

Problematyka wypalania prętów paliwowych z gadolinem w zestawach reaktora wodnego wrzącego – benchmark NEA OECD

On the depletion of gadolinium-bearing fuel rods in BWR assemblies: a study within the NEA/OECD benchmark

Łukasz Koszuk
Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska

Streszczenie: Artykuł prezentuje wyniki uzyskane przez autora w ramach międzynarodowego benchmarku OECD/NEA pt. „Porównanie kodów obliczeniowych dla wypalania prętów paliwowych z gadolinem w zestawach reaktora wodnego wrzącego”, poświęconego walidacji kodów obliczeniowych do modelowania wypalania paliwa reaktora wodnego wrzącego (BWR) zawierającego gadolin jako wypalającą się truciznę. Głównym celem benchmarku była analiza zdolności różnych systemów obliczeniowych do precyzyjnego przewidywania ewolucji reaktywności, ze szczególnym uwzględnieniem tzw. piku reaktywności, który jest kluczowy dla analiz bezpieczeństwa krytycznościowego i koncepcji *burnup credit*. Obliczenia wykonano przy użyciu pakietu kodów SCALE 6.2.2 (sekwencja TRITON/NEWT) z wykorzystaniem 252-grupowej biblioteki danych jądrowych ENDF/B-VII.1. W pracy przedstawiono ewolucję współczynnika mnożenia k_{inf} , zmiany stężeń kluczowych izotopów gadolinu (Gd-155, Gd-157) oraz szczegółowe składy izotopowe aktynowców i produktów rozszczepienia dla różnych głębokości wypalania i trzech wariantów zawartości pary w wodzie (0%, 40%, 70%). Uzyskane wyniki wykazały bardzo dobrą zgodność z rezultatami innych uczestników benchmarku, poprawnie odwzorowując zarówno ogólne trendy, jak i wartości liczbowe. W podsumowaniu odniesiono się także do ogólnych wniosków z raportu OECD, wskazując na biblioteki danych jądrowych jako główne źródło rozbieżności w wynikach oraz na wciąż istniejące wyzwania w modelowaniu stężeń niektórych izotopów.

Słowa kluczowe: Reaktor BWR, gadolin, wypalająca się trucizna, wypalanie paliwa bezpieczeństwo krytycznościowe, *burnup credit*, benchmark OECD/NEA, kod SCALE.

Abstract: This paper presents the results obtained by the author within the framework of the OECD/NEA international benchmark: “Code comparison for depletion of gadolinium-bearing fuel rods in Boiling Water Reactor assemblies”, dedicated to the validation of computer codes for modelling the burnup of Boiling Water Reactor (BWR) fuel containing gadolinium as a burnable absorber. The main objective of the benchmark was to analyze the capability of various computational systems to accurately predict the evolution of reactivity, with a particular focus on the „reactivity peak” phenomenon, which is crucial for criticality safety analyses and the burnup credit concept. The calculations were performed using the SCALE 6.2.2 code package (TRITON/NEWT sequence) with the 252-group ENDF/B-VII.1 nuclear data library. The paper presents the evolution of the k_{inf} multiplication factor, changes in the concentrations of key gadolinium isotopes (Gd-155, Gd-157), and detailed isotopic compositions of actinides and fission products for various burnup depths and three different water void fractions (0%, 40%, 70%). The obtained results showed very good agreement with the results of other benchmark participants, correctly reproducing both the general trends and numerical values. The summary also refers to the general conclusions from the OECD report, identifying nuclear data libraries as the main source of discrepancies in the results and highlighting the remaining challenges in modeling the concentrations of certain isotopes.

Keywords: BWR reactor, gadolinium, burnable absorber, fuel burnup, criticality safety, burnup credit, OECD/NEA benchmark, SCALE code.

1. Wstęp

Współczesne zestawy paliwowe stosowane w reaktorach wodnych wrzących (*Boiling Water Reactor*, BWR) często wykorzystują tlenek gadolinu (Gd_2O_3) jako wypalający się absorbent neutronów (tzw. wypalająca się trucizna reaktorowa). Jego obecność prowadzi do złożonego zachowania reaktywności paliwa w trakcie eksploatacji. Gwałtowne wypalanie się silnie absorbujących izotopów gadolinu powoduje, że reaktywność zestawu paliwowego początkowo rośnie, osiągając maksimum przy relatywnie niskim wypaleniu (zazwyczaj poniżej 20 GWd/MTU), a następnie systematycznie maleje. Dokładne przewidywanie charakterystyk tego piku reaktywności jest fundamentalnym wyzwaniem w analizach bezpieczeństwa krytycznościowego, szczególnie w kontekście wdrażania koncepcji *burn-up credit*, (BUC) dla wypalonego paliwa.

W celu walidacji i porównania zdolności systemów obliczeniowych do modelowania tego typu złożonych zjawisk, Nuclear Energy Agency OECD (NEA), poprzez swoją grupę roboczą WPNCs (*Working Party on Nuclear Criticality Safety*), organizuje międzynarodowe testy porównawcze (benchmarki). Bezpośrednią motywacją do zorganizowania benchmarku Fazy IIB – „*Code Comparison for Depletion of Gadolinium-Bearing Fuel Rods in Boiling Water Reactor Assemblies*” [1] były wyniki wcześniejszej Fazy IIIC, które wykazały znaczące rozbieżności w rezultatach, wynikające z różnic w opcjach modelowania wybieranych przez uczestników. W odpowiedzi, grupy roboczej EGUNF (*Expert Group on Used Nuclear Fuel criticality*) zaprojektowała Fazę IIB z kluczowym celem: wyizolowaniem i oceną różnic wynikających bezpośrednio z zastosowanych metod obliczeniowych i bibliotek danych jądrowych. Aby to osiągnąć, w specyfikacji benchmarku, opartego na geometrii zestawu paliwowego 9x9 „STEP-3”, przyjęto rygorystyczne podejście preskryptywne. Narzucono w nim wszystkim uczestnikom ujednolicony, szczegółowy model pręta z gadolinem (podział na 10 koncentrycznych pierścieni) i zdefiniowano precyzyjne kroki wypalenia, koncentrując analizę na kluczowym dla bezpieczeństwa obszarze piku reaktywności.

Niniejszy artykuł ma na celu prezentację oraz szczegółową analizę wyników benchmarku Fazy IIB uzyskanych przez autora. Praca dokumentuje zastosowanie wybranej metodyki obliczeniowej do rozwiązania złożonego problemu wypalania paliwa BWR z gadolinem, zgodnie ze ścisłą specyfikacją OECD/NEA. Przedstawione rezultaty i wnioski stanowią wkład w dokumentację i zrozumienie zachowania tego typu modeli, a sam benchmark jest cennym narzędziem w rozwoju metod analizy bezpieczeństwa wypalonego paliwa.

2. Wypalające się trucizny reaktorowe

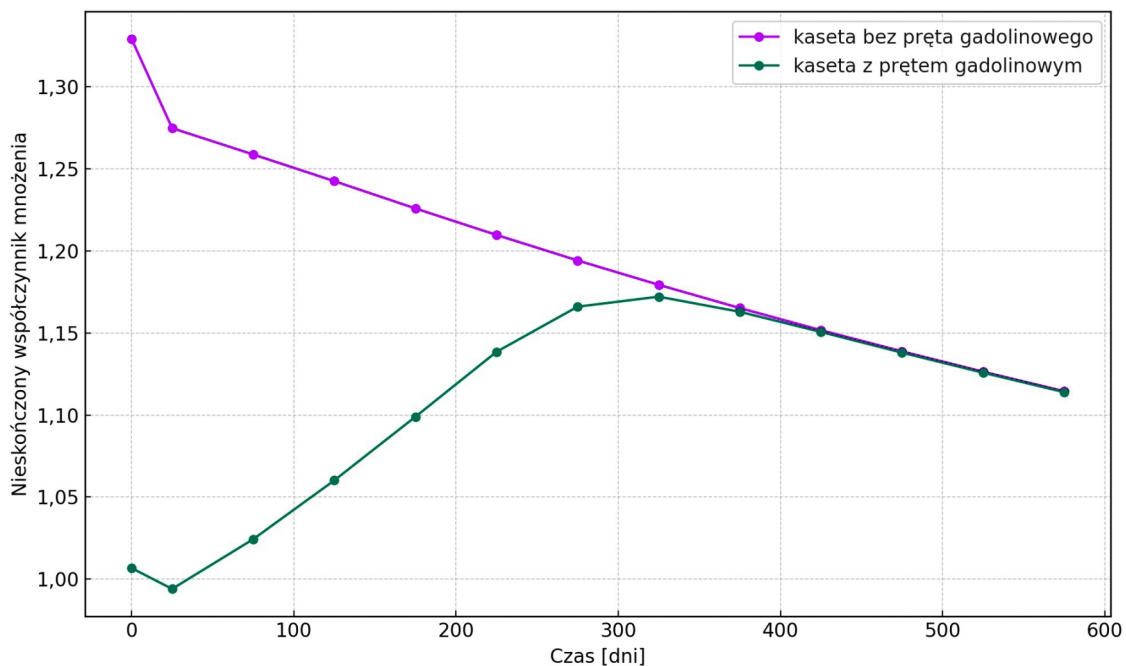
Wypalająca się trucizna reaktorowa (lub wypalający się absorbent) to materiał charakteryzujący się dużym przekrojem czynnym na absorpcję neutronów, który jest celowo wprowadzany do rdzenia reaktora jądrowego. Głównym celem stosowania wypalających się trucizn jest kompensacja nadmiarowej reaktywności świeżego paliwa na początku cyklu pracy reaktora. Pozwala to na bezpieczne załadowanie paliwa o wyższym wzbogaceniu, co z kolei umożliwia wydłużenie kampanii paliwowej (czasu pracy reaktora pomiędzy wymianami paliwa) oraz przyczynia się do bardziej równomiernego rozkładu mocy w rdzeniu.

Mechanizm działania wypalającej się trucizny polega na tym, że w trakcie pracy reaktora, pod wpływem strumienia neutronów, materiał absorbujący ulega transmutacji w izotopy o znacznie mniejszych przekrojach czynnych na absorpcję neutronów lub w izotopy stabilne. W ten sposób trucizna „wypala się”, a jej negatywny wkład do reaktywności maleje. Proces ten powoduje stopniowy wzrost reaktywności, kompensując w pewnym stopniu spadek reaktywności wynikający z wypalania się materiału rozszczepialnego i gromadzenia się absorbujących neutrony produktów rozszczepienia. Na rys. 1 pokazano ten efekt wykreślając zależność nieskończonego współczynnika mnożenia przykładowej kasety paliwowej w dwóch konfiguracjach: z oraz bez pręta gadolinowego w zależności od czasu wypalania. Rysunek ma wyłącznie ilustracyjny charakter: pokazuje jakościowy efekt obniżenia reaktywności (spadek k_{∞}) po dodaniu gadolinu do kasety paliwowej.

Do najczęściej stosowanych materiałów jako wypalające się absorbenty należą związki gadolinu (Gd_2O_3), a także erbu (Er_2O_3), dysprozu czy hafnu [2]. Wybór konkretnego materiału zależy od typu reaktora, projektu paliwa oraz pożądanej charakterystyki wypalania. W reaktorach wodnych zarówno ciśnieniowych jak i wrzących dominującym i najpowszechniej stosowanym wypalającym się absorbentem jest tlenek gadolinu, dodawany do wybranych prętów paliwowych.

