

Małe jądrowe reaktory modułowe

Small Modular Reactors -SMR

Wojciech Kramarek^{*)}

Słowa kluczowe: Reaktory modułowe, mikroreaktory, bezpieczeństwo, systemy i układy bezpieczeństwa, układy sterowania, normowanie europejskie i światowe

Streszczenie

Bardzo wysokie koszty budowy dużych nuklearnych reaktorów energetycznych oraz długie czasy ich budowy są jednym z powodów zmniejszenia zainteresowania klasyczną energetyką jądrową. Budowa małych modułowych reaktorów (small modular reactors- SMR) może być rozwiązaniem tego problemu. Reaktory takie można budować modułowo obok siebie i dalej rozbudowywać infrastrukturę, odzyskując część nakładów z poniesionych inwestycji i czerpiąc moc z działających modułów. Każdy reaktor będzie wyposażony w układ sterowania, pozwalający na normalną pracę i osiągnięcie wymaganych parametrów procesu produkcyjnego. Ponadto reaktor, zgodnie z obowiązującymi przepisami, musi być wyposażony w niezależnie działający dodatkowy układ sterowania, który odpowiada za zapewnienie bezpiecznej pracy systemu, nawet w sytuacjach awaryjnych. Układy odpowiedzialne za bezpieczeństwo mogą być systemami aktywnymi, pasywnymi lub mieszanymi. W reaktorach modułowych będą przeważały pasywne systemy bezpieczeństwa. Zacytowano przepisy dotyczące bezpieczeństwa obiektów energetyki jądrowej jako systemów stwarzających duże zagrożenia.

Keywords: Modular reactors, microreactors, safety, safety control systems, european and world safety standards

Abstract

Very high costs of constructions of large nuclear reactors and long terms of their construction diminished overall interest in this area. In response, a new strategy was introduced by nuclear reactors manufactures aimed at building smaller reactors, (small modular reactors- SMRs) which were expected to be faster to fabricate, safer to operate, and operate at lower cost per reactor. Many SMRs designs rely on a modular system, allowing customers to simply add modules to achieve a desired megawatt output (MWe). SMRs could potentially achieve safety advantages compared to large power plants and aim for a higher safety level especially through simplifications of design and development of active and passive safety systems. Especially passive safety systems will be dominated in SMRs. In article are also quoted world norms connected with safety of nuclear power plants.

1. Wstęp

Według prognoz MAE (Międzynarodowej Agencji Energetycznej - International Energy Agency, IEA), zapotrzebowanie na energię elektryczną na świecie będzie rosło w tempie 2,5% rocznie do 2030 r. Prognozy polskie dotyczące gospodarki szacują, że do 2030 r. zapotrzebowanie krajowe na energię elektryczną wzrośnie o 57%. Przyjęty w grudniu 2008 r. Unijny pakiet energetyczno - klimatyczny oraz sprecyzowane cele polityki klimatycznej Unii Europejskiej sprawiają, że energia pochodząca z elektrowni jądrowych, obok energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych, (wiatr, słońce) staje się obiecującym rozwiązaniem.

W przeciwieństwie do energetyki klasycznej bazującej na paliwach kopalnych, energetyka jądrowa zapewnia nieemisyjne źródła energii elektrycznej i ciepła. Odnawialne źródła energii w postaci elektrowni wiatrowych oraz fotowoltaiki, w sytuacjach braku słońca i wiatru zawiodą, natomiast energetyka jądrowa zapewnia stabilne dostawy energii.

2. Trendy rozwojowe w energetyce jądrowej

Pierwsza komercyjna elektrownia jądrowa na świecie rozpoczęła pracę na początku lat pięćdziesiątych (elektrownia jądrowa, o mocy 5 MW, która powstała w 1954 r. w Obnińsku (ZSRR)).

Obecnie energetyka jądrowa pokrywa około 10% światowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Energia jądrowa jest największym źródłem (około 26%) nisko węglowej energii elektrycznej.

Na świecie pracuje obecnie około 440 reaktorów energetycznych dużej mocy (rzędu 1000 do 1600 MW). Przeszło 50 krajów prowadzi prace w zakresie energii nuklearnej, wykorzystując około 220 badawczych reaktorów jądrowych, również używanych do produkcji izotopów, wykorzystywanych w medycynie i przemyśle. Należy również wymienić około 160 reaktorów mniejszych mocy, pracujących na okrętach wojennych różnych krajów.

Do najważniejszych przyczyn rozwoju energetyki jądrowej zaliczamy:

- obawę przed uzależnieniem od dostaw energii z zagranicy, przy narastającym popycie na energię elektryczną, niewystarczające moce przesyłowe krajowych sieci energetycznych,
- rosnące ceny węgla, ropy naftowej i gazu ziemnego,
- wymóg prawny minimalizacji udziału paliw kopalnych w miksie energetycznym,
- dobre opanowanie technologii jądrowej,
- rozwój przez energetykę jądrową wielu gałęzi gospodarki i nauki,
- brak monopolizacji rynku dostaw paliwa jądrowego.

Bardzo wysokie koszty budowy dużych reaktorów energetycznych, najczęściej o mocach od 1000 do 1600 MW, oraz długi czas

* Wojciech Kramarek, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych Im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie, e-mail: wojciech.kramarek@pansim.edu.pl

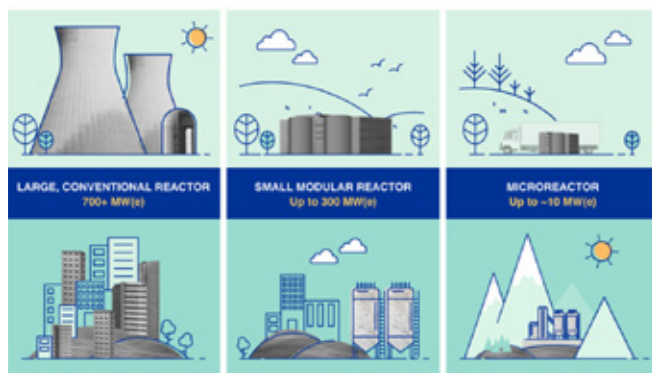
budowy są jednym z powodów zmniejszenia zainteresowania klasyczną energetyką jądrową. Elektrownia zawodowa składa się najczęściej z kilku reaktorów, uzyskując moc sumaryczną kilku tysięcy megawatów. Trzeba jednak dodać, że w wielu krajach, zwłaszcza azjatyckich, widać zdecydowany wzrost zainteresowania budową nowych dużych bloków jądrowych.

Rozwiązaniem tych problemów może być budowa SMR (small modular reactors- małych modularnych reaktorów). Reaktory takie można budować modułowo obok siebie w różnych okresach czasu, uruchamiać kolejne moduły i dalej rozbudowywać infrastrukturę zwiększając dysponowalną moc elektryczną. Wymagane nakłady finansowe, w momencie rozpoczęcia inwestycji, w porównaniu z budową dużego bloku są mniejsze i mogą być rozciągnięte w czasie. Inwestor odzyskuje część poniesionych nakładów finansowych dzięki pracy produkcyjnej działających modułów.

