

SAFEGUARD W MAŁYCH REAKTORACH MODULARNYCH - SMR

Safeguard in Small Modular Reactors – SMR

Krzysztof Rzymkowski

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono podstawowe cechy systemu zabezpieczeń w projektowanych Małych Reaktorach Modularnych – SMR. Rozpowszechnienie małych reaktorów jądrowych budzi uzasadnioną obawę przed ewentualnym rozprzestrzenieniem materiałów jądrowych. Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA) opracowuje zalecenia dotyczące kontroli tych materiałów w nowo powstających małych reaktorach o bardzo różnorodnych konstrukcjach na etapie projektowania.

Abstract: The paper presents the basic features of the safeguard at the designed Small Modular Reactors – SMR. The spreading of small nuclear reactors gives rise to a well-founded fear of the possible proliferation of nuclear material. The International Atomic Energy Agency (IAEA) is developing recommendations for the control of these materials in newly developed small reactors of a wide variety of designs at the design stage.

Słowa kluczowe: system zabezpieczeń, pokolenia reaktorów, materiał jądrowy, paliwo jądrowe, iPWR, HTR, LMFR

Keywords: : safeguards, reactors generation, nuclear material, nuclear fuel, iPWR, HTR, LMFR

Idea budowy małych reaktorów jądrowych przeznaczonych do wytwarzania energii elektrycznej i ogrzewania, dla baz wojskowych stacjonujących w trudno dostępnych obszarach powstała w Stanach Zjednoczonych w roku 1954. Budowę realizowano w ramach Wojskowego Programu Jądrowego. W końcu XX wieku rozpoczęto w cywilnych instytucjach prace nad podobnymi rozwiązaniami, otwierając nową erę w technikach jądrowych.

Obecnie powstaje wiele bardzo nowatorskich projektów dla bardzo różnorodnych zastosowań.

Przewidywane szerokie wykorzystanie małych modularnych reaktorów jądrowych (*SMR – Small Modular Reactor*) może budzić uzasadnioną obawę przed ewentualnym rozprzestrzenieniem materiałów jądrowych i ich użyciem w celach militarnych lub przestępczych. Kontrola nierozprzestrzeniania materiałów jądrowych jest prowadzona przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (MAEA). Agencja opracowuje również zalecenia dotyczące standardów bezpieczeństwa. Innym zadaniem MAEA jest ułatwianie wymiany informacji naukowych i stymulacja pokojowego zastosowania energii jądrowej. Jednakże zagrożenie terroryzmem wymusza konieczność wzmożonej i dokładniejszej kontroli i ochrony materiałów jądrowych, które, mogą być użyte do budowy broni jądrowej, jak i do celów dywersyjnych np. skażenia środowiska. MAEA rozpoczęła przygotowania do wprowadzenia systemu zabezpieczeń nowych konstrukcji małych reaktorów już na etapie projektowania.

Ochrona materiałów jądrowych

Kontrola i ochrona materiałów jądrowych wykorzystywanych w przemyśle jądrowym obejmuje cały cykl produkcyjny paliwa jądrowego, od chwili uzyskania materiałów wyjściowych, poprzez produkcję paliwa, przetwarzanie paliwa wypalonego, aż do składowania odpadów promieniotwórczych. Nielegalne uzyskanie materiałów jest możliwe na każdym etapie cyklu paliwowego. Reaktory jądrowe stanowią istotny i wrażliwy etap ochrony materiału jądrowego.

Przy projektowaniu systemu zabezpieczeń obiektu jądrowego rozważane są różne scenariusze nielegalnego pozyskiwania materiału jądrowego przez organizacje terrorystyczne. W projekcie uwzględnia się technologiczne możliwości dostępne w danym kraju, możliwość ukrycia, przesunięcia materiału jądrowego do innego wykorzystania niż deklarowane, zastąpienia elementów materiału atrapami oraz przesuwanie drobnych ilości materiału przez długi okres z różnych lokalizacji. Jest to bardzo istotne przy wprowadzaniu wielu małych reaktorów w rozproszonych lokalizacjach.

System zabezpieczeń materiałów jądrowych koncentruje się przede wszystkim na: uniemożliwieniu wykorzystania ich do produkcji broni jądrowej poza układem NPT oraz zabezpieczeniu przed kradzieżą i wykorzystaniem do działań terrorystycznych. Zgodnie z podstawową Umową o Zabezpieczeniach Wszechstronnych (*Comprehensive Safeguards Agreement*), dotyczącą wszystkich materiałów jądrowych we wszystkich obiektach państwa związanych z jądrowym cyklem paliwowym, międzynarodowe kontrole mają na celu wykrycie: niezadeklarowanego

materiału jądrowego i niezadeklarowanych działań na tym materiale, niezgłoszonej produkcji lub przetwarzania materiału jądrowego w zadeklarowanych obiektach lub lokalizacjach poza obiektami, przekierowania zadeklarowanego materiału do innych zastosowań niż zadeklarowano.

