
Wstępna analiza reaktora dwupłynowego z płynnym paliwem metalicznym

Jakub Sierchuła

REAKTOR DFR – wprowadzenie

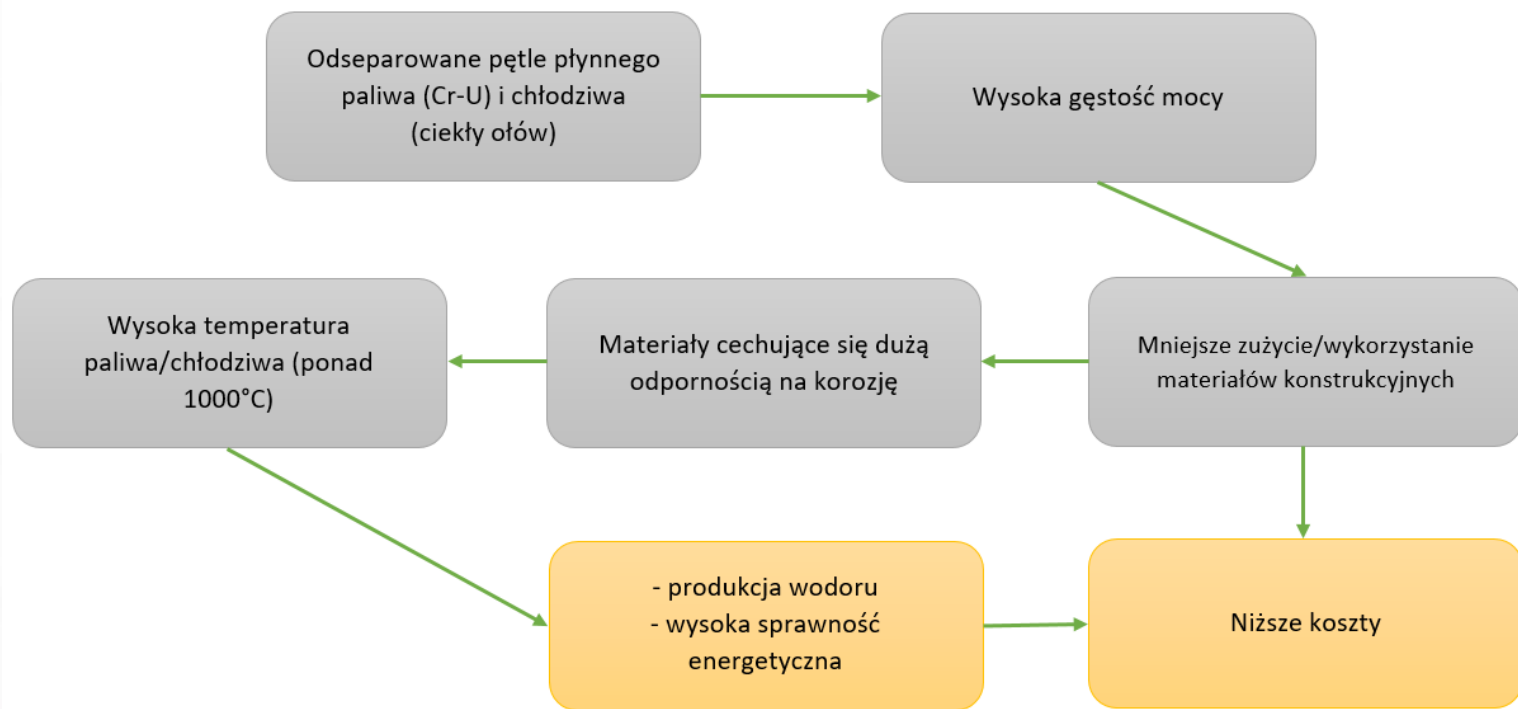
Dual Fluid Reactor (DFR) to nowa koncepcja wysokotemperaturowego reaktora jądrowego wykorzystującego prędkie neutrony, którego nazwa pochodzi od odseparowania pętli ciekłego paliwa od płynnego chłodziwa. W odróżnieniu do innych koncepcji bazujących na płynnym paliwie jądrowym jak np. Molten-Salt Fast Reactor (MSFR), wykorzystanie dwóch niezależnych pętli daje możliwość optymalizacji parametrów pracy zarówno dla paliwa jak i dla chłodziwa.

DFR:

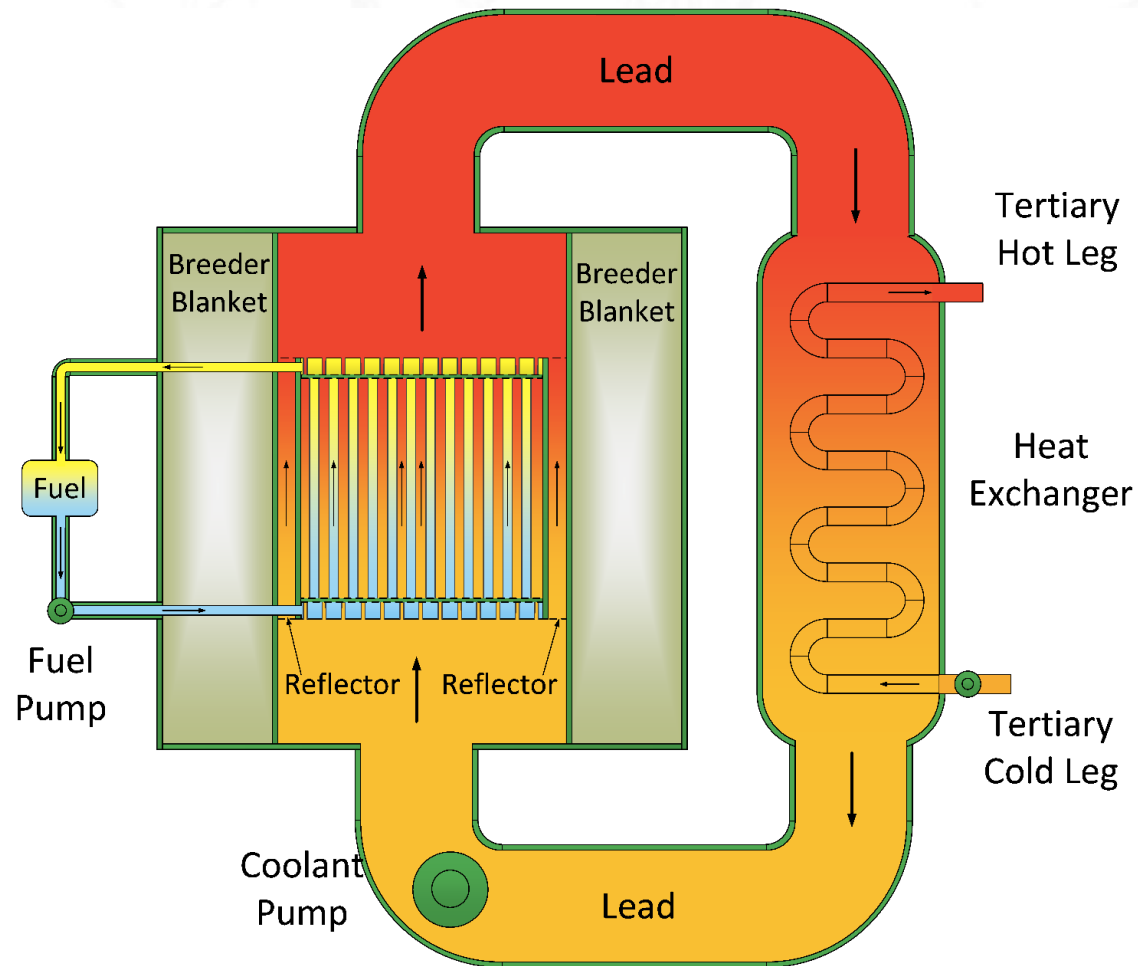
- paliwo: mieszanka chromu i uranu
- chłodziwo: ołów
- reaktor prędkie
- heterogeniczny (niejednorodny)
- wysokotemperaturowy (do 1300°C w górnej części rdzenia)
- powielający cykl paliwowy

REAKTOR DFR – wprowadzenie

Zastosowanie płynnego paliwa, cechującego się wysoką gęstością aktywności, w połączeniu z chłodziwem o bardzo dobrych właściwościach odbioru ciepła umożliwia znaczące zwiększenie gęstości mocy w rdzeniu reaktora.



Obieg paliwa i chłodziwa



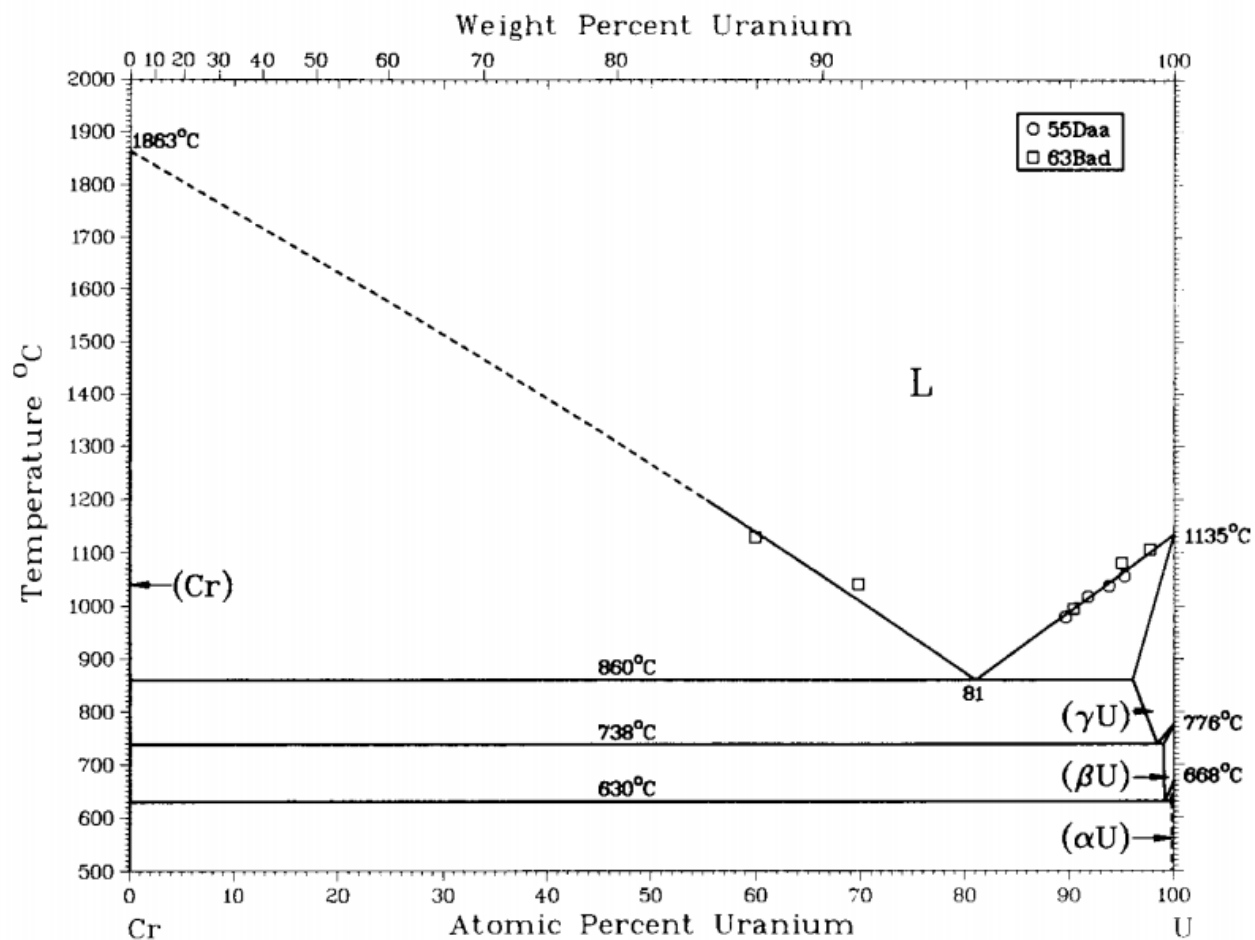
REAKTOR DFR – paliwo

- Proponowany typ paliwa:
 - Paliwo metaliczne: Cr-U
- Skład paliwa:
 - ⁵⁴Cr: 19.00%
 - ²³⁵U: 13.00%
 - ²³⁸U: 68.00%
- Gęstość Cr-U dla temperatury 1000 st. C: $\rho = 12.8772 \text{ g/cm}^3$

