



Katarzyna Skolik,  
Katedra Energetyki Jądrowej, AGH; UJV Rez a.s.

# Energetyka jądrowa w Polsce i na świecie

Obecnie (stan na 8.01.2020) na świecie pracuje 448 reaktorów jądrowych, pokrywając ok. 10% zapotrzebowania na energię elektryczną. Najwięcej (96) reaktorów znajduje się w USA, na kolejnych miejscach są Francja (58) i Chiny (48). Rozwój energetyki jądrowej na całym świecie jest koniecznością i warunkiem pozwalającym na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych w świetle obecnego kryzysu klimatycznego. Niestety, trendy nie są optymistyczne, a kraje europejskie wręcz odwracają się od energetyki jądrowej. Sztandarowym przykładem są Niemcy, gdzie zamknięto już większość elektrowni jądrowych, a pozostałe 6 bloków ma zostać wyłączonych do końca 2022 r.

Najwięcej spośród budowanych obecnie reaktorów jądrowych powstaje w krajach rozwijających się (Chiny - 10 reaktorów i Indie - 8), natomiast są to ilości zbyt małe by znacząco zmniejszyć ogromne emisje powodowane przez opartą na węglu energetykę w tych krajach. Dla przykładu, 48 pracujących obecnie w Chinach reaktorów jądrowych wytwarza zaledwie ok. 4% całej energii elektrycznej produkowanej w tym kraju.

Polski Program Energetyki Jądrowej (PPEJ) funkcjonuje już od 2010 r., a jego pierwotna wersja przewidywała

podłączenie do sieci pierwszego bloku jądrowego w 2025 r. Jednak od tamtego czasu żadne konkretne decyzje nie zostały podjęte i już wiadomo, że ta data jest nierealna. Obecnie, według planów zawartych w Polityce Energetycznej Polski (PEP2040, wersja zaktualizowana w listopadzie 2019 r.) pierwszy blok energetyczny z reaktorem jądrowym miałby powstać w Polsce do 2033 r.

Rozwój energetyki jądrowej, tak w Polsce, jak i na całym świecie powinien odbywać się dwutorowo - poprzez budowanie nowych, dużych bloków jądrowych pozwalających na wytwa-

rzanie dużych ilości energii elektrycznej w jednym miejscu (~1000 MWe/reaktor), a także poprzez wprowadzenie masowej produkcji małych reaktorów modułowych (Small Modular Reactors - SMR, ~50 MWe / reaktor). Zarówno reaktory o dużej mocy, jak i te małe mają swoje specyficzne cechy i zastosowania. Porównanie jednego z nowoczesnych projektów reaktora dużej mocy (AP600) z małym reaktorem modułowym (NuScale) jest tematem mojej pracy doktorskiej i w dużym skrócie zostanie opisane w kolejnych rozdziałach.

## ■ Reaktory dużej mocy (generacja III i III+)

Obecnie budowane i podłączane do sieci reaktory jądrowe należą do kolejnej generacji (III oraz III+) reaktorów jądrowych. Oznacza to wprowadzenie pewnych ulepszeń i innowacyjnych rozwiązań w stosunku do pracujących już reaktorów II generacji. Nowe projekty bazują jednak najczęściej na tych już sprawdzonych i dobrze poznanych (przede wszystkim reaktory lekkowodne - *Light Water Reactors*, LWR).

Głównymi celami wprowadzanych zmian są:

- przedłużenie czasu operacji reaktora do co najmniej 60 lat,
- poprawa bezpieczeństwa,
- zwiększenie efektywności wykorzystania paliwa uranowego.

Nowe projekty mają szereg zalet w porównaniu z tradycyjnymi, starszymi rozwiązaniami. Niestety, ich wprowadzenie wiąże się często z negatywnym efektem First of a Kind (FOAK), co oznacza, że pierwsze konstrukcje danego typu reaktora niosą za sobą duże, trudne do przewidzenia koszty i znaczne opóźnienia (jak w przypadku projektu EPR w elektrowni Flamanville we Francji).

