

Jan URUSKI

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska

NOWA GENERACJA BEZPIECZNYCH REAKTORÓW JĄDROWYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono opis konstrukcji i zasady działania nowego typu jądrowego reaktora energetycznego PIUS opracowanego przez szwedzką firmę ASEA-ATOM. Przeanalizowano pracę reaktora w obiegu siłowni rozważając różne stany eksploatacyjne, awaryjne, aspekty bezpieczeństwa jądrowego i ekonomiczne oraz metody obsługi tego typu reaktorów. Artykuł opracowano na podstawie [1, 2].

Na świecie czynnikiem ograniczającym budowę nowych elektrowni jądrowych, oprócz rosnących stale kosztów wynikających z konieczności stosowania wielokrotnie rezerwowanych układów zapewniających bezpieczeństwo, jest sprzeciw społeczeństwa, które obawia się skażeń radioaktywnych mogących powstać w trakcie eksploatacji elektrowni jądrowych oraz podczas możliwych awarii. Ostatnie poważne awarie jądrowe znacznie ten sprzeciw zaostrzyły. Z drugiej strony paradoksem jest, że właśnie budowa i rozwój elektrowni jądrowych stanowi nieodwracalną konieczność właśnie ze względu na zachowanie czystego środowiska i zapewnienie niezakłóconego rozwoju gospodarczego narodów.

Przed projektantami reaktorów jądrowych stanął więc problem opracowania nowej konstrukcji reaktora, który spełniałby następujące wymagania:

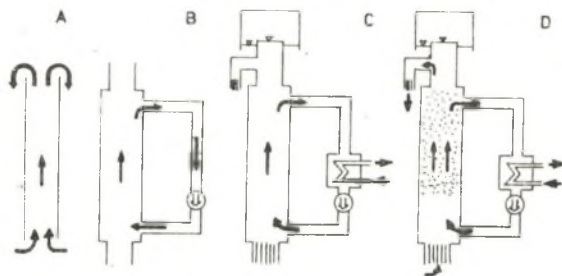
- zapewniał bezpieczeństwo jądrowe w stopniu o wiele wyższym niż dotychczas eksploatowane reaktory umożliwiając instalowanie go w pobliżu aglomeracji, również jako źródło ciepła;
- wyposażony był w układy bezpieczeństwa działające samoczynnie oparte na podstawowych prawach fizyki, niezależnie od niezawodności technicznych układów bezpieczeństwa i błędnych działań personelu operacyjnego;
- był odporny na działanie czynników zewnętrznych, takich jak trzęsienie ziemi, eksplozje, pożary, upadki samolotów, działania wojenne, działania terrorystyczne itp.;
- zapewniał utrzymanie niskich kosztów jednostkowych inwestycji i eksploatacji czyniących ekonomiczną budowę jednostek o stosunkowo małej mocy jednostkowej (200-800 MW) w zależności od lokalnych potrzeb elektrycznych i cieplnych;
- bazował na znanych i opanowanych technologiach i materiałach umożliwiającą szybką budowę w krajach zarówno o wysoko rozwiniętym poziomie technicznym, jak i w krajach rozwijających się;

- był prosty w obsłudze, nie stawiający zbyt wysokich wymagań personelowi eksploatacyjnemu;
- nie odbiegał pod względem ekonomiki od pracujących obecnie w świecie reaktorów lekkowodnych.

Próbie konstrukcji reaktora spełniającego te postulaty stanowi seria reaktorów SECURE szwedzkiej firmy ASEA-ATOM. Opracowano projekty dwóch wersji reaktorów: SECURE-P, zwany PIUS - reaktor energetyczny i SECURE-H reaktor ciepłowniczy. Są to lekkowodne ciśnieniowe reaktory typu zbiornikowego pracujące na paliwie uranowym UO_2 o wzbogaceniu w izotop U 235 - 3,7%. Obydwa wyżej wspomniane reaktory są obecnie w stadium projektowym, a ich elementy poddawane są badaniom na stanowiskach doświadczalnych firmy ASEA-ATOM. Budowa elektrowni wyposażonych w ten typ reaktora przewidywana jest po roku 2000.

Reaktory SECURE mają charakterystyczny układ samowygaszania reakcji łańcuchowej działający niezależnie od aktywnych układów technicznych bezpieczeństwa, uruchamiający się niezależnie od działań operatora.

Reaktor SECURE ma budowę modułową. W skład jednego modułu wchodzi: korpus reaktora zawierający rdzeń, wytwornicę pary, stabilizator ciśnienia i pompę cyrkulacyjną. Moduły reaktora po stronie obiegu wtórnego łączą się we wspólne kolektory parowy i wody zasilającej. Moduły te umieszczone są w basenie zamkniętym w betonowej obudowie bezpieczeństwa, wypełnionym silnie borowaną wodą.



Rys. 1. Zasada działania obiegu pierwotnego z reaktorem PIUS [1]

Fig. 1. Operation principle of primary cycle with the PIUS reactor [1]

Zasadę działania reaktora PIUS przedstawiono na rys. 1a-d. Na rys. 1a przedstawiono pionowy kanał otwarty z obu końców, zanurzony w basenie z wodą. W pobliżu dolnego końca kanału umieszczono źródło ciepła - rdzeń reaktora. Na skutek nagrzewania się wody i różnicy gęstości powstaje naturalna cyrkulacja powodująca przepływ czynnika ku górze, jak zaznaczono strzałkami. Natężenie tego przepływu proporcjonalne jest do ilości przekazywanego ciepła i oporów przepływu przez rdzeń. W celu wydzielenia obiegu pierwotnego z basenu, do kanału tego dodano kanał recyrkulacyjny (patrz rys. 1b) połączo-

ny z obydwoma końcami pionowego kanału zawierającego rdzeń. W kanale recyrkulacyjnym zabudowana jest pompa cyrkulacyjna, której zadaniem jest uruchomienie obiegu. Po nagraniu obiegu i ustabilizowaniu się naturalnej cyrkulacji praca pompy staje się zbędna, a przepływ czynnika będzie odbywał się zgodnie z zaznaczonymi na rys. 1b strzałkami.