$$\rho = 0.985 \cdot \left(\frac{100}{\frac{\text{wt.}\%Cr}{\rho_{Cr}(t)} + \frac{\text{wt.}\%U}{\rho_U(t)}} \right) \quad (1)$$

- Po rozpoczęciu pracy reaktora, w zależności od składu paliwa i zarządzania gospodarką neutronów, DFR może wytwarzać własny materiał rozszczepialny:
 - ²³⁹Pu z ²³⁸U lub
 - ²³³U z ²³²Th.

REAKTOR DFR – paliwo



Rys 1. Wykres fazowy Cr-U

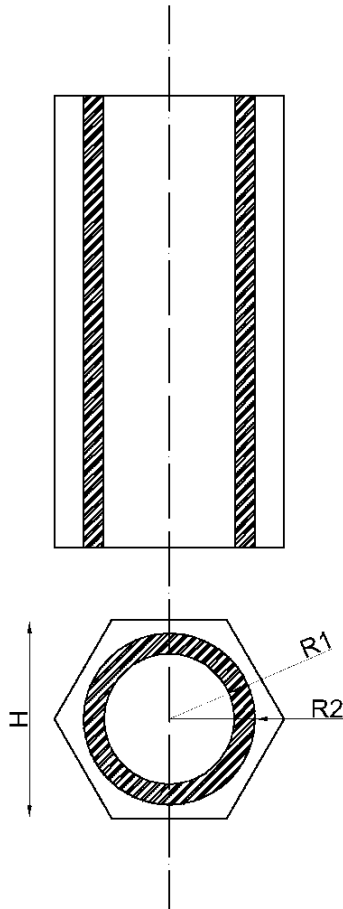
REAKTOR DFR – chłodziwo

- Punkt topnienia ołowiu: 327°C.
- Punkt wrzenia: 1749°C.
- Bardzo niski przekrój czynny na wychwytywanie neutronów prędkich.
- Praktycznie każdy radioaktywny izotop powstający w wyniku działania neutronów z ołowiem wraca z powrotem do stabilnego izotopu ołowiu.
- Dobry reflektor dla neutronów prędkich.
- Wysoka przewodność cieplna $\lambda = 9.32 + 0.0108 \cdot T$
- Gęstość dla temperatury 1000 st. C: $\rho = 9.8416 \text{ g/cm}^3$

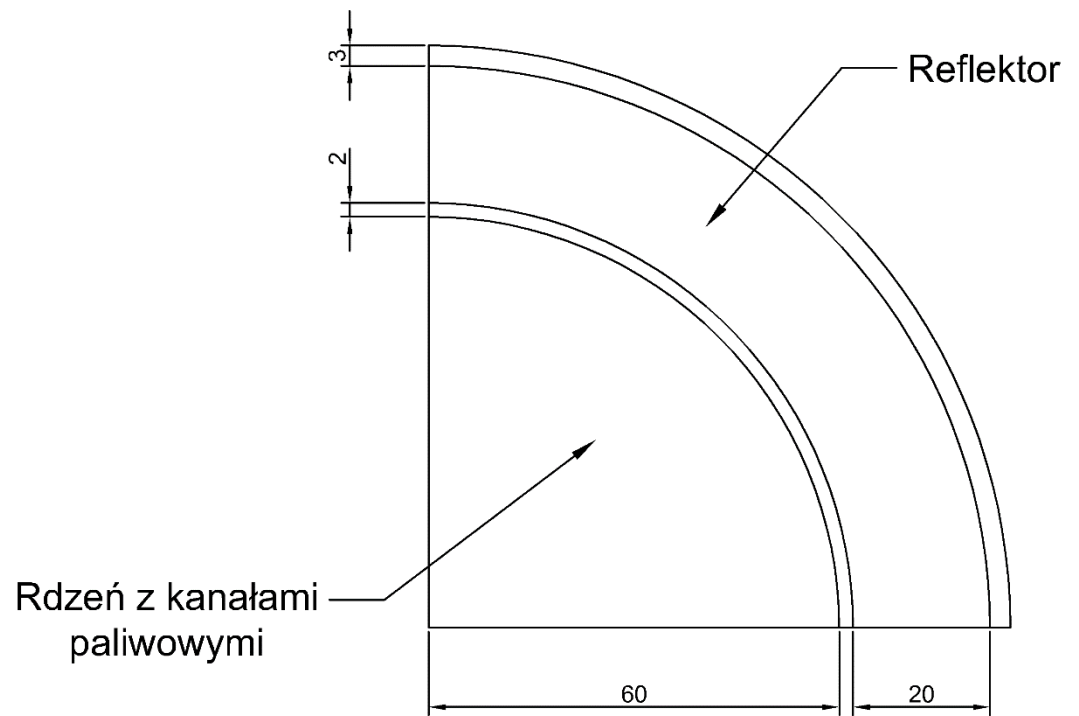
$$\rho = 11441 - 1.2795 \cdot T \quad (2)$$

- Prędkość przepływu zostanie zoptymalizowana w celu osiągnięcia jak najefektywniejszego odbioru ciepła.

