

Charakterystyka neutronowa kaset paliwowych w reaktorze PWR na przykładzie modelu BEAVRS

Neutronic characteristics of fuel assemblies in a PWR based on the BEAVRS benchmark

Anna Łuczak
Państwowa Agencja Atomistyki

Streszczenie: W pracy przeprowadzono analizę charakterystyk neutronowych dziewięciu typów kaset paliwowych z reaktora PWR BEAVRS z użyciem modułu Polaris z pakietu kodów SCALE. Porównano wyniki obliczeń otrzymanych przy zastosowaniu bibliotek przekrojów czynnych o podziale na 56 i 252 grupy energetyczne. Oceniono wpływ rodzaju biblioteki na współczynnik mnożenia neutronów oraz reaktywność w funkcji stopnia wypalenia paliwa. Zbadano również różnice czasowe w przeprowadzaniu obliczeń. Wyniki wskazują, że biblioteka 56-grupowa zapewnia satysfakcjonującą dokładność przy znacząco krótszym czasie obliczeń, co czyni ją odpowiednią dla większości zastosowań. Bibliotekę 252-grupową rekomenduje się natomiast tam, gdzie priorytetem jest najwyższa precyzja.

Słowa kluczowe: PWR, reaktor jądrowy, BEAVRS, SCALE, Polaris, biblioteki przekrojów czynnych.

Abstract: The study analyzes the neutronic characteristics of nine types of fuel assemblies from the BEAVRS PWR benchmark using the Polaris module from the SCALE code system. The results obtained with 56-group and 252-group cross-section data libraries were compared. The impact of library choice on the neutron multiplication factor and reactivity as a function of fuel burnup was assessed. Differences in computation time were also examined. The results indicate that, for most applications, the 56-group library provides sufficient accuracy while significantly reducing simulation time, whereas the 252-group library should be used in cases requiring the highest level of precision.

Keywords: PWR, nuclear reactor, BEAVRS, SCALE, Polaris, cross-section libraries.

1. Wstęp

W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na niskoemisyjne źródła energii energetyka jądrowa ponownie zyskuje na znaczeniu. W Polsce planowana jest budowa pierwszej elektrowni jądrowej z reaktorami typu AP1000. Reaktory te należą do grupy ciśnieniowych reaktorów wodnych (PWR), które stanowią najczęściej wykorzystywany typ reaktorów jądrowych na świecie.

Wraz z rozwojem energetyki jądrowej w Polsce wzrasta znaczenie analiz, istotnych dla zapewnienia bezpieczeństwa jądrowego, dotyczących działania i bezpieczeństwa reaktorów, wykonywanych m.in. w ramach dozoru jądrowego.

Jednym z podstawowych elementów takich analiz są obliczenia neutronowe, w tym wyznaczanie współczynnika mnożenia neutronów, wielkości kluczowej dla oceny stanu krytyczności reaktora.

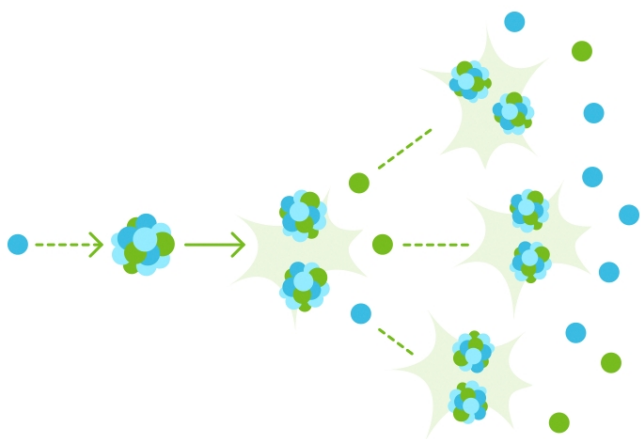
Celem pracy było porównanie wyników obliczeń neutronowych dla dziewięciu typów kaset paliwowych z modelu reaktora PWR BEAVRS, wykonanych z użyciem modułu Polaris pakietu SCALE. Analiza została przeprowadzona z zastosowaniem dwóch wersji bibliotek przekrojów czynnych: 56- i 252-grupowej. Oceniono wpływ wyboru biblioteki na wartość współczynnika mnożenia neutronów oraz czas trwania obliczeń.

2. Podstawy teoretyczne

2.1. Reakcja łańcuchowa

Rozszczepienie jądrowe to reakcja jądrowa, na skutek której jądro atomu rozpada się na co najmniej dwa jądra atomowe. Reakcji tej towarzyszy emisja neutronów, promieniowania gamma oraz związane z tym uwolnienie energii. W reaktorze jądrowym energię generuje się w wyniku samopodtrzymującej się łańcuchowej reakcji rozszczepienia ciężkich jąder, najczęściej uranu-235. Na rysunku 1 przedstawiono mechanizm reakcji łańcuchowej. Neutron pochodzący z zewnętrznego źródła lub spontanicznej reakcji rozszczepienia inicjuje rozszczepienia pierwszego jądra atomowego, a neutrony emitowane przy tym rozszczepieniu powodują rozszczepienia kolejnych jąder.

Poniżej przedstawiono dwie wielkości fizyczne kluczowe z punktu widzenia samopodtrzymującej się reakcji łańcuchowej – współczynnik mnożenia neutronów i reaktywność.



Rys. 1. Schemat reakcji łańcuchowej [1].

Fig. 1. Chain reaction scheme [1].

2.2. Współczynnik mnożenia neutronów

Współczynnik mnożenia neutronów k to podstawowa wielkość, która określa stabilność reakcji łańcuchowej i jest ona wyrażana przez stosunek liczby neutronów w danym pokoleniu do liczby neutronów w poprzednim pokoleniu. Wyróżnia się 3 stany reaktora w zależności od wartości k :

- dla $k < 1$ produkcja neutronów jest mniejsza od straty, więc reaktor znajduje się w stanie podkrytycznym,
- dla $k = 1$ produkcja jest równa stracie, więc reaktor znajduje się w stanie krytycznym,
- dla $k > 1$ produkcja neutronów przewyższa stratę, więc reaktor znajduje się w stanie nadkrytycznym.

Współczynnik mnożenia neutronów można podzielić na dwa rodzaje: efektywny współczynnik mnożenia k_{eff} i nieskończony współczynnik mnożenia k_{inf} . Różnią się one tym, że k_{eff} uwzględnia ucieczkę neutronów, natomiast k_{inf} odnosi się do nieskończonego ośrodka i nie uwzględnia ucieczki [2].

2.3. Reaktywność

Reaktywność to wartość, która opisuje względne odchylenie reaktora od stanu krytycznego i jest ona dana wzorem

$$\frac{(k - 1)}{k}, \quad (1)$$

gdzie k to współczynnik mnożenia neutronów.

Reaktywność jest wartością bezwymiarową, natomiast dla ułatwienia używa się często do jej przedstawienia następujących jednostek:

- 1% = 0,01 ,
- 1 pcm = 10^{-5} .

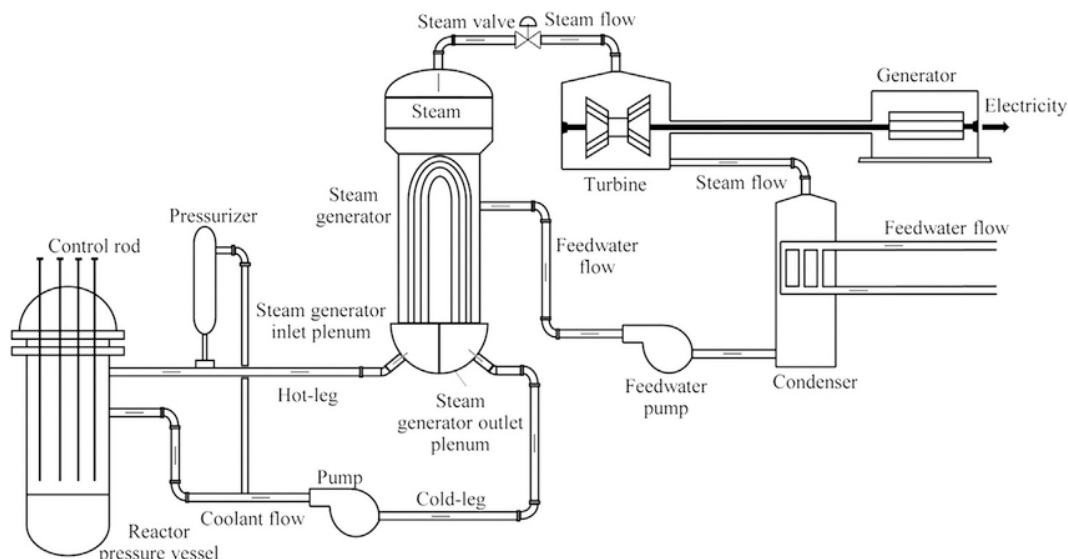
Reaktor, którego $\rho = 0$ jest w stanie krytycznym. Dla $\rho < 0$ lub $\rho > 0$ reaktor jest kolejno w stanie podkrytycznym lub nadkrytycznym [3].