Kolejny krok w skomplikowaniu układu stanowi wprowadzenie z góry i z dołu kanału pionowego blokad hydraulicznych oddzielających wodę krążącą w obiegu od wody w basenie. Blokad te są rozwiązane konstrukcyjnie w formie pečzka rur przypominającego plaster miodu, a ich zadaniem jest uspokajanie turbulencji przepływu. W boczny kanał cyrkulacyjny wmontowano wymiennik ciepła - wytwornicę pary, za pomocą której ciepło wyprowadzane jest z obiegu na zewnątrz. Nad głównym pionowym kanałem umieszczono stabilizator ciśnienia, dzięki któremu możliwe jest podniesienie ciśnienia, a co za tym idzie i temperatury w obiegu pierwotnym. Aby wyeliminować straty ciepła do wody basenu, w której zanurzony jest nasz układ, cała powierzchnia obiegu pierwotnego musi być zaizolowana termicznie.

Przy odpowiednim zbilansowaniu mocy generowanej w rdzeniu i odbieranej w wytwornicy pary, cyrkulacja naturalna w obiegu utrzymuje się bez konieczności pracy pompy cyrkulacyjnej.

Rys. 1d przedstawia sytuację, w której moc cieplna generowana w rdzeniu przekroczyła moc odbieraną w wytwornicy pary. Wydatek wody z kanału recyrkulacyjnego jest niewystarczający do odebrania w rdzeniu wytwarzanego ciepła - woda zaczyna wrzeć, jej objętość wzrasta i gorąca woda zaczyna wypływać przez górną powierzchnię rozdziału faz do basenu, natomiast przez dolną powierzchnię rozdziału faz z basenu do głównego kanału reaktora zaczyna wpływać zimna woda z domieszką kwasu borowego.

Przyjmując, że woda obiegu pierwotnego cyrkulująca w reaktorze ma do $1 \cdot 10^3$ ppm kwasu borowego, zaś woda w basenie 2000 ppm kwasu - wprowadzenie ciekłego absorbentu neutronów powoduje wygaszenie reakcji łańcuchowej w rdzeniu. Wyłączenie reaktora nastąpi tu w sposób samoczynny niezależny od pracy pompy cyrkulacyjnej lub działania operatora. Tak więc regulacja mocy w reaktorze PIUS odbywa się za pomocą regulacji stężenia ciekłego absorbentu i proces ten zachodzi w sposób samoczynny, brak jest w reaktorze pretów absorbcyjnych i mechanicznych układów bezpieczeństwa, których awaria mogłaby być przyczyną poważnych awarii reaktywnościowych. Zastosowany układ regulacji jest wprawdzie wolniejszy od stosowanych mechanicznych, jednak badania wykazały, że jest on dostatecznie szybki. Uruchomienie cyrkulacji poprzez basen nie tylko wygasza reakcję łańcuchową, ale zapewnia też odbiór ciepła powyłaczeniowego do wody basenu. Dla zapobieżenia nadmiernemu wzrostowi temperatury wody w basenie, zabudowane są w nim układy chłodzenia, które za pomocą wymienników włączonych w obieg pośredni odprowadzają ciepło z basenu do specjalnych zbiorników umieszczonych na szczycie konstrukcji basenu. Odparowywanie wody tych zbiorników do atmosfery zapewnia długotrwałe, bezpieczne chłodzenie basenu. Obliczenia wykazują, że niezbędne uzupełnia-

nie wody w zbiornikach chłodzących jest rzędu $1 \text{ m}^3/\text{MW}$ mocy cieplnej reaktora w ciągu tygodnia.

W przypadku awarii zasilania układu pośredniego woda w basenie może podgrzać się do wrzenia i wtedy ciepło odprowadzane jest do zbiorników zewnętrznych wraz z parą zrzucałą przez zawory bezpieczeństwa. Dla normalnej eksploatacji reaktor wyposażony jest także w techniczne układy bezpieczeństwa podobne do stosowanych w reaktorach typu PWR.

SIŁOWNIA Z REAKTOREM PIUS

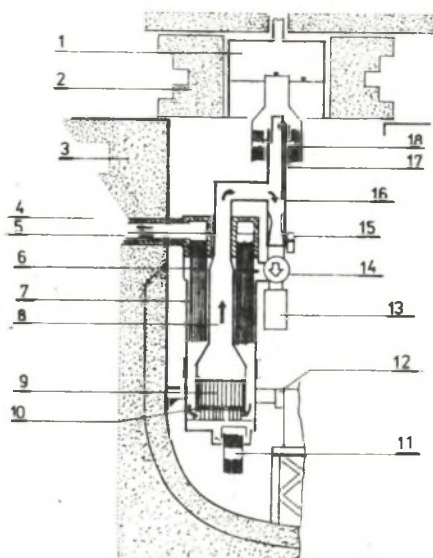
Jak już wspomniano, reaktor PIUS ma budowę modułową. Moduł, w którego skład wchodzi rdzeń reaktora, wytwornica pary, pompa cyrkulacyjna i stabilizator ciśnienia montowany jest całkowicie w fabryce i transportowany do elektrowni jako jedno urządzenie. Każdy z modułów ma standardową moc cieplną rdzenia 670 MW, co odpowiada mocy elektrycznej ok. 200 MW. Na rys. 2 przedstawiono jeden z takich modułów umieszczony w basenie betonowym, a na rys. 3 rozmieszczenie 3 modułów w basenie. Obok modułu reaktora w dolnej części basenu znajdują się stelaże do przechowywania wypalonego paliwa, które jest chłodzone wodą z basenu. Przyjęcie budowy modułowej ma wiele zalet:

- urządzenie ma konstrukcję zwartą,
- możliwość przeprowadzenia pełnego montażu i prób w fabryce,
- elastyczność eksploatacji, remontów i wymiany paliwa,
- możliwość komponowania układów o mocy od 200 do 800 MW w zależności od lokalnych potrzeb.