W ciągu ostatnich kilkunastu lat można zaobserwować wzrost zainteresowania małymi modułowymi reaktorami. Prace koncepcyjne i badawcze są prowadzone w USA, Chinach, Francji, Rosji, Japonii, Anglii, Indiach, Korei Południowej, Kanadzie. Kilkanaście krajów, w tym Polska, zadeklarowało chęć posiadania takich rozwiązań.

Według danych Polskiej Agencji Atomistyki obecnie jest wdrażanych na świecie, na różnych etapach rozwoju, ponad 70 projektów małych reaktorów jądrowych (SMR) w 18. państwach członkowskich Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej.

Projekty te są prowadzone, zarówno przez różne instytucje rządowe, jak i firmy prywatne. Prace nad konstrukcją, wdrożeniem i licencjonowaniem SMR-ów są najbardziej zaawansowane w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie oraz we Francji. Dane dotyczące Federacji Rosyjskiej są aktualnie niedostępne lub mało wiarygodne.



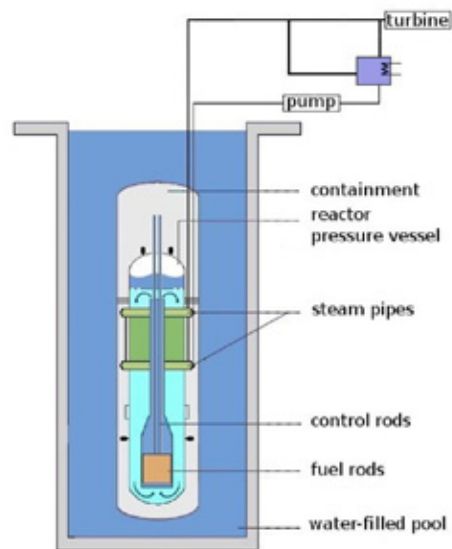
Rys.1. Porównanie wielkości różnych typów reaktorów [5]

Fig.1. Comparison of dimensions of different types of reactors



Rys.2. Elektrownia jądrowa Bruce Power Generating Station, Kanada, największa w północnej Ameryce, druga co do wielkości na świecie, 6500 MW mocy, obszar zajmowany 932 ha [6]

Fig.2. Bruce Power Generating Station (BPGS), first private nuclear power plant in Canada. It is the largest nuclear power generating plant in North America (6500 MW) and the second largest in the world, area 932 ha



Rys.3. Koncepcja modułu SMR według NuScale [9]

Fig.3. An example of proposed SMR type developed by NuScale Power

Zgodnie z definicją podaną przez Międzynarodową Agencję Atomistyki (organ ONZ z siedzibą w Wiedniu, któremu powierzono nadzór nad bezpieczeństwem jądrowym na całej kuli ziemskiej), małe reaktory modułowe (Small Modular Reactors - SMR) są definiowane jako reaktory o mocy do 300 MWe, (MWe- moc elektryczna reaktora) które będą wytwarzane seryjnie w wyspecjalizowanych zakładach produkcyjnych i dostarczane w całości na miejsce docelowej eksploatacji. Reaktory modułowe mogą być sytuowane obok siebie tworząc elektrownię (źródło ciepła) o mocy będącej wielokrotnością mocy pojedynczego modułu.

3. Koncepcje reaktorów modułowych

W pracach projektowych SMR prowadzonych w wielu krajach, obecnie przeważają cztery zasadnicze typy reaktorów:

- lekkowodne (PWR, BWR),
- prędkie chłodzone sodem, ołowiem lub eutektyką ołowiu z bizmitem (FNR/Na, Pb, Pb-Bi),
- wysokotemperaturowe grafitowe (HTGR),
- na stopione sole (MSR).

Większość z projektów SMR znajduje się obecnie w fazie koncepcyjnej i będzie prawdopodobnie realizowana po 2030 r.

Najbardziej zaawansowane są projekty reaktorów lekkowodnych ciśnieniowych, które wykorzystują wieloletnie doświadczenia z eksploatacji reaktorów używanych do napędu okrętów (lotniskowców oraz łodzi podwodnych). Reaktory okrętowe, mimo osiąganych mocy poniżej 300 MW, nie są zaliczane do SMR. Główne różnice pomiędzy SMR a istniejącymi reaktorami okrętowymi polegają na odmiennych systemach bezpieczeństwa pracy reaktora.



Rys. 4. Łódź podwodna US Virginia class z napędem jądrowym [4]

Fig.4. US nuclear submarine class Virginia

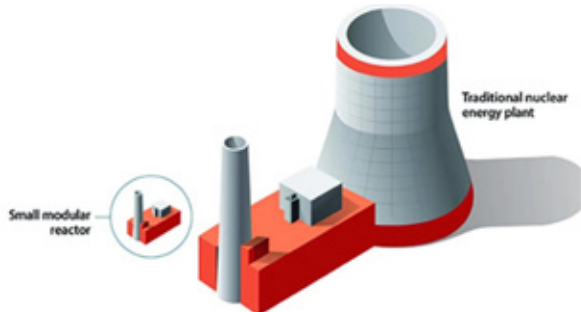
Przewidywane cechy reaktorów modułowych (SMR)

Nowoczesne modułowe reaktory małej mocy (SMR) do zastosowań energetycznych i specjalnych mają mieć prostą, zintegrowaną konstrukcję, być wytwarzane seryjnie w fabrykach a nie na placu budowy i mieć krótki czas budowy oraz niskie koszty budowy. Ponadto powinny posiadać pasywne cechy bezpieczeństwa, wynikające z praw przyrody (grawitacja, konwekcja, itp.). Przewiduje się zagłębienie ich w gruncie, co zwiększy ich bezpieczeństwo, odporność na zagrożenie terrorystyczne i proliferacyjne. Można je będzie budować pojedynczo lub jako moduły w większym kompleksie, ze stopniowym zwiększaniem mocy w miarę potrzeb. Ze względu na małe rozmiary będzie je można łatwo umieszczać na terenach zdegradowanych, w miejsce likwidowanych elektrowni węglowych lub kopalni paliw.

Do najważniejszych zalet reaktorów modułowych, które będą dostarczały zarówno energię elektryczną jak i ciepło na potrzeby procesów technologicznych, w stosunku do dużych reaktorów energetycznych, należy zaliczyć przede wszystkim mniejsze nakłady inwestycyjne. Przyjęto, że będą to reaktory mniejsze wymiarowo o mocy do 300 MWe, (mniejsze od energetycznych), wytwarzane seryjnie w zakładach przemysłowych i dostarczane w całości na miejsce docelowej eksploatacji. Zaczyna wtedy działać efekt ekonomiczny skali produkcji seryjnej wraz ze zmniejszonym czasem budowy. Ocenia się także, że jakość tych obiektów, z powodu budowy seryjnej oraz powtarzalności, powinna być większa w porównaniu do dużych bloków energetycznych.

SMR mogą być budowane pojedynczo lub w grupie wielu modułów oddawanych kolejno do eksploatacji, co pozwala rozciągnąć koszty inwestycyjne w czasie i ułatwić inwestowanie.