Jednym z takich nowoczesnych, obiecujących projektów jest reaktor AP1000, bazujący na wcześniej opracowanym AP600. Obydwa reaktory zostały stworzone przez amerykańską firmę Westinghouse, uzyskując licencję w 1999 i 2005 r. Projekt bazuje na najlepiej poznanym i najszerzej wykorzystywanym na świecie rozwiązaniu - reaktora ciśnieniowego chłodzonego lekką wodą (*Pressurized Light Water Reactor* lub po prostu LWR). Nowoczesność tego projektu polega głównie na uproszczonej konstrukcji (mniej zaworów, pomp, rur, itp.) oraz wykorzystaniu pasywnych systemów bezpieczeństwa. Oznacza to, że zadziałanie odpowiednich systemów mających zapobiec konsekwencjom dalszej awarii projektowej nie jest zależ-

ne od dostępności energii elektrycznej. Rozwiązania te bazują na prawach fizyki, jak naturalna konwekcja, różnice ciśnień, przepływ wody pod wpływem siły grawitacji. Dzięki temu, jeśli reaktor zostanie awaryjnie wyłączony, a awaryjne silniki Diesla zawiadą, ciepło powyląčenowe z reaktora wciąż będzie odbierane przez pasywne systemy i nie dojdzie do niebezpiecznego uszkodzenia, a w najgorszym przypadku - stopienia rdzenia reaktora.

Takie rozwiązanie wymaga jednak potężnych konstrukcji i dużej ilości wody obecnej zawsze w zbiornikach awaryjnych, tak aby umożliwić jej przepływ w przypadku awarii. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie reaktor AP1000 wraz z pasywnymi systemami bezpieczeństwa (główna część reaktora z rdzeniem zawierającym paliwo uranowe to RV - *Reactor Vessel*).

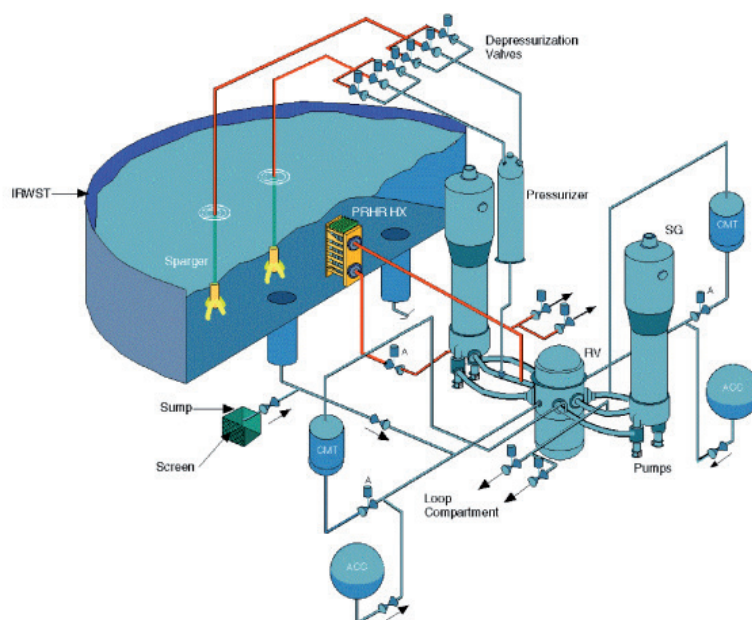
## ■ Małe reaktory modułowe - SMR

SMR (*Small Modular Reactors*) to popularne w ostatnim czasie małe reaktory modułowe. Są to projekty wykorzystujące różne technologie (pod względem