Rdzeń reaktora osłonięty jest korpusem zewnętrznym tworzącym pierścieniowy kanał opadowy do dolnej komory pod rdzeniem. W komorze tej znajduje się omówione wyżej zamknięcie hydrauliczne wykonane w postaci pęczka rurowego - tłumika turbulencji. Nad pęczkiem rur umieszczono kołpak, pod którym podczas rozruchu reaktora wytwarza się poduszkę azotową służącą do zamknięcia cyrkulacji przez basen podczas rozruchu. W komorze tej znajdują się też urządzenia do zapewnienia równomiernego rozpiływu czynnika w całym przekroju rdzenia.

Chłodziwo po przejściu przez rdzeń przepływa pionowym kanałem w górę, a następnie kanałem recyrkulacyjnym, w którym zabudowano zawór regulacyjny i pompę cyrkulacyjną, do komory wlotowej wytwornicy pary. Po przepłynięciu przez wytwornicę pary ochłodzony czynnik wraca kanałem opadowym do komory pod rdzeniem.

Część korpusu zawierająca wytwornicę pary i pionowy kanał wznoszący wykonana jest jako oddzielna część, która nie ma możliwości przemieszczeń. Dolna część korpusu z rdzeniem reaktora, dzięki odpowiedniej konstrukcji platformy, może być opuszczana i obracana do pozycji umożliwiającej przeładunek paliwa (rys. 4). Dolna i górna część korpusu reaktora łączone i



Rys. 2. Moduł reaktora PIUS o mocy cieplnej 670 MW [1]

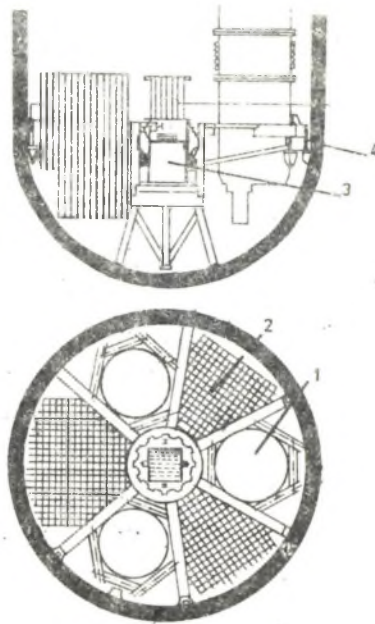
1 - stabilizator ciśnienia, 2 - zamknięcie zbiornika reaktora, 3 - zbiornik reaktora z betonu zbrojonego, 4 - kolektor parowy, 5 - kolektor wody zasilającej, 6 - pęczek rur wytwornicy pary, 7 - komora opadowa, 8 - kanał wnosowy, 9 - rdzeń, 10 - konstrukcja nośna rdzenia, 11 - dolna blokada hydrauliczna, 12 - platforma obrotowa, 13 - silnik pompy cyrkulacyjnej, 14 - pompa cyrkulacyjna, 15 - zawór, 16 - kanał nawrotny recykulacyjny, 17 - wejście sterowania reaktywnością, 18 - górna blokada hydrauliczna

Fig. 2. PIUS 670 MW reactor module [1]

1 - pressure stabilizer, 2 - reactor vessel closure, 3 - prestressed concrete reactor vessel, 4 - steam collector, 5 - feed water collector (header), 6 - steam generator tube bank, 7 - downcomer, 8 - riser tube, 9 - core, 10 - core support, 11 - lower hydraulic interlocking (hot/cold interface), 12 - revolving platform, 13 - recirculation pump motor, 14 - recirculation pump, 15 - valve, 16 - return flow tube, 17 - reactivity control input, 18 - upper hot/cold interface

uszczelniane są za pomocą elastycznych mieszków, które mogą być montowane zdalnie za pomocą specjalnego narzędzia. W górnej części korpusu nad kanałem cyrkulacyjnym znajduje się stabilizator ciśnienia i górna blokada hydrauliczna. Stabilizator ciśnienia zasilany jest parą ze źródła zewnętrznego, zawory bezpieczeństwa stabilizatora wyprowadzone są w górnej części betonowego zbiornika ciśnieniowego. Zastosowana wytwornica pary jest typu przepływowego z powierzchniami wymiany ciepła w postaci rurek Fielda (rysunek 5).

