

NEUTRONOWO- FIZYCZNA ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA NOWYCH ODPORNYCH NA AWARIE KOSZULEK ELEMENTÓW PALIWOWYCH, NA PRZYKŁADZIE REAKTORA EPR



mgr Agnieszka Boettcher

Zakład Energetyki Jądrowej i Analiz środowiska

Pracownia Obliczeń Neutronowych i Nowych Technologii

Plan seminarium

- Wstęp.
- Wybór materiałów na koszulki paliwowe i wyniki analiz dla:
 - elementu paliwowego,
 - zestawu paliwowego,
 - rdzenia reaktora PWR.
- Podsumowanie.

Wstęp

Prowadzone na świecie badania nad paliwami odpornymi na awarie (ang. ATF) skupiają się wokół takich materiałów jak: Mo, SiC.

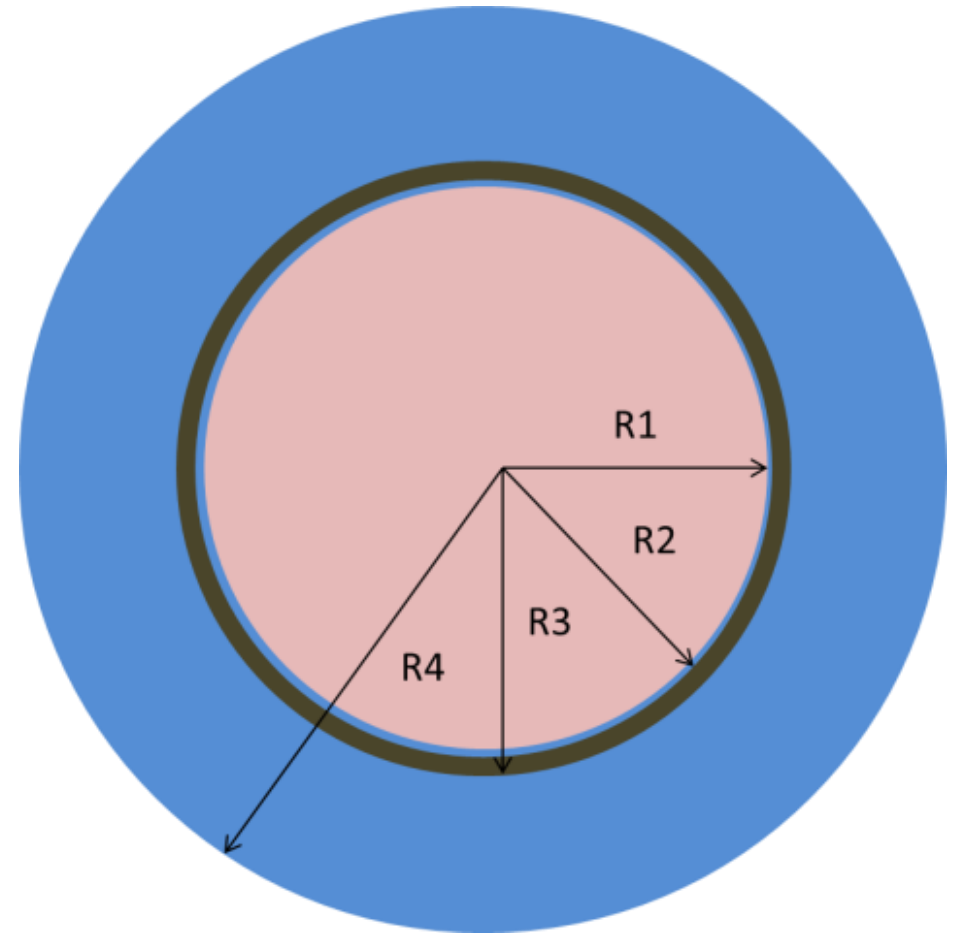
Zarówno kwestia możliwości wykorzystania jako koszulki paliwowej molibdenu jak i węgliku krzemu stanowi przedmiot dyskusji, ze względu na ich własności fizyko-mechaniczne.

Obliczenia w niniejszej pracy bazują na geometrii reaktora EPR, zgodnej ze specyfikacją techniczną: UK-EPR: Fundamental safety Overview, Vol. 1, Chapter A: EPR design Description, Aug. 2005.