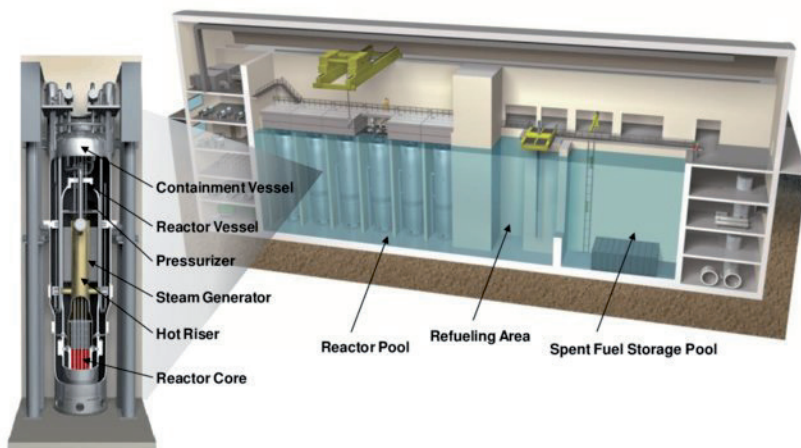
wzbogacenia i składu paliwa, rodzaju chłodziwa i moderatora, parametrów pracy, itd.) o mocy elektrycznej do 300 MW. Główną cechą odróżniającą projekty SMR od powszechnych reaktorów dużej mocy jest ich modułowość. Oznacza to że zbiornik reaktora może być produkowany w fabryce i w całości przewieziony na miejsce pracy, pozwalając tym samym na zmniejszenie kosztów i czasu budowy, a docelowo umożliwiając tańszą produkcję takich jednostek. Nie jest to nowa koncepcja, gdyż tego typu jednostki o małej mocy były wykorzystywane już w latach 50. XX w. w łodziach podwodnych (przede wszystkim ze względu na bardzo długi czas pracy bez wymiany paliwa). W ostatnich latach pomysł na małe reaktory modułowe wraca do łask i wiele nowoczesnych projektów tego typu jest opracowywanych przez firmy na całym świecie.

Główne cechy reaktorów SMR to:

- modułowa konstrukcja (zmniejszenie kosztu i czasu budowy, możliwość dostawiania kolejnych modułów do istniejącej elektrowni),
- lepsze cechy bezpieczeństwa (mniejsza gęstość mocy, łatwiejszy



Rys. 1. Duży reaktor lekkowodny AP1000 wraz z pasywnymi systemami bezpieczeństwa



Rys. 2. Mały reaktor modułowy NuScale i elektrownia z takimi modułami

odbiór ciepła powyłączeniowego z mniejszego rdzenia),

- potencjalne źródło energii dla regionów odizolowanych, a także dla dużych zakładów przemysłowych,
- nieelektryczne zastosowania (produkcja wodoru, ciepłownictwo, odsalanie wody),
- bardzo długi czas pracy bez konieczności przeładowania paliwa.

Reaktory SMR mogą stanowić alternatywę dla klasycznych reaktorów dużej mocy - projektanci zakładają możliwość budowania kilku lub kilkunastu modułów w jednej elektrowni, uzyskując w ten sposób moc porównywalną z dużymi blokami. Natomiast ich uniwersalność i mnogość zastosowań sprawia, że powinny stanowić dodatkową ścieżkę rozwoju energetyki jądrowej, nie zastępując przy tym dużych jednostek.

Większość rozwijanych projektów SMR bazuje na dobrze poznanej technologii lekkowodnej - tak jak opisany wcześniej reaktor AP600/AP1000. Jednym z najbardziej obiecujących projektów tego typu jest reaktor NuScale opracowany początkowo w Oregon State University w USA (teraz rozwijany przez firmę NuScale Power), będący obecnie bardzo blisko uzyskania licencji amerykańskiej Nuclear Regulatory Commission (NRC). NuScale to reaktor zintegrowany (iPWR - *integral Pressurized*

*Water Reactor*), co wiąże się z bardzo uproszczoną budową w stosunku do klasycznych jednostek. Wszystkie komponenty pierwszego obiegu znajdują się w ciśnieniowym zbiorniku reaktora (RPV - *Reactor Pressure Vessel*). Ten z kolei jest umieszczony w próżniowej obudowie bezpieczeństwa (containment), posadowionej pod ziemią w basenie reaktora. Taka konstrukcja eliminuje znaczną część potrzebnego orurowania i praktycznie uniemożliwia wystąpienie awarii związanej z utratą chłodziwa. Nawet w przypadku uszkodzenia zbiornika reaktora chłodziwo jest zatrzymywane w obu-