3. Tlenek Gadolinu (Gd_2O_3)

Popularność tlenku gadolinu jako wypalającego się absorbenta wynika z unikalnej kombinacji jego właściwości. Kluczową cechą gadolinu są bardzo duże przekroje czynne na absorpcję neutronów termicznych dla dwóch jego naturalnych izotopów: Gd-155 i Gd-157. Wartość przekroju czynnego na wychwyt neutronu (σ_a) dla neutronów termicznych (0,0253 eV) dla Gd-157 wynosi około 254 000 barnów, a dla Gd-155 około 61 000 barnów [3]. Wartości te są o kilka rzędów wielkości wyższe niż dla materiałów rozszczepialnych (np. ~580 barnów dla U-235) czy nawet innych silnych trucizn reaktorowych. To właśnie ta właści-



Rys. 1. Zależność nieskończonego współczynnika mnożenia względem czasu wypalania dla kasety paliwowej w dwóch konfiguracjach: z oraz bez pręta gadolinowego. Widoczny jest charakterystyczny pik reaktywności powstały w obecności gadolinu w paliwie jądrowym (źródło: opracowanie własne autora).

Fig. 1. Dependence of the infinite multiplication factor on the burn-up time for the fuel assembly in two configurations: with and without a gadolinium rod. A characteristic reactivity peak is visible, caused by the presence of gadolinium in the nuclear fuel (source: author's own work).

wość sprawia, że nawet niewielkie ilości gadolinu mogą skutecznie zmniejszać lokalny strumień neutronów i kontrolować reaktywność.

Skład izotopowy gadolinu naturalnego jest istotny z punktu widzenia skuteczności absorpcji: dominują izotopy parzyste o mniejszych przekrojach czynnych (Gd-158 około 24,84%, Gd-160 około 21,86%, Gd-156 około 20,47%), natomiast główne absorbery to Gd-155 około 14,80% i Gd-157 około 15,65% (pozostałe: Gd-154 około 2,18%, Gd-152 około 0,20%) [6]. Zatem ~30% gadolinu naturalnego stanowią izotopy o bardzo dużych przekrojach czynnych, które odpowiadają za szybkie „wypalanie” dodatku gadolinowego.

Poza właściwościami jądrowymi, Gd_2O_3 posiada szereg zalet fizykochemicznych:

- W temperaturach procesu spiekania pastylek UO_2 tlenem gadolinu (Gd_2O_3) dobrze rozpuszcza się w matrycy UO_2 , dzięki czemu możliwe jest uzyskanie jednorodnego dodatku absorbera. [4].
- Tlenek gadolinu cechuje się wysoką temperaturą topnienia (około 2420°C) oraz stabilnością chemiczną i radiacyjną w warunkach pracy reaktora. Co niezwykle istotne, w wyniku absorpcji neutronów nie generuje on znaczących ilości gazowych produktów transmutacji [5]. Odbyna się to w przeciwieństwie np. do boru, którego izotop B-10 w wyniku reakcji (n, α) produkuje hel, co może prowadzić do wzrostu ciśnienia w pręcie paliwowym i pęcznienia paliwa.

Niemniej jednak, stosowanie gadolinu ma również pewne wady. Po wypaleniu głównych absorbentów (Gd-155 i Gd-157), pozostałe izotopy (zwłaszcza parzyste: Gd-154,

Gd-156, Gd-158, Gd-160) mają znacznie mniejsze przekroje czynne i pozostają w paliwie jako tzw. „trucizna resztkowa” (*residual poison*). Może to negatywnie wpływać na ekonomię neutronów pod koniec cyklu pracy paliwa, obniżając osiągalne wypalenie [4].

3.1. Wyzwania w modelowaniu wypalania paliwa z gadolinem

Symulacja procesu wypalania paliwa jądrowego jest zadaniem złożonym, wymagającym jednoczesnego rozwiązania równania transportu neutronów oraz układu równań różniczkowych opisujących ewolucję składu izotopowego paliwa w czasie. Obecność gadolinu, ze względu na jego unikalne właściwości, potęguje tę złożoność i wprowadza szereg wyzwań, które muszą być precyzyjnie uwzględnione w kodach obliczeniowych. Chociaż poniższe wyzwania są omawiane w kontekście gadolinu, wiele z nich ma charakter ogólny i dotyczy modelowania dowolnego materiału o bardzo silnych właściwościach absorpcyjnych.

Można zidentyfikować następujące problemy w przypadku modelowania wypalania paliwa z bardzo silnym absorberem neutronów, w szczególności gadolinu.

a) Bardzo duże przekroje czynne na absorpcję neutronów izotopów Gd-155 i Gd-157

Ekstremalnie wysokie przekroje czynne na wychwyt neutronów termicznych dla dwóch jego naturalnych izotopów: Gd-155 i Gd-157, których wartości podane w punkcie 3, są jedną z głównych trudności w modelowaniu paliwa z gadolinem. Dlatego, aby dokładnie śledzić szybkie

zmiany koncentracji izotopów gadolinu i wynikające z nich zmiany reaktywności (zwłaszcza w okolicy pik reaktywności), obliczenia wypaleniowe muszą być prowadzone z użyciem małych kroków czasowych (lub inaczej – kroków wypalania).

b) Silne efekty samoprzesłaniania neutronów

Bezpośrednią konsekwencją bardzo dużych przekrojów czynnych gadolinu są silne efekty samoprzesłaniania neutronów (z ang. *self-shielding*). Oznacza to, że neutrony termiczne wnikające do obszaru paliwa zawierającego gadolin są bardzo efektywnie absorbowane w jego zewnętrznych warstwach. W rezultacie, strumień neutronów docierający do wewnętrznych części pręta paliwowego jest znacznie osłabiony (przesłonięty) w porównaniu do strumienia na jego powierzchni. Efekt ten znacząco zmniejsza efektywną szybkość reakcji absorpcji w gadolinie w porównaniu do wartości, która zostałaby obliczona przy założeniu jednorodnego strumienia neutronów w całej objętości pręta. Z tego powodu [7]:

- standardowe podejścia oparte na teorii dyfuzji mogą być niewystarczające. Wymagane jest stosowanie metod transportu neutronów o wysokiej rozdzielczości, takich jak metoda charakterystyk (MOC) lub metody Monte Carlo, które są w stanie lepiej odwzorować strome gradienty strumienia w obecności silnych absorberów;
- proste uśrednianie właściwości neutronowych w obrębie komórki obliczeniowej może prowadzić do znacznych błędów, jeśli efekty samoprzesłaniania nie są jawnie uwzględnione. Zatem homogenizacja materiałów w komórce paliwowej nie ma tutaj zastosowania;
- konieczne jest stosowanie wielogrupowych bibliotek przekrojów czynnych, które uwzględniają efekty samoprzesłaniania lub metod dynamicznego generowania efektywnych przekrojów czynnych „w locie” podczas obliczeń.

c) Szybkie, niejednorodne przestrzenne wypalanie

Niejednorodne przestrzenne wypalanie się gadolinu, często określane jako efekt „cebulowy” (*onion peeling effect*), jest bezpośrednią konsekwencją silnego samoprzesłaniania. Gadolin nie wypala się równomiernie w całej objętości pręta paliwowego. Proces ten zachodzi warstwowo, rozpoczynając od zewnętrznych części pastylki, które są wystawione na największy strumień neutronów. Te zewnętrzne warstwy szybko tracą Gd-155 i Gd-157, stając się bardziej „przezroczyste” dla neutronów, co pozwala im penetrować głębiej i wypalać kolejne warstwy. W ten sposób tworzy się front wypalania, który stopniowo przesuwa się od powierzchni w kierunku centrum pręta.

Ten wysoce niejednorodny proces stawia poważne wymagania przed kodami obliczeniowymi:

- aby dokładnie odwzorować strome gradienty koncentracji izotopów gadolinu, kody obliczeniowe muszą wykorzystywać bardzo drobną dyskretyzację przestrzenną

w obszarach z gadolinem. W praktyce polega to na podziale pręta paliwowego na szereg współosiowych pierścieni (stref cylindrycznych), dla których osobno śledzone jest wypalenie [8];

- modele traktujące cały pręt gadolinowy jako jednorodną strefę mogą prowadzić do istotnych błędów, np. przeszacowania szybkości zużycia absorbera na początku cyklu. To z kolei skutkuje odchyleniami w obliczonej reaktywności – model może wskazywać pik reaktywności zbyt wcześnie, podczas gdy w rzeczywistości część absorbera wciąż pozostaje wewnątrz pręta.
- połączenie wymogu stosowania zaawansowanych metod transportu, drobnej siatki przestrzennej i małych kroków czasowych (wypalania) prowadzi do bardzo długich czasów symulacji.

d) Wrażliwość na historię napromieniania i niedobór danych walidacyjnych

Szybkość wypalania gadolinu jest wrażliwa nie tylko na projekt paliwa, ale także na szczegółową historię napromieniania i lokalne parametry pracy reaktora, takie jak temperatura paliwa, gęstość moderatora (udział pary w BWR) czy obecność prętów kontrolnych [9]. Złożone, sprzężone efekty tych parametrów dodatkowo komplikują analizy.

Największym ograniczeniem dla doskonalenia narzędzi symulacyjnych jest jednak brak wystarczającej ilości wysokiej jakości danych eksperymentalnych. Dotyczy to w szczególności składu izotopowego wypalonego paliwa BWR z gadolinem, zwłaszcza w zakresie małych głębokości wypalania, gdzie występuje pik reaktywności [10]. Istniejące dane często nie obejmują precyzyjnych pomiarów stężeń resztkowych izotopów gadolinu. Oznacza to, że nawet jeśli kody są teoretycznie wykorzystywane do modelowania złożonych zjawisk, pewność co do dokładności ich predykcji jest ograniczona przez niedobór danych do porównań i walidacji.

4. Skutki pik reaktywności i wymagania dla analiz bezpieczeństwa

Obecność gadolinu w paliwie jądrowym prowadzi do charakterystycznego, niemonotonicznego przebiegu zmian reaktywności w funkcji wypalania. W przeciwieństwie do paliwa bez wypalających się absorbentów, gdzie reaktywność generalnie maleje, tutaj obserwuje się początkowy wzrost. Dzieje się tak, ponieważ tempo transmutacji izotopów Gd-155 i Gd-157 jest początkowo znacznie szybsze niż tempo wypalania materiału rozszczepialnego. W punkcie, gdy większość efektywnych izotopów gadolinu zostanie wypalona, krzywa reaktywności osiąga maksimum, zwane „pikiem reaktywności”. Po jego osiągnięciu, dominującym efektem staje się już ubytek materiału rozszczepialnego i dalsze gromadzenie produktów rozszczepienia, co prowadzi do systematycznego spadku reaktywności.