3. Reaktory PWR

Reaktory wodne ciśnieniowe (ang. *Pressurized Water Reactor*, PWR) to najpopularniejszy typ reaktorów jądrowych na świecie. Pierwszy tego typu reaktor o mocy elektrycznej 68 MWe i termicznej 231 MWth znajdujący się w elektrowni jądrowej Shippingport zaprojektowany oraz zbudowany został przez firmę Westinghouse Electric Company, a następnie był eksploatowany od 1957 roku przez firmę Duquesne Light Company [4].

Reaktory PWR do działania zgodnie z nazwą wykorzystują wodę pod wysokim ciśnieniem (zwykle około 15,5 MPa), która odgrywa rolę moderatora i chłodziwa. Dzięki wysokiemu ciśnieniu, które zapewnia praca pomp i utrzymuje stabilizator ciśnienia (ang. *pressurizer*), woda w obiegu pierwotnym nie zamienia się w parę wodną, jak ma to miejsce w reaktorach wodnych wrzących (ang. *Boiling Water Reactor*, BWR). Elektrownie z reaktorami PWR charakteryzują się występowaniem trzech obiegów, których zadaniem jest konwersja energii cieplnej na energię elektryczną.

Na rysunku 2 pokazano schemat reaktora wodnego ciśnieniowego. W zbiorniku ciśnieniowym reaktora (ang. *reactor pressure vessel*) znajduje się rdzeń reaktora, w którym zachodzi reakcja jądrowa. Podgrzana woda wypływa ze zbiornika ciśnieniowego i trafia do wytwornicy pary (ang. *steam generator*), gdzie zachodzi wymiana ciepła między obiegiem pierwotnym a wtórnym, schłodzona woda z obiegu pierwotnego trafia następnie do zbiornika reaktora. Woda z obiegu wtórnego w wytwornicy pary zamienia się w parę wodną, która napędza turbinę, która współpracuje z generatorem, dzięki czemu możliwa jest produkcja energii elektrycznej. Para z turbiny trafia dalej do skraplacza (ang. *condenser*), gdzie w wyniku wymiany ciepła zachodzi jej skraplanie. Schłodzona woda trafia dalej do wytwornicy pary i cykl się zamyka [6].



Rys. 2. Schemat elektrowni z reaktorem typu PWR [5].

Fig. 2. Diagram of a PWR power plant [5].

3.1. Budowa rdzenia

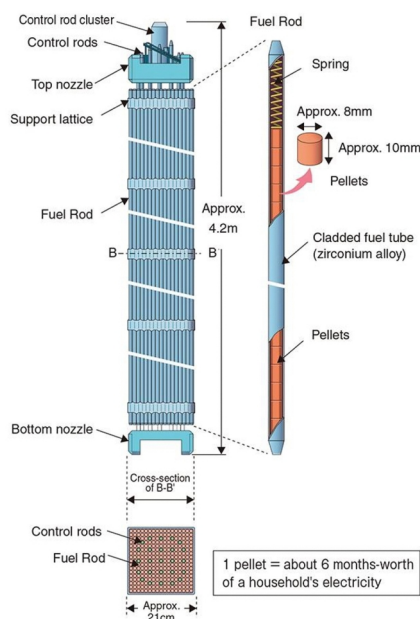
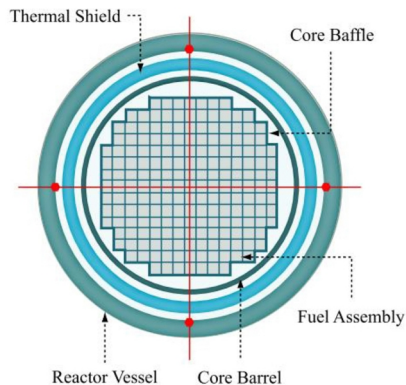
Podstawowymi elementami rdzenia są: paliwo, moderator, chłodziwo, pręty kontrolne i reflektor. W paliwie zachodzi reakcja rozszczepienia. Powstają tam neutrony, które spowalniane zostają przez moderator, z kolei reflektor ma za zadanie ograniczyć możliwość ucieczki tych neutronów z rdzenia. Pręty kontrolne służą do regulowania mocy reaktora i w razie potrzeby służą również do jego wyłączenia. Zadaniem chłodziwa jest odbiór ciepła z rdzenia [7].

Na rysunku 3 przedstawiony został przekrój poziomy rdzenia reaktora oraz schemat budowy kasety i pręta paliwowego. Rdzeń reaktora, który znajduje się w zbiorniku ciśnieniowym, tworzą kasety paliwowe (ang. *fuel assemblies*), przegroda rdzenia (ang. *core baffle*) pełniąc

funkcję reflektora, obudowa rdzenia (ang. *core barrel*) oraz osłona termiczna (ang. *thermal shield*). Kaseta paliwowa składa się z:

- siatki prętów 17 x 17, gdzie 1 pręt ma około 1 cm średnicy. W siatce znajdować się mogą: pręty paliwowe (ang. *fuel rods*), rury wiodące (ang. *guide tubes*), rurki instrumentów pomiarowych (ang. *instrument tubes*), pręty z trucizną wypalającą się BA (ang. *burnable absorber rods*) oraz pręty ze źródłem neutronowym (ang. *neutron source rods*),
- zespołu prętów kontrolnych (ang. *control rod cluster*), który służy do kontroli reaktywności,
- górnej i dolnej dyszy (ang. *top and bottom nozzle*), które za zadanie mają m.in. odpowiednio kierować przepływ chłodziwa,

Cross Section (193 Fuel Assemblies)



Rys. 3. Przykładowy schemat rdzenia i kasety paliwowej [8]. Znaczenie oznaczeń przedstawiono w tekście.

Fig. 3. Example diagram of core and fuel assembly [8].

- siatek dystansujących (ang. *support lattices*), które utrzymują pręty w odpowiedniej pozycji.

Pręty paliwowe składają się z pastylek paliwowych (ang. *fuel pellets*), koszulek paliwowych (ang. *cladding*) i sprężyny (ang. *spring*). Pastylki paliwowe mają cylindryczny kształt i są ułożone jedna na drugiej. Średnica każdej z nich to około 8 mm, a wysokość to około 1 cm. Wykonane są one najczęściej z dwutlenku uranu (UO_2) o wzbogaceniu 3–5%. Sprężyna poprzez nacisk na pastylki ma zapobiegać ich przemieszczaniu się. Pastylki paliwowe umieszczone są w koszulkach, zazwyczaj wykonanych ze stopu cyrkonu. Przestrzeń pomiędzy pastylkami a koszulką wypełniona jest gazem, np. helem.

4. Reaktor BEAVRS

BEAVRS (ang. *Benchmark for Evaluation and Validation of Reactor Simulations*) [9] to model reaktora ciśnieniowego lekkowodnego, który bazuje na istniejącym w USA reaktorze firmy Westinghouse o mocy 1100 MWe. Model ten stworzony został przez inżynierów z Massachusetts Institute of Technology w celu umożliwienia testowania narzędzi symulacyjnych rdzenia jądrowego. Benchmark jest dostępny publicznie na stronie MIT oraz jest aktualizowany co kilka lat [10].

