

Prędkie reaktory chłodzone gazem GFR, DEMONSTRATOR ALLEGRO, Benchmarki do obliczeń fizycznych



NARODOWE
CENTRUM
BADAŃ
JĄDROWYCH
ŚWIERK



Małgorzata Klisińska
Łukasz Koszuk

6 czerwca 2017 roku

Reaktor IV-generacji GFR

Gas-cooled Fast Reactor

Prędkie Reaktor chłodzony Gazem



❑ Zalety reaktora GFR

- Efektywne wykorzystanie uranu, recykling paliwa
- Mniejsza ilość i radiotoksyczność wysokoaktywnych odpadów
- Wysoka temperatura pracy (do około 850°C)
- Duża gęstość mocy $\sim 100\text{MW}/\text{m}^3$ (HTR $\sim 5\text{MW}/\text{m}^3$, SFR $\sim 400\text{MW}/\text{m}^3$)
- Przezroczyste, nieaktywne chemicznie chłodziwo He (**wady**: mała pojemność cieplna, stosunkowo wysokie ciśnienie $\sim 7\text{MPa}$)

❑ Wady reaktora GFR

- Mała pojemność cieplna chłodziwa i konieczność utrzymywania stosunkowo wysokiego ciśnienia $\sim 7\text{MPa}$)
- Mała pojemność cieplna rdzenia
- Konieczność układu odbioru ciepła powyłączeniowego

❑ Dlaczego nie reaktor sodowy?

- Wysoka reaktywność sodu z wodą i powietrzem
- Duży dodatni współczynnik reaktywności próżni
- Ograniczona maksymalna temperatura – temperatura wrzenia sodu 882.8°C

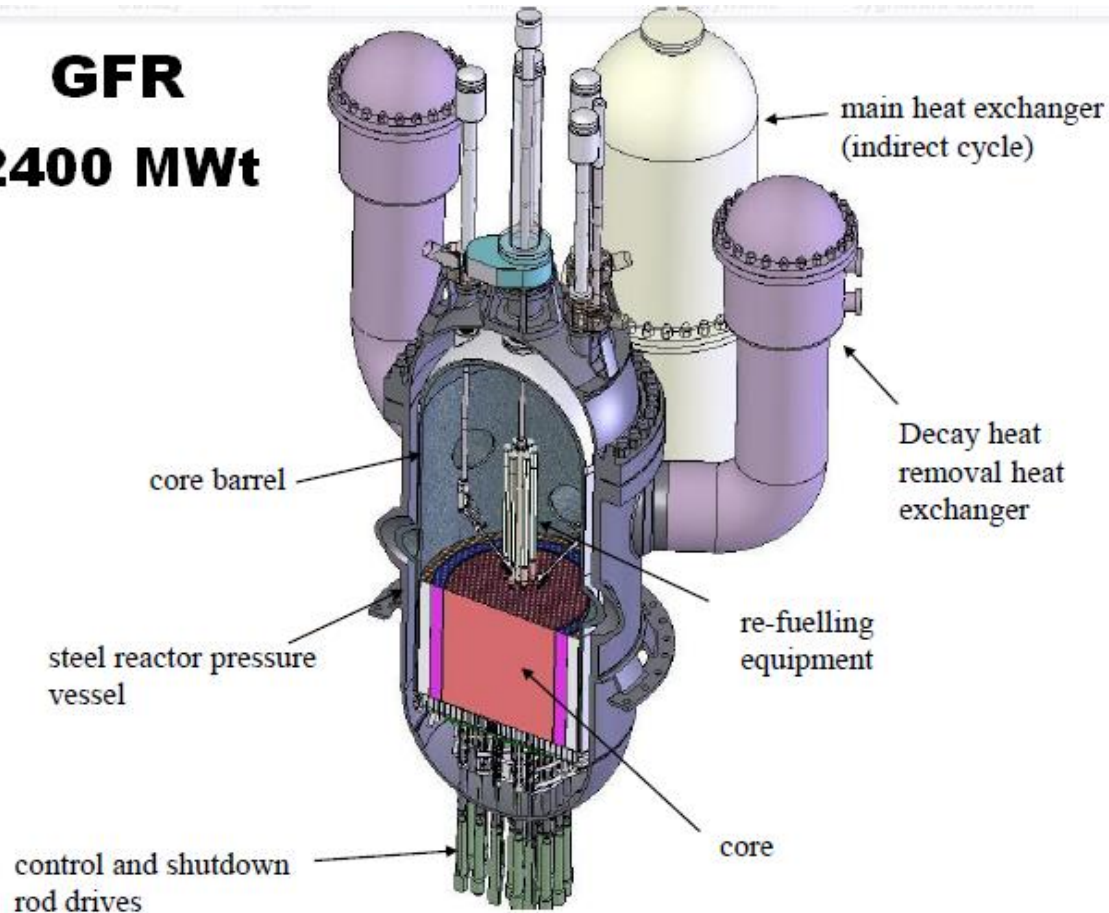


Reaktor IV-generacji GFR

Gas-cooled Fast Reactor

Prędko Reaktor chłodzony Gazem

GFR
2400 MWt



Demonstrator GFR
ALLEGRO
75MWt

Euratom – Projekt VINCO

Visegrad Initiative for Nuclear Cooperation

(1 września 2015 – 36 miesięcy)

Konsorcjum V4G4 – Węgry, Czechy, Słowacja, Polska, stowarzyszona Francja



Magyar Tudományos Akademia Energiatudományi Kutatóközpont
Hungary Academy of Sciences Centre for Energy Research
Budapeszt, Węgry



Ústav jaderného výzkumu Řež
Nuclear Research Institute
Rez, Czechy



Výskumný ústav jadrových elektrární
Nuclear Power Plants Research Institute
Trnava, Słowacja



Narodowe Centrum Badań Jądrowych
National Centre for Nuclear Research
Świerk, Polska

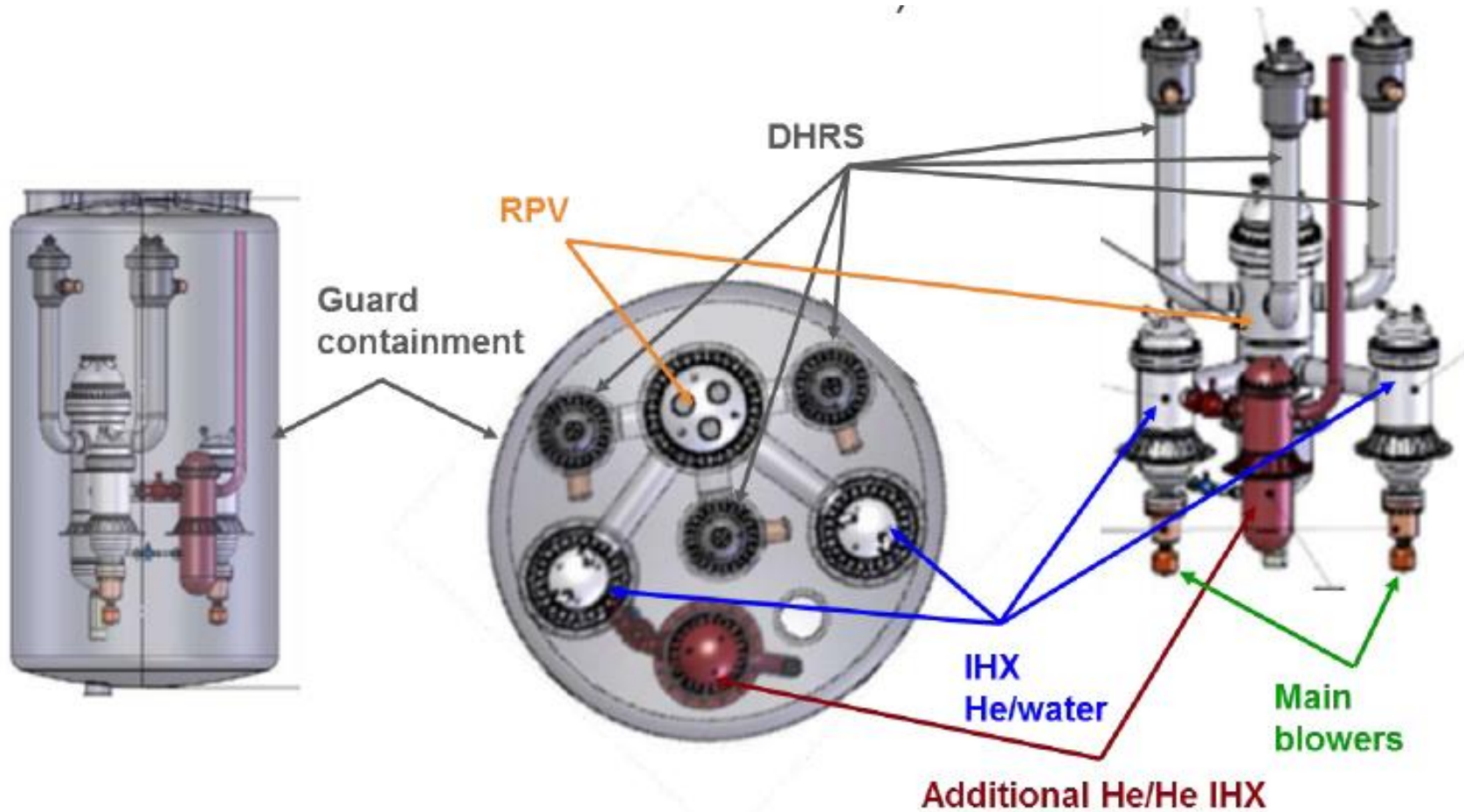


Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
The French Alternative Energies and Atomic Energy Commission

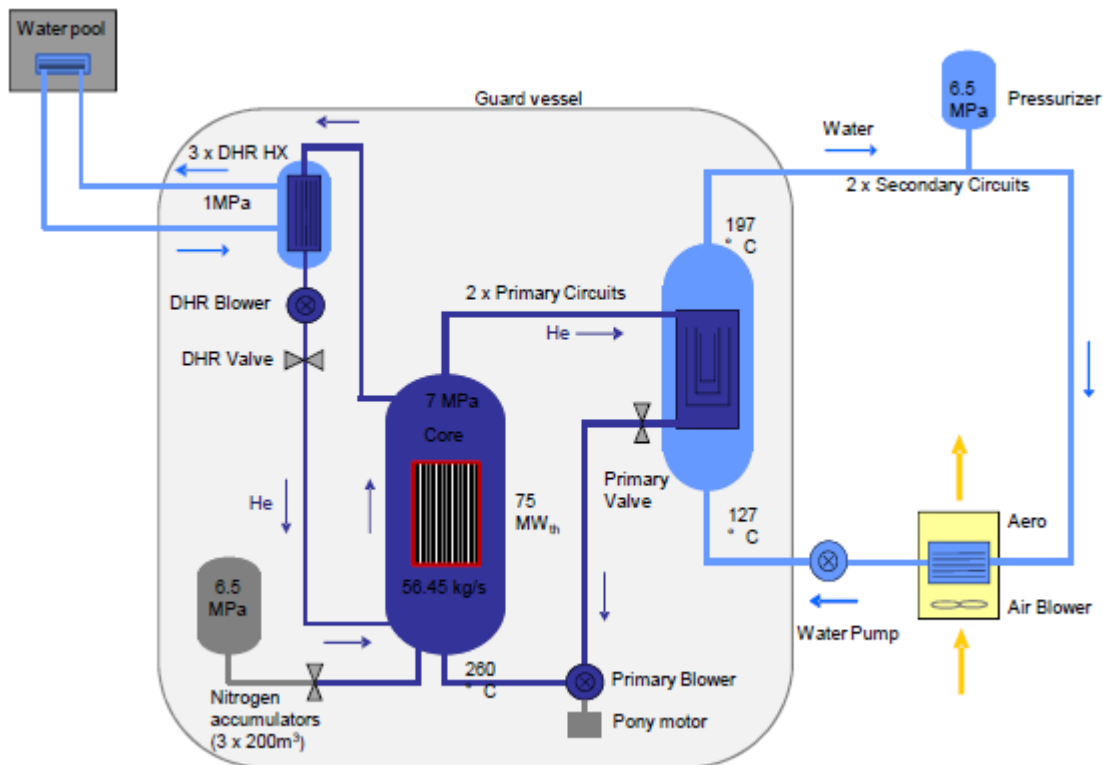
Cele projektu ALLEGRO:

- Demonstracja kluczowych elementów technologii **GFR**:
 - Zachowanie i kontrola rdzenia
 - Rozwój paliwa ceramicznego
 - Obiegi helowe
 - Odbiór ciepła powyłączeniowego
- Określenie granicznego napromieniowania prędkimi neutronami
- Potencjalne sprzężenie z systemami wykorzystującymi ciepło wysokotemperaturowe
- Opracowanie standardów bezpieczeństwa dla GFR

Reaktor ALLEGRO

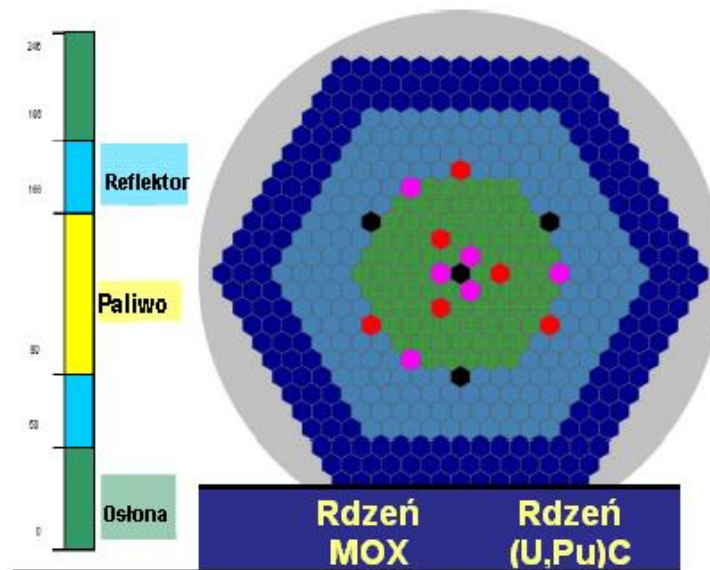


Schemat reaktora ALLEGRO









- Moc 75 MWt
- 2 pętle chłodzące z WP
- Ciśnienie helu 7 MPa
- Wydatek helu 56.35 kg/s
- Temperatura na locie 260°C
- Temperatura na wylocie 530°C
- 3 pętle odbioru ciepła powyłączeniowego (DHRS)

Rdzenie reaktora ALLEGRO



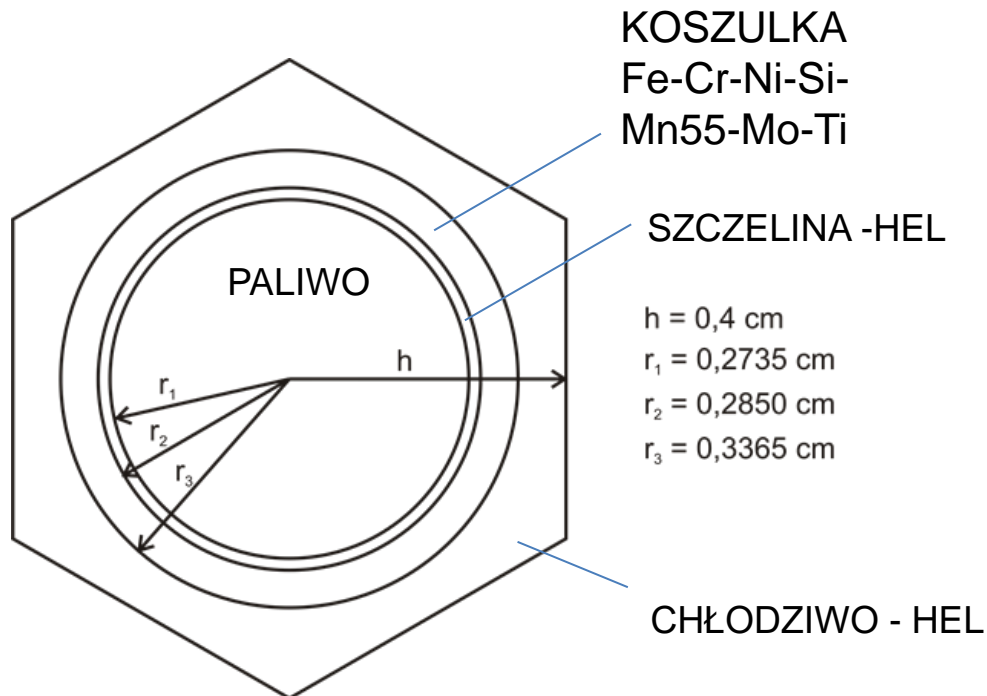
I Rdzeń – paliwo MOX
 Następne – paliwo ceramiczne
 (U,Pu)C

Moc	75 MWth	
Ciśnienie chłodziwa	7 MPa	
Wydatek chłodziwa	53 kg/s	36 kg/s
Temperatura na wlocie	260 °C	400 °C
Temperatura na wylocie	560 °C	850 °C

-  6 kaset eksperymentalnych z (U,Pu)C
-  Kasety paliwowe
-  elementy sterujące i bezpieczeństwa
-  Elementy drugiego układu bezpieczeństwa
-  Reflektor
-  Ostona

Benchmark 1: Obliczenia neutronowe pojedynczej komórki paliwowej reaktora ALLEGRO

Przedmiot obliczeń: pojedynczy pręt paliwowy z paliwami UOx i MOX otoczony komórką heksagonalną w siatce nieskończonej





Dane wyjściowe dla benchmarku:

- Dane geometryczne,
- Gęstości jądrowe wszystkich izotopów zawartych w materiałach komórki – paliwo MOX zawierało izotopy: U235, U238, Pu238, Pu239, Pu240, Pu241, Pu242, Am241, O16,
- Temperatura jednakowa dla wszystkich materiałów - 867°C – dla przypadku podstawowego,
- Objętościową gęstość mocy: 50 W/cm³,
- Docelowa wartość wypalenia: 75 MWd/kg_{HM} (co odpowiada wypaleniu ok. 7,5% atomów),
- Tam gdzie wymagane jest k-eff, wartość bucklingu jest ustalona i wynosi $B^2=2,7779E-03$ 1/cm²,





Wymagane wyniki, zależne od wypalenia, podane co 15 MWd/kg HM:

- k-inf,
- k-eff przy ustalonym bucklingu ($B^2=BR^2+BZ^2$, $BR^2=2 \cdot BZ^2$),
- iterowany buckling krytyczny,
- gęstości jądrowe następujących izotopów: U-235, U-236, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, U-238, Am-241, Cm-242, Pu-242,
- wpływ temperatury pastylek paliwowych na k-eff przy ustalonym bucklingu na podstawie przypadku nr 1 dla temperatury pastylek paliwowych 900 K (627°C) i 2000 K (1727°C),
- współczynnik Dopplera (współczynnik temperaturowy paliwa) przy ustalonym bucklingu na podstawie przypadku nr 1 dla temperatury pastylek paliwowych 900 K i 2000 K.
- Wpływ rozszerzalności promieniowej pastylki paliwowej na k-eff przy ustalonym bucklingu na podstawie przypadku nr 2 dla temperatury pastylek równej 900 K i 2000 K,
- Wpływ zmiany gęstości chłodziwa (efekt temperaturowy próżni) na k-eff przy ustalonym bucklingu, na podstawie przypadku nr 3.



Przypadki

Nr 1: Temperatura pastylek paliwowych zmienia się do 900 K i 2100 K, lecz rozszerzalność cieplna materiału nie jest uwzględniana, uwzględniany jest tylko efekt poszerzenia rezonansów.

Nr 2: Temperatura pastylek paliwowych zmienia się do 900 K i 2100 K. Uwzględniany jest tylko efekt zmiany promienia pastylki paliwowej, wpływający na zmianę gęstości jądrowej materiału. Nie jest uwzględniany wpływ poszerzenia rezonansów (jest rozpatrywany w przypadku nr 1).

Współczynnik rozszerzalności liniowej wyrażony jest następującym wzorem:

$$\text{średnica(paliwo)} = \text{średnica}(867^{\circ}\text{C}) * (1 + \alpha * (T_{\text{paliwo}} - 20)) / 1,009468975$$

gdzie:

$$\alpha = 0,00001059262154 - 0,0000000001271166281 * T_{\text{paliwo}} + 4,926011714\text{E-}13 * T_{\text{paliwo}}^2 + 1,631283749\text{E-}16 * T_{\text{paliwo}}^3$$

gdzie: T_{paliwo} wyrażona jest w $^{\circ}\text{C}$.

Gęstość zmienia się w ten sposób, aby zachować całkowitą masę UOX i MOX, zakładając rozszerzalność we wszystkich trzech wymiarach.

Nr 3: Efekt częściowej próżni: gęstość jądrowa helu na zewnątrz koszulki paliwowej zmniejszona jest do połowy.

Problem bucklingu

Dla stanu krytycznego równanie bilansu neutronów w płaskiej nieskończonej płycie można zapisać w postaci:

$$D \frac{d^2 \Phi(z)}{dz^2} - \Sigma_a \Phi(z) + \nu \Sigma_f \Phi(z) = 0$$

gdzie

$$B_m^2 = \frac{\nu \Sigma_f - \Sigma_a}{D} - \text{buckling materiałowy}$$

ν – średnia liczba neutronów na rozszczepienie

Σ_f – makroskopowy przekrój czynny na rozszczepienie

Σ_a – makroskopowy przekrój czynny na absorpcję

D – współczynnik dyfuzji

Z drugiej strony równanie na bilans neutronów dla płyty nieskończonej o grubości a :

$$\frac{d^2 \Phi(z)}{dz^2} + B_g^2 \Phi(z) = 0$$

Z warunkiem brzegowym $\Phi(z) = 0$ - na granicy ekstrapolowanej obszaru
Rozwiązaniem tego równania jest:

$$\Phi(z) = C \cos \left(\frac{\pi}{a_e} z \right)$$

Po wstawieniu do równia otrzymujemy:

$$B_g^2 = \left(\frac{\pi}{a_e} \right)^2$$

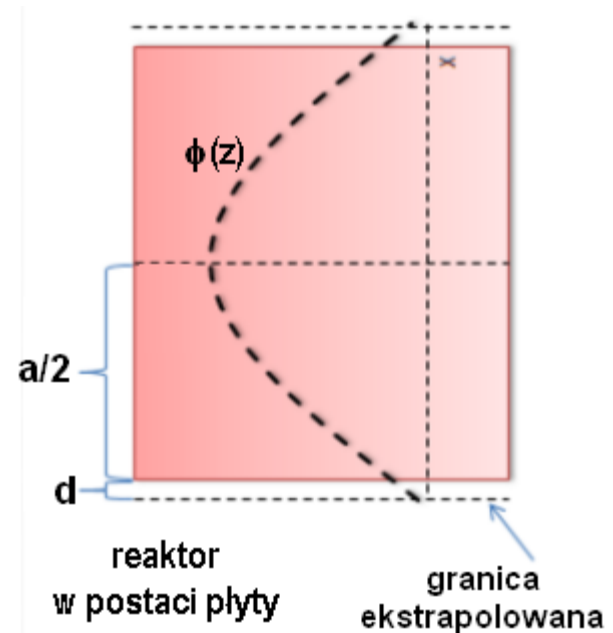
B_g^2 - buckling geometryczny

$$a_e = a + d$$

$d = 0.710446 \lambda_{tr}$ - długość ekstrapolacji

λ_{tr} - średnia droga swobodna transportu = $1/\Sigma_{tr}$

$$\Sigma_{tr} = \frac{1}{\lambda_{tr}} = \Sigma_s (1 - \bar{\mu}), \quad \bar{\mu} = \frac{2}{3A}, \quad A - \text{liczba masowa jąder ośrodka}$$





W stanie krytycznym $B_g^2 = B_m^2$

$D_g B_g^2 \Phi$ – opisuje ucieczkę neutronów

$D_g B_g^2$ – można uważać jako „makroskopowy przekrój czynny na ucieczkę neutronów”,
gdzie D_g jest współczynnikiem dyfuzji w grupie energetycznej g .



