

3-4 (116) 2019

BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RADIOLOGICZNA



PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI

Wydawca:



Redakcja: UL. Bonifraterska 17, 00-203 Warszawa

TEL. 22 628 94 39

FAX 22 621 37 86

E-MAIL biuletyn@paa.gov.pl

WWW. paa.gov.pl

Maciej JURKOWSKI, Redaktor naczelny, Przewodniczący Rady Programowej

Marek WOŹNIAK, Redaktor techniczny

ISSN 2353-9062 (publikacja elektroniczna)

BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RADIOLOGICZNA

BIULETYN INFORMACYJNY PAŃSTWOWEJ AGENCJI ATOMISTYKI

Nr 3–4 (116) 2019

Warszawa

Spis treści

Dr Łukasz Młynarkiewicz objął obowiązki Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki	5
Odszedł od nas Jerzy Zandberg	7
Marek Jastrzębski Klasyfikacja bezpieczeństwa systemów oraz elementów konstrukcji i wyposażenia obiektu jądrowego	9
Piotr Darnowski, Mateusz Włostowski Zintegrowane analizy awarii ciężkich na przykładzie eksperymentu Phebus FPT-1 z wykorzystaniem kodu obliczeniowego MELCOR 2.2 – Część 2: Symulacje.	12
Piotr Darnowski, Michał Stępień, Mateusz Włostowski, Konrad Świrski Zachowanie substancji promieniotwórczych w obiegu pierwotnym reaktora jądrowego typu PWR podczas ciężkiej awarii	22
Bartłomiej Geralt Prawnomiędzynarodowe źródła reżimu ochrony fizycznej materiałów jądrowych	33
Michał Snopek Intermitencja sytuacji kryzysowych: studium stanu przed awarią w Fukushima	41
Przemysław Czubek Energetyka jądrowa w Ameryce Łacińskiej	53

Szanowni Państwo

Bieżący numer Biuletynu otwiera informacja o zmianie na stanowisku Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki, którego obowiązki od 11 września br. pełni dr Łukasz Młynarkiewicz, oraz o działaniach, jakie podjął nowy p.o. Prezesa PAA po objęciu stanowiska. Zmiana ta następuje w roku, w którym na świecie weszły do eksploatacji pierwsze bloki jądrowe z reaktorami generacji III+ (EPR i AP1000 wybudowane i uruchomione w Chinach), licencję amerykańskiej NRC (*Nuclear Regulatory Commission*) uzyskał projekt koreańskiego reaktora APR1400, a źródła rządowe potwierdziły, także na arenie międzynarodowej, wolę realizacji w Polsce programu energetyki jądrowej. Dla dozoru jądrowego PAA wyzwaniem pozostaje również nadzór i kontrola wprowadzania w życie zmienionych wymagań ochrony radiologicznej, wynikających z tzw. dyrektywy BSS¹. Dyrektywa ta wprowadzona została do polskiego porządku prawnego zmianą ustawy – Prawo atomowe, która weszła w życie we wrześniu bieżącego roku.



W bieżącym numerze wspominamy także zmarłego 29 sierpnia br. Jerzego Zandberga, emerytowanego długoletniego inspektora dozoru jądrowego PAA i współorganizatora krajowego dozoru jądrowego na etapach tworzenia jego struktur organizacyjnych.

W dalszej części Biuletynu publikujemy trzy artykuły poświęcone tematyce dozoru bezpieczeństwa (*safety*) obiektów jądrowych. W pierwszym z nich **Marek Jastrzębski** omawia wymogi prawne, cele, zakres i sposób przeprowadzania klasyfikacji bezpieczeństwa systemów oraz elementów konstrukcji i wyposażenia obiektu jądrowego. W drugim – **Piotr Darnowski** i **Mateusz Włostowski** kontynuują tematykę zintegrowanych analiz hipotetycznych ciężkich awarii w elektrowniach jądrowych na przykładzie eksperymentu Phebus FPT-1, podjętą przez nich w poprzednim numerze Biuletynu. Autorzy opisują w tym artykule wyniki i wnioski z przeprowadzonej przez ich zespół, za pomocą kodu obliczeniowego MELCOR2.2 i modelu PW, symulacji zjawisk zachodzących podczas eksperymentu na pętli doświadczalnej, umożliwiającej pomiary zmian parametrów fizycznych istotnych dla bezpieczeństwa obiektu jądrowego podczas ciężkiej awarii, porównując te dane eksperymentalne z wynikami własnych obliczeń. Trzeci artykuł kilku autorów (**M. Darnowski, M. Stępień, M. Włostowski, K. Świrski**) jest syntetycznym przeglądem kluczowych procesów fizycznych i chemicznych, którym podlegają substancje promieniotwórcze w obiegu chłodzenia reaktora jądrowego podczas ciężkiej awarii ze stopieniem rdzenia.

W czwartym z zamieszczonych artykułów **Bartłomiej Geralt** podejmuje temat prawnomiędzynarodowych źródeł reżimu bezpieczeństwa fizycznego (*security*) materiałów i obiektów jądrowych, tzn. ich ochrony fizycznej, czyli zabezpieczenia przed aktami terroru, dywersji, sabotażu i kradzieży. Kolejny artykuł, autorstwa **Michała Snopka**, opisuje ciekawą próbę zastosowania podejścia opartego na teorii chaosu do analizy możliwości przewidzenia zawczasu i podjęcia odpowiednich środków zabezpieczających przed ciężką awarią w EJ Fukushima 1 w marcu 2011 r. Interesujące byłoby porównanie wniosków autora z wynikami bardziej szczegółowych analiz opartych na metodach inżynierskich, publikowanych wcześniej na naszych łamach, m.in. w numerze 2(100)2015 Biuletynu. Niniejsze wydanie zamyka artykuł **Przemysława Czubka** o początkach i stanie obecnym energetyki jądrowej w regionie Ameryki Łacińskiej. Życzymy Państwu owocnej lektury,

Redaktor Naczelny
Maciej Jurkowski

¹ BSS – ang. *Basic Safety Standards* – podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na promieniowanie jonizujące, wprowadzone dyrektywą 2013/59/Euratom.

Dr Łukasz Młynarkiewicz objął obowiązki Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki

Prezes Rady Ministrów Mateusz Morawiecki powierzył z dniem 11 września 2019 br. obowiązki prezesa Państwowej Agencji Atomistyki panu dr. Łukaszowi Młynarkiewiczowi, w miejsce odwołanego z dniem 10 września br. na wniosek Ministra Środowiska ze stanowiska Prezesa PAA pana Andrzeja Przybycina. Powołanie nowemu p.o. Prezesa PAA wręczył, w imieniu Prezesa Rady Ministrów, w dniu 11 września br. w Ministerstwie Środowiska minister Henryk Kowalczyk.

Dr Młynarkiewicz jest radcą prawnym, dyplomantem International School of Nuclear Law, programu organizowanego przez Agencję Energii Jądrowej OECD oraz Uniwersytet w Montpellier. Posiada stopień naukowy doktora nauk prawnych. Jego rozprawa doktorska poświęcona była instytucji decyzji zasadniczej w procesie przygotowania i realizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądrowej. Jest członkiem Krajowej Komisji ds. Ocen Oddziaływania na Środowisko oraz Sekretarzem Grupy Roboczej ds. Bezpieczeństwa Jądrowego i Legislacji w International Nuclear Law Association. Ostatnio piastował stanowisko dyrektora Departamentu Ocen Oddziaływania na Środowisko w Generalnej Dyrekcji Ochrony Środowiska. Poprzednio odpowiadał za koordynację odwoławczych postępowań środowiskowych dla kluczowych przedsięwzięć infrastrukturalnych w kraju, a także postępowań w sprawie transgranicznego oddziaływania na środowisko w przypadku projektów strategii, planów lub przedsięwzięć.



Minister Środowiska Henryk Kowalczyk wręcza nominację nowemu Prezesowi Państwowej Agencji Atomistyki (źródło: MŚ)

Dr Młynarkiewicz posiada istotne doświadczenie w prowadzeniu negocjacji i realizacji postanowień umów wielostronnych oraz zobowiązań wynikających z konwencji z Espoo oraz z Aarhus. Jest on także autorem licznych publikacji naukowych, w tym z zakresu prawa energetyki jądrowej oraz postępowania administracyjnego.

Od dnia objęcia obowiązków Prezesa PAA dr Młynarkiewicz nadał priorytet kwestii efektywnego przygotowania Państwowej Agencji Atomistyki do roli dozoru jądrowego dla obiektów energetyki jądrowej i budowania kompetencji w tym zakresie we współpracy z wiodącymi instytucjami dozorowymi na świecie. Już 13 września spotkał się w Warszawie z Kristine L. Svinicki, przewodniczącą Amerykańskiej Komisji Dozoru Jądrowego (US NRC). Tematem rozmów była współpraca i wymiana doświadczeń w zakresie nadzoru nad bezpieczeństwem jądrowym i ochroną radiologiczną elektrowni jądrowych. W 2010 r. Państwowa Agencja Atomistyki podpisała z US NRC porozumienie o wymianie informacji technicznej i współpracy w dziedzinie bezpieczeństwa jądrowego, przedłużone w 2016 r.

W trakcie spotkania delegacje PAA i US NRC omówiły perspektywy dalszej współpracy obu urzędów, w tym w związku z realizacją Programu Polskiej Energetyki Jądrowej.

Prezes Młynarkiewicz uczestniczył także w delegacji rządowej RP pod przewodnictwem ministra Piotra Naimskiego na 63 Konferencję Generalną Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej w Wiedniu w dniach 16–20 września br., gdzie odbył spotkania bilateralne z szefami dozorów jądrowych Kanady, RPA, Republiki Czeskiej i Węgier. Z każdym z tych partnerów PAA prowadzi programy wymiany pracowniczej oraz wymiany informacji i doświadczeń związanych ze sprawowaniem nadzoru nad bezpieczeństwem jądrowym i ochroną radiologiczną. W trakcie spotkań bilateralnych poruszano m.in. kwestię wyzwań, jakie stoją przed nowoczesnymi dozorami jądrowymi w trakcie licencjonowania nowych reaktorów.

Warto odnotować, że w oficjalnym oświadczeniu na sesji plenarnej 63. Konferencji Generalnej przewodniczący delegacji polskiej Piotr Naimski, sekretarz stanu w KPRM, Pełnomocnik Rządu do spraw Strategicznej Infrastruktury Energetycznej, potwierdził plany wprowadzenia w Polsce energetyki jądrowej, a delegacja PAA miała okazję do zaprezentowania, w ramach spotkania Międzynarodowego Forum Współpracy Dozorowej (RCF)¹, organizowanego w trakcie Konferencji Generalnej, wyników z symulacji licencjonowania elektrowni jądrowej przeprowadzonej w ramach projektu ALEP², który PAA uruchomiła w 2018 r. W ramach symulacji zespół PAA przez 4 miesiące dokonał analizy i oceny przykładowej dokumentacji bezpieczeństwa projektu elektrowni jądrowej.

W procesie oceny wykorzystano procedury PAA i przepisy polskiego prawa wdrożone w latach 2011–2014 na potrzeby Programu Polskiej Energetyki Jądrowej. Przeprowadzone działania pozwoliły przetestować funkcjonalność krajowego systemu wydawania zezwolenia dla elektrowni jądrowej i zebrać doświadczenie i wnioski

pozwalające na doskonalenie systemu krajowych wymogów bezpieczeństwa jądrowego i procedur dozorowych.

W zakresie dozoru zastosowań źródeł promieniowania jonizującego istotnym wyzwaniem dla PAA i jej nowego Prezesa pozostaje kontrola nad wdrożeniem w praktyce wymogów zmienionego Prawa atomowego, które weszło w życie w końcu września br., a które wprowadza do polskiego porządku prawnego wymagania dyrektywy 2013/59/Euratom, ustanawiającej podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego (zwanej potocznie „dyrektywą BSS”). Wprowadza ona znaczące zmiany w wymaganiach ochrony radiologicznej, konieczne teraz do efektywnego wprowadzenia w życie.



Kristine L. Svinicki, przewodnicząca Amerykańskiej Komisji Dozoru Jądrowego (US NRC) (źródło: PAA)



Szabolcs Hullán, Zastępca Dyrektora Generalnego Węgierskiej Agencji Energii Atomowej (źródło: PAA)



Michał Koc, Dyrektor Departamentu Bezpieczeństwa Jądrowego i Programów Międzynarodowych (źródło: PAA)

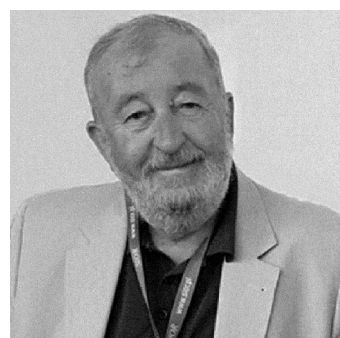
¹ RCF – ang. *Regulatory Cooperation Forum*

² ALEP – ang. *Advanced Licensing Exercise Project*

Odszedł od nas Jerzy Zandberg

W dniu 29 sierpnia 2019 r. zmarł w wieku 74 lat nasz kolega – inspektor dozoru jądrowego Jerzy Zandberg

Mgr inż. Jerzy Zandberg, absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej, od lat związany był z atomistyką, najpierw przez wiele lat jako pracownik Instytutu Badań Jądrowych w Świerku i wykładowca Technikum Nukleoncznego w Otwocku, później jako współorganizator działalności dozorowej i inspektor dozoru jądrowego, członek powołanych przez Prezesa PAA komisji egzaminacyjnych na stanowisko inspektora dozoru jądrowego oraz na uprawnienia inspektora ochrony radiologicznej. Był także współinicjatorem, a następnie działaczem Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej, szczególnie aktywnym po przejściu na emeryturę, ostatnio będąc wiceprezesem tego stowarzyszenia. Z dozorem jądrowym związał się w końcu lat 80. ub. wieku. Był współorganizatorem działającego w latach 1992–1995 Państwowego Inspektoratu Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej (PIBJiOR), a następnie pełnił funkcję jego dyrektora administracyjnego. Po włączeniu PIBJiOR w strukturę PAA, jako pracownik Państwowej Agencji Atomistyki i inspektor dozoru jądrowego w Departamencie Nadzoru Zastosowań Promieniowania Jonizującego, później – Departamencie Ochrony Radiologicznej – miał istotny wkład w wypracowywanie dobrych praktyk w dozorze nad jednostkami służby zdrowia, wykonującymi działalność z urządzeniami do teleradioterapii i brachyterapii.



Pozostanie w naszej pamięci jako człowiek o niezwykle szerokiej wiedzy i doświadczeniu w dozorze nad zastosowaniami źródeł promieniowania w medycynie, mentorem i wychowawcą młodych kadr dozorowych. Do końca uczestniczył w pracach komisji egzaminacyjnych, przyczyniając się do podniesienia poziomu wiedzy i kultury bezpieczeństwa całej rzeszy osób uzyskujących uprawnienia inspektora dozoru jądrowego i inspektora ochrony radiologicznej.

Dla nas był przede wszystkim Przyjacielem i Kolegą, lubianym i poważanym, człowiekiem z ogromnym poczuciem humoru, na którego pomoc zawsze można było liczyć. Będzie nam Go brakowało.

Koledzy i Przyjaciele, Inspektorzy Dozoru Jądrowego, pracownicy PAA

Klasyfikacja bezpieczeństwa systemów oraz elementów konstrukcji i wyposażenia obiektu jądrowego

Marek Jastrzębski
Państwowa Agencja Atomistyki

Wstęp

Klasyfikacja bezpieczeństwa **systemów oraz elementów konstrukcji i wyposażenia** (ang. *systems, structures and components – SSCs*) obiektu jądrowego jest podstawowym i jednym z najważniejszych dokumentów, jaki jest tworzony na etapie projektu, a następnie uaktualniany w trakcie eksploatacji obiektu jądrowego. Celem klasyfikacji bezpieczeństwa jest identyfikacja systemów oraz elementów konstrukcji i wyposażenia, mających istotne znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej oraz przypisanie im odpowiedniej klasy bezpieczeństwa, zależnie od istotności realizowanych przez nie funkcji bezpieczeństwa. Tak przypisane do poszczególnych systemów oraz elementów konstrukcji i wyposażenia klasy bezpieczeństwa determinują dalsze postępowanie wobec nich na poszczególnych etapach związanych z budową i eksploatacją obiektu jądrowego, jak np. projektowanie, wytwarzanie, produkcja, instalacja, zamawianie, testy, nadzór, przeglądy i remonty itp.

Wymogi prawne

Zgodnie z obowiązującymi przepisami [1] każdy system oraz element konstrukcji i wyposażenia obiektu jądrowego, mający istotne znaczenie ze względu na bezpieczeństwo jądrowe i ochronę radiologiczną, musi mieć określoną klasę bezpieczeństwa. Mając na względzie postęp technologiczny oraz wzrost znaczenia systemów automatyki przemysłowej, wymóg ten został rozszerzony także o oprogramowanie użyte do sterowania i kontroli poszczególnych systemów.

Jak już zostało wspomniane na wstępie, klasyfikacja bezpieczeństwa jest podstawowym dokumentem, jaki powinien być stworzony dla obiektu jądrowego, co znajduje odzwierciedlenie w przepisach wykonawczych do ustawy

Prawo atomowe [2, 3]. Wchodzi ona w skład Wstępnego Raportu Bezpieczeństwa obiektu jądrowego, który jest kluczowym dokumentem dołączanym do wniosku o wydanie zezwolenia na budowę obiektu jądrowego. W kolejnych etapach związanych z rozruchem i eksploatacją obiektu jądrowego klasyfikacja bezpieczeństwa także zawarta jest w dołączanej do wniosku dokumentacji.

Cel klasyfikacji bezpieczeństwa

Klasyfikacja określa wagę i rolę poszczególnych funkcji bezpieczeństwa, a co za tym idzie, przekłada się na realizujące je systemy oraz elementy konstrukcji i wyposażenia. Prawdłowo zrobiona klasyfikacja pozwala operatorowi obiektu jądrowego w sposób racjonalny, bez uszczerbku dla bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, kierować adekwatnie do klasy bezpieczeństwa swoje środki i zasoby przy realizacji zadań, takich jak: modernizacje, remonty, konserwacje itp., mających wpływ na stan systemów, elementów konstrukcji i wyposażenia. Dla dozoru jądrowego zaś klasyfikacja bezpieczeństwa jest źródłem informacji na temat **istotnych** dla bezpieczeństwa jądrowego systemów, elementów konstrukcji i wyposażenia. Kwestia istotności w tym wypadku jest kluczowa, gdyż warunkuje ona w kolejnych aktach wykonawczych [4] do ustawy [1] dalsze działania i obowiązki, jakie spoczywają na kierowniku jednostki organizacyjnej, zawężając ich zakres do systemów, elementów konstrukcji i wyposażenia, które zostały objęte klasyfikacją bezpieczeństwa.

Zakres klasyfikacji bezpieczeństwa

Polskie prawo [1] w niewielkim zakresie precyzuje wymogi co do zawartości klasyfikacji bezpieczeństwa, skupiając się

na tym, aby przy określaniu klasy bezpieczeństwa zostało uwzględnione:

- jakie funkcje bezpieczeństwa są zapewniane bądź częściowo realizowane przez klasyfikowany system lub element konstrukcji lub wyposażenia obiektu jądrowego;
- bezpośredni wpływ na ciągłość realizacji funkcji bezpieczeństwa w przypadku uszkodzenia klasyfikowanego systemu lub elementu konstrukcji lub wyposażenia w trakcie normalnej eksploatacji obiektu jądrowego, a także w czasie awarii;
- możliwe wystąpienie w wyniku uszkodzenia klasyfikowanego systemu lub elementu konstrukcji lub wyposażenia postulowanego zdarzenia inicjującego mogącego doprowadzić do zagrożenia bezpieczeństwa jądrowego;
- prawdopodobieństwo, że klasyfikowany system lub element konstrukcji lub wyposażenia będzie niezbędny do wykonania wymaganej funkcji bezpieczeństwa¹.

Ponadto wg ustawy dokumentacja powinna zawierać w szczególności:

- wykaz systemów oraz elementów konstrukcji i wyposażenia, składających się na obiekt jądrowy;
- przyporządkowanie systemów i elementów konstrukcji oraz wyposażenia obiektu jądrowego do poszczególnych klas bezpieczeństwa;
- dokumentację techniczną przedstawiającą fizyczne położenie systemów oraz elementów konstrukcji i wyposażenia w obrębie obiektu jądrowego².

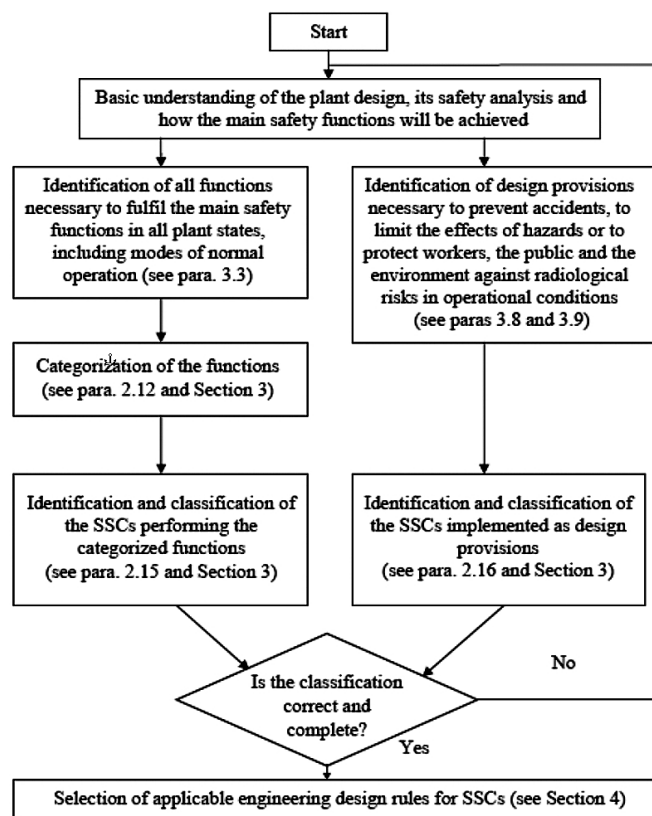
Jak można zauważyć, wyżej wymienione wymagania, chociaż istotne z punktu widzenia zawartości klasyfikacji bezpieczeństwa, nie są w stanie określić, w jaki sposób dokument ten ma wyglądać, ile klas powinno być itp. Oczywiście z racji rangi dokumentu ustawa nie jest miejscem, aby tego typu wskazówki były zamieszczone, takie szczegóły mogłyby być zawarte w odpowiednim rozporządzeniu, lecz w tym wypadku ustawodawca nie określił takiego warunku. Dlatego też należy się posilkować standardami międzynarodowymi w tym zakresie. Najbardziej rozpowszechniony jest dokument IAEA [5], który opisuje, co ma zawierać klasyfikacja bezpieczeństwa oraz jakie kroki należy wykonać, aby móc ją przeprowadzić. Znajdujemy tam w miarę przejrzyste ułożony i usystematyzowany opis procesu przeprowadzania klasyfikacji. Jak sam tytuł wskazuje, poradnik jest dedykowany dla elektrowni jądrowych, jednak, jak sami autorzy wskazują, może być także użyty do innych obiektów jądrowych, jak np. reaktorów badawczych. W takim przypadku należy zastosować stopniowe podejście (ang. *graded approach*), gdyż tak ze względu na skalę, jak i rozmiar zagrożenia w porównaniu do elektrowni jądrowej rygorystyczne wprowadzenie wszystkich wymogów byłoby niecelowe. Niemniej jednak metodyka, a także sposób postępowania przy realizacji klasyfikacji są jak najbardziej możliwe do wykorzystania.

Przeprowadzenie klasyfikacji bezpieczeństwa

Przeprowadzenie klasyfikacji bezpieczeństwa wg IAEA SSG-30 można podzielić na następujące etapy:

- identyfikacja funkcji bezpieczeństwa;
- kategoryzacja funkcji bezpieczeństwa;
- identyfikacja systemów oraz elementów konstrukcji i wyposażenia;
- klasyfikacja systemów oraz elementów konstrukcji i wyposażenia.

Na tych czterech etapach oparty jest cały proces związany z przeprowadzeniem klasyfikacji bezpieczeństwa. Proces ten wymaga przede wszystkim gruntownej wiedzy na temat obiektu jądrowego, jego założeń projektowych, a w szczególności charakterystyki i przebiegu wydarzeń podczas postulowanych zdarzeń inicjujących od osób, które będą ten dokument przygotowywać. Do prawidłowej identyfikacji funkcji bezpieczeństwa potrzebujemy zidentyfikować wszystkie postulowane zdarzenia inicjujące, które będą prowadzić do występowania poszczególnych stanów obiektu, takich jak przewidywanych zdarzeń eksploatacyjnych, awarii projektowych czy rozszerzonych warunków projektowych. Następnie na podstawie analizy probabilistycznej należy określić prawdopodobieństwa wystąpienia postulowanych zdarzeń inicjujących. Wartość prawdopodobieństwa wraz z informacją na temat konsekwencji



Rys. 1. Opis procesu przeprowadzenia klasyfikacji [5].

¹ Art. 36j ust. 2 ustawy Prawo atomowe.

² Art. 36j ust. 3 ustawy Prawo atomowe.

wencji, jakie zaistniałyby, gdyby nie została wypełniona dana funkcja bezpieczeństwa, będzie podstawą do określenia kategorii tej funkcji bezpieczeństwa. Do tak skategoryzowanych funkcji bezpieczeństwa należy przypisać systemy i elementy konstrukcji oraz wyposażenia, które realizują wypełnienie danych funkcji. Warto zaznaczyć, że poszczególne systemy lub elementy konstrukcji oraz wyposażenia mogą być przypisane do więcej niż dwóch funkcji bezpieczeństwa. Na samym końcu dokonujemy klasyfikacji bezpieczeństwa. Zazwyczaj przyjmuje się trzy klasy bezpieczeństwa oraz klasę niejądrową (NJ). Liczba klas pokrywa się z liczbą kategorii, jakie zostały przypisane funkcjom bezpieczeństwa. Wartością wyjściową w tym procesie jest kategoria funkcji bezpieczeństwa, do której przypisany jest system lub element konstrukcji oraz wyposażenia, a następnie rozważamy szereg czynników, które mogą podwyższyć bądź też obniżyć klasę bezpieczeństwa analizowanego systemu, elementu konstrukcji lub wyposażenia.

Jak widać na załączonym schemacie, równolegle można prowadzić proces klasyfikacji bezpieczeństwa oparty na założeniach projektowych, jakie muszą być spełnione w celu uniknięcia awarii i ograniczenia negatywnych skutków radiologicznych. Rezultaty obydwu analiz na samym końcu powinny dać ten sam efekt. Jeśli są rozbieżności, należy powrócić do założeń i sprawdzić raz jeszcze poszczególne etapy w poszukiwaniu rozwiązania, które ustali jednakowy rezultat.

Podsumowanie

Klasyfikacja bezpieczeństwa jest jednym z najważniejszych dokumentów, jakie powstają na etapie projektu obiektu

jądrowego i są rozwijane podczas kolejnych etapów budowy, rozruchów i eksploatacji. Jego właściwe wykonanie pozwala operatorowi na identyfikację funkcji bezpieczeństwa i realizujących je systemów, elementów konstrukcji oraz wyposażenia, które są kluczowe z punktu widzenia bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej. Taka wiedza pozwala operatorowi i dozorowi jądrowemu na skuteczne zastosowanie stopniowego podejścia przy dokonywaniu testów, przeglądów oraz planowaniu i przeprowadzaniu kontroli dozorowych.

Notka o autorze

Marek Jastrzębski – Naczelnik Wydziału Kontroli Obiektów Jądrowych i Nieprolifracji w Departamencie Nadzoru i Kontroli PAA, inspektor dozoru jądrowego II stopnia.

Literatura

1. Ustawa z dnia 29 listopada 2000 Prawo atomowe – tekst jednolity (Dz.U. z 2018 r. poz. 792).
2. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 31 sierpnia 2012 r. w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania analiz bezpieczeństwa przeprowadzanych przed wystąpieniem z wnioskiem o wydanie zezwolenia na budowę obiektu jądrowego, oraz zakresu wstępnego raportu bezpieczeństwa dla obiektu jądrowego (Dz.U. z 2012 r. poz. 1043).
3. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 czerwca 2015 r. w sprawie dokumentów wymaganych przy składaniu wniosku o wydanie zezwolenia na wykonywanie działalności związanej z narażeniem na działanie promieniowania jonizującego albo przy zgłoszeniu wykonywania tej działalności (Dz.U. z 2015 r. poz. 1355).
4. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 11 lutego 2013 r. w sprawie wymagań dotyczących rozruchu i eksploatacji obiektów jądrowych (Dz.U. z 2013 r. poz. 281).
5. IAEA Safety Standards, SSG-30 – *Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants*, Vienna 2014.

Zintegrowane analizy awarii ciężkich na przykładzie eksperymentu Phebus FPT-1 z wykorzystaniem kodu obliczeniowego MELCOR 2.2 – Część 2: Symulacje

Piotr Darnowski, Mateusz Włostowski
Politechnika Warszawska, Państwowa Agencja Atomistyki

Wstęp

Wymagania polskiego prawa odnoszące się do analiz bezpieczeństwa ciężkich awarii reaktorów energetycznych stanowią, że prowadzi się je, stosując założenia, dane, metody i kryteria decyzyjne oparte na najlepszym oszacowaniu. Stosowanie metod najlepszego oszacowania wymaga oceny poziomu niepewności używanych metod analitycznych i modeli matematycznych, a szczególnie kodów obliczeniowych. Jednym z najlepszych sposobów na poznanie niepewności modelowania używanego kodu obliczeniowego są symulacje instalacji eksperymentalnych dla zjawisk występujących podczas ciężkich awarii. Przykładem takiego eksperymentu jest instalacja Phebus i przeprowadzone w niej doświadczenie FPT-1. W niniejszym artykule opisano wyniki analizy testu Phebus FPT-1, wykorzystując kod obliczeniowy MELCOR 2.2.9541. Wybrane wyniki symulacji porównano z danymi eksperymentalnymi z raportu ISP-46 [3]. Artykuł ten stanowi drugą część cyklu dwóch prac. W pierwszej pracy opisano instalację, model oraz kwalifikację stanu ustalonego i była opublikowana w numerze 1-2(115)2019 Biuletynu.

Wyniki obliczeń eksperymentu

Temperatury w rdzeniu

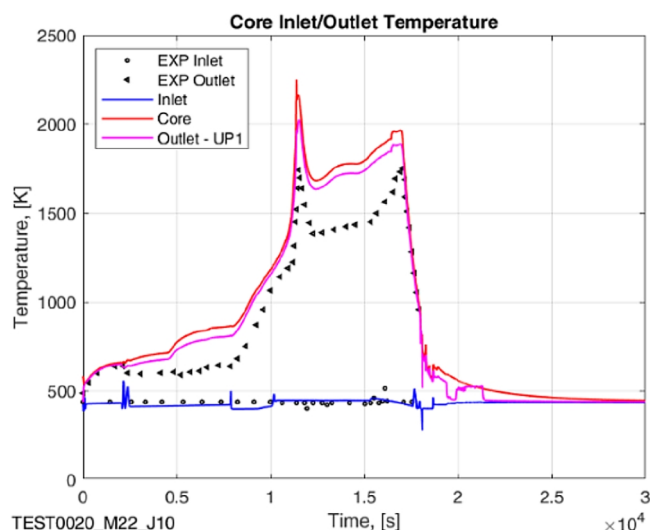
Na rysunku 1 przedstawiono zmiany temperatur gazów na wlocie i wylocie z rdzenia podczas testu. Zaobserwować można dużą zgodność temperatury na wejściu do rdzenia podczas całego badanego przedziału czasu. Dla kodu MELCOR podano temperaturę w objętości kontrolnej

rdzenia (linia czerwona) i temperaturę w objętości nad rdzeniem. Parametry pary na wlocie są warunkiem brzegowym symulacji, więc taki wynik nie jest zaskoczeniem.

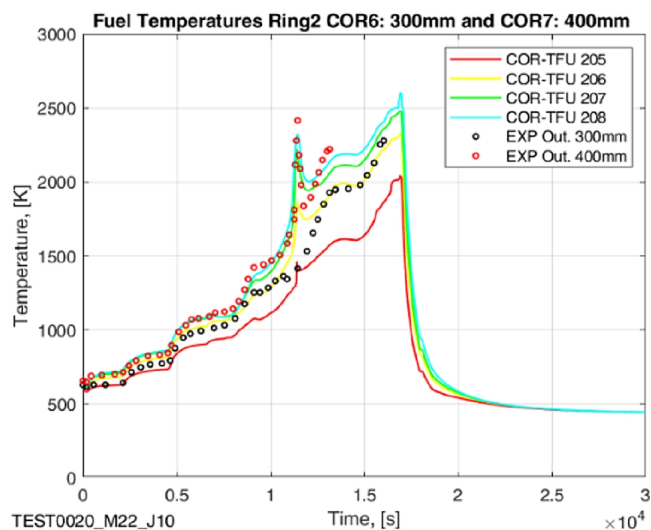
Na początku eksperymentu widoczna jest duża zgodność temperatury wylotowej. W dalszych etapach eksperymentu zaobserwowano przeszacowanie temperatury gazów opuszczających rdzeń. Dla zastosowanej prostej nodalizacji cieplno-przepływowej rdzenia nie jest możliwe dokładne odtworzenie temperatury. Jest tak z uwagi na to, że wyniki eksperymentalne odpowiadają jednej lokalizacji (termopary). Wyniki dla kodu są uśrednieniem po całej objętości kontrolnej, w której występują znaczące gradienty temperatur. Nie mniej istotny jest fakt, że kod MELCOR zwykle przeszacowuje temperatury gazów wylotowych z rdzenia. Porównując otrzymane wyniki z wynikami innych instytucji biorących udział w ISP-46 (rys. 2), nie zaobserwowano znaczącej różnicy. Warto zauważyć, że dla wielu uczestników zaobserwowano duże przeszacowanie temperatur, dochodzące do 500K.

Na rysunku 3 przedstawiono temperatury paliwa otrzymane w obliczeniach dla zewnętrznego pierścienia rdzenia (Pierścień 2). Przedstawiono wyniki dla poziomów 5, 6, 7 oraz 8. Poziomy 6 oraz 7 odpowiadają lokalizacji termopar. Otrzymane wyniki porównano z odczytami termopar w świeżym paliwie znajdującym się w zewnętrznej części rdzenia na poziomie 300 mm i 400 mm.

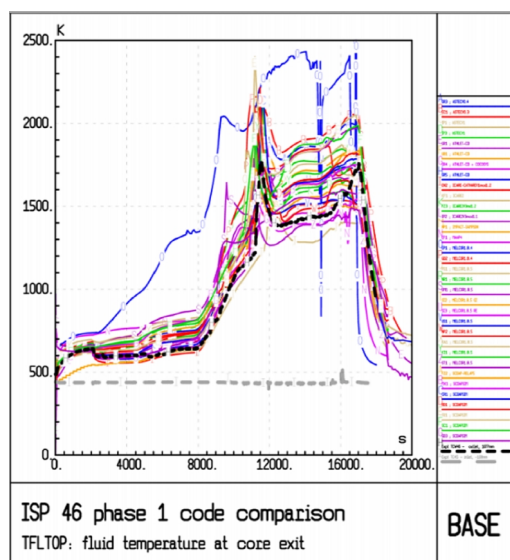
Wyniki pokazują zadowalającą zgodność z eksperymentem. Różnice nie przekraczają 100K przez pierwsze 10 000 sekund eksperymentu. Dla momentu, w którym pojawia się silne utlenianie i pik temperatury, zaobserwować można niedoszacowanie względem termopar dla lokalizacji 400 mm. Szczególnie interesujące jest to, że kod



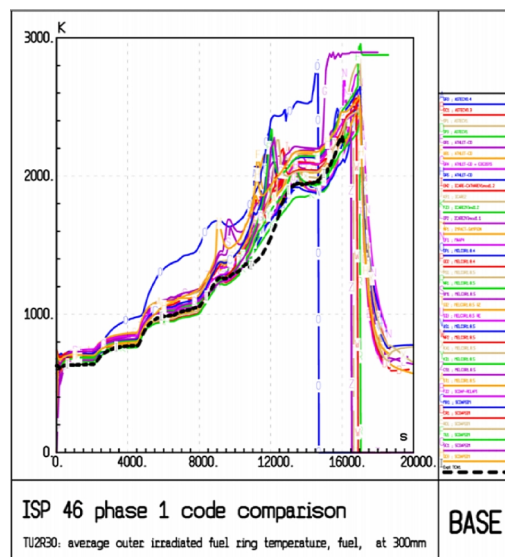
Rys. 1. Temperatura pary wodnej na wlocie i wylocie z rdzenia. Czarne punkty – dane eksperymentalne.