Zjawisko piku reaktywności, choć zachodzi wyłącznie w trakcie pracy reaktora, ma fundamentalne znaczenie dla późniejszych analiz bezpieczeństwa krytycznościowego, np. dla basenów przechowawczych czy pojemników transportowych [11]. Analizy te muszą opierać się na konserwatywnym założeniu dotyczącym stanu paliwa. Ponieważ w przechowalniku mogą znaleźć się zestawy o różnym stopniu wypalenia, należy zidentyfikować najbardziej reaktywny skład izotopowy, jaki paliwo mogło osiągnąć w dowolnym momencie swojego cyklu życia w reaktorze. Dla paliwa jądrowego z gadolinem, ten najbardziej reaktywny stan nie występuje ani na początku (gdy gadolin tłumi reaktywność), ani na końcu cyklu (gdy paliwo jest mocno wypalone). Występuje on dokładnie w momencie osiągnięcia piku reaktywności. Z tego powodu, precyzyjne przewidywanie składu izotopowego paliwa w tym konkretnym punkcie jest warunkiem koniecznym dla bezpiecznego i wiarygodnego wdrożenia tzw. koncepcji *burn-up credit*, polegającej na podejściu w analizach bezpieczeństwa krytyczności, które uwzględnia zmniejszenie reaktywności wypalonego paliwa jądrowego na skutek zmian jego składu po eksploatacji reaktora. Błędne obliczenie składu nuklidów w punkcie piku – na przykład niedoszacowanie pozostałości materiału rozszczepialnego lub przeszacowanie stężenia trutyczyn – doprowadziłoby do nieprawidłowej (niekonserwatywnej) oceny współczynnika mnożenia neutronów dla systemów przechowywania i transportu [10].

Podsumowując, chociaż pik reaktywności jest zjawiskiem reaktorowym, definiuje on najbardziej ograniczający przypadek dla analiz bezpieczeństwa wypalonego paliwa. Wyzwanie nie polega na modelowaniu samego piku jako

procesu, lecz na precyzyjnym obliczeniu składu izotopowego paliwa w tym jednym, krytycznym punkcie jego historii. Wiarygodność tych obliczeń zależy bezpośrednio od jakości kodów symulacyjnych i użytych danych jądrowych [12]. Dlatego międzynarodowe benchmarki, takie jak ten omawiany w niniejszej pracy, odgrywają kluczową rolę w weryfikacji i walidacji narzędzi obliczeniowych niezbędnych do sprostania temu wyzwaniu.

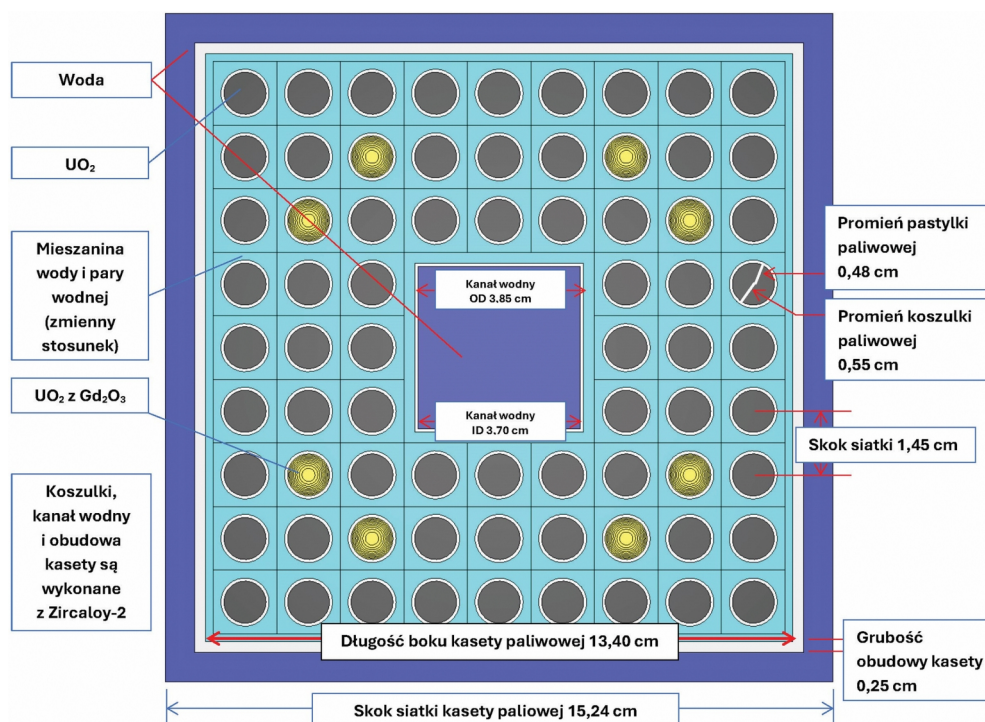
5. Specyfikacja benchmarku

Opisy specyfikacji, tabel i rysunków w niniejszym rozdziale stanowią tłumaczenie z raportu OECD/NEA [1].

A) Geometria

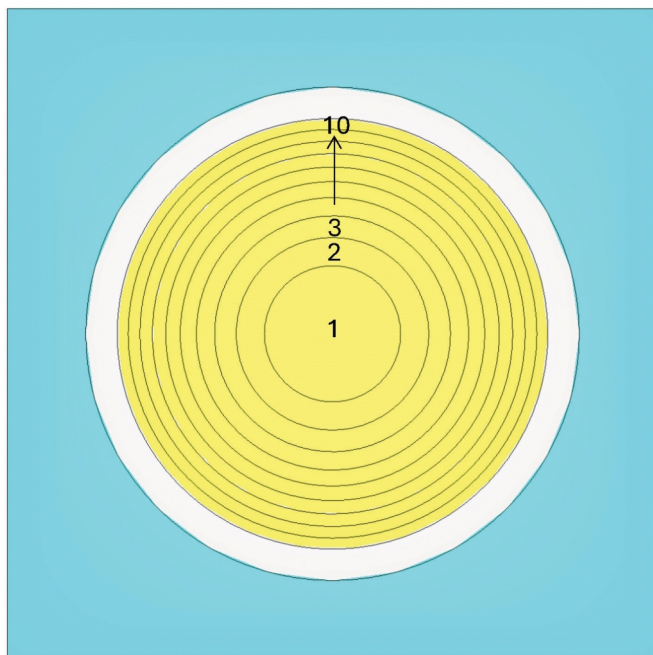
Geometrycznie układ składa się z pojedynczego zestawu paliwowego 9 9 z odbiciem, jako warunkiem brzegowym. W całym zestawie jest jednakowy skok siatki 1,45 cm. W części centralnej zestawu znajduje się kanał wodny o przekroju kwadratowym, zawierający wodę niezawierającą pary. Zarówno kanał wodny, jak i kanały prętów paliwowych są modelowane jako obszary kwadratowe o jednakowej wysokości. Geometria zestawu i pręta paliwowego pokazana jest na rysunku 2.

Podstawowym celem benchmarku jest dalsze zbadanie różnic w przewidywanych gęstościach jądrowych gadolinu w wypalonym paliwie BWR i ich wpływ na krytyczność. Benchmark narzuca sposób modelowania gadolinu, aby ograniczyć różnice wyników spowodowane różnicami



Rys. 2. Schemat 2D kasety paliwowej użytej w benchmarku.

Fig. 2. 2D diagram of the fuel assembly used in the benchmark.



Rys. 3. Szczegóły modelowania pręta Gd_2O_3 .

Fig. 3. Details of Gd_2O_3 rod modelling.

w modelowaniu przez różnych uczestników. Każdy pręt z gadolinem modelowany jest za pomocą 10 koncentrycznych pierścieni o jednakowych powierzchniach przekroju, jak pokazano na rysunku 3. Każdy z 10 obszarów w pręcie z gadolinem ma być rozważany oddzielnie przy wypalaniu, z zachowaniem numeracji jak na rysunku 3 i w tabeli 1. Pierścienie numerowane są 1÷10 od środka na zewnątrz. Rozpatrywana kasetka zawiera 8 prętów z gadolinem w pozycjach pokazanych na rysunku 2.

B) Materiały

Dla uproszczenia przyjęto, że pręty paliwowe nie zawierające gadolinu, mają jednakowe wzbogacenie 4,0 wt% U-235. Wszystkie pręty z gadolinem położone są syme-

Tabela 1. Wymiary pierścieni pręta gadolinowego [1].

Table 1. Dimensions of gadolinium rod rings.

Numer pierścienia	Zewnętrzny promień [cm]
1	0,151789
2	0,214663
3	0,262907
4	0,303579
5	0,339411
6	0,371806
7	0,401597
8	0,429325
9	0,455368
10	0,48

trycznie i mają jednakowy skład. Gęstości jądrowe dla świeżego paliwa i skład absorberów podane są w tabeli 2. Temperatura paliwa wynosi 900K. Koszulki, kanał wodny i obudowa kasety są wykonane ze stopu Zircaloy-2. Temperatura materiałów innych niż paliwo wynosi 600K i jest zgodna z temperaturami wielu bibliotek przekrojów czynnych dla ciągłego rozkładu energii. Rozpatrywane są trzy przypadki udziału przestrzeni parowych w wodzie otaczającej kanały paliwowe: 0%, 40% i 70%. Gęstości jądrowe Zircaloy'u i wody podane są w tabeli 3.

Tabela 2. Skład izotopowy paliwa i absorbera [1].

Table 2. Isotopic composition of fuel and absorber.

Materiał	Izotop/Pierwiastek	Gęstość jądrowa [atom/b-cm]
UO ₂	U-234	$8,4700 \times 10^{-6}$
	U-235	$9,4763 \times 10^{-4}$
	U-238	$2,2447 \times 10^{-2}$
	O	$4,6807 \times 10^{-2}$
UO ₂ + Gd ₂ O ₃	U-234	$6,8396 \times 10^{-6}$
	U-235	$7,6521 \times 10^{-4}$
	U-238	$2,1460 \times 10^{-2}$
	O	$4,6225 \times 10^{-2}$
	Gd-154	$2,5654 \times 10^{-5}$
	Gd-155	$1,7417 \times 10^{-4}$
	Gd-156	$2,4089 \times 10^{-4}$
	Gd-157	$1,8417 \times 10^{-4}$
	Gd-158	$2,9232 \times 10^{-4}$
	Gd-160	$2,5725 \times 10^{-4}$

Tabela 3. Skład izotopowy wody i stopu Zircaloy [1].

Table 3. Isotopic composition of water and Zircaloy.

Materiał	Pierwiastek	Gęstość jądrowa [atoms/b-cm]
Woda (0% pary wodnej)	H	$4,3417 \times 10^{-2}$
	O	$2,1708 \times 10^{-2}$
Woda z 40% zawartością pary wodnej	H	$2,7998 \times 10^{-2}$
	O	$1,3999 \times 10^{-2}$
Woda z 70% zawartością pary wodnej	H	$1,6434 \times 10^{-2}$
	O	$8,2170 \times 10^{-3}$
Zircaloy-2	Sn	$4,9797 \times 10^{-4}$
	Fe	$9,1782 \times 10^{-5}$
	Cr	$7,5861 \times 10^{-5}$
	Ni	$4,0314 \times 10^{-5}$
	Zr	$4,2465 \times 10^{-2}$

C) Warunki wypalania

Moc kasety paliwowej wynosi 25,0 MW/MTU (W/gU) przez cały czas wypalania, rozumiany jako pojedynczy okres bez okresów przerw. Kroki wypaleniowe wybrano tak, aby: spełniały następujące warunki: pierwsze dwa kroki to 0,1 i 0,4 GWd/MTU, po których następuje 39 kroków po 0,5 GWd/MTU, aby uzyskać wypalenie końcowe 20 GWd/MTU, przy czym uczestnik może dodać dodatkowe kroki, jeżeli uzna to za potrzebne dla większej dokładności.