Podstawowym dokumentem na podstawie, którego projektowany jest system zabezpieczeń dla danego obiektu jest **informacja projektowa** (*Design information*) zawierająca informacje dotyczące zabezpieczeń materiału jądrowego i jego wykorzystania w obiekcie. Zawierająca informacje identyfikujące obiekt jego charakterystykę ogólną, położenie geograficzne adresy urzędowe, postać, ilość, rozmieszczenie i przepływ materiału jądrowego, plan obiektu z uwzględnieniem elementów, w których materiał jest wytwarzany lub przetwarzany, elementów związanych ewidencją materiału stosowanego zamykania (plombowania) i nadzoru, opis procedur ewidencji i przeprowadzania spisu z natury, pomiarów, rejonów bilansu materiałowego.

W systemie zabezpieczeń obiekty jądrowe podzielono na dwie kategorie:

- obiekt z elementami policzalnymi, w którym materiał jądrowy jest używany w postaci elementów policzalnych (sztuk),
- obiekt z materiałem niepoliczalnym indywidualnie, w którym materiał jądrowy jest używany w postaci masowej (proszek, ciecz).

Reaktory SMR w większości należą do pierwszej kategorii. Wyjątek stanowią reaktory z rdzeniem ze stopionymi solami.

Podstawowym parametrem systemu zabezpieczeń jest miara określana jako – **znacząca ilość** (*Sinificant Quantity – SQ*). Znacząca ilość – jest to przybliżona ilość materiału rozszczepialnego, dla której nie można wykluczyć prawdopodobieństwa budowy jądrowego urządzenia wybuchowego przy zastosowaniu różnych metod przetwarzania tego materiału. Ponieważ w czasie procesu produkcyjnego występują ubytki materiału wartość SQ nie musi odpowiadać wartości masy krytycznej. Np. 8 kg Pu, 8 kg ²³³U, 25 kg ²³⁵U, 75 kg ²³⁵U, 20 t Th. Ilość materiału jądrowego w rdzeniu małego reaktora modularnego jest w porównaniu z reaktorami energetycznymi niewielka, co zmniejsza ryzyko pozyskiwania go do budowy urządzeń wybuchowych i ułatwia ochronę fizyczną ze względu na małe wymiary rdzenia.

Podstawą systemu kontroli jest **ewidencja materiałów jądrowych**, prowadzona oddzielnie dla każdego rejonu bilansu materiałowego, zawierająca informacje o materiale jądrowym (składzie, ilości, lokalizacji, zmianach składu, ruchu materiału). Uzupełnieniem ewidencji materiałowej są **systemy obserwacyjno-rejestrujące** umożliwiające zachowanie ciągłości informacji o materiale jądrowym, śledzenie jego transportu wewnątrz obiektu po ustalonych trasach, spraw-

dzenie, czy materiał jest testowany w wyznaczonych miejscach pomiarowych, potwierdzenie nienaruszalności plombowanych partii materiału.

System kontroli materiałów jądrowych, powinien zapewnić, jak najskuteczniejsze i najwydajniejsze spełnienie międzynarodowych zobowiązań kraju w zakresie zabezpieczeń. Wszystkie obiekty jądrowe w państwie, w którym obowiązuje kompleksowa umowa o zabezpieczeniach podlegają kontroli MAEA. System zabezpieczeń reaktorów SMR musi uwzględniać różnorodność stosowanych konstrukcji reaktorów (np. budowy rdzenia, rodzaju paliwa) sposób postępowania z wypalonym paliwem, odpadami radioaktywnymi, transportem. Dlatego tak ważne jest rozpoczęcie opracowania systemu na wczesnym etapie projektowania reaktora. Weryfikacja materiałów powinna być przeprowadzana w najbardziej efektywny sposób przy minimalnym obciążeniu operatora. Takie przygotowanie na etapie projektowania pozwoli uniknąć późniejszych, kosztownych modyfikacji w eksploatowanych reaktorach. Dlatego współpraca z konstruktorami SMR i władzami państwowymi jest bardzo istotna.