Rys. 3. Temperatury paliwa jądrowego dla zewnętrznego pierścienia modelu rdzenia. Punkty przedstawiają (EXP Out) dane eksperymentalne dla poziomów 300 mm (czerwone) i 400 mm (czarne). COR-TFU XXX jest temperaturą paliwa w rdzeniu, gdzie X to współrzędna promieniowa rdzenia, a YY to poziom osiowy rdzenia.



Rys. 2. Temperatury na wlocie i wylocie z rdzenia obliczone przez uczestników ISP-46. Wyniki porównane z danymi eksperymentalnymi – linie kreskowane szara i czarna [3].



Rys. 4. Temperatury paliwa jądrowego dla zewnętrznego pierścienia modelu rdzenia. Wyniki otrzymane w ISP-46. Linia kreskowana przedstawia dane eksperymentalne dla poziomu 300 mm [3].

MELCOR przewiduje pik temperatury dla poziomu 400 mm mniejszy o ok. 200K od pik eksperymentalnego. Przeciwnie dla poziomu 300 mm MELCOR przewiduje niewielki pik temperatury, natomiast eksperyment nie wskazuje pojawienia się tego pik, pojawia się różnica temperatury ok. 400K. Przyczyną tego jest najprawdopodobniej lokalny charakter utleniania cyrkonu i trudności z dokładnym odtworzeniem tego zjawiska. Warto zauważyć, że niższy poziom 5 modelu PW, odpowiadający 200 mm, nie przewiduje pojawienia się pik temperatury. MELCOR w sposób przybliżony wskazuje lokalizację pik.

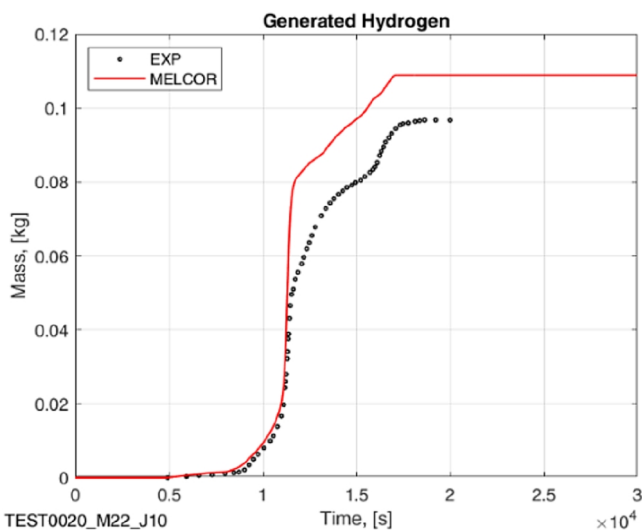
Porównanie wyników eksperymentalnych z ISP-46 przedstawione jest na rysunku 4. Należy stwierdzić, że wyniki otrzymane kodem MELCOR 2.2 nie odbiegają od wyników otrzymanych przez uczestników ISP-46.

Większość uczestników przewidywało pojawienie się pik temperatury dla poziomu 300 mm.

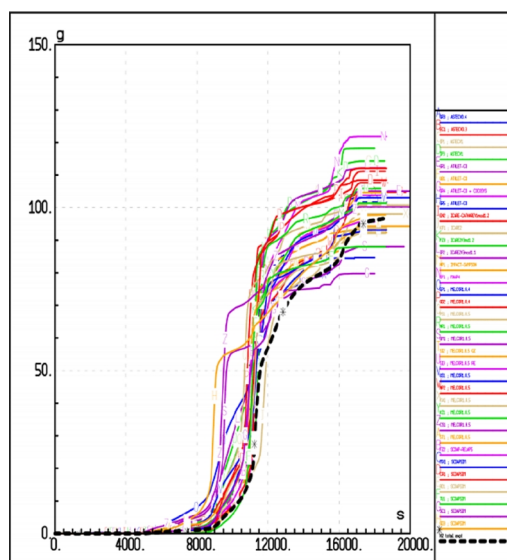
Produkcja wodoru

Na rysunku 5 przedstawiono całkowitą masę wodoru wytworzoną w rdzeniu w funkcji czasu. W eksperymencie oszacowano, że finalnie powstało 96 g wodoru z niepewnością $\pm 10\%$. W ramach obliczeń w tej pracy oszacowano, że produkowane jest 109,75 g wodoru. Jest to wartość bliska górnej granicy oszacowania.

Dynamika produkcji wodoru jest zgodna z eksperymentem do momentu, w którym powstało ~ 50 g wodoru. W późniejszym okresie tempo produkcji wodoru nie ustaje, w przeciwieństwie do eksperymentu. Jest tak naj-



Rys. 5. Masa wodoru wyprodukowanego w rdzeniu. Dane eksperymentalne – czarne punkty.



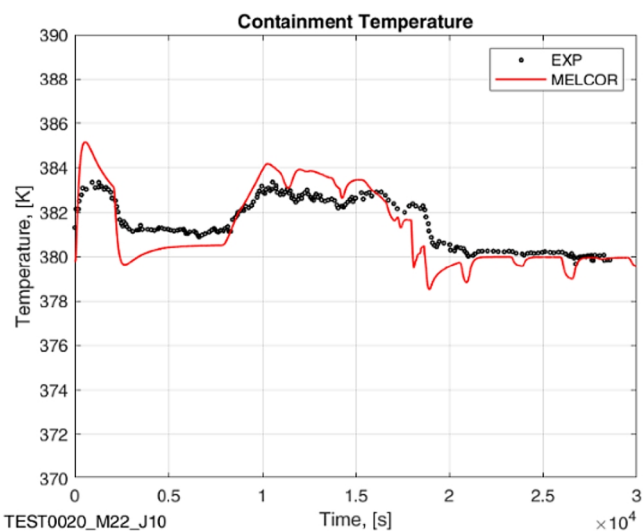
Rys. 6. Masa wyprodukowanego wodoru przez uczestników ISP-46. Czarna linia – dane eksperymentalne [3].

prawdopodobniej, ponieważ w wyniku degradacji rdzenia zmniejsza się szybkość produkcji wodoru. Powstają blokady przepływu w rdzeniu i zmniejsza się dostępna powierzchnia utleniania. Przepływająca para wodna nie reaguje z cyrkonem w takim tempie, jak w modelu MELCOR. W przypadku kodu MELCOR zniszczenie rdzenia jest opóźnione i para ma odpowiednią ilość czasu na wytworzenie większej ilości wodoru. Nie sposób również wykluczyć wpływu zastosowanych modeli utleniania. Problem ten jest tematem badań prowadzonych w ITC PW. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki produkcji wodoru otrzymane przez innych uczestników ISP-46. Warto zauważyć, że większość obliczeń przewiduje produkcję wodoru większą niż eksperymentalna.

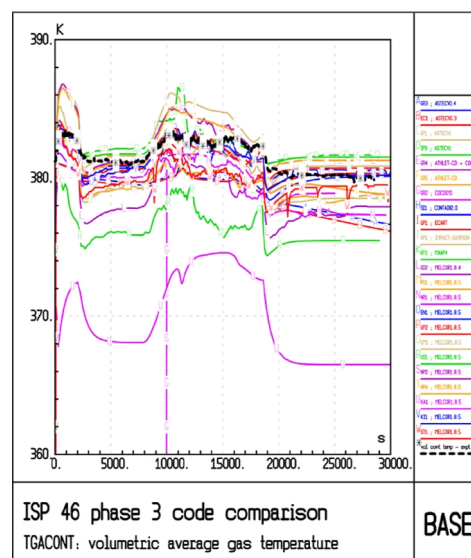
Warunki termodynamiczne w obudowie bezpieczeństwa

Na rysunku 7 przedstawiono średnią temperaturę gazu w objętości kontrolnej obudowy bezpieczeństwa. Kod obliczeniowy MELCOR w sposób zadowalający przewiduje temperaturę obudowy z odchyleniami nie większymi niż 6K. Wynika to bezpośrednio z faktu, że obudowa ma relatywnie dużą objętość 10 m³ i na całej powierzchni jest izotermiczna. Skutecznie tłumi efekt od podwyższonej temperatury gazu dostającego się do obudowy z symulowanego obiegu pierwotnego. Szczególnie widoczne jest to dla przedziału czasu podczas utleniania, powyżej 10 000 s. Temperatura w tym przedziale czasu jest podwyższona o ok. 2K.

Temperatury w obudowie bezpieczeństwa otrzymane w ramach ISP-46 pokazano na rysunku 8. Należy stwierdzić, że wyniki otrzymane w tej pracy nie odbiegają od wyników z ISP-46.

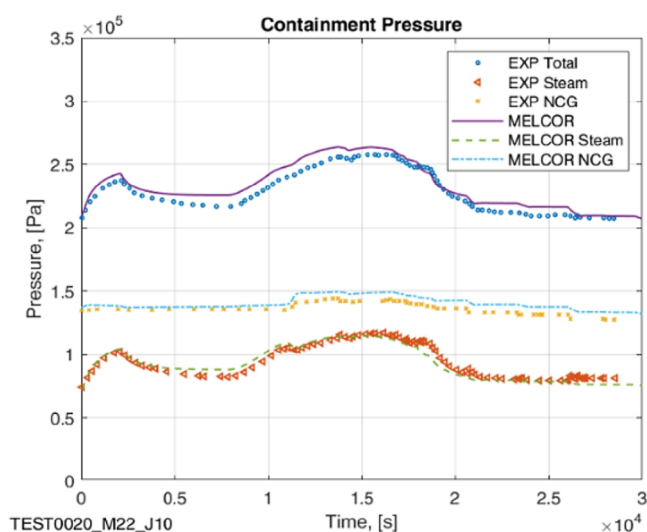


Rys. 7. Temperatura atmosfery obudowy bezpieczeństwa. Wyniki eksperymentalne – czarne punkty.



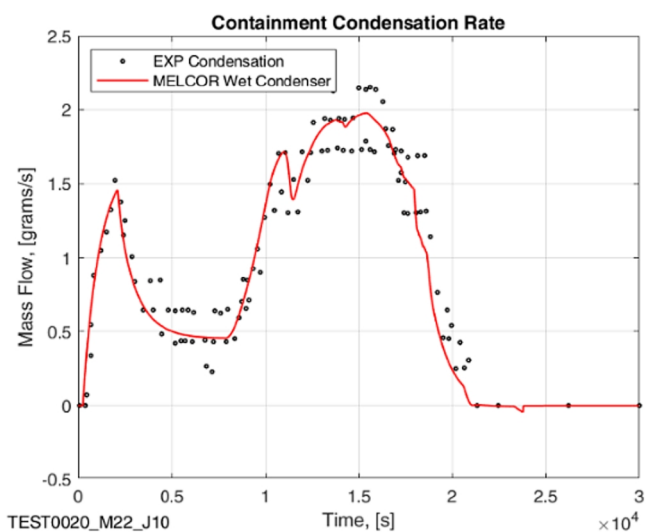
Rys. 8. Średnia temperatura w obudowie bezpieczeństwa ISP-46. Eksperymentalne dane – czarna linia [3].

Zmiany ciśnienia w obudowie bezpieczeństwa w czasie oraz ciśnień cząstkowych pary wodnej i gazów niekondensujących przedstawiono na rysunku 9. Można zaobserwować dobrą zgodność ciśnienia z niewielkimi odchyleniami. Przeszacowanie ciśnienia przed intensywnym utlenianiem wynika z większej ilości pary wodnej trafiającej do obudowy. Podobnie zwiększona wartość ciśnienia podczas i po fazie utleniania wynika ze zwiększonej produkcji wodoru względem wyników otrzymanych eksperymentalnie. Dodatkowy czynnik wpływający na otrzymane wyniki to pobór próbek gazów. Jak wspomniano w poprzednim artykule, przepływ ten jest dość znaczący i odgrywa rolę w predykcji ciśnienia. Porównując wyniki otrzymane przez PW z rezultatami ISP-46, można wyniki MELCOR 2.2 ocenić jako satysfakcjonujące (rys. 10).

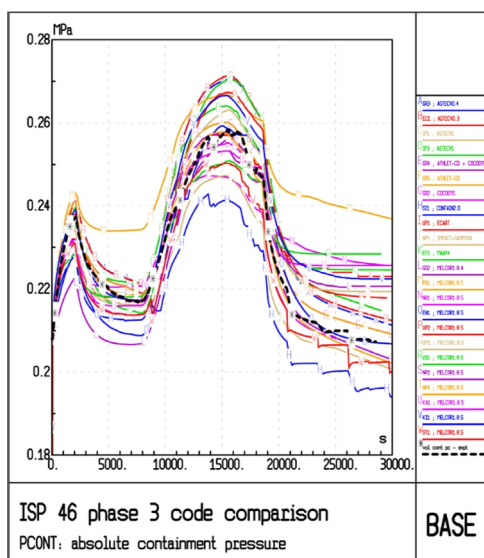


Rys. 9. Ciśnienie w obudowie – linia fioletowa. Ciśnienie cząstkowe gazów niekondensujących N₂, O₂ oraz H₂ – linia niebieska. Ciśnienie cząstkowe pary wodnej – linia zielona. Wyniki eksperymentalne lub oszacowania z raportu ISP-46 [3] – punkty.

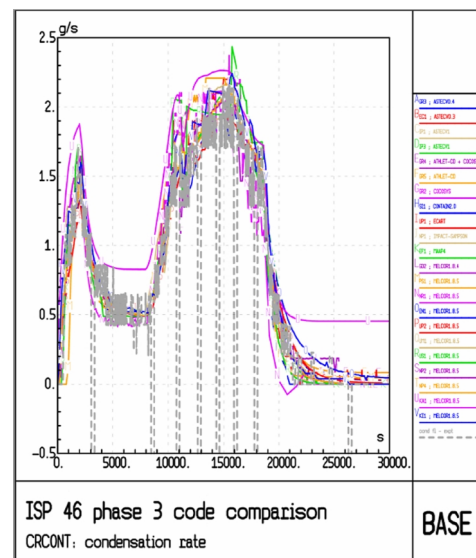
W obudowie bezpieczeństwa kondensacja pary wodnej zachodziła głównie na kondensatorze mokrym. W fazie <30 000 s jest to dominujący mechanizm kondensacji. Wszystkie ściany obudowy i kondensator suchy były utrzymywane w temperaturach uniemożliwiających kondensację. Na rysunku 11 porównano wyniki eksperymentu i wyniki obliczeń modelem PW, pokazując bardzo dobrą zgodność wyników kodu MELCOR z eksperymentem. Na rysunku 12 przedstawiono wyniki otrzymane w ramach ISP-46, gdzie niemal wszyscy uczestnicy otrzymali rezultaty zgodne z eksperymentem.



Rys. 11. Tempo kondensacji pary wodnej na mokrym kondensatorze w obudowie bezpieczeństwa. Wyniki eksperymentalne – czarne punkty.



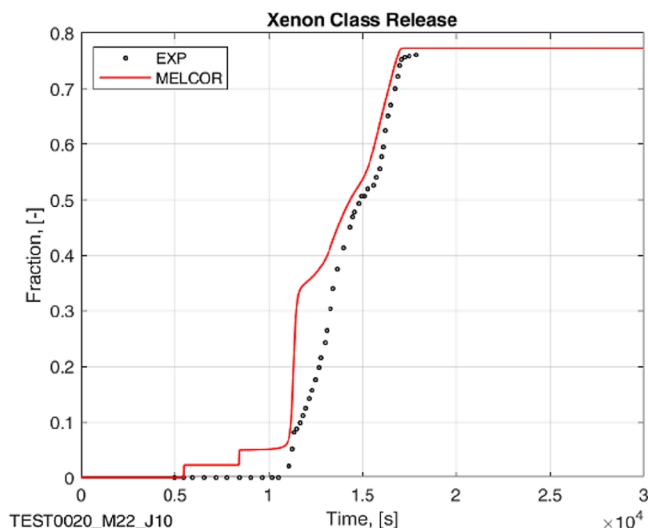
Rys. 10. Ciśnienie w obudowie ISP-46. Eksperymentalne dane – czarna linia [3].



Rys. 12. Tempo kondensacji w obudowie bezpieczeństwa ISP-46. Wyniki eksperymentalne – szara linia kreskowana.

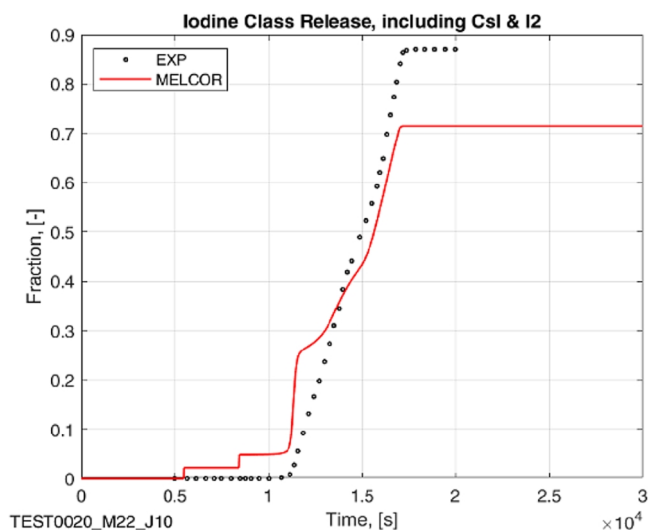
Uwolnienia substancji promieniotwórczych

Na rysunku 13 porównano uwolnienia klasy¹ gazów szlachetnych (XE) z wynikami eksperymentalnymi. Zaobserwować można bardzo dobrą zgodność ilości uwolnionego materiału promieniotwórczego. Historia uwalniania jest nieznacznie zmieniona ze względu na inny przebieg degradacji rdzenia oraz uwolnienia ze szczeliny gazowej. Uwaga ta odnosi się również do wszystkich innych przypadków analizowanych uwolnień.



Rys. 13. Uwolnienia klasy XE ksenonu z rdzenia.

Na rysunku 14 porównano uwolnienia jodu dla klasy jodu (I2) i klasy jodku cezu (CSI). Zaobserwować można relatywnie dobrą zgodność ilości uwolnionego materiału promieniotwórczego z różnicą względną ok. 15%. W obliczeniach uwzględniono zarówno jod molekularny cząsteczkowy, jak i jod zawarty w jodku cezu. Warto wspomnieć, że wykonano też obliczenia dla modelu CORSOR-M i w tym wypadku otrzymano bardzo dobrą zgodność z ekspery-

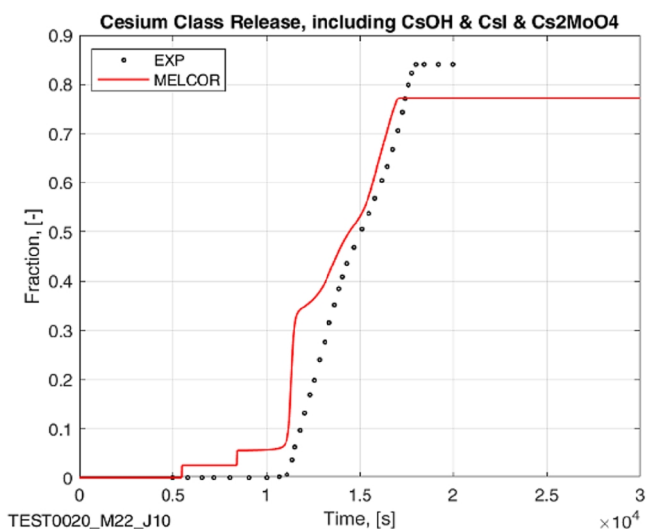


Rys. 14. Uwolnienia z rdzenia klasy jodu dla klas jodu molekularnego I2 oraz jodku cezu CSI.

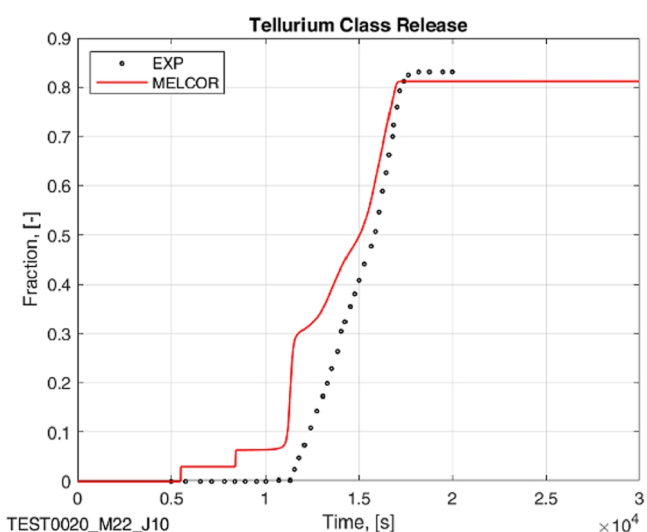
mentem (różnica <2%). Sugeruje to, że obliczenia powinny być prowadzone dla różnych modeli uwolnień, a różnice nie są zanedbywalne. W tej pracy przedstawiono wyniki tylko dla modelu CORSOR-Booth z głębokim stopniem wypalenia paliwa.

Na rysunku 15 porównano uwolnienia klas zawierających cez, w tym klasę 16 CSI, klasę 17 CSM oraz klasę 2 CS. Zastosowanie tych klas pozwoliło oszacować uwolnienia cezu w postaci wodorotlenku cezu, molibdenianu cezu oraz cezu zawartego w jodku cezu. Zaobserwować można dobrą zgodność co do ilości uwolnionego materiału promieniotwórczego. Model PW zaniża uwolnienia o ok. 5%.

Na rysunku 16 porównano uwolnienia klasy telluru (TE). Zaobserwować można bardzo dobrą zgodność ilości uwolnionego materiału promieniotwórczego z różnicą wynoszącą poniżej 5%.



Rys. 15. Uwolnienia z rdzenia klasy cezu z klasy 2 CS oraz klasy 16 jodku cezu CSI.

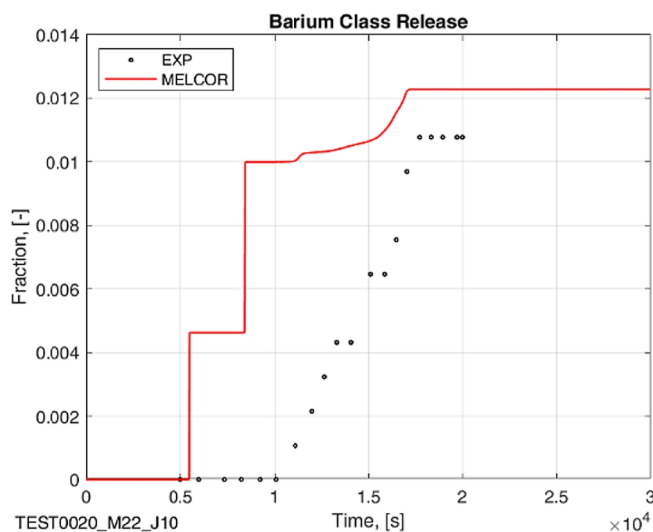


Rys. 16. Uwolnienia klasy telluru z rdzenia.

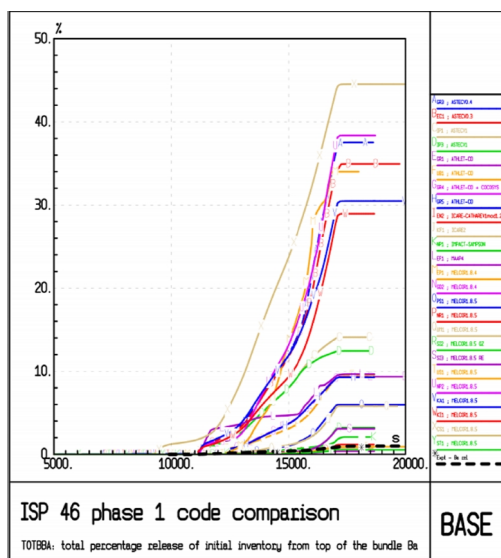
¹ Klasy opisano w poprzednim artykule na ten temat zamieszczonym w numerze 1–2/2019 Biuletynu.

Na rysunku 17 porównano uwolnienia klasy baru (BA). Kod MELCOR dobrze przewiduje uwolnienia tej klasy z błędem ok. 20%. Należy podkreślić, że obliczenia wykonywane były z gazem w szczelinie pod koszulką elementów paliwowych i ten fakt może mieć istotny efekt, ponieważ pod koszulką było ok. 1% całkowitej masy baru. Porównując otrzymane wyniki z ISP-46 (rys. 18), należy zauważyć, że niektórzy uczestnicy benchmarku oszacowali uwolnienia do dwóch rzędów wielkości większe niż eksperymentalne. Maksymalne uwolnienia sięgały nawet 45% początkowej frakcji rdzenia.

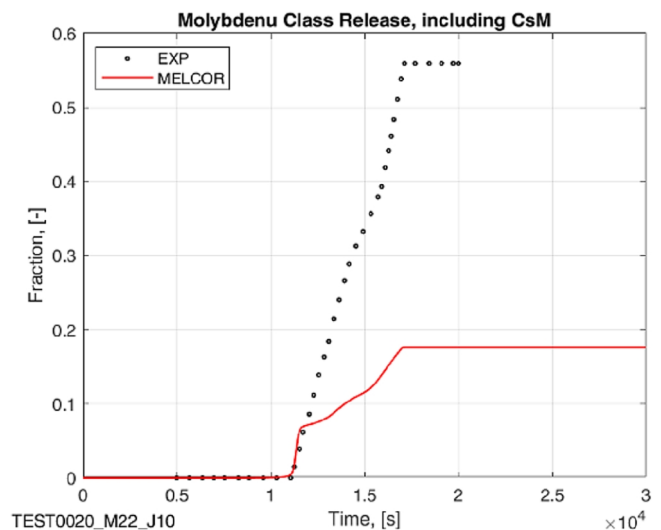
Na rysunku 19 porównano uwolnienia klasy molibdenu (MO) dla kodu MELCOR z pomiarami. Eksperyment przewiduje uwolnienia ok. 55% początkowej frakcji. Zaobserwować można, że model zaniża uwolnienia tej klasy trzy razy. Jest to dość duża różnica, która sugeruje, że w toku dalszych badań należy zwrócić większą uwagę na modelowanie uwolnienia tej klasy. W zastosowanym



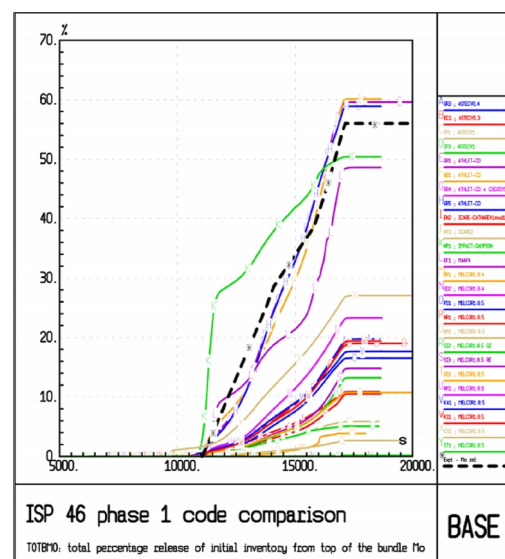
Rys. 17. Uwolnienia klasy baru z rdzenia.



Rys. 18. Frakcja początkowego inwentarza baru uwolniona z rdzenia [3].



Rys. 19. Uwolnienia klasy molibdenu z rdzenia. Porównując otrzymane wyniki z wynikami dostępnymi w ISP-46 (rys. 20), należy ocenić, że zbudowany model MELCOR 2.2 PW dostarcza wyników analogicznych do większości uczestników ISP-46.

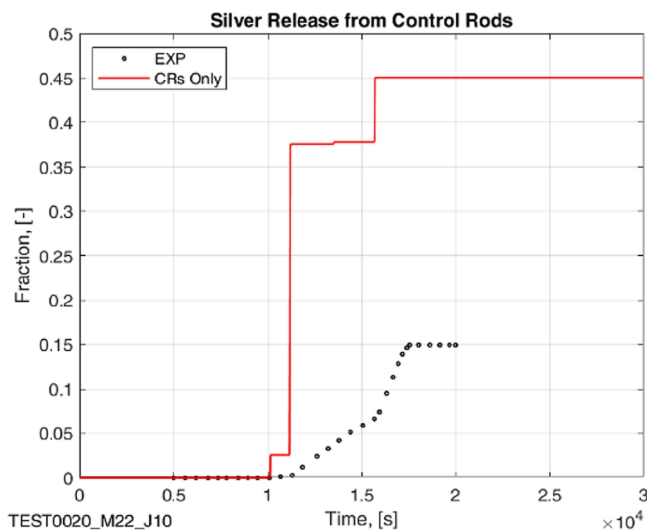


Rys. 20. Frakcja początkowego inwentarza molibdenu uwolniona z rdzenia [3].

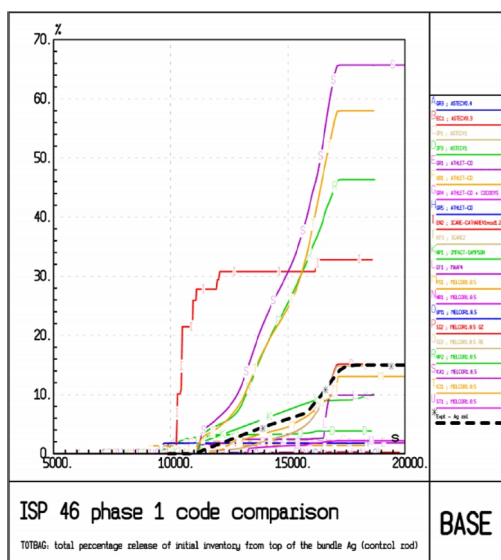
modelu większość molibdenu uwolniło się w postaci molibdenianu cezu (Cs_2MoO_4 , klasa CSM). Jest tak, ponieważ klasa CSM ma dużo większe ciśnienie par niż klasa molibdenu MO w kodzie MELCOR. Pomijając stosowanie klasy CSM, uwolnienia molibdenu byłyby wielokrotnie niższe. Przeprowadzone dodatkowe obliczenia pokazały, że nawet jakby cały dostępny cez połączył się z molibdenem, to maksymalna masa uwolnionego molibdenu nie przekroczyłaby 30% frakcji początkowej. Problem ten wymaga dalszych badań.

Uwolnienia materiałów konstrukcyjnych

Na rysunku 21 porównano uwolnienia srebra (klasa AG-CR) z prętów sterujących. Model PW zawyża prawie trzykrotnie ilość uwolnionego materiału (15% eksperyment i ok. 45% obliczenia). Historia uwalniania jest inna.



Rys. 21. Uwolnienia klasy (AG-CR) z rdzenia.



Rys. 22. Frakcja początkowego inwentarza srebra uwolniona z rdzenia [3].

W modelu większość materiału została uwolniona w jednym skokowym zdarzeniu, które najpewniej odpowiada chwili zniszczenia pręta sterującego. W eksperymencie uwalnianie następuje stopniowo.

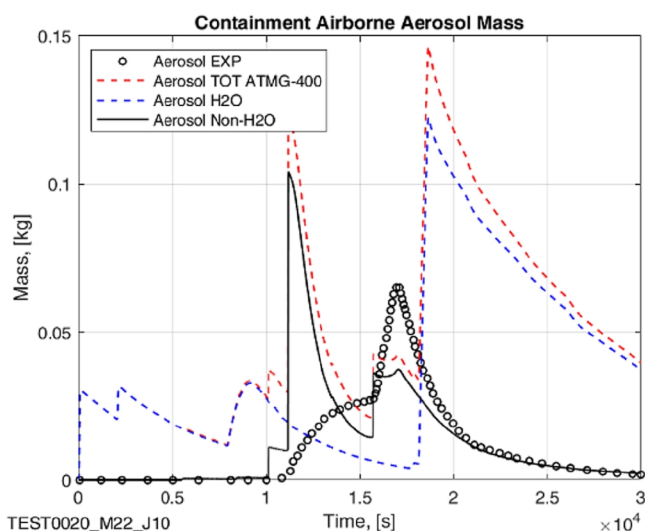
Warto zauważyć, że wielu uczestników ISP-46 bardzo mocno zaniżyło uwolnienia srebra. Główną przyczyną tego stanu rzeczy jest fakt, że w wielu przypadkach nie wykorzystano modelu uwolnienia materiałów prętów regulacyjnych i uwolnienia srebra są znikome (rys. 22). Należy podkreślić, że w licznych przeprowadzonych obliczeniach parametrycznych zaobserwowano, że ilość uwalnianego srebra jest mocno skorelowana z temperaturą zniszczenia struktur niepodtrzymujących (TNS) w pierwszym pierścieniu rdzenia. Struktury te symulują pręty regulacyjne. Zmiana w temperaturze zniszczenia prętów, która jest daną wejściową do modelu, prowadzi do skrajnych wyników. W obliczeniach zaobserwowano od 15% do 50% uwolnienia całkowitego srebra z prętów regulacyjnych. Niektóre przypadki prowadziły do więcej niż jednego

skoku wartości uwolnień. Wpływa to znacząco na ilość masy aerozoli w obudowie. W obliczeniach zastosowano model uwalniania, który pozwala na parowanie zarówno z ociekającego AIC, jak i z konglomeratu. Warto wspomnieć również, że wyniki dla innych składników stopu AIC są podobne, jednakże srebro jest najistotniejszym składnikiem.

Aerozole w atmosferze obudowy bezpieczeństwa

Na rysunku 23 przedstawiono całkowitą masę aerozolu w zbiorniku obudowy bezpieczeństwa z podziałem na aerozole wody oraz innych substancji. W obliczeniach modelem MELCOR PW wykorzystano model higroskopii w pakiecie RN. Wybór ten wpływa na ilość aerozoli przewidywanych przez kod.

Analizując rysunek 23, należy stwierdzić, że maksimum uwolnienia aerozoli odpowiada ok. 11 000 sekund. Wynika to z faktu, że w tym momencie następuje „punktowe” zniszczenie prętów regulacyjnych (rys. 21) i jest generowana duża ilość aerozoli z materiałów konstrukcyjnych. Pręty regulacyjne modelowane są jako struktury niepodtrzymujące (NS), a ich mechanizm zniszczenia opiera się na temperaturze materiału. Dla modelu PW zniszczenie następuje, gdy temperatura struktur niepodtrzymujących przekroczy 1623K. Jest to temperatura zniszczenia prętów regulacyjnych zaobserwowana w eksperymencie FPT-1 [10]. Emitowane są szczególnie duże ilości srebra, ponieważ tego pierwiastka jest najwięcej (ponad 450 g). Przenosi się to bezpośrednio na bardzo duże stężenie aerozolu w obudowie. Porównując wyniki eksperymentalne i symulacje, można zaobserwować, że emisja aerozolu dla eksperymentu była stopniowa, co też potwierdzają dane eksperymentalne dla emisji srebra i innych materiałów konstrukcyjnych.



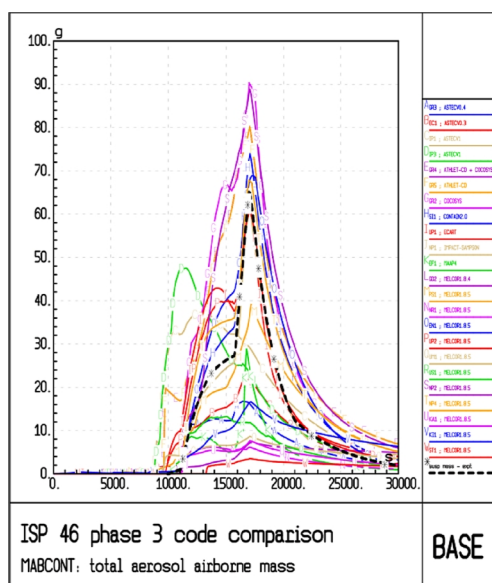
Rys. 23. Masa aerozoli w obudowie bezpieczeństwa. EXP – dane eksperymentalne. TOT ATMG-400 – suma mas wszystkich aerozoli. H₂O – aerozole wody. Non-H₂O – masa aerozoli bez aerozoli wody, w tym aerozole substancji promieniotwórczych oraz materiałów konstrukcyjnych.