REAKTOR DFR



Rys 2. Model kanału paliwowego

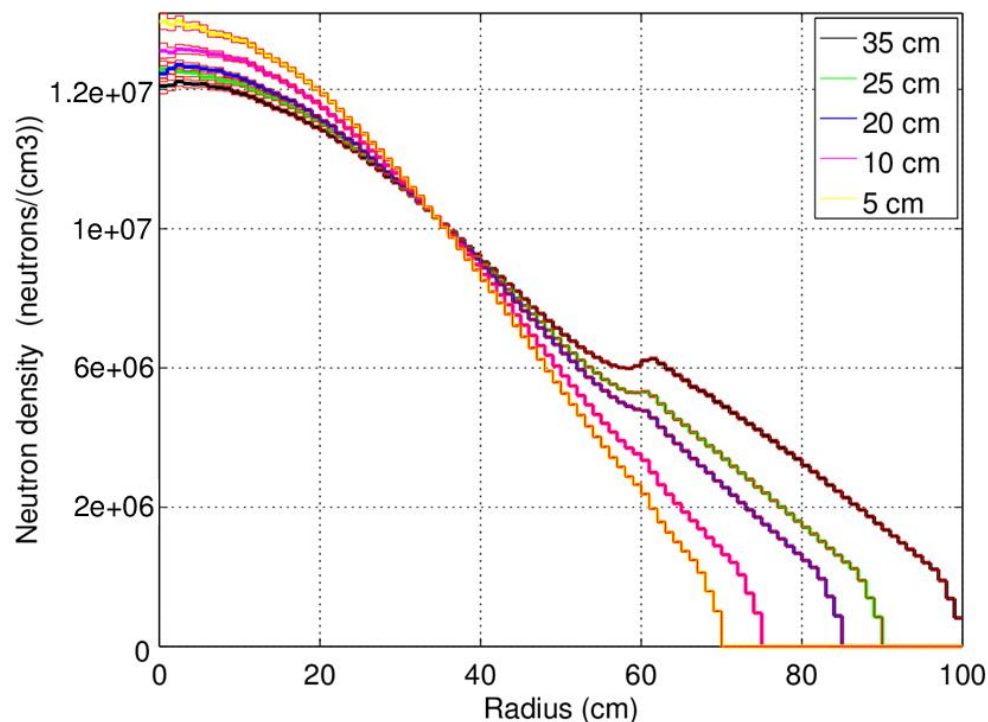


Rys 3. Geometria rdzenia reaktora

Wpływ grubości warstwy reflektora na efektywny współczynnik mnożenia neutronów

Tabela 2. Wyniki symulacji dla k_{eff}

Grubość reflektora [cm]	Efektywny współczynnik mnożenia neutronów k_{eff} [-]	
	endfb7u	jeff311
35	1.03239	1.03423
25	1.02526	1.02782
20	1.02092	1.02241
10	1.00398	1.00992
5	0.99319	1.00071



REAKTOR DFR

$R_1 = 0.95 \text{ cm}$ (promień wewnętrzny kanału paliwowego)

$R_2 = 1.10 \text{ cm}$ (promień zewnętrzny kanału paliwowego)

$H = 2.80 \text{ cm}$ (odległość między środkami sąsiadujących kanałów)

$r_r = 60 \text{ cm}$ (promień reaktora)

$h_r = 120 \text{ cm}$ (wysokość reaktora)

$$n = \frac{\pi \cdot r_r^2}{\frac{3 \cdot \frac{0.5 \cdot H}{\cos(30^\circ)} \cdot \sqrt{3}}{2}} = 2692.79 \approx 2695 \text{ (liczba kanałów paliwowych w rdzeniu)}$$

$$m_{Cr-U} = \rho_{Cr-U} \cdot V_{Cr-U} = \rho_{Cr-U} \cdot \pi \cdot R_1^2 \cdot h_r \cdot n \approx 11.80 \text{ t}$$

$$m_{Cr} = 2.48 \text{ t}$$

$$m_U = 9.32 \text{ t}$$

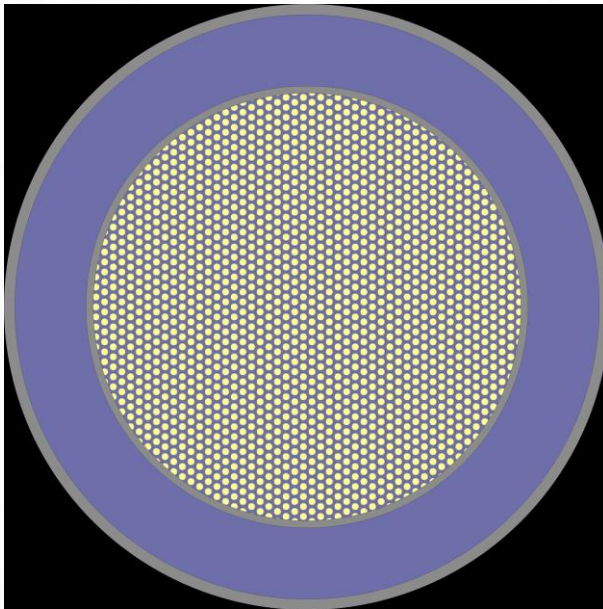
$$m_{Pb_reaktor} = \rho_{Pb} \cdot \pi \cdot r_r^2 \cdot h_r - \rho_{Pb} \cdot \pi \cdot R_2^2 \cdot h_r \cdot n \approx 1.30 \text{ t}$$

$$m_{Pb_reflektor} \approx 10.70 \text{ t}$$

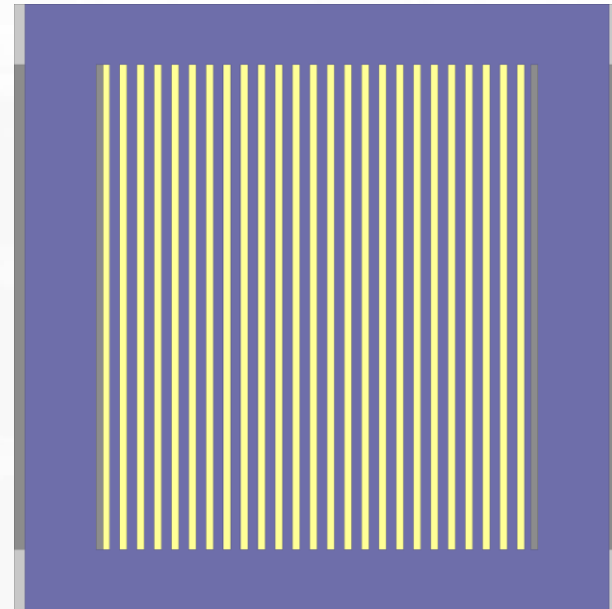
REAKTOR DFR - rdzeń

W obecnie rozpatrywanym przypadku DFR posiada rdzeń o szerokości 1.2 m dla strefy krytycznej, zawierającej pionowe kanały paliwowe wykonane z węgla krzemu (SiC).