Woda zasilająca dopływa kolektorem umieszczonym centrycznie wewnątrz kolektora parowego, wpływa do kolektora rozdzielającego, gdzie rozdzielana jest za pomocą układu kryz, równomiernie na rurki Fielda. Odparowanie odby-



Rys. 3. Obrotowa platforma rdzenia [1]

1 - miejsce zbiornika rdzenia, 2 - stelaże wypalonego paliwa, 3 - urządzenie do podnoszenia i obracania zbiornika rdzenia, 4 - zbiornik betonowy

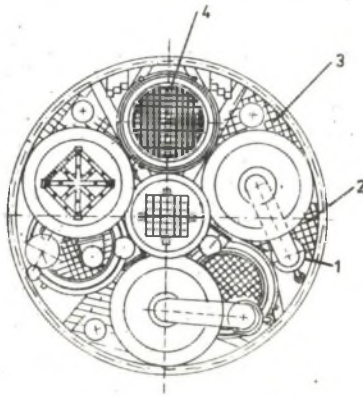
Fig. 3. Rotating core platform [1]

1 - core vessel position, 2 - spent fuel racks, 3 - core vessel lifting and turning device, 4 - reaktor concrete vessel

wa się wewnątrz rurek, a para przepływając w górę odbiera ciepło od czynnika obiegu pierwotnego przepływającego w przeciwnym kierunku. Kolektor parowy z kolektorem wodnym wyprowadzony jest na zewnątrz zbiornika ciśnieniowego, gdzie znajdują się zawory regulacyjne pozwalające na odcięcie indywidualne danej wytwornicy i odstawienie pojedynczych modułów.

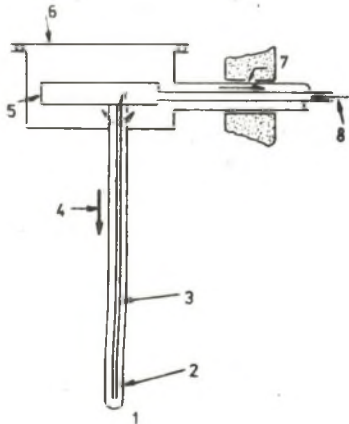
Przyjęcie elementów Fielda, oprócz korzyści termohydraulicznych przy wymianie ciepła, pozwoliło na zastosowanie rurek o cieńszej ściance niż w konwencjonalnych wytwornicach PWR, gdyż czynnik o wyższym ciśnieniu działa od zewnątrz, co jest bardziej korzystne z punktu widzenia materiału rury. Dalszą korzyścią tego typu wytwornicy jest zmniejszenie objętości wody po stronie obiegu wtórnego.

Korpus modułu zabezpieczony jest od zewnątrz przed stratą ciepła do wody basenu za pomocą izolacji wykonanej z nawiniętego drutu stalowego i cienkościennych ekranów stalowych, pomiędzy którymi znajduje się woda nieruchoma; podobny typ izolacji, ale z nieruchomą warstwą powietrza, stosowany jest w szybie reaktorów WWER.



Rys. 4. Przekrój poziomy przez zbiornik trójmodułowego reaktora PIUS [1]
 1 - pompa cyrkulacyjna, 2 - stelaże z paliwem wypalonym, 3 - mechanizm obracający, 4 - rdzeń w pozycji do przeładunku paliwa

Fig. 4. Horizontal section through a three-module PIUS reactor vessel [1]
 1 - recirculation pump, 2 - spent fuel racks, 3 - turntable, 4 - core in refuelling position

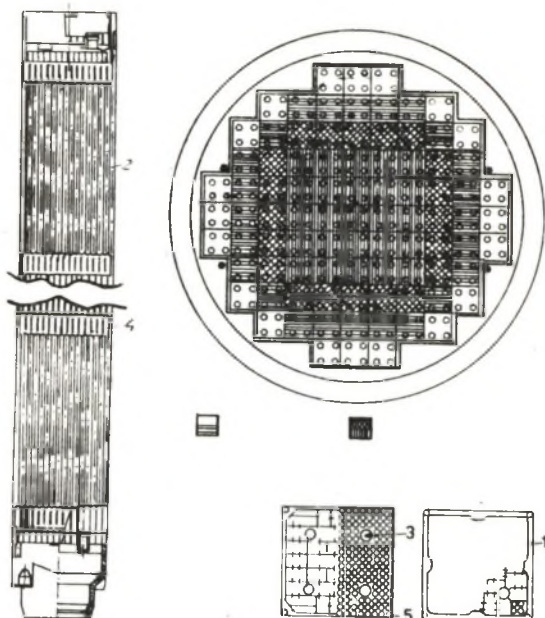


Rys. 5. Przepływowa wytwornica pary [1]

1 - typowy element Fielda, 2 - zewnętrzna rurka ciśnieniowa, 3 - rurka wody zasilającej, 4 - kierunek przepływu chłodziwa reaktorowego, 5 - kolektor wody zasilającej, 6 - komora parowa, 7 - odprowadzenie pary, 8 - doprowadzenie wody

Fig. 5. The once - through steam generator [1]

1 - typical bayonet tube assembly, 2 - primary pressure tube, 3 - feed water tube, 4 - reactor coolant flow direction, 5 - feed water header, 6 - steam offtake, 8 - feed water supply



Rys. 6. Zespół paliwowy reaktora PIUS i rdzeń jednego modułu [1]

1 - płyta górna, 2 - pręty paliwowe 16 x 16, 3 - rury osłonowe dla prętów z absorbentem (jeśli są przewidziane), 4 - siatka dystansująca, 5 - rury konstrukcji nośnej

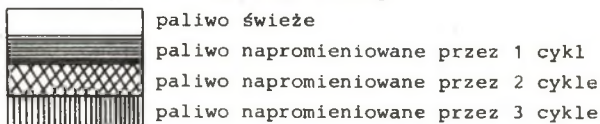
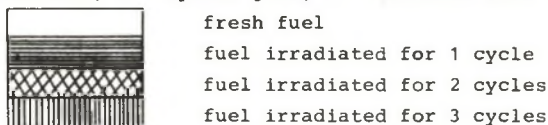


Fig. 6. PIUS reactor fuel subassembly and module core 1

1 - top plate, 2 - fuel rods 16 x 16, 3 - lead tubes for absorbent rods (if prescribed), 4 - spacer grid, 5 - skeleton rods or tubes



Odpowiedzialną i skomplikowaną technologicznie konstrukcją jest zbiornik ciśnieniowy basenu stanowiący zarazem obudowę bezpieczeństwa. Zbiornik ten dla trzymodułowego reaktora ma wewnętrzną średnicę 13,5 m, wysokość ponad 33 m, grubość ścianek 8-10 m. Wykonany jest ze sprężonego żelazobetonu i wyposażony w wewnętrzny stalowy płaszcz. Spełnia on wszystkie warunki stawiane pełnościśnieniowym obudowom bezpieczeństwa. Przejścia rurowe usytuowane są w górnej części zbiornika, tak by uszkodzenie rur nie spowodowało wy-

cieku wody z basenu. Zbiornik zabezpieczony jest przed przegrzaniem w stacjach awaryjnych przez zabudowanie układu chłodzenia oraz zawory bezpieczeństwa.