Obliczenia zostały wykonane za pomocą kodu MCNPX version 2.6.0.

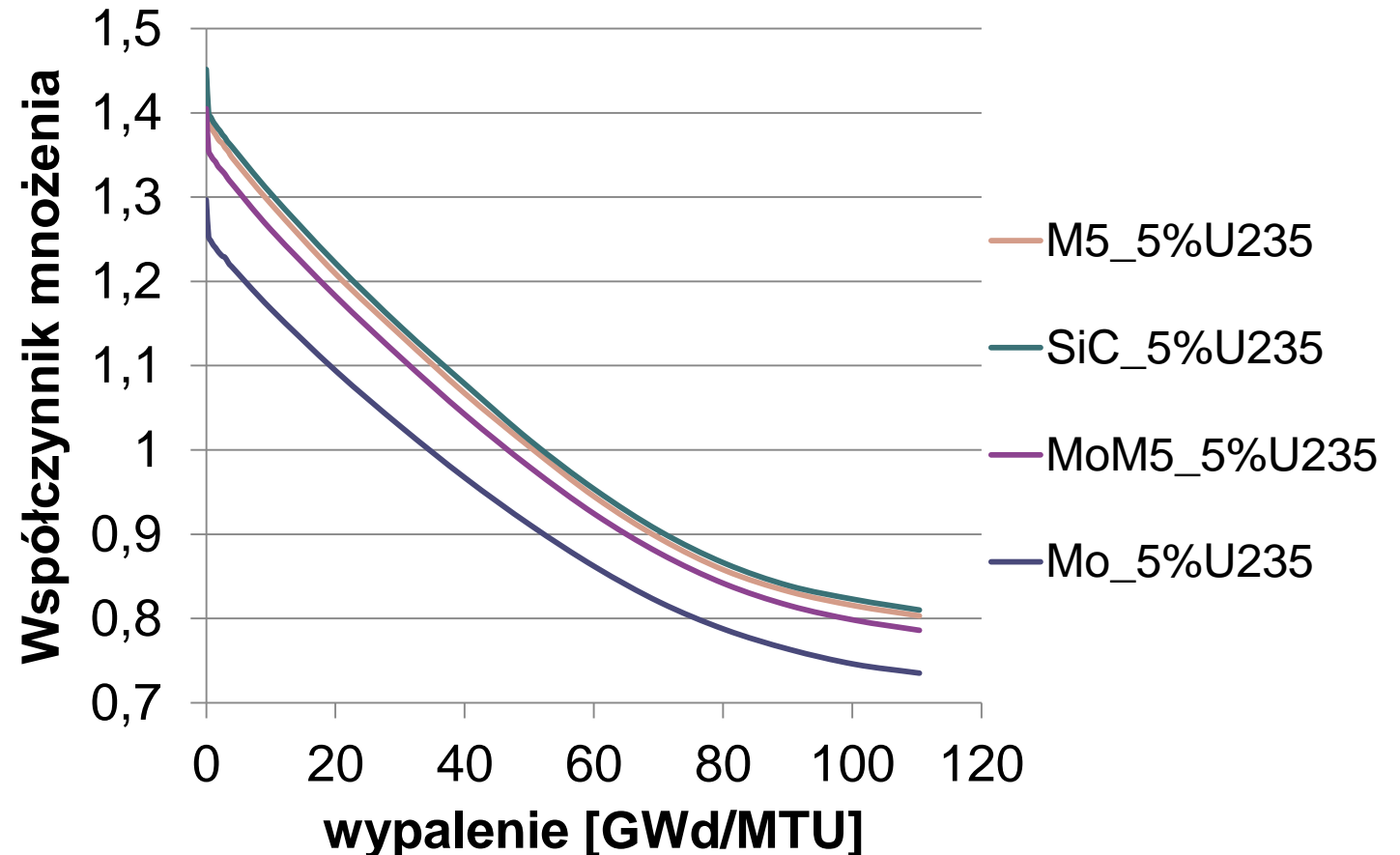
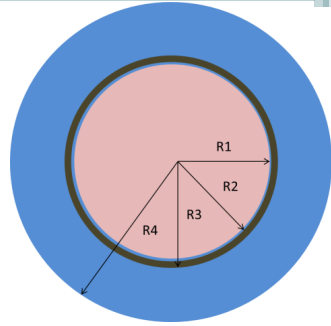
Element paliwowy