W rezultacie do obliczeń wybrano 61 kroków (podanych w tabeli 4) tak, aby:

1. uzyskać wystarczająco dokładne wyniki dla większości obliczeń kodami,

2. uzyskać precyzyjne oszacowanie zmian reaktywności w obszarze wypalania, w którym występuje maksimum reaktywności.

Stosownie do warunków benchmarku obliczenia zostały wykonane dla następujących udziałów przestrzeni parowych w wodzie znajdującej się w kanałach prętów paliwowych 0%, 40% i 70%, używając gęstości zawartych w tabeli 3. Woda w kanale centralnym i na zewnątrz kasety paliwowej we wszystkich przypadkach nie zawiera przestrzeni parowych (0%). Przyjmuje się, że temperatury paliwa, moderatora i materiałów konstrukcyjnych są takie same we wszystkich trzech przypadkach.

Tabela 4. Kroki wypaleniowe [1].

Table 4. Depletion steps.

Nr Kroku	Długość ^a	Skumulowana głębokość wypalenia ^b	Nr Kroku	Długość ^a	Skumulowana głębokość wypalenia ^b
1	0,10	0,10	32	0,25	7,75
2	0,15	0,25	33	0,25	8,00
3	0,25	0,50	34	0,25	8,25
4	0,25	0,75	35	0,25	8,50
5	0,25	1,00	36	0,25	8,75
6	0,25	1,25	37	0,25	9,00
7	0,25	1,50	38	0,25	9,25
8	0,25	1,75	39	0,25	9,50
9	0,25	2,00	40	0,25	9,75
10	0,25	2,25	41	0,25	10,0
11	0,25	2,50	42	0,5	10,5
12	0,25	2,75	43	0,5	11,0
13	0,25	3,00	44	0,5	11,5
14	0,25	3,25	45	0,5	12,0
15	0,25	3,50	46	0,5	12,5
16	0,25	3,75	47	0,5	13,0
17	0,25	4,00	48	0,5	13,5
18	0,25	4,25	49	0,5	14,0
19	0,25	4,50	50	0,5	14,5
20	0,25	4,75	51	0,5	15,0
21	0,25	5,00	52	0,5	15,5
22	0,25	5,25	53	0,5	16,0
23	0,25	5,50	54	0,5	16,5
24	0,25	5,75	55	0,5	17,0
25	0,25	6,00	56	0,5	17,5
26	0,25	6,25	57	0,5	18,0
27	0,25	6,50	58	0,5	18,5
28	0,25	6,75	59	0,5	19,0
29	0,25	7,00	60	0,5	19,5
30	0,25	7,25	61	0,5	20,0
31	0,25	7,50			

^a Długość kroku wypaleniowego podana jest w GWd/MTU.

^b Skumulowana głębokość wypalenia podana jest w GWd/MTU.

Projekt kasety używany w benchmarku ma kilka symetrii (połówkowa, 1/4 i 1/8) i każda z nich może być zastosowana w wykonywanych obliczeniach.

D) Wymagane wyniki obliczeń

Następujące wyniki były wymagane od wszystkich uczestników benchmarku:

- Nieskończony współczynnik mnożenia k -inf dla układu 2-D dla świeżego paliwa oraz po każdym kroku wypaleniowym, bez żadnego okresu przechowywania paliwa bez naświetlania.
- Gęstości jądrowe izotopów z tabeli 5 mają być podane co 2 GWd/MTU
 - bez okresu przechowywania,
 - z 5-letnim okresem przechowywania.
- Uśrednione gęstości jądrowe aktywności i produktów rozszczepienia mają być podane we wszystkich prętach paliwowych niezawierających gadolinu. Gęstości jądrowe izotopów gadolinu mają być podane dla każdego pierścienia w prętach z gadolinem. Wymagane kombinacje wypalania i okresu składowania zebrano w tabeli 6. Wypalanie prętów z gadolinem powinno być również podane dla każdego z dziesięciu kroków z tabeli 6 w celu oszacowania potencjalnych różnic w wypalaniu, spowodowanych modelowaniem absorpcji w gadolinie.

Tabela 5. Izotopy, jakie należy zareportować [1].

Table 5. Isotopes to report.

Aktynowce	U-234,235,236,238, Np-237, Pu-238,239,240,241,242, Am-241
Produkty rozszczepienia	Tc-99, Rh-103, Xe-131, Eu-155, Cs-133, Nd-143,148, Sm-147, 149,151,152
Gd	Gd-154,155,156,157,158,160

Tabela 6. Czas wypalania i czas przechowywania do zareportowania [1].

Table 6. Burnup and decay times for reporting.

Głębokość wypalania [GWd/MTU]	Okres przechowywania [lata]
2	0 i 5
4	0 i 5
6	0 i 5
8	0 i 5
10	0 i 5
12	0 i 5
14	0 i 5
16	0 i 5
18	0 i 5
20	0 i 5

Arkusz kalkulacyjny w Excelu został dostarczony w celu ułatwienia przesyłania wyników. Uczestnicy byli proszeni o dostarczenie również ogólnych informacji m.in. informacji istotnych z punktu widzenia porównywania wyników pomiędzy uczestnikami, tj.:

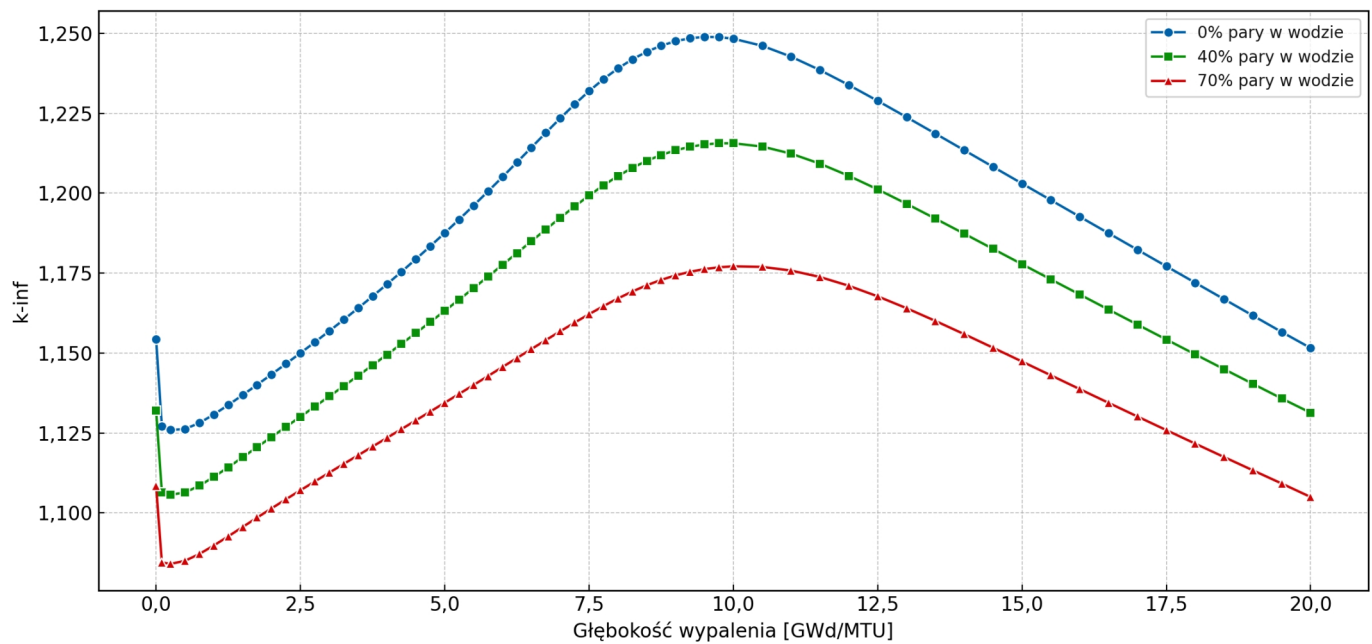
- Nazwa używanego kodu,
- Metoda obliczeń widmowych (np. Monte Carlo, S_n , MOC),
- Metoda obliczeń wypaleniowych (np. *predictor-corector*, tylko *predictor*, iteracyjna metoda *predictor-corector*, metoda punktu środkowego,
- Biblioteka danych jądrowych (np. ENDF/B-VII.1, JEFF-3.1),
- Liczba grup energetycznych (lub ciągły rozkład energii strumienia neutronów),
- Jaka część kasety była modelowana (np. cała kasetka, pół kasety, itd.),
- Kryterium zbieżności (np. źródła i strumień lub k_{eff} i wartość),
- Opcjonalnie opis kodu.

Wyniki zaprezentowane w niniejszej pracy pochodzą ze zgłoszenia SC20 (Polska) w ramach benchmarku OECD/NEA.

6. Wyniki

Obliczenia wypaleniowe dla analizowanej kasety paliwowej reaktora BWR zostały przeprowadzone przy użyciu sekwencji obliczeniowej TRITON z pakietu kodów SCALE w wersji 6.2.2 [13]. Pakiet SCALE, rozwijany przez Oak Ridge National Laboratory, jest zintegrowanym zestawem narzędzi do modelowania i analizy bezpieczeństwa systemów jądrowych. W ramach sekwencji TRITON, do rozwiązania równania transportu neutronów wykorzystano dwuwymiarowy solver deterministyczny NEWT, bazujący na metodzie rzędnych dyskretnych (S_n). Sprzężenie obliczeń transportu z obliczeniami wypaleniowymi realizowano za pomocą metody predyktor-korektor.