Przeprowadzono dodatkowe obliczenia, które pokazują, że warunki zniszczenia prętów regulacyjnych mają duże znaczenie dla sposobu emisji radionuklidów z prętów regulacyjnych. Nie można też wykluczyć wpływu zastosowanych parametrów uwolnienia dla niestandardowych grup IN-CR, AG-CR oraz CD-CR. Zagadnienie to wymaga przeprowadzenia dalszych badań.

Należy zauważyć, że po osiągnięciu pików masy aerozolu następuje stopniowa depozycja. Zgodnie z raportem ISP-46 główny mechanizm osiadania to sedymentacja oraz dyfuzjoforeza. Dynamika osiadania aerozoli innych niż wodne jest zbliżona do obserwacji eksperymentalnych. Zgodnie z raportem ISP-46 jednym z najistotniejszych czynników jest ewolucja uwolnienia aerozoli z materiałów prętów regulacyjnych. Jest to w zgodzie z wynikami obliczeń kodem MELCOR przedstawionymi powyżej.

Na rysunku 24 przedstawiono wyniki uczestników ISP-46. Należy stwierdzić, że zastosowany model MELCOR zawyża uwolnienia aerozoli podczas pierwszej degradacji rdzenia i prętów sterujących. Przewidywana masa aerozolu innego niż woda jest zawyżona o kilkadziesiąt gramów względem eksperymentu. Takie ilości aerozolu otrzymało tylko dwóch innych uczestników. Zdecydowana większość obliczeń zaniżała ilość aerozolu.

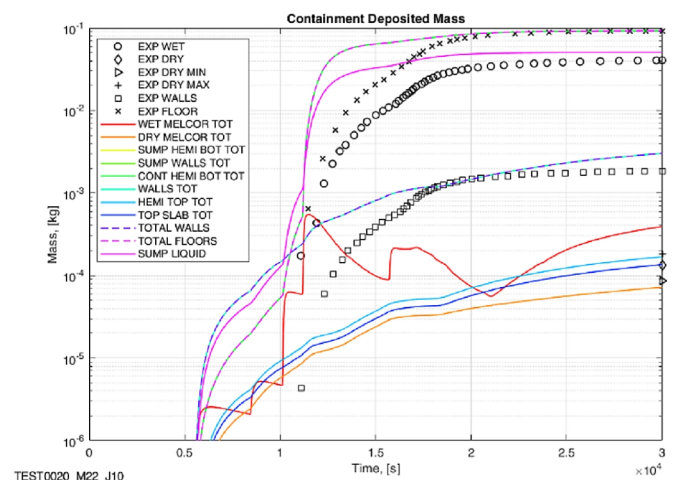
Warto jednak podkreślić, że otrzymane wyniki są satysfakcjonujące w zakresie przedstawionej pracy i praktyce obliczeń ciężkich awarii. Jest tak, szczególnie biorąc pod uwagę fakt, że substancje promieniotwórcze są transportowane z rdzenia, przez cały obieg chłodzenia reaktora, gdzie podlegają różnym procesom depozycji i usuwania. Oszacowanie masy aerozolu z otrzymaną dokładnością można uznać za akceptowalne. Należy jednak podkreślić, że prowadzone będą dalsze prace nad usprawnieniem modelowania uwolnień aerozoli.



Rys. 24. Całkowita masa aerozoli w obudowie bezpieczeństwa. Wyniki ISP-46 [3].

Masa aerozoli zdeponowana na kondensatorze suchym i mokrym oraz podłodze obudowy bezpieczeństwa

Na rysunku 25 przedstawiono w skali logarytmicznej masy zdeponowanych materiałów dla wszystkich powierzchni w obudowie oraz masę aerozolu w studzience. Można zaobserwować, że depozycja na ścianach zgadza się co do rzędu wielkości z eksperymentem. Podobny wniosek można wyciągnąć dla depozycji na podłodze obudowy. Wynik, który był niespodziewany, to znaczna rozbieżność dla masy osadzonej na kondensatorze mokrym. Efekt ten wynika z faktu, że kondensująca woda wymywa cząsteczki aerozoli z kondensatora mokrego.

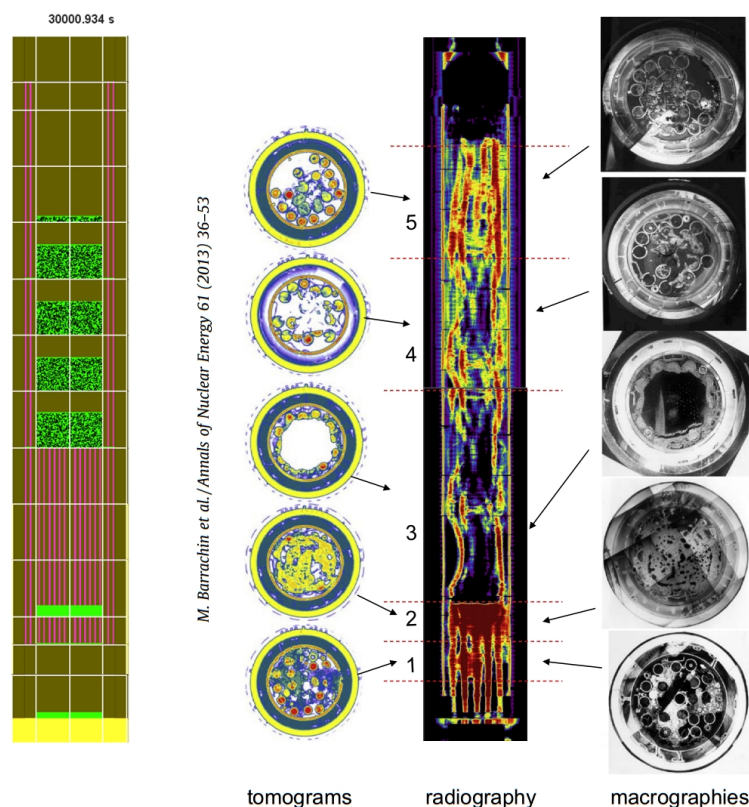


Rys. 25. Masa aerozoli znajdujących się w strukturach cieplnych obudowy. Skala logarytmiczna. EXP – dane eksperymentalne; EXP WET – kondensator mokry; EXP DRY – kondensator suchy, EXP DRY MIN – suchy kondensator minimalny wynik skrajny, EXP DRY MAX – suchy kondensator maksymalny wynik skrajny; EXP WALLS – depozycja na ścianach; EXP FLOOR – depozycja na podłodze. Wyniki kodu MELCOR: WET MELCOR TOT – całkowita depozycja na kondensatorze mokrym DRY MELCOR TOT – depozycja na kondensatorze suchym; SUMP HEMI BOT TOT – depozycja na dennicy studzienki, SUMP WALLS TOT – depozycja na ścianach studzienki, CONT HEMI BOT TOT – depozycja na półsferycznej podłodze zbiornika; WALLS TOT – depozycja na ścianach; HEMI TOP TOT – depozycja na półsferycznym suficie zbiornika; TOP SLAB TOT – depozycja na suficie. TOTAL FLOORS – suma depozycji na wszystkich powierzchniach typu FLOOR; TOTAL WALLS – depozycja na wszystkich powierzchniach typu WALL. SUMP LIQUID – masa aerozoli w studzience.

Stan końcowy rdzenia

Na rysunku 26 porównano stan rdzenia otrzymany eksperymentalnie w postaci grafik z różnych metod obrazowania oraz wizualizacje otrzymane z wykorzystaniem programu SNAP dla wyników kodu MELCOR.

Analizując obrazy kasety FPT-1, można zaobserwować, że zniszczona jest większość kasety, w tym szczególnie środkowy pierścień rdzenia. Zewnętrzny pierścień prętów został częściowo zachowany. Efekt ten jest przewidywany przez kod MELCOR. W obliczeniach MELCOR częściowo zachowane są elementy paliwowe dla poziomu 3, 4, 5



Rys. 26. Porównanie stanu rdzenia obliczonego przez MELCOR2.2 (lewa) oraz obrazów tomograficznych, radiografii i makrografii (prawa) [11].

i 6, gdzie szczyt poziomu 65 to wysokość 3250 mm nad spodem aktywnej części rdzenia. Wykorzystując ogólnodostępne programy graficzne, oszacowano, że szczyt stopionego basenu znajduje się na wysokości 210–230 mm. Wynik ten pozwala stwierdzić, że MELCOR przewiduje w sposób przybliżony stan zniszczonego rdzenia. Jednakże niezniszczona część rdzenia jest większa niż zaobserwowana eksperymentalnie.

Podsumowanie

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki symulacji najlepszego oszacowania dla testu zintegrowanego Phebus FPT-1. W obliczeniach wykorzystano kod obliczeniowy MELCOR 2.2 i rozwinięty przez PW model matematyczny. Przeprowadzono symulacje trzech faz eksperymentu FPT-1: fazy **degradacji**, fazy **obiegu chłodzenia** oraz fazy **obudowy**. Otrzymane wyniki dla parametrów cieplno-przepływowych rdzenia i obudowy oraz uwolnienia radionuklidów w większości przypadków są zbliżone z wynikami eksperymentalnymi oraz są porównywalne z wynikami ISP-46. Dla wielu przypadków otrzymano wyniki lepsze niż wielu uczestników ISP-46.

W pracy część wyników, szczególnie uwolnienia wodoru, molibdenu oraz aerozoli materiałów konstrukcyjnych, są tylko częściowo satysfakcjonujące, co wskazuje na potrzebę przeprowadzenia dalszych badań. Niemniej jednak można stwierdzić, że otrzymane wyniki są zgodne z danymi

eksperymentalnymi w zakresie typowych wyników zintegrowanych kodów obliczeniowych dla ciężkich awarii.

Podczas rozwoju modelu PW przetestowano wiele parametrów, np. temperatury zniszczenia prętów regulacyjnych, modele uwolnienia i inne. Zaobserwowano znaczący wpływ różnych parametrów szczególnie na uwolnienia radionuklidów. Prace te wyraźnie pokazały zjawisko propagacji nawet niewielkich zmian w modelach matematycznych. W pracach starano się stosować najlepsze praktyki wykorzystania kodu MELCOR, a gdy takie nie były dostępne, korzystano z literatury lub ustawień domyślnych kodu.

Podstawowym zaleceniem przy dalszych analizach ciężkich awarii jest prowadzenie co najmniej analiz parametrycznych. Zgodnie z aktualnymi trendami międzynarodowymi zalecane jest prowadzenie analiz wrażliwości i czułości (ang. *sensitivity and uncertainty*) dla przebiegu ciężkich awarii. Pojedyncze symulacje z wybranymi wartościami parametrów nie pozwalają w pełni ocenić potencjalnego przebiegu i skutków ciężkiej awarii, wykorzystując modelowanie matematyczne.

Notka o autorach

dr inż. Piotr Darnowski – adiunkt w Instytucie Techniki Ciepłej Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej.

mgr. inż. Mateusz Włostowski – starszy specjalista w Wydziale Analiz Obiektów Jądrowych i Technologii Reaktorowych, Departament Bezpieczeństwa Jądrowego i Programów Międzynarodowych Państwowej Agencji Atomistyki.

Literatura

1. Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania analiz bezpieczeństwa przeprowadzonych przed wystąpieniem z wnioskiem o wydanie zezwolenia na budowę obiektu jądrowego, oraz zakresu wstępnego raportu bezpieczeństwa dla obiektu jądrowego (Dz. U. z 2012 r. poz. 1043).
2. IRSN, *Nuclear Power Reactor Core Melt Accidents*, EDP Sciences, 2015.
3. B. Clement, T. Haste, *Thematic Network for a Phebus FPT-1 International Standard Problem – Comparison Report on International Standard Problem ISP-46*, 2003.
4. M. Leskovar, *Simulation of the Phebus FPT1 Experiment with MELCOR 1.8.5*, in: Int. Conf. Nucl. Energy New Eur. 2002, 2002: pp. 1–8.
5. SNL, *MELCOR 2.1 Computer Code Manual – Volume 3 – Code Assessment*, 2015.
6. SNL, NUREG/CR-7008: *MELCOR Best Practices as Applied in the State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) Project*, NUREG/CR-7008. (2014).
7. U.S. NRC, NUREG/CR-7155: *State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project – Uncertainty Analysis of the Unmitigated Long-Term Station Blackout of the Peach Bottom Atomic Power Station*, 2018.
8. A. Kontautas, E. Urbonavičius, *Analysis of aerosol deposition in PHEBUS containment during FPT-1 experiment*, Nucl. Eng. Des. 239 (2009) 1267–1274. doi:10.1016/j.nucengdes.2009.03.012.
9. H. Claudia, L. Del Pr, A.M. Rinc, *Informes Técnicos Ciemat CIEMAT Contribution to the Interpretation of the PHEBUS-FPT1 Experiment* (2003).
10. O. De Luze, T. Haste, M. Barrachin, G. Repetto, *Early phase fuel degradation in Phébus FP: Initiating phenomena of degradation in fuel bundle tests*, Ann. Nucl. Energy. 61 (2013) 23–35.
11. M. Barrachin et al., *Late phase fuel degradation in the Phébus FP tests*, Annals of Nuclear Energy 61 (2013), 36–53.

Zachowanie substancji promieniotwórczych w obiegu pierwotnym reaktora jądrowego typu PWR podczas ciężkiej awarii

Piotr Darnowski¹⁾, Michał Stępień¹⁾, Mateusz Włostowski²⁾, Konrad Świrski¹⁾

¹⁾ Politechnika Warszawska, ²⁾ Państwowa Agencja Atomistyki

1. Wstęp

Artykuł jest syntetycznym przeglądem kluczowych procesów fizycznych i chemicznych, którym podlegają substancje promieniotwórcze w obiegu chłodzenia reaktora jądrowego podczas ciężkiej awarii ze stopieniem rdzenia. Uwaga została skupiona na elektrowni z reaktorem wodnym ciśnieniowym (PWR). Opisano mechanizmy, które odgrywają rolę w transporcie, depozycji i retencji najważniejszych radionuklidów. W szczególności opisana jest dynamika aerozoli i par. Opisano również zjawiska chemiczne, które mają wpływ na człon źródłowy emisji radionuklidów do obudowy bezpieczeństwa.

2. Zjawiska zachodzące w obiegu chłodzenia reaktora

2.1. Wprowadzenie

Zanim dojdzie do emisji radionuklidów w postaci członu źródłowego do obudowy bezpieczeństwa, a następnie do środowiska, niezbędna jest analiza procesów w obiegu pierwotnym. Zjawiska w obiegu mogą istotnie wpłynąć na człon źródłowy poprzez opóźnienie lub zredukowanie ilości radionuklidów trafiających do obudowy [1].

Znaczna część substancji, które opuszczają rdzeń reaktora podczas jego degradacji, jest uwalniana w procesie odparowania (ang. *vapourisation*). Nawet jeżeli możliwa jest kondensacja wewnątrz rdzenia, to pomimo to duże ilości par opuszczają rdzeń, nie kondensując. Szczególnie dotyczy to par cezu oraz jodu. Z uwagi na dużą różnicę temperatur pomiędzy rdzeniem a obiegiem chłodzenia reaktora oraz różnymi warunkami atmosfery, pary mogą się osadzać na powierzchniach obiegu poprzez zwykłą kondensację lub interakcje chemiczne ze ścianami.

Procesy depozycji usuwają produkty rozszczepienia, które mogłyby zostać uwolnione jako część członu źródłowego. Depozycja nie jest permanentna i bezwarunkowa, możliwe są powtórne uwolnienia związanych radionuklidów w wyniku grzania powierzchni poprzez ciepło połączeniowe lub omywanie przez gorące gazy. Dodatkowo mogą zajść reakcje chemiczne w wyniku pojawienia się nowych warunków (jak chociażby zmiana atmosfery z utleniającej na redukującą), które doprowadzą do zamiany substancji zdeponowanych na inne bardziej lotne substancje. Istotnym faktem jest to, że pary mogą tworzyć aerozole i przyczyniać się do zmiany postaci aerozoli, a w szczególności rozmiarów aerozoli już istniejących. Jak podaje [1], dynamika aerozoli w obiegu chłodzenia reaktora jest niezwykle podatna na zmiany ich rozmiarów. Procesy te decydują o tym, jaka postać substancji radioaktywnych dostanie się w następnym etapie do obudowy bezpieczeństwa. Zjawiska chemiczne i fizyczne zachodzące w obiegu chłodzenia reaktora można podzielić na występujące w fazie par (ang. *vapour phase*) oraz w fazie aerozoli (ang. *aerosol phase*). Szczegółowy opis tych zjawisk znajduje się poniżej.

Symulacje awarii z wykorzystaniem kodów komputerowych dla ciężkich awarii w typowych reaktorach PWR wykazują, że podczas fazy wewnątrzbiornikowej temperatura gazu osiąga zakres 1500–3000K w rdzeniu reaktora oraz 450–1000K w obiegu pierwotnym. W rezultacie większość produktów rozszczepienia i materiałów konstrukcyjnych będzie wyemitowana ze zdegradowanego rdzenia w postaci wysoko przesyconych par. Podczas transportu przez obieg pierwotny pary przesycone będą przyczyniać się do powstawania i wzrostu ilości aerozoli poprzez jednorodne (homogeniczne) i niejednorodne (heterogeniczne) zarodkowanie. Wyjątkami od tej reguły są gazy szlachetne (Xe, Kr) oraz wysoce lotne radionuklidy, takie jak jod lub

ruten, które mogą być transportowane przez układ chłodzenia reaktora w postaci par. Zasadniczo, materiały prętów regulacyjnych, koszulki paliwowe, paliwo oraz stal nierdzewna składają się ze składników o małej lotności, które szybko zarodkują. Bardziej lotne produkty rozszczepienia zarodkują w chłodniejszych regionach układu chłodzenia. Istnieją eksperymentalne dowody otrzymane w testach Phebus FP na to, że zarodkowanie może się pojawić w górnej części rdzenia. Powstawanie aerozoli może się zacząć przed wejściem do obiegu, w chłodniejszej, górnej części rdzenia. Jest tak szczególnie w przypadku mniej lotnych pierwiastków.

Kondensacja różnych pierwiastków na cząstkach lub powierzchniach materiałów konstrukcyjnych jest kontrolowana głównie przez lotność. W tym zakresie również rola chemii radionuklidów jest istotna. Warunki w obiegu chłodzenia reaktora sprzyjają chemicznej interakcji zachodzącej pomiędzy substancjami znajdującymi się w fazie gazowej w postaci pary lub pomiędzy parami i cząstkami aerozoli. Właściwości fizyczne powstałych związków, zwłaszcza lotność, mogą się znacznie różnić od pierwiastków początkowych. Dlatego rola chemii jest kluczowa w celu określenia transportu produktów rozszczepienia i innych materiałów wyemitowanych z rdzenia oraz z obiegu pierwotnego [2].

Zarodkowanie homogeniczne (ang. *homogenous nucleation*) prowadzi do generacji w przepływie gazu jednokładnikowego jąder zarodkowania (ang. *embryos*). Jądra zarodkowania zwane również zarodkami są bardzo małymi cząstkami o rozmiarach rzędu nanometra lub mniejsze. Powstałe bardzo drobne cząsteczki służą jako miejsce kondensacji bardziej lotnych cząstek, które nadal pozostają w fazie gazowej w formie pary. Podczas tego procesu para kondensuje na istniejących wcześniej cząstkach i na ścianach rurociągów. Część pary, która skondensowała, jest określona na podstawie skomplikowanego bilansu pomiędzy transportem pary na powierzchnię cząsteczki i transportem pary przez gaz omywający ścianki rury. Zasadniczo pierwsze zjawisko jest bardziej korzystne, ponieważ powierzchnia cząstek aerozolowych dostępna dla kondensacji pary jest kilka rzędów wielkości większa od powierzchni ścian obiegu pierwotnego.

Proces zarodkowania heterogenicznego (ang. *heterogeneous nucleation*) sprawia, że początkowo uformowane cząstki stają się większe i wielokładnikowe. Poza tym zjawiskiem koagulacja/aglomeracja (ang. *coagulation/agglomeration*) jest kolejnym procesem, który przyczynia się do przesuwania widma rozmiarów aerozoli w kierunku wyższych wartości (średnice aerozoli rosną). W szczególności cząstki, które powstały w początkowej fazie zarodkowania homogenicznego, są bardzo ruchliwe z powodu ich małych rozmiarów (dyfuzja jest odwrotnie proporcjonalna do rozmiaru cząstki). Intensywność ruchów Browna zwiększa szybkość koagulacji i prowadzi do powstawania większych cząstek [2].

Efekt opisanych wyżej zjawisk jest taki, że w układzie chłodzenia reaktora człon źródłowy ma postać wielokładnikowych polidispersyjnych (o różnych masach, funkcjonuje statystyczny rozrzut masy aerozoli) cząstek, unoszonych przez przepływ pary wodnej (zawieszonych w niej). Ten ogólny obraz został potwierdzony eksperymentalnie przez testy Phebus FP. Testy FPT0 i FPT1 pokazały, że promieniotwórcze aerozole zawierają dobrze zmieszane wielokładnikowe cząstki, mające większość wyemitowanych produktów rozszczepienia, z wyjątkiem jodu. Rozkład rozmiarów aerozoli jest szeroki, przez co obejmuje cząstki o różnych wymiarach. Mediana średnicy z rozkładu aerozoli, zmierzona w różnych pozycjach wzdłuż obiegu dla testów Phebus, zwiększała się, co świadczy o ciągłym wzroście cząstek. Średnia masowa średnica aerozolu wynosi około 1 μm . Określa się, że masa aerozoli rozmieszczona jest w zakresie wielkości od 0,001 μm do 10 μm . Dla warunków spodziewanych w układzie chłodzenia reaktora liczba Knudsen (Kn, stosunek średniej drogi swobodnej cząstek do wielkości reprezentującej skalę długości – promień ciała w cieczy), zmienia się, odpowiednio, od 10 do 10^{-3} . Z uwagi na to rozkład wielkości pokrywa wszystkie reżimy, odpowiednio od reżimu przepływu swobodnie molekularnego (ang. *free molecular regime* – przepływ Knudsen), ($\text{Kn} \gg 1$) do reżimu ośrodka ciągłego ($\text{Kn} \ll 1$) [2].

Podczas transportu przez układ chłodzenia reaktora różne pierwiastki, bez względu na to, czy są rozdzielone przed rekombinacją chemiczną, czy po niej, są osadzane na ścianach rurociągów jako para lub aerozole. Osadzanie się jest korzystne z punktu widzenia bezpieczeństwa jądrowego, ponieważ osłabia człon źródłowy przenoszony do obudowy. Proces osadzania się pary jest głównie powiązany z kondensacją na ścianie lub absorpcją na powierzchni. Osadzanie się aerozoli, co jest najbardziej istotne, zależy od rozmiaru cząsteczki i warunków przepływu gazu. Warunki przepływu w układzie chłodzenia reaktora zależą od przepływu pary wodnej, geometrii układu i stanu termicznego przepływu na wylocie z rdzenia, który z kolei zależy od przebiegu awarii. Przebieg awarii jest silnie kontrolowany przez ciśnienie w układzie i zależy od reakcji egzotermicznych w rdzeniu. Warunki przepływu w układzie chłodzenia reaktora zależą również od geometrii orurowania i temperatury gazu panującej wzdłuż obiegu. W układzie chłodzenia mogą się pojawić wszystkie rodzaje przepływów, zaczynając od laminarnego przez przejściowy aż do rozwiniętego przepływu turbulentnego. W eksperymencie Phebus przepływ gazu zwykle pozostawał laminarny w gorących częściach układu. Na wlocie do wytwornicy pary przepływ osiągał stan przejściowy i stawał się turbulentny. W zimnych partiach przepływ gazu był turbulentny [2].

Osadzanie się aerozoli wzdłuż rurociągów obiegu nie jest równomierne. Zamiast tego występują obszary zwiększonej akumulacji aerozoli. Miejscami tymi są szczególnie

rury wytwornicy pary w reaktorach PWR. W testach Phebus FP większość osadów w obiegu była zlokalizowana w gorącej gałęzi wytwornicy pary, gdzie termoforeza była głównym mechanizmem depozycji (ruch cząsteczek w cieczy pod wpływem gradientu temperatury).

Ważnym efektem mogącym występować w układzie chłodzenia i mającym wpływ na człon źródłowy jest powtórne tworzenie zawiesiny aerozoli lub ponowne odparowanie osadzonego materiału. Powtórne tworzenie zawiesiny aerozoli jest skomplikowanym procesem, który wciąż nie jest dobrze zbadany. Wydaje się, że istotny wpływ ma wiele czynników, takich jak zmienność prędkości gazu, stopień turbulencji, chropowatość powierzchni, morfologia i porowatość osadu. Ponowne odparowanie może się pojawić, gdy ściany są ogrzewane przez ciepło powyłaczeniowe wynikające z rozpadów promieniotwórczych osadzonych produktów rozszczepienia. Obecnie niepewny jest wpływ powtórnego tworzenia zawiesiny lub ponownego odparowania na człon źródłowy do obudowy bezpieczeństwa. Jednakże może to oznaczać, że powtórne tworzenie zawiesiny okaże się ważnym czynnikiem w sytuacjach takich, jak duża awaria z rozerwaniem obiegu pierwotnego (LB-LOCA), gdzie przepływ może być wysoki. Ponowne odparowanie może być ważne podczas ciężkich awarii, gdy powierzchnie układu są ogrzewane i prowadzi to do zmiany członu źródłowego w późnych fazach awarii [2].

Zjawiska pojawiające się w obiegu chłodzenia nie tylko zmniejszają ilość materiału uwolnionego do obudowy bezpieczeństwa, lecz również warunkują jego fizyko-chemiczną postać. Powstawanie wysokolotnych chemicznych substancji w postaci pary, dodanych do członu źródłowego w obudowie jest istotne dla bezpieczeństwa. Rola różnych zjawisk w formowaniu członu źródłowego różni się w zależności od sekwencji awarii. Na przykład grawitacyjne osadzenie się aerozolu jest o wiele mniejsze w sekwencjach rozerwania gorącej gałęzi obiegu pierwotnego, ponieważ poziome powierzchnie z punktu widzenia transportowanych aerozoli są ograniczone. Wiele radioaktywnych materiałów pozostaje w postaci pary w wyniku relatywnie

wysokiej temperatury pomiędzy rdzeniem a rozerwaniem, natomiast czas transportu przez układ chłodzenia reaktora jest krótki w wyniku małego dystansu przebytego przed uwolnieniem do obudowy oraz wysokiego przepływu.

Prezentowano poniżej listę zjawisk (tab. 1) towarzyszących procesom transportu gazów, par i aerozoli [2]. W następnych podrozdziałach fizyka procesów przedstawiona jest w szerszym zakresie.

2.2. Zjawiska zachodzące w fazie parowej

2.2.1. Chemia fazy parowej

Panuje konsensus, że dla fazy gazowej w obiegu chłodzenia reaktora, w wysokich temperaturach panuje równowaga chemiczna. Prowadzi to do specjacji (ang. *speciation*) chemicznej [1]. Popularny jest pogląd, że procesy zachodzące w tym wypadku nie są jednak w pełni zrozumiałe i trwają prace badawcze, takie jak projekt ISTP/CHIP.

2.2.2. Kondensacja/odparowanie par na aerozolach i powierzchniach konstrukcyjnych

Heterogeniczna kondensacja na istniejących aerozolach oraz kondensacja na powierzchniach są kluczowe dla określenia ilości lotnych związków docierających do obudowy bezpieczeństwa w formie aerozoli. Lotne związki w postaci aerozoli składają się na większość znaczących radiologicznie produktów rozszczepienia (np. jodek ceszu).

Kondensacja heterogeniczna par występuje wtedy, kiedy para ulega przesyconiu i istnieje dostępna powierzchnia dla procesu kondensacji (aerozol lub ściana). Wpływ mają ograniczenia transportu masy w obiegu pierwotnym. Ograniczenia mają wpływ głównie na mniejszy opór par na kondensację niż na homogeniczną nukleację. Para nienasycona w przepływie głównym może być przesycona w stosunku do powierzchni struktury, która ma zwykle mniejszą temperaturę. Przeciwnie, aerozole zawieszone w przepływie mają zwykle tę samą temperaturę, co otoczenie. Jest tak, ponieważ aerozole mają niewielką pojemność cieplną oraz dużą wartość stosunku powierzchni do objętości, przez co szybko osiągają równowagę

Tabela 1. Lista procesów, jakim podlegają aerozole i pary w obiegu pierwotnym

Reakcje chemiczne gazów i par z:	<u>innymi gazami/parami</u> (chemia fazy gazowej); aerozolami; powierzchniami (włączając chemisorpcję)
Homogeniczne (jednorodne) zarodkowanie par	
Kondensacja par na:	<u>aerozolach</u> (heterogeniczne zarodkowanie); powierzchniach strukturalnych
Aglomeracja aerozoli poprzez:	dyfuzję Browna; sedymentację; turbulencję (efekt wewnętrzny oraz ścinania)
Osadzanie aerozoli poprzez:	dyfuzję Browna; <u>termoforezę</u> (ruch cząsteczek pod wpływem gradientów temperatury w płynie); dyfuzjoforezę (ruch cząsteczek pod wpływem gradientów stężenia w płynie); elektroforezę (ruch pod wpływem niejednorodnego przestrzennego pola elektrycznego); sedymentację (grawitacyjne osadzanie); zmiany geometrii przepływu (wewnętrzne zderzenia); turbulencję (wewnętrzne zderzenia spowodowane przez wiry) oraz wymywanie w wodzie
Remobilizacja substancji zdeponowanych	ponowne odparowanie (ciepło powyłaczeniowe lub gorący przepływ); chemiczne reakcje w substancji osadzonej i/lub ze stanem gazowym produkującym wysokolotne cząstki; mechaniczne powtórne tworzenie zawiesiny spowodowane przyspieszeniem przepływu

termiczną z otoczeniem. W związku z tym kondensacja na ścianach obiegu nie musi konkurować z tworzeniem się aerozoli lub kondensacją na aerozolach. Gdy para zostanie przesycona w przepływie głównym, zwykle już znajdują się tam aerozole, skraplanie na aerozolach jest wydajne ze względu na dużą powierzchnię aerozoli [1]–[3].

Kondensacja lub odparowania par na powierzchniach są uwzględniane we współczesnych kodach komputerowych. Ponieważ stała czasowa dojścia układu do równowagi chemicznej fazy gazowej nawet dla niskich temperatur jest mała w porównaniu do skali czasu ww. procesów, zjawiska te nie są sprzężone. Co więcej, wymiana masy pomiędzy różnymi fazami nie jest determinowana przez równowagę fazową (ang. *phase equilibria*), ale jest zależna od kinetyki. Szybkość kondensacji jest proporcjonalna do odchylenia od stanu równowagi [1].

Niejednorodne zarodkowanie na aerozolach i wpływ wynikający z podgrzewania cząstek przez uwalnianie ciepła zmiany fazy przez kondensację zostały dobrze opisane. Jednakże istnieją trzy komplikacje. Pierwsza wynika ze znaczącego zakrzywienia powierzchni aerozoli, która połączona z pojawiającymi się w wyniku tego napięciami powierzchniowymi dla kondensujących par wprowadza zwiększenie efektywnego ciśnienia par na powierzchni płynu na aerozolu. Jest to tzn. efekt Kelvina, który może zredukować całkowitą kondensację i znacząco przesunąć ją w kierunku większych cząsteczek w populacji aerozoli. Druga komplikacja powstaje, gdy rozmiar cząsteczek jest mniejszy lub zbliżony do średniej drogi swobodnej pomiędzy zderzeniami molekularnymi (np. duża liczba Kn). W takim przypadku rozważanie przepływu i zachowania cząsteczek w reżimie przepływu ośrodka ciągłego nie jest skuteczne i tempo kondensacji się zmienia. Trzecia komplikacja powstaje w wyniku tego, że powierzchnia aerozoli ma heterogeniczną naturę. Wpływa to potencjalnie na miejsca kondensacji [2].

2.2.3. Sorpcja/chemisorpcja par

Chemisorpcja par to ich interakcja chemiczna z materiałami konstrukcyjnymi. W dalszym ciągu trwają prace badawcze nad tym zjawiskiem. Niektóre związki cezu i telluru reagują ze stopami metali, a wielkość chemisorpcji jako funkcja temperatury została opracowana dla CsOH, CsI, Te (oraz SnTe) dla stali nierdzewnej i Inconelu. Istnieją również dane dla kilku związków w stosunku do specyficznych materiałów, jak stop Zircalloy [1], [2]. Szybkość sorpcji par lotnych substancji określana jest zwykle poprzez półempiryczne korelacje w funkcji temperatury ściany obiegu pierwotnego. Wychwyt lotnych substancji przez sorpcję na ścianie dzieli się na dwa etapy – pierwszy to transport o charakterze dyfuzji w strukturę ściany, który jest podobny do kondensacji i odparowania oraz sorpcja na samej powierzchni ściany [1].

2.2.4. Zarodkowanie jednorodne

Zarodkowanie jednorodne (nukleacja homogeniczna) z fazy pary występuje, gdy ciśnienie cząstkowe otoczenia wypełnionego kondensującymi parami przekracza ciśnienie cząstkowe równowagowe o czynnik rzędu czterech. Jak podaje [1], ilościowe szacowanie zarodkowania w obiegu pierwotnym jest zagadnieniem skomplikowanym. Istnieją teorie czystej nukleacji, jednakże napotykanne są trudności w rozszerzeniu ich na pary wieloskładnikowe [1].

Nawet w przypadku pary nienasyconej powstają tzw. klastry molekularne (ang. *molecular cluster*), które są niestabilne. Wraz z przejściem pary w stan przesyconia mogą się wytwarzać aerozole lub może się pojawić kondensacja na powierzchniach. Można uznać, że homogeniczna nukleacja może występować jedynie w warunkach ekstremalnego przesyconia w przypadku braku wcześniej istniejących aerozoli. Dzieje się tak, ponieważ wysoka energia powierzchni małych cząstek uformowanych przez homogeniczną nukleację stwarza większą barierę, niż ta generowana poprzez kondensację na istniejących powierzchniach (aerozoli lub strukturalnych). Jednakże należy pamiętać, że w obecnym kontekście pole wysokiego promieniowania zmniejsza ten opór, dostarczając dużą ilość stref nukleacji pojawiających się w wyniku jonizowania atmosfery. Jeżeli aerozole nie są produkowane przez zjawiska mechaniczne (np. rozerwanie i rozbryzg stopów prętów regulacyjnych lub eksplozja parowa w zbiorniku reaktora), pierwsze aerozole są tworzone przez homologiczną nukleację ze wszystkich „opornych” związków. Mogą to być na przykład pary srebra lub w późniejszym stadium degradacji rdzenia reaktora związki uranu. Klastry molekularne lub cząsteczki będące jądrami nukleacji (ang. *embryo particles*) formują się szybko i aglomerują, będąc jednocześnie celem dalszej kondensacji początkowo zarodkujących par, jak również przesyconych niskoreaktywnych związków. Ten obraz może być również bardziej skomplikowany, ponieważ więcej niż jeden związek może się przesyć i mogą powstawać częściej pojedyncze binarne lub potrójne procesy zarodkowania [2].

2.3. Zjawiska, którym podlegają aerozole

Szeroki przegląd aktualnego stanu wiedzy, technik modelowania i eksperymentów fizyki aerozoli w inżynierii jądrowej dostępny jest w referencji [4]. Wiele zjawisk opisanych w tym rozdziale zachodzi również w obudowie bezpieczeństwa. Interesujący przegląd procesów zachodzących w obudowie bezpieczeństwa, który jest jedną z niewielu polskojęzycznych publikacji w tym temacie, zawarty jest w pracy [5]. Interesująca i pożyteczna praca wydana w języku polskim to [6], która również przedstawia zagadnienia procesów w obudowie bezpieczeństwa.