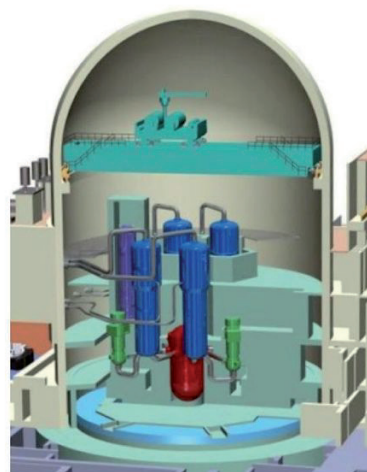
dowie, zapewniając odbiór ciepła powyłączeniowego. W trakcie normalnej pracy reaktora chłodziwo krąży w zbiorniku reaktora wyłącznie pod wpływem naturalnej cyrkulacji (podgrzanie wody przy omywaniu położonego w dolnej części rdzenia i chłodzenie po przejściu przez wymiennik ciepła umieszczony w górnej części). Dzięki temu nie używa się pomp chłodziwa, koniecznych w dużych reaktorach.

### ■ Porównanie bezpieczeństwa reaktorów jądrowych lekkowodnych o dużej i małej mocy

W mojej pracy doktorskiej skupiłam się na porównaniu bezpieczeństwa reaktorów lekkowodnych: dużej mocy (AP600) oraz małej mocy (NuScale). Taki wybór jest uzasadniony, ponieważ reaktory wykorzystują podobną technologię (lekka woda jako chłodziwo i moderator, utrzymywana pod wysokim ciśnieniem kilkunastu megapaskali) oraz to samo paliwo (uran wzbogacony do ok. 5% U-235). Pręty paliwowe zbudowane są z takich samych materiałów (są jednak ok. 2 razy krótsze w reaktorze NuScale) i ułożone w kasetach

### Typical Pressurized-Water Reactor

NuScale's combined containment vessel and reactor system



\*Source: NRC

Rys. 3. Porównanie rozmiaru reaktora typu NuScale z typowym dużym reaktorem ciśnieniowym



17x17 prętów. 37 takich kaset znajduje się w rdzeniu reaktora NuScale, a 145 w AP600. Przewidywana przez projektantów elektrownia z 12 modułami typu NuScale miałaby ok. 600 MWe, a więc tyle samo, ile jeden blok AP600. Główne różnice między tymi rozwiązaniami to rozmiar rdzenia, obieg chłodziwa (bazujący na naturalnej cyrkulacji lub wymuszony pompami) oraz podejście do bezpieczeństwa. W reaktorze AP600 systemy bezpieczeństwa, choć pasywne, wymagają rozległych konstrukcji i zbiorników wypełnionych wodą (największy z nich to ponad 2000 m<sup>3</sup>) do awaryjnego chłodzenia. NuScale ma zintegrowaną konstrukcję i całą masę chłodziwa zamkniętą w zbiorniku reaktora, co umożliwia odbiór ciepła powyłączeniowego bez dodatkowych źródeł wody chłodzącej.

Dla porównania bezpieczeństwa obydwu projektów, reaktory zostały zamodelowane w programie RELAP, dedykowanym do termo-hydraulicznych analiz reaktorów jądrowych. RELAP umożliwia zamodelowanie całego bloku, łącznie z obiegiem wtórnym (wytwornica pary), systemami bezpieczeństwa, automatyką i uproszczonym budynkiem reaktora. Obliczenia wykonuje się zarówno dla normalnej pracy reaktora (aby zweryfikować wiarygodność modelu, tzn. zwalidować go), jak i dla dowolnie zaprojektowanych warunków awaryjnych. Wynikiem symulacji jest informacja o przebiegu awarii - zmianach parametrów chłodziwa i paliwa w czasie awarii, zachowaniu systemów bezpieczeństwa, ewentualnym uszkodzeniu rdzenia, itd.

