reaktora. System ten powoduje zrzut mieszaniny parowo wodnej do układu kondensacji i oczyszczania zrzutu z radioaktywnych substancji.

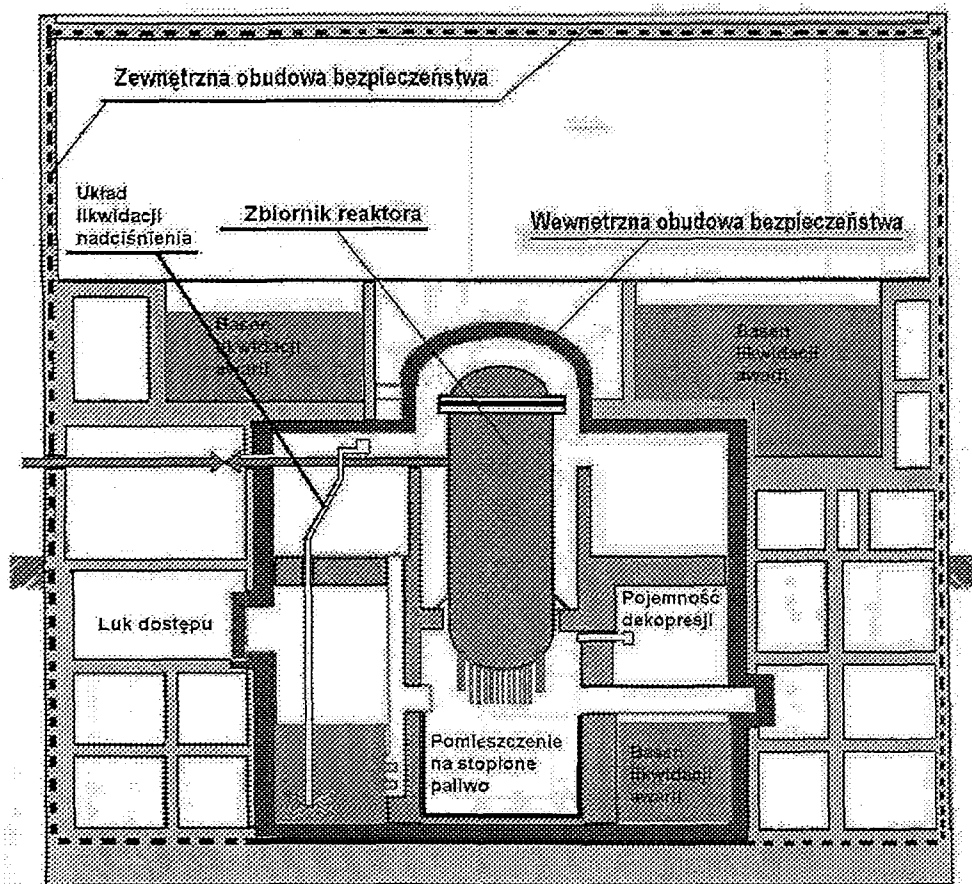
- System awaryjnego chłodzenia zbiornika reaktora.
- System awaryjnego chłodzenia obudowy bezpieczeństwa reaktora.

Schemat systemu awaryjnego chłodzenia reaktora na przykładzie bloku ABWR elektrowni Kashiwazaki - Kariwa jest przedstawiony na rysunku 10.

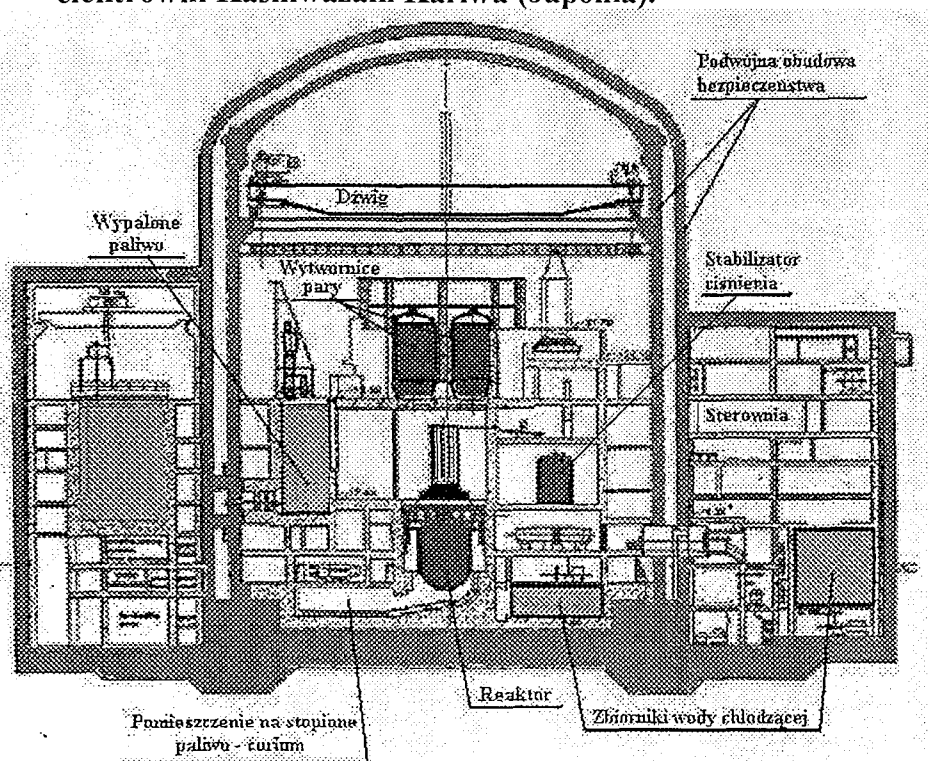


**Rys. 10. Schemat systemu awaryjnego chłodzenia reaktora ABWR. W elektrowni jądrowej Kashiwazaki - Kariwa. WCSCR - wysoko - ciśnieniowy system chłodzenia reaktora, NCSCR - nisko - ciśnieniowy System chłodzenia reaktora, SCRR - system chłodzenia rdzenia reaktora.**