2.3.1. Transport aerozoli w obiegu chłodzenia

Istotnym zagadnieniem w fizyce aerozoli jest mechanizm ich transportu w obiegu chłodzenia. Aerozole są unoszone przez przepływ (adwekcja i konwekcja), ale również podlegają procesom takim jak dyfuzja i wielu innym.

Punktem wyjściowym do analizy zachowania aerozoli jest mieszanina gazów i par w danej temperaturze, gdzie dane są cieplno-przepływowe warunki początkowe dla geometrii obiegu chłodzenia i przebiegu awarii. Niezbędne jest zrozumienie i analiza procesów cieplno-przepływowych [2].

Symulacje fizyki aerozoli uwzględniają formowanie, transport oraz osadzanie aerozoli w obiegu chłodzenia. Wzajemne oddziaływania między transportem, osadzaniem i zmianami rozkładów rozmiarów cząstek mogą być opisane przez równanie bilansu populacji, które w literaturze dotyczącej aerozoli jest znane jako ogólne równanie dynamiki (GDE, ang. *General Dynamic Equation*). Numeryczne rozwiązanie GDE jest jednym z istotnych kroków wykonywanych w różnych kodach, które symulują transport aerozoli. W jego ogólnej formie GDE jest trójwymiarowym układem równań różniczkowych cząstkowych. W praktyce używana jest uproszczona jednowymiarowa forma, która może zostać zapisana następująco [2]:

$$\frac{n}{t} - \frac{n(u_g)}{x} - \frac{4}{d_h} V_{dep} n - \frac{D}{x} \frac{n}{x} - \frac{n}{t} \Big|_{g-p} - \frac{n}{t} \Big|_{coag} \quad (4.1.2.1)$$

gdzie: x jest niezależną zmienną – osiowe położenie wzdłuż rurociągu; t jest niezależną zmienną – czas. Trzecia zmienna niezależna może opisywać wielkość cząstek, np. średnica cząstek d_p . W praktyce używana jest również objętość cząsteczki v , ponieważ jest ona zachowana podczas koagulacji. Zmienną zależną jest funkcja rozkładu (dystrybucji) rozmiarów cząstek [2]:

$$n = n(d_p; x, t) \text{ lub } n = n(v; x, t) \quad (4.1.2.2)$$

Po lewej stronie równania (4.1.2.1) pierwszy człon jest odpowiedzialny za akumulację, drugi – odpowiada za konwekcję (u_g jest prędkością gazu), zaś trzeci podaje strumień osadzania podczas różnych zewnętrznych procesów (d_h jest średnicą hydrauliczną kanału). Potrzebne są właściwe zależności dla prędkości osadzania V_{dep} dla odpowiednich obliczeń efektów takich, jak: sedymentacja, osadzanie dyfuzyjne, wewnętrzne zderzenia czy termoforeza [2].

Po prawej stronie równania (4.1.2.1) pierwszy warunek opisuje osiową dyfuzję, dwa następne – wewnętrzne procesy, mianowicie konwersję gaz-cząsteczka i koagulację. Wewnętrzne procesy mogą zostać opisane w następujący sposób:

$$\frac{n}{t} \Big|_{g-p} - J_{nuc}(d_p, d_p^*) - \frac{dd_p}{d_p} \frac{dn}{dt} \quad (4.1.2.4)$$

$$\frac{n}{t} \Big|_{coag} - \frac{1}{2} \int_0^v d\tilde{v} K(\tilde{v}, v - \tilde{v}) n(\tilde{v}) n(v - \tilde{v}) - n(v) \int_0^v d\tilde{v} K(v, \tilde{v}) n(\tilde{v}) \quad (4.1.2.5)$$

W równaniu (4.1.2.4) pierwszy warunek po prawej stronie modeluje jednorodne zarodkowanie (J jest funkcją

delta Diraca). Wymagana jest znajomość szybkości zarodkowania J_{nuc} oraz średnicy krytycznej, d_p^* , która jest wielkością homogenicznie tworzącej się cząsteczki. Te dwa ważne parametry są obiektem różnych teorii zarodkowania. Wspomniana teoria zarodkowania jest klasycznym podejściem stosowanym w większości kodów komputerowych dla ciężkich awarii. Modelowanie homogenicznego zarodkowania wymaga obliczeń cieplno-przepływowych oraz obliczeń chemii fizycznej. Drugi wyraz po prawej stronie równania (4.1.2.4) modeluje wzrost cząstek poprzez kondensację (np. heterogeniczne zarodkowanie). Ważnym parametrem jest pochodna, $\frac{dd_p}{dt}$, znana jako prawo wzrostu. Prawo to wymaga poznania procesów cieplno-przepływowych, chemii oraz wymiany ciepła i masy [2].

Równanie (4.1.2.4) opisuje koagulację/aglomerację. Jest często nazywane równaniem Smoluchowskiego. Ważnym parametrem wymaganym tutaj jest jądro koagulacji K , które jest funkcją dwóch zmiennych zależnych od wielkości zderzających się cząstek,

$$K = K(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2).$$

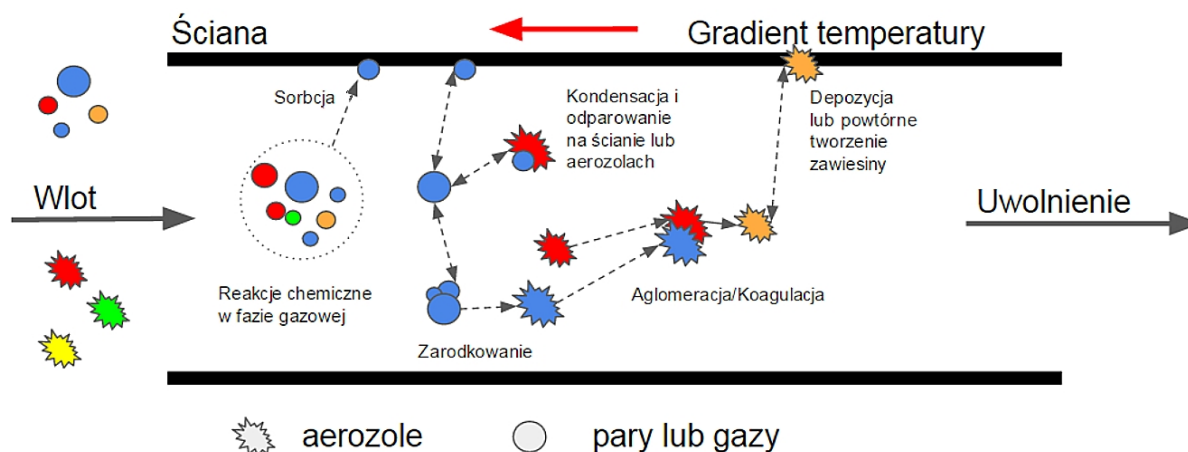
Jądro pozwala określić częstotliwość zderzeń pomiędzy cząsteczkami o objętości $\mathbf{v}_1$ i $\mathbf{v}_2$. Najważniejszym mechanizmem, który odpowiada za zderzanie cząstek, są ruchy Browna, względny ruch podczas laminarnego lub turbulentnego przepływu oraz osiadanie grawitacyjne. Istnieją zależności pozwalające określić częstotliwość zderzeń dla każdego mechanizmu. Sumaryczne jądro użyte w równaniu (4.1.2.4) jest sumą indywidualnych jąder [2]. Procesy te opisane są w dalszej części pracy.

Rozwiązanie GDE jest dużym wyzwaniem. Z jednej strony, wymaga wyrafinowanych metod numerycznych do rozwiązywania równania całkowo-różniczkowego. Z drugiej strony, wymaga korelacji dla różnych fizycznych parametrów opisywanych powyżej, jak szybkość nukleacji czy koagulacji/aglomeracji. Zachowanie tych parametrów nie jest w pełni znane w warunkach ciężkich awarii. Z tego powodu przeprowadzone były wielkoskalowe eksperymenty, takie jak Phebus FP, [2].

2.3.2. Podstawowe procesy w fizyce i dynamice aerozoli

Pary produktów rozszczepienia oraz materiałów konstrukcyjnych wychładzają się, opuszczając rdzeń. Wynikiem tego jest kondensacja uwolnionych związków i przejście do formy aerozoli zawieszonych i unoszonych przez przepływ mieszanin pary wodnej, wodoru i powietrza. Wyjątkiem w tym przypadku jest jod i ruten, które mogą w dużym stopniu pozostać w formie gazowej. Podstawowe procesy aerozoli w elementarnej komórce płynu są przedstawione schematycznie na rysunku 1. Należy rozróżnić procesy wewnętrzne i zewnętrzne.

Wewnętrzne procesy to te, które powodują zmiany w charakterystykach aerozoli poprzez procesy, które zachodzą w tej elementarnej objętości kontrolnej obiegu



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie najistotniejszych procesów, którym podlegają produkty rozszczepienia oraz substancje pochodzące z elementów konstrukcyjnych w obiegu chłodzenia podczas ciężkiej awarii

pierwotnego. Są dwie szerokie klasy procesów wewnętrznych: koagulacja/aglomeracja oraz konwersja gazu w cząsteczki (ang. *gas particle conversion*).

Koagulacja/aglomeracja występuje wtedy, gdy cząstki zderzają się z powodu ich ruchu względnego. Ruch względny między cząstkami aerozoli jest wytwarzany przez różne mechanizmy, takie jak ruchy Browna, turbulencja i naprężenia płynu lub z powodu pola siły (np. grawitacyjne, elektrostatyczne).

Gdy zderzają się dwie cząstki, mogą one się złączyć, tracą swoją odrębność i tworzą pojedynczą cząstkę. W tym przypadku proces jest nazywany koagulacją. Mogą one również utrzymać swoją tożsamość i kształt. Wtedy większe cząstki są zabudowane jako łańcuch cząstek pierwotnych. Nazywane są one aglomeratami, a proces ten to aglomeracja. W wielu przypadkach dla prostoty nie rozróżnia się procesu aglomeracji i koagulacji.

Konwersja gazu do cząstek występuje w postaci procesów fizycznych lub chemicznych tworzących przesyconą parę w fazie gazowej. Podczas ciężkich awarii podstawowy proces fizyczny, który prowadzi do przesylenia pary, to chłodzenie. Metastabilny stan pary doprowadza do równowagi za pomocą dwóch oddzielnych ścieżek: (1) tworzenie nowych cząstek, zwanych jądrami lub zarodkami, w procesie znanym jako jednorodny (homogeniczny) zarodkowanie (nukleacja) oraz (2) wzrost już istniejących cząstek w procesie kondensacji lub zarodkowania niejednorodnego (nukleacji heterogenicznej).

Procesy zewnętrzne to te, które wprowadzają zmiany we właściwościach aerozoli przez transportowanie cząstek poprzez granice sąsiednich objętości kontrolnych. Odbývają się one na większych skalach długości niż procesy wewnętrzne. Mechanizmy te, zmieniając zewnętrzne własności, są praktycznie równoznaczne z ruchem cząstek z objętości płynu oraz mechanizmów depozycji. Efektem tego jest migracja cząstek z objętości płynu i depozycja na dostępnej powierzchni. Wiele mechanizmów prowadzi do ruchu cząstek, w tym osadzanie grawitacyjne, dyfuzja Browna, ruch inercyjny i siły foretyczne.

2.3.3. Rozkłady wielkości aerozoli

Poza opisem fundamentalnej teorii aerozoli należy przedstawić krótką dyskusję wpływu rozmiarów cząstek aerozoli. W obiegu chłodzenia reaktora rozkład populacji aerozoli jest polidispersyjny (heterodispersyjny, różne masy cząstek) i charakteryzuje się rozkładem względem rozmiarów (ang. *size class distribution*). Rozkłady rządzone są wspomnianymi we wcześniejszych podrozdziałach równaniami ogólnymi dynamiki aerozoli. W problemach dynamiki aerozoli w reaktorach jądrowych zwykle dzieli się aerozole na grupy (sekcje). Funkcja rozkładu wielkości aerozoli podzielona jest na skończoną liczbę grup dla określonych przedziałów rozmiaru aerozoli. Grupy mogą być podzielone ze względu na masę, rozmiar, koncentrację i powierzchnię. W zastosowaniach jądrowych zwykle masa i jej zachowanie odgrywa kluczową rolę. Dlatego też często funkcja rozkładu jest określona względem masy dla określonej gęstości aerozoli [2]. Takie podejście jest na przykład stosowane w modelu MAEROS, który wykorzystywany jest w kodzie MELCOR [7].

2.3.4. Koagulacja/aglomeracja

Agglomeracja zachodzi w wyniku kolizji cząsteczek wynikających z różnic w ich prędkościach. Względny ruch aerozoli sprawia, że dochodzi do kontaktu pomiędzy nimi. Ruch cząstek jest wzbudzany przez dyfuzję Browna, sedymentację i turbulencję, gdy wpływ innych czynników, takich jak siły elektryczne i akustyczne, jest mniej istotny. Cząsteczki łączą się ze względu na siły Van der Waalsa, w wyniku zmian swobodnej energii powierzchniowej i reakcji chemicznych. Warto podkreślić, że kody komputerowe zwykle zakładają, że wydajność sklejanie jest zupełna (czyli cząstki zderzające się zawsze się skleją). W obiegu chłodzenia reaktora największe znaczenie ma mechanizm Browna, ponieważ po utworzeniu cząstki zarodkowej zjawisko to szybko prowadzi do powstania większych cząsteczek i redukcji ich ilości. Po wzroście aerozoli do większych rozmiarów inne mechanizmy aglomeracji (prawidłowo nazywając: kinematyczne nagromadzenie –

kinetyczna aglomeracja) zaczynają odgrywać większą rolę. Zwykle jednak krótki czas przebywania aerozoli i turbulentne warunki w obiegu chłodzenia sprawiają, że aglomeracja poprzez sedimentację jest niewielka [1], [2].

2.3.4.1. Aglomeracja Browna

Aglomeracja/koagulacja Browna jest najbardziej istotna dla małych cząstek, gdzie reżim przepływu swobodnie molekularnego ($Kn \gg 1$) oraz reżimu przepływu przejściowego ($Kn \sim 1$) muszą być uwzględnione. Ruchliwość małych cząsteczek jest bardzo duża, ale wpływ ten jest łagodzony przez ich zmniejszoną powierzchnię istotną dla zderzeń (ang. *target area*). Aglomeracja Browna jest najbardziej efektywna, gdy zachodzi pomiędzy bardzo małymi a dużymi cząsteczkami. Ogólnie, dostępne modele matematyczne zostały uzyskane na podstawie teorii dyfuzji Browna oraz współczynników korekcyjnych dla reżimu przepływu swobodnie molekularnego i dla niesferycznych cząsteczek [2].

2.3.4.2. Aglomeracja grawitacyjna

Aglomeracja/koagulacja grawitacyjna jest wyrażona w kategoriach prędkości końcowych cząsteczek, które opadają w polu grawitacyjnym. Tempo procesu jest proporcjonalne do różnicy prędkości dwóch cząsteczek oraz sumy ich rzutowanych powierzchni (ang. *target area*).

Występują rozbieżności w dostępnych modelach i wynikają one z czynnika określającego efektywność kolizji, który stanowi korektę względem idealnej sytuacji, gdzie cząsteczki „zamiatają” (ang. *sweep*) i gromadzą wszystkie mniejsze cząsteczki. Cząsteczki rozpatruje się w obszarze tzn. rzutowanego cylindra, reprezentującym ścieżkę cząsteczki podczas swobodnego opadania. Korekta zmniejsza efektywność z uwagi na występowanie efektów hydrodynamicznych. Mniejsze cząsteczki mają tendencję do przepływu wokół większych cząstek, co pozwala niektórym na uniknięcie wychwycenia. W obiegu chłodzenia reaktora występuje ograniczone oddziaływanie aglomeracji grawitacyjnej przez szybkość, z jaką zachodzą procesy [1]–[3].

2.3.4.3. Aglomeracja turbulentna

Aglomeracja/koagulacja turbulentna powstaje z powodu względnej prędkości cząstek powodowanej przez pole ścinania przepływu i dryf cząstek w stosunku do przepływów wynikających z różnic inercji płynu. Udział tego ostatniego ma wartość zerową dla cząstek o tej samej wielkości, a turbulentna aglomeracja osiąga w tym przypadku minimum [2].

2.3.5. Depozycja aerozoli

W obiegu chłodzenia reaktora znajdują się aerozole o bardzo szerokim zakresie rozmiarów. Dlatego też za depozycję odpowiadają różne procesy i jest ich więcej niż w obudowie bezpieczeństwa. Znajdują się aerozole, które

są wystarczająco małe, aby podlegać ruchom (dyfuzji) Browna, wpływ gradientów temperatury poprzez proces termoforezy, gradienty koncentracji (dyfuzjoforeza) oraz siły elektrostatyczne (elektroforeza), a także zjawiska turbulentne. Ponadto występują aerozole duże, że działają efekty opuszczania przepływu przez aerozole w wyniku działania sił inercji i grawitacji.

2.3.5.1. Depozycja poprzez dyfuzję Browna

Dyfuzyjne osadzanie jest istotne dla obszaru, gdzie występuje zarodkowanie pary i cząsteczki są niewielkie. Dla przepływów laminarnych wykorzystanie podejścia dyfuzji Browna (i prawa Ficka) jest właściwe jedynie w granicy stagnacji przepływu. Z uwagi na ten fakt osadzanie w przepływie laminarnym na skutek dyfuzji jest często oparte na modelach doświadczalnych. Dla przepływów turbulentnych fenomenologia zmienia się, kiedy turbulencja przenosi cząsteczki wystarczająco blisko do ściany. Dyfuzja w tym przypadku staje się dominującym mechanizmem transportu oraz doprowadza ona do osadzania się cząsteczek [2].

2.3.5.2. Depozycja poprzez dyfuzję turbulentną

Depozycja poprzez dyfuzję turbulentną zachodzi tylko w reżimie przepływu turbulentnego. W zwykłej rurze o przekroju kołowym przepływ turbulentny pojawia się, gdy liczba Reynolda $Re > 2300$. W dostępnych modelach zwykle nie rozpatruje się tego procesu w przepływie przejściowym. Wykorzystuje się sformułowanie Daviesa w celu obliczenia szybkości depozycji. Dla dyfuzji turbulentnej funkcjonuje duża liczba różnych modeli, które opisane są w literaturze dotyczącej danego kodu obliczeniowego [2], [3], [8].

2.3.5.3. Depozycja poprzez termoforezę

Termoforeza jest zjawiskiem, które w niewielkim stopniu zależy od wielkości cząstek, chociaż jest większa dla cząstek submikronowych. W wyniku niezerównoważonych kolizji pomiędzy cząsteczkami gazu i cząsteczkami aerozolu cząstki w gradiencie temperatury doświadczają siły skierowanej w kierunku niższych temperatur (przeciwdziałającej hydrodynamicznej sile oporu). Cząsteczki o wysokiej przewodności (np. metaliczne) są mniej dotknięte przez termoforezę niż cząsteczki materiałów z mniejszą przewodnością. Dla większych cząsteczek może powstać gradient temperatury w cząstce, zwiększając złożoność procesów [2].

2.3.5.4. Depozycja przez dyfuzjoforezę

Dyfuzjoforeza towarzyszy procesowi kondensacji. Kondensacja zachodzi, gdy ściany obiegu są chłodniejsze niż temperatura nasycenia pary wodnej. Pojawiająca się kondensacja powoduje przepływ gazu, który przenosi cząstki w kierunku ścian, dzięki czemu cząstki te mogą osiąść na ścianach [9].

Dyfuzjoforeza jest ważna w obiegu chłodzenia reaktora, zwłaszcza w awariach z rozerwaniem rurociągu zimnej gałęzi obiegu pierwotnego. W innych przypadkach dyfuzjoforeza ma drugorzędne znaczenie. Dodatkowo w obiegu chłodzenia dyfuzjoforeza nie występuje samodzielnie, lecz z termoforezą, więc w rzeczywistości jest obserwowana termo-dyfuzjoforeza [2].

2.3.5.5. Depozycja w wyniku osadzania grawitacyjnego (sedymентация)

Cząstki osiadają pod wpływem siły grawitacji, w której prędkość graniczna opadania jest proporcjonalna do kwadratu średnicy cząstki. Osiadanie grawitacyjne nie jest szczególnie istotne w obiegu chłodzenia z powodu zazwyczaj ograniczonej wielkości cząstek (małe prędkości opadania) oraz ich krótkiego czasu przebywania przed uwolnieniem do obudowy (podobnie jak aglomeracja grawitacyjna). Najczęstszym podejściem do modelowania jest założenie cząstek stokesowskich, to znaczy podczas poruszania się cząsteczek przepływ wokół nich ma reżim Stokesa ($Re_p < 1$, gdzie Re_p jest liczbą Reynoldsa). W tej sytuacji siła oporu jest podana przez dobrze znane prawo Stokesa dla ruchomej sfery w płynie. Ważnym punktem, który różni ruch cząstki aerozolu od ruchu makroskopowej sfery, jest tak zwany efekt poślizgu (ang. *slip effect*). Jeśli średnica cząsteczki jest znacznie większa od średnicy drogi swobodnej molekuł zawieszonego gazu, wtedy przemieszczanie się cząstek aerozolu w rzeczywistości jest podobne do obiektu makroskopowego i może być zastosowane prawo Stokesa, odpowiada to przypadkowi niewielkiej liczby Knudsen, tj. reżimowi ośrodka ciągłego. Przeciwnie, gdy średnica cząsteczek jest porównywalna lub mniejsza niż średnia droga swobodna molekuł gazu, otaczający gaz nie jest już postrzegany jako ośrodek ciągły ($Kn > 1$, przepływ jest przejściowy lub swobodnie molekularny). Prawo Stokesa nie jest już wtedy dokładne, a siła oporu musi być zmniejszona o współczynnik znany jako współczynnik korekcyjny Cunninghama czy współczynnik korekcji poślizgu. Dodatkowo należy wprowadzić poprawki dla sytuacji ruchu cząsteczek poza reżimem Stokesa, to znaczy dla większych cząsteczek, gdzie przepływ nie jest już całkowicie laminarny i może być wywołany efekt strumienia nadążającego (ang. *wake effect*). Jak już wspomniano, mechanizm osiadania najczęściej ma ograniczony wpływ, co może również oznaczać, że przybliżenia modelowania mają niewielki wpływ na człon źródłowy do obudowy [2].

2.3.5.6. Depozycja konwencyjna

Cząstki aerozoli ze względu na ich bezwładność, która ogranicza ich zdolność do nadążania za przepływem gazu nośnego, mogą się osadzać na powierzchniach podczas przechodzenia strumienia przez kolana/zagięcia w rurociągach, nagłe kontrakcje lub ekspansję w kanale. Zjawisko to występuje bez względu na to, czy przepływ jest laminarny, czy turbulentny. Ponieważ to osadzanie zachodzi z powodu bezwładności aerozoli, zwiększa się wraz

z wielkością aerozolu i prędkością przepływu. Jednakże przepływy o wysokiej prędkości (prowadzące do wysokiej prędkości zderzenia cząsteczek) i cząsteczek z materiałów o niskiej elastyczności mogą powodować odbijanie się cząsteczek. W konsekwencji zderzenia cząstek w powierzchniowo wywołane bezwładnością nie mogą mieć idealnej efektywności wiązania. Zjawisko to było badane przez długi czas i może być ważne dla poszczególnych sekwencji awarii, w których występują odpowiednie warunki [1], [9].

Ze względu na skomplikowane ścieżki przepływu w obiegu pierwotnym osadzanie na zakrętach jest ważne w analizie zachowania się aerozoli. W modelowaniu, aby pokryć zakres występujących warunków, powszechne jest połączenie kilku korelacji dających efektywność transmisji cząstek w modelu dla laminarnych i turbulentnych przepływów. Wybór korelacji zależy od kryteriów, które są funkcjami liczby Reynoldsa i liczby Stokesa. Kryteria te są określone na podstawie danych eksperymentalnych i prac teoretycznych [1], [9].

2.3.5.7. Depozycja przez elektroforezę

Osadzanie aerozoli może być zwiększone w wyniku elektroforezy. Elektroforeza jest złożonym procesem zależnym od aktywności rozpadów promieniotwórczych, wielkości, stężenia aerozoli oraz geometrii ograniczającej pomieszczenie, w którym zawieszone są aerozole. Radioaktywne aerozole samoistnie elektryzują się, ze względu na dominację rozpadu (rozpad alfa na ogół pozbawia cząsteczkę większej liczby elektronów, niż dwa ładunki dodatnie, które ona posiada) oraz rozpad β^- , podczas którego jest tworzony ładunek dodatni, choć bardzo małe cząsteczki mogą wytworzyć mały ładunek ujemny. Prace teoretyczne wskazują, że elektryzowanie się cząstek jest bardzo wrażliwe na dwa czynniki: w obiegu chłodzenia niewielki rozmiar cząstek powinien znacznie ograniczyć ich zdolność do elektryzowania się, a ich stężenie powinno zmniejszyć samoładowanie poprzez umożliwienie dyfuzyjnego połączenia z jonami w fazie gazowej. Z drugiej strony, należy stwierdzić, że zgodnie z oczekiwaniami uwięzienie aerozoli, na przykład w obiegu chłodzenia, może pomóc w naelektryzowaniu się ich przez obniżenie stężenia jonów. Podsumowując, prace teoretyczne implikują ograniczone elektryzowanie się (ang. *self-charging*, samoładowanie) w tych warunkach, z wyjątkiem regionów o szczególnie ograniczonym przepływie. Obecnie kody komputerowe do analiz bezpieczeństwa nie uwzględniają tego efektu, a właściwa ocena jego wpływu wydaje się konieczna w przyszłości [1], [9].

2.3.5.8. Mechaniczne powtórne tworzenie zawiesiny

W obiegu chłodzenia mogą się pojawić warunki przepływu o dużym przyspieszeniu. Przyspieszane masy płynów mogą porwać aerozole zdeponowane na ścianach obiegu, jest to tzw. zjawisko mechanicznego powtórnego tworzenia zawiesiny aerozoli (ang. *mechanical resuspension*) [1].

Mechaniczne ponowne tworzenie zawiesiny należy brać pod uwagę w analizach, ponieważ uniesione aerozole mogą się przyczynić do wzrostu członu źródłowego [3].

Ponowne mechaniczne tworzenie zawiesiny odbywa się zasadniczo w warunkach przepływu turbulentnego i jest powstrzymywane przez parę czynników: obecność wilgoci w otaczającej atmosferze, powierzchni osadzania. Również osadzany aerozol powinien być suchy dla efektywnego ponownego zawieszenia. Tworzenie ponowne zawiesiny występuje wtedy, gdy siły aerodynamicznego oderwania przekraczają siły adhezji cząsteczki do powierzchni [2], [3].

2.4. Chemia radionuklidów w obiegu pierwotnym

2.4.1. Chemia gazowych produktów rozszczepienia w obiegu pierwotnym

Skład chemiczny produktów rozszczepienia w obiegu pierwotnym podczas awarii ze stopnieniem rdzenia reaktora może być oszacowany, zakładając w pierwszym przybliżeniu, że reakcje chemiczne osiągnęły stan równowagi termodynamicznej. Stan równowagi w rozumieniu stężeń poszczególnych pierwiastków chemicznych i właściwości termodynamicznych różnych związków chemicznych, które mogą być utworzone. Jednakże ze względu na złożoność omawianych układów chemicznych, ze szczególnym uwzględnieniem dużej liczby pierwiastków biorących udział w reakcjach chemicznych (produktów rozszczepienia, pierwiastki uwalniane w wyniku degradacji prętów kontrolnych oraz struktur rdzenia, cząsteczek wodoru i tlenu), istniejące termodynamiczne bazy danych nie zawierają wszystkich substancji. Co więcej, niektóre ze wspomnianych baz danych nie są pozbawione znacznych niepewności. Dlatego też związki chemiczne produktów rozszczepienia w obiegu pierwotnym nie mogą zostać określone z całą pewnością na podstawie obliczeń termodynamicznych [9].

Równowaga termodynamiczna nie zawsze zostaje osiągnięta. Dzieje się tak szczególnie wtedy, kiedy reakcje chemiczne zachodzą zbyt wolno, aby uzyskane zostały stężenia równowagowe wytworzonych związków. Jeśli równowaga termodynamiczna jest osiągana najprawdopodobniej w wysokich temperaturach w pobliżu rdzenia (reakcje chemiczne zachodzą bardzo szybko w wysokiej temperaturze), to na podobny bieg wypadków nie można liczyć w zimnych gałęziach obiegu pierwotnego, gdzie temperatury są niższe. Jest tak też w przypadku niektórych substancji w częściach obiegu pierwotnego, w których temperatura chłodziwa gwałtownie spada (w szczególności w wytwornicach pary). Dla obszarów, gdzie temperatura szybko spada, prędkość reakcji jest wystarczająco niska, by mieć wpływ na końcowy skład chemiczny produktów rozszczepienia. W rezultacie substancje, których obecność stwierdzono, nie zawsze pokrywają się z substancjami utworzonymi w stanie równowagi termodynamicznej [9].

Wczesne badania prowadzone w celu określenia właściwości związków wytworzonych w początkowej fazie awarii

dotyczyły głównie pierwiastków lotnych (w szczególności jodu) i prostego układu reakcji ograniczonego do oddziaływań cezu, jodu, tlenu i wodoru z uwzględnieniem wpływu kwasu borowego. Stwierdzono, że w przypadku nieobecności boru jod jest transportowany w formie jodku cezu (CsI), zaś pozostały cez w postaci wodorotlenku cezu (CsOH). Obecność boru może prowadzić do powstawania boranu cezu, który jest mniej lotny niż CsOH i w przypadku którego część jodu przekształca w kwas jodowodorowy (HI), który jest bardziej lotny niż CsI . Badania te opierają się na wynikach eksperymentów prowadzonych z symulowanymi produktami rozszczepienia w ramach programów takich jak brytyjski program FALCON [9]. Wyniki te były powszechnie wykorzystywane w analizach ciężkich awarii.

Wyniki tych badań doprowadziły twórców kodów obliczeniowych takich jak MELCOR do ustalenia form chemicznych transportowanych pierwiastków, nie biorąc pod uwagę reakcji chemicznych występujących w obiegu. Kody obliczeniowe, takie jak SOPHAEROS (moduł kodu ASTEC), na potrzeby których w ostatnim okresie rozwinięto modelowanie transportu produktów rozszczepienia w obiegu pierwotnym, wyznaczają skład chemiczny produktów rozszczepienia. Procedura ta nie jest oparta na obliczeniach termodynamicznych kompletnych układów reakcyjnych, lecz na uproszczonych obliczeniach ograniczonych do reagujących układów z najważniejszymi substancjami (m.in. produktami rozszczepienia), które przeprowadzono z użyciem dostatecznie obszernej termodynamicznej bazy danych [9].

Substancje chemiczne wybrane na podstawie wyżej opisanych wstępnych badań zostały sprawdzone głównie z wynikami programu Phebus FP. Zaletą tego programu jest to, że źródło produktów rozszczepienia oraz materiałów konstrukcyjnych jest realistyczne zarówno pod względem składu, jak i kinetyki uwalniania. Dzieje się tak dlatego, że źródła radionuklidów pochodziły z podlegających degradacji napromieniowanych prętów paliwowych [9].

W testach programu Phebus FP substancje chemiczne nie były określane bezpośrednio. Było tak z powodu granicy wykrywalności małych ilości materiałów promieniotwórczych dostępnych dla poszczególnych technik pomiarowych. Jednak wskazania pośrednie dostarczane są przez lotność pierwiastków (ich temperatury skraplania) oraz ich rozpuszczalność w wodzie lub kwasie [9].

W odniesieniu do cezu wyniki programu Phebus FP wykazały, że w obecności gazu o dużej zawartości pary wodnej cez występuje przede wszystkim w fazie skondensowanej w temperaturze 700°C . Jest to niezgodne z zachowaniem wodorotlenku cezu, który w tej samej temperaturze znajduje się w fazie gazowej. Badania te wykazały również, że w obecności gazu o dużej zawartości pary wodnej występują dwa zjawiska: pierwsze – wydzielanie się molibdenu jest większe od oczekiwanego oraz drugie –

molibden obecny jest w obiegu pierwotnym w znacznie większym stężeniu niż cez, co sprzyja powstawaniu molibdenianu cezu (Cs_2MoO_4), substancji mniej lotnej niż wodorotlenek cezu [9].

W przypadku jodu symulacje z wykorzystaniem kodów do ciężkich awarii przewidują tworzenie się jodku cezu lub jodku rubidu (o niemal identycznych właściwościach). Testy Phebus, szczególnie FPT-2, wykazały, że nie zawsze tak jest. W zależności od występowania warunków utleniających i redukujących oraz stężenia pierwiastków pochodzących z prętów sterujących (Ag, In, Cd lub B) w obiegu pierwotnym jodek cezu i co najmniej jedna bardziej lotna substancja mogą być obecne lub nieobecne. Taki skład chemiczny nie jest aktualnie przewidywany przez dostępne modele. Celem prowadzonego przez IRSN programu eksperymentalnego CHIP, poświęconego chemii jodu w obiegu pierwotnym, jest dostarczenie informacji na temat zachodzących wtedy reakcji chemicznych i wytworzonych substancji [9].

2.4.2. Oddziaływanie produktów rozszczepienia ze ścianami obiegu pierwotnego

Pary produktów rozszczepienia mogą reagować ze ścianami obiegu pierwotnego. Pierwiastki takie jak tellur mogą również ulec absorpcji chemicznej, zwiększając stopień depozycji. Jednakże zjawisko to jest hamowane, jeśli odpowiednio ilości cyny (składnik stopu Zircaloy) transportowane są wraz z tellurem, tworząc tellurek cyny (SnTe). Jeśli rozkład stopu Zircaloy z koszulek paliwowych prowadzi do znacznego uwolnienia cyny, większe ilości telluru mogą być transportowane jako aerozole do obudowy bezpieczeństwa.

Pary produktów rozszczepienia skraplają się na metalowych ścianach, z którymi reagują. Dotyczy to szczególnie cezu w gorącej gałęzi obiegu pierwotnego. Testy powtórnego przejścia do stanu gazowego osadów prowadzone na próbkach w gorącej gałęzi testu FPT-1 wykazały, że oddziaływania między cezem a stalą nierdzewną mogą prowadzić do powstawania różnych substancji lotnych. Powtórne przejście w stan lotny osadzonych produktów rozszczepienia może wystąpić w następstwie ich uwolnieniu z rdzenia podczas jego degradacji. Może to doprowadzić do długotrwałych uwolnień, szczególnie w przypadku opóźnionej awarii obudowy (rozerwanie występujące co najmniej 24 godziny po wystąpieniu awarii poprzez tryb (rozerwanie przez ciśnienie) lub tryb (rozerwanie przez przetopienie). Taki typ uwolnień jest uzależniony od lotności substancji zdeponowanych [9].

2.4.3. Chemia związków jodu w obiegu pierwotnym

W obiegu pierwotnym jod może się łączyć z wieloma innymi pierwiastkami (produktami rozszczepienia lub składnikami materiałów konstrukcyjnych), w szczególności z cezem, rubidem, srebrem, indem i kadmem. Jod może być również obecny w obiegu pierwotnym w formie wol-

nych atomów (I), cząsteczek (I_2) lub kwasu jodowodorowego (HI). Właściwością tych substancji jest ich występowanie w fazie gazowej w warunkach panujących w obiegu pierwotnym podczas awarii ze stopieniem rdzenia [9].

W następstwie badań prowadzonych po awarii TMI-2, w latach 80. i 90. XX wieku przyjęto ogólnie, że jod transportowany jest głównie jako jodek cezu (CsI). W 1995 r. US NRC przeprowadziło badania mające na celu lepsze szacowanie uwolnień do obudowy bezpieczeństwa podczas awarii. Badania te zostały podsumowane w raporcie NUREG-1465 [10], który wskazuje, że znaczna część (5%) lotnego jodu (I i HI) może być uwalniana do obudowy bezpieczeństwa. Odsetek ten nie został określony na podstawie wyników doświadczalnych, lecz obliczeń (dla kilku sekwencji awaryjnych) termodynamicznych prostego systemu Cs, I, O i H, uzupełnionych oceną szybkości reakcji chemicznych dla substancji zawierających jod. Jak wspomniano wyżej, gdy szybkość reakcji jest wystarczająco mała, jod nie ma czasu, aby w pełni reagować z cezem w obiegu pierwotnym. W związku z tym niepomijalna część lotnych związków jodu (I oraz HI) pozostaje w obiegu pierwotnym.