Przedstawione wyniki dotyczą awarii typu Station Black-out, czyli braku zasilania z zewnątrz połączonego z niezadziałaniem awaryjnych silników Diesla. Zakłada się, że zainstalowane w elektrowni baterie wystarczą na zasilanie podstawowych urządzeń pomiarowych i automatyki przez pewien czas, mogący pozwolić na podjęcie odpowiednich działań zaradczych. Natomiast niedostępne jest zasilanie dla utrzymania obiegu chłodziwa. Aby utrudnić warunki, dezaktywowano

Wydarzenie	AP600	NuScale
Utrata zasilania	0s	0s
Wyłączenie turbiny (i pomp chłodziwa)	0s	0s
Reactor trip	4,6s	12s
Początek utleniania cyrkonu	6578s	-
Odkrycie rdzenia	8738s	-
Początek topienia paliwa	9050s	-
Koniec symulacji	86400s (24h)	604800s (168h)

Tab. 1. Przebieg awarii typu Station Black-out z odłączeniem systemów bezpieczeństwa w reaktorach AP600 i NuScale

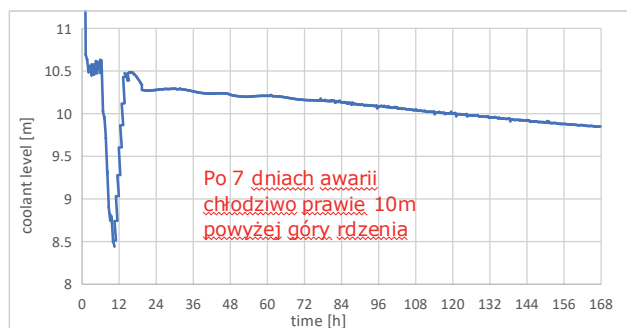
wszystkie systemy bezpieczeństwa poza zaworami bezpieczeństwa, przeciwdziałającymi nadmiernemu wzrostowi ciśnienia w zbiorniku reaktora. Najistotniejsze parametry oraz przebieg awarii przedstawiono w tabeli 1 oraz na wykresach 4-9.

Założona utrata zasilania i w konsekwencji wyłączenie turbiny (i pomp chłodziwa w przypadku reaktora AP600) następuje na samym początku symulacji. Automatyczne wyłączenie reaktora (reactor trip), dzięki wprowadzeniu do rdzenia prętów kontrolnych następuje po kilku/kilkunastu sekundach. To powoduje przerwanie reakcji łańcuchowej, natomiast - jak w przypadku każdego reaktora jądrowego - wciąż generowane jest ciepło powyłączeniowe, z radioaktywnych produktów rozszczepienia uranu obecnych w rdzeniu reaktora. To ciepło musi być skutecznie odbierane z rdzenia, aby nie dopuścić do niebezpiecznego nagrzania się paliwa i w konsekwencji uszkodzenia, a nawet stopienia rdzenia. W przypadku reaktora NuScale, jego zintegrowana konstrukcja umożliwia wychłodzenie reaktora nawet w tak ekstremalnych warunkach. W dużym reaktorze, przy braku cyrkulacji chłodziwa i odłączeniu systemów bezpieczeństwa, dochodzi do odkrycia i stopienia paliwa, którego początek zaobserwowano po ok. 2.5 h (9050 s) od utraty zasilania. W dalszym kroku mogłoby dojść do uszkodzenia powłok budynku reaktora,

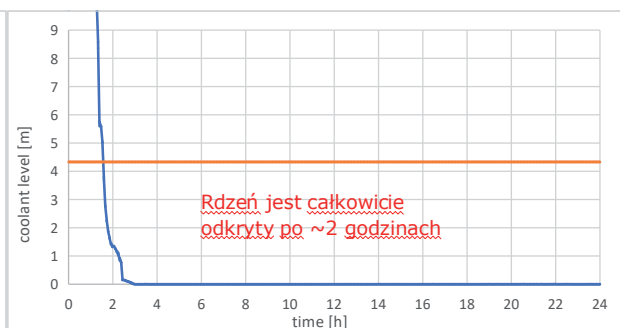
przetopienia się rdzenia i uwolnienia izotopów radioaktywnych do otoczenia (to jednak nie było elementem tej analizy, która skupia się na wpływie systemów bezpieczeństwa na potencjalne uszkodzenie paliwa).