Małe moce i wymagane pasywne cechy bezpieczeństwa czynią je atrakcyjnymi dla państw posiadających nierozbudowane sieci energetyczne i niewielkie doświadczenie w energetyce jądrowej. Reaktory te powinny się cieszyć zainteresowaniem państw o dużych powierzchniach, zwłaszcza ze słabo rozbudowanymi elektrycznymi sieciami energetycznymi.



Rys. 5. Porównanie rozmiarów SMR z reaktorem energetycznym [9]
Fig. 5. Comparison of dimensions of SMR to big nuclear power plant



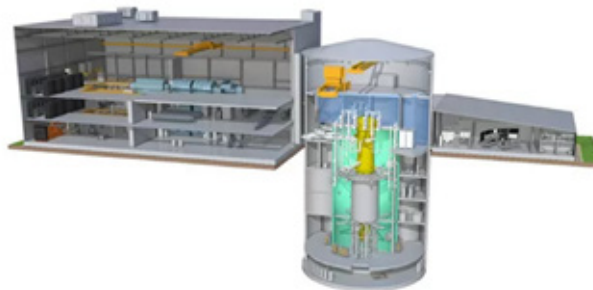
Rys. 6. Model elektrowni jądrowej złożonej z 6 modułów SMR według firmy NuScale [10]
Fig. 6. Concept of 6 modular nuclear energy plant type developed by NuScale Power

Wejście SMR-ów na rynek jest opóźniane przez przewidywane wysokie koszty budowy fabryk modułów oraz kwestie licencjonowania nowych reaktorów. Bardzo złożone procedury licencjonowania stosowane aktualnie, dotyczą dużych istniejących bloków energetycznych, ale

są dobrze znane od lat. W przypadku SMR procedury te będą musiały być dostosowane do projektowanych małych jednostek. Konieczność opracowania nowych procedur podniesie koszty licencjonowania, które będą wyższe niż obecnie. Wzrośnie także czas wydawania licencji, niezbędny do wyszkolenia ekspertów dozoru technicznego.



Rys. 7. Model reaktora SMR o mocy 50 MWe wg firmy NuScale [9]
Fig. 7. A diagram of the NuScale Power Module reactor (50 MWe)



Rys. 8. Koncepcja jednomodułowej elektrowni SMR według Ge-Hitachi [8]
Fig. 8. Concept of one module power plant according to Ge-Hitachi

Mniejsze zapotrzebowanie na wodę chłodzącą, wynikające z nowej koncepcji rozwiązania reaktora modułowego, umożliwi rozmieszczenie reaktorów blisko potencjalnego odbiorcy, nie tylko na wybrzeżu, przy rzekach, gdzie istnieją duże ilości potrzebnej wody. Reaktory te mogą być także użyte do zasilania różnych obiektów wydobywczych czy naukowych, na terenach słabo uprzemysłowionych lub jako dedykowane źródło energii dla dużych zakładów przemysłowych.

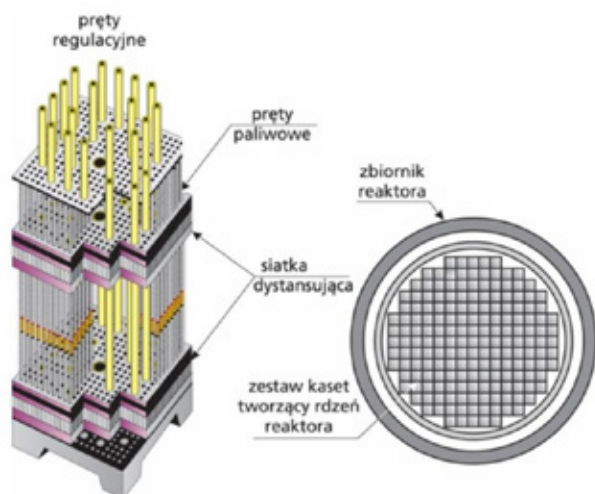
Przewiduje się zastosowanie tych reaktorów, usytuowanych w pobliżu obiektów przemysłowych, także lub wyłącznie do wytwarzania ciepła. Może być ono wykorzystane do odsalania wody, ogrzewania obiektów, do prowadzenia procesów chemicznych (w tym do produkcji ekologicznego wodoru), itp. Po zakończeniu okresu pracy reaktora będzie istniała możliwość usunięcia obiektu w całości lub przeprowadzenie demontażu na miejscu usytuowania.

4. Zagadnienia bezpieczeństwa energetyki jądrowej

Podstawowe problemy, związane z bezpieczną pracą elektrowni jądrowej, to awaryjne zatrzymanie reaktora, odbiór ciepła w czasie pracy normalnej oraz odbiór ciepła po zatrzymaniu reaktora, a także zabezpieczenie przed wydostaniem się produktów radioaktywnych poza obszar elektrowni. Należy także uwzględnić odporność reaktora na wstrząsy sejsmiczne, zakłócenia elektromagnetyczne oraz na katastrofy klimatyczne (powódź, wichury). Elektrownia jądrowa musi być także zabezpieczona przed aktami dywersji i sabotażu.

Funkcje bezpieczeństwa związane z bezpieczną pracą reaktora jądrowego są następujące:

1. sterowanie reaktywnością (ilością wytwarzanych neutronów) od której zależy moc reaktora,
2. odprowadzanie ciepła od elementów paliwowych reaktora w czasie normalnej pracy oraz po zatrzymaniu reaktora,
3. zatrzymywanie substancji promieniotwórczych:
 - ograniczanie i kontrolowanie ich uwolnień do środowiska w stanach normalnej eksploatacji,
 - ograniczanie uwolnień substancji promieniotwórczych podczas awarii reaktora.



Rys. 9. System prętów kontrolnych reaktora jądrowego [9]

Fig.9.Rod control system of nuclear reactor

Układ sterujący reaktora nie może spowodować wzrostu reaktywności (mocy reaktora) podczas oddziaływania zakłóceń na układ w czasie normalnej pracy. Układ sterujący nie może również dopuścić do niekontrolowanego wzrostu mocy reaktora w stanach awaryjnych. Podobnie jak we wszystkich układach automatycznej regulacji, powstanie dodatniego sprzężenia zwrotnego w czasie opisanych stanów jest niedopuszczalne.

Należy zaznaczyć, że obawa dużej części społeczeństwa o możliwość awaryjnego przekształcenia reaktora w bombę atomową, jest nieprawdziwa. Reaktory pracują na paliwie o zbyt małym wzbogaceniu, aby taka sytuacja mogła zaistnieć (bomba atomowa wymaga paliwa o bardzo dużym wzbogaceniu).

Układy sterowania reaktora (dla normalnej pracy oraz sytuacji awaryjnych) muszą być tak zaprojektowane i wykonane, aby:

- apewniona była stabilność mocy reaktora podczas normalnej eksploatacji,
- wahania mocy reaktora, w wyniku których mogłoby nastąpić przekroczenie granicznych parametrów paliwa jądrowego, muszą być zachowane na pewnym, określonym przez projekt, poziomie. Eksploatowane obecnie typy reaktorów spełniają przedstawione powyżej wymagania.