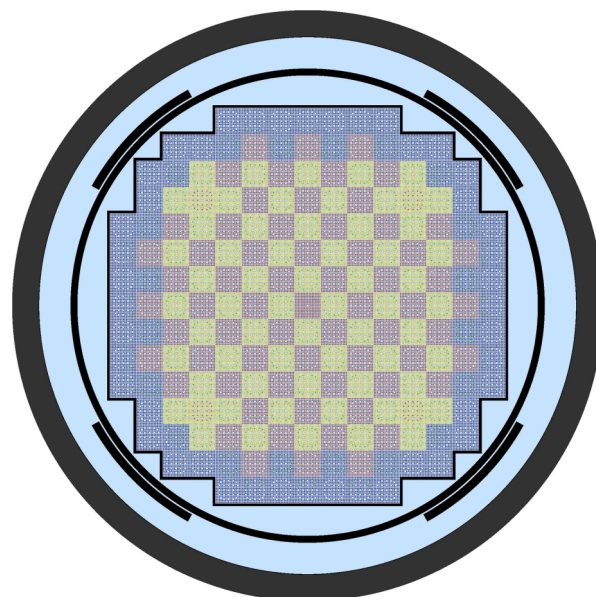
Najważniejsze parametry reaktora zostały przedstawione w tabeli 1. Więcej informacji można znaleźć w benchmarku. W ramach tej pracy analizowany był jedynie pierwszy cykl działania reaktora na pełnej mocy (ang. *hot full power*, HFP).

Tabela 1. Podstawowe parametry reaktora BEAVRS [10].

Table 1. Basic parameters of BEAVRS reactor [10].

Liczba kaset paliwowych	193
Typ kaset paliwowych	17x17
Liczba prętów paliwowych w kasie	264
Liczba prętów z trucizną wypalającą	1266
Początkowa masa ciężkiego metalu	81,8 MT
Moc elektryczna	1100 MWe
Moc cieplna	3410 MWth
Rodzaj paliwa	UO_2

Na rysunku 4 przedstawiono przekrój poprzeczny reaktora BEAVRS. Reaktor BEAVRS składa się z rdzenia, przegrody rdzenia, obudowy rdzenia, osłony neutronowej oraz zbiornika ciśnieniowego reaktora. Dodatkowo, niebieskim kolorem została zaznaczona woda znajdująca się w reaktorze. Czerwonym kolorem zaznaczone zostały kasetki paliwowe ze średnim wzbogaceniem paliwa 1,6%, żółtym – 2,4%, a granatowym – 3,1%.



Rys. 4. Przekrój poprzeczny reaktora BEAVRS [10].

Fig. 4. Cross-section of the BEAVRS reactor [10].

4.1. Elementy kaset paliwowych

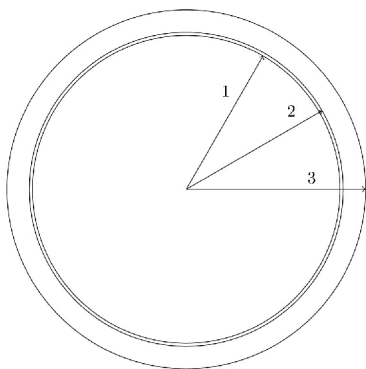
Kasetki paliwowe reaktora BEAVRS składają się z sześciu rodzajów prętów: pręta paliwowego, rury wiodącej, rurki instrumentów pomiarowych, pręta z trucizną wypalającą się oraz górnej i dolnej części pręta kontrolnego. W modelu stworzonym w ramach tej pracy nie uwzględniono obecności prętów kontrolnych w kasie paliwowej, aby uzyskać możliwie największą reaktywność. Geometria prętów użytych do obliczeń zostały przedstawione na rysunkach 5–8 (praca własna), a materiały zawarte są w tabelach 2–5.

4.2. Materiały

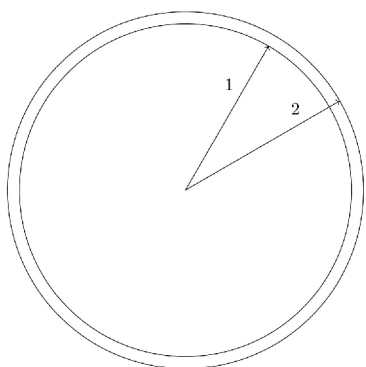
W poniższych tabelach 6–14 przedstawiono materiały, które znajdują się w elementach kaset paliwowych i reflektorze reaktora BEAVRS, wraz z ich gęstościami masowymi oraz gęstościami atomowymi poszczególnych izotopów. Dane dla wody borowej zostały odpowiednio przeliczone względem tych z benchmarku. Było to spowodowane koniecznością przyjęcia innej zawartości boru – benchmark określał tę wartość dla pracy reaktora na zerovej mocy (ang. *Hot Zero Power*, HZP), natomiast w tej pracy badano reaktor pracujący na pełnej mocy. Zawartość boru została więc zmieniona z 975 ppm na 378 ppm, zgodnie z wyjaśnieniem znajdującym się w innej pracy [11], która skupia się na tym samym reaktorze.

4.3. Kasetki paliwowe

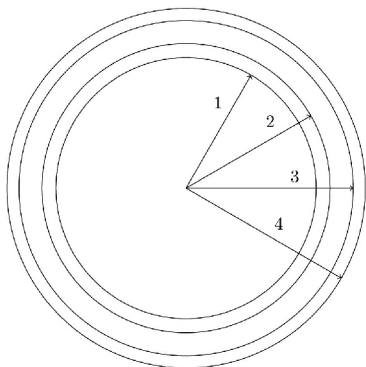
Kasetki paliwowe mają siatkę 17 17. Ich aktywna długość wynosi 365,76 cm. Skok siatki elementu paliwowego to 1,25984 cm, a długość boku kasety paliwowej to 21,50364 cm. Pręty z trucizną wypalającą się (ang. *Burn-*



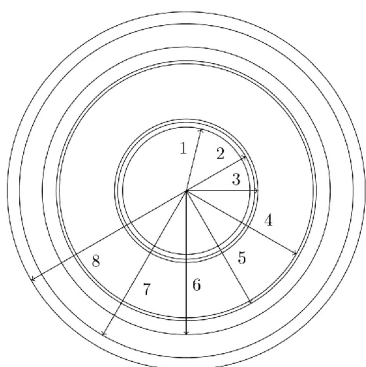
Rys. 5. Wymiary pręta paliwowego.
Fig. 5. Fuel pin geometry.



Rys. 6. Wymiary rury wodącej.
Fig. 6. Guide tube geometry.



Rys. 7. Wymiary rurki instrumentów pomiarowych.
Fig. 7. Instrument tube geometry.



Rys. 8. Wymiary pręta z truczną wypalającą się.
Fig. 8. Burnable absorber rod geometry.

able Absorber, BA) mają aktywną długość 360,68 cm i jest ich w rdzeniu 1266. Zadaniem wypalającej się trucizny jest pochłanianie neutronów w celu zrównoważenia reaktywności w świeżym paliwie. W kasetach paliwowych może znajdować się 0, 6, 12, 15, 16 lub 20 prętów z truczną wypalającą się, oznaczanych skrótem BA, zgodnie z następującym zestawieniem liczby prętów i stopnia wzbogacenia paliwa:

- 1,6% wzbogacenia – 0 BA,
- 2,4% wzbogacenia – 0, 12 lub 16 BA,
- 3,1% wzbogacenia – 0, 6, 15, 16 lub 20 BA.

W każdej z kaset znajdują się 264 pręty paliwowe i 25 rur wodących. Graficzne przedstawienie każdej z kaset paliwowych otrzymane za pomocą kodu Polaris znajduje się w dalszej części pracy.

Tabela 2. Materiały pręta paliwowego.
Table 2. Fuel pin materials.

Nr strzałki	Promień (cm)	Materiał
1	0,39218	Paliwo
2	0,40005	Hel
3	0,45720	Stop cyrkonu

Tabela 3. Materiały rury wodącej.
Table 3. Guide tube materials.

Nr strzałki	Promień (cm)	Materiał
1	0,56134	Woda borowa
2	0,60198	Stop cyrkonu

Tabela 4. Materiały rurki instrumentów pomiarowych.
Table 4. Instrument tube materials.