Buckling geometryczny dla różnych geometrii

Geometria	Wymiary	Buckling
Blok prostokątny	$a \times b \times c$	$B^2 = \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{c}\right)^2$
Kula	Promień R	$B^2 = \left(\frac{\pi}{R}\right)^2$
Cylinder	Promień R Wysokość H	$B^2 = \left(\frac{2.405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$



W programie SCALE/NEWT są do wyboru dwie opcje:

W programie można zadać wartość bucklingu materiałowego, który określa ucieczkę neutronów :

→ program wyznacza k_{eff}

lub

→ program wyznacza buckling krytyczny tak, aby wielkość ucieczki neutronów odpowiadała stanowi ustalonemu reaktora (tzn. $k_{eff}=1$), a widmo było widmem krytycznym.



KOMÓRKA PALIWOWA W SIATCE NIESKOŃCZONEJ OBLICZENIA 2-D

BUCKLING
ITEROWANY W
KAŻDYM KROKU
WYPALENIOWYM

BUCKLING MA STAŁĄ
WARTOŚĆ
 $B^2 = 2.7779E-03 \text{ 1/cm}^2$

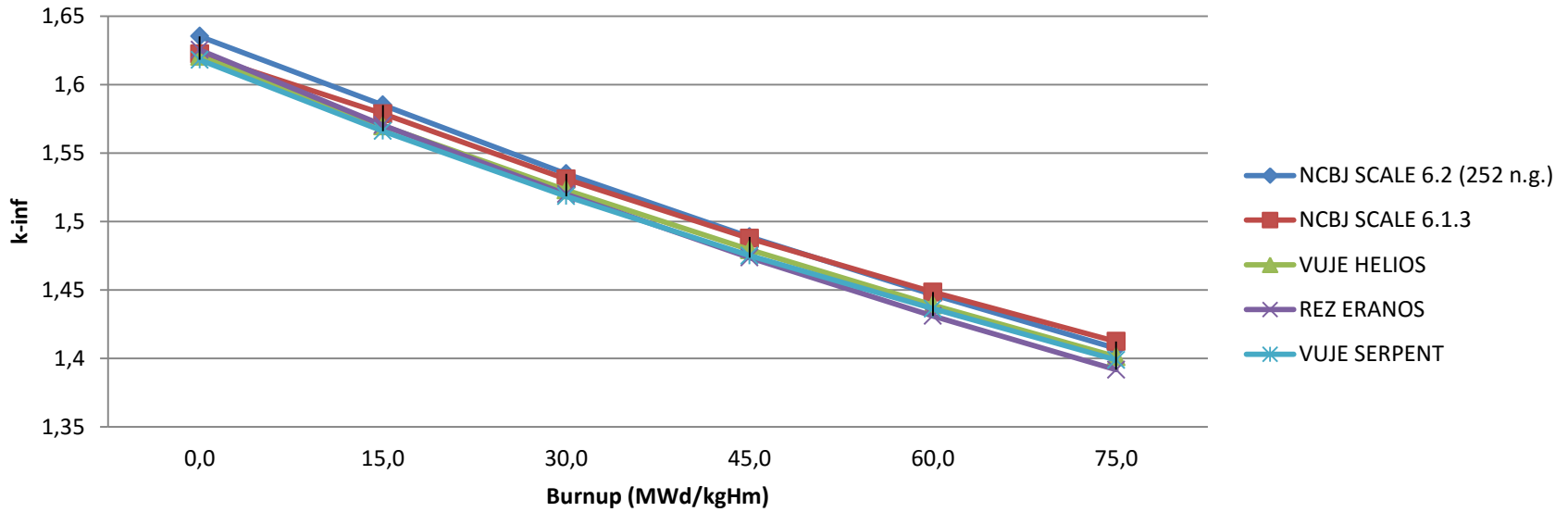
Uczestnicy benchmarku

Company/Institute/ University	Mailing address	Group members	Code to be used
ÚJV Řež, a.s.	Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec, Czech Republic	Milan Gren	ECCO module of ERANOS 2.2
VUJE, a.s.	Okružná 5, 918 64 Trnava, Slovak Republic	Petr Dařílek	HELIOS 2.1.1
VUJE, a.s.	Okružná 5, 918 64 Trnava, Slovak Republic	Radoslav Zajac	SERPENT 2.1.25
NCBJ (Narodowe Centrum Badań Jądrowych)	Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock, Poland	Malgorzata Klisinska / Lukasz Koszuk	SCALE 6.2
NCBJ (Narodowe Centrum Badań Jądrowych)	Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock, Poland	Malgorzata Klisinska / Lukasz Koszuk	SCALE 6.1.3
MTA EK (Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpont)	<u>Location:</u> KFKI Campus 29-33, Konkoly Thege Miklós street, 1121 Budapest, Hungary	András Keresztúri	ECCO module of ERANOS 2.2
VUJE, a.s.	Okružná 5, 918 64 Trnava, Slovak Republic	Tomáš Chrebet	SCALE 6.2

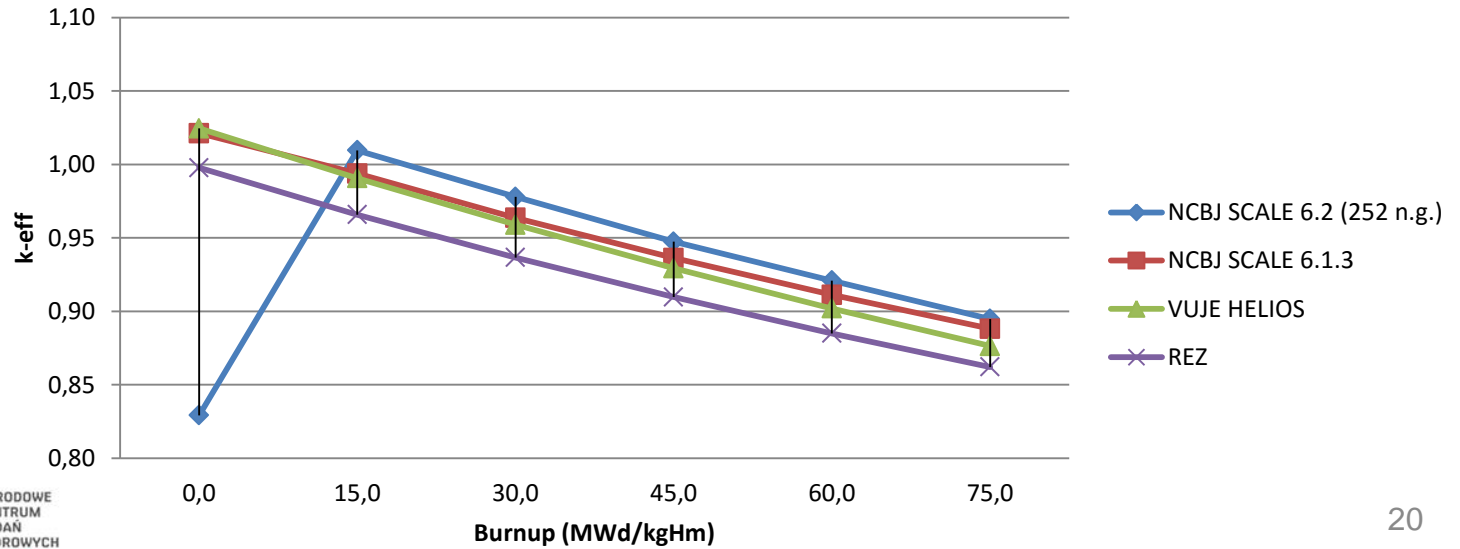
Wyniki - MOX



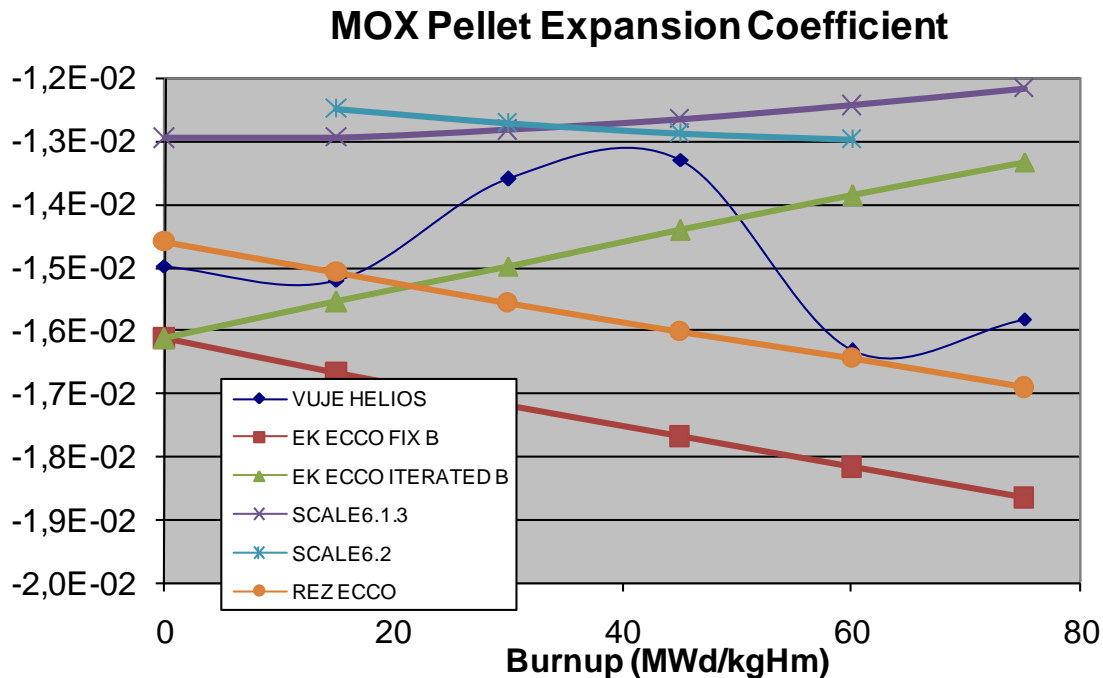
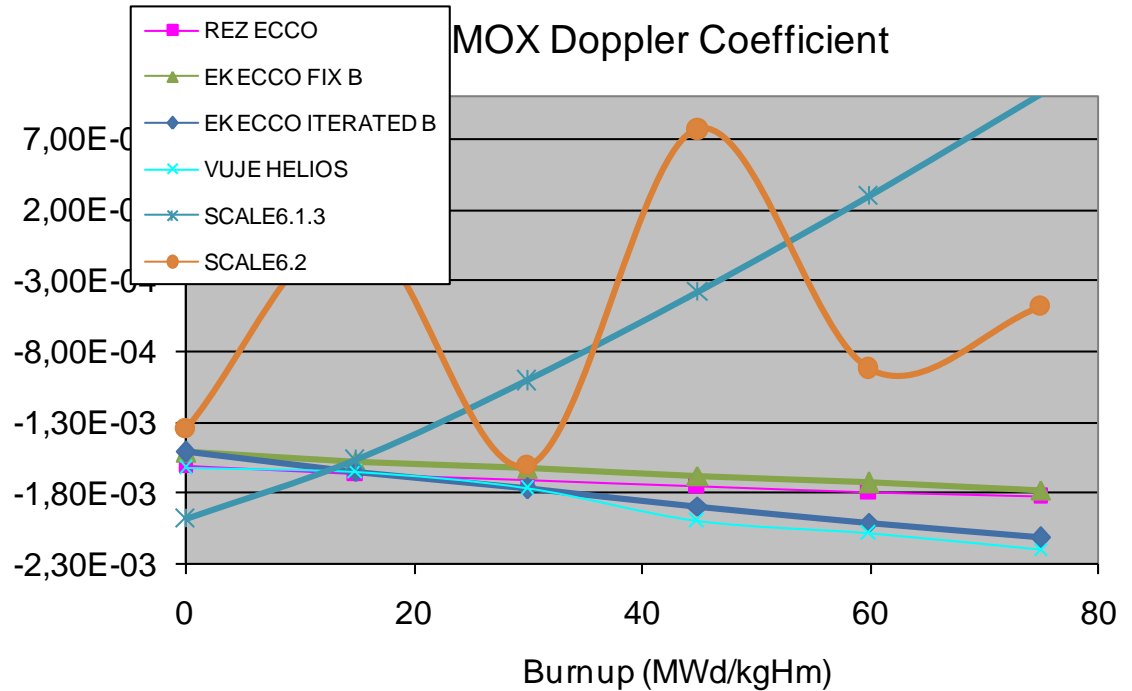
k-inf