Wyniki testów Phebus FP wskazują, że zachowanie jodu w obiegu pierwotnym jest w rzeczywistości bardziej skomplikowane. Dominującą postacią jodu nie zawsze jest jodek cezu, lecz tworzy on związki z innymi pierwiastkami uwolnionymi podczas rozkładu paliwa oraz materiałów konstrukcyjnych. Termodynamiczne oceny wykazały, że w szczególności srebro i kadm w prętach regulacyjnych AIC mogą mieć wpływ na zachowanie jodu w obiegu pierwotnym w zależności od warunków utleniających i redukujących oraz poziomów temperatury. Dane termodynamiczne substancji, które mogą być obecne w obiegu pierwotnym, zostały zebrane i zweryfikowane. To pokazuje zadanie umożliwiło wykorzystanie obszernych baz danych w kodach obliczeniowych, takich jak ASTEC lub MELCOR. Pomimo to współczesne obliczenia termodynamiczne nadal nie pozwalają odtworzyć w pełni zachowania jodu, które zaobserwowano podczas testów Phebus FP [9].

Innym ważnym wynikiem testu Phebus FP była obecność gazowego jodu w obudowie bezpieczeństwa na początku degradacji paliwa i nie może to być wyjaśnione przez reakcje chemiczne w obudowie bezpieczeństwa. Obecność ta przypisywana jest napływowi gazowego jodu z obiegu pierwotnego. Ułamek gazowego jodu transportowanego w obiegu pierwotnym w danym momencie w odniesieniu do całkowitej zawartości jodu (gazowego jodu i jodu w postaci aerozoli) osiągnął wartość od 30% w teście FPT-0 do 4% w teście FPT-1 [9].

Testy Phebus FPT-0, FPT-1 i FPT-2 przeprowadzono z użyciem prętów regulacyjnych AIC, takich jak te używane we francuskich reaktorach PWR 900 MW_e (również w większości reaktorów PWR zachodniej konstrukcji). Natomiast test Phebus FPT-3 przeprowadzono przy użyciu prętów regulacyjnych z węglikiem boru (B_4C), takich jak te

stosowane w reaktorach PWR 1300 i 1450 MW_e oraz reaktorach BWR. Wartość frakcji jodu w fazie gazowej zmierzona w obudowie bezpieczeństwa w tym badaniu była znacznie wyższa (o ponad 80%) niż dla innych badań w programie. Wynik ten można wyjaśnić wieloma założeniami, w tym brak srebra, indu i kadmu (co zmniejsza liczbę pierwiastków, z którymi jod może się chemicznie łączyć) oraz obecność dużych stężeń kwasu borowego powstałego z utleniania pręta regulacyjnego (kwas borowy może się łączyć z cezem, zapobiegając powstawaniu jodku cezu). Reakcje łączenia jodu z innymi pierwiastkami mogą być mniejsze i więcej jodu może pozostać w postaci gazowej. Program eksperymentalny CHIP prowadzony w Cadarache przez IRSN ma na celu sprawdzenie powyższych założeń [9].

Należy zachować ostrożność przy ekstrapolacji tych wyników eksperymentalnych na rzeczywiste sekwencje awarii elektrowni. Chociaż badania dla NUREG-1465 dotyczące ewentualnych uwolnień podczas awarii ze stopieniem rdzenia przeprowadzone około 2000 r. uwzględniały wyniki testów FPT-0 i FPT-1 (przyjmując 5% frakcji gazowego jodu w płynie wyciekającym z rozzerwania obiegu pierwotnego), potrzebne są uzupełniające badania, aby wziąć pod uwagę wnioski z wyników testu FPT-3 dla reaktorów energetycznych.

Tematyka chemii produktów rozszczepienia w obiegu pierwotnym jest w dalszym ciągu ważnym punktem poważnych badań, które głównie są prowadzone we Francji i innych krajach UE.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono i przedyskutowano najistotniejsze procesy, jakim podlegają substancje promieniotwórcze w obiegu pierwotnym reaktora PWR. Wiele opisanych procesów występuje również w obudowie bezpieczeństwa. W przyszłości w Biuletynie BJIOR zostanie opublikowany artykuł dotyczący obudowy bezpieczeństwa, który będzie uzupełnieniem niniejszej pracy.

Niniejszy artykuł powstał na bazie rozdziału 4 raportu „Zachowanie substancji promieniotwórczych w reaktorze

jądrowym podczas ciężkiej awarii”, który przygotowany został w 2016 r. w ramach umowy nr 19/F/2016/54 między Państwową Agencją Atomistyki a Instytutem Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej.

Notka o autorach

dr inż. Piotr Darnowski – adiunkt w Zakładzie Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska.

mgr inż. Michał Stępień – doktorant w Zakładzie Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska.

mgr inż. Mateusz Włostowski – starszy specjalista w Wydziale Analiz Obiektów Jądrowych i Technologii Reaktorowych, Departament Bezpieczeństwa Jądrowego i Programów Międzynarodowych Państwowej Agencji Atomistyki.

Prof. dr hab. inż. Konrad Świrski – profesor w Zakładzie Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska. Sekretarz Rady ds. Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej przy Państwowej Agencji Atomistyki.

Literatura

1. Cousin F., Kissane M.P., Girault N., “Modelling of fission-product transport in the reactor coolant system,” *Annals of Nuclear Energy*, 61, pp. 135, Elsevier Ltd (2013); <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.02.035>.
2. Sehgal B., *Nuclear Reactor Safety* (2012); <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-388446-6.00005-8>.
3. Cousin F., Dieschbourg K., Jacq F., “New capabilities of simulating fission product transport in circuits with ASTEC/SOPHAEROS v.1.3,” *Nuclear Engineering and Design*, 238 (9), pp. 2430 (2008); <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.03.018>.
4. OECD/NEA, “STATE-OF-THE-ART REPORT ON NUCLEAR AEROSOLS NEA / CSNI / R (2009)” (2009).
5. Adamski J., “Analiza transportu i retencji aerozoli w obudowie bezpieczeństwa reaktora” (1990).
6. Strupczewski A., *Awarie reaktorowe a bezpieczeństwo energetyki jądrowej* (1990).
7. Humphries L.L. et al., “MELCOR 2.2 Computer Code Manuals – Vol. 2: Reference Manual” (2017).
8. SNL, “MELCOR Computer Code Reference Manual” (2011).
9. Jacquemain D., *Nuclear Power Reactor Core Melt Accidents, Current State of Knowledge*, in Irsn (2015).
10. NRC, “Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants Light-Water Nuclear Power Plants NUREG-1465” (1995).

Prawnomiędzynarodowe źródła reżimu ochrony fizycznej materiałów jądrowych

Bartłomiej Geralt
Uniwersytet Łódzki

Wstęp

Termin „ochrona fizyczna¹” jest ogólnie przyjęty jako „całokształt przedsięwzięć organizacyjnych i technicznych, mających na celu skuteczne zabezpieczenie materiałów jądrowych i obiektów jądrowych przed aktami terroru, dywersji, sabotażu i kradzieży².” Podczas gdy ostateczna odpowiedzialność za bezpieczeństwo jądrowe w obrębie danego państwa spoczywa wyłącznie na tym państwie, konieczność współpracy regionalnej i międzynarodowej staje się coraz bardziej widoczna wraz ze wzrostem uznania, że zdolność do zapobiegania, wykrywania i reagowania na zagrożenia dla ochrony fizycznej w obrębie jednego państwa wymaga adekwatności i skuteczności środków ochrony fizycznej podjętej przez inne państwa, zwłaszcza gdy materiał jądrowy jest transportowany przez granice poszczególnych krajów.

Począwszy od 1970 r., Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA) była zobowiązana do odgrywania coraz większej roli we wspieraniu państw we wzmacnianiu ich krajowych ram prawnych i systemów ochrony fizycznej, a także w ułatwianiu regionalnych i międzynarodowych wysiłków na rzecz poprawy ochrony fizycznej, w tym środków mających na celu ochronę przed nuklearnym terroryzmem.

Ewolucja mandatu MAEA w zakresie ochrony fizycznej nastąpiła poprzez określenie konkretnych ram prawnych i stosownej polityki bezpieczeństwa. Ramy prawne MAEA obejmują statut, uchwały podjęte przez Radę Gubernatorów MAEA oraz Konferencję Generalną, a także odpowiednie rezolucje Rady Bezpieczeństwa ONZ i Zgromadzenia Ogólnego. Ponadto, przyjęto pod auspicjami

MAEA i innych organizacji szereg konwencji międzynarodowych, które również przyczyniły się do umocnienia mandatu i funkcji MAEA w dziedzinie rozwoju bezpieczeństwa jądrowego, a zwłaszcza ochrony fizycznej.

Uprawnienia i działania MAEA w dziedzinie ochrony fizycznej, podobnie jak w wielu innych sferach, pochodzą z artykułu II jej statutu, który stanowi, iż MAEA działa m.in. „aby przyspieszyć i zwiększyć wkład w rozwój energii atomowej dla pokojowych zastosowań, zdrowia i dobrobytu na całym świecie.” Rola MAEA w zakresie promowania ochrony fizycznej i zwalczania terroryzmu jądrowego jest prawnie ugruntowana i potwierdzona w uchwałach Rady Gubernatorów i Konferencji Generalnej, w tym planów ochrony fizycznej zatwierdzonych przez Radę Gubernatorów w kolejnych latach. Zgodnie z tymi planami MAEA prowadzi szeroką działalność w celu udzielenia pomocy państwom, w poprawie ich krajowych ram prawno-organizacyjnych w zakresie ochrony fizycznej oraz ich współpracy regionalnej i międzynarodowej, zmniejszając tym samym ryzyko terroryzmu jądrowego oraz przyczyniając się do międzynarodowego pokoju i bezpieczeństwa.

Konwencje międzynarodowe przyjęte zarówno przy współudziale MAEA, jak i przez inne podmioty wyznały MAEA jasną rolę i funkcję w dziedzinie szerzenia koncepcji bezpieczeństwa jądrowego i zostały one zatwierdzone przez Radę Gubernatorów. Szczególnym aktem prawnym jest Konwencja o ochronie fizycznej materiałów jądrowych [1] i poprawka do niej z 2005 r. [2]

Rola i kompetencje MAEA w propagowaniu bezpieczeństwa jądrowego oraz w zakresie ochrony przed terroryzmem jądrowym zostały również uznane w rezolucjach Rady Bezpieczeństwa 1373 (2001) i 1540 (2004), które

¹ Międzynarodowe standardy bezpieczeństwa jądrowego posługują się terminem „nuclear security”, który stanowi rozwinięcie pojęcia „physical protection”. Rozwinięcie to obejmuje nie tylko fizyczne bariery przed promieniowaniem, ale także całokształt ram prawnych i organizacyjnych mających na celu uniemożliwić dostęp do materiału jądrowego osobom niepowołanym. Tłumaczenie zwrotu „nuclear security” jest utrudnione ze względu na wykorzystywanie terminu „bezpieczeństwo jądrowe” jako odpowiednika „nuclear safety”.

² Taką definicję stosuje polska ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (Dz. U. z 2018 r. poz. 792).

zostały przyjęte na podstawie rozdziału VII Karty Narodów Zjednoczonych.

Poza aktami prawnymi powstały równie niewiążące instrumenty prawne powołane pod auspicjami MAEA, do których należą zalecenia w zakresie bezpieczeństwa jądrowego dotyczące ochrony fizycznej materiałów jądrowych i obiektów jądrowych oraz Kodeks postępowania w zakresie bezpieczeństwa i ochrony źródeł promieniotwórczych [7]. Dokumenty te ilustrują również rolę MAEA w opracowywaniu takich wytycznych i potwierdzają ich znaczenie we wspieraniu państw w zakresie wdrażania zawartych w nich zaleceń.

Tak więc, podobnie jak międzynarodowe ramy prawne dotyczące bezpieczeństwa jądrowego, szeroki mandat MAEA dotyczący ochrony fizycznej zawarty jest zarówno w wiążących, jak i niewiążących instrumentach prawnych przyjętych tak przez MAEA, jak i przez inne podmioty prawa międzynarodowego (głównie Organizację Narodów Zjednoczonych).

Niniejszy artykuł omawia prawnie wiążące podstawowe instrumenty prawa międzynarodowego oraz przyjęte na arenie międzynarodowej niewiążące instrumenty, które tworzą międzynarodowe ramy prawne w zakresie bezpieczeństwa jądrowego, szczególnie w celu zapewnienia ochrony fizycznej.

Konwencja o ochronie fizycznej materiałów jądrowych

Konwencja o ochronie fizycznej materiałów jądrowych (*The Convention on the Physical Protection of Nuclear Material, CPPNM*)³ oraz poprawka do niej⁴ to wiodące spośród prawnie wiążących instrumentów prawnych z zakresu ochrony fizycznej.

Zadaniem CPPNM jest osiągnięcie i utrzymanie na całym świecie skutecznej ochrony fizycznej materiałów jądrowych wykorzystywanych do celów pokojowych; do zapobiegania i zwalczania działań zmierzających do wykorzystywania materiałów jądrowych do innych celów niż pokojowe oraz ułatwienia współpracy pomiędzy państwami-stronami traktatu. Preambuła wyraźnie wskazuje prawo wszystkich państw do rozwijania i stosowania energii jądrowej w celach pokojowych oraz ich prawnie uzasadnionego zainteresowania potencjalnymi korzyściami wynikającymi z pokojowego wykorzystania energii jądrowej.

Obowiązki określone w CPPNM mają zastosowanie do materiałów jądrowych wykorzystywanych do celów pokojowych oraz na czas międzynarodowego transportu materiału jądrowego. Choć CPPNM odnosi się tylko do mate-

riałów jądrowych wykorzystywanych do celów pokojowych, końcowy akapit preambuły wskazuje, iż również „za skuteczną ochronę fizyczną materiałów jądrowych i obiektów jądrowych wykorzystywanych do celów wojskowych odpowiada państwo posiadające takie materiały jądrowe i obiekty jądrowe, przyjmując, że takie materiały i obiekty są i będą nadal objęte ścisłą ochroną fizyczną”.

Poniżej przedstawione zostaną najistotniejsze postanowienia konwencji:

Zgodnie z artykułem 3 każde państwo-strona podejmie w ramach swego ustawodawstwa krajowego oraz zgodnie z prawem międzynarodowym odpowiednie kroki w celu zapewnienia, w stopniu praktycznie możliwym, aby podczas międzynarodowego transportu materiałów jądrowych materiały te, znajdujące się na jego terytorium lub na pokładzie statku albo samolotu będącego pod jego jurysdykcją, jeżeli taki statek lub samolot jest wykorzystywany do transportu do lub z tego państwa, były odpowiednio ochraniane.

Stosownie do art. 4 żadne państwo-strona nie będzie importować lub zezwalać na import materiałów jądrowych z jakiegokolwiek państwa, które nie jest stroną niniejszej konwencji oraz eksportować lub zezwalać na eksport materiałów jądrowych, jeżeli to państwo-strona nie otrzymało zapewnień, że takie materiały będą ochraniane podczas międzynarodowego transportu na odpowiednim poziomie.

W ramach wzajemnej współpracy, na podstawie art. 5 konwencji, państwa-strony określą i powiadomią się wzajemnie bezpośrednio lub przez MAEA o swoim punkcie kontaktowym w zakresie spraw wchodzących w materię ochrony fizycznej oraz będą współpracować i konsultować się ze sobą bezpośrednio lub poprzez MAEA i inne właściwe organizacje międzynarodowe w celu uzyskania wytycznych dotyczących projektowania, utrzymywania i doskonalenia systemów ochrony fizycznej materiałów jądrowych w międzynarodowym transporcie. Ponadto, każde państwo-strona może, gdy uzna to za właściwe, współpracować i konsultować się z innymi państwami-stronami bezpośrednio lub poprzez MAEA i inne właściwe organizacje międzynarodowe, w celu uzyskania ich wytycznych dotyczących projektowania, utrzymywania i doskonalenia ich krajowych systemów ochrony fizycznej materiałów jądrowych znajdujących się w krajowym użytkowaniu, przechowywaniu i transporcie, a także dotyczących ochrony fizycznej obiektów jądrowych. Co więcej, w przypadku kradzieży, rabunku lub jakiegokolwiek innego bezprawnego zawładnięcia materiałami jądrowymi, jak też w przypadku realnej groźby takich czynów, państwa-strony zapewnią w maksymalnie możliwym stopniu współpracę i pomoc w celu odzyskania i zabezpieczenia takich materiałów każdemu państwu, które o to się zwróci.

³ Konwencja o ochronie fizycznej materiałów jądrowych wraz z załącznikami I i II, z dnia 26 października 1979 r. otwarta do podpisu w Wiedniu i w Nowym Jorku w dniu 3 marca 1980 r. (Dz.U. 1989 Nr 17, poz. 93).

⁴ Poprawka do Konwencji o ochronie fizycznej materiałów jądrowych przyjęta w Wiedniu dnia 8 lipca 2005 r. (ratyfikowana przez Polskę dnia 1 czerwca 2007 r.), weszła w życie z dniem 8 maja 2016 r. (Dz.U. z 2018 r. poz. 89).

W celu zapewnienia maksymalnego poziomu bezpieczeństwa, zgodnie z art. 6, państwa-strony podejmą, zgodnie ze swym ustawodawstwem krajowym, odpowiednie środki do zapewnienia poufności wszelkich informacji otrzymywanych jako poufne. Ponadto, każde z państw-stron zobowiązane jest do penalizowania wszelkich naruszeń prawa, uwzględniając ciężar tych naruszeń oraz podjąć niezbędne środki do ustanowienia swojej jurysdykcji w zakresie przestępstw popełnionych na terytorium tego państwa lub na pokładzie statku czy samolotu zarejestrowanego w tym państwie bądź gdy domniemany sprawca jest obywatelem tego państwa lub gdy sprawca przebywa na jego terytorium. Państwo-strona, na którego terytorium znajduje się domniemany sprawca, jeżeli nie dokona jego ekstradycji, przekaże bez żadnych wyjątków i bez nieuzasadnionego opóźnienia sprawę kompetentnym organom w celu wszczęcia postępowania karnego. W związku z tym państwa-strony będą udzielać sobie wzajemnie jak największej pomocy w związku z postępowaniem karnym, łącznie z dostarczeniem do ich dyspozycji dowodów niezbędnych w dochodzeniu.

W ramach obowiązku informacyjnego, stosownie do art. 14 ust. 1, każde państwo-strona poinformuje depozytariusza o swoich ustawach i innych przepisach, które dotyczą wprowadzenia CPPNM. Depozytariusz będzie informować o tym okresowo wszystkie państwa-strony, a w sprawie, gdy przeciwko domniemanemu sprawcy jest prowadzone postępowanie karne, państwo-strona będzie w miarę możliwości w pierwszym rzędzie powiadamiać o końcowym wyniku dochodzenia bezpośrednio zainteresowane państwa. Państwo-strona będzie również powiadamiać o wyniku dochodzenia depozytariusza, który z kolei będzie informować wszystkie państwa.

Poprawka do Konwencji o ochronie fizycznej materiałów jądrowych

W dniu 8 lipca 2005 r. sporządzono poprawkę do Konwencji o ochronie fizycznej materiałów jądrowych, której zadaniem było osiągnięcie i utrzymanie na całym świecie skutecznej ochrony fizycznej materiałów jądrowych i obiektów jądrowych wykorzystywanych do celów pokojowych, a także zapobieganie i zwalczanie przestępstw dotyczących takich materiałów i obiektów na całym świecie oraz ułatwianie współpracy pomiędzy państwami-stronami. Zmiana powiększa zapisy CPPNM o obowiązki w zakresie ochrony fizycznej podczas transportu międzynarodowego materiałów jądrowych oraz obejmuje rozszerzenie ochrony obiektów jądrowych i materiałów jądrowych także o sabotaż. Zakres poprawki ogranicza się do materiałów jądrowych i obiektów jądrowych, nie obejmuje „wszystkich materiałów rozszczepialnych i urządzeń towarzyszących”. Poprawka nie znajduje zastosowania do materiałów jądrowych używanych lub

pozostających w posiadaniu do celów wojskowych ani do obiektów jądrowych zawierających takie materiały.

Zgodnie z art. 2A każde z państw-stron ustanowi, wdroży i utrzyma odpowiedni krajowy system ochrony fizycznej odpowiedni do materiałów jądrowych i obiektów jądrowych znajdujących się pod jego jurysdykcją, mając na celu:

- ochronę przed kradzieżą i innym bezprawnym zawładnięciem materiałów jądrowych podczas jego stosowania, przechowywania i transportu;
- zapewnienie wdrożenia szybkich i kompleksowych rozwiązań umożliwiających lokalizację i, gdy jest to właściwe, odzyskanie zaginionych lub skradzionych materiałów jądrowych, jeśli materiały te znajdują się poza jego terytorium,
- ochronę materiałów jądrowych i obiektów jądrowych przed sabotażem oraz
- łagodzenie lub minimalizowanie radiologicznych skutków sabotażu.

Realizując te zobowiązania, każde państwo-strona stosować będzie w rozsądnym i możliwym do realizacji zakresie następujące podstawowe zasady ochrony fizycznej materiałów jądrowych i obiektów jądrowych:

- **Zasada podstawowa A: Odpowiedzialność państwa**, która oznacza, że odpowiedzialność za ustanowienie, wdrożenie i utrzymanie krajowego systemu ochrony fizycznej na terytorium danego państwa spoczywa wyłącznie na tym państwie.
- **Zasada podstawowa B: Odpowiedzialność podczas transportu międzynarodowego**, która oznacza, że odpowiedzialność państwa za zapewnienie, by materiały jądrowe były odpowiednio chronione, rozciąga się na międzynarodowy transport tych materiałów aż do momentu właściwego i należytego przekazania tej odpowiedzialności innemu państwu.
- **Zasada podstawowa C: Ramy prawne i dozоровe**, która oznacza, że państwo jest odpowiedzialne za ustanowienie i utrzymywanie ram prawnych i dozоровych w zakresie ochrony fizycznej. Ramy te powinny przewidywać ustanowienie odpowiednich wymogów ochrony fizycznej oraz obejmować system oceny i wydawania zezwoleń lub innych procedur nadających uprawnienia. Ramy te powinny obejmować system kontroli obiektów jądrowych i transportu w celu weryfikacji spełniania odpowiednich wymogów i warunków zezwolenia lub innego dokumentu uprawniającego oraz w celu ustanowienia sposobów egzekwowania przestrzegania odpowiednich wymogów i warunków, włącznie ze skutecznymi karami.
- **Zasada podstawowa D: Właściwy organ**, która oznacza, że państwo powinno ustanowić lub wyznaczyć właściwy organ, który odpowiada za wdrożenie ram prawnych i dozоровych i jest wyposażony w uprawnienia, kompetencje oraz środki finansowe i kadrowe stosowne do wypełniania nałożonych na niego obowiązków. Państwo powinno podjąć działania zapewniające

rzeczywistą niezależność między działaniem właściwego organu tego państwa i działaniem jakiegokolwiek innego organu zajmującego się promocją lub wykorzystaniem energii jądrowej.

- Zasada podstawowa E: **Odpowiedzialność posiadacza zezwolenia**, która oznacza, że należy wyraźnie określić zakres odpowiedzialności za wdrażanie poszczególnych elementów ochrony fizycznej w obrębie danego państwa. Państwo powinno gwarantować to, że główna odpowiedzialność za zapewnienie ochrony fizycznej materiałów jądrowych lub obiektów jądrowych spoczywa na posiadaczach stosownych zezwoleń lub innych dokumentów uprawniających (np. na operatorach lub przewoźnikach).
- Zasada podstawowa F: **Kultura bezpieczeństwa**, która oznacza, że wszystkie organizacje zaangażowane we wdrażanie ochrony fizycznej powinny nadać należyty priorytet kulturze bezpieczeństwa, jej rozwijaniu i utrzymaniu, niezbędny do zapewnienia jej skutecznego wprowadzenia w życie w całej strukturze organizacyjnej.
- Zasada podstawowa G: **Zagrożenie**, która oznacza, że ochrona fizyczna w danym państwie powinna się opierać na aktualnej ocenie zagrożenia.
- Zasada podstawowa H: **Podejście stopniowane**, która oznacza, że wymogi ochrony fizycznej należy oprzeć na podejściu stopniowanym, uwzględniając aktualną ocenę zagrożenia, względną atrakcyjność i rodzaj materiałów, a także potencjalne skutki związane z nieuprawnionym zawładnięciem materiałami jądrowymi oraz z sabotażem wymierzonym w materiały jądrowe lub obiekty jądrowe.
- Zasada podstawowa I: **Obrona w głąb**, która oznacza, że wymogi w zakresie ochrony fizycznej w danym państwie powinny odzwierciedlać koncepcję kilku poziomów i metod ochrony (strukturalne i inne techniczne, osobowe i organizacyjne), które przeciwnik musiałby przezwyciężyć lub obejść dla zrealizowania swoich celów.
- Zasada podstawowa J: **Zapewnienie jakości**, która oznacza, że w celu uzyskania pewności, iż spełnione zostały określone wymogi dotyczące wszystkich działań istotnych z punktu widzenia ochrony fizycznej, należy ustanowić i wdrożyć politykę zapewnienia jakości i programy zapewnienia jakości.
- Zasada podstawowa K: **Plany awaryjne**, która oznacza, że plany awaryjne opisujące postępowanie w przypadku nieuprawnionego zawładnięcia materiałem jądrowym, sabotażu wymierzonego w materiały jądrowe lub obiekt jądrowy lub próby dokonania takich czynów powinny być opracowane oraz przećwiczone przez posiadaczy zezwoleń oraz odpowiednie organy.
- Zasada podstawowa L: **Poufność**, która oznacza, że państwo powinno określić wymogi dotyczące ochrony

poufności informacji, których nieuprawnione ujawnienie mogłoby być niekorzystne z punktu widzenia ochrony fizycznej materiałów jądrowych i obiektów jądrowych.

W przypadku kradzieży, rabunku lub jakiegokolwiek innego bezprawnego zawładnięcia materiałami jądrowymi, jak też w przypadku realnej groźby takich czynów państwa-strony zapewnią w maksymalnie możliwym stopniu współpracę i pomoc w celu odzyskania i zabezpieczenia takich materiałów każdemu państwu, które o to się zwróci. W szczególności będą podejmowane odpowiednie kroki w celu poinformowania, tak szybko, jak to jest możliwe, inne zainteresowane państwa o każdym przypadku kradzieży, rabunku lub innego bezprawnego zawładnięcia materiałami jądrowymi lub o realnej groźbie podjęcia takich czynów oraz będą zawiadamiać o tym MAEA i inne właściwe organizacje międzynarodowe.

Na mocy art. 7 państwa-strony są zobowiązane do wprowadzenia karalności przestępstw, obejmujących kradzież, rabunek, przemyt materiałów jądrowych albo sabotaż obiektów jądrowych, a także czynności z tym związanych, jak kierowanie i przyczyniających się do popełnienia tych przestępstw. Ponadto warto zauważyć w tym kontekście, że katalog przestępstw został rozszerzony o „poważne szkody dla środowiska naturalnego”.

Poprawka do Konwencji zawiera również wyraźne potwierdzenie, że żadne z jej postanowień nie wpływa na transfer technologii jądrowych w celach pokojowych, podejmowany dla wzmocnienia ochrony fizycznej materiałów jądrowych i obiektów jądrowych.

Międzynarodowa Konwencja w sprawie zwalczania aktów terroryzmu jądrowego

Międzynarodowa Konwencja w sprawie zwalczania aktów terroryzmu jądrowego⁵ została przyjęta pod auspicjami Organizacji Narodów Zjednoczonych, wyraźnie uznając prawo wszystkich państw do rozwijania i wykorzystywania energii jądrowej w celach pokojowych oraz ich uprawnione zainteresowanie potencjalnymi korzyściami płynącymi z pokojowego wykorzystania energii jądrowej. Konwencja ta swoją treścią zmierza do zapobiegania i karania aktów terroryzmu jądrowego. Jej zakres jest szerszy niż CPPNM, wprowadzając penalizację czynów z wykorzystaniem „materiału radioaktywnego”, który obejmuje nie tylko materiały jądrowe, ale także inne materiały promieniotwórcze. Swoją treścią obejmuje również działania dotyczące materiałów jądrowych i urządzeń używanych do celów wojskowych, które zostały wyraźnie wyłączone z zakresu CPPNM i poprawki z 2005 r.

Na podstawie tej konwencji każde państwo-strona podejmie działania, jakie mogą być niezbędne do pena-

⁵ Międzynarodowa Konwencja w sprawie zwalczania aktów terroryzmu jądrowego, przyjęta przez Zgromadzenie Ogólne Narodów Zjednoczonych dnia 13 kwietnia 2005 r. (Dz.U. 2010 Nr 112, poz. 740).

lizacji wszystkich czynów naruszających zasady bezpieczeństwa, tj. poddania tych przestępstw odpowiednim karom, uwzględniając ich poważny charakter. W tym zakresie państwa-strony są zobowiązane do współpracy i pomocy wzajemnej, zwłaszcza w odniesieniu do postępowań karnych i ekstradycji oraz do podjęcia odpowiednich środków w celu poinformowania organizacji międzynarodowych o przygotowaniach do popełnienia lub popełnieniu określonych przestępstw. W celu zapobiegania przestępstwom określonym w niniejszej konwencji państwa-strony podejmą wszelkie starania dotyczące wdrożenia odpowiednich procedur zapewniających ochronę materiału promieniotwórczego, uwzględniając odpowiednie zalecenia i funkcje MAEA.

Zgodnie z postanowieniami art. 2 konwencji popełnia przestępstwo ten, kto w sposób bezprawny i świadomy:

- posiada materiał promieniotwórczy lub wytwarza bądź posiada urządzenie:
 - z zamiarem spowodowania śmierci lub poważnego uszkodzenia ciała, lub
 - z zamiarem spowodowania poważnej szkody w mieniu lub środowisku;
- w jakikolwiek sposób używa materiału promieniotwórczego lub urządzenia, lub używa albo powoduje szkodę w obiekcie jądrowym w sposób, który powoduje uwolnienie lub ryzyko uwolnienia materiału promieniotwórczego:
 - z zamiarem spowodowania śmierci lub poważnego uszkodzenia ciała, lub
 - z zamiarem spowodowania poważnej szkody w mieniu lub środowisku, lub
 - z zamiarem zmuszenia osoby fizycznej lub prawnej, albo organizacji międzynarodowej, lub państwa do określonego działania lub zaniechania.

Ponadto, przestępstwami są czyny polegające na groźeniu dokonania tych czynności, uczestniczeniu w takich czynnościach (współudział) lub organizowaniu takich czynności.

Zgodnie z art. 18 po konfiskacie lub innej formie przejęcia kontroli nad materiałem promieniotwórczym, urządzeniami lub obiektami jądrowymi, która nastąpiła w związku z popełnieniem przestępstwa, państwo-strona, w której posiadaniu znajdują się wspomniane materiały, urządzenia lub obiekty, powinno:

- podjąć działania mające na celu zabezpieczenie materiału promieniotwórczego, urządzenia lub obiektu jądrowego;
- zapewnić przechowywanie materiału promieniotwórczego zgodnie ze stosownymi zasadami bezpieczeństwa Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej oraz
- stosować się do zaleceń w zakresie ochrony fizycznej oraz standardów bezpieczeństwa i ochrony radiologicznej publikowanych przez MAEA.

Państwo-strona będące w posiadaniu takiego materiału promieniotwórczego, urządzenia lub obiektu jądrowego

może wystąpić o pomoc lub współpracę do innych państw-stron, w szczególności zainteresowanych państw-stron oraz wszystkich właściwych organizacji międzynarodowych, w szczególności MAEA. Państwa-strony dysponujące lub zatrzymujące taki materiał promieniotwórczy, urządzenie lub obiekt jądrowy poinformują Dyrektora Generalnego MAEA o sposobie zadysponowania lub zatrzymania takiego materiału promieniotwórczego, urządzenia lub obiektu jądrowego.

Rezolucje Rady Bezpieczeństwa ONZ przyjęte na podstawie rozdziału VII Karty Narodów Zjednoczonych

Rezolucja Rady Bezpieczeństwa Organizacji Narodów Zjednoczonych nr 1373

Podstawowym celem rezolucji RB ONZ nr 1373 z 2001 r. (RB ONZ 1373) jest zapobieganie i hamowanie finansowania i przygotowania wszelkich aktów terroryzmu. Działając na podstawie rozdziału VII, Rada Bezpieczeństwa, *inter alia*, potwierdziła „swoje jednoznaczne potępienie dla ataków terrorystycznych [z 11 września 2001 r.]” i wyraziła „swoją determinację do zapobiegania aktom tego rodzaju”. Rada Bezpieczeństwa wezwała, by „współpracować w trybie pilnym w celu zapobiegania i zwalczania ataków terrorystycznych, w tym poprzez zwiększenie współpracy i pełnego wdrożenia odpowiednich konwencji międzynarodowych odnoszących się do terroryzmu”. Rezolucja ta stanowi, iż:

- wszystkie państwa są zobowiązane do zapobiegania i zwalczania finansowania terroryzmu; zobowiązane są kryminalizować finansowanie terroryzmu; zamrażać fundusze i aktywa finansowe osób biorących udział w aktach terrorystycznych oraz zabraniać udostępniania funduszy na rzecz osób popełniających akty terrorystyczne.
- wszystkie państwa są ponadto zobowiązane do powstrzymania się od jakiejkolwiek formy wsparcia dla terrorystów; zobowiązane są podjąć niezbędne kroki, aby zapobiec aktom terrorystycznym, odmawiać bezpiecznego schronienia terrorystom lub podmiotom finansującym terroryzm, uniemożliwić terrorystom wykorzystywanie ich terytoriów przeciwko innym państwom, postawić przed wymiarem sprawiedliwości terrorystów i finansujących terroryzm za pomocą odpowiednich kar; zapewnić pomoc w dochodzeniach i postępowaniach karnych, zapobiegać przemieszczaniu się terrorystów poprzez kontrole graniczne i kontrole dokumentów tożsamości.
- wzywa się wszystkie państwa, aby między innymi jak najszybciej stały się stronami odpowiednich konwencji międzynarodowych i protokołów dotyczących terroryzmu.

- Rada Bezpieczeństwa ustanawia i kieruje komitetem monitorującym wdrażanie rezolucji RB ONZ nr 1373 (2001), do którego państwa są zobowiązane przekazywać informacje o krokach podjętych w celu wdrożenia rezolucji.

Rezolucja Rady Bezpieczeństwa Organizacji Narodów Zjednoczonych nr 1540

Celem rezolucji RB ONZ nr 1540 z 2004 r. (RB ONZ 1540) jest potwierdzenie, że „rozprzestrzenianie broni jądrowej oraz środków jej przenoszenia stanowi zagrożenie dla pokoju i bezpieczeństwa międzynarodowego”, podkreślenie determinacji do podjęcia odpowiednich i skutecznych działań przeciwko wszelkiemu zagrożeniu dla pokoju i bezpieczeństwa międzynarodowego spowodowanemu rozprzestrzenianiem broni jądrowej i środków jej przenoszenia oraz „wsparcie dla wielostronnych traktatów, których celem jest wyeliminowanie lub zapobieganie rozprzestrzenianiu broni nuklearnej”. Rada Bezpieczeństwa wyraża również poważne zaniepokojenie „zagrożeniem terroryzmem oraz ryzykiem, że podmioty niepaństwowe mogą nabywać, rozwijać, wprowadzać do obrotu lub używać broni nuklearnej i środków jej przenoszenia” oraz „groźbą nielegalnego handlu energią jądrową. Ponadto, broń i środki jej przenoszenia oraz powiązane materiały, które nadają nowy wymiar kwestii rozprzestrzeniania takiej broni także stanowią zagrożenie dla międzynarodowego pokoju i bezpieczeństwa”. Rezolucja ta stanowi, iż:

- wszystkie państwa powstrzymają się od udzielania jakiegokolwiek formy wsparcia podmiotom niepaństwowym, które próbują rozwijać, nabywać, wytwarzać, posiadać, transportować, przekazywać lub używać broni jądrowej i środków jej przenoszenia.
- wszystkie państwa przyjmują i egzekwują odpowiednie skuteczne przepisy prawne, które zabraniają podmiotom niepaństwowym wytwarzania, nabywania, posiadania, rozwijania, transportu, przekazywania lub używania broni jądrowej i środków jej przenoszenia, w szczególności do celów terrorystycznych, a także związanych z nimi przestępstw dodatkowych.
- wszystkie państwa podejmują i egzekwują skuteczne środki umożliwiające ustanowienie kontroli wewnętrznej w celu zapobiegania rozprzestrzenianiu broni jądrowej i środków jej przenoszenia, w tym poprzez ustanowienie odpowiednich kontroli w odniesieniu do powiązanych materiałów, takich jak: skuteczne środki uwzględniające i zabezpieczające takie produkty w wytwarzaniu, użyciu, przechowywaniu lub transporcie; odpowiednie skuteczne środki ochrony fizycznej; odpowiednie skuteczne kontrole graniczne i działania organów ścigania; odpowiednie skuteczne krajowe kontrole wywozu i przeładunku takich produktów oraz odpowiednie sankcje karne lub cywilne za naruszenie takich kontroli eksportu.