Nr strzałki	Promień (cm)	Materiał
1	0,43688	Powietrze
2	0,48387	Stop cyrkonu
3	0,56134	Woda borowa
4	0,60198	Stop cyrkonu

Tabela 5. Materiały pręta z truczną wypalającą się.
Table 5. Burnable absorber rod materials.

Nr strzałki	Promień (cm)	Materiał
1	0,21400	Powietrze
2	0,23051	Stal nierdzewna 304
3	0,24130	Hel
4	0,42672	Szkoło boro-krzemowe
5	0,43688	Hel
6	0,48387	SS304
7	0,56134	Woda borowa
8	0,60198	Stop cyrkonu

Tabela 6. Paliwo o wzbogaceniu 1,6%.**Table 6.** 1.6% enrichment fuel.

Gęstość	10,31341 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
O16	4,5897e-02
O17	1,7436e-05
O18	9,2032e-05
U234	3,0131e-06
U235	3,7503e-04
U238	2,2625e-02

Tabela 7. Paliwo o wzbogaceniu 2,4%.**Table 7.** 2.4% enrichment fuel.

Gęstość	10,29748 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
O16	4,5830e-02
O17	1,7411e-05
O18	9,1898e-05
U234	4,4842e-06
U235	5,5814e-04
U238	2,2407e-02

Tabela 8. Paliwo o wzbogaceniu 3,1%.**Table 8.** 3.1% enrichment fuel.

Gęstość	10,30166 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
O16	4,5853e-02
O17	1,7420e-05
O18	9,1942e-05
U234	5,7987e-06
U235	7,2175e-04
U238	2,2253e-02

Tabela 9. Woda borowa.**Table 9.** Borated water.

Gęstość	0,71217 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
B10	2,9719e-06
B11	1,2022e-05
H1	4,7559e-02
H2	7,408e-06
O16	2,3726e-02
O17	9,0138e-06
O18	4,7576e-05

Tabela 10. Powietrze.**Table 10.** Air.

Gęstość	0,00616 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
Ar36	7,8730e-09
Ar40	1,4844e-09
Ar40	2,3506e-06
C12	6,7539e-08
C13	7,5658e-10
N14	1,9680e-04
N15	7,2354e-07
O16	5,2866e-05
O17	2,0084e-08
O18	1,0601e-07

Tabela 11. Szkło boro-krzemowe.**Table 11.** Borosilicate glass.

Gęstość	2,26 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
Al27	1,7352e-03
B10	9,6506e-04
B11	3,9189e-03
O16	4,6514e-02
O17	1,7671e-05
O18	9,3268e-05
Si28	1,6926e-02
Si29	8,5944e-04
Si30	5,6654e-04

Tabela 12. Hel.**Table 12.** Helium.

Gęstość	0,0015981 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
He3	4,8089e-10
He4	2,4044e04

Tabela 13. Stal nierdzewna 304.**Table 13.** Stainless steel 304.

Gęstość	8,03 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
Cr50	7,6778e-04
Cr52	1,4806e-02
Cr53	1,6789e-03
Cr54	4,1791e-04
Fe54	3,4620e-03
Fe56	5,4345e-02

Fe57	1,2551e-03
Fe58	1,6703e-04
Mn55	1,7604e-03
Ni58	5,6089e-03
Ni60	2,1605e-03
Ni61	9,3917e-05
Ni62	2,9945e-04
Ni64	7,6261e-05
Si28	9,5281e-05
Si29	4,8381e-05
Si30	3,1893e-05

Tabela 14. Stop cyrkonu.**Table 14.** Zirconium alloy.

Gęstość	6,55 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
Cr50	3,2962e-06
Cr52	6,3564e-05
Cr53	7,2076e-06
Cr54	1,7941e-06
Fe54	8,6698e-06
Fe56	1,3610e-04
Fe57	3,1431e-06
Fe58	4,1829e-07
O16	3,0744e-04
O17	1,1680e-07
O18	6,1648e-07
Sn112	4,6735e-06
Sn114	3,1799e-06
Sn115	1,6381e-06
Sn116	7,0055e-05
Sn117	3,7003e-05
Sn118	1,1669e-04
Sn119	4,1387e-05
Sn120	1,5697e-04
Sn122	2,2308e-02
Sn124	2,7897e-05
Zr90	2,1828e-02
Zr91	4,7601e-03
Zr92	7,2759e-03
Zr94	7,3734e-03
Zr96	1,1879e-03

5. SCALE

SCALE [12] (ang. *Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*) to narzędzie rozwijane w Narodowym Laboratorium Oak Ridge ORNL, służące do różnego rodzaju analiz związanych z bezpieczeństwem jądrowym i ochroną radiologiczną, takich jak obliczanie krytyczności, składu izotopowego paliwa, stopnia wypalenia paliwa itp. Korzysta z niego wiele dozorów jądrowych, takich jak amerykański NRC czy polska Państwowa Agencja Atomistyki oraz wiele firm na całym świecie.

5.1. Polaris

Do wykonania obliczeń wykorzystano kod Polaris z pakietu SCALE 6.2.4 [13]. Przeznaczony jest on do analiz neutronowych reaktorów lekkowodnych (LWR) i stanowi alternatywę dla starszego kodu TRITON, umożliwiając szybsze i prostsze modelowanie problemów. W ramach tej pracy do obliczeń w kodzie Polaris wykorzystano zestawy danych jądrowych, tzw. biblioteki przekrojów czynnych ENDF/B-V7.1, w wersji 252-grupowej oraz 56-grupowej, a także dane wprowadzone przez użytkownika w plikach wejściowych z rozszerzeniem.inp. Pliki wyjściowe mogą zostać wykorzystane do stworzenia trójwymiarowego modelu reaktora w innym kodzie obliczeniowym, np. PARCS [14]. Wyniki uzyskane z użyciem biblioteki 252-grupowej cechują się większą dokładnością niż te otrzymane na podstawie biblioteki 56-grupowej, jednak wyższa dokładność wiąże się z istotnym wydłużeniem czasu obliczeń. W pracy porównano rezultaty uzyskane dla obu bibliotek.

6. Modelowanie kaset paliwowych

Plik wejściowy kodu Polaris składa się z bloków, w których należy wskazać rodzaj reaktora, geometrię kasety paliwowej, skład, właściwości materiałów, typy elementów kasety wraz z rozmieszczeniem oraz inne parametry w zależności od rodzaju obliczeń, które są do wykonania. Zastosowano domyślne warunki refleksyjne na brzegach modelu, co odpowiada nieskończonej siatce kaset. Obliczenia wykonano dla kroków stopnia wypalenia: 0, 0,1, 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5, 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20, 25, 30, 35, 40 i 45 GWd/tHM. W tabeli 15 przedstawione zostały parametry wejściowe, które przyjęto w ramach tej pracy. Gęstość mocy została wyliczona, korzystając ze wzoru: $P = P_{th}/M_{HM}$, gdzie M_{HM} – początkowa masa ciężkiego metalu, P_{th} – moc cieplna reaktora. Obie te wartości znaleźć można w tabeli 1. Temperatury i zawartość boru dla pracy reaktora na pełnej mocy zaczerpnięte zostały ze wspomnianej wcześniej pracy [11].

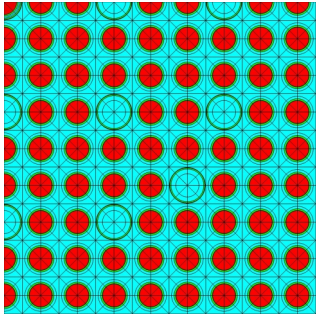
W reaktorze znajduje się 9 rodzajów kaset paliwowych, które różnią się wzbogaceniem paliwa lub liczbą prętów

Tabela 15. Parametry użyte w plikach wejściowych dla konwencjonalnego paliwa.

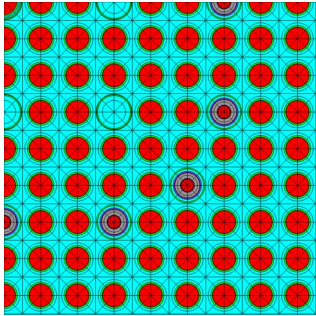
Table 15. Parameters used in the input files for conventional fuel.