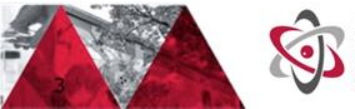
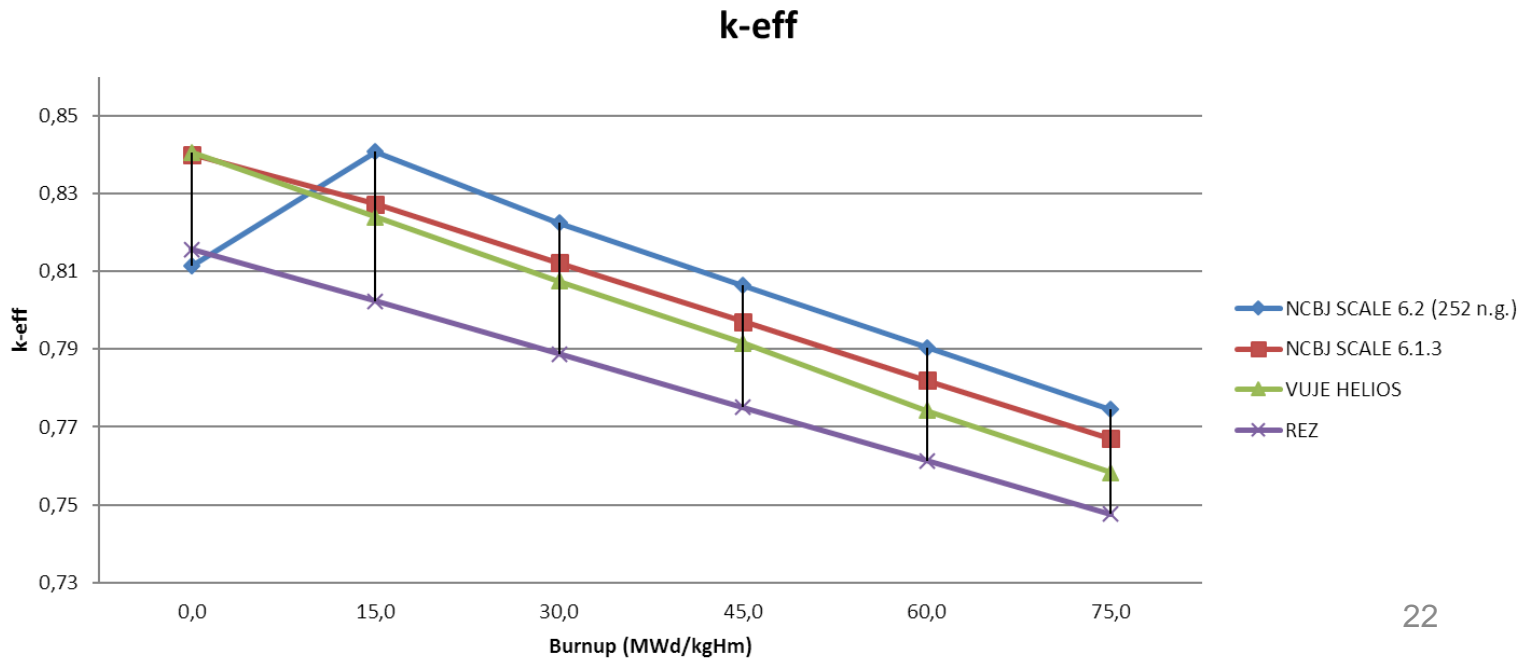
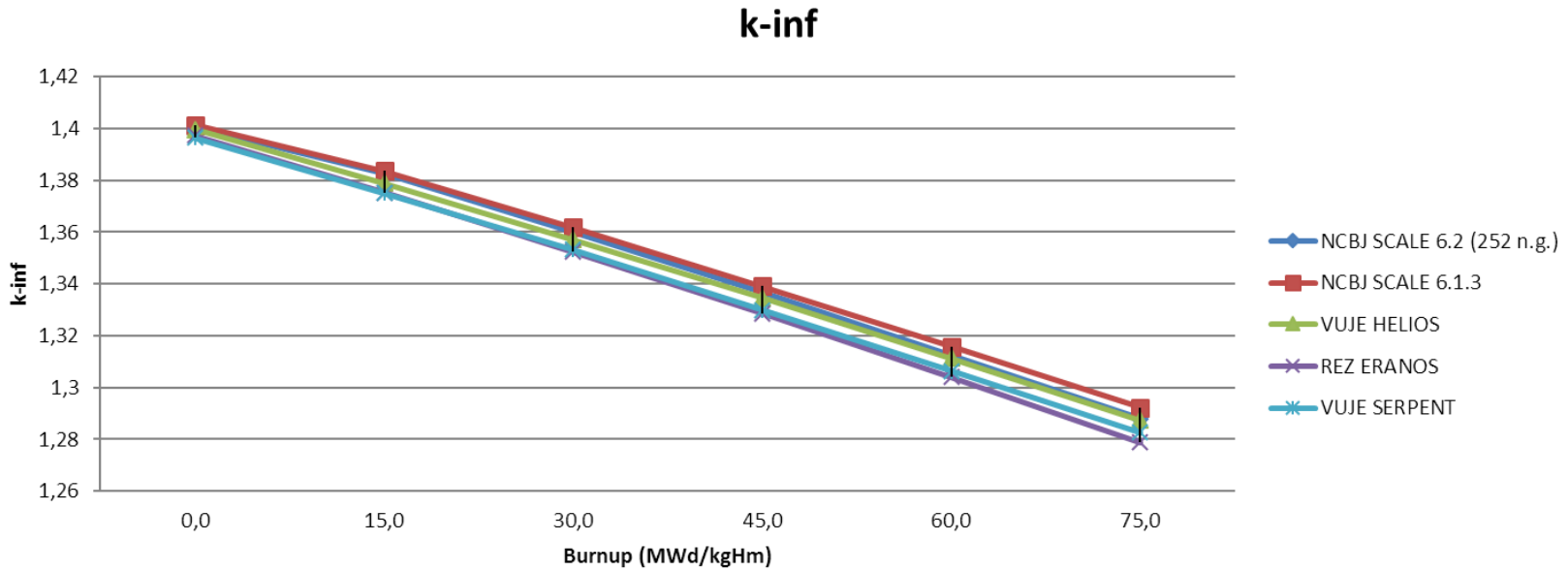
k-eff



Wyniki - MOX



Wyniki - UOX

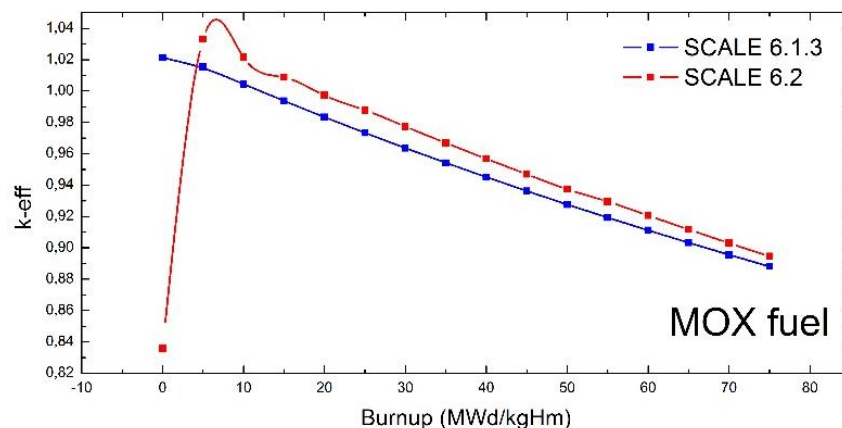
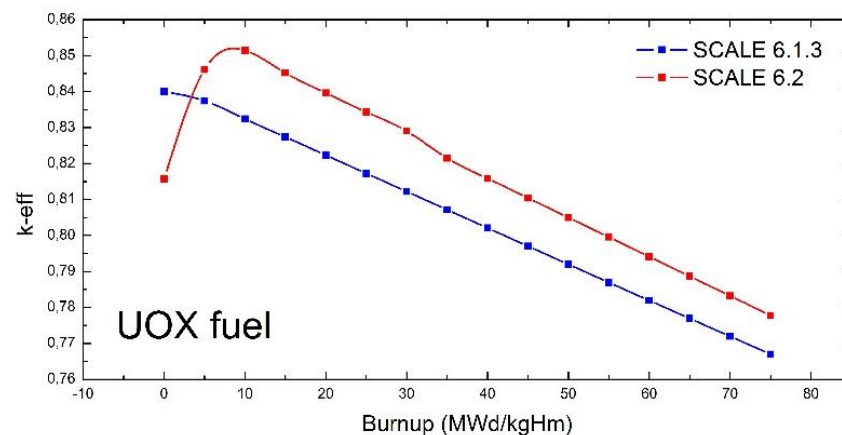


Kody użyte do obliczeń

- Do wykonania analiz wypaleniowych została wybrana sekwencja obliczeniowa T-DEPL w module TRITON/SCALE, w której kod transportowy NEWT jest sprzężony z punktowym kodem wypaleniowym ORIGEN-S.

- TRITON został opracowany przy użyciu podejścia modułowego, charakterystycznego dla funkcjonalności całego pakietu SCALE. TRITON koordynuje wielogrupowe obliczenia wypaleniowe i używa algorytmu predyktor-korektor do przeprowadzenia dokładnego wypalania paliwa.**

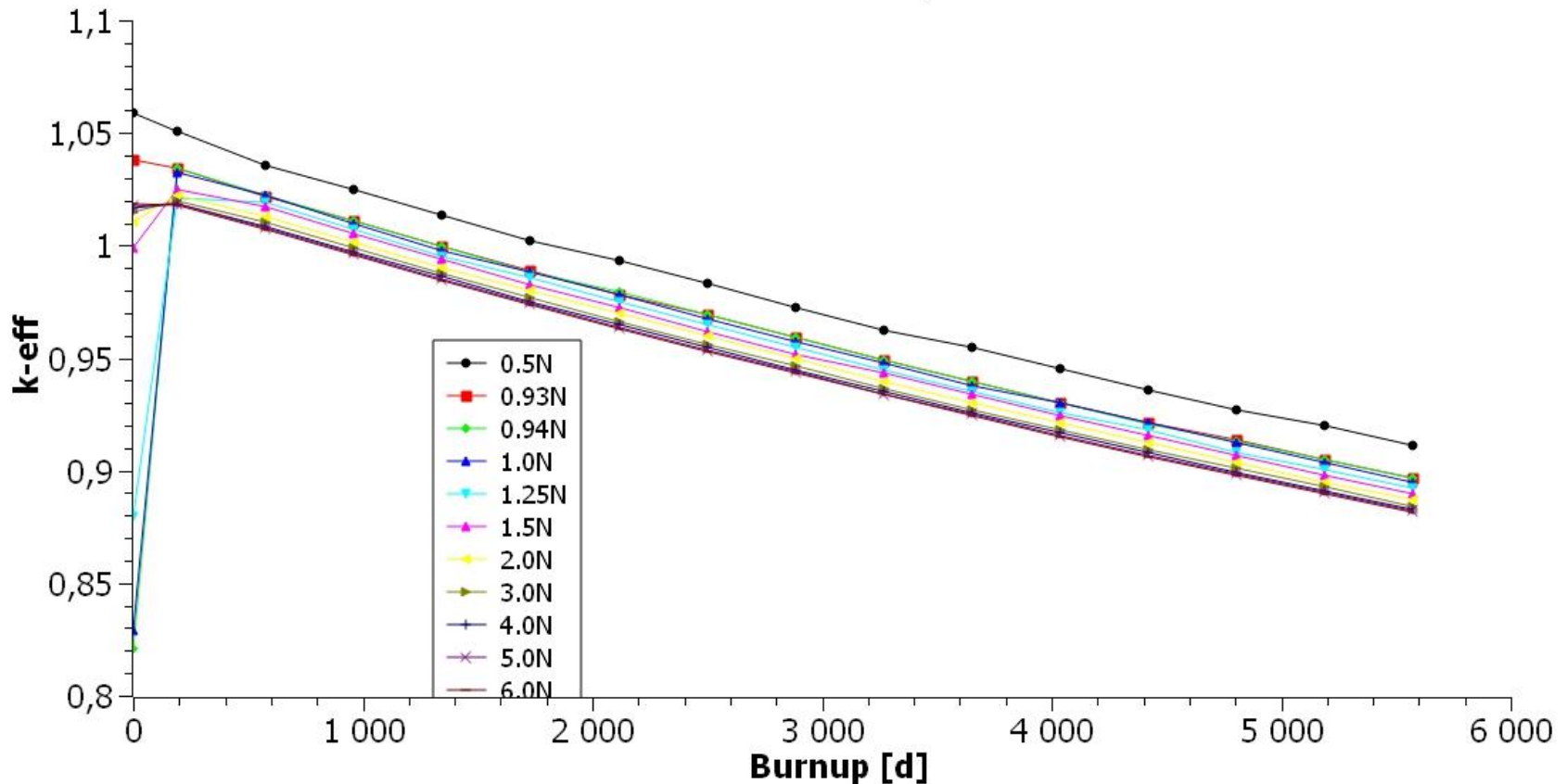
- Ważny komentarz: W benchmarku nr 1, dotyczącym obliczeń pojedynczego pręta paliwowego z ustalonym bucklingiem wyniknął poważny problem. Wyniki pokazują nietypowe zachowanie k_{eff} w funkcji wypalenia dla SCALE6.2.1 (możliwe, że spowodowane błędem w kodzie).**