Opracowanie procedur oraz utrzymanie optymalnego stanu systemu zabezpieczeń zależy od procesów technologicznych, do których będzie używany reaktor jądrowy. Znajomość specyfiki obiektu, umożliwi projektantowi systemu zabezpieczeń określenie istotnych punktów przepływu materiałów jądrowych, wyboru punktów pomiarowych i metod pomiaru, wyboru systemów i miejsc monitorowania wykorzystania i składowania materiałów jądrowych, przygotowanie planu i sposobów weryfikacji informacji projektowej stanowiącej jeden z ważniejszych elementów weryfikacji wykorzystania materiałów jądrowych w obiekcie.

Przewidywane szerokie zastosowanie małych modularnych reaktorów jądrowych w różnych dziedzinach wynika z ich podstawowych zalet, przede wszystkim z obniżenia kosztów i skrócenie czasu budowy. Reaktor i cały zestaw urządzeń będzie produkowany w warunkach fabrycznych, a następnie przetransportowany do przygotowanego miejsca pracy reaktora. Modułowa konstrukcja umożliwi zwiększenie mocy zestawu reaktorowego. Projekty SMR powstają w wielu krajach głównie w Rosji, USA, Chinach, Kanadzie, Wielkiej Brytanii, Japonii. Na świecie powstało około 55 projektów.

Zgodnie z klasyfikacją przyjętą przez MAEA, małe reaktory to reaktory o mocy elektrycznej mniejszej niż 300 MW(e). Reaktory średniej wielkości to reaktory o mocy elektrycznej 300–700 MW(e). Konstrukcje reaktorów SMR są bardzo różnorodne. Oprócz lądowych reaktorów stacjonarnych pojawiły się projekty reaktorów przwoźnych zarówno lądowych, jak i morskich (elektrownie na barkach) lub jako jednostki napędowe, a nawet zdalnie sterowane reaktory umieszczane pod wodą (również, jako elektrownie). Planowane są także instalacje wielomodułowe (tj. 2–12 połączonych indy-

widualnych energetycznych modułów reaktorowych o mocy 10–300 MW(e) na moduł. Różnorodność wynika z przeznaczenia reaktora i ma wpływ na konstrukcję budowy, sposób chłodzenia, wprowadzenia automatyzacji, a nawet stosowanie zdalnego sterowania. W większości proponowanych rozwiązań dąży się do większego upakowania elementów automatyki sterującej i pomiarowej wewnątrz obudowy reaktora. Systemy chłodzenia reaktorów są również bardzo zróżnicowane począwszy od klasycznych metod chłodzenia wodą, stosowane są inne metody chłodzenia gazem i metalami ciekłymi (sód, ołów, mieszanina ołowiowo bizmutowa). Różnorodność koncepcji budowy reaktorów SMR wymaga wdrożenia bardziej wyrafinowanych metod ich kontroli dostosowanych indywidualnie do danego typu reaktora.

W tabelach przedstawiono aktualne zaawansowane propozycje będące w trakcie opracowywania.

Powstające nowe propozycje budowy reaktorów wymagają opracowania nowych dokładniejszych metod weryfikacji dla rzadkich rozwiązań, jak np. reaktorów z rdzeniem kulowym, reaktorów z ciekłymi solami, reaktorów modularnych. Jednym z ważnych problemów wymagających nowego podejścia do opracowywania systemu weryfikacji w proponowanych rozwiązaniach jest zmiana wzbogacenia uranu w paliwie reaktora. Dotychczas w reaktorach jądrowych stosowano paliwo o niskim wzbogaceniu, do 4% LEU (ang. *Low Enrichment Uranium*) (wzbogacenie to stosunek sumarycznej wagi izotopów U^{233} i U^{235} do całkowitej wagi używanego uranu wyrażany w %). W niektórych reaktorach badawczych wykorzystywane jest paliwo

Tabela 1. SMR chłodzone wodą

Projekt firmy	Typ	Twórca technologii	Ilość modułów	Moc MWe
CAREM -25	iPWR	CNEA Argentyna	1	27
mPOWER	iPWR	B&W Stan.Zjed.	2	360
NuScale	iPWR	NuSale Stan.Zjed.	12	340
SMART	iPWR	KAERI Korea Pł	1	1000
IRIS	iPWR	IRIRS Włochy	1	125
SMR – 160	iPWR	Holtec Stan.Zjed.	1	160
ACP100	iPWR	CNNC//NPC Chiny	2	200
VBR -100	iPWR	OKHM Afrikanow Rosja	1	300
Westinghouse SMR	iPWR	Westinghouse Electric Stan.Zjed.	1	225
AHWR – 100 LEU	iPWR	BARC Indie	1	300

iPWR – *Integral Pressurized Water SMR* – zintegrowany ciśnieniowo – wodny SMR

Tabela 2. SMR chłodzone gazem

Projekt firmy	Typ	Twórca technologii	Ilość modułów	Moc MWe
HTR - PM	HTGR	INET Tsinghua Uniwersytet Chiny	2	210
EM	HTGR	General Atomic Stan.Zjed.	1	240
PBMR	HTGR	Eskom PBMR RPA	1	165