Temperatura paliwa	900 K
Temperatura pozostałych materiałów	580 K
Zawartość boru	378 ppm
Gęstość mocy	41,699 MWth/tHM

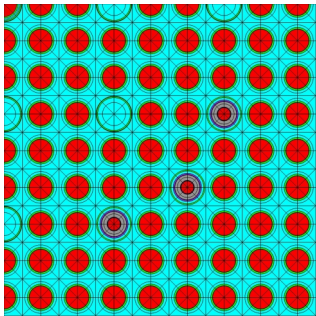
z wypalającą się trucizną. Dla każdego rodzaju kasety stworzone zostały 2 pliki wejściowe Polaris – jeden dla biblioteki 56-grupowej i drugi dla biblioteki 252-grupowej. W ramach symulacji Polaris utworzył pliki graficzne przedstawiające geometrię kaset. Te, których geometria jest symetryczna, przedstawione zostały w postaci ćwiartek. Grafiki widoczne są na rysunkach 9–15 (praca własna).



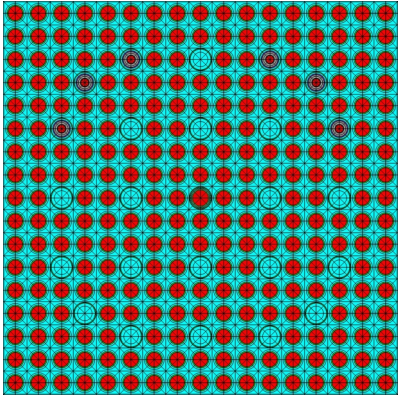
Rys. 9. Ćwiartka kaset: 1,6% OBA, 2,4% OBA i 3,1% OBA.
Fig. 9. Quarter of the assemblies: 1.6% OBA, 2.4% OBA and 3.1% OBA.% OBA



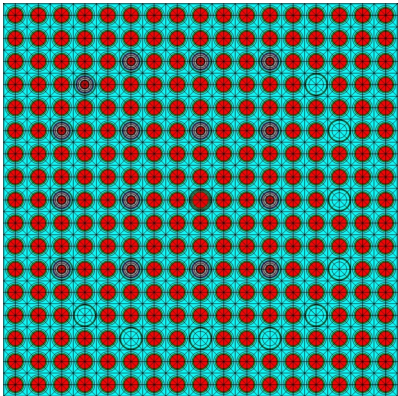
Rys. 10. Ćwiartka kasety 2,4% 16BA.
Fig. 10. Quarter of assembly 2.4% 16BA.



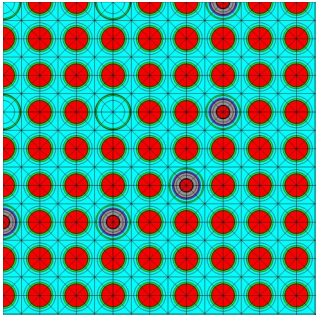
Rys. 11. Ćwiartka kasety 2,4% 12BA.
Fig. 11. Quarter of assembly 2.4% 12BA.



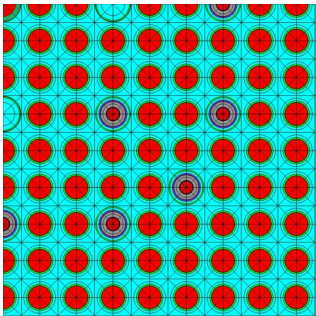
Rys. 12. Kaseta paliwowa 3,1% 6 BA.
Fig. 12. Fuel assembly 3,1% 6 BA.



Rys. 13. Kaseta paliwowa 3,1% 15BA.
Fig. 13. Fuel assembly 3.1% 15BA.



Rys. 14. Ćwiartka kasety 3,1% 16BA.
Fig. 14. Quarter of 3.1% 16BA assembly.



Rys. 15. Ćwiartka kasety 3,1% 20BA.
Fig. 15. Quarter of assembly 3.1% 20BA.

7. Analiza wyników

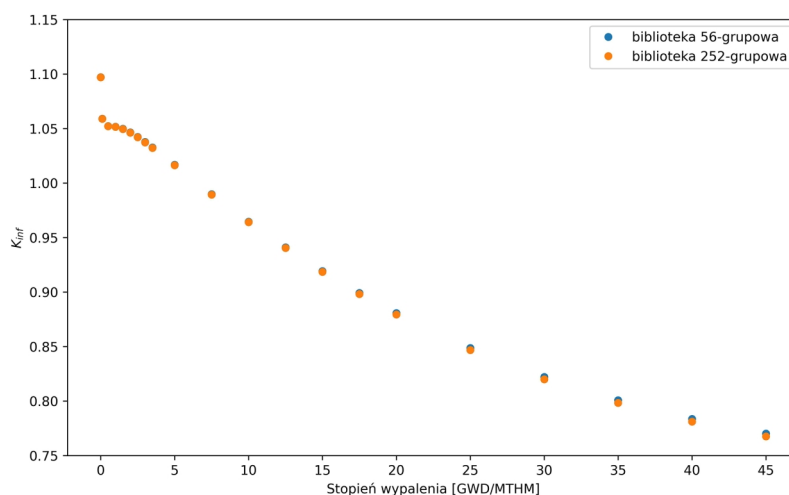
Do przeprowadzenia obliczeń krytycznościowych dla każdej kasety wykorzystano kod Polaris. Pliki wyjściowe zawierały m.in. wartość nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów dla kolejnych kroków stopnia wypalenia. Stopień wypalenia to miara ilości energii uwolnionej podczas wypalania paliwa w reaktorze i jest on proporcjonalny do czasu wypalania.

Na wykresach 16–24 (praca własna) przedstawiono porównanie zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla biblioteki 56- i 252-grupowej. Z wykresów odczytać można, że wyniki dla obu rodzajów bibliotek na wszystkich wykresach w większości dobrze się pokrywają. Różnica zaczyna być widoczna dopiero dla bardzo dużych wartości stopnia wypalenia kaset – w okolicy punktu głębokiego stopnia

wypalenia, tzn. kiedy $k_{inf} < 0,95$, co oznacza, że reaktor jest w stanie głęboko podkrytycznym.

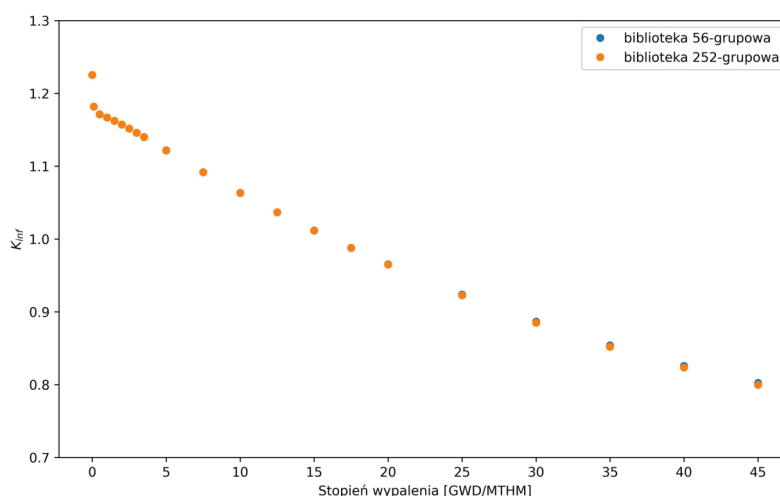
W celu lepszego zobrazowania tych różnic, na rysunku 25 przedstawiono wykres względnej różnicy nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów, obliczonej wg wzoru $(k_{inf-56} - k_{inf-252}) / k_{inf-252}$ w funkcji stopnia wypalenia dla wszystkich typów kaset. Wartość tej różnicy osiąga maksymalnie wartość około 0,33%, co mogłoby się wydawać bardzo dobrym wynikiem.

W celu porównania wyników przygotowano również widoczny na rysunku 26 wykres, który przedstawia w skali logarytmicznej zależność różnicy w reaktywności w pcm dla obu bibliotek w funkcji stopnia wypalenia. Odczytać z niego można, że maksymalna wartość różnicy to około 450 pcm, co jest sporą wartością z punktu widzenia działania reaktora.