Problem z obliczeniami w NEWT/SCALE 6.2.1



ALLEGRO-Pin MOX fixed buckling
SCALE-6.2.1
v7-252
N=0.000755675 at/barn*cm



W TRITON/SCALE 6.1.3

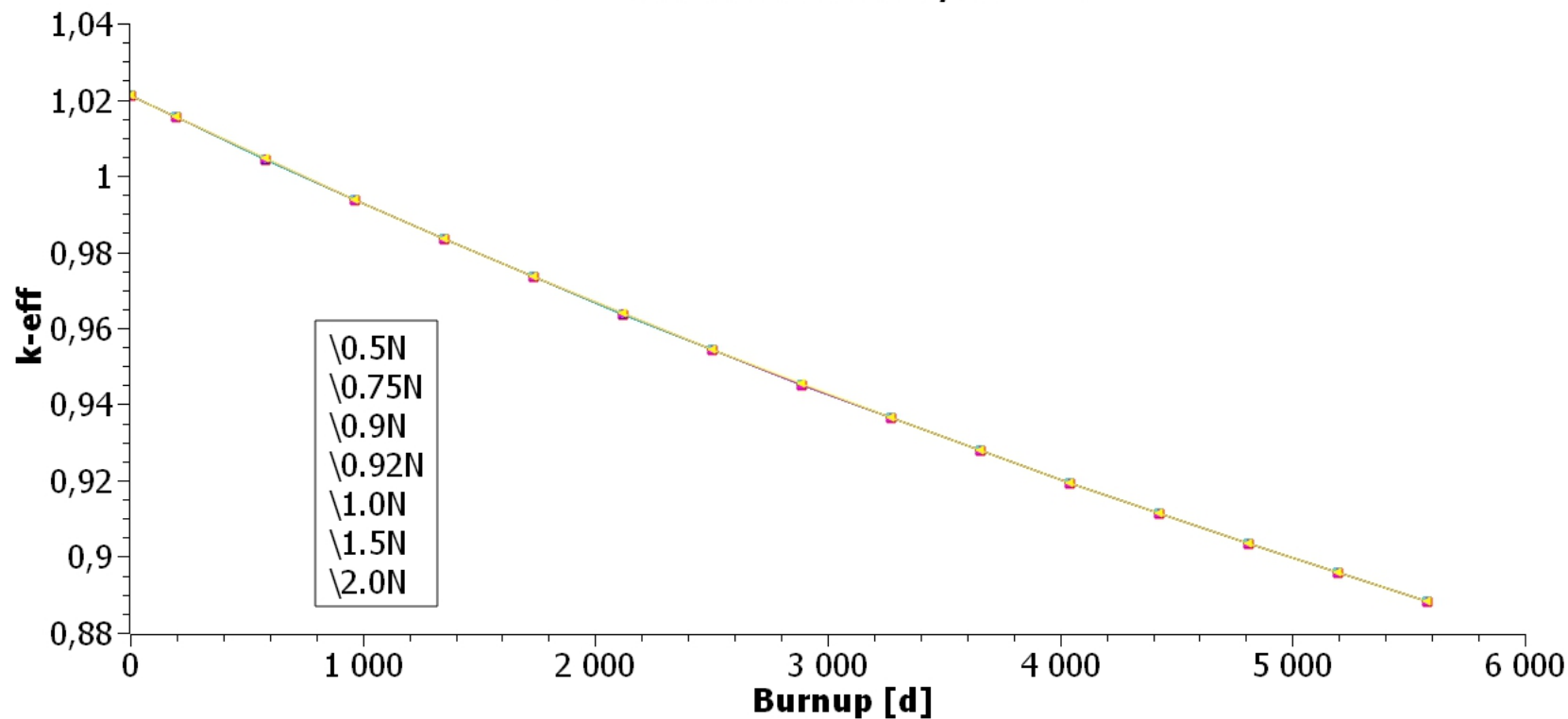
Takie problemy nie występują

ALLEGRO Pin MOX fixed buckling

SCALE-6.1

V7-238

$N=0.000755675 \text{ at/barn*cm}$



Benchmark 1 - podsumowanie



Rozbieżność wyników jest znaczna, co wynika z następujących przyczyn:

- Niepewności danych jądrowych,
- Samoprzestłania się rezonansów w obszarze rezonansów rozdzielonych i nierozdzielonych,

Niezerowa wartość bucklingu może wskazywać na wpływ modelu ucieczki na k_{eff} , ale również na współczynnik Dopplera i współczynnik reaktywności związany z rozszerzalnością pastylek. Prawdopodobną przyczyną odchyień mogą być różnice w modelowaniu:

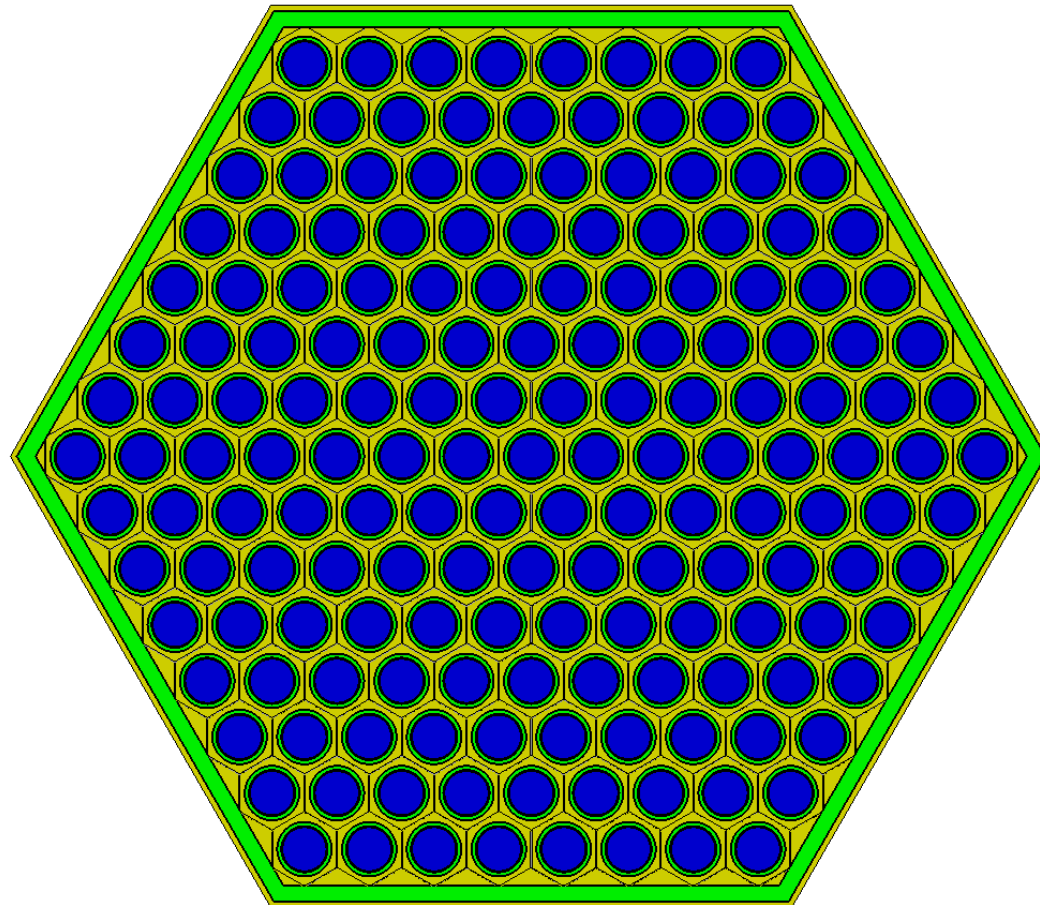
- Anizotropii rozpraszania w obliczeniach ucieczki
- Anizotropii strumienia

W przypadku kodów HELIOS I SCALE widać problem z iteracją, szczególnie w przypadku współczynników reaktywności, które miały być policzone przy niezerowym bucklingu.



Benchmark 2: Obliczenia neutronowe kasety paliwowej reaktora ALLEGRO

Przedmiot benchmarku – 2-D obliczenia kasety paliwowej w siatce nieskończonej, zbudowanej ze 169 komórek paliwowych, takich jak w Benchmarku-1, ustawionych w 8 koncentrycznych pierścieniach.



Model kasety
w programie
NEWT/SCALE

Benchmark 2: Obliczenia neutronowe kasyety paliwowej reaktora ALLEGRO



Dane:

- Gęstość mocy – 50 W/cm³
- Temperatura paliwa - 867°C
- Temperatura helu w szczelinie – 475°C,
- Temperatura koszulki – 447.5°C,
- Temperatura chłodziwa – 397.5°C,
- Docelowa wartość wypalenia: 75 MWd/kg_{HM}
(co odpowiada wypaleniu ok. 7,5% atomów)