HTGR – *High Temperature Gas Reactor* – Wysoko temperaturowy chłodzony gazem reaktor

Tabela 3. SMR chłodzone metalami

Projekt firmy	Typ	Twórca technologii	Ilość modułów	Moc MWe
SYBE - 100	LMFR	AKME Rosja	1	101
BREST – OD 300	LMF	RDIFE Rosja	1	100
PRISM	LMF	GE Nucleark Energy Stan.Zjed.	4	1244
4S	LMF	Toshiba Japonia	1	10-30

LMFR – *Liquid Metal Fast Reactor* – reaktor prędko chłodzony ciekłym metalem

Tabela 4. SMR oparte o doświadczenia morskie

Projekt firmy	Typ	Twórca technologii	Ilość modułów	Moc MWe
KLT – 40S	FPU,TNPP	OKHM Afrikanow Rosja	2	70
Flexblue		DCNS Francja	1	160

o wyższym wzbogaceniu HEU (ang. *High Enrichment Uranium*), nawet powyżej 20%. Przy wykorzystywaniu paliwa HEU w tych reaktorach stosowane są zaostrzone kryteria kontroli i podobne rozwiązanie zalecane będzie dla SMR. Obecnie pojawiają się projekty małych reaktorów modułowych z paliwem wzbogaczonym do 20%. Wynika to częściowo z konieczności wydłużenia czasu wymiany paliwa w rdzeniu, która jest utrudniona. Wydłużenie czasu pracy reaktora powoduje większe wypalenie redukując jego przydatność do wykorzystania w nieuprawnionych działaniach np. budowy broni jądrowej. W skrajnym przypadku załadowane paliwo przez producenta i zaplombowaniu rdzenia może być wykorzystywane przez cały okres eksploatacji reaktora wynoszący 25-30 lat. Takie rozwiązanie stosowane jest dla systemów napędowych łodzi podwodnych i wymaga wzbogacenia, około 95%, co w zastosowaniach cywilnych jest niedopuszczalne. Wydłużenie czasu pomiędzy kolejnymi wymianami paliwa przez zwiększenie wzbogacenia do np. 20% wymaga dodatkowych zabezpieczeń. Niewielkie wymiary fizyczne paliwa powodują, że elementy paliwowe nie zawierają większej ilości materiału jądrowego i aby uzyskać znaczącą jego ilość, trzeba ukryć dużo elementów.

Modułarna konstrukcja reaktorów umożliwia budowę elektrowni jądrowej składającą się z indywidualnych bloków energetycznych o określonej mocy łączone w zestawy zależnie od potrzeb energetycznych. Każdy moduł stanowi zintegrowany blok np. lekko-wodnego reaktora jądrowego podłączonego z własnym zestawem urządzeń, włącznie z turbiną parową i generatorem. Basen wypalonego paliwa jest wspólny dla wszystkich modułów. Wymiana paliwa w każdym z modułów następuje po kolei zgodnie zaplanowanym czasem wypalenia paliwa. Podczas operacji wymiany reaktor zostaje fizycznie przesunięty ze swojego roboczego pola do stanowiska, gdzie następuje przeładowywanie paliwa. Wypalone paliwo jest transportowane do basenu. Przy większej liczbie reaktorów proces wymiany paliwa zbliża się, z punktu widzenia kontroli systemu zabezpieczeń do systemu pracy ciągłej obiektu, ponieważ jeden reaktor lub kilka zawsze są otwarte. Wymaga to stałej (całodobowej) obecności inspektora MAEA. Jednocześnie przeniesienie reaktora do innego pomieszczenia związane jest z przepływem materiału jądrowego w obiekcie, co też wymaga kontroli. Nowym problemem dla projektantów systemu zabezpieczeń jest nieprzezroczystość chłodziwa. Przy innym chłodziwie niż woda, np. ciekły metal, utrudniona jest identyfikacja elementów paliwowych wymagająca specjalizowanego legalizowanego urządzenia. Dodatkową trudność identyfikacji elementów paliwowych jest sposób ich składowania.