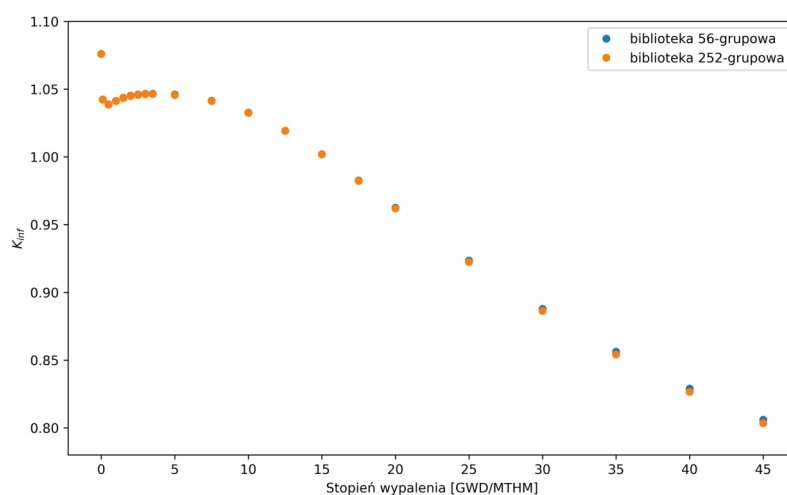
Rys. 16. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 1,6% bez prętów z wypalającą się trucizną.

Fig. 16. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on fuel burnup for a fuel assembly with 1.6% enrichment, without burnable absorber rods.



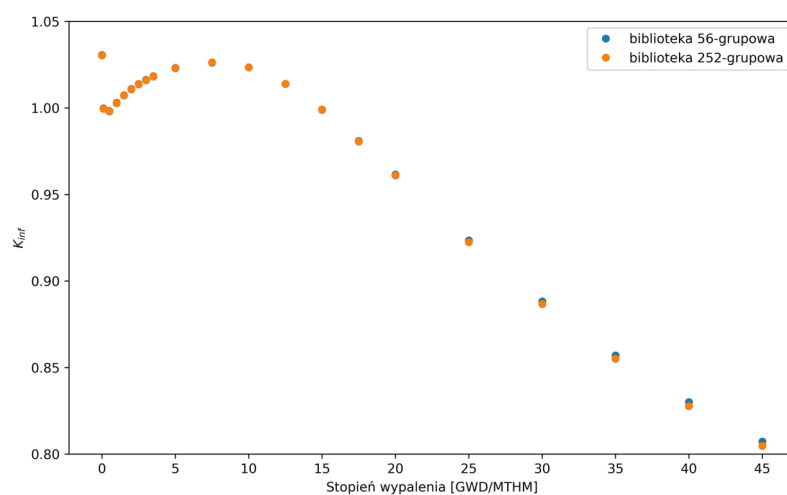
Rys. 17. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 2,4% bez prętów z wypalającą się trucizną.

Fig. 17. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 2.4% enriched fuel assembly without burnable absorber rods.



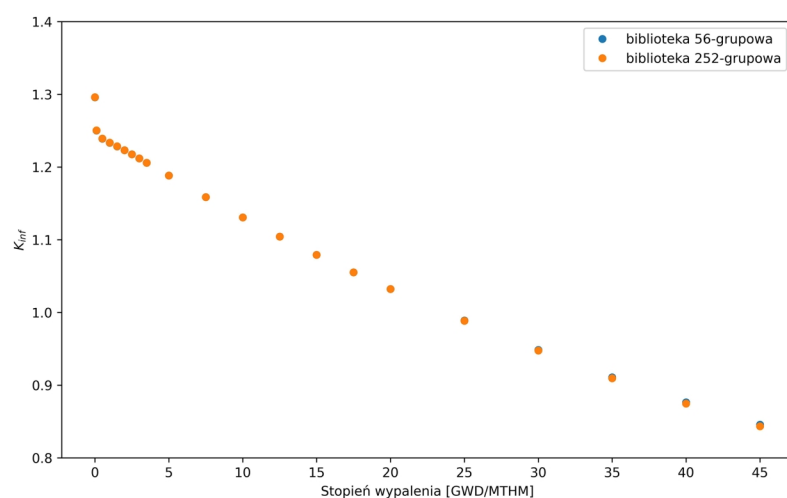
Rys. 18. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 2,4% z 12 prętami z wypalającą się trutyczną.

Fig. 18. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 2.4% enriched fuel assembly with 12 burnable absorber rods.



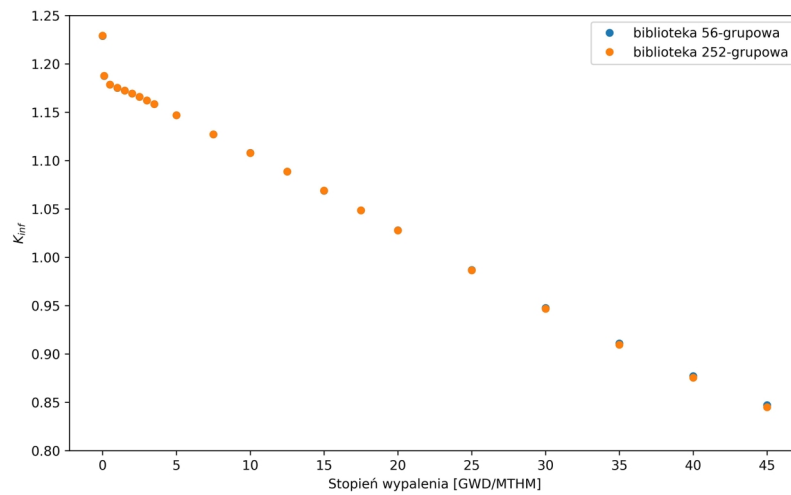
Rys. 19. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 2,4% z 16 prętami z wypalającą się trutyczną.

Fig. 19. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 2.4% enriched fuel assembly with 16 burnable absorber rods.



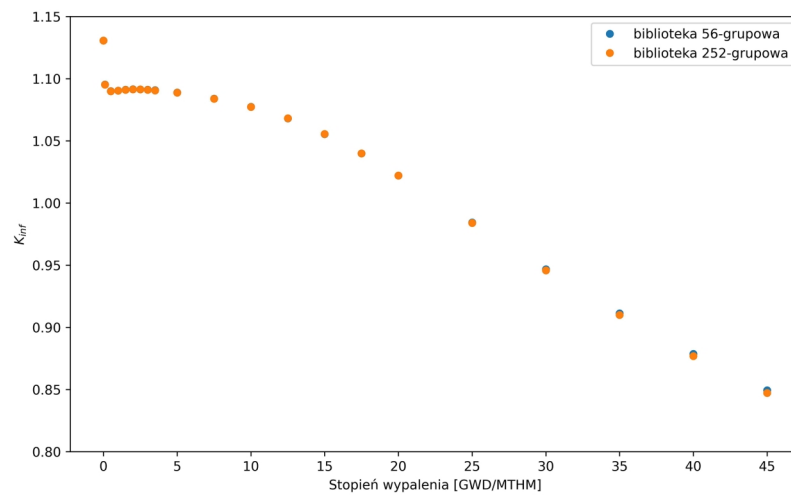
Rys. 20. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 3,1% bez prętów z wypalającą się trutyczną.

Fig. 20. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 3.1% enriched fuel assembly without burnable absorber rods.