W górnej odsuwanej części zbiornika znajduje się tunel obsługowy umożliwiający montaż urządzeń i wymianę paliwa. W zbiorniku znajdują też pomieszczenie wszystkie układy techniczne bezpieczeństwa i regulacji mocy bloku podobne do układów stosowanych w blokach PWR. Zastosowana pompa cyrkulacyjna ma silnik całkowicie zanurzony w wodzie i pracuje przy różnicy ciśnień równej kilka MPa.

Rdzeń reaktora PIUS (rys. 6) jest z punktu widzenia jądrowego podobny do nisko obciążonych rdzeni reaktorów PWR (21,4 kW/kg U). Zestawy paliwowe mają 16 x 16 elementów i wysokość równą połowie wysokości normalnych kaset PWR. Pręty paliwowe są identyczne do stosowanych w reaktorach BWR. Każda kasetka paliwowa zawiera 4 pręty z wypalającym się pochłaniaczem (gadolin), których zadaniem jest kompensacja nadmiaru reaktywności na początku cyklu paliwowego i w ten sposób utrzymanie przy pełnej mocy reaktora niskiej koncentracji kwasu borowego w obiegu pierwotnym. Podstawowe charakterystyki 3 modułowego reaktora PIUS zawarto w tabelicy 1.

Tabela 1

Podstawowe dane techniczne reaktora PIUS (SECURE P)

Wielkość charakterystyczna	Jednostka	Wartość
1	2	3
Moc jądrowa reaktora	MW	2010
Moc cieplna na wyjściu do obiegu wtórnego	MW	1998
Moc elektryczna brutto	MW	641
Moc elektryczna netto	MW	622
Sprawność netto (odniesiona do mocy reaktora)	%	30,9
<u>Rdzeń reaktora</u>		
Liczba zestawów paliwowych		89
Siatka zestawu paliwowego		16 x 16
Podziałka zestawu	mm	245
Ilość paliwa w rdzeniu	10 ³ kg	35,6
Ilość uranu w rdzeniu	"	31,3
Aktywna wysokość rdzenia	mm	1970
Średnica ekwiwalentna rdzenia	mm	2620
Liczba elementów paliwowych w zestawie		232
Liczba prętów z zatruciem wypalającym się (Gd ₂ O ₃)		4
Podziałka poprzeczna prętów paliwowych	mm	15,25
Zewnętrzna średnica pręta paliwowego	mm	12,25

cd. tablicy 1

1	2	3
Gęstość mocy		
średnio w paliwie	kW/kgU	21,4
w objętości rdzenia	kW/l	63,1
max moc cieplna liniowa	kW/m	38,9
Średnie wzbogacenie paliwa	%	3,7
Średnie wypalenie paliwa	kWd/kgU	36 000
Maksymalny wydatek doprowadzenia kwasu borowego (2200 ppm B) (w jednym module)	kg/s	4
Maksymalny wydatek doprowadzenia czystej wody (w jednym module)	kg/s	20
Obieg pierwotny (na 1 moduł)		
Ciśnienie robocze	MPa	9,0
Temperatura czynnika na wlocie do rdzenia (100% obc)	°C	261
Temperatura czynnika na wylocie z rdzenia (100% obc)	°C	291
Natężenie przepływu czynnika obiegu pierwotnego	kg/s	4350
Spadek ciśnienia w rdzeniu	MPa	0,05
<u>Zbiornik betonowy basenu</u>		
Średnica wewnętrzna zbiornika	m	13,4
Wysokość zbiornika (bez zamknięcia)	m	32,8
Grubość ścian	m	8-10
Całkowita wysokość zbiornika	m	62,5
Ciśnienie projektowe	MPa	10,5
Temperatura projektowa	°C	75
Czynnik basenu - woda borowana 2200 ppm B		
Objętość wody uzupełniającej do odprowadzenia ciepła w ciągu tygodnia	m ³	2200
Wytwornica pary (w 1 module)		
Typ: przepływowa z odparowaniem wewnątrz rur		
Średnica rur zew/wew	mm	22,0/18,6
Długość rury	m	15
Liczba rur		8400
Zasilanie wodą - kolektorem umieszczonym wewnątrz kolektora parowego		
Ciśnienie po stronie wtórnej	MPa	4,0
Temperatura pary na wylocie	°C	260
<u>Turbogenerator</u>		
Moc elektryczna	MW	650
Obroty	1/min	3000
Ciśnienie pary na wlocie	MPa	3,85
Temperatura pary na wlocie	°C	248,1

cd. tablicy 1

1	2	3
Reaktor ciepłowniczy SECURE H		
Moc	MW	400
Temperatura na wylocie z reaktora	°C	190
Temperatura na wlocie do reaktora	°C	150
Ciśnienie w reaktorze	MPa	2,0
Przepływ chłodziwa przez rdzeń	kg/s	2300
Temperatury sieci ciepłowniczej (szczyt)	°C	150/70
Natężenie przepływu w sieci ciepłowniczej	kg/s	1179
Rdzeń		
Liczba elementów paliwowych		308
Całkowita masa paliwa	t U	26,6
Aktywna wysokość rdzenia	mm	1845
Średnie wzbogacenie	%	2,5
Średnie wypalenie	MWd/Tu	29000
Liczba prętów absorpcyjnych		308
Liczba prętów paliwowych w zestawie		60
Średnica zewn. pręta pal.	mm	12,35
Grubość koszulki	mm	0,8
Materiał koszulki		ZR 2
Średnia temperatura paliwa	°C	435