W trakcie przepływu przez rdzeń, coraz więcej aktywności ulega rozszczepieniu, przy czym paliwo zmienia swój skład chemiczny. Objętość paliwa wynosi zaledwie kilka metrów sześciennych (w rdzeniu około 1 m^3), co upraszcza obsługę i przetwarzanie.



Rys 4. Reaktor DFR- rzut z góry



Rys 5. Reaktor DFR- rzut z boku

REAKTOR DFR – współczynnik mnożenia neutronów

Efektywny współczynnik mnożenia neutronów – k_{eff} – jest to stosunek liczby neutronów w danym pokoleniu do ich liczby w pokoleniu poprzednim.

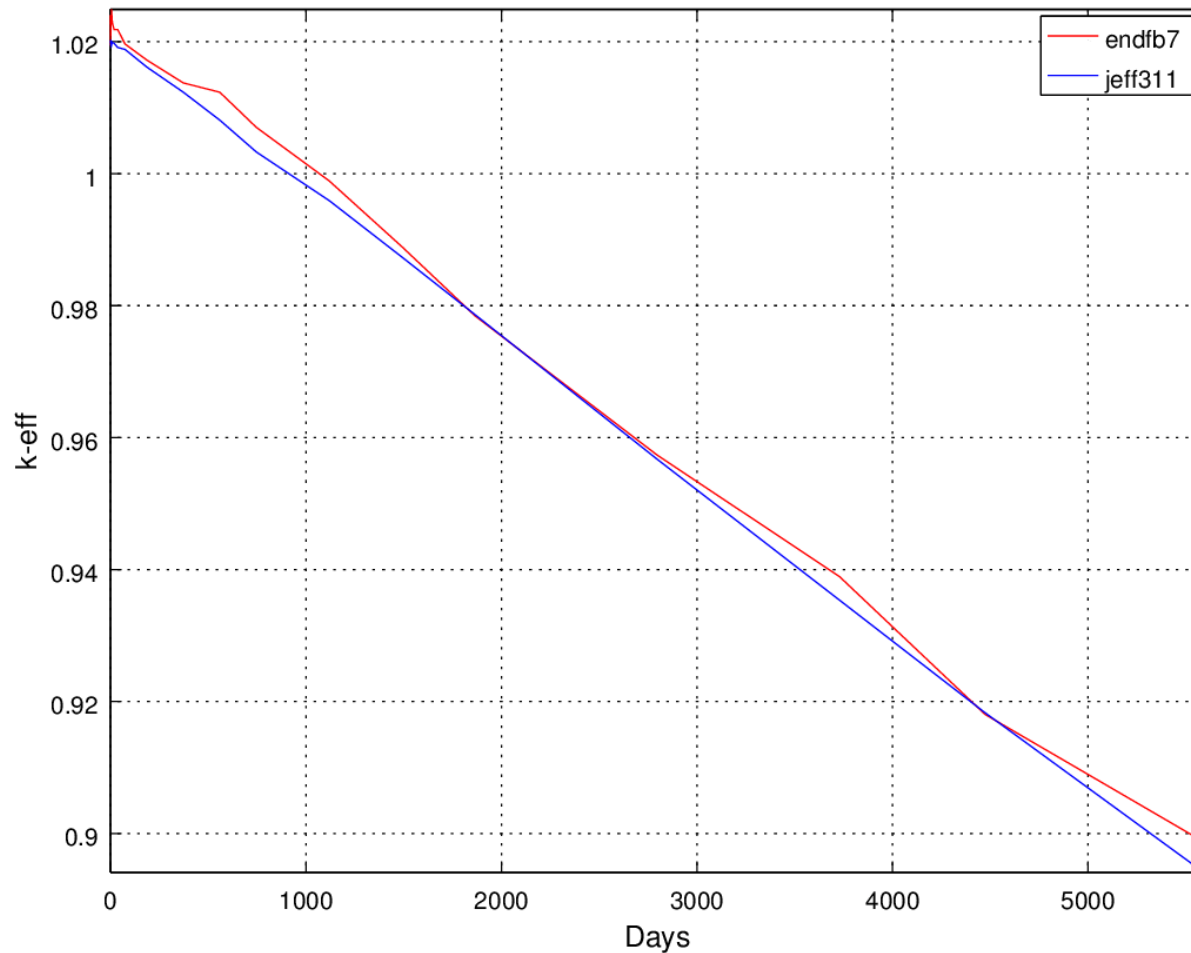
Tabela 1. Wyniki symulacji dla k_{eff}

Biblioteka obliczeniowa	Współczynnik mnożenia neutronów k_{eff}	
	Endfb7*	Jeff311**
Serpent 2.1.23	1.02189	1.02721
Serpent 2.1.27	1.02092	1.02241
SCALE 6.2.2	1.03421	