Małe reaktory posiadają mniejsze rozmiary rdzenia i automatycznie mniejsze i krótsze elementy paliwo-

we. Wpływa to na sposób składowania wypalonego paliwa, które zwykle składowane jest w pozycji pionowej w celu chłodzenia. W celu zmniejszenia powierzchni przechowywania i względów ekonomicznych paliwo układane jest warstwami, co utrudnia jego identyfikację. Sposób kontroli paliwa wymaga uzgodnień. Jednym z proponowanych rozwiązań jest umieszczenie sprawdzonych elementów paliwowych w zaplombowanym koszu. Późniejsze kontrole polegają na sprawdzeniu nienaruszalności plomby.

Małe wymiary paliwa ułatwiają ukrycie większej liczby elementów do niekontrolowanego wykorzystania materiału jądrowego.

Uzupełnieniem ewidencji materiałowej przy kontroli przepływu materiału są systemy obserwacyjno-rejestrujące umożliwiające zachowanie ciągłości informacji o materiale jądrowym. Śledzenie transportu materiału wewnątrz obiektu jest powiązane ze sprawdzeniem, czy jest on testowany w wyznaczonych punktach pomiarowych. Pozwala również obserwować czy nie manipulowano przy zainstalowanych urządzeniach MAEA oraz potwierdzić nienaruszalność plomb. Zdalnie sterowane systemy obserwacyjno-rejestrujące są używane w trudno dostępnych obszarach obiektu, a w odległych lokalizacjach np. wyspach, słabo zaludnionych terenach stanowią kluczowe narzędzie systemu zabezpieczeń. Dlatego ważna jest współpraca projektantów systemu zabezpieczeń i projektantów reaktorów modułowych pozwalająca ustalić istotne procesy i obszary, w których używany jest materiał jądrowy, położenie stacjonarnych przyrządów pomiarowych, miejsca położenia plomb i innych elementów narażonych na działania dywersyjne i sabotaż.

Reaktory iPWR

Projektowane zintegrowane reaktory modułowe iPWR moderowane i chłodzone wodą są podobne do energetycznych reaktorów typu PWR i najprawdopodobniej najszybciej uzyskają licencje dopuszczające je do użytkowania. Większość sprawdzonych w reaktorach PWR metod kontroli materiału jądrowego można dostosować do nowych konstrukcji. Wynika to głównie z podobieństwa budowy elementów paliwowych, które są elementami policzalnymi (sztuki). Cały materiał jądrowy używany w obiekcie jest zawarty w poszczególnych elementach paliwowych przed i po wypaleniu. Kontrola materiału jądrowego sprowadza się do sprawdzenia deklaracji o składzie izotopowym materiału po wypaleniu, który jest przypisany do poszczególnych elementów paliwowych.

Nowym problemem związanym z reaktorami iPWR jest załadowanie paliwa do rdzenia reaktora i jego zaplombowanie, co ma nastąpić u producenta. Ponieważ obiekt gdzie budowany jest reaktor nie jest

obiektem jądrowym objętym umową NPT wymaga specjalnych uzgodnień i ustalenia nowych procedur. W tym celu należałoby wprowadzić w Kwestionariusz Informacji Projektowej (DIQ) producenta reaktorów, a przed załadowaniem paliwa i jego plombowaniem powinna być przeprowadzona inspekcja zgodnie z obowiązującymi kryteriami zabezpieczeń. Wszystkie operacje dotyczące materiału jądrowego (zarówno u producenta jak i w miejscu instalacji reaktora) powinny być wykonywane pod kontrolą dublowanych systemów obserwacyjno rejestrujących z możliwością zdalnej komunikacji.

Przewidywane są też pewne trudności formalne przy eksporcie zaplombowanych reaktorów iPWR do innego kraju i ewentualnego tranzytu, ponieważ będą transportowane materiały jądrowe, co wymaga uzgodnień międzypaństwowych.

Reaktory HTR

Wysokotemperaturowe modularne reaktory HTR (lub VHTR – *Very High Temperature Reactor*, HTGR – *High Temperature Gas Reactor*) należą do reaktorów IV generacji. Powstały dwa podstawowe typy reaktorów wykorzystujących nową kulową konstrukcję elementów paliwowych – paliwo TRISO. Paliwo ma postać nieoznakowanych kulek o średnicy mniejszej niż milimetr. Każda kulka zawiera jądro (około 0,5 mm) tleno węgliku uranu U^{235} (lub dwutlenku uranu), wzbogaconego do 20% (od 3% do 19%). Paliwo jest otoczone warstwami węgla i węgliku, który w warunkach awaryjnych może przetrwać wzrost temperatury do 1600°C.