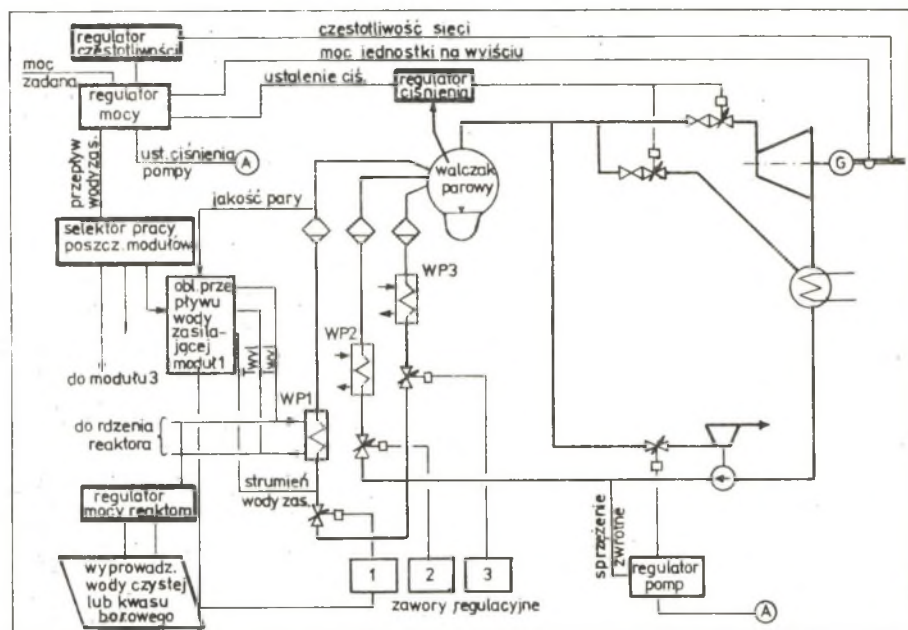
NORMALNA PRACA REAKTORA

Reaktor PIUS nie ma prętów regulacyjnych i regulacja mocy odbywa się w nim tylko za pomocą zmiany stężenia kwasu borowego w wodzie obiegu pierwotnego oraz zmiany temperatury czynnika. Taki sposób regulacji wymaga, by reaktor charakteryzował się stosunkowo dużym ujemnym temperaturowym współczynnikiem reaktywności. Osiąga się to stosując jako truciznę wypalającą gadolin, dzięki czemu w obiegu pierwotnym podczas całej kampanii może być utrzymywana niska koncentracja kwasu borowego.

Dzięki ujemnemu temperaturowemu współczynnikowi reaktywności możliwe jest też "jądrowe" uruchomienie reaktora ze stanu zimnego. Podczas uruchamiania obiegu pierwotnego pompa cyrkulacyjna pracuje na minimalnej prędkości, wymaganej tylko chłodzeniem i smarowaniem łożysk hydrodynamicznych. Po zamknięciu przepływu przez dolną blokadę hydrauliczną poprzez wprowadzenie azotu pod kołpak, można rozpocząć rozcieńczenie roztworu kwasu borowego w obiegu pierwotnym poprzez wprowadzenie do obiegu czystej wody w miejsce odpompowywanego roztworu.

Po osiągnięciu stanu krytycznego i nagraniu obiegu do temperatury 80-100°C strumień wody wypływającej z rdzenia zrówna się z wydajnością pompy

cyrkulacyjnej, azot z zamka gazowego zostanie usunięty, a obieg pierwotny będzie stopniowo doprowadzany do nominalnych parametrów pracy poprzez dalsze zmniejszanie zawartości kwasu borowego i zmianę prędkości obrotowej pompy tak, by ustabilizować przepływ w dolnej blokadzie hydraulicznej. Podczas normalnej pracy temperatury wody na wylocie z rdzenia utrzymywana jest stała 290° za pomocą układu regulacji mocy reaktora (rys. 7), przy czym

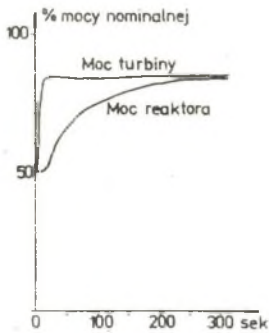


Rys. 7. Schemat układów regulacji mocy [1]

Fig. 7. Diagram of power control systems [1]

temperatura wody na wlocie do rdzenia zmienia się w zależności od obciążenia bloku. Przy pełnym obciążeniu przyrost temperatury w rdzeniu wynosi ok. 30 K, przy niższych obciążeniach przyrost ten jest proporcjonalnie niższy. Gdy temperatura wody na wylocie z rdzenia obniża się, do obiegu należy doprowadzić czystą wodę, by uzyskać efekt zwiększenia mocy reaktora, jeżeli temperatura rośnie, należy wprowadzić więcej kwasu borowego. Utrzymanie stałej temperatury wody na wylocie z rdzenia jest równoważne utrzymaniem stałego natężenia przepływu czynnika przez rdzeń. Dlatego też w warunkach normalnej eksploatacji utrzymywana jest stała prędkość pompy cyrkulacyjnej, a zakres regulacji tej prędkości wynosi $\pm 5\%$.