- wszystkie państwa są zobowiązane do promowania powszechnego przyjęcia i pełnego wdrożenia wielostronnych traktatów, których są stronami, a których celem jest zapobieganie rozprzestrzenianiu broni jądrowej, przyjmowanie krajowych przepisów i regulacji w celu zapewnienia zgodności z ich zobowiązaniami wynikającymi z kluczowych wielostronnych traktatów o nierozprzestrzenianiu; oraz do odnowienia i wypełnienia zobowiązania do współpracy wielostronnej, w szczególności w ramach MAEA.
- wszystkie państwa są zobowiązane do podjęcia wspólnych działań w celu zapobiegania nielegalnemu handlowi bronią jądrową, środkami jej przenoszenia i powiązanymi materiałami.
- Rada Bezpieczeństwa ustanawia i działa jako komitet monitorujący wdrażanie rezolucji RB ONZ 1540 i do którego państwa są zobowiązane informować o krokach podjętych w celu wdrożenia rezolucji.

Zalecenia bezpieczeństwa jądrowego w sprawie ochrony fizycznej materiałów jądrowych i obiektów jądrowych (INFCIRC/225/Revision 5)

Dążeniem zaleceń bezpieczeństwa jądrowego w sprawie ochrony fizycznej materiałów jądrowych i obiektów jądrowych (*Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Revision 5)*) INFCIRC / 225/5 jest osiągnięcie skutecznej ochrony fizycznej w celu zabezpieczenia przed kradzieżą lub nieuprawnionym przejęciem materiału jądrowego oraz przed sabotażem obiektów jądrowych.

Zalecenia zawarte w INFCIRC / 225 / 5 obejmują: cele reżimu ochrony fizycznej państwa, elementy systemu ochrony fizycznej państwa dla materiałów jądrowych i obiektów jądrowych, wymogi dotyczące środków przeciw nieuprawnionemu usunięciu materiału jądrowego podczas użytkowania i składowania, wymogi dotyczące środków przeciwdziałających sabotażowi obiektów jądrowych i materiałów jądrowych będących w użyciu i przechowywanych oraz wymogi dotyczące środków przeciw nieuprawnionemu usuwaniu i sabotażowi materiałów jądrowych podczas transportu.

Kodeks postępowania dotyczący bezpieczeństwa i ochrony źródeł promieniotwórczych oraz dodatkowe wytyczne dotyczące importu i eksportu źródeł promieniotwórczych

Kodeks postępowania dotyczący bezpieczeństwa i ochrony źródeł promieniotwórczych oraz dodatkowe wytyczne odnoszące się do importu i eksportu źródeł promie-

miotwórczych (*Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources and supplementary Guidance on the Import and Export of Radioactive Sources*) mają na celu, poprzez rozwój, harmonizację i wdrażanie krajowych polityk, przepisów ustawowych i wykonawczych oraz poprzez wspieranie współpracy międzynarodowej:

- osiągnięcie i utrzymanie wysokiego poziomu bezpieczeństwa i ochrony źródeł promieniotwórczych;
- zapobieganie nieuprawnionemu dostępowi lub uszkodzeniu, utracie, kradzieży lub nieuprawnionemu przekazaniu takich źródeł, aby zmniejszyć prawdopodobieństwo przypadkowego szkodliwego narażenia na takie źródła lub złośliwego wykorzystania takich źródeł w celu wyrządzenia szkody osobom, społeczeństwu lub środowisku;
- łagodzenie lub minimalizowanie radiologicznych konsekwencji wypadków bądź złośliwych działań z udziałem źródła promieniotwórczego.

Kodeks ma zastosowanie do wszystkich źródeł promieniotwórczych, które mogą stwarzać znaczne zagrożenie dla osób, społeczeństwa i środowiska. Kodeks nie ma zastosowania do materiałów jądrowych zdefiniowanych w CPPNM, z wyjątkiem źródeł zawierających pluton-239, a także nie ma zastosowania do źródeł promieniotwórczych używanych w ramach programów wojskowych lub obronnych.

Kodeks ustanawia wytyczne zawierające przepisy i regulacje, które powinny obowiązywać w każdym państwie. Ponadto zaleca przyznanie organowi regulacyjnemu odpowiednich uprawnień, określając jednocześnie szereg funkcji dozorowych, które powinien on pełnić. Ponadto, kodeks zawiera zalecenia dotyczące importu i eksportu źródeł promieniotwórczych, które są uzupełnione wytycznymi. Zalecenia kodeksu są następujące:

- podjęcie przez państwa odpowiednich środków w celu zapewnienia promowania kultury bezpieczeństwa w odniesieniu do źródeł promieniotwórczych oraz zapewnienie, by wszelkie takie źródła na ich terytorium lub pod ich jurysdykcją bądź kontrolą były bezpiecznie zarządzane i chronione (ust. 7);
- wprowadzenie skutecznego krajowego systemu legislacyjnego i dozorowego kontroli zarządzania i ochrony źródeł promieniotwórczych (ust. 8);
- zapewnienie, aby odpowiednie urzędnicy i usługi w zakresie ochrony przed promieniowaniem oraz bezpieczeństwa były dostępne dla osób upoważnionych do zarządzania źródłami radioaktywnymi, z których korzystają; takie udogodnienia i usługi obejmują poszukiwanie brakujących źródeł i ich zabezpieczanie, interwencję w razie wypadku lub szkodliwego działania z udziałem źródła promieniotwórczego, kalibrację sprzętu do monitorowania promieniowania itp. (ust. 9);
- zapewnienie odpowiedniego rozwiązania w zakresie adekwatnego szkolenia personelu organu dozorowego,

organów ścigania i organizacji służb ratunkowych (ust. 10);

- ustanowienie krajowego rejestru źródeł promieniotwórczych; informacje zawarte w tym rejestrze powinny być odpowiednio chronione; państwa powinny się starać zharmonizować formaty swoich rejestrów, aby ułatwić efektywność wymiany informacji (ust. 11);
- zapewnienie, by informacje dotyczące utraty kontroli nad źródłami promieniotwórczymi lub incydenty z potencjalnymi skutkami transgranicznymi obejmującymi takie źródła były niezwłocznie przekazywane potencjalnie dotkniętym państwom za pośrednictwem MAEA lub innych środków (ust. 12);
- promowanie świadomości w zakresie porzucania źródeł i wskazywanie osobom zajmującym się źródłami promieniotwórczymi ich odpowiedzialności za bezpieczeństwo i ochronę źródeł promieniotwórczych (ust. 13);
- zdefiniowanie zagrożenia wewnętrznego i oceny wrażliwości na to zagrożenie dla różnych źródeł wykorzystywanych na terytorium, z uwzględnieniem możliwości utraty kontroli i złośliwych działań z udziałem jednego lub więcej źródeł promieniotwórczych (pkt 16);
- podjęcie odpowiednich środków zgodnych z prawem krajowym w celu ochrony poufności wszelkich informacji otrzymanych poufnie zgodnie z kodeksem z innego państwa lub poprzez udział w działaniach mających za zadanie wdrożenie kodeksu (pkt 17);
- ponadto zalecenie państwom wyznaczenia punktu kontaktowego w celu ułatwienia eksportu i/lub importu źródeł promieniotwórczych zgodnie z kodeksem i wytycznymi.

Globalna Strategia Zwalczania Terroryzmu ONZ

Celem Globalnej Strategii Zwalczania Terroryzmu ONZ (*The United Nations Global Counter-Terrorism Strategy (UNGCTS) (A/RES/60/288)*) jest kompleksowa walka z terroryzmem, wzmacniająca zdolność państw oraz jednocześnie rolę systemu ONZ w zapobieganiu terroryzmowi i zwalczaniu go, promując jednocześnie podstawowe prawa człowieka i praworządność. Plan działania strategii składa się z 50 ponumerowanych przepisów ułożonych w następujących głównych rozdziałach:

- Środki mające na celu zaradzenie warunkom sprzyjającym rozprzestrzenianiu się terroryzmu.
- Środki zapobiegania terroryzmowi i zwalczania go.
- Środki mające na celu budowanie zdolności państw do zapobiegania terroryzmowi i zwalczania go oraz do wzmocnienia roli systemu Narodów Zjednoczonych w tym zakresie.
- Środki zapewniające poszanowanie praw człowieka dla wszystkich i praworządność jako podstawę walki z terroryzmem.

Środkami przewidzianymi w UNGCTS w zakresie ochrony fizycznej materiałów jądrowych są:

- ściganie i karanie sprawców aktów terrorystycznych (II.2 i II.3);
- współpraca i koordynacja w zwalczaniu przemytu materiału jądrowego (II.5);
- poprawa jakości kontroli granicznych i celnych (II.13);
- koordynacja reagowania na ataki terrorystyczne (II.17);
- poprawa bezpieczeństwa i ochrony wrażliwych celów (II.18);
- zachęcanie do dobrowolnej współpracy technicznej (III.1);
- wymiana i dzielenie się najlepszymi praktykami w zakresie zwalczania terroryzmu (III.2);
- reforma i modernizacja systemów zarządzania granicami (III.11).

Zakończenie

Jednym z celów Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA) na mocy artykułu II jej statutu jest „przyspieszenie i zwiększenie wkładu energii atomowej do pokoju, zdrowia i dobrobytu na całym świecie.” Ochrona fizyczna jest akceptowana dzisiaj jako podstawowy warunek wykorzystania energii jądrowej w ten właśnie sposób. Z biegiem lat to podejście zostało prawnie ugruntowane i potwierdzone w różnych decyzjach i uchwałach Rady Gubernatorów MAEA oraz Konferencji Generalnej, a także Rady Bezpieczeństwa Organizacji Narodów Zjednoczonych i Zgromadzenia Ogólnego. Jednakże międzynarodowe ramy prawne w zakresie ochrony fizycznej rozwinęły się w niezwykle złożony sposób i składają się z szerokiego zbioru prawnie wiążących i niewiążących instrumentów międzynarodowych, które czasami mogą być uznane za trudne do zrozumienia i stosownego zaaplikowania, co przedstawia powyższe omówienie obejmujące najważniejsze akty prawne dotyczące tego problemu.

Jednakże to właśnie polityka i działalność MAEA stworzyły symbiozę pomiędzy działaniami na rzecz wzmocnienia bezpieczeństwa a środkami sprzyjającymi temu bezpieczeństwu i zabezpieczeniu materiałów jądrowych w celu zapobieżenia, odstraszenia i reagowania na zagrożenia oraz w celu zapewnienia ochrony przed terroryzmem jądrowym i innymi szkodliwymi czynami.

Notka o autorze

Mgr Bartłomiej Geralt – prawnik, absolwent Wydziału Prawa i Administracji Uniwersytetu Łódzkiego, doktorant w Katedrze Prawa Międzynarodowego i Stosunków Międzynarodowych WPiA UŁ.

Literatura

1. Konwencja o ochronie fizycznej materiałów jądrowych wraz z załącznikami I i II, z dnia 26 października 1979 r. otwarta do podpisu w Wiedniu i w Nowym Jorku w dniu 3 marca 1980 r. (Dz.U. 1989 Nr 17, poz. 93).
2. Poprawka do Konwencji o ochronie fizycznej materiałów jądrowych przyjęta w Wiedniu dnia 8 lipca 2005 r. (ratyfikowana przez Polskę dnia 1 czerwca 2007 r.), weszła w życie z dniem 8 maja 2016 r. (Dz.U. z 2018 r. poz. 89).
3. Międzynarodowa Konwencja w sprawie zwalczania aktów terroryzmu jądrowego, przyjęta przez Zgromadzenie Ogólne Narodów Zjednoczonych dnia 13 kwietnia 2005 r. (Dz.U. 2010 Nr 112, poz. 740).
4. Rezolucja Rady Bezpieczeństwa Organizacji Narodów Zjednoczonych nr 1373 z 2001 r. (RB ONZ 1373).
5. Rezolucja Rady Bezpieczeństwa Organizacji Narodów Zjednoczonych nr 1540 z 2004 r. (RB ONZ 1540).
6. Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Revision 5).
7. Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources and supplementary Guidance on the Import and Export of Radioactive Sources.
8. The United Nations Global Counter-Terrorism Strategy (UNGCTS) (A/RES/60/288).
9. IAEA International Law Series No. 4 – The International Legal Framework for Nuclear Security.

Intermitencja sytuacji kryzysowych: studium stanu przed awarią w Fukushima

Michał Snopek
Uniwersytet Warszawski

Wprowadzenie

Artykuł porusza zagadnienie związane z prognozowaniem sytuacji kryzysowych w elektrowniach jądrowych. Do realizacji tego zadania zostało wykorzystane zjawisko intermitencji pochodzące z teorii chaosu.

Istotnym problemem jest nierówne rozłożenie przesłanek kryzysu na trzech różnych poziomach: mikro, mezo oraz makro. Stawia to przed badaczami, a także regulatorami, szereg wyzwań. Wynikają one ze złożoności społeczno-technologicznej systemu energetyki jądrowej. Sprawia to, że źródeł kryzysów należy szukać nie tylko w popełnionych błędach konstrukcyjnych i operacyjnych, ale także w dotychczasowych sukcesach. Szczególnie wtedy, gdy sukcesy te były następstwem szczęśliwego zbiegu okoliczności. Skutkuje to niedostrzeganiem bądź ignorowaniem błędów, jako nieistotnych, w oparciu o przeszłe doświadczenia. W tym celu zostało wprowadzone pojęcie „inkubacji kryzysu”, który jest jedną z możliwych form wyjaśnienia rozwoju zjawisk.

Zgodnie z założeniami artykułu autor nie ogranicza się jedynie do wskazania przyczyn katastrof, ale podejmuje się określenia obszarów, w których istnieje możliwość przewidywania wystąpienia zjawiska kryzysowego oraz zapobieżenia mu. Do tego celu zostało wykorzystane **zjawisko intermitencji, czyli przełączanie się systemu pomiędzy dwoma typami zachowań**. Proces kształtowania się przesłanek wydarzenia, które nastąpiło w Japonii w marcu 2011 r., pozwala na wyciągnięcie wniosków mogących znaleźć zastosowanie także w innych krajach. Autor wskazuje na istniejące narzędzia, wywodzące się z teorii chaosu, które mogą zostać wykorzystane przez naukowców w celu lepszego zrozumienia zachodzących procesów, a także sposobu minimalizacji zagrożeń.

W konkluzji autor artykułu wskazuje na nierównomierne rozłożenie przesłanek przyszłego kryzysu na poszczególnych poziomach. Zauważa, że nie jest możliwe

stwierdzenie występowania zjawiska intermitencji przez osoby odpowiedzialne za bezpieczeństwo na poziomie mikro. Równocześnie, obserwując z poziomu makro, można zauważyć, na podstawie historycznych danych oraz dostępnych prognoz, że w najbliższym czasie awaria któregoś z elementów systemu powinna się zdarzyć.

Wstęp

W dziejach pokojowego wykorzystania atomu do wytwarzania energii wydarzyły się trzy znaczące awarie w elektrowniach jądrowych: Three Mile Island (Stany Zjednoczone Ameryki) – 28.03.1979, Czarnobyl (Związek Radziecki) – 26.04.1986 oraz Fukushima Daiichi (Japonia) – 11.03.2011. Każda z nich wywarła negatywny wpływ na społeczeństwo i jego nastawienie do energetyki jądrowej. Wspomniane wydarzenia zaliczają się do grona kompleksowych kryzysów społeczno-technologicznych. Oznacza to, że nie jest możliwe rozpatrywanie ich tylko z perspektywy jednego aspektu, ale należy dostrzec ogólną złożoność problemu. Stawia to nowe wyzwania tak przed organami odpowiedzialnymi za zarządzanie kryzysowe, jak i przed naukowcami starającymi się zrozumieć zjawisko.

Celem artykułu jest określenie elementów mogących wskazywać na nadciągający kryzys. W pracach poświęconych temu zagadnieniu pojawia się z reguły istotny problem. Rozumowanie *ex post* jest zawsze obarczone ryzykiem prezentowania jako oczywistych elementów niedostrzegalnych bądź uznanych za nieistotne, zanim doszło do katastrofy. Z łatwością przychodzi stawianie się w roli Nostradamusa, gdy wypowiada się sądy z perspektywy wielu lat. Dlatego, na potrzeby zrealizowania głównego celu artykułu, została przyjęta metoda intermitencji wywodząca się z teorii chaosu. Pojęcie oznacza, że normalne funkcjonowanie systemu przerywane jest okresami niestabilności [16, s. 4]. Jest ona zjawiskiem wszechobec-

nym w modelach nieliniowych. Alternacja może występować pomiędzy okresami deterministycznymi oraz chaotycznymi (dynamika Pomeau-Manneville'a) oraz pomiędzy różnymi ich etapami (intermitencja wywołana kryzysem) [19]. To właśnie fakt występowania w ramach systemu tego zjawiska może świadczyć o jego podatności na przyszłe awarie. Wyciągając wnioski z wcześniejszych okresów chaotycznych, możliwy do zbudowania jest model pozwalający wskazać na obszary, z których przyszły kryzys się wyłoni.

Tak sformułowany cel przyczynił się do postawienia hipotezy, że awaria 11 marca 2011 r. w elektrowni jądrowej Fukushima Daiichi nie stanowiła załamania się funkcjonującego systemu i przejścia z modelu deterministycznego na chaotyczny, ale była tylko kolejnym etapem intermitującego kryzysu. System funkcjonujący w Japonii na wiele lat przed wspomnianymi wydarzeniami wykazywał cechy intermitencji bądź o charakterze dynamiki Pomeau-Menneville'a (dalej: intermitencja typu A), bądź wywołanej kryzysem (dalej: intermitencja typu B). Zatem, opierając się na istniejących narzędziach, także przed rokiem 2011 można było wskazać na wysokie prawdopodobieństwo wystąpienia poważnej awarii w którejś z elektrowni jądrowych.

Istotny problem do przezwyciężenia stanowi kompleksowość wydarzeń w Fukushima. Mamy w niej do czynienia nie tylko z przesłankami politycznymi, technologicznymi i społecznymi, ale także naturalnymi – trzęsieniem ziemi oraz tsunami. Pierwszą grupę należy zaliczyć do przyczyn wewnętrznych, wynikających z kształtu i sposobu funkcjonowania systemu, a drugą do grona zewnętrznych, które nie ograniczają się tylko do katastrof naturalnych, ale także wojen i działań terrorystycznych. W ramach artykułu analizie poddana zostanie tylko pierwsza. Na jego potrzeby zostało przyjęte, że moment wystąpienia zarówno trzęsienia ziemi, jak i tsunami jest nie do przewidzenia. Zatem wpływ państwa na wystąpienie czynników zewnętrznych jest zerowy bądź mocno ograniczony. Może jedynie oddziaływać na regulacje prawne, kulturę zarządzania, sposoby kontroli oraz zarządzanie kryzysowe.

Artykuł został podzielony na cztery części. W pierwszej przedstawiona jest siatka pojęć zastosowanych do analizy. Każda z kolejnych koncentruje się na innym poziomie szczegółowości, od możliwości dostrzeżenia symptomów nadciągającej katastrofy na poziomie mikro (elektrowni), przez poziom mezo (wszystkich elektrowni działających w Japonii), aż do poziomu makro (możliwości dostrzeżenia przesłanek przy uwzględnieniu całego systemu kulturowo-politycznego). Podział ten jest również zgodny z elementami teorii chaosu. Wskazuje ona na fakt, że systemy mają różne charakterystyki w zależności od skali,

w jakiej są obserwowane [20]. Zmiana poziomu pozwala na dostrzeżenie elementów, które z innej perspektywy były niedostrzegalne.

Siatka pojęć

Pierwszym krokiem, który należy wykonać przed dokładniejszym zaprezentowaniem tematu, jest zbudowanie odpowiedniej siatki pojęć niezbędnej do późniejszej analizy. W artykule można wyróżnić dwie części. W pierwszej zaprezentowana zostanie problematyka związana z pojęciem **kryzysu** oraz **sytuacji kryzysowej**, w kolejnej pojęcia związane z teorią chaosu.

Kryzys definiowany jest przez Katarzynę Sienkiewicz-Małyjurek jako „moment, okres przełomu, przesilenie, decydujący zwrot [30, s. 22]”. Należy go rozumieć jako zakłócenie normalnej działalności organizacji, procesu realizacji jej celów, a w skrajnych przypadkach stanowi również zagrożenie dla jej istnienia. W literaturze występuje wiele systemów klasyfikacji kryzysów, na potrzeby artykułu przyjąłem jednak podział zaproponowany przez Brenta Ritchiego. Wyróżnił on kryzysy **natychmiastowe**, gdzie nie występują (bądź są słabe) przesłanki odnośnie do możliwości ich wystąpienia, kryzysy **narastające**, które kształtują się wolniej, co sprawia, że mogą zostać zatrzymane bądź iż ich efekty mogą być ograniczone, oraz kryzysy **podtrzymujące**, które mogą trwać nawet latami [25]. Niektórzy wskazują także, że kryzys w określonych sytuacjach (np. w dziedzinie dyplomacji) powinien być postrzegany jako zjawisko fraktalne. To oznacza wydarzenie samopodobne¹, zarówno w skali mikro, jak i makro, funkcjonujące w pętli, aż nie zostanie przerwane [2, s. 346]. Istotne jest również wskazanie, że dokładne przewidzenie momentu wystąpienia kryzysu jest niemożliwe. Próbę wytłumaczenia tego zjawiska podejmuje między innymi teoria systemów. Wskazuje ona na kompleksowy, skomplikowany charakter systemów społeczno-kulturowych, tworzących układy dynamiczne, jako jedną z przyczyn [30]. Inną przyczynę, pochodzącą z teorii nieliniarnych, wskazuje Shari Veil. Jego zdaniem do wystąpienia kryzysu mogą prowadzić wcześniejsze sukcesy organizacji. Szczególnie wtedy, gdy były one następstwem szczęśliwego zbiegu okoliczności, co skutkuje niedostrzeganiem bądź ignorowaniem błędów jako nieistotnych. Następstwem jest „inkubacja kryzysu”, czyli stopniowego przechodzenia systemu ze stanu stabilnego w chaotyczny [35, s. 130].

Pojęcie kryzysu prowadzi do terminu **sytuacji kryzysowej**. Jest ona definiowana jako „sytuacja wpływająca negatywnie na poziom bezpieczeństwa ludzi, mienia w znacznych rozmiarach lub środowiska [30, s. 23]”. Co

¹ W teorii chaosu samopodobieństwo oznacza, że każdy wycinek analizowanej rzeczywistości jest podobny do całego analizowanego zdarzenia. W rzeczywistości samopodobieństwo jest jednak ograniczone przez charakter zdarzeń. Analizując elementy wybranego incydentu, można zauważyć, że jego części składowe są pod wieloma względami podobne w swoim przebiegu do całego analizowanego wydarzenia (np. analizując sytuację tylko w jednym z reaktorów jądrowych, mamy również obraz przebiegu zdarzeń w całej elektrowni).

istotne, każdy kryzys jest sytuacją kryzysową, jednak nie każda sytuacja zawiera w sobie powyższy element. Równocześnie w jej trakcie może występować wiele punktów kryzysowych [30]. Tadeusz Iwanek wskazuje na efekt domina wywołany przez takie sytuacje. Jedna uruchamia drugą, a te z kolei następne, zatem mogą one się na siebie nakładać bądź wprowadzić organizację w długotrwały okres perturbacji, który jednak przybiera nowe oblicza [9, s. 13]. Efektem końcowym sytuacji kryzysowej jest powrót organizacji do stanu normalnego, ale ustalonego na nowym poziomie w porównaniu do tego sprzed kryzysu [30].

Każda sytuacja kryzysowa jest odmienna i złożona, co przyczynia się do niemożności stworzenia uniwersalnych planów działania. Istotne staje się zatem tworzenie ich wariantów oraz szkolenie kadr na wypadek wystąpienia sytuacji nieoczekiwanych [30, ss. 9–10]. Timothy Sellnow *et al.* wskazują, że organizacje, w sytuacji gdy straciły zdolność działania zdroworozsądkowego wskutek sytuacji chaotycznej, starają się ponownie odnaleźć ich sens poprzez odwołanie do poprzednich wydarzeń. Działanie takie służy do uzasadnienia ustandaryzowanych metod, nawet jeśli nie przynoszą oczekiwanego skutku [31]. Cechą specyficzną kryzysów jest to, że przesłanki zapowiadające ich wystąpienie stają się oczywiste, po tym gdy się wydarzyły [35, s. 116]. Istnieją jednak dwie istotne przyczyny, dla których ich prognozowanie może być trudne bądź niemożliwe. Po pierwsze, związane jest to ze stanowiskiem, że jednostka nie jest w stanie wyjść poza doświadczenie, własne lub czyjeś. Ze względu na to, że postrzegamy świat, opierając się na doświadczeniu, nasze przeżycia wpływają na postrzeganie przyszłości [35]. Po drugie, występują problemy z odpowiednim klasyfikowaniem pozyskiwanych informacji. Cały system klasyfikacji jest oparty na naszym doświadczeniu (zarówno empirycznym, jak i teoretycznym), zatem dane nie pasujące do żadnej z istniejących klasyfikacji są pomijane lub ignorowane [35, s. 124]. Elektrownie jądrowe, a także inne skomplikowane systemy technologiczne spełniają szczególny warunek. Równie istotne są wady powstałe w trakcie projektowania, jak i w czasie funkcjonowania. Wśród niektórych autorów te pierwsze są nieraz wysuwane na czoło. Ich zdaniem braki projektowe są odpowiedzialne za przynajmniej połowę problemów w fazie funkcjonowania [37]. Zajmując się zatem bezpieczeństwem elektrowni jądrowych, należy równocześnie funkcjonować w ramach dwóch systemów, technicznego i organizacyjnego.

Drugim elementem wykorzystywanym w pracy jest **teoria chaosu**. Mark Speakman i Richard Sharpley definiują ją (za Faulknerem i Russelem) jako sytuację, w której system zbacza ze stabilnej ścieżki w wyniku losowego wydarzenia o nieprzewidywalnym efekcie końcowym [34]. Cechą charakterystyczną systemów chaotycznych jest wysoka podatność na niewielkie zmienne, które nie mogą być zmierzone i zrozumiane tradycyjnymi metodami [29].

Zjawisko to nazywa się efektem motyla, co oznacza, że nawet tak nieznaczająca zmienna jak trzepot skrzydeł motyla na jednym kontynencie może przyczynić się do wystąpienia tornada na innym. Wynika to z efektu kuli śnieżnej – mała zmiana w warunkach początkowych po wystarczająco dużej liczbie iteracji systemu daje znaczne różnice końcowe. Istotne jest także dostrzeżenie, że ten system ma różne charakterystyki w zależności od skali, w jakiej jest obserwowany [20]. Oznacza to, że ta sama sytuacja kryzysowa inaczej wygląda z poziomu jednostki, której dotyczy, inaczej na poziomie organu powołanego do jej rozwiązywania, a jeszcze odmiennie z perspektywy krajowej czy międzynarodowej. Aspekt ten należy wziąć pod uwagę przy opisywaniu zjawiska.

Nie oznacza to jednak, że teoria chaosu odrzuca jakiegokolwiek próby prognozowania. W rzeczywistości poszukuje porządku i przewidywalności, uznaje jednak, że tradycyjne metody wyrastające z newtonowskiego nurtu są do tego niewystarczające [31, s. 270]. Dlatego też wprowadzono pojęcie **chaosu deterministycznego**, w celu odróżnienia zjawisk, którymi zajmuje się teoria, od tych całkowicie losowych [15, s. 5]. Odnosząc to do tematu artykułu, podkreśla ona, że momenty katastrof nie są przypadkowe, lecz powstają w chwili kulminacyjnego nagromadzenia „szumu” wewnątrz systemu [20, s. 106]. Zatem kryzys może być następstwem niedeterministycznych zjawisk zewnętrznych, procesów wewnętrznych bądź ich mieszaną. Heinz Schuster wyróżnił dwa scenariusze przejścia do chaosu. Pierwszy z nich zakłada oscylację systemu pomiędzy punktami stałymi, których liczba podwaja się przy pewnych wartościach zewnętrznego parametru. Gdy liczba punktów osiągnie nieskończoność, system staje się nieregularny [27, s. 17]. Zjawisko to obrazuje bifurkacja Feigenbauma, zakładająca podział początkowo stabilnej trajektorii systemu na dwa odnóża, który to podział narasta lawinowo w czasie.

W tym miejscu należy wyjaśnić pojęcie **bifurkacji**. Zdaniem Sławomira Wyciślaka jest to punkt, w którym dalsza ewolucja układu może potoczyć się dwoma różnymi sposobami [39, s. 38]. Jest jedną z charakterystycznych dróg przejścia z regularnego systemu do chaotycznego [12]. Wśród przyczyn wystąpienia podwojenia istniejących punktów, z perspektywy zarządzania kryzysowego, można wyróżnić dwie. Pierwsza z nich jest związana z twardymi przesłankami. Zaliczyć do nich należałoby katastrofy naturalne, błędy konstrukcyjne, błędy ludzkie, brak odpowiednich procedur czy także czynności o charakterze korupcyjnym. Wśród drugiej grupy znajdują się przesłanki miękkie, takie jak kultura organizacyjna. W literaturze istotną rolę odgrywa podkreślenie komunikacji pomiędzy aktorami, która może przyczyniać się do bifurkacji. Małe wariacje w procesie komunikacji mogą doprowadzić do zakłóceń, które w następstwie stworzą kolejny punkt bifurkacji [29].

Drugi scenariusz (nazywany także scenariuszem Manneville’a i Pomeau) przewiduje, że „sygnał zachowujący się regularnie w czasie jest przerywany przez przypadkowo złożone okresy ruchu nieregularnego [27, s. 17]”. Proces ten nazywany jest intermitencją. Liczba intermitencji wzrasta wraz ze zmianami parametru sterującego, aż do momentu, gdy stanie się ona całkowicie chaotyczna [16, s. 4]. **Intermitencja typu A** polega na alternacji pomiędzy uporządkowanym a chaotycznym zachowaniem systemu, a **intermitencja typu B** – pomiędzy różnymi systemami chaotycznymi. Poza modelami opisanymi w artykule występuje również **intermitencja synchroniczna** (sprzężenie zmian pomiędzy stanami synchronicznymi a asynchronicznymi) oraz **intermitencja wywołana szumem** (przeskoki pomiędzy koegzystującymi stanami są inicjowane przez drgania atryktora) [19]. W przypadku planów długoterminowych, zgodnie z założeniami przyjętej metody, należałoby odrzucić zasadę regularnych cykli. Przechodzenie z jednego cyklu do drugiego (bez względu, czy w typie A, czy B) jest zawsze nieregularne w długim okresie.

Tak skonstruowana siatka pojęć pozwoli w dalszej części na potwierdzenie bądź odrzucenie hipotezy, że awaria w elektrowni jądrowej Fukushima Daiichi, która nastąpiła 11 marca 2011 r., nie stanowiła załamania się funkcjonującego systemu i przejścia z modelu deterministycznego na chaotyczny, ale była tylko kolejnym etapem już istniejącego kryzysu.

Poziom mikro

Podjmując się wskazania elementów świadczących o nadchodzącym kryzysie, badacz z łatwością może wpaść w pułapkę osądzania podejmowanych decyzji z perspektywy wynikłych wydarzeń. Bardzo łatwo jest stwierdzić *post factum*, że powinien on być oczywisty dla wszystkich, ponieważ symptomy A, B i C na niego wskazywały. Dlatego też, podejmując się analizy na poziomie mikro, najbardziej zagrożonej takim podejściem, należy przyjąć jedno podstawowe założenie. Przy braku naukowych ekspertyz napływających spoza systemu (w tym miejscu rozumianego jako elektrownia jądrowa Fukushima Daiichi oraz jej właściciel Tokyo Electric Power Company – dalej: TEPCO) wskazujących obszary problemowe, podejmowane czynności nie mogły dawać przesłanek osobom wewnątrz o nadciągającym kryzysie. Gdyby działania przedsiębiorstwa miały charakter „działań idealnych”, czyli procedury zarządzania kryzysowego były oparte na najdokładniejszych możliwych danych (ograniczona forma demona Laplace’a), przy odpowiednio wdrożonych środkach kontrolnych, należałoby stwierdzić, że każda awaria jest następstwem czynników zewnętrznych. W takiej sytuacji należałoby zdjąć odpowiedzialność z operatora i uznać, że kryzys jest następstwem niedeterministycznego charakteru zjawisk.

Sytuacja wygląda zgoła odmiennie, gdy przedsiębiorstwa w procesie kształtowania procedur bezpieczeństwa pomijałyby niektóre informacje, czy to ze względu na brak zaufania do ich wiarygodności, czy niechęć do ponoszenia dodatkowych kosztów. Jeśli na zewnątrz funkcjonującego systemu istniały przesłanki wskazujące, że stosowane normy są niewystarczające do zapewnienia bezpieczeństwa, ich zignorowanie należy traktować jako jedną z przesłanek nadciągającego kryzysu.

Podział ten możemy zastosować już na początkowym etapie związanym z projektowaniem elektrowni jądrowej oraz pozostałych zabezpieczeń. Aż do lat 70. XX wieku nie funkcjonowały wytyczne dotyczące sposobów oszacowywania zagrożeń płynących z natury, w tym możliwych wysokości fal tsunami [3]. Dlatego też, gdy podczas projektowania elektrowni w 1967 roku inżynierowie określili maksymalną wysokość szacowanego tsunami na 3,05 metra [3], nie należy uznawać tego za jedną z przesłanek przyszłego kryzysu. Pewne wątpliwości mogą za to dotyczyć sposobu zaprojektowania reaktora numer 1. Jest on dziełem amerykańskiego przedsiębiorstwa General Electric i z tego też powodu był bardziej przystosowany do amerykańskich zagrożeń niż japońskich. Zastosowawszy amerykańskie wytyczne, awaryjne silniki diesla zostały umieszczone w piwnicach, w celu ochrony przed tornadami [3]. Pominęto przy tym zapewnienie awaryjnego zasilania w sytuacji zalania silników.

Całkowicie innego charakteru są decyzje podejmowane w kolejnych latach, a dotyczące potencjalnych zagrożeń dla bezpieczeństwa elektrowni. Ministerstwo międzynarodowego handlu i przemysłu (dalej: MITI) w następstwie trzęsienia z lipca 1993 r. (epicentrum w pobliżu wyspy Okushiri) nakazało operatorom elektrowni jądrowych ponowną analizę wysokości potencjalnego tsunami. TEPCO odrzuciło wyniki badań wskazujących, że w przeszłości (między innymi w roku 869) zdarzały się fale przekraczające wysokość 10 metrów, a pozostało przy bardziej optymistycznych danych [7]. Także w roku 2009 organy centralne pod naciskiem TEPCO postanowiły zignorować konkluzje sejsmologów działających w ramach Komisji doradczej ds. zasobów naturalnych i energii [7, s. 31]. Przyczyną takiego postępowania była niechęć do zwiększenia kosztów zapewnienia bezpieczeństwa oraz maksymalizacja zysków. Istotną rolę odegrała w tym „atomowa wioska”, która zostanie dokładniej zaprezentowana w części poświęconej przyczynom w skali makro.