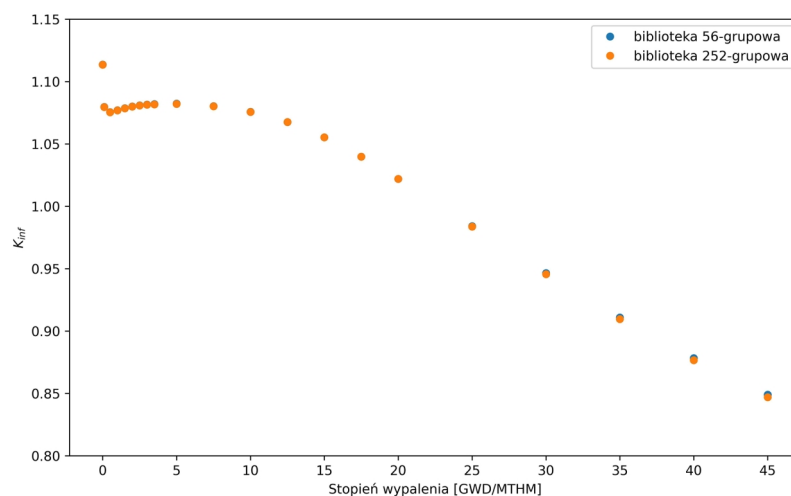
Rys. 21. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasy o wzbogaceniu paliwa 3,1% z 6 prętami z wypalającą się trucizną.

Fig. 21. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 3.1% enriched fuel assembly with 6 burnable absorber rods.



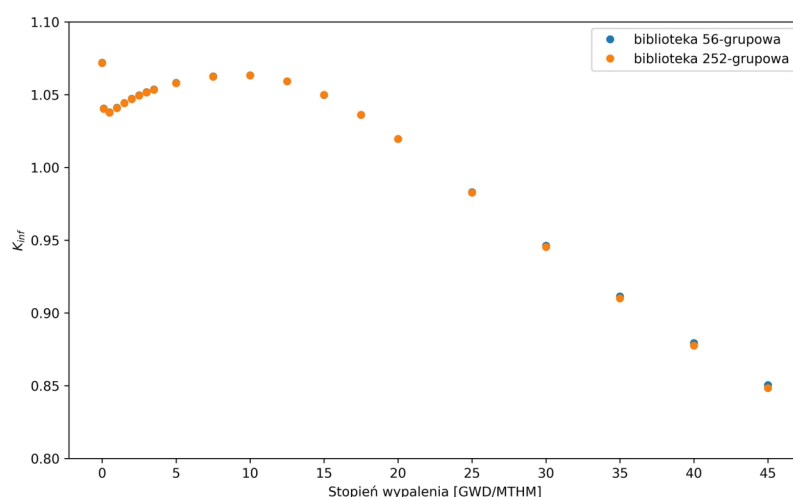
Rys. 22. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasy o wzbogaceniu paliwa 3,1% z 15 prętami z wypalającą się trucizną.

Fig. 22. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 3.1% enriched fuel assembly with 15 burnable absorber rods.



Rys. 23. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasy o wzbogaceniu paliwa 3,1% z 16 prętami z wypalającą się trucizną.

Fig. 23. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 3.1% enriched fuel assembly with 16 burnable absorber rods.

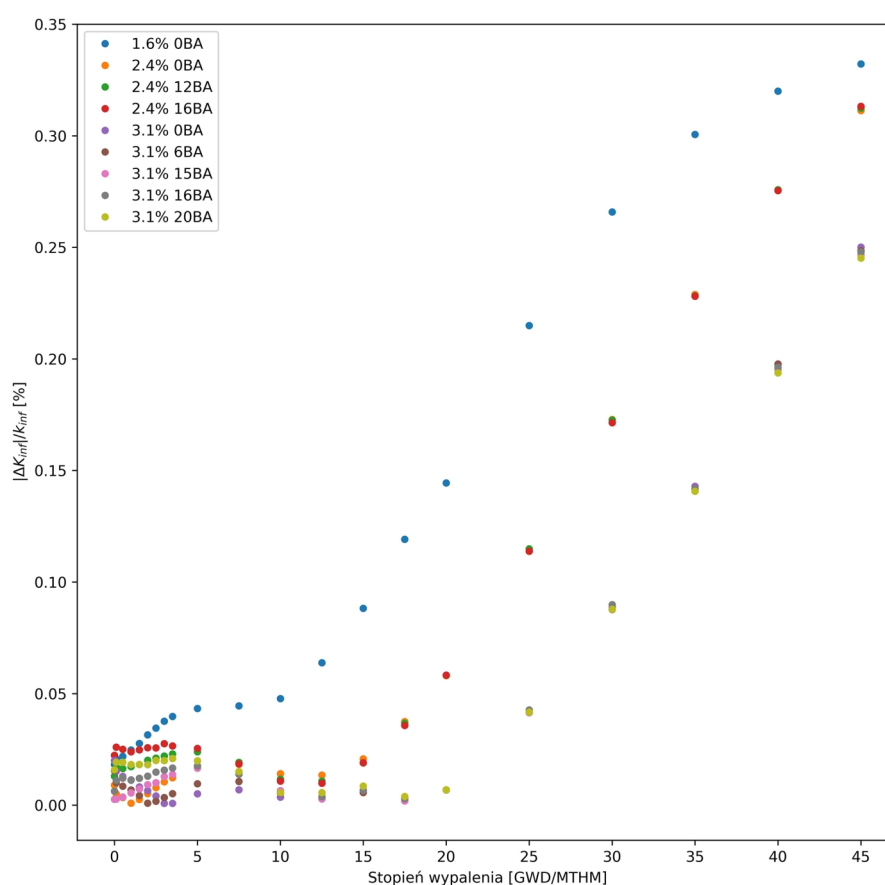


Rys. 24. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 3,1% z 20 prętami z wypalającą się trucizną.

Fig. 24. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 3.1% enriched fuel assembly with 20 burnable absorber rods.

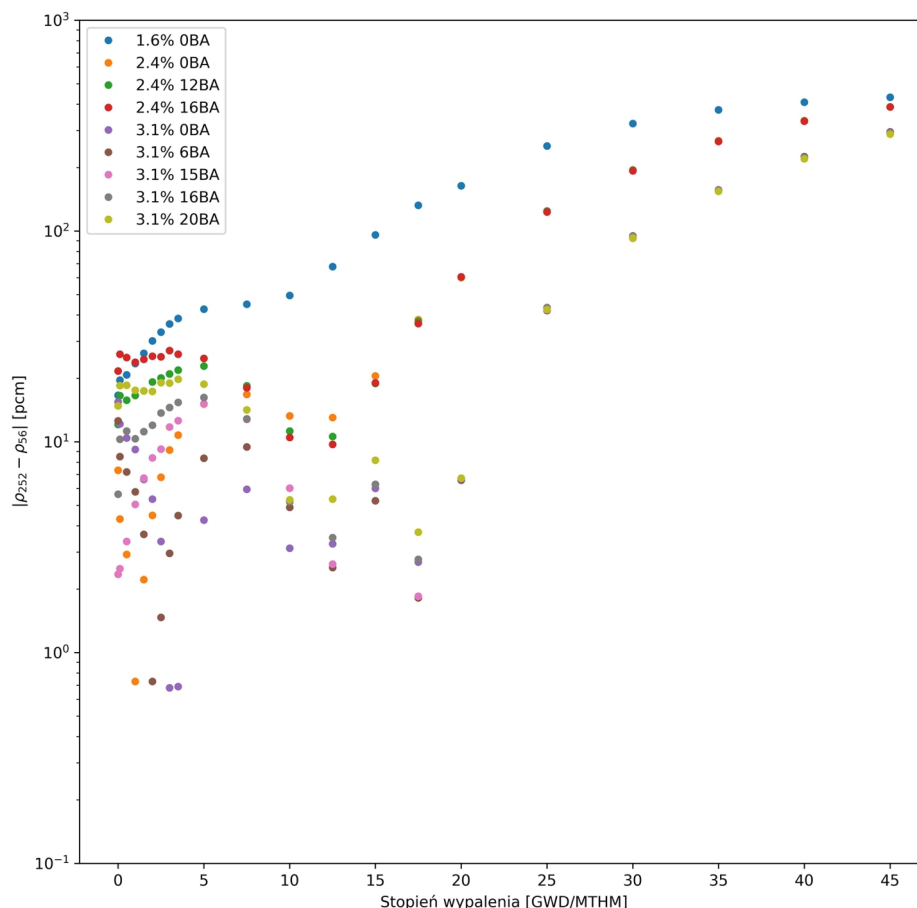
W większości różnica nie przekracza jednak wartości 18 pcm. Można więc uznać, że otrzymane wartości są szczególnie satysfakcjonujące dla mniejszych stopni wypalenia. Na obu wykresach widać, że różnica bardzo mocno zależy od wzbogacenia paliwa – im wyższe wzbogacenie, tym bardziej wyniki dla obu bibliotek są do siebie zbliżone.