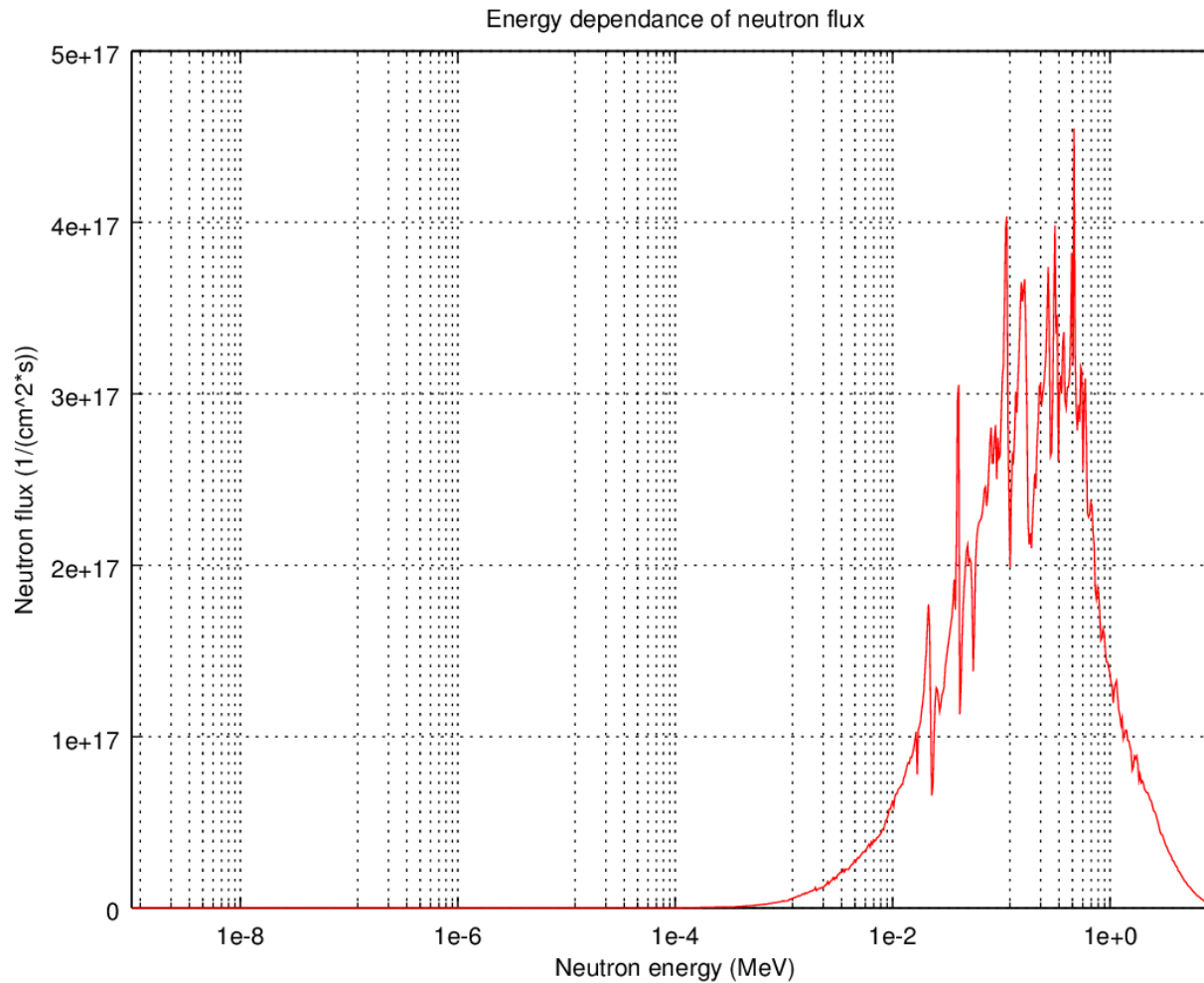
*endfb - Evaluated Nuclear Data Library (U.S. Department of Energy)

**jeff - Joint Evaluated Fission and Fusion File (NEA – Nuclear Energy Agency)

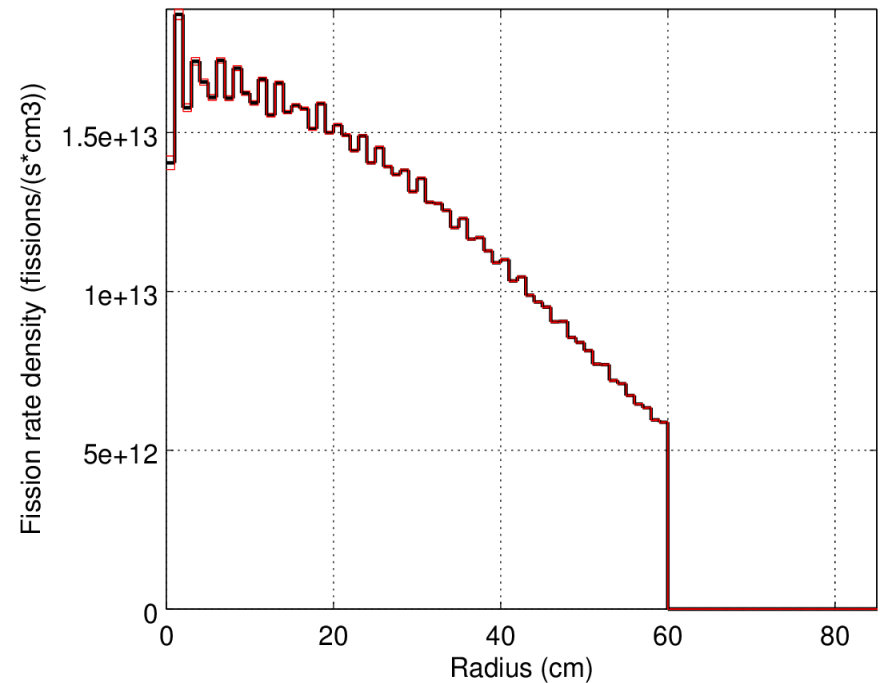
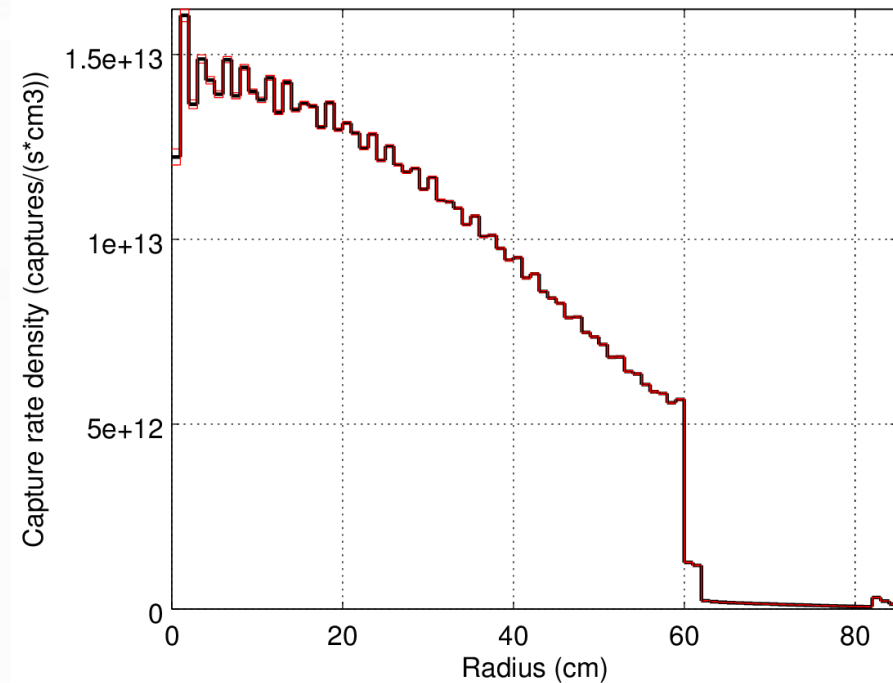
ZALEŻNOŚĆ WSPÓŁCZYNNIKA MNOŻENIA NEUTRONÓW OD CZASU