Model obliczeniowy został opracowany zgodnie ze specyfikacją benchmarku [1]. Zamodelowano pełny układ kasety paliwowej 9 9, bez stosowania uproszczeń symetrii, co było jedną z możliwych dróg modelowania przyjętą przez uczestników. Zgodnie z założeniami benchmarku dla wyznaczenia nieskończonego współczynnika mnożenia (k -inf), na zewnętrznych granicach kasety zastosowano odbijające warunki brzegowe, symulujące nieskończoną siatkę identycznych kaset. Kluczowym elementem specyfikacji było szczegółowe modelowanie prętów paliwowych z gadolinem, które podzielono na dziesięć koncentrycznych stref o równej powierzchni w celu precyzyjnego śledzenia wypalania się truciźny. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem 252-grupowej biblioteki danych neutronowych opartej na ENDF/B-VII.1, dostarczanej z pakietem SCALE. Zestaw raportowanych wielkości (k -inf, gęstości



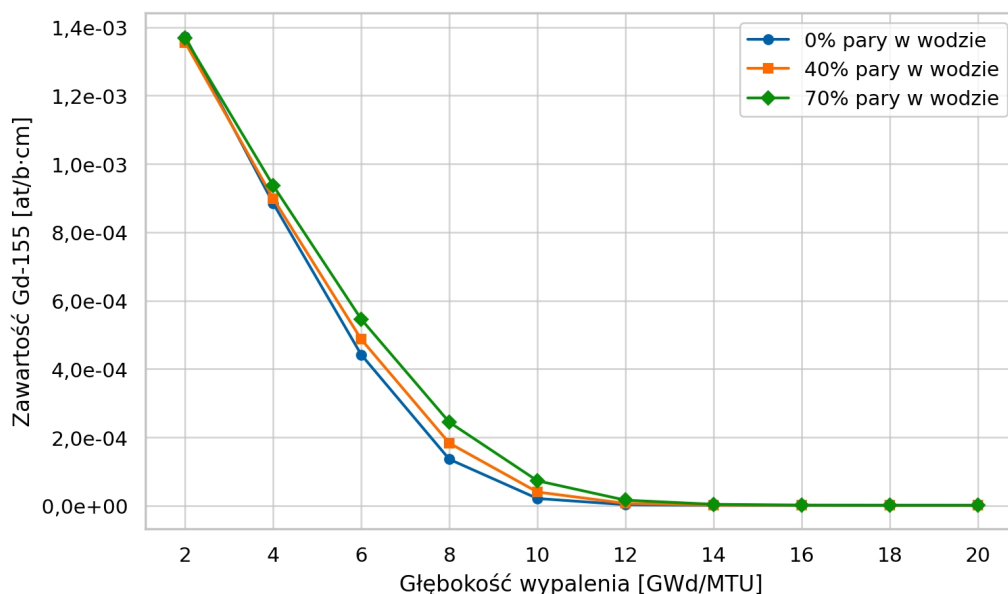
Rys. 4. Zmiany współczynnika mnożenia k_{inf} w funkcji wypalenia dla trzech analizowanych wariantów zawartości pary w wodzie.

Fig. 4. Changes in the k_{inf} multiplication factor as a function of burnup for the three analysed variants of water vapour content.

jądrowe aktywności/produktów rozszczepienia oraz izotopów Gd), poziomy wypalenia i czasy chłodzenia są zgodne z wymaganiami specyfikacji (tab. 2.5–2.6) [1].

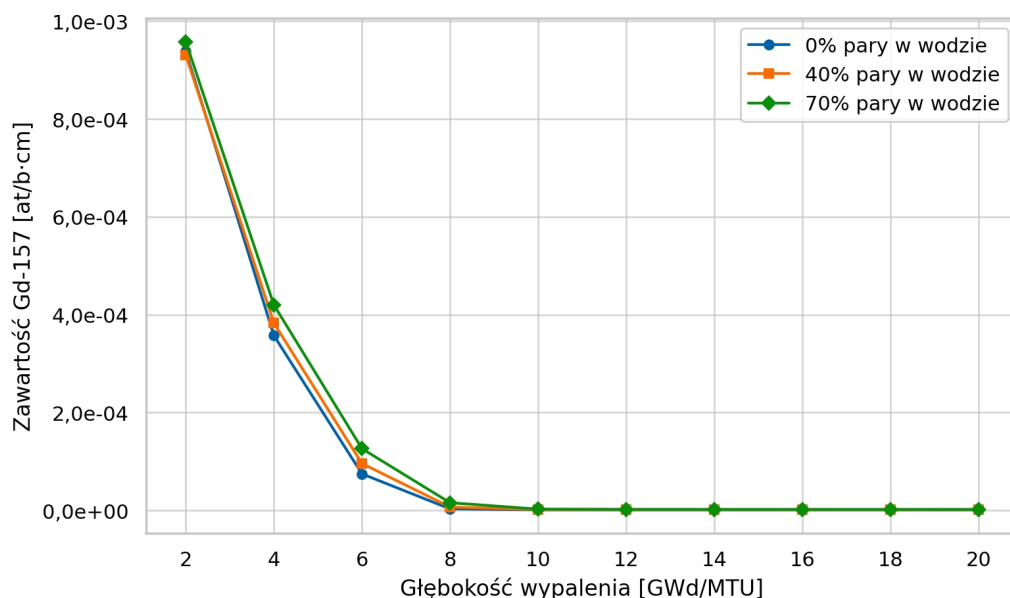
W niniejszym artykule zaprezentowano wybrane wyniki w stosunku do wymagań autorów benchmarku. Na rysunku 4 przedstawiono zmiany współczynnika mnożenia k_{inf} w funkcji wypalenia dla trzech analizowanych wariantów zawartości pary w wodzie. W tabelach 7 i 8 zestawiono obliczone gęstości jądrowe dla najważniejszych z punktu widzenia krytyczności aktywności i produktów rozszczepienia, uwzględniając różne głębokości wypalenia, zawartości pary oraz 5-letni czas chłodzenia. Kluczowy dla benchmarku wpływ wypalenia się trucizny gadolinowej

zilustrowano na rysunkach 5 i 6, gdzie dla izotopów Gd-155 oraz Gd-157 pokazano zmiany ich zsumowanej po wszystkich pierścieniach gęstości jądrowej w zależności od głębokości wypalenia i zawartości pary. Z kolei, na rysunku 7 przedstawiono zależność pomiędzy głębokością wypalenia prętów z gadolinem a głębokością wypalenia całej kasy paliwowej. Ze względu na prawa do danych nie reprodukowano tu wyników innych zespołów. Porównania zbiorcze dostępne są w Aneksie B raportu OECD/NEA, gdzie wiersze SC20 w tabelach stężeń Gd-155/Gd-157 (m.in. s. 117–122 [1]) pokazują ten sam rząd wielkości co pozostali uczestnicy; analogicznie zestawiono wyniki k_{inf} i odpowiadające im wypalenia (tab. 4.2 [1]). W raporcie



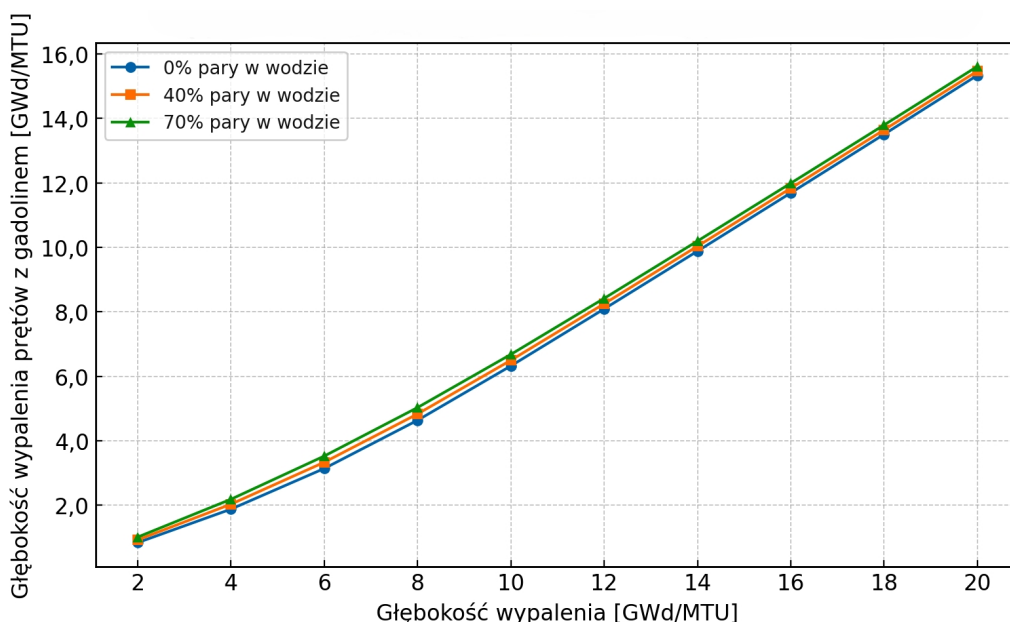
Rys. 5. Zmiany zsumowanej po wszystkich pierścieniach gęstości jądrowej Gd-155 w zależności od głębokości wypalenia i zawartości pary.

Fig. 5. Changes in the total Gd-155 nuclear density across all rings depending on burnup and vapour content.



Rys. 6. Zmiany zsumowanej po wszystkich pierścieniach gęstości jądrowej Gd-157 w zależności od głębokości wypalenia i zawartości pary.

Fig. 6. Changes in the total Gd-157 nuclear density across all rings depending on burnup and vapour content.



Rys. 7. Zależność pomiędzy głębokością wypalenia prętów z gadolinem a głębokością wypalenia całej kasety paliwowej.

Fig. 7. The relationship between the burnup of gadolinium rods and the burnup of the entire fuel assembly.

OECD/NEA [1] odnotowano, że „SC20 actinide results indicate an error in the initial uranium isotopic concentrations” i z tego powodu wyniki SC20 nie zostały włączone do analiz statystycznych aktywności. Uwaga dotyczy wyłącznie aktywności i wybranych produktów rozszczepienia – nie odnosi się do przedstawionych tu porównań gadolinu ani do przebiegów k -inf.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki uzyskane przez autora w ramach międzynarodowego benchmarku OECD/NEA Fazy IIB, dotyczącego modelowania wypalania paliwa typu

BWR z prętami zawierającymi gadolin. Obliczenia wykonano przy użyciu kodu SCALE/TRITON 6.2.2, stosując metodę rzędnych dyskretnych (Sn) do rozwiązania równania transportu neutronów oraz szczegółowy model pręta z gadolinem, narzucony przez specyfikację benchmarku. Zaprezentowane wyniki jednoznacznie odzwierciedlają złożoną fizykę procesu. Wykresy współczynnika mnożenia k -inf (rys. 4) poprawnie obrazują charakterystyczny pik reaktywności, którego wartość maleje, a położenie przesuwa się w stronę wyższych wypaleń wraz ze wzrostem udziału pary w wodzie. Analiza gęstości jądrowych kluczowych izotopów gadolinu, Gd-155 i Gd-157 (rys. 5 i 6), pokazuje ich gwałtowny spadek, będący główną przyczyną początkowego wzrostu reaktywności. Zgodnie z oczekiwaniami,

Tabela 7. Obliczone gęstości jądrowe dla najważniejszych z punktu widzenia krytyczności aktynowców, uwzględniając różne głębokości wypalenia, zawartości pary oraz 5-letni czas chłodzenia.
Table 7. Calculated nuclear densities for the most important actinides from the point of view of criticality, taking into account different burn-up, steam content and a 5-year cooling time.