Problemem bardzo istotnym w energetyce jądrowej jest zagadnienie odbioru ciepła od rdzenia reaktora (dokładnie od elementów paliwowych).

W nowoczesnych elektrowniach jądrowych grzanie elementów paliwowych jest bardzo intensywne (do kilkuset Wat na 1cm długości pręta paliwowego). Wytworzone ciepło jest wykorzystywane najczęściej do produkcji pary wodnej lub podgrzania gazu, czyli czynników stosowanych do napędów turbogeneratorów lub jako ciepło technologiczne w przemyśle chemicznym (pierwsze próby zastosowań).

W reaktorze jest wytwarzane ciepło nie tylko w czasie jego normalnej pracy ale również po jego zatrzymaniu. Po zatrzymaniu reaktora powstaje ciepło powyłłączeniowe, związane głównie z emisją promieniowania z rozpadów promieniotwórczych fragmentów

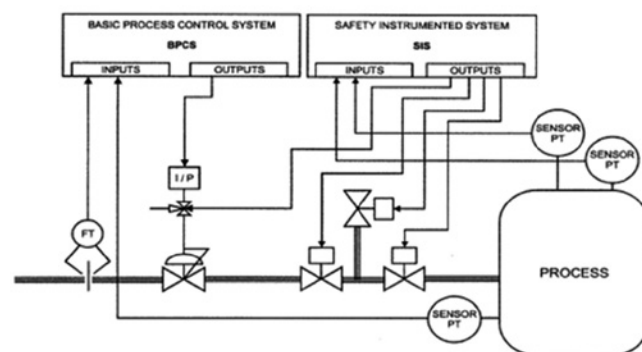
rozszczenia. Ciepło to stanowi ułamek procenta mocy cieplnej reaktora. Odniesione do zazwyczaj dużej mocy reaktora stanowi znaczącą moc mogącą doprowadzić do przegrzania i stopienia elementów paliwowych.

W razie braku odbioru ciepła z reaktora paliwo może ulec przegrzaniu i uszkodzeniu, a zawarte w nim produkty rozszczepienia mogą wydostać się poza koszulki paliwowe i przeniknąć do chłodziwa.

Konieczność odbioru tego ciepła, nawet przy zatrzymanej pracy reaktora, stanowi jeden z głównych problemów energetyki jądrowej.

Problemem podstawowym we wszystkich typach reaktorów jest zagwarantowanie odbioru ciepła od rdzenia po wyłączeniu pracy reaktora. Układy sterowania reaktora muszą wypełniać swoje zadania bezpieczeństwa czyli odpowiadają za ciągłe pokrycie rdzenia wodą (w reaktorach wodnych) i chłodzenie bez względu na możliwy rodzaj awarii. Awarią może być utrata zasilania elektrycznego z sieci energetycznej, prowadząca do zatrzymania układów niezbędnych do prawidłowej pracy reaktora (silników elektrycznych napędzających pompy chłodziwa, zaworów, itp.). Awarią może być uszkodzenie pomp, zaworów i innych elementów obiegu chłodzącego a nawet rozszczelnienie obiegu pierwotnego i utrata czynnika chłodzącego rdzeń reaktora.

Każdy obiekt techniczny wyposażony jest w układ sterowania technologicznego (BPCS-podstawowy system kontroli produkcji) umożliwiający jego normalną pracę i osiąganie wymaganych parametrów procesu. Ponadto, zgodnie z dyrektywami Unii Europejskiej, musi być wyposażony w układ sterowania, który odpowiada za spełnienie funkcji bezpieczeństwa. Zadaniem systemów bezpieczeństwa, określanych najczęściej jako ang. Safety Instrumented Systems, SIS, jest eliminowanie możliwości powstania niebezpiecznych sytuacji oraz w przypadku ich zaistnienia kontrola powstałego hazardu i ryzyka.



Rys. 10. Podwójny system sterujący obiektem, system odpowiedzialny za cykl produkcyjny BPCS oraz SIS, system bezpieczeństwa [12]

Fig.10.Dual control system, BPCS production system and safety system

Nie wszystkie systemy sterujące, odpowiedzialne za bezpieczeństwo maszyn i instalacji, zapewniają taki sam poziom bezpieczeństwa. Pewne grupy układów zapewniają wykonywanie poleceń związanych z powstającymi zagrożeniami tylko w przypadku prawidłowego działania wszystkich elementów składowych układu sterującego. Układy te są nieodporne na błędy elementów. Istnieją także grupy układów sterujących, które potrafią realizować funkcje bezpieczeństwa, nawet w przypadku pojawienia się uszkodzeń elementów tworzących system.

Systemy bezpieczeństwa maszyn są dzielone na kategorie (poziomy), związane z ich przeznaczeniem oraz zdolnością zapewnienia działania funkcji bezpieczeństwa. Wprowadzona niedawno norma EN ISO 13849/1 2008 (od 1 stycznia 2012 r.) bezpieczeństwa wprowadza pojęcie poziomów działania (ang. PL -performance level). Występuje pięć poziomów działania różniących się niezawodnością wykonywania otrzymywanych poleceń sterujących. Najniższy z nich, zapewniający najniższe bezpieczeństwo układów to PLa, najwyższy to Ple.

Trochę inne podejście do zagadnień bezpieczeństwa funkcjonuje do dnia dzisiejszego w przemyśle procesowym (spożywcym, chemicznym, petrochemicznym, energetycznym). Zagadnienia bezpieczeństwa instalacji procesowych są objęte normami IEC 61508 oraz IEC 61511 oraz normą IEC 61513 dotyczącą zagadnień energetyki jądrowej.

Normy te definiują wymagany stopień ograniczenia ryzyka oraz zdolność systemu do ograniczania ryzyka (niezawodność układów sterujących do wykonywania poleceń związanych z bezpieczeństwem) przez podanie parametru SIL (ang. Safety Integrity Level) nazywanego poziomem nienaruszalności bezpieczeństwa.). Poziom nienaruszalności bezpieczeństwa jest zdefiniowany jako prawdopodobieństwo, że system związany z bezpieczeństwem wykona w sposób zadowalający wymagane funkcje bezpieczeństwa we wszystkich określonych warunkach i w określonym przedziale. Norma 61511 definiuje cztery poziomy SIL. Poziom SIL 1 daje najmniejsze gwarancje poprawnego zachowania układu sterującego w warunkach przywołania funkcji bezpieczeństwa, natomiast SIL 4 daje najwyższe gwarancje zadziałania.

Oceny związane z niezawodnością działania układów sterujących, zwłaszcza odpowiedzialnych za bezpieczeństwo, doprowadziły do wytworzenia pojęć aktywnych i pasywnych systemów bezpieczeństwa. Pojęcia te nie są odpowiednikami kategorii bezpieczeństwa czy wskaźników niezawodności działania (PL lub SIL) aczkolwiek dotyczą tych samych problemów. Aktywny system bezpieczeństwa to klasyczny układ złożony z odpowiednich czujników informujących o stanach procesu lub maszyny, układu logicznego przetwarzającego uzyskane informacje i podejmującego odpowiednie decyzje przesyłane do zespołów wykonawczych realizujących wytworzone decyzje. W klasycznych układach podukłady całego łańcucha są zasilane energią z zewnątrz, najczęściej elektryczną. W przypadku uszkodzenia zasilania cały układ odpowiedzialny za bezpieczeństwo, nawet jeśli jest wielokanałowy, redundancyjny, zawodzi, przestaje działać prawidłowo.