Układ regulacji stężenia kwasu borowego pozwala na zmianę mocy reaktora z prędkością 1,5–2% na minutę. Gwałtowne zmiany mocy (rys. 8) mogą być w razie konieczności przeprowadzone w bardzo prosty sposób. Zwiększenie natę-



Rys. 8. Nagły wzrost mocy reaktora PIUS z 50% do 80% mocy nominalnej [1]

Fig. 8. Rapid increase in PIUS reactor output from 50 per cent to 80 per cent of rated power [1]

żenia przepływu wody zasilającej do przepływowej wytwornicy pary powoduje wzrost wydajności generowania pary, co z kolei spowoduje napływ do rdzenia zimnej wody i obniżenie średniej temperatury chłodziwa w rdzeniu. Dzięki silnemu ujemnemu sprzężeniu temperaturowemu reaktora wystąpi gwałtowny wzrost mocy aż do momentu ustabilizowania się temperatury na nowym poziomie mocy. Po takim skoku mocy układ regulacji reaktywności zacznie podawać czystą wodę do obiegu pierwotnego, co spowoduje ustabilizowanie się nowego poziomu mocy i warunków termicznych pracy rdzenia. Tą drogą, jak wynika z rys. 8, moc elektryczna jednostki może być w ciągu 10 sek podniesiona z 50% do 80% nominalnej. Para generowana w poszczególnych modułach wprowadzana jest do wspólnego walczaka separacyjnego, skąd podawana jest na turbinę. Podczas normalnej eksploatacji w walczaku utrzymywane jest stałe ciśnienie na poziomie zadanym przez regulator ciśnienia.

W stanach nieustalonych, oczywiście, ciśnienie to będzie ulegało zmianom. Ciśnienie pary po stronie wtórnej wytwornicy wynosi 4,0 MPa i jest to para słabo przegrzana. Ciśnienie pary na zaworach turbiny wynosi 3,85 MPa.

Kondensat turbinowy poddawany jest pełnemu oczyszczaniu w celu utrzymania wysokiej jakości wody kotłowej. Woda zasilająca podgrzewana jest w szeregu podgrzewaczach układu regeneracyjnego do temperatury 210°C. Główna pompa zasilająca ma napęd turbinowy.

Niskie ciśnienie pary powoduje że sprawność termiczna obiegu jest niższa niż w dotychczas eksploatowanych reaktorach lekkowodnych. Moc osiągnięta przez generator trójmodułowego reaktora PIUS wynosi 642 MWe. Stosunkowo małe jest zużycie energii do napędu własnych i wynosi tylko 20 MWe.

Głównym źródłem strat w obiegu pierwotnym jest strata ciepła do wody zbiornika poprzez mokrą izolację cieplną reaktora, wynosi ona ok. 1% mocy reaktora. W przypadku 3-modułowego reaktora PIUS ogólna sprawność termiczna odniesiona do mocy rdzenia wynosi 31,9%, a odpowiadająca sprawność netto 30,9% (dla porównania sprawności te w blokach typu BWR wynoszą odpowiednio 34 i 32,9%).

Gdy moduł pracuje przy stałym obciążeniu i dolna blokada hydrauliczna ma ustabilizowany przepływ, również i górna blokada hydrauliczna będzie pracować w warunkach ustalonych, gdyż objętość czynnika w obiegu pierwotnym nie będzie ulegać zmianom. Przy obciążeniach częściowych średnia temperatura jest nieco wyższa, co powoduje wzrost objętości czynnika i pewna ilość wody jest odprowadzana poprzez górną blokadę hydrauliczną.

W dolnej blokadzie hydraulicznej utrzymywany jest niewielki przepływ wody w celu stabilizacji rozdziału wody o niskiej i wysokiej zawartości kwasu borowego.

Woda obiegu pierwotnego poddawana jest procesowi ciągłego oczyszczania w instalacji bocznikowej. Układ regulacji borowej rozwiązany podobnie jak w PWR.

STANY AWARYJNE, BEZPIECZEŃSTWO PRACY BLOKU

W przypadku gdy parametry modułu osiągną poziom niebezpieczny dla pracy reaktora, układ zabezpieczeń poda sygnał otwarcia zaworu na ssaniu pompy cyrkulacyjnej powodując napływ do rdzenia chłodnej wody z basenu reaktora z dużą koncentracją kwasu borowego. Zawór awaryjny pozostając otwarty przez 60 sek. pozwala doprowadzić reaktor do stanu podkrytycznego przy utrzymaniu temperatury wody w obiegu pierwotnym bliskiej normalnej temperatury eksploatacyjnej. Jest to tzw. "gorące odstawienie awaryjne".

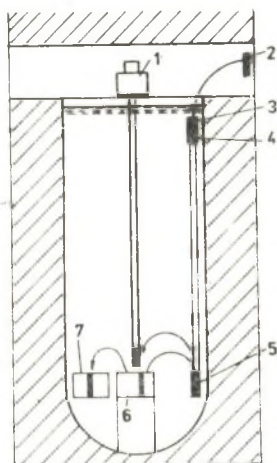
Ochłodzenie wody obiegu pierwotnego i odpowiadająca temu zmiana objętości spowoduje napływ wody z basenu przez dolną blokadę hydrauliczną. Do basenu przedostanie się tylko niewielka ilość wody aktywnej, co w nieznacznym tylko stopniu może wpłynąć na pracę pozostałych modułów. Dalszą zaletą zasady "gorącego wyłączenia awaryjnego" jest krótkotrwałość stanów niestabilnych i możliwość szybkiego ponownego pełnego obciążenia jednostki. "Gorące odstawienie" tylko w jednym module może być wykorzystane do zrzutu mocy z ograniczeniem generacji pary do 50-60% wydajności nominalnej, przy zrzucie nadmiaru pary do kondensatora poprzez zawory bocznikowe.