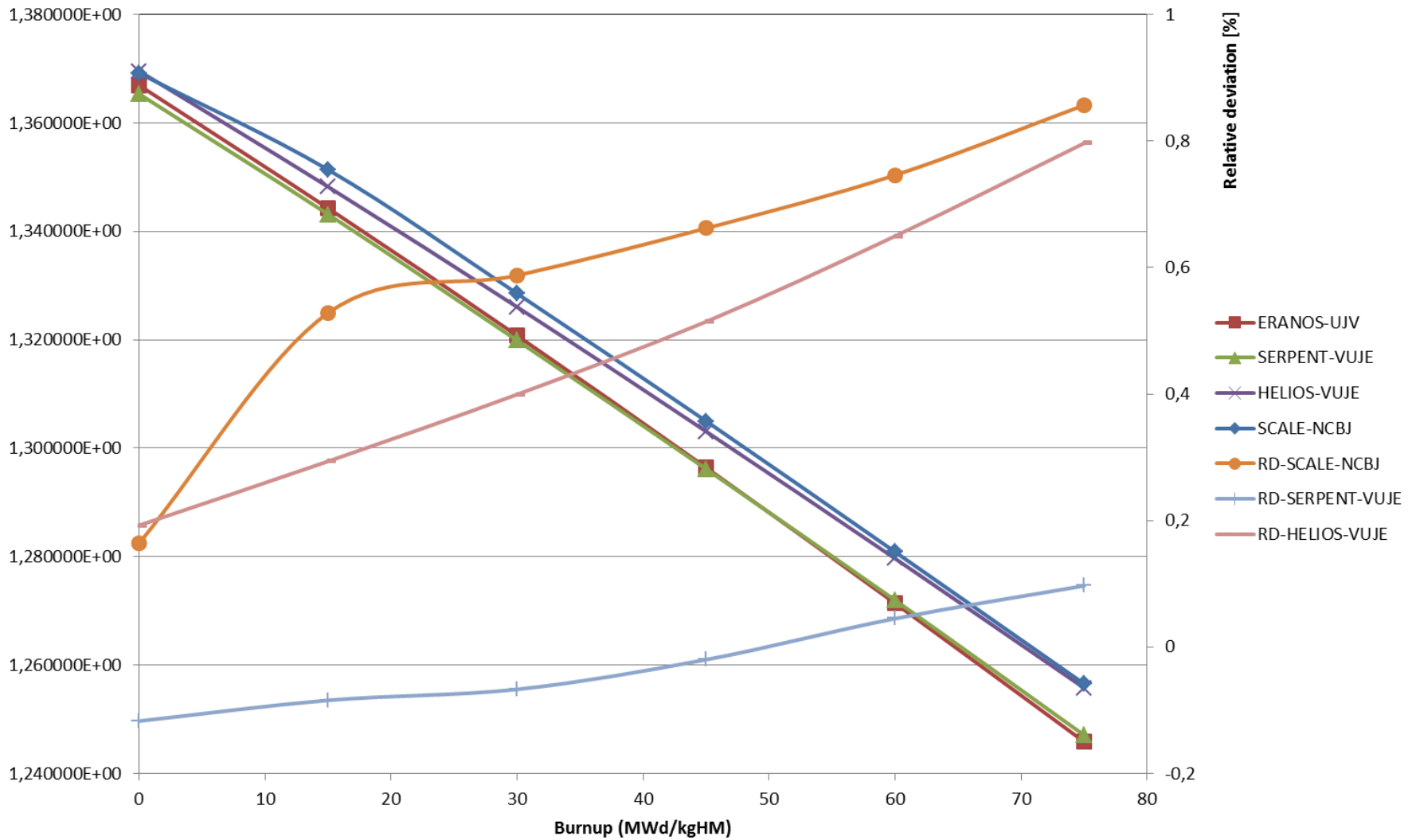
ŻĄDANE WYNIKI

podawane co 15 MWd/kgHM

- **k-inf** dla temperatury paliwa 867°C
- **Gęstości jądrowe izotopów w pastylkach paliwowych: U235, U238, Pu238, Pu239, Pu240, Pu241, Pu242, Am241, Cm242**
- parametry kinetyczne:
 - **β i β_i** – całkowity i w grupach energetycznych udział neutronów opóźnionych
 - **czas życia neutronów natychmiastowych**
- **makroskopowe przekroje czynne w 8 zadanych grupach energetycznych**
- **k-inf dla temperatury pastylek paliwowych: 900K i 2100K** – wpływ temperatury paliwa na reaktywność (współczynnik Dopplera)
- **k-inf dla wymiarów paliwa przy temperaturze 900K i 2100K** – wpływ rozszerzalności cieplnej paliwa na reaktywność
- **k-inf** dla zmniejszonej do połowy gęstości chłodziwa helowego
- **k-inf** dla temperatury chłodziwa 300K i 1300K – wpływ temperatury chłodziwa na reaktywność