Zawartość pary w wodzie [%]	Głębokość wypalenia [GWd/MTU]	Czas przechowywania [lata]	Gęstości jądrowe aktynowców [atom/barn-cm]										
			U-234	U-235	U-236	U-238	Np-237	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	Am-241
0	2	0	8,0919E-06	8,7188E-04	1,0068E-05	2,2313E-02	1,4632E-07	2,2230E-09	1,8703E-05	6,8719E-07	6,0084E-08	7,8557E-10	1,5664E-10
0	2	5	8,0919E-06	8,7188E-04	1,0069E-05	2,2313E-02	1,7169E-07	2,3455E-09	1,9621E-05	6,8683E-07	4,7152E-08	7,8561E-10	1,3033E-08
0	4	0	7,9014E-06	8,1942E-04	1,9468E-05	2,2289E-02	3,8288E-07	1,2122E-08	3,4412E-05	2,4179E-06	4,0231E-07	1,1063E-08	2,1584E-09
0	4	5	7,9015E-06	8,1943E-04	1,9468E-05	2,2289E-02	4,1901E-07	1,3695E-08	3,5310E-05	2,4175E-06	3,0753E-07	1,0764E-08	9,6877E-08
0	6	0	7,7171E-06	7,6944E-04	2,8298E-05	2,2265E-02	6,7703E-07	3,2176E-08	4,6926E-05	4,7667E-06	1,0986E-06	4,7512E-08	9,0197E-09
0	6	5	7,7180E-06	7,6944E-04	2,8298E-05	2,2265E-02	7,2543E-07	4,3407E-08	4,7803E-05	4,7649E-06	8,0128E-07	4,4986E-08	3,0701E-07
0	8	0	7,5384E-06	7,2151E-04	3,6629E-05	2,2241E-02	1,0141E-06	6,4093E-08	5,6810E-05	7,4960E-06	2,0979E-06	1,2684E-07	2,3319E-08
0	8	5	7,5421E-06	7,2148E-04	3,6633E-05	2,2241E-02	1,0782E-06	1,0504E-07	5,7668E-05	7,4928E-06	1,4559E-06	1,1729E-07	6,7046E-07
0	10	0	7,3640E-06	6,7541E-04	4,4524E-05	2,2217E-02	1,3861E-06	1,0948E-07	6,4645E-05	1,0459E-05	3,3271E-06	2,6282E-07	4,6568E-08
0	10	5	7,3744E-06	6,7531E-04	4,4536E-05	2,2217E-02	1,4718E-06	2,1394E-07	6,5497E-05	1,0456E-05	2,2014E-06	2,3807E-07	1,1900E-06
0	12	0	7,1914E-06	6,3109E-04	5,2024E-05	2,2194E-02	1,7931E-06	1,7056E-07	7,0990E-05	1,3566E-05	4,7355E-06	4,6720E-07	7,9351E-08
0	12	5	7,2147E-06	6,3086E-04	5,2052E-05	2,2193E-02	1,9082E-06	3,8641E-07	7,1852E-05	1,3566E-05	3,0021E-06	4,1578E-07	1,8558E-06
0	14	0	7,0196E-06	5,8851E-04	5,9151E-05	2,2169E-02	2,2349E-06	2,4986E-07	7,6181E-05	1,6763E-05	6,2754E-06	7,5010E-07	1,2158E-07
0	14	5	7,0650E-06	5,8810E-04	5,9202E-05	2,2169E-02	2,3877E-06	6,3824E-07	7,7061E-05	1,6770E-05	3,8319E-06	6,5769E-07	2,6499E-06
0	16	0	6,8484E-06	5,4762E-04	6,5916E-05	2,2144E-02	2,7082E-06	3,4981E-07	8,0401E-05	2,0010E-05	7,8963E-06	1,1196E-06	1,7259E-07
0	16	5	6,9285E-06	5,4695E-04	6,6000E-05	2,2144E-02	2,9074E-06	9,8308E-07	8,1303E-05	2,0031E-05	4,6668E-06	9,6951E-07	3,5488E-06
0	18	0	6,6776E-06	5,0837E-04	7,2328E-05	2,2119E-02	3,2089E-06	4,7272E-07	8,3779E-05	2,3276E-05	9,5543E-06	1,5818E-06	2,3120E-07
0	18	5	6,8091E-06	5,0738E-04	7,2454E-05	2,2118E-02	3,4639E-06	1,4321E-06	8,4709E-05	2,3320E-05	5,4907E-06	1,3557E-06	4,5261E-06
0	20	0	6,5072E-06	4,7074E-04	7,8394E-05	2,2092E-02	3,7334E-06	6,2081E-07	8,6430E-05	2,6536E-05	1,1213E-05	2,1413E-06	2,9591E-07
0	20	5	6,7108E-06	4,6936E-04	7,8571E-05	2,2092E-02	4,0536E-06	1,9937E-06	8,7393E-05	2,6611E-05	6,2945E-06	1,8199E-06	5,5550E-06
40	2	0	8,0696E-06	8,7230E-04	1,0398E-05	2,2309E-02	1,7064E-07	2,8752E-09	2,1276E-05	7,7949E-07	7,9735E-08	1,0286E-09	2,0881E-10
40	2	5	8,0697E-06	8,7231E-04	1,0398E-05	2,2309E-02	2,0051E-07	3,0344E-09	2,2319E-05	7,7909E-07	6,2573E-08	1,0287E-09	1,7297E-08
40	4	0	7,8592E-06	8,2065E-04	2,0028E-05	2,2282E-02	4,4888E-07	1,5723E-08	3,9153E-05	2,6886E-06	5,2000E-07	1,4049E-08	2,8102E-09
40	4	5	7,8594E-06	8,2066E-04	2,0027E-05	2,2282E-02	4,9188E-07	1,7889E-08	4,0172E-05	2,6881E-06	3,9711E-07	1,3686E-08	1,2539E-07
40	6	0	7,6568E-06	7,7174E-04	2,9012E-05	2,2255E-02	7,9499E-07	4,1758E-08	5,3485E-05	5,2301E-06	1,3908E-06	5,8830E-08	1,1521E-08
40	6	5	7,6580E-06	7,7175E-04	2,9011E-05	2,2255E-02	8,5321E-07	5,6885E-08	5,4480E-05	5,2282E-06	1,0120E-06	5,5845E-08	3,8970E-07
40	8	0	7,4617E-06	7,2512E-04	3,7438E-05	2,2227E-02	1,1913E-06	8,3155E-08	6,4943E-05	8,1504E-06	2,6150E-06	1,5378E-07	2,9336E-08
40	8	5	7,4666E-06	7,2509E-04	3,7440E-05	2,2227E-02	1,2691E-06	1,3712E-07	6,5917E-05	8,1476E-06	1,8077E-06	1,4272E-07	8,3802E-07

40	10	0	7,2724E-06	6,8050E-04	4,5376E-05	2,2201E-02	1,6270E-06	1,4181E-07	7,4146E-05	1,1300E-05	4,0946E-06	3,1281E-07	5,7881E-08
40	10	5	7,2859E-06	6,8039E-04	4,5386E-05	2,2201E-02	1,7314E-06	2,7690E-07	7,5112E-05	1,1298E-05	2,6937E-06	2,8462E-07	1,4682E-06
40	12	0	7,0868E-06	6,3776E-04	5,2879E-05	2,2173E-02	2,0998E-06	2,2019E-07	8,1691E-05	1,4585E-05	5,7617E-06	5,4648E-07	9,7641E-08
40	12	5	7,1167E-06	6,3751E-04	5,2905E-05	2,2173E-02	2,2397E-06	4,9452E-07	8,2667E-05	1,4589E-05	3,6234E-06	4,8876E-07	2,2636E-06
40	14	0	6,9034E-06	5,9685E-04	5,9976E-05	2,2146E-02	2,6087E-06	3,2111E-07	8,7978E-05	1,7951E-05	7,5634E-06	8,6308E-07	1,4834E-07
40	14	5	6,9612E-06	5,9639E-04	6,0027E-05	2,2146E-02	2,7941E-06	8,0697E-07	8,8975E-05	1,7965E-05	4,5708E-06	7,6072E-07	3,2002E-06
40	16	0	6,7219E-06	5,5770E-04	6,6685E-05	2,2118E-02	3,1503E-06	4,4728E-07	9,3223E-05	2,1358E-05	9,4477E-06	1,2686E-06	2,0915E-07
40	16	5	6,8231E-06	5,5696E-04	6,6770E-05	2,2118E-02	3,3913E-06	1,2283E-06	9,4248E-05	2,1391E-05	5,5135E-06	1,1044E-06	4,2503E-06
40	18	0	6,5422E-06	5,2025E-04	7,3019E-05	2,2089E-02	3,7198E-06	6,0116E-07	9,7570E-05	2,4778E-05	1,1369E-05	1,7671E-06	2,7876E-07
40	18	5	6,7066E-06	5,1917E-04	7,3147E-05	2,2089E-02	4,0270E-06	1,7691E-06	9,8631E-05	2,4840E-05	6,4361E-06	1,5224E-06	5,3845E-06
40	20	0	6,3644E-06	4,8444E-04	7,8989E-05	2,2060E-02	4,3127E-06	7,8500E-07	1,0114E-04	2,8187E-05	1,3289E-05	2,3606E-06	3,5557E-07
40	20	5	6,6166E-06	4,8295E-04	7,9168E-05	2,2059E-02	4,6967E-06	2,4367E-06	1,0224E-04	2,8288E-05	7,3301E-06	2,0161E-06	6,5742E-06
70	2	0	8,0473E-06	8,7273E-04	1,0746E-05	2,2306E-02	1,9567E-07	3,6415E-09	2,3881E-05	8,6431E-07	1,0168E-07	1,2875E-09	2,6767E-10
70	2	5	8,0473E-06	8,7274E-04	1,0746E-05	2,2306E-02	2,3033E-07	3,8457E-09	2,5048E-05	8,6381E-07	7,9791E-08	1,2875E-09	2,2058E-08
70	4	0	7,8169E-06	8,2186E-04	2,0631E-05	2,2275E-02	5,1674E-07	1,9969E-08	4,4033E-05	2,9250E-06	6,4508E-07	1,7023E-08	3,5145E-09
70	4	5	7,8171E-06	8,2187E-04	2,0630E-05	2,2275E-02	5,6716E-07	2,2831E-08	4,5174E-05	2,9242E-06	4,9205E-07	1,6602E-08	1,5579E-07
70	6	0	7,5963E-06	7,7398E-04	2,9802E-05	2,2244E-02	9,1548E-07	5,3060E-08	6,0366E-05	5,6255E-06	1,6900E-06	6,9436E-08	1,4133E-08
70	6	5	7,5978E-06	7,7399E-04	2,9800E-05	2,2244E-02	9,8446E-07	7,2505E-08	6,1482E-05	5,6233E-06	1,2264E-06	6,6092E-08	4,7485E-07
70	8	0	7,3846E-06	7,2859E-04	3,8360E-05	2,2214E-02	1,3710E-06	1,0561E-07	7,3638E-05	8,7070E-06	3,1310E-06	1,7765E-07	3,5458E-08
70	8	5	7,3907E-06	7,2856E-04	3,8360E-05	2,2213E-02	1,4640E-06	1,7347E-07	7,4733E-05	8,7043E-06	2,1552E-06	1,6554E-07	1,0061E-06
70	10	0	7,1805E-06	6,8536E-04	4,6384E-05	2,2183E-02	1,8696E-06	1,7982E-07	8,4487E-05	1,2023E-05	4,8474E-06	3,5486E-07	6,9177E-08
70	10	5	7,1971E-06	6,8524E-04	4,6390E-05	2,2183E-02	1,9945E-06	3,4662E-07	8,5575E-05	1,2022E-05	3,1699E-06	3,2449E-07	1,7419E-06
70	12	0	6,9818E-06	6,4410E-04	5,3934E-05	2,2153E-02	2,4062E-06	2,7823E-07	9,3522E-05	1,5478E-05	6,7558E-06	6,0977E-07	1,1567E-07
70	12	5	7,0186E-06	6,4383E-04	5,3955E-05	2,2153E-02	2,5730E-06	6,1149E-07	9,4622E-05	1,5485E-05	4,2140E-06	5,4845E-07	2,6587E-06
70	14	0	6,7870E-06	6,0473E-04	6,1048E-05	2,2122E-02	2,9783E-06	4,0384E-07	1,0119E-04	1,9016E-05	8,7986E-06	9,4833E-07	1,7451E-07
70	14	5	6,8576E-06	6,0425E-04	6,1094E-05	2,2122E-02	3,1983E-06	9,8541E-07	1,0231E-04	1,9037E-05	5,2616E-06	8,4087E-07	3,7270E-06
70	16	0	6,5955E-06	5,6718E-04	6,7752E-05	2,2090E-02	3,5825E-06	5,5953E-07	1,0774E-04	2,2596E-05	1,0926E-05	1,3742E-06	2,4470E-07
70	16	5	6,7181E-06	5,6642E-04	6,7831E-05	2,2090E-02	3,8672E-06	1,4821E-06	1,0891E-04	2,2642E-05	6,2947E-06	1,2037E-06	4,9157E-06
70	18	0	6,4072E-06	5,3136E-04	7,4061E-05	2,2059E-02	4,2139E-06	7,4783E-07	1,1336E-04	2,6190E-05	1,3093E-05	1,8891E-06	3,2490E-07
70	18	5	6,6049E-06	5,3025E-04	7,4182E-05	2,2058E-02	4,5748E-06	2,1114E-06	1,1457E-04	2,6272E-05	7,3004E-06	1,6375E-06	6,1939E-06
70	20	0	6,2221E-06	4,9721E-04	7,9990E-05	2,2026E-02	4,8674E-06	9,7094E-07	1,1814E-04	2,9776E-05	1,5264E-05	2,4933E-06	4,1347E-07
70	20	5	6,5230E-06	4,9568E-04	8,0162E-05	2,2025E-02	5,3160E-06	2,8790E-06	1,1942E-04	2,9907E-05	8,2716E-06	2,1419E-06	7,5324E-06