Jedną z przyczyn mniejszych różnic między bibliotekami przy wyższym wzbogaceniu paliwa jest wyższa energia neutronów. Wynika to z mniejszej zawartości U-238, który w znacznym stopniu odpowiada za pochłanianie neutronów w obszarze rezonansowym widma. Gdy U-238 jest mniej, spada liczba pochłonieć w tym zakresie, a średnia



Rys. 25. Wykres zależności względnej różnicy nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla wszystkich typów kaset (praca własna).

Fig. 25. Graph showing the dependence of the relative difference in the infinite neutron multiplication factor on burnup for all fuel assembly types (own work).



Rys. 26. Wykres zależności bezwzględnej różnicy reaktywności od stopnia wypalenia dla wszystkich typów kaset (praca własna).

Fig. 26. Graph showing the dependence of the absolute reactivity difference on burnup for all fuel assembly types (own work).

energia neutronów rośnie. W rezultacie wpływ tego obszaru widma, w którym różnice między bibliotekami są największe, staje się mniej istotny. Dlatego wraz ze wzrostem wzbogacenia obserwuje się zmniejszenie różnic w wartościach k_{inf} pomiędzy bibliotekami.

Zauważyć można też, że do pewnego stopnia wypalenia (w zależności od stopnia wzbogacenia paliwa) różnica jest większa dla kaset, które mają większą liczbę prętów z trucizną wypalającą się. Natomiast powyżej tego stopnia wypalenia większa liczba prętów z trucizną daje mniejszą różnicę. Wypalające się trucizny, takie jak gadolin, charakteryzują się bardzo silnymi i złożonymi rezonansami absorpcyjnymi. Na początku cyklu wypalania, przy ich wysokim stężeniu, znacząco wpływają na absorpcję neutronów. Dokładność odwzorowania tych rezonansów przez bibliotekę przekrojów ma istotny wpływ na wartość współczynnika mnożenia. Biblioteka 56-grupowa odwzorowuje je z mniejszą precyzją niż biblioteka 252-grupowa, co prowadzi do większych różnic w wynikach. Wraz z wypalaniem trucizn ich wpływ maleje, a różnice między wynikami dla obu bibliotek stają się mniej wyraźne. Pliki wyjściowe poza wyliczeniami rejestrowały również czas trwania obliczeń. Porównanie czasów dla obu bibliotek pokazało, że w zależności od rodzaju kasety czas obliczeń dla biblioteki 252-grupowej może być nawet ponad 6 razy

dłuższy niż dla biblioteki 56-grupowej. Warto tutaj wspomnieć, że najdłuższy czas obliczeń dla jednej kasety wyniósł prawie 82 godziny. Można zatem wywnioskować, że w przypadku bardzo dużej liczby przypadków do przeanalizowania, ograniczonej wydajności sprzętu lub w przypadku gdy nie ma potrzeby, aby wyniki były bardzo dokładne (zwłaszcza dla dużych stopni wypalenia), lepszym wyborem będzie skorzystanie z biblioteki 56-grupowej. Natomiast w pozostałych przypadkach warto rozważyć wydłużenie obliczeń i otrzymanie bardziej dokładnych wyników z użyciem biblioteki 252-grupowej. Warto zaznaczyć, że głównym celem przeprowadzonych obliczeń nie była realizacja benchmarku w jego klasycznym rozumieniu, lecz analiza wpływu zastosowanej biblioteki przekrojów na wyniki uzyskiwane dla pojedynczych kaset paliwowych. Tego rodzaju porównanie umożliwia ocenę niepewności związanej z wyborem biblioteki, co ma istotne znaczenie przy podejmowaniu decyzji dotyczących dalszych obliczeń na poziomie całego rdzenia. Choć model geometryczny oparto na danych z benchmarku BEAVRS, należy podkreślić, że nie zawiera on danych referencyjnych – ani pomiarowych, ani obliczeniowych – dotyczących pojedynczych kaset. Z tego względu przeprowadzenie walidacji na tym poziomie nie było możliwe i nie stanowiło zakresu niniejszej pracy.

8. Podsumowanie

Celem pracy było określenie wpływu doboru biblioteki przekrojów czynnych na wyniki obliczeń dla pojedynczych kaset paliwowych. Analiza wykazała, że różnice między wynikami uzyskanymi z bibliotek 56- i 252-grupowych są minimalne w zakresie niskich i średnich stopni wypalenia. Dla zastosowań wymagających najwyższej precyzji, zwłaszcza przy dużych stopniach wypalenia zalecana jest biblioteka 252-grupowa. Jednak w większości przypadków, gdzie kluczowe jest szybkie wykonanie obliczeń przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia zasobów sprzętowych, biblioteka 56-grupowa stanowi optymalny wybór, szcze-

gólnie że czas obliczeń może być nawet sześciokrotnie krótszy. Brak danych dla pojedynczych kaset w benchmarku BEAVRS uniemożliwił bezpośrednią walidację, jednak wyniki są zgodne z przewidywanym zachowaniem fizycznym kaset paliwowych podczas wypalania.

O autorze

Anna Łuczak – mgr fizyki, od trzech lat pracuje w Państwowej Agencji Atomistyki (PAA), w Departamencie Bezpieczeństwa Jądrowego. Specjalizuje się w analizach bezpieczeństwa obiektów jądrowych, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień neutroniki. Absolwentka Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Literatura

1. <https://www.fornuclear.org/en/nuclear-power/questions-and-answers/on-nuclear-power/how-does-a-nuclear-reaction-take-place/>, dostęp: 4 lipca 2025 r.
2. Dobrzyński L., Podstawy fizyki reaktorów jądrowych, Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Świerku oraz Wydział Matematyczno-Fizyczny Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie, Świerk, 2013.
3. U.S. Department of Energy, DOE Fundamentals Handbook: Nuclear Physics and Reactor Theory, t. 2, Waszyngton DC, 1993.
4. Kok K. D. Nuclear Engineering Handbook, CRC Press, Boca Raton, 2016.
5. El-Sefy, M., Ezzeldin M., El-Dakhakhni W., Wiebe L., Nagasaki S., System dynamics simulation of the thermal dynamic processes in nuclear power plants, Nuclear Engineering and Technology, t. 51, 6, 2019, 1540-1553.
6. U.S. NRC, NRC Reactor Concepts (R-100) Training Course, 2017.
7. International Atomic Energy Agency, Design of the Reactor Core for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-52, IAEA, Wiedeń, 2019.
8. Darnowski P., 3-fizyka reaktorów jądrowych, materiały szkoleniowe, Politechnika Warszawska, Warszawa, 12-16.12.2022.
9. Kumar S., Liang J., Forget B., Smith K., BEAVRS: An integral full core multi-physics PWR benchmark with measurements and uncertainties, Progress in Nuclear Energy, 129, 103488, 2020.
10. Horelik N., Herman B., Ellis M., Kumar S., Liang J., Forget B., Smith K., MIT Benchmark for Evaluation and Validation of Reactor Simulations (BEAVRS) Rev. 2.0.2. MIT Computational Reactor Physics Group, 2018.
11. Darnowski P., Pawulczyk M., Analysis of the BEAVRS PWR benchmark using SCALE and PARCS, Nukleonika, t. 64, 3, 2019.
12. Wieselquist W. A., Lefebvre R. A., Jessee M. A., SCALE Code System Version 6.2.4, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 2020.
13. Jessee, M. A., Wieselquist, W. A., Evans, T. M., Hamilton, S. P., Jarrell, J. J., Kim, K. S., Lefebvre, J. P., Lefebvre, R. A., Mertyurek, U., Thompson, A. B., Williams, M. L., Polaris: A new two-dimensional lattice physics analysis capability for the SCALE code system, Paper presented at 2014 International Conference on Physics of Reactors, PHYSOR 2014, Kyoto, 2014.
14. Downar T., Ward A., Seker V., Hudson N., Barber D., Larsen L., Neykov B., Roth G., Xu Y., PARCS v3.4.3 Release, t. 1, 2022.