W konstrukcji reaktora ze złożem kulowym (*pebble-bed reactor*) elementem paliwowym w reaktorze są kule grafitowe (moderator) o średnicy 60 mm otoczone warstwą ceramiczną z węgliku krzemu, zawierające tysiące kulek paliwa TRISO. Wszystkie kule paliwowe są umieszczone w pojemniku grafitowym będącym jednocześnie reflektorem neutronów. Znajdują się w nim również pręty sterujące.

Reaktory z rdzeniem pryzmatycznym składają się z sześciokątnych bloków grafitowych, przylegających szczelnie do siebie. Paliwo TRISO umieszczone w grafitowych cylindrach jest wsuwane w kanały paliwowe. W blokach pryzmatycznych znajdują się pionowe kanały przepływu chłodziwa – gazu, pręty regulacyjne. Chłodziwem w reaktorach HTR jest hel, azot lub dwutlenek węgla. Osiągana temperatura pracy wynosi 700-950°C do około 1000°C. Nie są stosowane aktywne systemy bezpieczeństwa. Wymiana paliwa w reaktorze z rdzeniem kulowym odbywa się w sposób ciągły bez przerw w pracy reaktora. W reaktorach z rdzeniem pryzmatycznym wymiana paliwa jest dokonywana w okresach od 1 do 3 lat. Reaktor jest wyłączany (co około 6-10 lat) w celu wymiany struktur grafitowych w rdzeniu. Reaktory HTR o ujemnym współczynniku

temperaturowym reaktywności, są z natury bezpieczne, ale dla bezpieczeństwa są instalowane poniżej poziomu gruntu.

Duża ilość nieoznakowanych (bez własnych numerów identyfikacyjnych) elementów paliwowych, sposób jego wymiany paliwa i składowania wypalonego paliwa nie pozwala na bezpośrednią adaptację systemu zabezpieczeń ze stosowanego w reaktorach energetycznych. Reaktory tego typu stanowią coś pośredniego pomiędzy obiektami z elementami policzalnymi i elementami niepoliczalnymi używanymi w postaci masowej. W systemie zabezpieczeń brakuje wypracowanych zaleceń kontroli. Wydaje się, że najlepszym rozwiązaniem jest podejście hybrydowe, w którym stosuje się monitorowanie przepływu paliwa przez dodatkowe zaawansowane systemy obserwacji i zamykania (plombowania) oraz wprowadzanie weryfikacji i księgowości materiału stosowanej przy kontroli masowych materiałów jądrowych. Systemy zamykania/obserwacji są umieszczane głównie w miejscach przepływu paliwa (w śluzach) magazynu świeżego paliwa, reaktora i przechowalnika paliwa wypalonego. Powinny to być systemy bezobsługowe z możliwością komunikacji zdalnej, a w bardziej wrażliwych miejscach dublowane. W obszarach składowania pojemniki z paliwem powinny być plombowane. Proponuje się również wprowadzenie monitorów przepływu rozróżniających paliwo świeże od wypalonego, wykrywających paliwo uszkodzone oraz wprowadzenie systemu identyfikacji elementów paliwowych metodą rozpoznawania ich za pomocą ultradźwięków. Wybór systemu zależy od ilości używanego materiału jądrowego oraz jego składu (izotopy uranu, pluton, tor). Pewien problem, nie do końca rozwiązany stanowi zagadnienie postępowania z wypalonym paliwem PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*) z reaktora z rdzeniem kulowym. Początkowo uznawano, że materiał jądrowy w zużytych paliwach PBMR jest nie do odzyskania. Ostatecznie opracowano laboratoryjnie metodę odzyskiwania użytecznych izotopów.

Reaktory LMFR

Reaktory SMR chłodzone metalami są reaktorami powielającymi (ang. *Fast Breeder Reactor* – FBR), w których rozszczepienia jąder paliwa wywoływane są przez neutrony prędkie, tzn. przez neutrony o dużej energii (posiadające energie powyżej 0,5 MeV lub więcej), w przeciwieństwie do neutronów termicznych wykorzystywanych w reaktorach termiczno-neutronowych stosowanych np. w reaktorach energetycznych. W reaktorach (ang. *Liquid Metal Fast Reactor* – LMFR) nie stosuje się moderatora neutronów. Reaktory na neutrony prędkie są zaprojektowane tak, aby efektywniej wykorzystywać materiał jądrowy zawarty w paliwie.

W reaktorach LMFR, jako paliwo wykorzystuje się U^{238} . Prędkie neutrony są idealne do produkcji plutonu, ponieważ absorbowane przez U^{238} , tworzą Pu^{239} . Wysoka efektywność produkcji składnika paliwa jądrowego może znacznie zmniejszyć obawy dotyczące braku dostaw paliwa. Reaktory powielające charakteryzują się wysokim stopniem wypalenia paliwa, ponieważ produkty rozszczepienia są również wypalane. Chłodziwem w obecnie projektowanych reaktorach SMR LMFR jest ołów lub mieszanina ołowiu i bizmutu, oraz sód.