Rys. 11. Przykład aktywnego systemu bezpieczeństwa [11]

Fig.11.Example of active safety control system

Metody pasywne zwiększania bezpieczeństwa polegają na zastosowaniu takich rozwiązań, które w sytuacjach niebezpiecznych nie wymagają działania układów elektrycznych czy elektronicznych, nie wymagają działania układów logicznych, analizujących powstałe zagrożenie, ani nie wymagają źródeł zasilania. W układach biernego bezpieczeństwa w przypadkach zagrożenia następują jednak pewne działania elementów układu bezpieczeństwa jak zmiana otwarcie szczelin dławiących, zalanie układu, wprowadzenie prętów kontrolnych w rdzenie reaktorów, itp.

Zastosowane w maszynach i instalacjach pasywne systemy bezpieczeństwa nie wymagają zasilania w energię elektryczną lub inną. Wykorzystuje się w nich zjawiska fizyczne, takie jak siła grawitacji, konwekcja naturalna lub zmiana właściwości niektórych materiałów

wraz z temperaturą. Takie systemy bezpieczeństwa są bardziej niezawodne w porównaniu z systemami aktywnymi. Prawdopodobieństwo zablokowania działania takiego systemu lub jego uszkodzenia jest bardzo małe.

W energetyce jądrowej, gdzie zagadnienia bezpieczeństwa są stawiane absolutnie priorytetowo, od wielu lat trwają prace nad tworzeniem układów zapewniających bezpieczną pracę reaktorów. Podstawowe problemy związane z bezpieczną pracą elektrowni jądrowej sygnalizowane wcześniej to awaryjne zatrzymanie reaktora, odbiór ciepła w czasie pracy normalnej oraz odbiór ciepła po zatrzymaniu reaktora a także zabezpieczenie przed wydostaniem się produktów radioaktywnych poza obszar elektrowni.

Awaryjne wyłączenie reaktora polega na zwolnienie procesu powielania neutronów, najczęściej przez wprowadzenie do reaktora prętów z borazonu zatrzymujących proces. Pręty awaryjne wykonane są z materiałów silnie pochłaniających neutrony lub (w nowszych rozwiązaniach) z materiałów słabiej pochłaniających neutrony, lecz rozmieszczonych w rdzeniu w zoptymalizowany sposób. Po wsunięciu (lub najczęściej zrzuceniu z elektromagnetycznych zaczepów) prętów awaryjnych do rdzenia reaktora, ustają w nim reakcje rozszczepień wymuszonych.

Odrębną sprawą stanowi natomiast chłodzenie rdzenia reaktora. W czasie normalnej pracy reaktora ciepło wydzielane w stosie jest odbierane przez wodę (zwykłą lub ciężką), płynny metal (sód lub mieszanina ołowiu z bizmutem), stopione sole ewentualnie gaz (hel, dwutlenek węgla lub gaz dysocjujący). W reaktorach pierwszej i drugiej generacji do odbioru ciepła od stosu były stosowane aktywne układy chłodzenia.

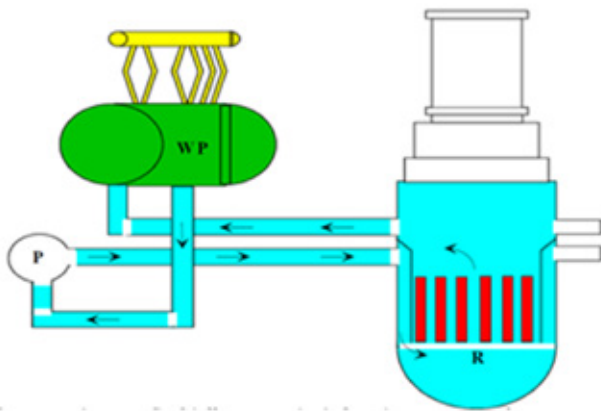
5.Systemy bezpieczeństwa reaktorów

W reaktorach jako innych obiektach procesowych są stosowane zarówno aktywne jak i pasywne systemy bezpieczeństwa. Układy aktywne zawierają trzy lub cztery równoległe podukłady chłodzenia reaktora ze zbiornikami chłodziwa, pompami, i zaworami. Są to więc układy redundancyjne z funkcjami samonadzoru. Tylko jeden z kilku podukładów wystarcza do zalania rdzenia wodą i skutecznego chłodzenia. W przypadku awarii podukładu jego zadania przejmuje podukład równoległy. Układy aktywne wymagają jednak elektrycznych systemów zasilających (napędy pomp, zasilanie czujników, napędy zaworów, itp.). Wszystkie reaktory posiadają niezależne źródła energii elektrycznej, niezbędne do sterowania pracą reaktora. (awaryjne generatory elektryczne napędzane silnikami spalinowymi, baterie akumulatorów, hydroelektrownia). Wydarzenia w Fukushima pokazały, że awaryjne systemy zasilania w sytuacjach skrajnych, również mogą przestać działać.

W najnowszych typach pracujących reaktorów (reaktorach III generacji) coraz częściej są stosowane, poza aktywnymi systemami, również pasywne układy bezpieczeństwa. (głównie systemy awaryjnego chłodzenia rdzenia).

Pasywne bezpieczeństwo nie wymaga interwencji ani człowieka, ani urządzenia pośredniczącego. W europejskim EPR (European Pressurized Reactor) moderatorem jest woda, która odparowuje, gdy moc (temperatura) reaktora przekroczy poziom bezpieczeństwa. Neutrony powstające w reaktorze mają za dużą energię, by rozbić jądro uranu. Muszą zostać spowolnione przez moderator, czyli w wypadku EPR-ów – przez wodę. Gdy ta wyparuje, neutrony nie będą spowalniane, a reakcja rozszczepienia szybko zostaje spowolniona.

W innym reaktorze III generacji, amerykańskim AP1000, projektanci oszacowali bezpieczeństwo jego pracy na tak duże, że zrezygnowali z zastosowania generatorów dieselskich jako urządzeń pracy awaryjnej (w starszych konstrukcjach zasilają one systemy bezpieczeństwa podczas awarii prądu, zapewniając zasilanie).