Wyniki - UOX

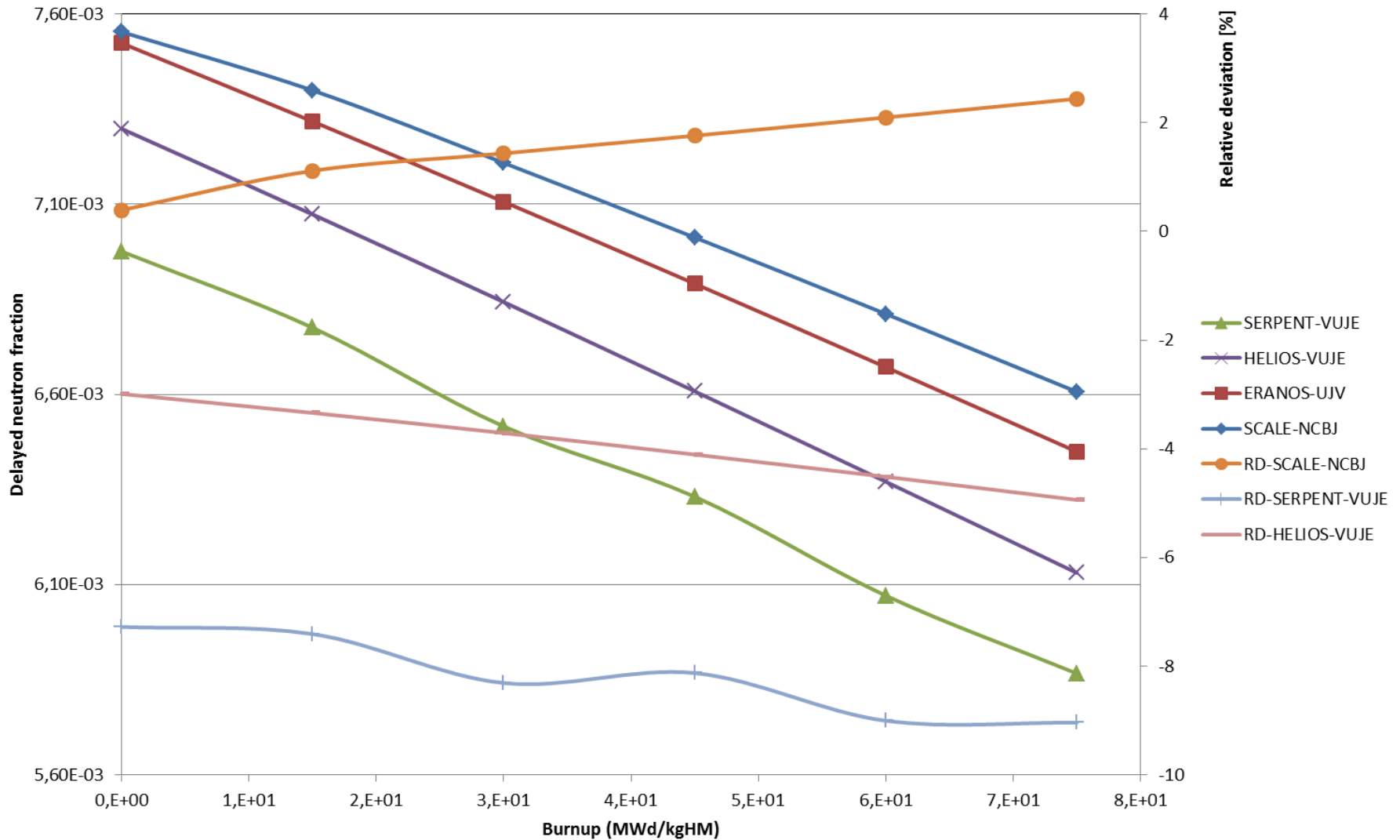
k-inf - UOX



Wyniki - UOX



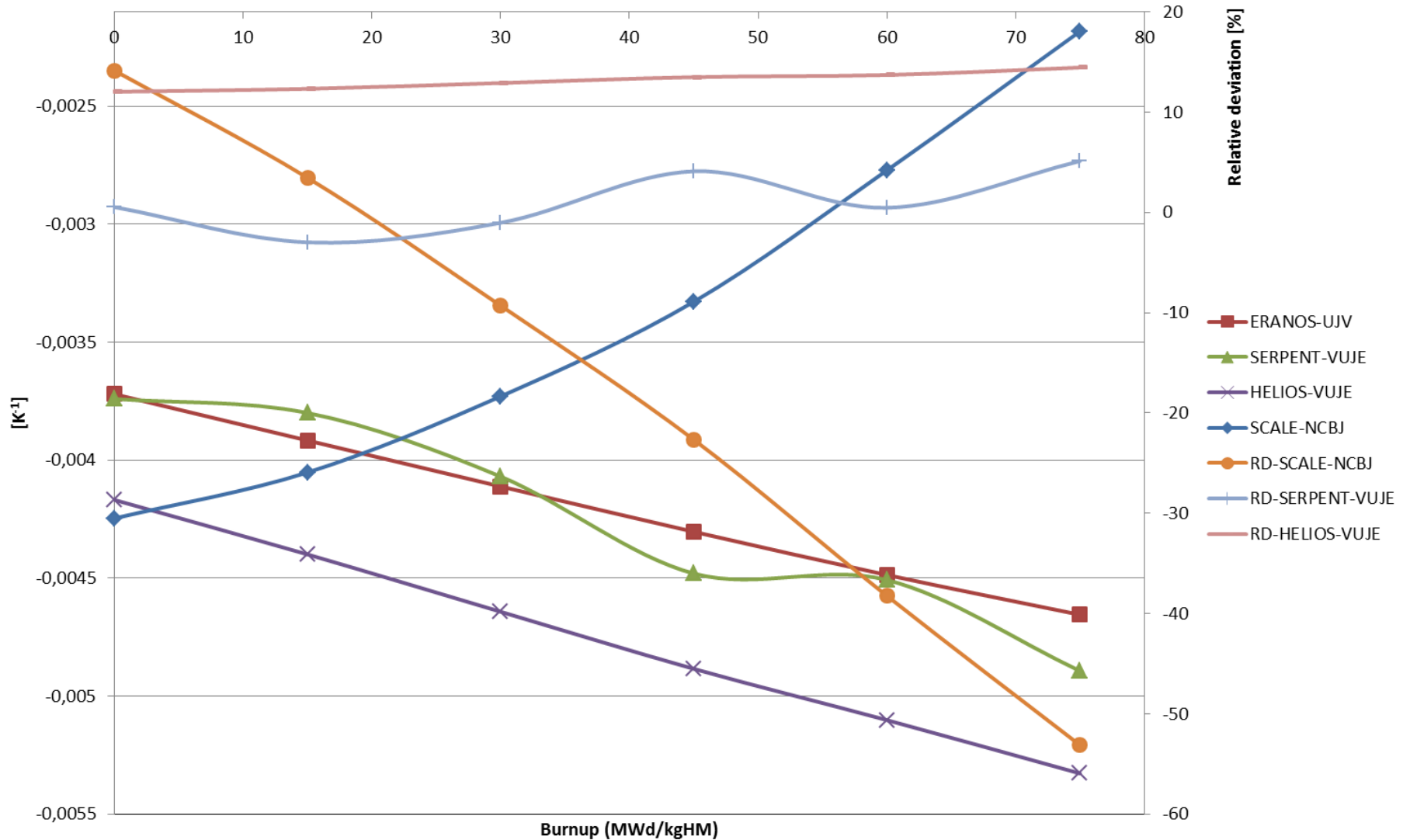
β - UOX



Wyniki - UOX



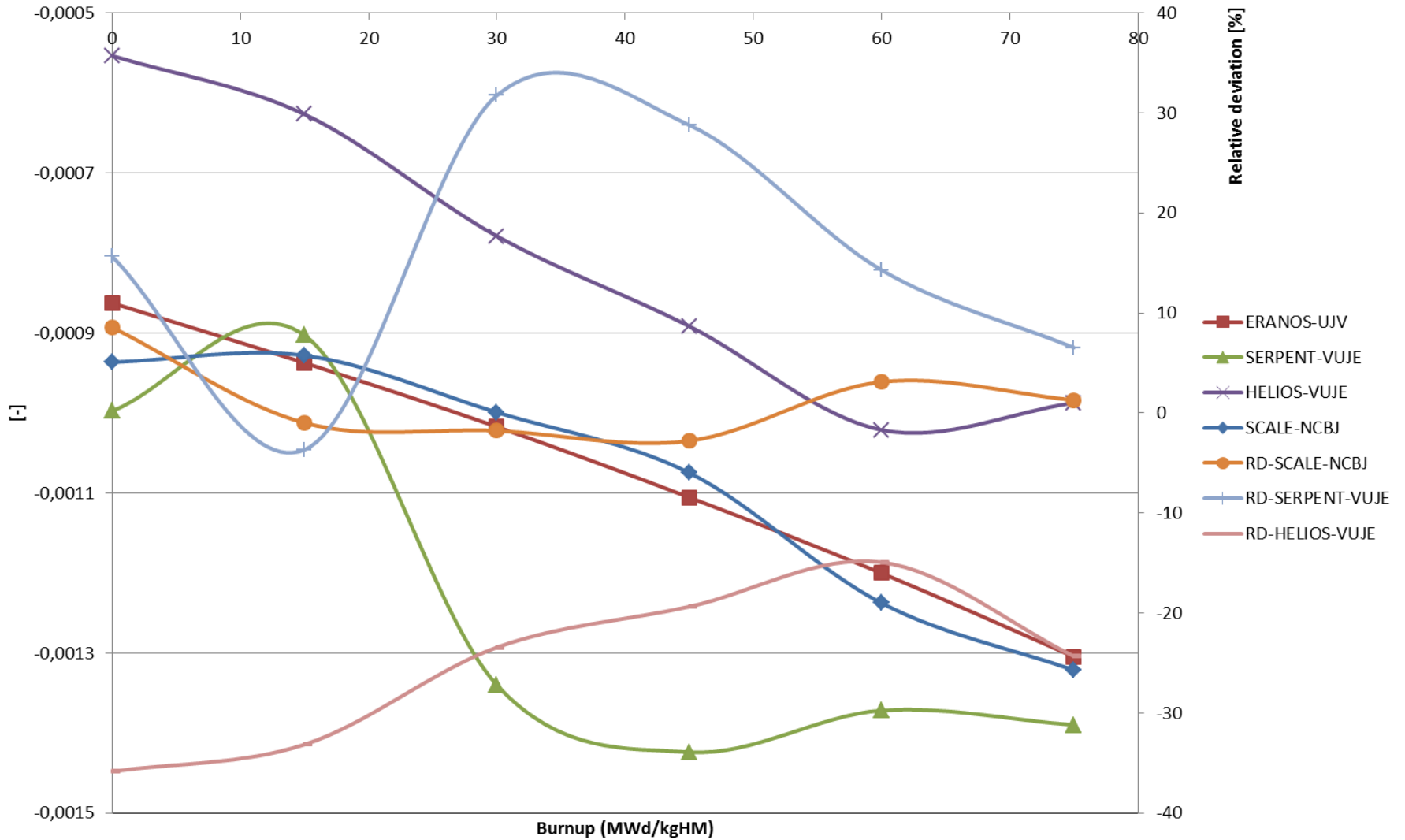
Doppler reactivity coefficient - UOX



Wyniki - UOX



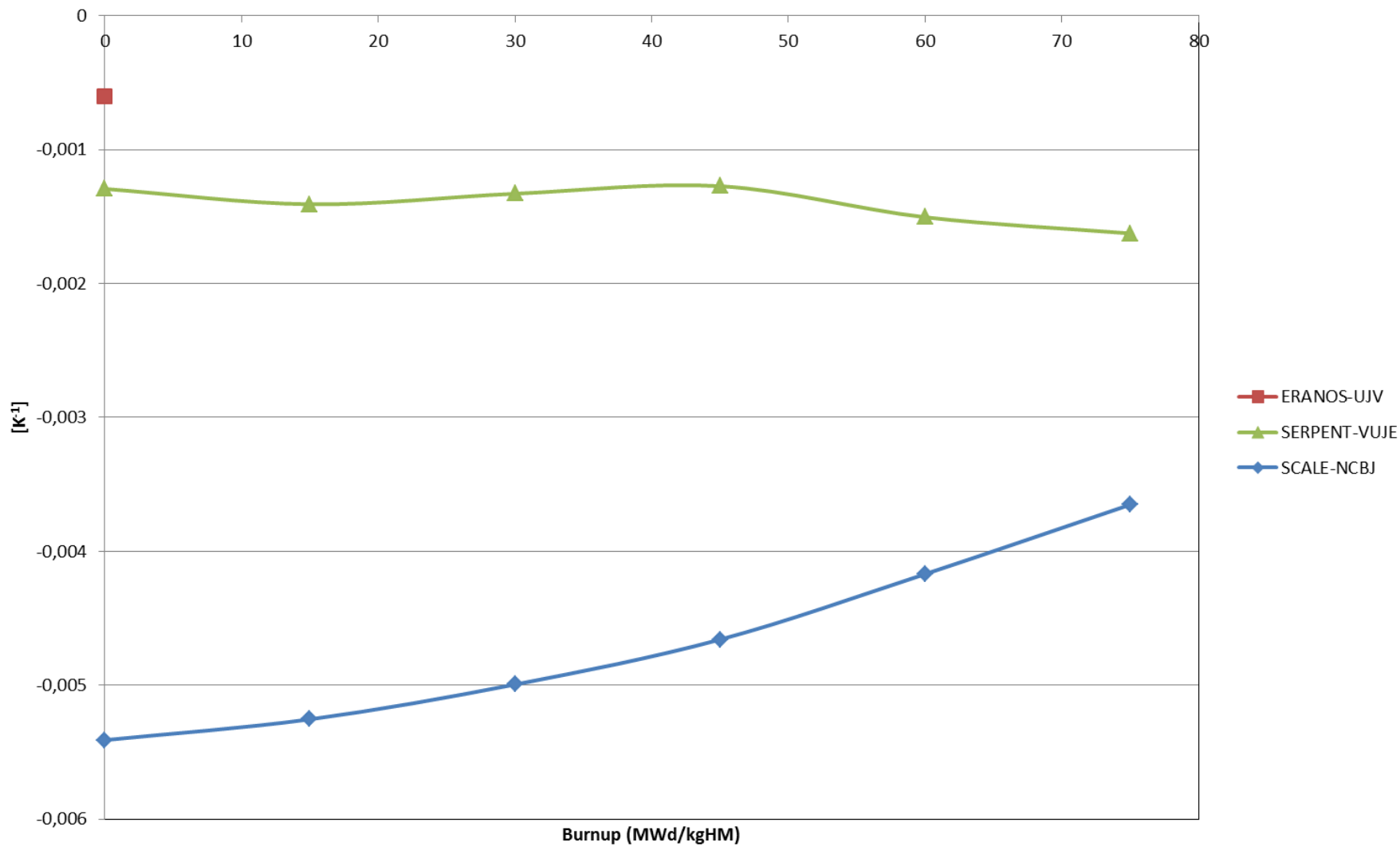
He dilution reactivity coefficient - UOX



Wyniki - UOX



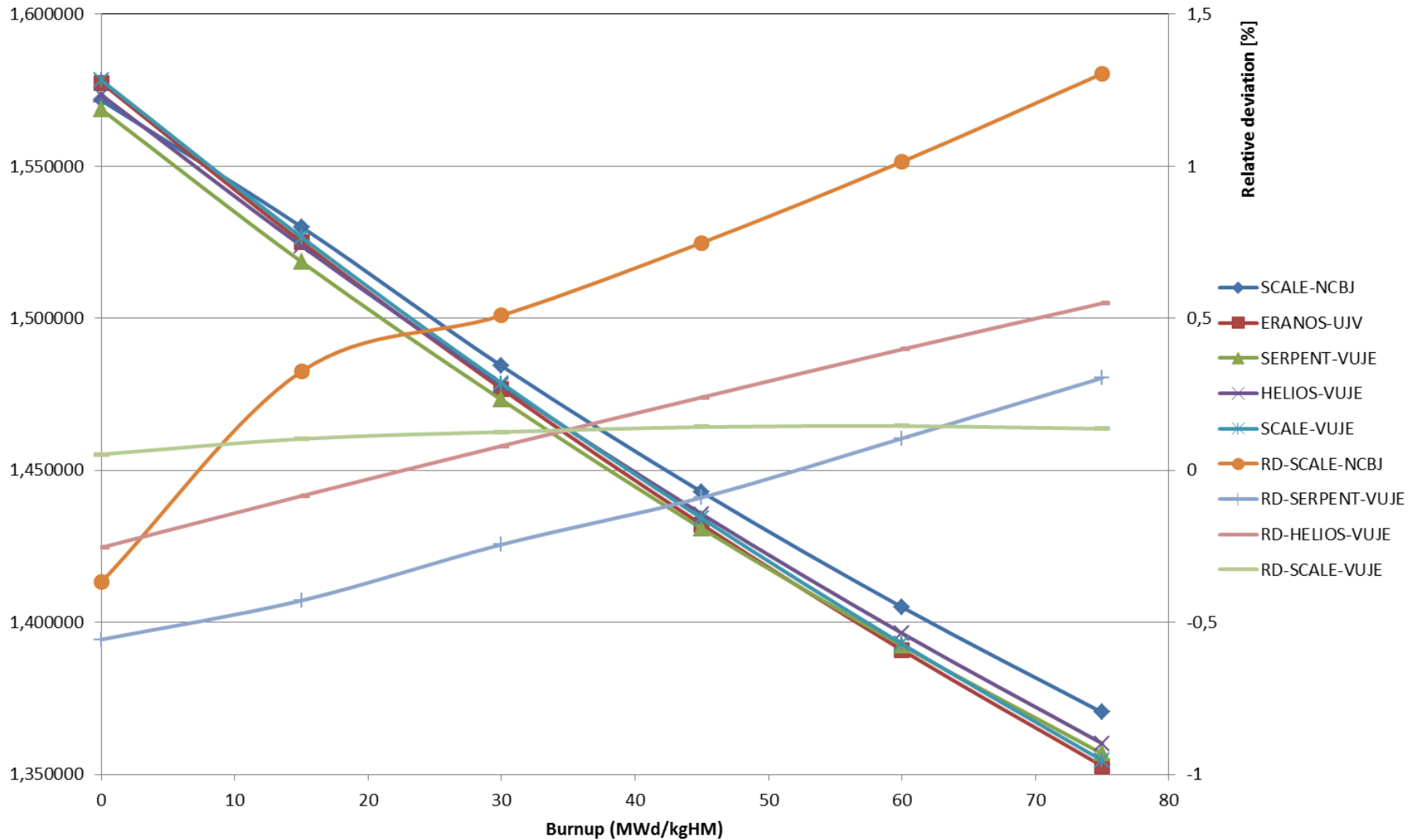
Pellet expansion reactivity coefficient - UOX