Na wykresach 4-5 widać poziom chłodziwa w zbiorniku ciśnieniowym reaktora. Dla reaktora NuScale symulacja była prowadzona przez 168 godz. (7 dni), natomiast dla reaktora AP600 - przez 24 godz. Jak widać, poziom chłodziwa w małym reaktorze tylko nieznacznie się obniżył, wciąż pozostając prawie 10 m powyżej poziomu aktywnego paliwa. W reaktorze AP600 już po ok. 1.5 godziny woda chłodząca zrównuje się z górą prętów paliwowych (poziom 4.3 m - pomarańczowa linia). Rdzeń jest całkowicie odkryty po nieco ponad 2 godz. - taka sytuacja jest bardzo niebezpieczna i jeśli odpowiednie chłodzenie nie zostanie zapewnione prowadzi do szybkiego nagrzewania się, a w konsekwencji uszkodzenia rdzenia.

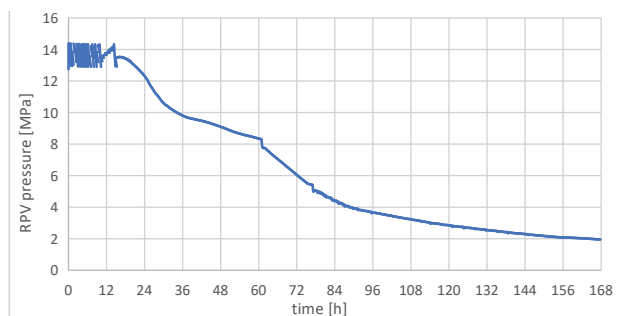
Kolejne dwa wykresy obrazują przebieg ciśnienia w zbiornikach reaktorów w czasie awarii. Fluktuacje ciśnienia są powodowane działaniem zaworów bezpieczeństwa. Jak widać na wykresie 6, po ok. 15 godz. ciśnienie w reaktorze NuScale zaczyna spadać. Natomiast w przypadku analizowanego dużego reaktora fluktuacje występują coraz rzadziej, jednak ciśnienie utrzymuje się na wyso-



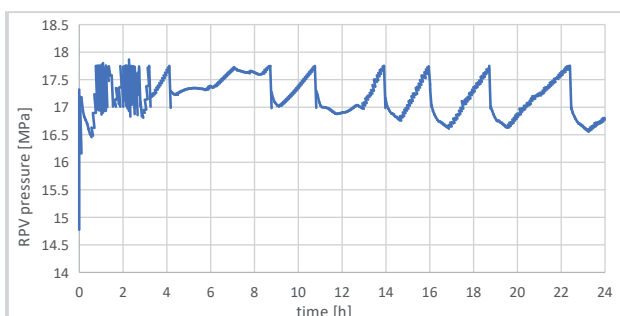
Rys. 4. Poziom chłodziwa powyżej aktywnej części rdzenia w reaktorze NuScale



Rys. 5. Poziom chłodziwa w rdzeniu reaktora AP600



Rys. 6. Ciśnienie w obiegu pierwotnym w reaktorze NuScale

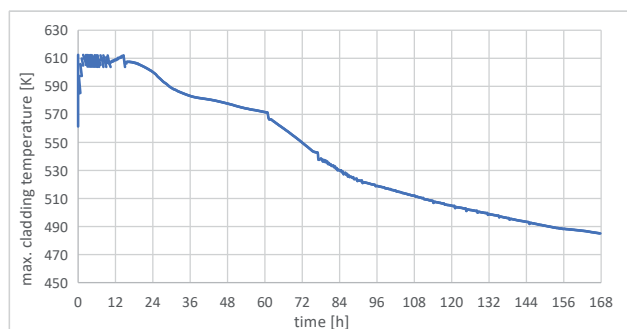


Rys. 7. Ciśnienie w obiegu pierwotnym w reaktorze AP600

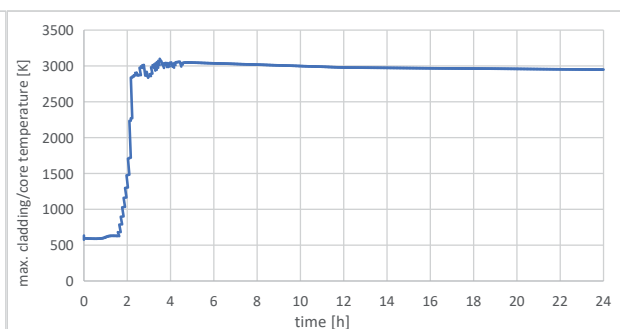
kim poziomie przez cały czas symulacji (24 godz.). Brak chłodzenia i ciągła generacja ciepła powyłączeniowego w rdzeniu reaktora uniemożliwiają spadek ciśnienia. Wykresy 8-9 przedstawiają temperaturę w rdzeniu reaktora. Początkowo, parametr dotyczy temperatury koszulek paliwowych, natomiast po przekroczeniu temperatury topienia