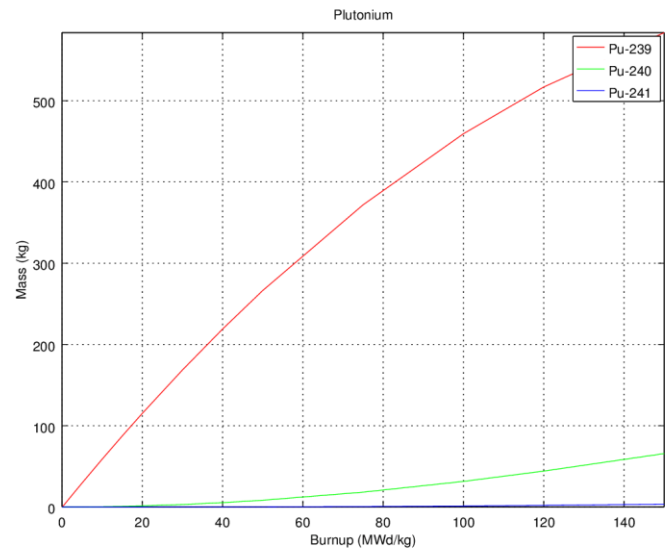
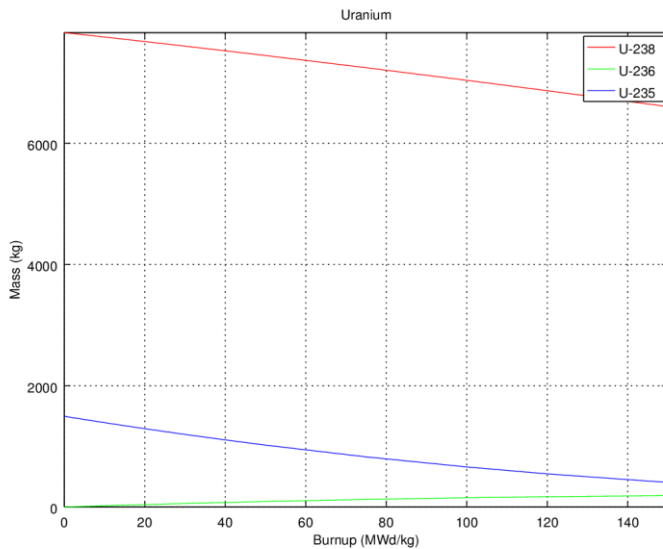
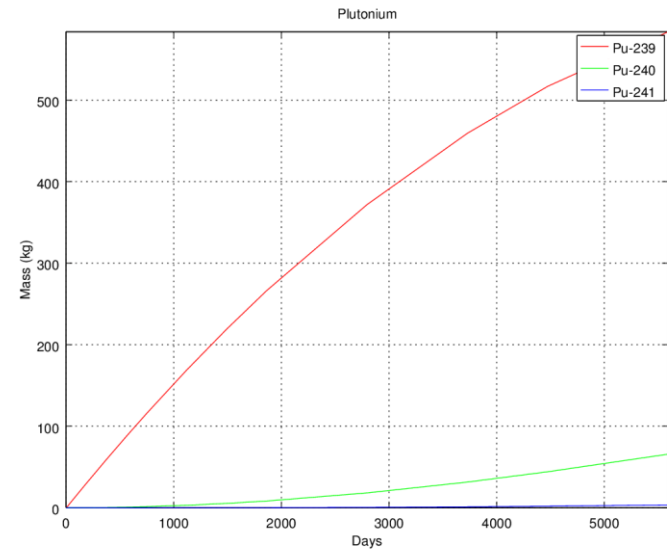
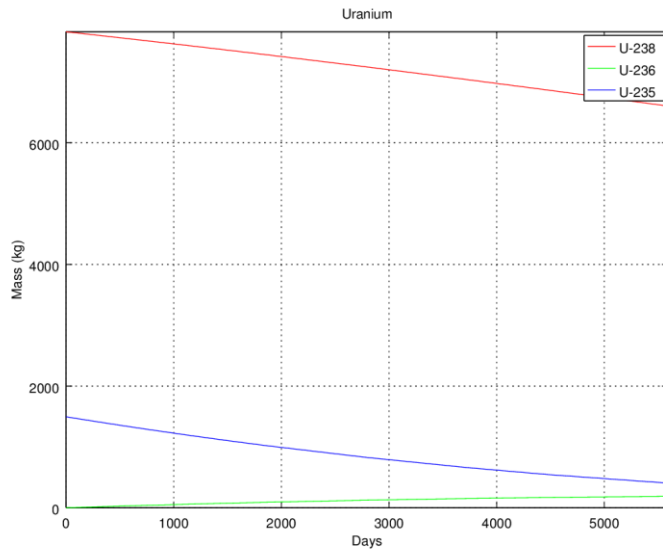
Zależność gęstości strumienia neutronów od energii