Wyniki - MOX



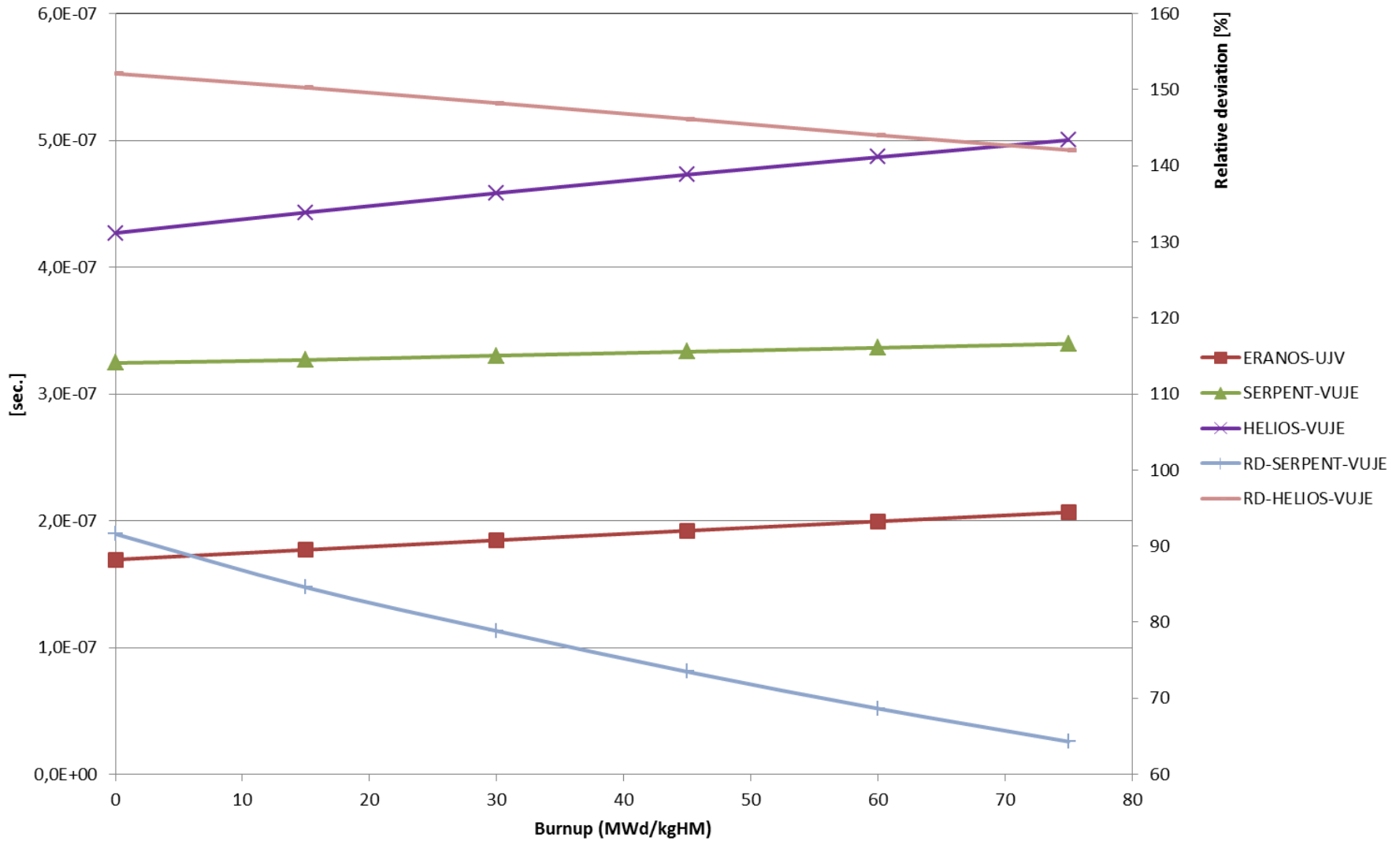
k-inf - MOX



Wyniki - MOX



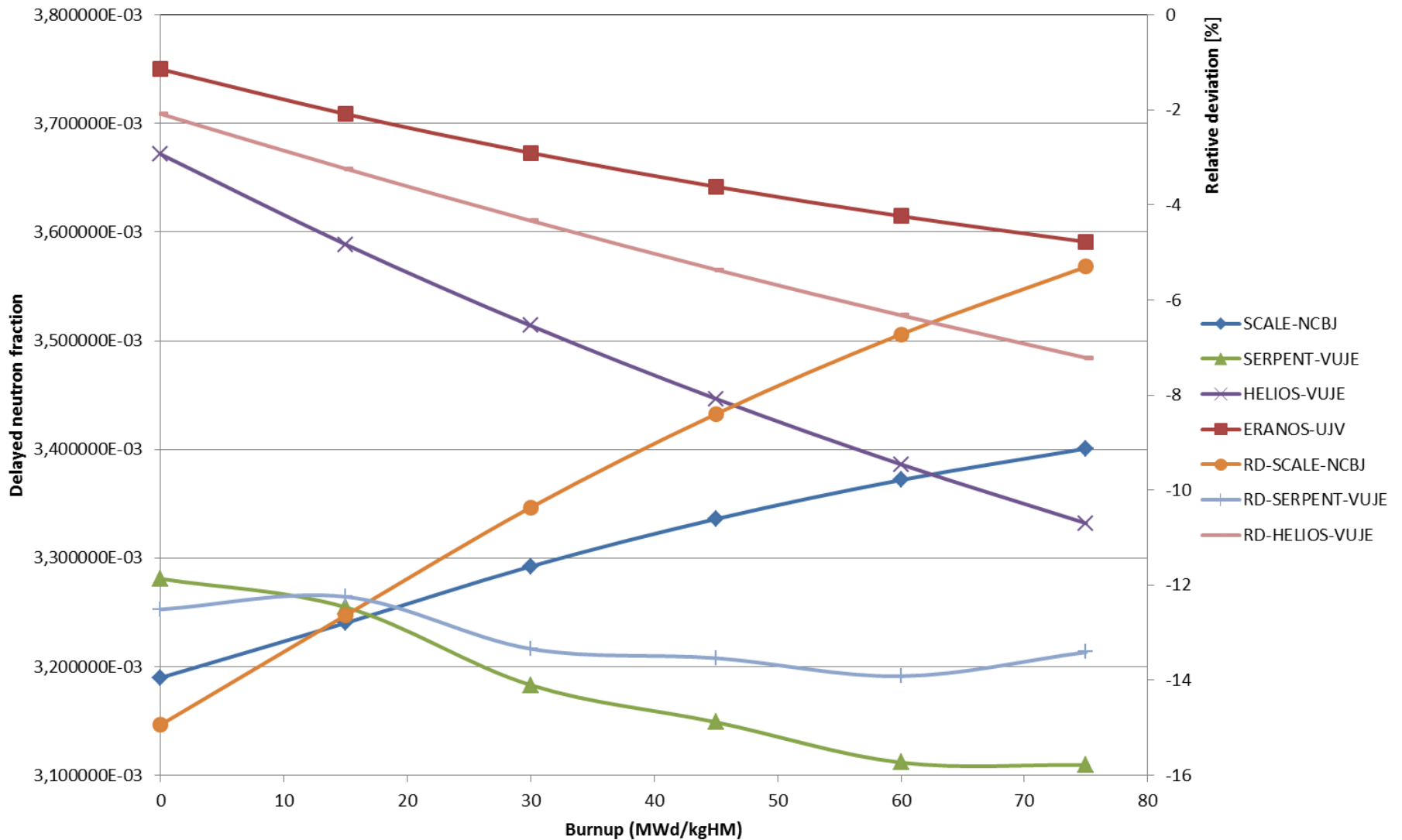
Prompt neutron lifetime - MOX



Wyniki - MOX



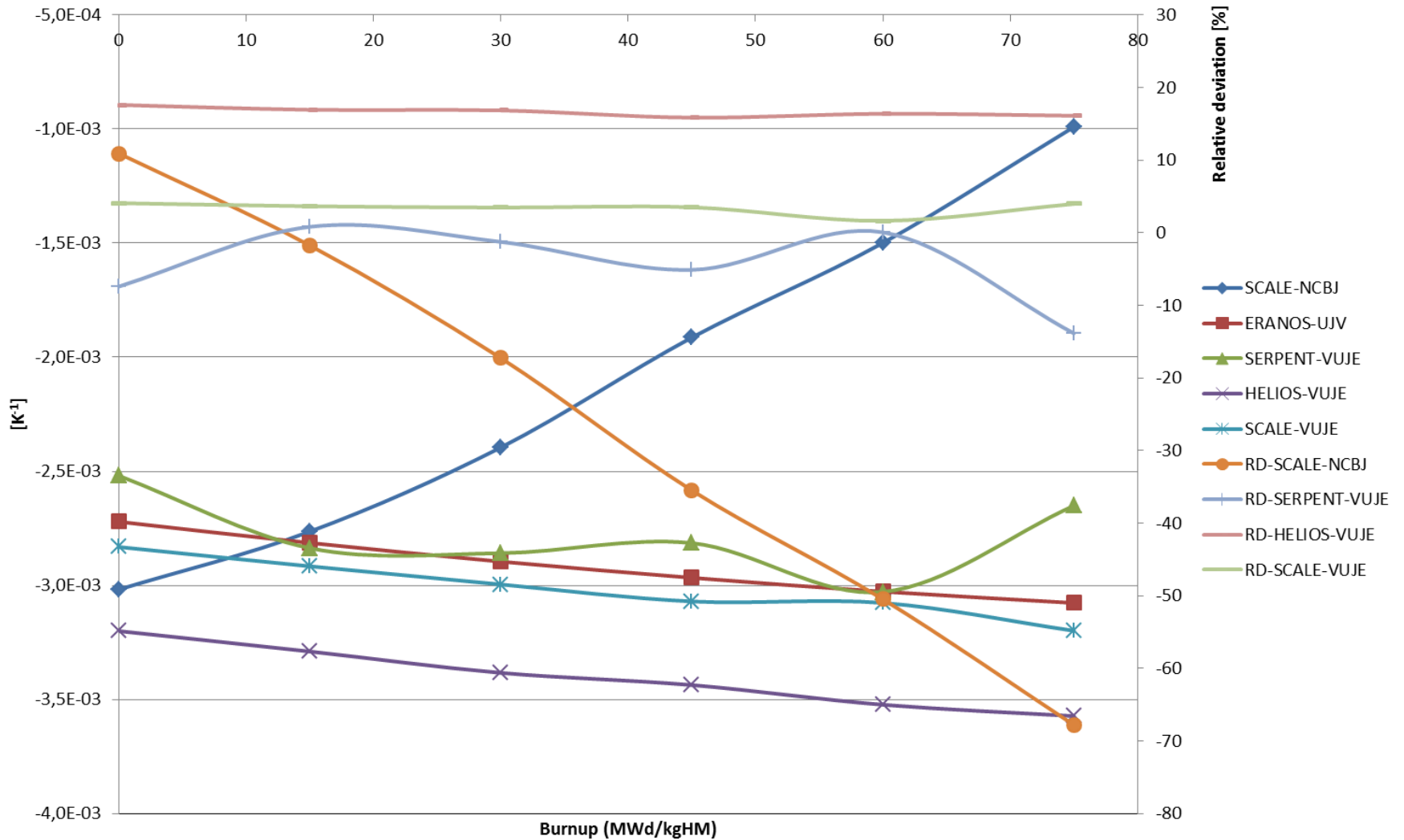
β - MOX



Wyniki - MOX

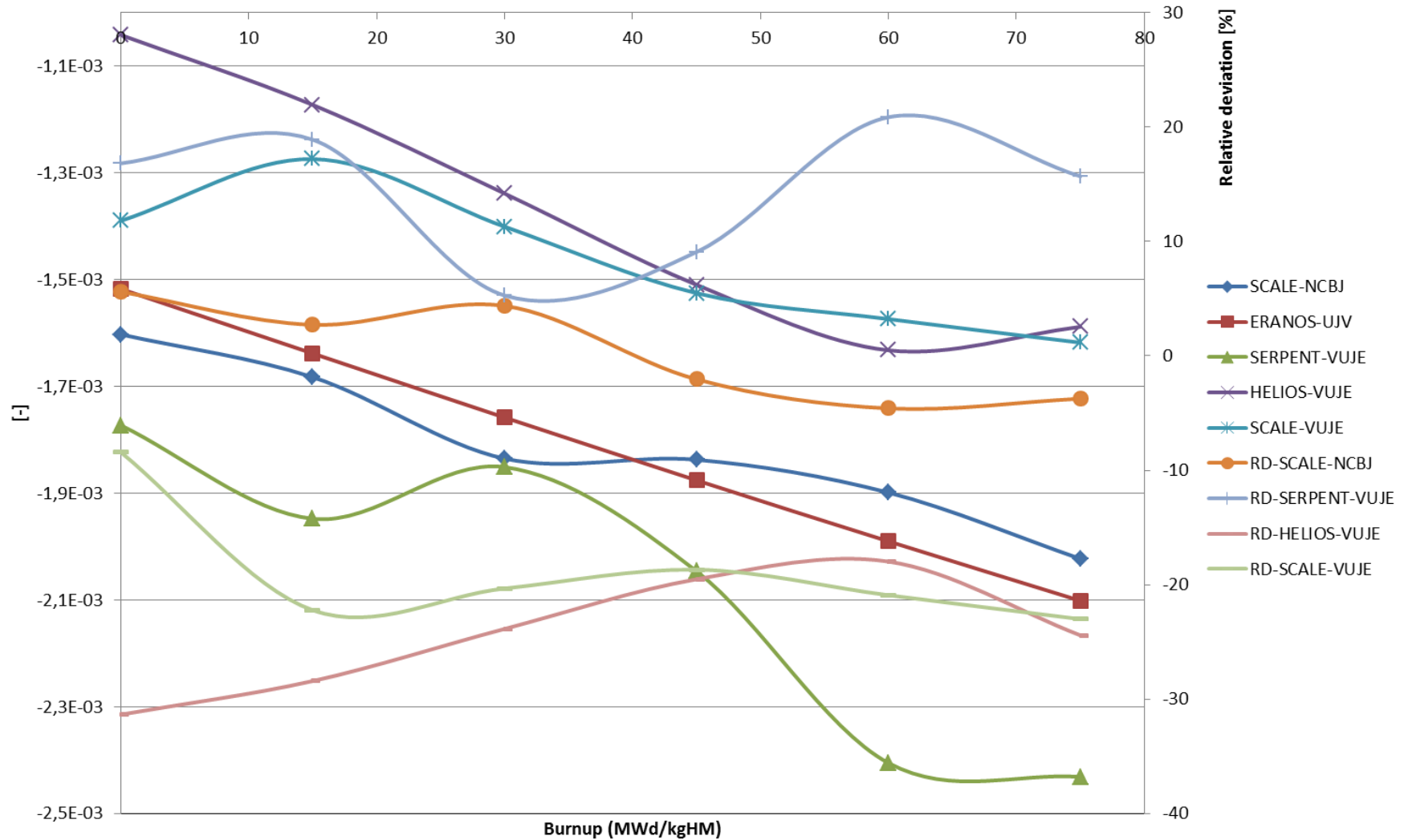


Doppler reactivity coefficient - MOX



Wyniki - MOX

He dillution reactivity coefficient - MOX





Dziękuję!

m.klisinska@ncbj.gov.pl