Tabela 8. Obliczone gęstości jądrowe dla najważniejszych z punktu widzenia krytyczności produktów rozszczepienia, uwzględniając różne głębokości wypalenia, zawartości pary oraz 5-letni czas chłodzenia.

Table 8. Calculated nuclear densities for the most important fission products from the point of view of criticality, taking into account different burn-up, steam content and a 5-year cooling time.

Zawartość pary w wodzie [%]	Głębokość wypalenia [GWD/MTU]	Czas przechowywania [lata]	Gęstości jądrowe produktów rozszczepienia [atom/barn-cm]										
			Tc-99	Rh-103	Xe-131	Cs-133	Nd-143	Nd-148	Sm-147	Sm-149	Sm-151	Sm-152	Eu-155
0	2	0	2,8460E-06	7,3955E-07	1,2166E-06	2,9378E-06	2,1011E-06	8,4670E-07	2,0953E-08	7,9082E-08	1,5038E-07	2,0197E-07	1,3566E-08
0	2	5	3,0077E-06	1,6208E-06	1,4374E-06	3,3096E-06	2,8635E-06	8,4673E-07	7,9810E-07	1,0224E-07	1,4934E-07	2,0200E-07	6,5494E-09
0	4	0	5,8255E-06	2,1418E-06	2,6265E-06	6,2104E-06	4,8391E-06	1,6931E-06	9,5949E-08	8,2212E-08	2,2802E-07	4,7831E-07	2,1982E-08
0	4	5	5,9871E-06	3,2678E-06	2,8499E-06	6,5830E-06	5,6011E-06	1,6910E-06	1,7697E-06	1,0368E-07	2,2164E-07	4,7583E-07	9,2503E-09
0	6	0	8,7798E-06	3,7180E-06	4,0116E-06	9,4491E-06	7,4729E-06	2,5379E-06	2,1926E-07	7,9684E-08	2,6982E-07	7,8193E-07	2,9207E-08
0	6	5	8,9410E-06	4,9253E-06	4,2369E-06	9,8227E-06	8,2241E-06	2,5337E-06	2,7589E-06	9,9179E-08	2,5943E-07	7,7477E-07	1,1423E-08
0	8	0	1,1711E-05	5,3406E-06	5,3714E-06	1,2656E-05	9,9972E-06	3,3817E-06	3,8398E-07	7,7184E-08	2,9296E-07	1,0940E-06	3,6831E-08
0	8	5	1,1872E-05	6,5828E-06	5,5983E-06	1,3031E-05	1,0739E-05	3,3753E-06	3,7312E-06	9,5049E-08	2,7971E-07	1,0806E-06	1,3671E-08
0	10	0	1,4620E-05	6,9706E-06	6,7040E-06	1,5830E-05	1,2414E-05	4,2246E-06	5,8411E-07	7,6224E-08	3,0555E-07	1,4055E-06	4,5417E-08
0	10	5	1,4779E-05	8,2311E-06	6,9319E-06	1,6205E-05	1,3147E-05	4,2159E-06	4,6784E-06	9,2682E-08	2,9022E-07	1,3845E-06	1,6084E-08
0	12	0	1,7499E-05	8,5907E-06	8,0046E-06	1,8965E-05	1,4720E-05	5,0660E-06	8,1398E-07	7,5660E-08	3,1337E-07	1,7092E-06	5,5170E-08
0	12	5	1,7657E-05	9,8616E-06	8,2330E-06	1,9339E-05	1,5443E-05	5,0549E-06	5,5962E-06	9,0805E-08	2,9627E-07	1,6797E-06	1,8712E-08
0	14	0	2,0347E-05	1,0192E-05	9,2699E-06	2,2055E-05	1,6912E-05	5,9058E-06	1,0682E-06	7,4990E-08	3,1930E-07	2,0015E-06	6,6316E-08
0	14	5	2,0502E-05	1,1468E-05	9,4982E-06	2,2429E-05	1,7625E-05	5,8920E-06	6,4820E-06	8,8949E-08	3,0045E-07	1,9624E-06	2,1635E-08
0	16	0	2,3162E-05	1,1768E-05	1,0498E-05	2,5100E-05	1,8988E-05	6,7439E-06	1,3420E-06	7,4098E-08	3,2414E-07	2,2819E-06	7,9036E-08
0	16	5	2,3314E-05	1,3045E-05	1,0726E-05	2,5471E-05	1,9689E-05	6,7272E-06	7,3350E-06	8,7028E-08	3,0341E-07	2,2321E-06	2,4908E-08
0	18	0	2,5943E-05	1,3317E-05	1,1688E-05	2,8097E-05	2,0947E-05	7,5804E-06	1,6308E-06	7,3000E-08	3,2817E-07	2,5506E-06	9,3399E-08
0	18	5	2,6090E-05	1,4590E-05	1,1914E-05	2,8465E-05	2,1634E-05	7,5605E-06	8,1545E-06	8,5055E-08	3,0542E-07	2,4887E-06	2,8556E-08
0	20	0	2,8689E-05	1,4834E-05	1,2839E-05	3,1045E-05	2,2786E-05	8,4155E-06	1,9307E-06	7,1731E-08	3,3153E-07	2,8079E-06	1,0939E-07
0	20	5	2,8830E-05	1,6099E-05	1,3062E-05	3,1408E-05	2,3457E-05	8,3919E-06	8,9400E-06	8,3049E-08	3,0664E-07	2,7322E-06	3,2594E-08
40	2	0	2,8391E-06	7,4610E-07	1,2151E-06	2,9307E-06	2,0914E-06	8,4721E-07	2,0850E-08	8,6716E-08	1,5491E-07	1,9947E-07	1,3649E-08
40	2	5	3,0005E-06	1,6384E-06	1,4362E-06	3,3019E-06	2,8494E-06	8,4724E-07	7,9478E-07	1,1001E-07	1,5375E-07	1,9950E-07	6,5894E-09
40	4	0	5,8070E-06	2,1625E-06	2,6192E-06	6,1901E-06	4,8149E-06	1,6937E-06	9,5048E-08	9,1415E-08	2,3970E-07	4,6909E-07	2,2002E-08
40	4	5	5,9682E-06	3,3055E-06	2,8432E-06	6,5621E-06	5,5715E-06	1,6915E-06	1,7565E-06	1,1263E-07	2,3273E-07	4,6670E-07	9,3423E-09
40	6	0	8,7455E-06	3,7555E-06	3,9943E-06	9,4101E-06	7,4346E-06	2,5381E-06	2,1628E-07	8,9372E-08	2,8839E-07	7,6386E-07	2,9330E-08
40	6	5	8,9062E-06	4,9829E-06	4,2203E-06	9,7829E-06	8,1796E-06	2,5338E-06	2,7303E-06	1,0817E-07	2,7675E-07	7,5688E-07	1,1634E-08
40	8	0	1,1657E-05	5,3949E-06	5,3398E-06	1,2593E-05	9,9464E-06	3,3810E-06	3,7725E-07	8,6747E-08	3,1756E-07	1,0654E-06	3,7251E-08