Wszystkie wymienione powyżej systemy - w przypadku sytuacji awaryjnej wykorzystują znaczne ilości wody. W obudowach bezpieczeństwa reaktorów nowej generacji znajdują się zbiorniki z dostateczną ilością wody. Konstrukcja obudowy bezpieczeństwa, dla zwiększenia odporności na wewnętrzne i zewnętrzne zdarzenia awaryjne wykonana jest jako podwójna konstrukcja. W części pomiędzy powłokami obudowy, w niektórych konstrukcjach umieszczone są systemy chłodzenia. Schemat obudowy bezpieczeństwa reaktora wodnego wrzącego ABWR uruchomionego w elektrowni Kashiwazaki Kariwa jest przedstawiony na rys. 11. Przekrój obudowy bezpieczeństwa projektowanego reaktora energetycznego EPR jest przedstawiony na rysunku 12.



Rys. 11. Schemat obudowy bezpieczeństwa energetycznego reaktora wrzącego ABWR elektrowni Kashiwazaki Kariwa (Japonia).



Rys. 12. Schemat obudowy bezpieczeństwa projektowanego przez firmę NPI reaktora wodno ciśnieniowego nowej generacji EPR (European Pressurized Reactor).



Obudowa bezpieczeństwa reaktora pochłania znaczącą część kosztów inwestycyjnych jądrowego bloku energetycznego. Dlatego znaczny wysiłek konstruktorów jądrowych bloków energetycznych jest poświęcony dla kierunku obniżenia kosztów budowy i eksploatacji obudowy bezpieczeństwa bez pogorszenia właściwości.

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawione powyżej działania nad opracowaniem konstrukcji wodnych reaktorów energetycznych nowej generacji doprowadziły już obecnie do uruchomienia dwóch bloków energetycznych z reaktorami nowego typu. W opracowaniu są następne rozwiązania charakteryzujące się bezpieczeństwem, niezawodnością pracy i konkurencyjnością ekonomiczną. W wyniku pewnej stabilizacji wykorzystania energii elektrycznej w rozwiniętych krajach Europy i Ameryki Północnej przewiduje się, że obiekty te będą głównie lokalizowane w rozwijających się krajach wschodniej Azji i Oceanii.

Analizując dane przedstawione w Tabeli 1 należy stwierdzić, iż nie przewiduje się prac nad konstrukcją jądrowych bloków energetycznych w oparciu o reaktory wodne nowej generacji o mocy elektrycznej mniejszej niż 600 MW. Wynika to przede wszystkim z przesłanek ekonomicznych. Koszt zastosowań układów zwiększających bezpieczeństwo pracy tego typu obiektu, urządzeń ograniczających skutki ewentualnych awarii wymusza niejako budowę bloków energetycznych dużej mocy, w których koszty te rozłożone byłyby na większą moc obiektu i w mniejszym stopniu wpływały na cenę wytwarzanej energii elektrycznej.

Taka sytuacja uniemożliwia zastosowanie elektrowni jądrowych z reaktorami wodnymi nowej generacji w obszarach charakteryzujących się mniejszą „gęstością” wykorzystania energii elektrycznej oraz trudnościami w dostawach konwencjonalnych surowców energetycznych - a takie tereny występują w Azji, Afryce czy Ameryce Południowej. Alternatywą mogą zostać tu reaktory wysokotemperaturowe chłodzone helem. Właściwości bezpieczeństwa takich obiektów pozwalają na budowę modułowych bloków energetycznych z tymi reaktorami o mocy rzędu 100 MWe. Prace nad wykorzystaniem reaktorów energetycznych do wytwarzania energii elektrycznej oraz do zasilania procesów technologicznych są prowadzone w Japonii, Republice Południowej Afryki, w Chinach oraz w Federacji Rosyjskiej [11].

#### Literatura

- [1] *IAEA Power Reactors Information System (PRIS)* – Vienna 2000.
- [2] *Energy for Tomorrow World*. World Energy Council. Edition 1993.
- [3] *Energy for Tomorrow World*. World Energy Council, Edition 2000. (Internet);
- [4] E. O. Adamov (Editor),: *White Book of Nuclear Power*. RDIPE, Moscow, 1998.
- [5] *Status of Advanced Light Water Cooled Reactor Design*. IAEA TECDOC 969 Vienna, September 1997;
- [6] *European Utility Requirements (EUR) for LWR Nuclear Power Plants*. A document produced by DTN, Electricite de France, ENEL SpA, KEMA Nederland BV, Nuclear Electric, Tractebel and Vereinigung Deutscher Electricitätswerke. November 1995.
- [7] R. Yang, O. Ozer, H. Rosenbaum,: *EPR's robust approach to fuel*. Nuclear Engineering International Vol 45 No 550 May 2000. Str. 14.
- [8] R. Ahlstrand, H. Jokineva, j. Kohopä,: *Radiation embrittlement of VVER-440 reactor vessel - Finnish experience*. Nuclear Europe Worldscan. No 5/6 May June 1995 str.38.
- [9] H. Leiman (EJ Greiswald) *Informacja prywatna*.
- [10] K.W. Park, T.Oshile, J. Touret, L. Brusa, M. Elgohary,: *Containment: More than one way to met safety and economic goals*.
- [11] S. Chwaszczewski,: *Modułowe reaktory wysokotemperaturowe*. W druku.