Okres ten można określić jako **czas nierówności** w stosunkach między podmiotami publicznymi a TEPCO, z przewagą dla tego drugiego. Przykładem ilustrującym taką zależność była kwestia implementacji zabezpieczeń przeciwko trzęsieniom ziemi zarekomendowanym przez Agencję Bezpieczeństwa Jądrowego i Przemysłowego (dalej: NISA) czy zabezpieczeń przeciwko tsunami rekomendowanym przez Japońskie Towarzystwo Inżynierii Lądowej (dalej: JSCE). W pierwszym przypadku

Komitet bezpieczeństwa ds. wytrzymałości na trzęsienia ziemi w 2006 roku dokonał rewizji starych dokumentów i we współpracy z NISA nakazał ich implementację operatorom elektrowni jądrowej. TEPCO wykorzystało jednak swoją uprzywilejowaną pozycję i pomimo przygotowania raportu dotyczącego zabezpieczeń (2009) udało się odłożyć implementację regulacji na styczeń 2016 r. W drugim opisywanym przypadku propozycje JSCE zostały zignorowane przez urzędy państwowe [14]. Co także istotne, w lutym 2011 r. TEPCO przekonało Komisję do badań nad trzęsieniami ziemi do złagodzenia raportu mówiącego, że silne tsunami może uderzyć w region Tōhoku. Zapis został zmieniony z uzasadnieniem, że informowanie o potencjalnie ogromnym tsunami może spowodować niezrozumienie w społeczeństwie, a przez to obniżyć akceptację dla elektrowni jądrowych [13, s. 7].

Nie oznacza to jednak, że wszystkie wytyczne były ignorowane, ich implementacja zależała od dobrej woli operatora. Tak było choćby z omawianymi wcześniej wytycznymi JSCE. Pomimo to, że całość założeń nie znalazła uznania w oczach rządzących, TEPCO część zaleceń dobrowolnie zastosowało, przygotowując wybrane elementy instalacji znajdujących się na nadbrzeżu na wyższą falę [3]. Przedsiębiorstwo energetyczne w raporcie analizującym przyczyny awarii w Fukushima Daiichi wielokrotnie podkreślało, że wszystkie zabezpieczenia były zgodne z „Ustawą regulującą materiały jądrowe, paliwa jądrowe i reaktory” [6, s. 18]. Równocześnie w dniu katastrofy na terenie elektrowni prowadzone były prace nad wzmocnieniem konstrukcji przeciw trzęsieniom ziemi. Ich zakończenie zostało przewidziane na rok 2020. Jednak 11 marca 2011 r. Fukushima Daiichi nadal była podatna na wstrząsy o sile przesunięcia 1024 Gal [14].

Osobnym zagadnieniem są relacje, jakie funkcjonowały pomiędzy organami narodowymi a sygnalistami (*whistle-blowers*). W roku 2000 informator powiadomił METI (Ministerstwo Gospodarki, Handlu i Przemysłu), że od lat 80. ubiegłego wieku TEPCO fałszuje raporty dotyczące zdarzeń eksploatacyjnych, przeprowadzonych napraw i przeglądów. Ministerstwo zamiast zainteresować się tematem, przekazało operatorowi, że mają w swoich szeregach osobę nielojalną. Sprawa zapewne nie znalazłaby żadnego rozwiązania, gdyby wiadomość nie dotarła do mediów. Dopiero pod ich naciskiem METI rozpoczęło przegląd sytuacji w elektrowniach zarządzanych przez TEPCO. W raporcie opublikowanym w 2007 roku pojawiły się informacje, że w siedmiu z dwunastu elektrowni odkryto dowody świadczące o fałszowaniu raportów [13, s. 7].

Innym aspektem mogącym wskazywać na zaistnienie przesłanek do wystąpienia poważniejszego kryzysu w elektrowni jądrowej w przyszłości były zdarzenia eksploatacyjne w przeszłości, które zgodnie z ideą „mitu bezpieczeństwa” (*anzen shinwa*) były zatajane. Do najpoważniejszego może być zaliczone zdarzenie z 1978 roku. W trakcie umieszczania prętów paliwowych w reaktorze, podczas

normalnej procedury wymiany zużytych prętów, doszło do upuszczenia jednego z nich. W wyniku tego wydarzenia wystąpił niekontrolowany proces rozszczepiania. Istnieje nawet możliwość, że nastąpiło przekroczenia stanu krytycznego, brak jednak dostatecznych informacji. Sprawa została zatuszowana przez operatora i wyszła na jaw dopiero w roku 2007, dzięki zeznaniom dwóch emerytowanych pracowników. Jednak ze względu na wewnętrzne regulacje dokumentacja techniczna została zniszczona dziesięć lat po katastrofie, stąd wiedza na ten temat jest mocno ograniczona [11]. Do innego poważnego zdarzenia doszło także w innej elektrowni zarządzanej przez TEPCO (Kashiwazaki-Kariwa) w 2007 roku. Pod niektórymi względami była ona podobna do tej z roku 2011. W wyniku silnego trzęsienia ziemi o magnitudzie 6,6 w skali Richtera, do którego doszło w regionie Chūetsu, nastąpił wyciek setek litrów radioaktywnej wody do Morza Japońskiego [33, s. 380]. Nie doszło jednak do uszkodzenia samych reaktorów, które zgodnie z procedurami przeszły automatycznie w stan bezpiecznego wyłączenia.

Wyjaśnienie wystąpienia **kryzysu w skali mikro** możemy podzielić na trzy kategorie: **techniczne**, **wewnętrzne** oraz **zewnętrzne**.

W pierwszej możemy dodatkowo wyróżnić dwie subkategorie, **projektowe** oraz **funkcjonowania**. W literaturze pojawia się opinia, że braki projektowe są odpowiedzialne za przynajmniej połowę problemów w fazie działania [37]. Do drugiej subkategorii zaliczone zostały decyzje o nieuwzględnianiu określonych modeli probabilistycznych, których implementacja okazałaby się zbyt kosztowna.

Przesłanki o charakterze **wewnętrznym** mają charakter błędów w procedurze kontrolnej. Ze względu na kulturę pracy czy naciski ze strony przełożonych niektóre bądź wszystkie z funkcji kontroli (informacyjna, profilaktyczna, korygująca, kreatywna, instruktażowa, pobudzająca [30, s. 61]) nie funkcjonowały w sposób prawidłowy.

Ostatnia z kategorii (**zewnętrzna**) odwołuje się do nierównoważonych relacji między przedsiębiorstwem energetycznym a podmiotami publicznymi odpowiedzialnymi za aspekt legislacyjny oraz kontrolny (dozorem jądrowym).

Poziom mezo

Pomiędzy przesłankami wskazującymi na możliwość zaistnienia zdarzenia na poziomie mikro oraz makro istnieje trudny do zdefiniowania stopień pośredni, w artykule nazwany poziomem mezo. Został on wyróżniony w związku ze specyficzną sytuacją japońskiego rynku energetycznego. Od roku 1972, gdy Okinawa wróciła pod administrację japońską, do połowy lat 80. ukształtował się podział rynku na 10 regionalnych monopolii. Każde z przedsiębiorstw (HEPCO – *Hokkaido Electric Power Company*, Tokohuden – *Tohoku Electric Power Company*, TEPCO,

Chuden – *Chubu Electric Power Company*, Hokuden – *Hokuriku Electric Power Company*, KEPCO – *Kansai Electric Power Company*, CEPSCO – *Chugoku Electric Power Company*, Yonden – *Shikoku Electric Power Company*, Kyuden – *Kyūshū Electric Power Company* i Okiden – *Okinawa Electric Power Company*) otrzymało całkowitą wyłączność w swoim regionie, zarówno jeśli chodzi o wytwarzanie, jak i przesyłanie energii elektrycznej. O ich sile i znaczeniu może również świadczyć fakt, że przedstawiciele wyższych kadr kierowniczych z reguły pełnili funkcje przewodniczącego regionalnych federacji biznesowych. Z dziesięciu wymienionych podmiotów tylko jeden (Okiden) nie posiadał elektrowni jądrowej w swoim port folio [26].

Poszczególni operatorzy, ze względu na to, że nie istniała potrzeba rywalizacji o klientów, współpracowali ze sobą w sprawach wspólnego stanowiska wobec inicjatyw rządowych mogących zmniejszyć ich zyski bądź narazić na dodatkowe koszty. Kształtowały w ten sposób określony klimat wśród kadr zarządzających, mający wpływ na możliwość wystąpienia sytuacji kryzysowej. Z tego też względu należy prześledzić istotne zdarzenia eksploata-

cyjne w elektrowniach jądrowych wszystkich przedsiębiorstw (tab. 1).

Okazuje się to nawet jeszcze bardziej korzystne, jeśli zdamy sobie sprawę z tego, że liczba informacji odnośnie do przeszłych wydarzeń w elektrowni TEPCO jest ograniczona, ze względu na ukrywanie informacji o awariach i niszczeniu dokumentacji, w pierwszym terminie, gdy pozwoli na to prawo. Zatem większa liczba przykładów pozwala na zastąpienie brakujących danych informacjami o zbliżonym charakterze.

Poza tym, pozwoli to także na lepsze zrozumienie klimatu organizacyjnego panującego w Japonii. Wskazuje na istnienie ciągu zdarzeń przyczynowo-skutkowych, który jest związany z występującymi wcześniej incydentami. Problem stanowi wybór odpowiedniej liczby zdarzeń eksploatacyjnych do analizy. W krótkiej historii energetyki nuklearnej w Japonii wystąpiło ich kilkadziesiąt, z czego w jednej z elektrowni było ich ponad dwadzieścia. Dlatego też zostały zastosowane dwa kryteria wyboru: czy w trakcie zdarzenia doszło do sytuacji, które wykraczają poza dopuszczalne odchylenia w funkcjonowaniu oraz czy jest dostęp do informacji dotyczących szczegółów wydarzenia.

Tabela 1. Wykaz zdarzeń eksploatacyjnych w japońskich elektrowniach jądrowych spełniających kryteria określone w artykule

Lp.	Miejsce	Operator	Rok	Opis
1	Mihama	KEPCO	1974	Doszło do uszkodzenia generatora pary.
2	Mihama	KEPCO	1977	Podczas procedury załadunku do reaktora świeżych prętów paliwowych doszło do ukruszenia bądź złamania jednego z nich.
3	Fukushima I	TEPCO	1978	W trakcie umieszczania prętów paliwowych w reaktorze doszło do upuszczenia jednego z nich. Doprowadziło to prawdopodobnie do niekontrolowanego procesu rozszczepiania.
4	Mihama	KEPCO	1979	Doszło do nieoczekiwanego wygięcia pręta paliwowego, co doprowadziło do uszkodzenia systemu załadunku paliwa.
5	Tokaimura	JCO	1981	17 stycznia uszkodzeniu uległa pompa strumieniowa. 4 lutego doszło do awarii w trakcie ekstrakowania plutonu. 6 lutego nastąpił wyciek pary z uszkodzonego obiegu i niewielki pożar.
6	Tsuruga	JAPC	1981	Doszło do wycieku około czterdziestu metrów sześciennych skażonej wody do oceanu.
7	Mihama	KEPCO	1981	Doszło do wycieku radioaktywnej wody, a także gazów, które następnie ułotniły się do atmosfery.
8	Monju	JAPC	1995	Nastąpiło pęknięcie rury odpowiedzialnej za dostarczanie chłodziwa i jego wycieku.
9	Shika	Hokuden	1999	Podczas wprowadzania do reaktora pręta regulacyjnego doszło do niekontrolowanego procesu rozszczepienia jądra atomu.
10	Tokaimura	JCO	1999	Nad ranem doszło do przekroczenia masy krytycznej w zbiorniku sedimentacyjnym. Zamiast wymaganej ilości uranu (2,4 kg) znalazło się w nim ponad szesnaście kilogramów ² .
11	Mihama	KEPCO	2004	Został uszkodzony zewnętrzny obieg wody. W jego następstwie doszło do wybuchu pary wodnej.
12	Kashiwazaki-Kariwa	TEPCO	2007	W wyniku silnego trzęsienia ziemi o sile 6,6 magnitudy, do którego doszło w regionie Chūetsu, nastąpił wyciek setek litrów radioaktywnej wody do Morza Japońskiego.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [10; 11; 13; 22; 23; 28; 33].

² Awaria ta miała miejsce poza elektrownią, w zakładzie cyklu paliwowego.

Równocześnie zostały wyróżnione trzy rodzaje awarii: **technologiczna**, **następstwo czynnika ludzkiego** oraz **katastrofa naturalna**. Awaria technologiczna jest następstwem wadliwości infrastruktury. Oczywiście, każda wada sprzętu i infrastruktury w pewien sposób jest powiązana z działaniami ludzkimi (brak odpowiedniej konserwacji, błędy projektowe), jednak nie są one następstwem bezpośredniego błędu ludzkiego. Druga kategoria to awarie będące następstwem błędu ludzkiego. Zaliczamy do niej zarówno błąd mechaniczny (upuszczenie), jak i nieprzestrzeganie obowiązujących procedur bądź ich brak. Kolejna kategoria to awarie będące następstwem katastrofy naturalnej.

Do **awarii technologicznych** autor zaliczył wydarzenia w (1) elektrowni Mihama z 1974, (4) Mihama z 12 września 1979, (5) Tokaimura ze stycznia i lutego 1981 oraz (8) Monju z 8 grudnia 1995 r. Cechą wspólną tych wydarzeń jest fakt, że uszkodzenia pojawiały się nie bezpośrednio w samym pomieszczeniu reaktora, ale w systemach chłodzących czy osuszających parę wodną. Istotne jest także to, że ten sam rodzaj uszkodzenia potrafił pojawiać się częściej niż jeden raz w danym obiekcie. Dochodziło też do sytuacji, że awarie o zbliżonym charakterze występowały w kilku różnych elektrowniach należących do tego samego operatora. Wskazywałoby to zatem na istotne błędy konstrukcyjne.

Do **awarii spowodowanych błędem ludzkim** zaliczyłem wydarzenia w (2) Mihama – 1977, (3) Fukushima Daiichi – 1978, (6) Tsuruga – kwiecień 1981, (7) Mihama – lipiec 1981, (9) Shika – 25 maja 1999, (10) Tokaimura – 30 września 1999 oraz (11) Mihama – 9 sierpnia 2004 r. Istotny wpływ na tak liczne przypadki awarii powstałych w następstwie błędu ludzkiego miał brak odpowiednich procedur kontrolnych. Jedną z częstych przyczyn związana była z niedopilnowaniem procedur dotyczących wymaganej liczby prętów paliwowych i sterujących w reaktorze. Na poziom zagrożenia dla środowiska oraz zdrowia i życia ludzkiego wpływał brak informacji o zdarzeniach od odpowiednich organów administracji publicznej.

Do **wydarzeń o charakterze naturalnym** zaliczona została tylko awaria w elektrowni jądrowej Kashiwazaki-Kariwa w 2007 roku, której operatorem jest TEPCO. W wyniku silnego trzęsienia ziemi o magnitudzie 6,6 w skali Richtera, do którego doszło w regionie Chūetsu, nastąpił wyciek setek litrów radioaktywnej wody do Morza Japońskiego [33]. Nie nastąpiło jednak uszkodzenie samych reaktorów, które zgodnie z procedurami przeszły automatycznie w stan bezpiecznego wyłączenia.

Można zauważyć, że wśród wystarczająco dokładnie opisanych awarii przeważają te wynikające z błędów ludzkich. Miały one różny charakter (od popełnienia błędu przy obliczaniu niezbędnych prętów regulacyjnych w reaktorze po niefrasobliwość pracowników), wskazywały jednak na brak umiejętności wyciągania wniosków z poprzednich zdarzeń. Organizacje nie uczyły się ani na błędach

innych operatorów, ani na błędach własnych (czego przykładem są liczne awarie w elektrowni Mihama). Trzeba zdać sobie jednak sprawę, że wykaz ten nie jest kompletny. Ze względu na istniejącą kulturę organizacyjną należy przyjąć, że większość informacji o drobnych wypadkach nigdy nie dotarła do organów nadzorujących oraz opinii społecznej. Analiza poziomu mezo pozwala na wskazanie jednej z przesłanek późniejszej katastrofy w Fukushima: brak procedur pozwalających na uczenie się organizacji na podstawie błędów popełnianych przez innych.

Poziom makro

Trzecim stopniem wpływającym na tworzenie klimatu sprzyjającego awariom elektrowni jądrowych jest poziom kultury nadzoru i organizacji. Dotychczas wskazano dwa obszary przesłanek przyszłej katastrofy: funkcjonowanie przedsiębiorstwa oraz funkcjonowanie sektora rynku. Są to jednak elementy pewnej większej całości, która jest następstwem procesów funkcjonowania w społeczeństwie, jego norm i zwyczajów. W artykule skupiono się na obszarach związanych z bezpieczeństwem i polityką energetyczną państwa oraz wskazano na elementy mogące już wcześniej świadczyć o zagrożeniu poważną awarią elektrowni jądrowej w przyszłości.

Najczęściej wymienianymi pojęciami, gdy porusza się temat funkcjonowania systemu japońskiego, są *amakudari* (zstępować z niebios) oraz *amaagari* (wstąpienie w niebiosy). Oba są formą zacieśniania relacji między administracją publiczną i politykami z jednej strony a prywatnymi przedsiębiorstwami z drugiej. Co istotne, działania te odbywają się poza oficjalnymi kanałami wyznaczonymi przez system prawny. *Amakudari* oznacza ponowne zatrudnienie pracowników administracji publicznej w firmach prywatnych bądź spółkach skarbu państwa po ich przejściu na emeryturę bądź odejściu z pracy [4]. Pensje w biznesie są znacząco wyższe niż w administracji, pozwala to na dorobienie do emerytury, zajmując stanowisko nieniosące ze sobą żadnych istotnych obowiązków. Należy to zatem traktować jako formę nagrody dla pomocnych i usłużnych urzędników. Zbliżone funkcje ma także drugi z wymienionych terminów. Oznacza on zatrudnianie w administracji państwowej, a także przydzielanie miejsc na listach wyborczych do parlamentu osobom pełniącym funkcje eksperckie w biznesie [38]. Stwarza to możliwość przedsiębiorstwom na bardziej bezpośrednie oddziaływanie na proces stanowienia prawa oraz upewnienie się, że nie zostaną podjęte decyzje niekorzystne dla branży. Zjawisko to było tym bardziej istotne, że przed rokiem 2011 za rozwój polityki energetycznej odpowiedzialni byli przede wszystkim urzędnicy średniego stopnia. Sprawiało to, że pomimo przetasowań u władzy kierunek polityki energetycznej od kryzysów naftowych pozostawał stabilny [36].

Nie powinien zatem dziwić fakt, że kolejne rządy aktywnie wspomagały działalność przedsiębiorstw energetycznych. Odbywało się to na dwóch poziomach. Pierwszym, bardziej bezpośrednim, była forma różnego wsparcia dla gmin i prefektur, które zdecydowały się na umiejscowienie na swoim terytorium elektrowni jądrowych [4]. Drugim, bardziej ukrytym, ale mającym zdecydowanie istotniejszy wpływ, było budowanie mitu o całkowitym bezpieczeństwie technologii jądrowej (*anzen shinwa*). Polegał on na powtarzaniu informacji, zarówno przez osoby ze świata mediów, jak i naukowców powiązanych z „atomową wioską”, o całkowitym bezpieczeństwie energetyki jądrowej. Propaganda stała się jeszcze bardziej nasilona po wydarzeniach w Three Mile Island i Czarnobylu [3]. Wszystkie zaprezentowane elementy systemu sprawiły, że jakiegokolwiek próby negacji korzyści płynących z energetyki jądrowej lub wskazania na zagrożenia z niej płynące były zwalczane. Wykorzystano do tego środki zarówno finansowe (ograniczenie reklam w antynuklearnych mediach, brak grantów badawczych dla naukowców), jak i nacisku społecznego (ostracyzm, utrudnienie dostępu do wybranych ścieżek kariery). Dlatego też fałszowanie raportów, ukrywanie zdarzeń eksploatacyjnych, a także zwalnianie pracowników, którzy odważyli się poinformować o problemach organy nadzorcze bądź media odgrywało istotną rolę w utrwaleniu mitu bezpieczeństwa.

Taka forma funkcjonowania systemu zarządzania reaktorami jądrowymi była ze swojej natury sprzeczna z powszechnie uznawanymi zasadami zarządzania kryzysami oraz bezpieczeństwa. Obserwując kształt systemu, a także historię wcześniejszych awarii można było z dużym prawdopodobieństwem przewidzieć przyszłe wystąpienie kolejnej. Oczywiście na tym etapie nie jest możliwe stwierdzenie jej skutków, można było jednak wysnuć wnioski, że mit o bezpieczeństwie wpływał na słabsze przygotowanie państwa na wypadek zdarzenia. Oznaczałoby to, że gdyby sytuacja wymknęła się spod kontroli, państwo nie miało odpowiednich procedur, by na nią zareagować.

Tak funkcjonujący system przyczynił się do powstania nieformalnych więzów pomiędzy politykami, urzędnikami i przedsiębiorstwami noszący nazwę „atomowej wioski”. Projądrowa postawa rządu natrafiła na pierwsze trudności w latach 70. XX wieku. W obliczu międzynarodowego wzrostu liczby protestów przeciwko elektrowniom jądrowym (związanych z pierwszymi ujawnionymi usterkami i wypadkami) podobny nurt zaczął przybierać na sile także w Japonii. Mieszkańcy, kierując się zasadą NIMBY (*Not In My Backyard* – nie w moim ogródku), zaczęli być przeciwni budowie elektrowni jądrowych w okolicach zamieszkania. Aby zaradzić temu problemowi, rząd przyjął dwie strategie, które już w momencie ich podejmowania mogły budzić wątpliwości. Po pierwsze, zdecydował się na koncentrację nowych reaktorów na terenach, gdzie już wcześniej (przed rokiem 1970) mieszkańcy wyrazili na nie zgodę [5]. Celem było zwiększenie potencjału energetyki jądrowej kraju,

dlatego też zagrożenia wynikające z koncentracji znaczącej liczby reaktorów w jednym miejscu były pomijane. Możliwość wystąpienia sytuacji kaskadowej, nawet jeśli była rozważana, nie wpłynęła na kształt ostatecznej decyzji. Po drugie, podjął działania w celu wsparcia finansowego miast, wiosek i prefektur, w których znajdowały się elektrownie jądrowe. Pozwoliło to na zmniejszenie sprzeciwu, gdyż zapewnienie bezpieczeństwa mieszkańców (społecznego, ekonomicznego, ekologicznego etc.) w dużej mierze zależało od transferów finansowych z rządu centralnego. Na przykład w mieście Genkai (prefektura Saga) 60% budżetu miało związek z różnymi transferami łączącymi się z funkcjonowaniem elektrowni, a 1/6 mieszkańców pracowała w nich bądź firmach powiązanych z ich funkcjonowaniem [26, s. 114]. Było to możliwe dzięki zasadzie umiejscawiania elektrowni na terenach wiejskich.

Istotny wpływ miała na to także słabość społeczeństwa obywatelskiego. Japońskie społeczeństwo obywatelskie charakteryzuje się kilkoma dystynktywnymi cechami odróżniającymi je od społeczności zachodnich. Bardzo często rola organizacji pozarządowych ograniczała się do świadczenia „usług” w obszarach, które nie były wystarczająco istotne dla rządu centralnego bądź lokalnego [17]. Działania miały zatem charakter komplementarny, a nie konfliktowy. W tych działaniach niektóre obszary (np. energetyka jądrowa, połowy wielorybów) znajdowały się poza zakresem zaangażowania organizacji społeczeństwa obywatelskiego [17]. Było to zapewne następstwem jego kształtu, określanym jako „4 razy małe”. Organizacje charakteryzowały się małą liczbą członków, małą liczbą profesjonalnych pracowników, małym budżetem oraz małym obszarem działania [17, s. 39]. Z tego też względu unikały angażowania się w sprawy konfliktowe obejmujące swoim działaniem cały system polityczny.

Taki sam sposób postępowania przyjął ruch antynuklearny (nazywany nową falą antynuklearyzmu), który rozwinął się w 1988 roku po wydarzeniach w Czarnobylu. Głównie ograniczony do gospodyń domowych z dużych miast, w trakcie protestów był w stanie zgromadzić maksymalnie 20 tysięcy uczestników [8]. Mimo wszystko działania o charakterze lokalnym przynosiły pewne określone, wymierne sukcesy. Skoro ruchy antynuklearne nie miały wystarczającej siły, by wpłynąć na politykę centralną, podejmowały próby powstrzymania budowy elektrowni w swoim najbliższym sąsiedztwie. Na potrzeby tych działań powstała także grupa dostarczająca pomocy poszczególnym lokalnym ugrupowaniom (*Citizens' Nuclear Information Center*) oraz antynuklearna gazeta (*Hangenpatsu Shinbun*). W następstwie podejmowanych działań z 95 prób zbudowania nowych reaktorów jądrowych tylko 54 razy odniesiono sukces [1, s. 5].

Biorąc pod uwagę wszystkie przedstawione wyżej czynniki, należy stwierdzić, że istotną rolę w systemie zapobiegania kryzysowemu odgrywała struktura organizacyjna organów odpowiedzialnych za energetykę jądrową. Mindy

Kay Bricker sformułowała tezę, że gdyby system stworzony przez rząd funkcjonował prawidłowo i efektywnie, pozwoliłoby to w pewnym stopniu przygotować się na wydarzenia z marca 2011 r. [3, s. 63]. Cechą charakterystyczną systemu było jego rozproszenie. Za promocję i kontrolę nad energetyką jądrową odpowiedzialnych było wiele organów, których kompetencje nieraz się pokrywały. Do najważniejszych podmiotów należało zaliczyć Ministerstwo Edukacji, Kultury, Sportu, Nauki i Technologii (MEXT), METI oraz jej poprzedniczkę MITI, a także organizacje podlegające bezpośrednio premierowi. Wśród najważniejszych, z trzeciej grupy, do roku 2001, była Komisja Energii Jądrowej (JAEC), powstała w 1956 roku na podstawie *Ustawy o energii jądrowej*. Do jej zadań należało przekazywanie zaleceń dotyczących bezpieczeństwa instalacji, kwestii licencyjnych oraz innych pożądanych praktyk pozostałym uczestnikom na rynku energetycznym [21]. Odegrała choćby istotną rolę po incydencie w Monju, gdzie zorganizowała obrady okrągłego stołu, dotyczące bezpieczeństwa w przemyśle jądrowym [18]. W 1978 roku od JAEC oddzieliła się Komisja Bezpieczeństwa Jądrowego (NSC), co miało poprawić zarządzanie bezpieczeństwem. W pierwszym okresie do jej głównych zadań należało przekazywanie rekomendacji odpowiednim organom poprzez premiera [3]. Po roku 2001 jej kompetencje oraz skład osobowy znacząco się zwiększyły, co było następstwem rozwiązania Agencji Nauki i Technologii (STA) [21].

Do zadań MEXT należało promowanie prac badawczo-rozwojowych w obszarze energetyki jądrowej. Celem tych działań było zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego państwa poprzez rozwój najnowszych technologii (jak np. reaktor prędkości, który powstał w Monju), a które mają także zapewnić lepsze wykorzystanie paliwa. Kolejnym celem jest również zapewnienie zrównoważonego rozwoju w regionach, w których znajdują się elektrownie jądrowe [24]. Do roku 2001 do jej struktur należała także STA.

Ostatnim organem jest MITI i jej następczyni METI. Od samego początku istnienia jednym z zadań tego podmiotu była promocja energetyki jądrowej oraz reprezentowanie interesów gospodarczych państwa, a także prywatnych przedsiębiorstw. Po reformie do zadań dołączono także kontrolę w reaktorach komercyjnych oraz ogólnie w elektrowniach jądrowych [32, s. 193]. Doszło zatem do sytuacji, że jedna z instytucji kontrolnych miała równocześnie za zadanie jej promowanie. Jeszcze przed awarią w Fukushima wielokrotnie podkreślano, że taki system prowadzi tylko do nieprawidłowości. Skoro w negocjacjach z rządem oraz innymi ministerstwami Ministerstwo Gospodarki reprezentowało interesy dziesięciu największych producentów energii, było oczywiste, że będzie im zależało na ukrywaniu informacji dotyczących nieprawidłowości. Można nawet pokusić się o stwierdzenie, że należało to do ich ustawowych obowiązków.

W tej części wykazano, że przyczyny awarii nie ograniczają się tylko i wyłącznie do form funkcjonowania organizacji. Także kultura przeważająca na danym terytorium, postrzeganie priorytetów w lojalności do poszczególnych grup oraz funkcjonowanie zewnętrznych organów kontrolnych mają istotny wpływ na rozwój sytuacji.

Konkluzje

Przesłanki wskazujące na możliwość wystąpienia sytuacji kryzysowej zostały podzielone na trzy grupy, w zależności od kryterium zasięgu. Najważniejsze elementy w skali mikro związane są z bezpieczeństwem pojedynczych elektrowni jądrowych oraz pewnością co do prawidłowego funkcjonowania odpowiednich urzędów. W przedstawionych wyżej informacjach zwrócono szczególną uwagę na kwestie związane ze sposobem organizacji systemu bezpieczeństwa w elektrowni jądrowej Fukushima Daiichi. Cechą charakterystyczną systemu była awersja do ujawniania informacji o występujących nieprawidłowościach, a także chęć minimalizacji kosztów za wszelką cenę. Nie należy oczywiście pomijać ograniczeń (czy nawet błędów) projektowych w okresie planowania elektrowni, jednak wśród czynników mikro najistotniejszą rolę odgrywają te związane z działalnością organów kontrolnych oraz władz przedsiębiorstwa.

Na drugim poziomie (mezo) o wiele istotniejszą rolę odgrywają cechy wspólne dla wszystkich przedsiębiorstw z branży energetycznej, w tym także dotyczące kultury organizacyjnej. Istotne zagadnienie stanowił brak procedur pozwalających na uczenie się organizacji na podstawie błędów popełnianych przez innych. Pomimo braku rywalizacji pomiędzy poszczególnymi aktorami, co było zasługą funkcjonowania systemu lokalnych monopolii, współpraca między nimi miała charakter ograniczony do promocji energetyki jądrowej oraz utrzymywania mitu całkowitego bezpieczeństwa.

Na najwyższym poziomie (makro) do elementów wpływających na kształt bezpieczeństwa zaliczone zostały przesłanki związane z dominującą w państwie kulturą oraz funkcjonowaniem organów publicznych odpowiedzialnych za kontrolę branży. Oba elementy wpływają na przedsiębiorstwa w różny sposób. Kultura zapewnia umocowanie podejmowanych decyzji w społeczeństwie i pozwala na ograniczenie krytyki płynącej ze źródeł zewnętrznych w stosunku do organizacji. Było to istotne, gdyż pozwalało na dużo swobodniejszy rozwój energetyki jądrowej niż w sytuacji, gdyby organizacje społeczeństwa obywatelskiego zdecydowały się na wykorzystanie swojej funkcji kontrolnej w stosunku do działających podmiotów z branży energetycznej. Brak poważnych zagrożeń dla rozwoju energetyki jądrowej płynących ze strony społeczeństwa pozwolił firmom energetycznym skoncentrować swoje wysiłki na kontroli organów publicznych odpowiedzialnych

za nadzór. Poprzez system nieformalnych powiązań oraz zjawisk *amakudari* oraz *amaagari* możliwe stało się funkcjonowanie tych firm przy jedynie niewielkim nacisku ze strony rządowej. Pozwoliło to na przedkładanie zysku prywatnych przedsiębiorstw nad kwestie bezpieczeństwa. Z tego też powodu należy stwierdzić, że zjawisko bifurkacji miało swoje źródło zarówno w warunkach wewnętrznych przedsiębiorstw, jak i pochodziło z zewnątrz, tworząc w ten sposób skomplikowany system społeczno-technologiczny, bardziej skłonny do zachowań nieliniowych.

Björn Wahlström zauważył, że w sytuacji gdy analizujemy interakcje poszczególnych elementów systemu elektrowni jądrowych, nawet bardzo proste mogą niespodziewanie ukazać swoją złożoność i prowadzić do bifurkacji oraz zachowań chaotycznych [37, s. 204]. Należy to połączyć z opisaniem przez T. Iwankę faktem, że sytuacje kryzysowe prawie nigdy nie występują w odosobnieniu oraz iż mają często charakter reakcji łańcuchowej [9, 13]. Pozwala to zatem na stwierdzenie, że organizacje działające w tej branży funkcjonują na skraju (krawędzi) chaosu. Część autorów stwierdza nawet, że ilekroć organizacja nie znajduje się w kryzysie, znajduje się w fazie przedkryzysowej [25]. Cechami charakterystycznymi organizacji funkcjonujących na skraju chaosu są: nieprzewidywalność przyszłości, niemożliwość precyzyjnej kontroli, krótkoterminowa nieefektywność, potrzeba ciągłych aktywnych działań, proces ciągłych zmian, a nie jednostkowych rewolucji w ich funkcjonowaniu oraz testowanie otoczenia [15, s. 6-7]. Wszystkie te elementy służą do sformułowania zalecenia, aby w ramach elektrowni jądrowych powoływać wysoko wyspecjalizowane jednostki odpowiedzialne za zapewnienie bezpieczeństwa. Jest to wynikiem tego, że są one systemami złożonymi i niezbędna jest wiedza i doświadczenie z różnych obszarów [37].

Należy zatem stwierdzić, że cel artykułu, którym było określenie elementów wskazujących na nadciągający kryzys, został zrealizowany. Elementy te zostały przedstawione na trzech, wyżej zaprezentowanych, poziomach. Ostatnim elementem jest sprawdzenie zawartej we wstępie hipotezy: *awaria w elektrowni jądrowej Fukushima Daiichi, która miała miejsce 11 marca 2011 roku, nie stanowiła załamania się funkcjonującego systemu i przejścia z modelu deterministycznego na chaotyczny, ale była tylko kolejnym etapem intermitującego kryzysu. System funkcjonujący w Japonii na wiele lat przed wspomnianymi wydarzeniami wykazywał cechy intermitencji, bądź o charakterze dynamiki Pomeau-Menneville'a, bądź wywołanej kryzysem. Zatem, opierając się na istniejących narzędziach, także przed rokiem 2011 można było wskazać na wysokie prawdopodobieństwo wystąpienia poważnej awarii w którejś z elektrowni jądrowych*. By tego dokonać, niezbędne jest określenie, czy możemy mówić o zjawisku intermitencji w omawianym przykładzie, a jeśli tak, to którego typu.

Aby móc stwierdzić występowanie intermitencji, należy orzec, czy trajektoria, którą podąża system, po opuszcze-

niu fazy regularnej przechodzi w sytuację chaotyczną, a następnie wielokrotnie powtarza ten cykl [27, ss. 90–91]. Na podstawie danych przedstawionych w artykule trzeba stwierdzić, że hipoteza została częściowo zweryfikowana. Jak zostało to wcześniej wskazane, system wygląda różnie w zależności od skali, w jakiej go postrzegamy. W przypadku poziomu makro ministerstwa oraz agencji rządowe miały wszystkie niezbędne dane do stwierdzenia, że szanse na wystąpienie kolejnej poważnej awarii są znaczne. Posiadając analizy pochodzące z różnych źródeł, również od niezależnych naukowców, a także o wiele bardziej szczegółowe informacje odnośnie do wydarzeń u poszczególnych operatorów, system miał wszystkie cechy systemu chaotycznego. Historia energetyki jądrowej w Japonii to historia dużej liczby powtarzających się zdarzeń eksploatacyjnych, mniejszych lub większych, we wszystkich przedsiębiorstwach energetycznych. System zatem przechodził z jednej sytuacji chaotycznej do drugiej, nie znajdując się w obszarze normalnego funkcjonowania (intermitencja typu B). Nawet jeśli w jednej elektrowni stan się unormował, po wystąpieniu sytuacji kryzysowej należało cały czas poszukiwać wad w jego funkcjonowaniu. Na tym poziomie mamy także do czynienia z najdoskonalszą formą systemu społeczno-technologicznego. Za kolejne okresy chaotyczne odpowiedzialne były nie tylko aspekty technologiczne wewnątrz elektrowni, ale także cały kompleks funkcjonowania energetyki jądrowej w państwie. Kultura organizacyjna, zjawisko finansowego wsparcia prefektur oraz miast i wsi, gdzie funkcjonowały elektrownie jądrowe w celu eliminacji protestów, propagowanie mitu całkowitego bezpieczeństwa, wszystko to kreowało kolejne punkty bifurkacyjne prowadzące do następnych sytuacji kryzysowych. Warto zauważyć, że bifurkacje powstawały równocześnie w wielu miejscach systemu, zatem mogliśmy mieć do czynienia z występowaniem kilku układów chaotycznych równocześnie lub jednego po drugim. Oczywiście nie oznacza to, że istniała możliwość przewidzenia, iż następna wielka awaria nastąpi dokładnie w tej, a nie innej elektrowni. Jednak podmioty odpowiedzialne za zapewnienie bezpieczeństwa mogły wpływać na poprawę poziomu zabezpieczeń, poprzez wymaganie przygotowania się na najbardziej pesymistyczne scenariusze, nawet jeśli operator (wbrew opiniom naukowców) uznawał je za całkowicie nieprawdopodobne.