Przewiduje się, że ten typ reaktorów będzie w przyszłości dominujący.

Reaktory prędkie chłodzone stopionym ołowiem stopiony ołów lub mieszanina ołowiu i bizmutu, są obojętne w stosunku do wody lub powietrza, ale są silnie korozyjne i wymagają bardziej wytrzymałych materiałów w systemie chłodzenia. Przewidywany czas użytkowania projektowanych obecnie konstrukcji modułowych o mocy 300-400 MWe wynosi 15-20 lat przy temperaturze pracy wynosi, około $550^{\circ}C$. W dalszej przyszłości przy specjalizowanej konstrukcji i użyciu bardzo wytrzymałych na korozję materiałów temperatura pracy może osiągać $800^{\circ}C$. Reaktory te przewidziane są do produkcji wodoru. Odpowiada to rosyjskiej technologii szybkiego reaktora BREST stosowanego w reaktorach w okrętach podwodnych.

Reaktory chłodzone ciekłym sodem

SFR (*Sodium Fast Reactor*) umożliwiają osiągnięcie wysokiej mocy przy małej objętości chłodziwa i niskim ciśnieniu. Sód ma wysoką temperaturę wrzenia ($883^{\circ}C$), nie ma więc potrzeby stosowania ciśnienia wyższego od atmosferycznego. Wyższe ciśnienie wymaga kosztownej instalacji systemu chłodzenia. Temperatura pracy reaktora wynosi $500-550^{\circ}C$. Opracowano różne warianty reaktorów:

- modułowy o mocy typ 50-150 MWe z aktywnymi zawartymi w paliwie metalicznym uranowo-plutonowym, wymagającym obróbki elektrometalurgicznej,
- basenowy o mocy 300-1500 MWe,
- pętlowy o mocy 600-1500 MWe z konwencjonalnym paliwem MOX z dodatkiem aktywności.

Praktyczne zastosowanie reaktorów prędkich chłodzonych sodem jest bardzo ograniczone, mimo że teoretycznie reaktor powielający jest w stanie wytworzyć znacznie więcej energii niż reaktor LWR, używając tej samej ilości uranu.

Budowa reaktorów chłodzonych sodem wykorzystanych w energetyce jest bardziej złożona w porównaniu z reaktorami LWR. Sód, pochłaniając neutrony przy przepływie przez rdzeń, tworzy izotop emitujący promieniowanie gamma. Powoduje to konieczność stosowania pośredniego obiegu chłodzenia między obie-

giem pierwotnym, a parowym obiegiem roboczym. Reaktory sodowe mają 3 obiegi chłodzenia: pierwotny zawierający radioaktywny sód, wtórny z nieaktywnym sodem i trzeci będący obiegiem parowo-wodnym. Każda drobna awaria powoduje znaczne koszty, ponadto sód charakteryzuje się wysoką aktywnością chemiczną, w zetknięciu z wodą reaguje on gwałtownie.

Paliwo reaktorów wykorzystujących neutrony prędkie, zarówno świeże, jak i wypalone zawiera znaczne ilości Pu oraz HEU. Wymusza to wprowadzenie ściślejszej kontroli materiałów jądrowych, zwiększając ilość kontroli, rozszerzenia zakresu pomiarów, rozbudowy specjalizowanych systemów obserwacyjno-rejestrujących. Paliwo stosowane w reaktorach LMFR jest bardziej wzbogacone niż w reaktorach energetycznych. W czasie reakcji jądrowych podczas pracy reaktora z uranu (U^{238}) powstaje pluton (Pu^{239}). Reaktor wytwarza więcej Pu niż go zużywa. Pluton (Pu^{239}) jest używany w broni jądrowej. Reaktory są przewidziane do bardzo długiej eksploatacji.

Budowa reaktorów LMFR jest zbliżona do budowy reaktorów energetycznych i wiele elementów systemu zabezpieczeń może być bezpośrednio do nich adaptowana uwzględniając zaostrożenia kryteriów. Pewien problem stanowi obecność plutonu w świeżym i wypalonym paliwie. Powstawanie w dużych ilościach izotopu Pu^{239} o wysokiej czystości w reaktorach LMFR i jego odzyskiwanie z wypalonego paliwa w zamkniętym cyklu paliwowym wymaga specjalnej uwagi ze względu na konieczność stałej obserwacji transferów elementów paliwowych w obiektach i między nimi. Obecnie prowadzone są prace badawcze nad opracowaniem schematu przepływu zużytego materiału jądrowego znajdującego się w każdym z obiektów, FBFRFC; opracowanie narzędzia do oceny skuteczności ochrony materiału jądrowego i barier wewnętrznych i zewnętrznych zapobiegających ukryciu wypalonego paliwa; oraz uszczelnienie systemu zabezpieczeń w rejonach bilansu materiałowego, okresu bilansu materiałowego, kluczowych punktów pomiarowych i programu monitoringu.