Badania wykazały że PIUS może być wyłączony z sieci przy awarii zwarciowej przy obniżeniu napięcia o 25% przez 250 msec i powrócić do stanu poprzedniego w ciągu 500 msec. Wewnętrzne systemy zabezpieczające umożliwiają wyłączenie reaktora i utrzymanie go w stanie wyłączonym niezależnie od awarii układów pomocniczych, zewnętrznych źródeł energii i błędnych decyzji personelu obsługującego. Pojemność wodna basenu i zbiorników chłodzących basen zapewnia bezpieczne wychładzanie reaktora bez ingerencji z zewnątrz przez tydzień. W przypadku zaistnienia awarii o mniejszym zasięgu, układ wyposażony jest w systemy zabezpieczeń podobne do pracujących w konwencjonalnych blokach PWR.

OBSŁUGA REAKTORA

Dostęp do rdzenia reaktora w celu dokonania przeładunku paliwa możliwy jest po otwarciu tunelu obsługowego zbiornika basenu reaktora. Po mechanicznym odłączeniu dolnej części korpusu zawierającej rdzeń od górnej części modułu, które przeprowadza się za pomocą odpowiedniego przemieszczenia platformy montażowej (opuszczenie i obrót) paliwo wypalone za pomocą maszyny

przeładowczej przenoszone jest na stelaże umieszczone obok modułu w objętości basenu, pojemność stelaży wystarcza na przechowywanie wypalonego paliwa przez 20 lat, schematycznie przeładunek paliwa przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Wymiana paliwa w reaktorze [1]

1 - maszyna przeładowcza, 2 - świeże paliwo, 3 - sprawdzanie i wymiana wypalającego się absorbentu, 4 - podajnik paliwa w górnym położeniu, 5 - podajnik paliwa w dolnym położeniu, 6 - rdzeń, 7 - stelaże wypalonego paliwa

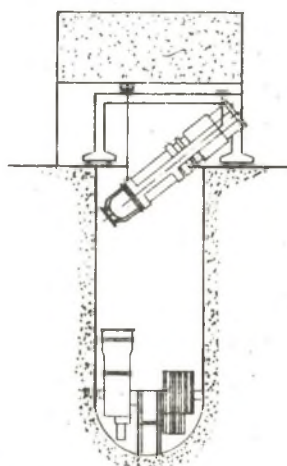
Fig. 9. Reactor refuelling [1]

1 - fuel handling machine, 2 - fresh fuel, 3 - inspections and replacement of burnable absorber, 4 - fuel elevator in upper position, 5 - fuel elevator in lower position, 6 - core, 7 - spent fuel racks

W celu dokonania napraw urządzeń znajdujących się w górnej części modułu, między innymi wytwornicy, należy górną część modułu wymontować, wyjąć z basenu i wykonać naprawę w warsztacie specjalistycznym.

EKONOMIKA

Analizując koszty inwestycyjne i eksploatacyjne reaktora PIUS dokonano porównania z konwencjonalnym reaktorem BWR firmy ASEA ATOM o podobnej mocy i elektrownią spalającą węgiel wyposażoną w układ odpylania i odsiarczania spalin. Porównanie wykazało, że pod względem inwestycyjnym PIUS jest dwu-



Rys. 10. Usuwanie górnej części modułu zawierającego wytwornicę pary ze zbiornika betonowego dla przeprowadzenia remontu [1]

Fig. 10. Removal of the upper part of the module containing steam generator from the concrete vessel for repair [1]

krotnie droższy od elektrowni opalanej węglem, natomiast ma znacznie niższe koszty eksploatacyjne.

Porównanie kosztów z blokami BWR dokonane zostało przy założeniach:

- podobna lokalizacja nad brzegiem morza w terenie asejsmicznym,
- brak inflacji,
- jednakowy zysk kapitału 4-6%,
- ekonomiczny czas pracy 25 lat,
- wzrost kosztów paliwa 2% rocznie przez 25 lat.

Z porównania wynika, że PIUS ma łączne koszty niższe od typowego bloku BWR pomimo gorszej sprawności cieplnej i w związku z tym większych kosztów paliwowych; zadecydowały o tym niższe koszty układów zabezpieczeń.

LITERATURA

1. Sundqvist C., Pedersen T.: PIUS the Forgiving Reactor. Modern Power Systems October 1985.
2. Secure-H Heat from Nuclear Energy, ASEA-ATOM, Västeras 1986.

Recenzent: Doc. dr inż. Marian Kiełkiewicz

Wpłynęło do redakcji w marcu 1988 r.

НОВЫЕ БЕЗОПАСНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ ДЛЯ СЛЕДУЮЩИХ ПОКОЛЕНИЙ

Р е з ю м е

В работе приводится описание конструкции и принципов действия нового типа ядерного энергетического реактора PIUS, разработанного шведским трестом ASEA-ATOM. Представлен тоже анализ работы реактора действующего как элемент первого контура АЭС, особое внимание обратив на различные эксплуатационные и аварийные режимы, аспекты ядерной безопасности, экономики и технологий обслуживания реакторов этого типа.

NEW GENERATION OF SAFETY NUCLEAR REACTORS

S u m m a r y

The description of design principles and features and operation principles of the new type of the nuclear power light water reactor PIUS, designed by the Swedish company ASEA-ATOM are presented.

The normal operating conditions as well as operation transients, plant safety, plant economy and maintenance have been discussed.