O wiele trudniej dostrzec te zjawiska na poziomie mezo. Problem wynika z faktu, że przedsiębiorstwo po awarii jest w stanie wdrożyć odpowiednie procedury zarządzania kryzysowego, zmodyfikować wytyczne dotyczące sprzętu i w ten sposób zapobiec kolejnym awariom tego samego typu. Istotnym problemem występującym tylko na analizowanym poziomie jest znaczna różnica między aspektami technologicznymi oraz procedurami wśród poszczególnych elektrowni i operatorów. Wśród elektrowni jądrowych funkcjonujących w Japonii przed rokiem 2011 były te o reaktorach BWR (reaktor wodny wrzący) oraz PWR

(reaktor wodny ciśnieniowy). Co więcej, w samej elektrowni Fukushima Daiichi funkcjonowały reaktory BWR różnej generacji. Pojawia się zatem problem z dostrzeżeniem elementów wspólnych systemów, które pozwoliłyby na wskazanie procesów intermitencyjnych. By umożliwić przeprowadzenie analizy, należałoby znacząco uprościć badany obszar. Aby tego dokonać, należy przeprowadzić dwa procesy – po pierwsze, uznać każdego z operatorów za jednostkową całość. Oznacza to, że różnice między poszczególnymi elektrowniami są nieistotne, z perspektywy przeprowadzanego studium. Po drugie, należy uznać, co jest bardziej kontrowersyjnym założeniem, że wszystkie występujące awarie należą do jednej kategorii. Oznacza to odrzucenie podziału na incydenty będące następstwem czynnika ludzkiego, technologicznego i katastrofy naturalnej. Pozwala spojrzeć na przyczyny kryzysów z perspektywy norm kulturowych i prawnych funkcjonujących w przedsiębiorstwie. Takie uproszczenie umożliwia wskazanie występowania intermitencji typu A, czyli przeskoków pomiędzy okresami stabilnymi i chaotycznymi. Mimo to mogą się zdarzać między tymi stanami okresy przerwy na tyle długie, że istotne staje się pytanie, czy na pewno mamy do czynienia ze zjawiskiem intermitencji.

To co sprawia trudność przy wybranym operatorze, staje się praktycznie niemożliwe, gdy mowa o pojedynczej elektrowni. Organy zarządzające jednostką nie są w stanie dostrzec, ze środka systemu, możliwości wystąpienia zjawiska intermitencji. Jest to zatem zjawisko losowe, niemożliwe do przewidzenia. Obserwując system z poziomu elektrowni jądrowej Fukushima Daiichi, przewidzenie, że w najbliższym czasie może dojść do poważnej awarii właśnie w niej, okazuje się niemożliwe. Wskazuje na to także typologia kryzysów przyjęta przez B. Ritchiego. Wyróżnił on kryzysy natychmiastowe (*immediate crises*),

gdzie przesłanki wskazujące na jego prawdopodobieństwo są słabe bądź żadne; narastające (*emerging crises*), które kształtują się wolniej, co sprawia, że mogą zostać zatrzymane bądź ich efekty ograniczone; podtrzymujące (*sustained crises*), które mogą trwać tygodnie, miesiące, a nawet lata [25, s. 671]. W przypadku elektrowni jądrowych znacząca liczba wydarzeń ma charakter kryzysów natychmiastowych, gdyż wynikają z jednostkowych błędów w trakcie normalnego funkcjonowania bądź katastrof naturalnych. Najpoważniejsze z awarii (Czarnobyl, Fukushima) przechodzą następnie w kryzysy podtrzymujące, co nie zmienia faktu, że w momencie startowym, z perspektywy jednostki znajdującej się wewnątrz systemu, liczba przesłanek wskazująca na możliwość wystąpienia sytuacji kryzysowej jest niewystarczająca. Nie jest możliwe stwierdzenie występowania zjawiska intermitencji przez osoby odpowiedzialne za bezpieczeństwo konkretnej elektrowni. Równocześnie, obserwując z poziomu makro, można zauważyć, na podstawie danych historycznych oraz dostępnych prognoz, że w najbliższym czasie awaria któregoś z elementów systemu musi się zdarzyć. Zatem zapobieganie powinno być realizowane na poziomach makro oraz mezo, gdyż z perspektywy jednostkowej symptomy są niedostrzegalne.

Notka o autorze

Mgr Michał Snopek – absolwent Wydziału Dziennikarstwa i Nauk Politycznych Uniwersytetu Warszawskiego na kierunku Politologia. Od roku 2014 doktorant na Wydziale Nauk Politycznych i Studiów Międzynarodowych Uniwersytetu Warszawskiego. Tematem pracy doktorskiej jest bezpieczeństwo energetyczne Japonii po wydarzeniach w Fukushima. Zainteresowania skupiają się wokół szeroko pojmowanego bezpieczeństwa energetycznego, ze szczególnym uwzględnieniem państw Dalekiego Wschodu. Istotną rolę w badaniach poświęca zastosowaniu elementów teorii chaosu w naukach o bezpieczeństwie.

Literatura

1. Aldrich D.P., *Post-Crisis Japanese Nuclear Policy: From Top-Down Directives to Bottom-Up Activism*, Asia-Pacific, 2012, no. 103, ss. 1–12.
2. Bjola C., *Diplomacy as world disclosure: A fractal theory of crisis management*, The British Journal of Politics and International Relations, 2015, vol. 18 issue 2, ss. 335–350.
3. Bricker M.K. (red.), *The Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Disaster: Investigating the Myth and Reality*, Routledge, New York 2014.
4. Carpenter S., *Japan's Nuclear Crisis: The Routes to Responsibility*, Palgrave MacMillan, Basingstone 2012.
5. Fujigaki Y., *The Processes Through Which Nuclear Power Plants Are Embedded in Political, Economic, and Social Contexts in Japan*, [w:] Y. Fujigaki (red.) *Lessons from Fukushima. Japanese Case Studies on Science, Technology and Society*, Springer International Publishing, Switzerland 2015, ss. 7–25.
6. *Fukushima Nuclear Accident Analysis Report (Interim Report)*, The Tokyo Electric Power Company, Inc., 02.12.2011, w: http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/111202e14.pdf (dostęp: 15.02.2019).
7. Hara T., *Social Shaping of Nuclear Safety: Before and After the Disaster*, [w:] R. Hindmarsh (red.) *Nuclear Disaster at Fukushima Daiichi: Social, Political and Environmental Issues*, Routledge, New York 2013, ss. 22–40.
8. Hasegawa K., *The Fukushima nuclear accident and Japan's civil society: Context, reactions, and policy impacts*, International Sociology, 2014, vol. 29 issue 4, ss. 283–301.
9. Iwanek T., *Kryzys i jego odmiany*, Wyższa Szkoła Zarządzania „Edukacja”, Wrocław 2004.
10. Jezierski G., *Energia jądrowa wczoraj i dziś*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
11. Kao I., *Japan's TEPCO admits 1978 nuclear criticality*, Reuters, 22.03.2007, w: <http://uk.reuters.com/article/japan-tepco-nuclear-idUKT16854920070322> (dostęp: 15.02.2019).
12. Kapitaniuk T., Wojewoda J., *Bifurkacje i chaos*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1995.
13. Kingston J., *Japan's Nuclear Village*, The Asia-Pacific Journal, 2012, vol. 10 issue 37 no 1, ss. 1–23.
14. *Kokkai jikochō Tōkyōdenryoku Fukushima genshiryoku hatsudenshōjiko chōsaiinkai: hōkokusho* [Parlamentarna komisja ds. wypadku jądrowego w elektrowni jądrowej TEPCO w Fukushima], National Diet of Japan Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, w: http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naaic.go.jp/pdf/naaic_honpen.pdf (dostęp: 15.02.2019).

15. Krupski R., *Istota i krytyka koncepcji organizacji działającej na krawędzi chaosu*, Zeszyty Naukowe WWSZiP, 2010, nr 14, ss. 5–12.
16. Mańkowski C., Implikacje logistyczne teorii chaosu, LogForum, 2009, vol. 5 issue 4 no 4, w:
http://www.logforum.net/pdf/5_4_09.pdf (dostęp: 06.05.2019).
17. Mason R.J., *Japan's Evolving Civic Environmentalism*, [w:] S. B. Kedzio, L. Leonard (red.), *Occupy the Earth Global Environmental Movements*, Emerald Group Publishing Limited, Bingley 2014, ss. 37–61.
18. Mikami N., *Public Participation in Decision-Making on Energy Policy: The Case of the „National Discussion” After the Fukushima Accident*, [w:] Y. Fujigaki (red.) *Lessons from Fukushima. Japanese Case Studies on Science, Technology and Society*, Springer International Publishing, Switzerland 2015, ss. 87–122.
19. Moskalenko O.I., Koronovskii A.A., Zhuravlev M.O., Hramor A.E., *Characteristics of noise-induced intermittency*, Chaos, Solitons and Fractals: the interdisciplinary journal of Nonlinear Science and Nonequilibrium and Complex Phenomena, 2018, vol. 117, ss. 269–275.
20. Murphy P., *Chaos Theory as a Model for Managing Issues and Crises*, Public Relations Review, 1996, vol. 22 no 2, ss. 95–113.
21. Pickett S.E., *Japan's nuclear energy policy: from firm commitment to difficult dilemma addressing growing stocks of plutonium, program delays, domestic opposition and international pressure*, Energy Policy, 2002, vol. 30 issue 15, ss. 1337–1355.
22. Pollack A., *Reactor accident in Japan imperils energy program*, New York Times, 24.01.1996, vol. 145 issue 50347.
23. Powell J.W., *Nuclear Power in Japan*, Bulletin of the Atomic Scientists, 1983, vol. 39 issue 5, ss. 33–39.
24. *R & D in the Nuclear Energy Field*, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, w:
http://www.mext.go.jp/en/policy/science_technology/research_development/title01/detail01/1374001.htm (dostęp: 15.02.2019).
25. Ritchie B.W., *Chaos, crises and disasters: a strategic approach to crisis management in the tourism industry*, Tourism Management, 2004, vol. 25 issue 6, ss. 669–683.
26. Samuels R.J., *3.11 Disaster and Change in Japan*, Cornell University Press, New York 2013.
27. Schuster H.G., *Chaos deterministyczny. Wprowadzenie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
28. *Secondary piping rupture at the Mihama power station in Japan*, United States Nuclear Regulatory Commission, w:
<https://permanent.access.gpo.gov/lps126057/in200608.pdf> (dostęp: 04.01.2017).
29. Seeger M.W., *Chaos and crisis: prepositions for a general theory of crisis communication*, Public Relation Review, 2002, vol. 28 no 4, ss. 329–337.
30. Sienkiewicz-Małjurek K., Krynojewski F.R., *Zarządzanie kryzysowe w administracji publicznej. Zarządzanie bezpieczeństwem*, Diffin SA, Warszawa 2010.
31. Sellnow T.L., Seeger M.W., Ulmer R.R., *Chaos Theory, Informational Needs, and Natural Disasters*, Journal of Applied Communication Research, 2002, vol. 30 no. 4, ss. 269–292.
32. Socha M., *Miedzy ekologią a problemem bezpieczeństwa energetycznego: uwarunkowania zmian w japońskiej polityce energetycznej i klimatycznej w latach 1992–2014*, Uniwersytet Łódzki, Łódź 2015.
33. Sovacool B.K., *A critical Evaluation of Nuclear Power and Renewable Electricity in Asia*, Journal of Contemporary Asia, 2010, vol. 40 no. 3, ss. 369–400.
34. Speakman M., Sharpley R., *A chaos theory perspective on destination crisis management: Evidence from Mexico*, Journal of Destination Marketing & Management, 2012, vol. 1, ss. 67–77.
35. Veil S.R., *Mindful learning in crisis management*, Journal of Business Communication, 2011, vol. 48 issue 2, ss. 116–147.
36. Vivoda V., *Energy Security in Japan: Challenges After Fukushima*, Routledge, Survey 2014.
37. Wahlström B., *Systemic thinking in support of safety management in nuclear power plants*, Safety Science, 2018, vol. 109, ss. 201–218.
38. Wang Q., Chen X., *Regulatory failures for nuclear safety – the bad example of Japan – implication for the rest of world*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, vol. 16 no. 5, ss. 2610–2617.
39. Wycisłak S., *Wykorzystanie teorii chaosu w zarządzaniu przedsiębiorstwem*, Organizacja i Kierowanie, 2009, nr 1, ss. 37–50.

Energetyka jądrowa w Ameryce Łacińskiej

Przemysław Czubek
Ministerstwo Spraw Wewnętrznych i Administracji

W poniższym tekście autor przedstawia początki energetyki jądrowej w Ameryce Łacińskiej oraz jej stan obecny w Argentynie, Brazylii i Meksyku, czyli państwach posiadających elektrownie jądrowe, oraz przybliża plany powstania bądź rozwoju tego typu infrastruktury energetycznej w państwach regionu.

Na wstępie należy jednak wyjaśnić, co kryje się pod terminem Ameryka Łacińska. Jest to pojęcie wielowymiarowe biorące pod uwagę czynniki geograficzne, kulturowe i polityczne oraz łączące w sobie wszystkie Ameryki inne niż anglosaska. Wyraz „Ameryki” nie został tu użyty przypadkowo, ponieważ w istocie rzeczy nie ma jednej Ameryki Łacińskiej. Jest ich wiele, m.in. Hispanoameryka, Lusoameryka, Iberoameryka, Ameryka Frankońska, Afroameryka czy Indoameryka. W niniejszym tekście autor skoncentruje się na energetyce jądrowej w dwóch Amerykach – Hispanoameryce i Lusoameryce, czyli Amerykach hiszpańsko- i portugalskojęzycznych.

Stan obecny

W regionie Ameryki Łacińskiej i Karaibów jedynie 2% energii elektrycznej produkowanej jest z użyciem energii jądrowej. Za jej wytwarzanie odpowiedzialnych jest 7 reaktorów jądrowych znajdujących się w Ameryce Łacińskiej.

Trzy z nich znajdują się w Argentynie oraz po dwa w Brazylii i Meksyku. Wytwarzają one odpowiednio około 5%, 3% oraz 4% energii produkowanej w poszczególnych krajach.

Głównym źródłem energii pozostaje hydroenergetyka, dzięki której produkowane jest 48% energii elektrycznej. Na dalszych miejscach znajdują się paliwa kopalne oraz odnawialne źródła energii, z których wytwarza się odpowiednio 38% i około 13% energii elektrycznej.

Argentyna

Pierwszym krokiem w argentyńskim programie jądrowym było utworzenie w 1950 r. przez prezydenta Juana Perona Komisji ds. Energii Nuklearnej (*Comisión Nacional de Energía Atómica*, CNEA). Stała się ona podstawową instytucją rządową odpowiedzialną za prace nad krajowym programem jądrowym, w tym za prace badawcze i rozwojowe oraz kształcenie kadr w celu pozyskania specjalistów w dziedzinie fizyki jądrowej. Przez blisko 14 lat prace prowadzone przez CNEA zaowocowały stopniowym wzrostem technologicznej autonomii dotyczącej reaktorów jądrowych. Prace nad programem jądrowym znacznie przyspieszyły w czasach rządów wojskowych w latach 70. i 80. XX wieku. Sprawujący dyktatorską władzę generałowie nie poprzestali jednak na cywilnym wykorzystaniu

Tabela 1. Elektrownie jądrowe w Ameryce Łacińskiej

Nazwa elektrowni	Lokalizacja	Kraj	Typ reaktora	Moc MW(e)	Dostawca reaktora	Data rozpoczęcia działalności komercyjnej
Atucha I	Lima	Argentyna	PHWR	340	SIEMENS	1974-06-24
Atucha II	Lima	Argentyna	PHWR	693	SIEMENS	2016-05-26
Embalase	Embalase	Argentyna	PHWR	600	AECL	1984-01-20
Angra	Itaorna Beach	Brazylia	PWR	609 1275	WE KWU	1985-01-01 (pierwszy reaktor) 2001-02-01 (drugi reaktor)
Laguna Verde	Okolice Palma Sola	Meksyk	BWR	654 654 (od 2010 777+775)	GE GE	1990-07-29 1995-04-10 (oba zmodernizowane w 2010 r.)



Elektrownia jądrowa Atucha (fot. Wikipedia).

energii jądrowej i zlecieli rozpoczęcie prac nad wojskowym programem wykorzystania energii jądrowej. Argentynie nie udało się jednak osiągnąć odpowiedniego poziomu wzbogacenia uranu umożliwiającego budowę broni jądrowej, jednak prace prowadzone w tym kierunku, jak i program argentyńskiej marynarki wojennej, w ramach którego zamierzano opracować pociski rakietowe krótkiego zasięgu, uprawdopodobnia tezę o próbie stworzenia przez Buenos Aires bomby atomowej i uczynienie z Argentyny państwa nuklearnego.

W 1964 r. rozpoczęto prace projektowe, a w 1968 r. ruszyła budowa pierwszej elektrowni jądrowej w Ameryce Łacińskiej nazwanej Atucha I. Na jej lokalizację wybrano miejsce leżące około 100 km na północny zachód od Buenos Aires w sąsiedztwie miasta Lima. Głównym wykonawcą została spółka Kraftwerk Union AG (KWU) będąca spółką zależną od dwóch niemieckich firm – Siemens oraz Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (AEG). Prace nad elektrownią o mocy 340 MW(e) trwały do 1974 r., kiedy to weszła ona do komercyjnego użytku. Przy jej budowie brało udział wielu krajowych podwykonawców. Udział argentyńskich firm przy budowie elektrowni wyniósł 36,7% całkowitych kosztów przedsięwzięcia.

Buenos Aires nie zamierzało jednak wybudować tylko jednej elektrowni jądrowej. Dlatego w 1967 r. rozpoczęto pracę nad studium wykonalności dla drugiej elektrowni jądrowej, której budowa została rozpoczęta w 1974 r. Nadano jej nazwę Embalse pochodzącą od miasta, w którego sąsiedztwie powstała. Na jej lokalizację wybrano miejsce położone znacznie dalej od stolicy kraju, leżące około 600 kilometrów na południowy wschód od elektrowni. W tym wypadku głównym wykonawcą zostało kanadyjsko-włoskie konsorcjum, w którego skład wchodziły włoska firma Italmimpianti oraz kanadyjska AECL (*Atomic Energy of Canada Limited*). Elektrownia jądrowa o mocy 600 MW(e) została przyłączona do sieci w 1984 r.

Trzecia argentyńska elektrownia jądrowa powstała obok pierwszej zbudowanej w okolicy miasta Lima. Nadano jej nazwę Atucha II. Na głównego wykonawcę wybrano podobnie jak w przypadku elektrowni Atucha I

Kraftwerk Union AG, które w tym okresie było już w pełni kontrolowane przez Siemens. Prace nad nią rozpoczęły się w 1979 r., a sama budowa ruszyła w 1981 r. Początkowo elektrownia o mocy 693 MW(e) miała uzyskać zdolność operacyjną w 1987 r. Jednak bankructwa Argentyny w 1982 oraz w 1989 r. i wynikające z nich ograniczenia budżetowe nie pozwoliły na dokończenie prac wstrzymanych w 1994 r. Atucha II była wtedy ukończona w 81%. Kolejnym ciosem dla południowoamerykańskiej republiki było następne bankructwo w 2002 r. Zaciskanie pasa przez kolejne rządy oraz przeznaczenie środków budżetowych na cele uważane za ważniejsze w danym momencie nie pozwoliło na wyasygnowanie sumy umożliwiającej podjęcie wstrzymanych prac. Budowę wznowiono dopiero w 2006 r. w wyniku przyjęcia Narodowego Planu Jądrowego. Jednym z celów było dokończenie budowy elektrowni. Elektrownia jądrowa została podłączona do argentyńskiej sieci energetycznej w 2014 r. po 34 latach od rozpoczęcia budowy. Rozwój energetyki jądrowej w kraju wymagał również stworzenia odpowiednich instytucji odpowiedzialnych za zapewnienie bezpieczeństwa jądrowego oraz kontrolę jego stanu. W przypadku Argentyny za dozór jądrowy, przygotowanie przepisów, prowadzenie analiz i ocen bezpieczeństwa, wydawanie odpowiednich zezwoleń oraz egzekwowanie przepisów odpowiada Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN).

Brazylia

Początek prac nad Brazylijskim programem jądrowym wiąże się z powstaniem w 1951 r. Narodowej Rady na rzecz Naukowego i Technologicznego Rozwoju (*Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico*, CNPq), pod której auspicjami rozwijano technologie jądrowe. Program ten uległ przyspieszeniu w czasie trwania dyktatury wojskowej rządzącej Brazylią w latach 1964-1985. Brazylijscy wojskowi nie ograniczyli się jednak do rozwoju energii jądrowej na użytek cywilny. W odpowiedzi na działania argentyńskich rywali rozpoczęli rozwijać energię jądrową również na użytek wojskowy, co poskutkowało rozpoczęciem przez Wojska Lądowe, Marynarkę Wojenną i Siły Powietrzne szeregu tajnych programów wojskowych mogących doprowadzić do powstania broni jądrowej. Podobnie jak w Argentynie, rozwijano technologie rakietowe, a w roku 1987 po upadku dyktatury wojskowej prezydent José Sarney ogłosił, że Brazylii udało się osiągnąć pułap wzbogacenia uranu równy 20%, po jego przekroczeniu uran może zostać wykorzystany do celów wojskowych.

Południowoamerykański wyścig zbrojeń zakończył się dopiero w 1991 r., gdy po dwóch latach rozmów podpisano porozumienie pomiędzy obydwojema krajami i stworzono Argentyńsko-Brazylijską Agencję ds. Ewidencjonowania i Kontroli Materiałów Jądrowych (*Agencia Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares*, ABACC). Agencja ta odpowiada za wymianę infor-



Elektrownia jądrowa ANGRA (fot. Wikipedia).

macji i kontrolowanie programów atomowych prowadzonych przez obydwa państwa.

Decyzja o budowie pierwszej brazylijskiej elektrowni jądrowej nazwanej ANGRA zapadła w 1970 r. Jej wykonawcą miał zostać wybrany w międzynarodowym przetargu. Zwycięzcą została firma Westinghouse Electric Corporation pochodząca ze Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej mająca dostarczyć m.in. reaktor o mocy 609 MW(e) nazwany ANGRA I. Budowa rozpoczęła się w następnym roku. Na jej lokalizację wybrano część wybrzeża położonego pomiędzy Rio de Janeiro i São Paulo. Ukończenie przedsięwzięcia nastąpiło w 1985 r. Wtedy to nowo powstała elektrownia rozpoczęła komercyjne użytkowanie.

Brazylijskie władze nie chciały poprzestać na budowie jednej elektrowni jądrowej i już w 1975 r. podpisały z rządem Niemiec Zachodnich porozumienie o budowie kolejnych elektrowni. Umowa zakładała jak najszybsze dostarczenie przez KWU dwóch reaktorów o mocy około 1300 MW(e) każdy oraz przekazanie technologii umożliwiającej zbudowanie kolejnych sześciu, przy wynoszącym 90% udziale brazylijskiego przemysłu. W 1976 r. ruszyła budowa reaktora ANGRA II o mocy 1275 MW(e), która z powodów finansowych i związanych z nimi spowolnieniem prac oraz ich kilkukrotnym wstrzymaniem zakończyła się dopiero w 2001 r., kiedy to elektrownia rozpoczęła komercyjną działalność. Ambitne plany Brazylii zakończyły się ukończeniem tylko jednego reaktora z planowanych ośmiu. Kolejnym miał być ANGRA III. Prace nad reaktorem rozpoczęto w 1984 r. Budowa została jednak zawieszona w 1986 r., zanim prace nad nim nabrały rozpędu. Do projektu powrócono po 20 latach. Budowa ponownie ruszyła 2010 r., by w 2015 r. po raz kolejny ulec zawieszeniu. Było to wynikiem gigantycznego skandalu korupcyjnego, który wstrząsnął Brazylią. Według obecnych planów elektrownia ma rozpocząć pracę w 2026 r.

W Brazylii, podobnie jak w Argentynie, wraz z rozwojem energetyki jądrowej powstały odpowiednie instytucje odpowiedzialne za zapewnienie bezpieczeństwa jądrowego

oraz kontrolę jego stanu. W tym kraju za dozór jądrowy, przygotowanie przepisów, prowadzenie analiz, ocenę bezpieczeństwa, wydawanie odpowiednich zezwoleń oraz egzekwowanie przepisów odpowiada National Nuclear Energy Commission (*Comissão Nacional de Energia Nuclear*, CNEN).

Meksyk

Meksykańskie zainteresowanie energią jądrową, podobnie jak w Argentynie i Brazylii, sięga lat 50. XX wieku. Pierwsze poważne kroki na drodze do budowy elektrowni jądrowej podjęto jednak dopiero w 1966 r., kiedy to rozpoczęto wstępne badania nad przyszłą lokalizacją reaktorów i innej niezbędnej infrastruktury. Pod koniec dekady zdecydowano, że energia jądrowa może odgrywać ważną rolę w meksykańskiej energetyce. W 1969 r. zorganizowano przetarg i zaproszono potencjalnych wykonawców do składania ofert. Meksyk chciał nabyć dwa reaktory, każdy o mocy około 600 MW(e). Oferty zaczęły napływać rok później, a w 1972 r. dokonano wyboru przyszłego wykonawcy prac oraz dostawcy reaktora. Zwycięzcą została firma General Electric z USA. Budowa elektrowni jądrowej, której nadano nazwę Laguna Verde, rozpoczęła się w 1976 r. Na jej lokalizację wybrano wybrzeże niedaleko miejscowości Palma Sola leżącej w stanie Veracruz Reaktory. Pierwszy reaktor (Laguna Verde 1) rozpoczął komercyjną działalność w 1990 roku, a drugi (Laguna Verde 2) w 1995 r. Ostatecznie obydwa reaktory miały po 654 MW(e) mocy każdy. W 2010 r. reaktory przeszły modernizację. W jej wyniku pierwszy z nich dysponuje obecnie mocą równą 777 MW(e), a drugi 775 MW(e).

W Meksyku pierwotnie za całość jądrowej aktywności odpowiadała National Commission for Nuclear Energy (CNEN), która została później przekształcona w National Institute on Nuclear Energy (INEN). Ostatecznie po podziale INEN za dozór jądrowy, przygotowanie przepisów, prowadzenie analiz, ocenę bezpieczeństwa, wydawanie odpowiednich zezwoleń oraz egzekwowanie przepisów odpowiada National Commission for Nuclear Safety and Safeguards (CNSNS).



Elektrownia jądrowa Laguna Verde (fot. Wikipedia)

Przyszłość energetyki jądrowej w Ameryce Łacińskiej

Bogate złoża paliw kopalnych, wykorzystanie energii rzek oraz odnawialnych źródeł energii, jak i skomplikowana sytuacja ekonomiczna wielu państw w Ameryce Łacińskiej sprawiają, że w regionie nie widzi się potrzeby szybkiego rozwoju energetyki jądrowej i oparcia na niej swoich systemów energetycznych. W regionie panuje również nieufność do tego typu energetyki spotęgowana w 2011 r. katastrofą w Fukushima. Nie znaczy to jednak, że państwa niedysponujące reaktorami jądrowymi wykorzystywanymi do produkcji energii elektrycznej, jak i te posiadające elektrownie jądrowe nie są zainteresowane rozwojem energetyki jądrowej lub budową kolejnych obiektów wytwarzających energię przez wykorzystanie energii pochodzącej z rozszczepienia jąder atomów. Dostrzegają one korzyści w wymiarze gospodarczym, ochrony środowiska oraz bezpieczeństwa płynące z tego źródła energii, jednak z powodów wymienionych na początku akapitu nie muszą podejmować w tym zakresie szybkich decyzji.

Jednym z państw chcących rozwijać swoją energetykę z wykorzystaniem energii jądrowej jest Argentyna. Buenos Aires obecnie buduje mały prototypowy reaktor o mocy 25 MW(e) oraz planuje budowę reaktora o mocy 1150 MW(e) we współpracy z Chinami. W tym celu zawarło w 2014 r. z Państwem Środka porozumienie dotyczące współpracy oraz przekazania technologii niezbędnych do budowy reaktora. Między 2015 r. a 2017 r. podpisano z Chinami szereg kontraktów związanych z budową reaktora Atucha 3. Pekin ma zapewnić 85% środków finansowych. Budowa ma rozpocząć się w 2020 r.

Strategia rozwoju energetyki jądrowej przewidują również budowę kolejnych reaktorów. Piąty z nich miał również powstać we współpracy z Chinami, jednak plany budowy zostały unieważnione na początku 2019 r. O ewentualny kontrakt na budowę reaktorów zabiegają również Rosjanie, którzy od 2010 r. zawarli z Argentyńczykami szereg umów o współpracy na polu energii jądrowej. Plany te (tak jak budowa czwartego reaktora) z dużym prawdopodobieństwem nie zostaną zrealizowane w najbliższej przyszłości. Znajdująca się w permanentnym kryzysie gospodarczym Argentyna, która obecnie jest na skraju kolejnego bankructwa, nie będzie mogła przeznaczyć funduszy na ten cel. Nie wydaje się również prawdopodobne, by Rosja czy Chiny zdecydowały się zaryzykować udział w tak kosztownej inwestycji w kraju z bardzo niestabilną sytuacją gospodarczą. Szczególnie po lekcji wyniesionej ze znajdującej się w kryzysie politycznym i ekonomicznym Wenezueli, która z wielkim trudem stara się obecnie spłacać swoje zobowiązania finansowe wobec tych dwóch krajów.

Brazylia, podobnie jak sąsiad z południa, stara się planować w dłuższym okresie rozwój energetyki jądrowej. Plany przewidują dokończenie budowy reaktora Angra 3. W grze pozostają firmy z Rosji, Chin, Korei Południowej

i konsorcjum francusko-japońskie. Jak na razie, nie podjęto żadnych wiążących decyzji w tym zakresie. W dalszej perspektywie znajduje się budowa kolejnych elektrowni o łącznej mocy 4000 MW(e). Plany te prawdopodobnie też nie zostaną zrealizowane lub zostaną wykonane tylko częściowo. Wynika to z trudnej sytuacji gospodarczej Brazylii i konieczności wprowadzania cięć budżetowych. Najbardziej prawdopodobne jest dokończenie budowy reaktora Angra 3.

Meksykańskie plany w zakresie budowy nowych reaktorów jądrowych są jeszcze mniej zaawansowane. W kraju prowadzi się analizy oraz studium wykonalności dla inwestycji w energetykę jądrową. Rozważana jest budowa 3 nowych reaktorów jądrowych. Nowe reaktory miałyby zostać oddane do użytku odpowiednio w latach 2029, 2030 oraz 2031.

Pozostałe państwa regionu nie mają konkretnych planów budowy elektrowni jądrowych bądź z nich zrezygnowały. Chile obecnie prowadzi analizy mające dać odpowiedź na pytanie, czy energia jądrowa może być jednym z głównych filarów polityki energetycznej państwa. Boliwia zaś w 2015 r. podpisała z Rosją porozumienie o współpracy w rozwoju boliwijskiego programu jądrowego. Jej efektem było m.in. powstanie w 2016 r. Boliwijskiej Agencji Atomowej (ABEN), a także rozpoczęcie budowy centrum odpowiedzialnego za badania dotyczące energii jądrowej. Jego budowa ma zostać zakończona w 2022 r.

Pozostałe państwa nie prowadzą obecnie programów związanych z rozwojem energetyki jądrowej bądź z nich zrezygnowały. Kuba ostatecznie zaprzestała budowy elektrowni jądrowej w 2000 r. Rozpoczęty w 1983 r. program zakładał budowę na karaibskiej wyspie dwóch reaktorów jądrowych. Ich wykonawcą miał być Związek Sowiecki, jednak jego upadek doprowadził do przerwania budowy w 1992 r. Kilukrotnie podejmowane próby wznowienia budowy nie powiodły się. Wenezuelski program budowy przez Rosję elektrowni jądrowej zakończył się zaś wraz z katastrofą w Fukushima. Po tym wydarzeniu Caracas wycofało się z umowy z Rosjanami. Peru z tego samego powodu co Wenezuela zrezygnowało z planów inwestycji w energię jądrową.

Ciekawym przypadkiem jest Urugwaj, w którym użycie energii jądrowej jest zakazane przez prawo.

Podsumowanie

W zakresie stosunku do problematyki związanej z energią jądrową w Ameryce Łacińskiej widać wyraźny podział na państwa, w których działają elektrownie jądrowe oraz te, które ich nie posiadają. Pierwsza grupa stara się doprowadzić do budowy kolejnych. W drugiej występują różne postawy. Niektóre z państw budują fundamenty pod ewentualne przyszłe programy związane z energetyką jądrową poprzez powoływanie instytucji zajmujących się energią

jądrową oraz szkolenie kadr. Inne rezygnują z rozwoju energetyki jądrowej lub wykorzystanie energii jądrowej na ich terytorium jest zakazane. Wysiłki na rzecz budowy nowych elektrowni jądrowych będą jednak w dużym stopniu zależeć od sytuacji gospodarczej i politycznej poszczególnych państw. Obecnie atomowa trójka zмага się z większymi lub mniejszymi problemami natury politycznej i ekonomicznej, a budowa elektrowni jądrowych w innych państwach to sprawa przyszłości. Stawia to plany

rozwoju energetyki jądrowej w Ameryce Łacińskiej pod znakiem zapytania.

Notka o autorze

Przemysław Czubek – absolwent Instytutu Nauk Politycznych Uniwersytetu Warszawskiego, kierunek Bezpieczeństwo Wewnętrzne oraz absolwent Centrum Studiów Latinoamerykańskich Uniwersytetu Warszawskiego. Od kilku lat związany z administracją rządową. Obecnie pracownik Ministerstwa Spraw Wewnętrznych i Administracji.

Literatura

https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/19-00521_web.pdf
<https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/cnpp2018/countryprofiles/Argentina/Argentina.htm>
<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/cnpp2018/countryprofiles/Chile/Chile.htm>
<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/cnpp2018/countryprofiles/Brazil/Brazil.htm>
<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/cnpp2018/countryprofiles/Mexico/Mexico.htm>
<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/argentina.aspx>
<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/brazil.aspx>
<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/mexico.aspx>
<http://www.coha.org/nuclear-security-issues-in-latin-america-and-the-caribbean/>
<https://worldpolicy.org/2012/05/14/in-latin-america-nuclear-power-on-shaky-ground/> <http://large.stanford.edu/courses/2018/ph241/choi-e2/>
<https://energytransition.org/2016/09/has-nuclear-power-been-abandoned-latin-america/>
<https://www.globalsecurity.org/wmd/world/brazil/nuke.htm> <https://www.nti.org/learn/countries/argentina/>
<https://www.neimagazine.com/news/newsbolivian-nuclear-research-centre-to-be-completed-ahead-of-sc>

Szanowni Czytelnicy

Zachęcamy do współtworzenia biuletynu
Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna.
Zapraszamy do przesyłania na adres biuletyn@paa.gov.pl
propozycji tematów artykułów, które chcieliby
Państwo opublikować w biuletynie.

Szczegółowe informacje dla autorów na stronach PAA.