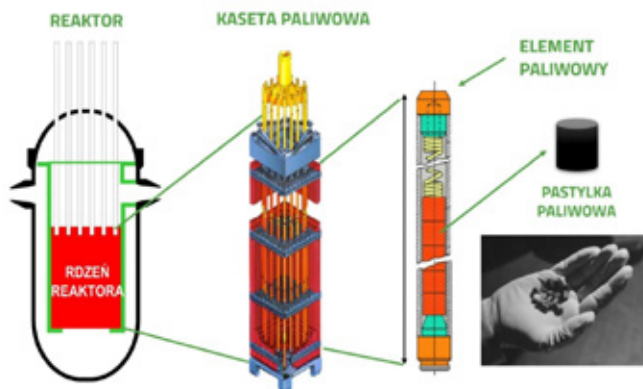
Rys. 12. Schemat pasywnego chłodzenia reaktora [11]
 Fig.12.Example of passive cooling safety system of nuclear reactor

Przykładem układu pasywnego chłodzenia reaktora, umożliwiającego wychładzanie rdzenia bez konieczności stosowania napędu elektrycznego do napędu pomp jest układ przedstawiony na rys.12. W przypadku awarii pomp w obiegu pierwotnym do zapewnienia bezpieczeństwa działania reaktora wykorzystano zjawisko konwekcji naturalnej. Woda chłodząca elementy paliwowe oddaje ciepło w wytwornicy pary (WP). Różnica poziomu cieczy w wytwornicy oraz w reaktorze oraz zjawisko konwekcji cieplnej wystarcza do rozproszenia mocy cieplnej powstającej po zatrzymaniu pracy reaktora. Pompy w tym obiegu służą tylko jako dodatkowe elementy zabezpieczające.

Nowoczesne reaktory jądrowe wyposażone są w wielokrotniony system barier bezpieczeństwa chroniących przed uwolnieniem z obszaru reaktora materiałów radioaktywnych.

Bariery te tworzone są przez:

- osłonę pastylek paliwowych,
- koszulki paliwowe,
- obieg pierwotny chłodziwa wraz ze stalowym korpusem reaktora,
- żelbetonową obudowę bezpieczeństwa.



Rys. 13. Bariery bezpieczeństwa radioaktywnego reaktora [7]
 Fig.13.Safety barriers of radioactive reactor

6.Reaktor SMR firmy NuScale

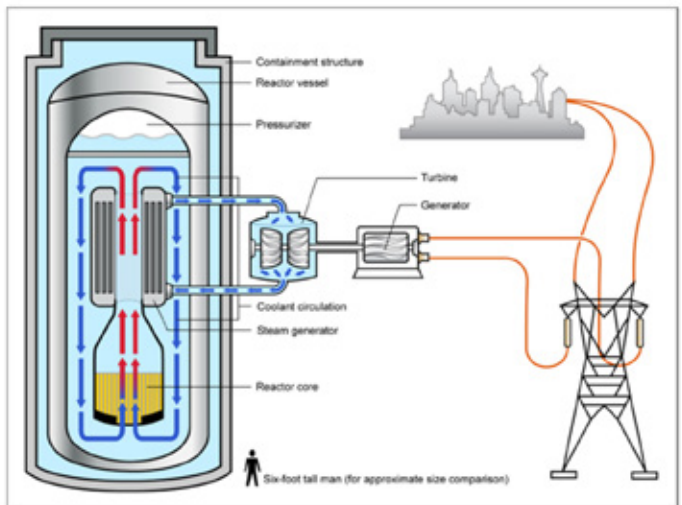
Jedną z firm odnoszących zauważalne sukcesy na rynku światowym SMR jest amerykańska NuScale, która pod koniec grudnia 2016 r. przedstawiła do oceny amerykańskiemu NRC (Nuclear Regulatory Commission, agencja odpowiedzialna za bezpieczeństwo urządzeń jądrowych w USA) projekt reaktora SMR lekkowodnego o mocy 77

MWe, w celu uzyskania licencji na jego budowę i złożyła wniosek o uzyskanie licencji na budowę

NuScale moduł to zintegrowany PWR o mocy 250 MWt i mocy 77 MWe brutto z naturalnym obiegiem. Zostanie zbudowany fabrycznie ze zbiornikiem ciśnieniowym o średnicy około trzech metrów, ma posiadać chłodzenie konwekcyjne, a jedynymi ruchomymi częściami będą napędy prętów regulacyjnych. W zbiorniku zostanie umieszczony reaktor, stabilizator ciśnienia i wytwornica pary. Moduł ma używać standardowego paliwa PWR wzbogaconego do 4,95% w normalnych prętach paliwowych. Cykl wymiany prętów ma wynosić 24 miesiące.

Woda, przechodząc przez rdzeń reaktora, w którym będą elementy paliwowe o długości 2 m, odbiera na ich powierzchni ciepło od paliwa jądrowego. Woda z chwilą, kiedy odbierze ciepło od prętów paliwowych, zamieni się częściowo albo całkowicie w parę wodną, która idzie do góry. W górnej części zbiornika para spotyka się z obiegiem wtórnym w wymienniku ciepła. W obiegu tym wytworzona para jest kierowana na łopatki turbiny. Ciecz z obiegu pierwotnego oddając ciepło w wymienniku ulega skropleniu i spływa jako woda zewnętrznym pierścieniem na dół pod rdzeń reaktora. Występuje naturalny układ konwekcji nie potrzebujący pomp w obiegu pierwotnym. Pompy występują tylko w obiegu wtórnym, w którym para przepływa od wytwornicy pary do turbiny napędzającej generator.

Zainstalowany w wypełnionym wodą basenie pod poziomem gruntu, cylindryczny moduł zbiornika o średnicy 4,6 m i wysokości 23 m będzie ważył około 640 ton. Moduł ma zawierać reaktor z generatorem pary nad nim. Standardowa elektrownia składałaby się łącznie z 12 modułów, co dawałoby około 924 Mwe. Przewidywane są również elektrownie cztero- i sześciomodułowe, określane obecnie jako VOYGR.



Source: GAO, based on Department of Energy documentation | GAO-15-652

Rys. 14. Koncepcja budowy SMR według US Department of Energy, GAO-15-652 [9]
 Fig.14.Illustration of a light water small modular nuclear reactor (SMR) according to US Department of Energy

Elektrownia VOYGR-12SMR będzie mogła wytworzyć moc 924 MW zajmując powierzchnię 0,11 mili kwadratowej w porównaniu do 94 mil kwadratowych wymaganych dla zakładów wiatrowych o tej samej mocy lub 17 mil kwadratowych dla ogniw słonecznych. Reaktor SMR umieszczony będzie w basenie wypełnionym wodą, umieszczonym pod ziemią. W takim rozwiązaniu terrorystyczny atak samolotu czy akcje dywersyjne są bardzo utrudnione. Nad ziemią znajduje się wspomniany już obieg wtórny. Para w nim znajdująca się nie jest skażona i jeśli instalacja zostanie uszkodzona powodując wyciek płynu to nie spowoduje to skażenia okolicy. Reaktor będzie

ważył około 640 ton i będzie mógł być dostarczany drogą wodną lub kolejową w postaci 3 segmentów ważących około 200-300 ton każdy. Reaktor NuScale jest stosunkowo mały i budowany z modułów, które będą montowane na placu budowy. Przewidywalny czas budowy modułu wg NuScale ma wynosić 3-4 lata.

W normalnych warunkach eksploatacyjnych ciśnienie w zbiorniku reaktora jest niewielkie, bliskie próżni, co poprawia warunki wymiany ciepła. Ta sytuacja zmniejsza powstawanie korozji i poprawia niezawodność zastosowanych komponentów.