40	8	5	1,1817E-05	6,6587E-06	5,5673E-06	1,2966E-05	1,0682E-05	3,3745E-06	3,6824E-06	1,0358E-07	3,0232E-07	1,0521E-06	1,4040E-08
40	10	0	1,4542E-05	7,0410E-06	6,6545E-06	1,5737E-05	1,2355E-05	4,2228E-06	5,7170E-07	8,5891E-08	3,3518E-07	1,3649E-06	4,6330E-08
40	10	5	1,4700E-05	8,3235E-06	6,8830E-06	1,6111E-05	1,3081E-05	4,2139E-06	4,6055E-06	1,0106E-07	3,1712E-07	1,3440E-06	1,6643E-08
40	12	0	1,7396E-05	8,6761E-06	7,9346E-06	1,8839E-05	1,4658E-05	5,0629E-06	7,9387E-07	8,5719E-08	3,4699E-07	1,6556E-06	5,6739E-08
40	12	5	1,7552E-05	9,9688E-06	8,1635E-06	1,9212E-05	1,5375E-05	5,0516E-06	5,4960E-06	9,9358E-08	3,2649E-07	1,6259E-06	1,9472E-08
40	14	0	2,0217E-05	1,0291E-05	9,1769E-06	2,1893E-05	1,6856E-05	5,9013E-06	1,0384E-06	8,5571E-08	3,5644E-07	1,9334E-06	6,8636E-08
40	14	5	2,0369E-05	1,1588E-05	9,4055E-06	2,2265E-05	1,7562E-05	5,8873E-06	6,3517E-06	9,7802E-08	3,3355E-07	1,8938E-06	2,2588E-08
40	16	0	2,3002E-05	1,1880E-05	1,0380E-05	2,4898E-05	1,8948E-05	6,7379E-06	1,3003E-06	8,5200E-08	3,6466E-07	2,1976E-06	8,2172E-08
40	16	5	2,3150E-05	1,3177E-05	1,0607E-05	2,5267E-05	1,9642E-05	6,7209E-06	7,1716E-06	9,6188E-08	3,3928E-07	2,1469E-06	2,6041E-08
40	18	0	2,5751E-05	1,3440E-05	1,1543E-05	2,7852E-05	2,0933E-05	7,5728E-06	1,5753E-06	8,4586E-08	3,7199E-07	2,4487E-06	9,7403E-08
40	18	5	2,5893E-05	1,4732E-05	1,1768E-05	2,8216E-05	2,1614E-05	7,5524E-06	7,9555E-06	9,4505E-08	3,4396E-07	2,3853E-06	2,9849E-08
40	20	0	2,8464E-05	1,4967E-05	1,2665E-05	3,0754E-05	2,2811E-05	8,4060E-06	1,8596E-06	8,3766E-08	3,7855E-07	2,6872E-06	1,1429E-07
40	20	5	2,8599E-05	1,6250E-05	1,2887E-05	3,1112E-05	2,3476E-05	8,3819E-06	8,7032E-06	9,2772E-08	3,4774E-07	2,6095E-06	3,4013E-08
70	2	0	2,8319E-06	7,5287E-07	1,2133E-06	2,9234E-06	2,0813E-06	8,4785E-07	2,0744E-08	9,5842E-08	1,5964E-07	1,9677E-07	1,3742E-08
70	2	5	2,9931E-06	1,6564E-06	1,4349E-06	3,2941E-06	2,8349E-06	8,4789E-07	7,9152E-07	1,1927E-07	1,5836E-07	1,9680E-07	6,6349E-09
70	4	0	5,7880E-06	2,1828E-06	2,6109E-06	6,1693E-06	4,7900E-06	1,6945E-06	9,4138E-08	1,0267E-07	2,5206E-07	4,5881E-07	2,2035E-08
70	4	5	5,9488E-06	3,3424E-06	2,8354E-06	6,5406E-06	5,5411E-06	1,6923E-06	1,7432E-06	1,2356E-07	2,4446E-07	4,5653E-07	9,4332E-09
70	6	0	8,7104E-06	3,7905E-06	3,9745E-06	9,3698E-06	7,3953E-06	2,5386E-06	2,1329E-07	1,0150E-07	3,0844E-07	7,4335E-07	2,9469E-08
70	6	5	8,8706E-06	5,0368E-06	4,2011E-06	9,7417E-06	8,1342E-06	2,5342E-06	2,7011E-06	1,1946E-07	2,9544E-07	7,3660E-07	1,1835E-08
70	8	0	1,1602E-05	5,4433E-06	5,3042E-06	1,2527E-05	9,8947E-06	3,3808E-06	3,7049E-07	9,8819E-08	3,4470E-07	1,0326E-06	3,7687E-08
70	8	5	1,1761E-05	6,7270E-06	5,5323E-06	1,2899E-05	1,0623E-05	3,3742E-06	3,6322E-06	1,1440E-07	3,2724E-07	1,0196E-06	1,4394E-08
70	10	0	1,4463E-05	7,1009E-06	6,5995E-06	1,5641E-05	1,2294E-05	4,2214E-06	5,5927E-07	9,7909E-08	3,6855E-07	1,3183E-06	4,7265E-08
70	10	5	1,4620E-05	8,4036E-06	6,8285E-06	1,6013E-05	1,3013E-05	4,2125E-06	4,5300E-06	1,1155E-07	3,4739E-07	1,2977E-06	1,7187E-08
70	12	0	1,7292E-05	8,7462E-06	7,8578E-06	1,8708E-05	1,4595E-05	5,0603E-06	7,7378E-07	9,8086E-08	3,8545E-07	1,5946E-06	5,8345E-08
70	12	5	1,7446E-05	1,0059E-05	8,0871E-06	1,9080E-05	1,5304E-05	5,0489E-06	5,3919E-06	1,0995E-07	3,6101E-07	1,5650E-06	2,0220E-08
70	14	0	2,0085E-05	1,0369E-05	9,0763E-06	2,1725E-05	1,6797E-05	5,8973E-06	1,0086E-06	9,8503E-08	3,9923E-07	1,8572E-06	7,1018E-08
70	14	5	2,0235E-05	1,1686E-05	9,3051E-06	2,2095E-05	1,7496E-05	5,8831E-06	6,2160E-06	1,0873E-07	3,7163E-07	1,8174E-06	2,3533E-08
70	16	0	2,2841E-05	1,1965E-05	1,0254E-05	2,4689E-05	1,8902E-05	6,7324E-06	1,2590E-06	9,8776E-08	4,1156E-07	2,1050E-06	8,5381E-08
70	16	5	2,2985E-05	1,3281E-05	1,0481E-05	2,5055E-05	1,9590E-05	6,7151E-06	7,0015E-06	1,0752E-07	3,8071E-07	2,0536E-06	2,7162E-08
70	18	0	2,5559E-05	1,3530E-05	1,1390E-05	2,7600E-05	2,0910E-05	7,5656E-06	1,5206E-06	9,8799E-08	4,2292E-07	2,3385E-06	1,0147E-07
70	18	5	2,5696E-05	1,4840E-05	1,1614E-05	2,7960E-05	2,1585E-05	7,5449E-06	7,7483E-06	1,0624E-07	3,8868E-07	2,2740E-06	3,1121E-08
70	20	0	2,8240E-05	1,5062E-05	1,2484E-05	3,0456E-05	2,2823E-05	8,3970E-06	1,7897E-06	9,8584E-08	4,3349E-07	2,5585E-06	1,1922E-07
70	20	5	2,8368E-05	1,6363E-05	1,2704E-05	3,0808E-05	2,3482E-05	8,3724E-06	8,4567E-06	1,0490E-07	3,9572E-07	2,4795E-06	3,5401E-08

proces ten przebiega najszybciej dla przypadku 0% pary, gdzie strumień neutronów termicznych jest największy. Zależność wypalania prętów z gadolinem od wypalania całej kasy (rys. 7) wskazuje na mniejsze tempo wypalania truciźny w stosunku do średniej dla całego zestawu, co jest wynikiem lokalnego tłumienia strumienia neutronów. Szczegółowe dane dotyczące składu izotopowego aktywności i produktów rozszczepienia (tab. 7 i 8) stanowią kompletną bazę danych dla dalszych, szczegółowych analiz bezpieczeństwa, np. w ramach koncepcji burnup credit.

Porównanie z wynikami zbiorczymi opublikowanymi w raporcie OECD/NEA wskazuje, że kształt krzywych k-inf oraz rząd wielkości stężeń Gd-155/Gd-157 dla zgłoszenia SC20 są spójne z trendami i zakresem rozrzutu prezentowanym w publikacji. Wartości piku reaktywności dla analizowanych wariantów zawartości pary (ok. 1,250 dla 0% pary; 1,216 dla 40% pary; 1,177 dla 70% pary) mieszczą się w zakresie raportowanym. Jednocześnie, zgodnie z uwagą redakcyjną raportu OECD/NEA, wyniki SC20 dla aktywności wskazują na prawdopodobny błąd w początkowym składzie izotopowym uranu, przez co nie były uwzględniane w analizach statystycznych aktywności. Z tego względu w niniejszym tekście nie formułowane są wnioski porównawcze dla szczegółowych koncentracji aktywności. Prezentowane tabele traktowane są jako materiał uzupełniający do dalszych analiz.

Ogólne wnioski płynące z benchmarku Fazy IIB, sformułowane w raporcie OECD [1], wskazują na kilka kluczowych aspektów. Po pierwsze, największym źródłem rozbieżności w wynikach między uczestnikami okazały się zastosowane biblioteki danych jądrowych, a w mniejszym stopniu sam kod obliczeniowy czy metoda rozwiązania równania transportu. Zaobserwowano, że wykluczenie wyników opartych na starszych generacjach bibliotek (np. ENDF/B-V) znacząco zmniejszało całkowity rozrzut wyników k-inf. Benchmark wykazał również, że o ile stężenia głównych izotopów, jak U-238, są obliczane z bardzo dużą zgodnością (odchylenie poniżej 0,07%), to istnieją znaczne niepewności w predykcji gęstości jądrowych kluczowych izotopów gadolinu (2 do 44% dla Gd-155) oraz niektórych produktów rozszczepienia, zwłaszcza Sm-149, Sm-151 i Eu-155 (2 rzędu 10–26%). Wyniki te podkreślają wagę dalszych prac nad doskonaleniem danych jądrowych i walidacją kodów obliczeniowych, które są niezbędne do wiarygodnych analiz bezpieczeństwa wypalonego paliwa jądrowego.

Notka o autorze

mgr Łukasz Koszuk – fizyk jądrowy, absolwent Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, obecnie pracownik Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, współzałożyciel i prezes Fundacji Forum Atomowe, prowadzi także własną firmę doradczą „AI and Nuclear”. Jest także delegatem do grupy roboczej NEA/OECD *Working Party on Nuclear Criticality Safety*.

Literatura

1. NEA (2022), Burnup Credit Criticality Benchmark Phase IIID: Burnup Calculations of Gadolinium- Bearing Fuel Rods in Boiling Water Reactor Assemblies for Storage and Transportation, OECD Publishing, Paris.
2. Galahom, A. A., et al. (2016). Investigation of different burnable absorbers effects on the neutronic characteristics of PWR assembly. *Journal of Taibah University for Science*, 10(6), 872–882.
3. Rauscher, T., et al. (2019). Cross section measurements of $^{155,157}\text{Gd}(n, \gamma)$ induced by thermal and epithermal neutrons. *The European Physical Journal A*, 55(1), 9.
4. Bolukbasi, M., et al. (2017). Performance and economic assessment of enriched gadolinia burnable absorbers. *Nuclear Engineering and Design*, 313, 329–336.
5. Kim, H., et al. (2022). Development of a high performance burnable absorber for soluble-boron-free SMR. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(7), 2545–2555.
6. NIST, Atomic Weights and Isotopic Compositions – Gadolinium (Gd), [online].
7. Noguere, G., Leconte, P., Bernard, D., Pottier, M., Paradela, C., Kopecky, S., & Schillebeeckx, P. (2024). Generation of particle self-shielded neutron cross-sections for the Monte-Carlo code TRIPOLI-4®. *EPJ Nuclear Sciences and Technologies*, 10, Article 18.
8. Radaideh, M. I., et al. (2019). Advanced BWR criticality safety part II: Cask criticality burnup credit sensitivity and uncertainty analyses. *Annals of Nuclear Energy*, 132, 506–520.
9. Ahn, V. V., et al. (2018). Compound effects of operating parameters on burnup credit in boiling water reactor spent fuel assemblies. *Journal of the Korean Physical Society*, 72(10), 1229–1238.
10. Clarity, J. B., & Twardowski, T. (2016). An Overview of NRC's BWR Burnup Credit Research Project. PATRAM 2016.
11. Ghayeb, S., & Wilson, V. (2016). Regulatory research on use of burnup credit for criticality safety in BWR spent fuel transportation packages. In *Proceedings of the 18th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2016)* (Paper No. 2023). U.S. Nuclear Regulatory Commission.
12. International Atomic Energy Agency. (2007). Implementation of Burnup Credit in Spent Fuel Management Systems. IAEA-TEC-DOC-1547. Vienna: IAEA.
13. Rearden, Bradley T., & Jessee, Matthew Anderson (2017). SCALE Code System 6.2.2.