Szerokie wprowadzenie reaktorów SMR wymaga:

- opracowania umów międzypaństwowych dotyczących ochrony i transportu wysokowzbogaczonego paliwa,
- opracowania i analizy możliwych scenariuszy sabotażu i ataków terrorystycznych na SMR oraz instrukcji ich zapobiegania,
- opracowania nowych koncepcji zabezpieczeń, nowych detektorów i systemów obserwacyjno-rejestrujących sterowanych zdalnie,
- opracowania rozwiązań systemu zabezpieczeń dla transportu elementów paliwowych zawierających pluton.

Przy wprowadzaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych reaktorów IV generacji należy zwrócić uwagę

nie tylko na zapewnienie warunków weryfikacji wymagań układu NPT, ale i na bezpieczeństwo jądrowe, szczególnie przy rozbudowaniu sieci małych reaktorów modułowych. System zabezpieczeń wymaga stałego unowocześniania i ulepszania krajowych systemów kontroli materiałów jądrowych, zwiększenia efektywności i sprawności kontroli materiałów jądrowych i radioaktywnych, ulepszenia i modernizowania krajowych regulacji prawnych oraz ich ścisłego powiązania z systemami międzynarodowymi. Dotyczy to w szczególności procedur powiadamiania o kradzieży, czy akcie sabotażu oraz wzmocnienia systemów kontroli handlu materiałami jądrowymi w celu eliminacji ich nielegalnego obrotu i przemytu.

*dr inż. Krzysztof Rzymkowski,
Stowarzyszenie Ekologów na
Rzecz Energii Nuklearnej,
Warszawa*

Literatura:

- [1] Virgli Nicole, The Impact of Small Modular Reactors on Nuclear Non-Proliferation and IAEA Safeguards Disarmament and Non-Proliferation (VCDNP) Vienna May 2020
- [2] IAEA Nuclear Energy Series, Instrumentation and Control Systems for Advanced Small Modular Reactors, No. NP-T-3.19 Vienna 2017
- [3] IAEA Nuclear Energy Series, Technology Road Map for Advanced Small Modular Reactors, No. NR_T-1.18 Vienna 2021
- [4] Rzymkowski Krzysztof, Międzynarodowy system zabezpieczeń w nowych reaktorach jądrowych. BJOR PAA Nr 3-4 2020, Warszawa
- [5] Lankevich Alexxey, The main nonproliferation and safeguards challenges facing the small modular reactors, AtomInfoRu April 2020
- [6] Boyer Brian D., Understanding the Specific Small Modular Reactors Safeguards, INPRO Vienna. 18-21 October 2016



SPOTKANIE W SPRAWIE PROJEKTÓW WDROŻENIOWYCH

W dniu 5 maja br. odbyło się w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej (IChTJ) spotkanie Piotra Dziadzio, wiceministra klimatu i środowiska z dyrektorami Instytutów badawczych nadzorowanych przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska.

W spotkaniu wzięli również udział wiceprezes Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, dr Przemysław Ligenza oraz dyrektor Departamentu Innowacji i Wodoryzacji Gospodarki Piotr Dowżenko.

Głównym celem spotkania było omówienie możliwości finansowania technologii wybranych przez Ministerstwo do wdrożenia spośród projektów zgłoszonych przez instytuty. Wśród 8 projektów wdrożeniowych zakwalifikowanych do finansowania 3 projekty zostały opracowane w IChTJ, a mianowicie:

- Radiacyjna technologia sterylizacji materiałów medycznych i przeszczepów,
- Projekt i budowa pilotażowej instalacji termicznej przeróbki odpadów promieniotwórczych,
- Biogazownia rolnicza.

Wprowadzeniem do dyskusji było wystąpienie dyrektora Dowżenko, który omówił różne formy finansowania projektów wdrożeniowych przez Narodowy



Fot. 1. Od lewej, wiceminister klimatu i środowiska Piotr Dziadzio, wiceprezes NFOŚiGW Sławomir Mazurek, z MKiŚ Tomasz Mieczkowski, dyrektor Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej prof. dr. hab. Andrzej Chmielewski