W wersji dwunastomodułowej elektrowni moduły reaktora będą umieszczone w pojedynczych basenach porozidzielanych betonowymi ścianami. Dla wymiany prętów paliwowych z określonego modułu będzie on przemieszczany pod wodą kanałem transportowym do osobnego basenu wyposażonego w maszynę załadowniczą. Przewidywany jest także osobny basen do przechowywania zapasowego modułu. W zespole elektrowni 12 modułowej moduły będą umieszczone w dwóch rzędach po 6 modułów w rzędzie. Kanał transportowy ma być umieszczony centralnie pomiędzy rzędami.

Pasywne systemy bezpieczeństwa reaktorów NuScale zapewnią wystarczającą odporność obiektu z punktu widzenia bezpieczeństwa ponieważ nie wymagają zasilania elektrycznego do uruchomienia zabezpieczeń. Po utracie zasilania elektrycznego reaktor wygasi się samoczynnie bez działania obsługi lub systemów nadzorujących. Reaktor może pozostać wygaszony przez bardzo długi okres bez konieczności uzupełniania wody w basenie. Chłodzenie zużytego paliwa w basenie będzie zachowane przez 5 miesięcy bez konieczności uzupełniania wody. Reaktory NuScale w małym stopniu obawiają się ataku cybernetycznego ponieważ zatrzymanie pracy reaktora i długoterminowe oddawanie ciepła powyłłączeniowego nie zależy od sterowania komputerowego. Systemy bezpieczeństwa będą stosowały elektroniczne układy logiczne niepołączone z siecią komputerową.

Zgodnie z wymaganiami NCR budynki reaktora muszą wytrzymać uderzenie dużego samolotu pasażerskiego, wstrząsy sejsmiczne, uderzenia huraganu oraz stany powodziowe. Zgodnie z projektem reaktor NuScale będzie mógł wytrzymać 0.5 g przyspieszenia poziomego oraz pionowego oraz 1.1 g szczytowego przyspieszenia w zakresie od 3 do 12 Hz spełniając wymagane regulacje. Założono okres eksploatacji modułu na 60 lat. Moduł będzie posiadał pełne chłodzenie pasywne w czasie pracy i po wyłączeniu na czas nieokreślony, nawet bez konieczności stosowania zasilania elektrycznego.

W styczniu 2018 r. NRC stwierdziła, że przedstawiony projekt NuScale eliminuje potrzebę zasilania rezerwowego klasy 1E – obecnie wymaganego dla wszystkich amerykańskich elektrowni jądrowych. Oceniono że reaktor zapewnia wymaganą zdolność do podążania za obciążeniem, zgodnie z wymogami EPRI, a także zdolność do rozruchu czarnego (uruchamiania bez konieczności korzystania z sieci elektrycznej).

7. Przyszłość SMRs

Podstawowe problemy związane z dalszymi losami SMR to niewiadoma dotycząca kosztów rozwoju, brak precyzyjnych wymogów w zakresie licencji oraz nieznajomość rzeczywistych kosztów wytworzenia jednostki energii. Zagadnienia te nie mają wpływu na wielkoskalowe elektrownie jądrowe, ponieważ wymogi dotyczące licencji są już dobrze ustalone a koszt za kWh jest konkurencyjny w stosunku do innych metod wytwarzania ze względu na opanowaną technologię oraz wielkość produkcji. Technologia wielkich reaktorów jest dobrze sprawdzona i oparta na wielu godzinach ich pracy a bezpieczeństwo reaktorów ostatnich generacji jest wyjątkowo wysokie.

W 2022 roku badania prowadzone przez Stanford University wykazały, że SMR produkują więcej wysoce radioaktywnych odpadów w przeliczeniu na moc, w porównaniu z wielkoskalowymi reaktorami. Badania te zostały jednak zakwestionowane przez NuScale ze względu na metodykę opracowania.

Niestety trzeba dodać, że firma NuScale przerwała w listopadzie 2023 projekt budowy swoich pierwszych małych reaktorów jądrowych (SMR) dla agencji energetycznej zrzeszającej lokalne zakłady energetyczne w amerykańskim stanie Utah. Projekt zakończył się fiaskiem z powodu rosnących kosztów inwestycji i braku wystarczającej liczby chętnych do odbioru energii. W styczniu firma NuScale podała, że docelowa cena energii z elektrowni wyniesie 89 dolarów za megawatogodzinę, co stanowi wzrost o 53% w porównaniu z poprzednimi szacunkami wynoszącymi 58 dolarów za MWh. Sytuacja taka zmniejszyła zainteresowanie inwestorów reaktorem. NuScale poszukuje obecnie partnerów finansowych do współpracy. NuScale miał budować takie reaktory także w Polsce we współpracy z międzynarodowym potentatem KGHM.

KGHM nie wyklucza budowy małych elektrowni jądrowych w oparciu o inną technologię wskazując kilka możliwych do zastosowania rozwiązań: Rolls-Royce, Nuward (EDF), SMR-160 (Holtec), BWRX-300 (GE Hitachi).

8. Mikroreaktory jądrowe MMR

W wielu krajach a szczególnie w Stanach Zjednoczonych oraz Kanadzie opracowywanych jest kilka projektów małych reaktorów nazywanych mikroreaktorami, które mogą być gotowe do wdrożenia w ciągu następnej dekady.

Te kompaktowe reaktory będą na tyle małe, że można je będzie przemieszczać transportem drogowym lub kolejowym. Mikroreaktory mogą pomóc w rozwiązaniu problemów energetycznych w wielu obszarach. Umownie przyjęto, że moc tych jednostek nie będzie przekraczać 20 MWe.

Niektóre rozwiązania SMR o stosunkowo małej mocy wyjściowej są przewidywane do zasilania obiektów przemysłowych, do zasilania odległych lokalizacji poza siecią elektryczną oraz do łatwego i szybkiego wdrożenia w instalacjach wojskowych oraz w lokalizacjach dotkniętych klęskami żywiołowymi.

W sytuacjach awaryjnych przerw w dostawie prądu ważne obiekty podłączone do sieci, takie jak szpitale, stacje uzdatniania wody itp., mogłyby nadal działać, jeśli byłyby zasilane przez mikroreaktory w mikrosieciach.

Mikroreaktory jądrowe to podkategoria małych reaktorów modułowych (SMR) w fazie rozwoju, pierwsze reaktory spodziewane są po 2025 r. Mikroreaktory znajdują się obecnie na najwcześniejszych etapach rozwoju, a poszczególne projekty znajdują się na różnych etapach dojrzałości.

Mikroreaktory mają wykorzystywać dobrze znane rozszczepienie jądrowe do wytwarzania ciepła. Ciepło to ma być przekazywane w innowacyjny sposób do chłodziwa krążącego w reaktorze i przekazywane w wymienniku ciepła do wtórnego obiegu. Firma Westinghouse opracowała i nadal pracuje nad technologią rurek cieplnych oraz technologią produkcji tych rurek służących do wymiany ciepła. Rury cieplne są to pasywne urządzenia do transportu ciepła eliminujące potrzebę klasycznego chłodziwa reaktora i powiązanych systemów oraz wody chłodzącej. Są samoregulujące i oparte na sprawdzonej technologii.