się cyrkonu (ok. 2200 K), przedstawiana jest maksymalna temperatura paliwa w rdzeniu (ma to miejsce na wykresie 9). Jak widać, w reaktorze NuScale temperatura utrzymuje się na poziomie ok. 610 K, a po 15 godz. zaczyna spadać - podobnie jak ciśnienie w zbiorniku reaktora (rys. 6.). W reaktorze AP600 temperatura ta zaczyna gwałtownie rosnąć,

kiedy poziom chłodziwa spada poniżej poziomu prętów paliwowych. Kiedy temperatura osiąga 2850 K (ok. 2575°C), rozpoczyna się topienie rdzenia. Degradacja rdzenia reaktora postępuje przez cały czas symulacji (24 h) i maksymalna temperatura utrzymuje się na poziomie ok. 3000 K.



Rys. 8. Temperatura koszulek paliwowych w reaktorze NuScale



Rys. 9. Temperatura koszulek paliwowych / maksymalna temperatura w rdzeniu w reaktorze AP600

## ■ Wnioski

Wyniki symulacji jednoznacznie pokazują, jakie konsekwencje niesie za sobą poważna awaria w małym zintegrowanym reaktorze w porównaniu do dużego klasycznego reaktora jądrowego. Trzeba jednak zaznaczyć, że zaistnienie tak ekstremalnych warunków (brak wewnętrznego i zewnętrznego zasilania połączone z utratą wszystkich systemów bezpieczeństwa) ma skrajnie małe prawdopodobieństwo wystąpienia. Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano uproszczone modele, stworzone na podstawie publicznie dostępnych danych dotyczących reaktorów AP600 i NuScale, a ich wyniki należy traktować jako przybliżone i dające ogólny obraz

zachowania reaktorów w przypadku poważnej awarii.

Reaktor AP600 (a także jego wersja o zwiększonej mocy AP1000, obecnie oferowana przez firmę Westinghouse) zawiera szereg ulepszeń i innowacyjnych rozwiązań w stosunku do obecnie pracujących reaktorów podobnego typu. Systemy bezpieczeństwa zawarte w projekcie pozwalają na uniknięcie poważnych konsekwencji dowolnej awarii projektowej (zdarzeń mniej ekstremalnych, ale bardziej prawdopodobnych od opisanego wyżej scenariusza).

Z kolei reaktor NuScale jest innowacyjnym projektem reaktora, którego bezpieczeństwo zostało wyniesione na jeszcze wyższy poziom. Zintegrowana konstrukcja pozwala na wychłodzenie i

zachowanie bezpiecznych parametrów reaktora nawet przy najbardziej ekstremalnych warunkach. Pierwsza elektrownia z modułami NuScale ma powstać w najbliższych latach w Idaho w Stanach Zjednoczonych. Jeśli ta inwestycja się powiedzie, ten modułowy reaktor może zostać wprowadzony na komercyjny rynek i być masowo produkowany dla odbiorców na całym świecie. □



fot. unsplash.com

Źródło:

<https://pris.iaea.org/pris/>

<http://nuclear.pl/>

[http://www.paa.gov.pl/strona-69-program\\_polskiej\\_energetyki\\_jadrowej.html](http://www.paa.gov.pl/strona-69-program_polskiej_energetyki_jadrowej.html)

<https://www.nuscalepower.com/>

Westinghouse, AP600 Design Control Document, 2000 (<https://www.nrc.gov/docs/ML0036/ML003691016.html>)

NuScale Power, NuScale Design Certification Application, 2019 (<https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/nuscale/documents.html>)

C. M. Allison and J. K. Hohorst, Role of RELAP/SCDAPSIM in Nuclear Safety, 2010 (<https://new.hindawi.com/journals/stni/2010/425658/>).