Gęstości rozkładu wychwytu neutronów oraz ilości rozszczepień w funkcji odległości od środka rdzenia



WYPALENIE PALIWA W RDZENIU REAKTORA

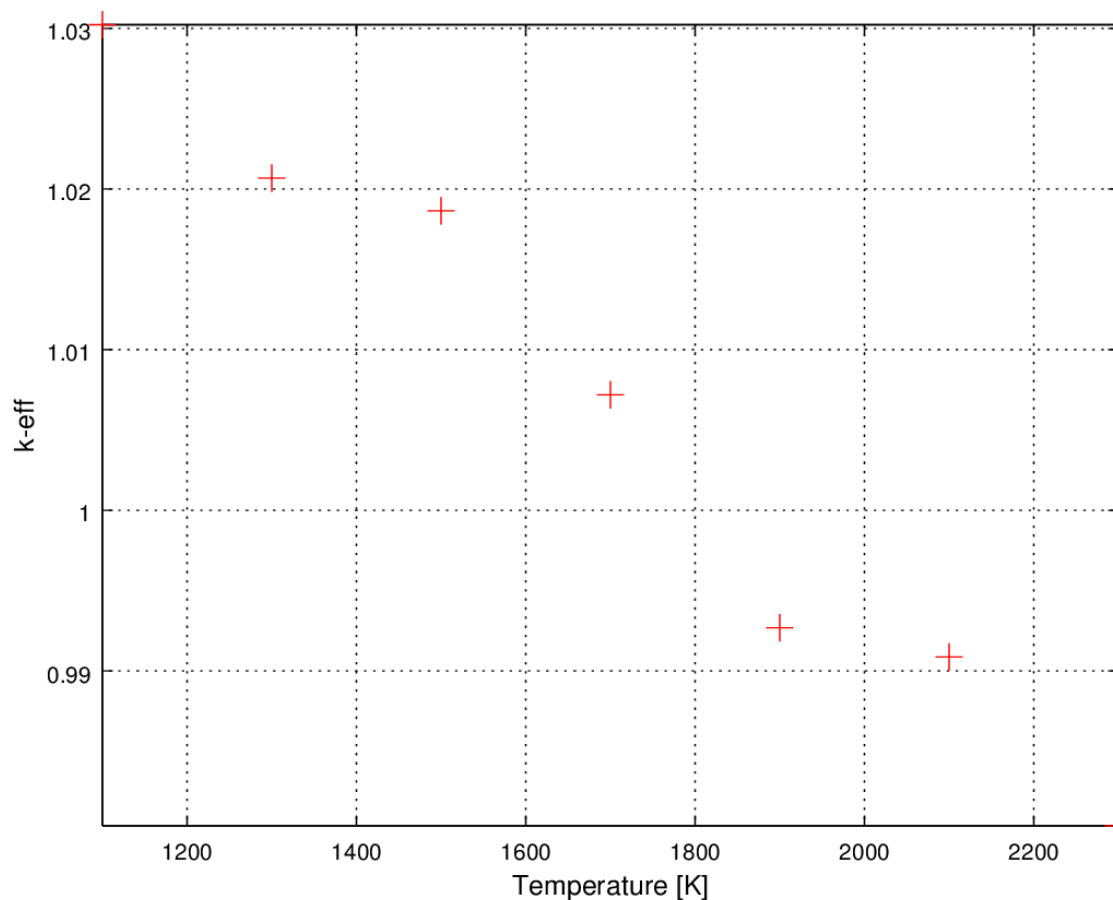


REAKTOR DFR – bezpieczeństwo

Pasywne systemy bezpieczeństwa reagujące na wzrost temperatury w obiegu paliwa:

- „Bezpiecznik” ulega stopieniu dzięki czemu paliwo trafia do zbiornika podkrytycznego umiejscowionego pod reaktorem.
- Ciepło powyłączeniowe w zbiorniku podkrytycznym jest odbierane przez naturalny przepływ powietrza.
- Zmniejszenie gęstości paliwa zmniejsza ilość materiałów rozszczepialnych.
- Zmniejszenie gęstości chłodziwa – gorsze własności ołowiu jako reflektor.
- Zwiększenie rezonansowego wychwytu neutronów w paliwie – zjawisko Dopplera.

ZALEŻNOŚĆ WSPÓŁCZYNNIKA MNOŻENIA NEUTRONÓW OD TEMPERATURY PALIWA



PRODUKCJA RADIOIZOTOPÓW

U234, U235, U236, U238, Np239, Np237, Pu238, Pu239, Pu240, Pu241, Pu242, Am241, Am243, Mo99, **Tc99**, Ru101, Rh103, Ag109, Cs133, Sm147, Sm149, Sm150, Sm151, Sm152, Nd143, Nd145, Eu153, Gd155, itd.

Technet 99 jest podstawowym wskaźnikiem wykorzystywanym w medycynie nuklearnej do celów diagnostycznych. Jest on idealnym izotopem do tych celów, ponieważ ma krótki okres połowicznego rozpadu (6 godzin) minimalizując napromieniowanie ciała. Wykorzystywany jest w diagnostyce onkologicznej, w scyntygrafii kośćca a także w badaniach funkcji mózgu, nerek, serca.