Główne oczekiwane cechy mikroreaktorów to:

- małe, nieemisyjne źródła energii elektrycznej i ciepła,
- budowane fabrycznie i instalowane na miejscu przeznaczenia,
- łatwo i szybko dostarczane i usuwane z miejsca przeznaczenia,
- wyposażone w pasywne systemy bezpieczeństwa,
- możliwość wieloletniej pracy bez wymiany prętów paliwowych.

Jedną z wiodących firm w energetyce jądrowej, firma Westinghouse, pracuje obecnie nad mikroreaktorem eVinci™, mikroreaktorem mikromodułowym nowej generacji. Jego niewielkie rozmiary (długość poniżej 4 m) pozwolą na jego transport kolejowy, drogowy lub rzeczny i szybkie zainstalowanie na miejscu docelowym. Opracowywany reaktor będzie miał moc 5 MWe przy konstrukcji rdzenia

o mocy 13 MWt. Rdzeń reaktora będzie mógł pracować nieprzerwanie z pełną mocą przez co najmniej osiem lat, potem wymagana będzie wymiana prętów paliwowych. Reaktor eVinci został zaprojektowany z różnorodnymi i redundantnymi funkcjami bezpieczeństwa, od paliwa odpornego na wypadki po pasywne odprowadzanie ciepła. Przewidywane jest zastosowanie paliwa TRISO (ang. TRi-structural ISotropic - izotropowe trójwarstwowe). Paliwo zostało opracowane w Kanadzie w latach 60-tych dla reaktorów chłodzonych gazem, TRISO było przedmiotem wieloletnich prac rozwojowych z udziałem Departamentu Energii (DOE) USA i krajowych kanadyjskich laboratoriów w ramach prac nad zaawansowanymi reaktorami chłodzonymi gazem i w innych programach.

Przełomem przy produkcji paliwa było zamknięcie cząstek TRISO w gęstej ceramicznej matrycy, zwanej paliwem w pełni ceramicznym z mikrokapsułkami (ang. fully ceramic microencapsulated - FCM). Matryca ceramiczna zapewnia wyjątkowo silną ochronę dla cząstek TRISO podczas produkcji energii oraz w trakcie wypadków i długotrwałego przechowywania. Jest to paliwo wzbogacone do 19,75% strukturalnie bardziej odporne na promieniowanie neutronowe, korozję, utlenianie i wysokie temperatury niż tradycyjne paliwa reaktorowe.



Rys. 15. Demonstrowany model reaktora eVinci™ [3]

Fig.15.Example of model eVinci™ microreactor



Rys.16 .Możliwy przykład transportu reaktora eVinci™ [3]

Fig.16.Example of possible mode of transportation eVinci™ reactor

Mikroreaktor będzie wykonywany w całości w zakładzie produkcyjnym i transportowany na miejsce budowy. Wymagana powierzchnia do instalacji ma wynosić poniżej 1 ha. Do obsługi/konserwacji/bezpieczeństwa na miejscu pracy obiektu wymagany będzie minimalny personel. Przewidziano możliwość podłączenia reaktora do lokalnej sieci elektrycznej. Reaktor będzie miał możliwość śledzenia i nadążania za obciążeniem elektrycznym w ciągu krótkiego czasu

rzędu ułamków sekundy. Przewiduje się także możliwość dostarczania wytworzonego ciepła technologicznego dla sieci ciepłowniczych lub do zastosowań przemysłowych.

Innym przykładem projektu mikroreaktora jest rozwiązanie przedstawione przez firmę Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC), z siedzibą w Seattle, wspólnie z partnerami Global First Power i Ontario Power Generation. Jest to projekt małego reaktora modułowego (SMR) z wykorzystaniem technologii MMR - reaktora wysokotemperaturowego chłodzonego gazem (HTR) o mocy termicznej 15 MWt.

Pracujące reaktory jądrowe działają przy dużej gęstości mocy z wykorzystaniem paliwa podatnego na uszkodzenia. Reaktory te muszą być wyposażone w złożone systemy bezpieczeństwa. Systemy te mają na celu schłodzenie reaktora podczas awarii i obejmują sieci rurociągów, zbiorników wodnych i pomp. W reaktorze MMR zaproponowanym przez USNC bezpieczeństw reaktora będzie osiągnięte poprzez zastosowanie wyjątkowo wytrzymałego paliwa o niskiej gęstości mocy. Nie jest przewidywana budowa aktywnych systemów bezpieczeństwa. Idea bezpieczeństwa zawarta jest w konstrukcji paliwa. Ten typ paliwa, omawiany powyżej, nazywany jest TRISO.

9.Wnioski

Zgodnie z obecną wiedzą oczekuje się, że SMR będą bardziej ekonomicznie wydajne w produkcji energii elektrycznej niż duże elektrownie jądrowe. Powodem tego rozumowania jest przewidywana seryjna budowa modułowa reaktorów w wyspecjalizowanych zakładach a nie na placu budowy oraz odmienny, rozłożony w czasie, sposób finansowania. Niestety brakuje informacji dotyczącej problemów i kosztów transportu takich obiektów na miejsce przeznaczenia. Część dostępnych publikacji kwestionuje przewidywane zmniejszenie kosztów jednostkowej produkcji energii elektrycznej argumentując to brakiem dostępnych danych.

Proponowane rozwiązania reaktorów są bardziej bezpieczne niż istniejące obiekty. Jeśli przewidywania i prognozy dotyczące budowy i zastosowania małych reaktorów a zwłaszcza mikroreaktorów się sprawdzą, będzie to jednoznaczne z zasadniczym przełomem w rozwoju i zastosowaniach energetyki jądrowej.

LITERATURA

- [1] DOYLE, et., al.2016. "Highly Reliable Nuclear Power for Mission Critical Applications," Proc. ICAPP .
- [2] IAEA TECDOC SERIE: Lessons Learned in Regulating Small Modular Reactors.
- [3] <https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/evinci-microreactor>
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Virginia-class_submarine
- [5] <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Bruce_Nuclear_Generating_Station#/media/File:Bruce-Nucle
- [7] <http://atom.edu.pl/index.php/bezpieczenstwo/zabezpieczenia-przed-awaria.html>
- [8] <https://www.governova.com/nuclear/carbon-free-power/bwrx-300-small-modular-reactor>
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Small_modular_reactor
- [10] <http://www.nuscalepower.com/ot-How-NuScale-Technology-Works.php>
- [11] Kramarek W., Sałaciński T.2013. „Podstawowe zagadnienia bezpieczeństwa elektrowni jądrowej”. Przegląd Techniczny nr 21,22, 23,24.
- [12] Kramarek W.2016.” Warunki bezpiecznej pracy elektrowni jądrowej”, Mechanik, styczeń
- [13] Mikroreaktory”. Laboratorium Narodowe Idaho . Źródło 21.11.2020 .
- [14] Safety Classification of Passive Nuclear Power Plant Electrical Systems Topical Report. TR-0815-16497-NP-A. Rev. 1
- [15] Reyes, Ingersoll: NuScale Power Plant Resilience Studies Trans. Am. Nucl. Soc, 118, Philadelphia, PA
- [16] What is a Nuclear Microreactor?”, Office of Nuclear Energy, Feb. 26, 2021