Nr	MATERIAŁ	PROMIĘŃ ZEWNĘTRZNY[cm]
R1	Paliwo	0.409575
R2	Szczelina	0.417830
R3	Koszulka paliwowa	0.474980
R4	Woda	1.116600
-	Wysokość	420.00



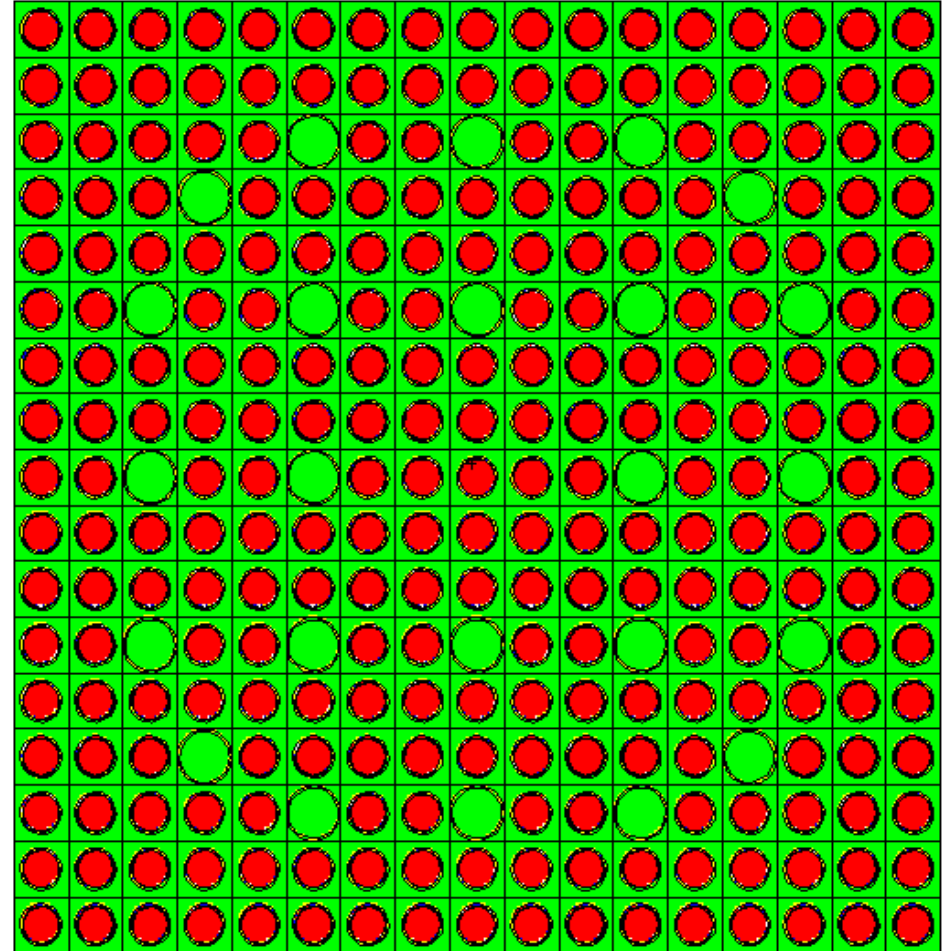
Element paliwowy

- ~12% mniejszy współczynnik mnożenia dla koszulki Mo
- ~2% mniejszy współczynnik mnożenia dla koszulki M5+Mo
- Przebieg wypalenia elementu paliwowego z koszulką SiC oraz Mo zbliżony



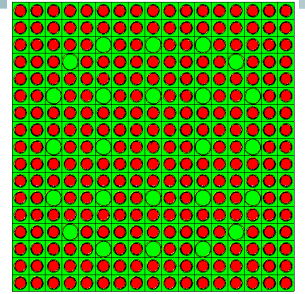
Zestaw paliwowy

- 17x17 :
 - 265 elementów paliwowych
 - 24 kanały wodne
- Siatka nieskończona
- Zestaw paliwowy jednorodny:
 - Wzbogacenia w U-235
 - 3.5%, 3.75%, 4%, 4.5%, 5%
- Koszulki paliwowe:
 - SiC
 - Mo+M5

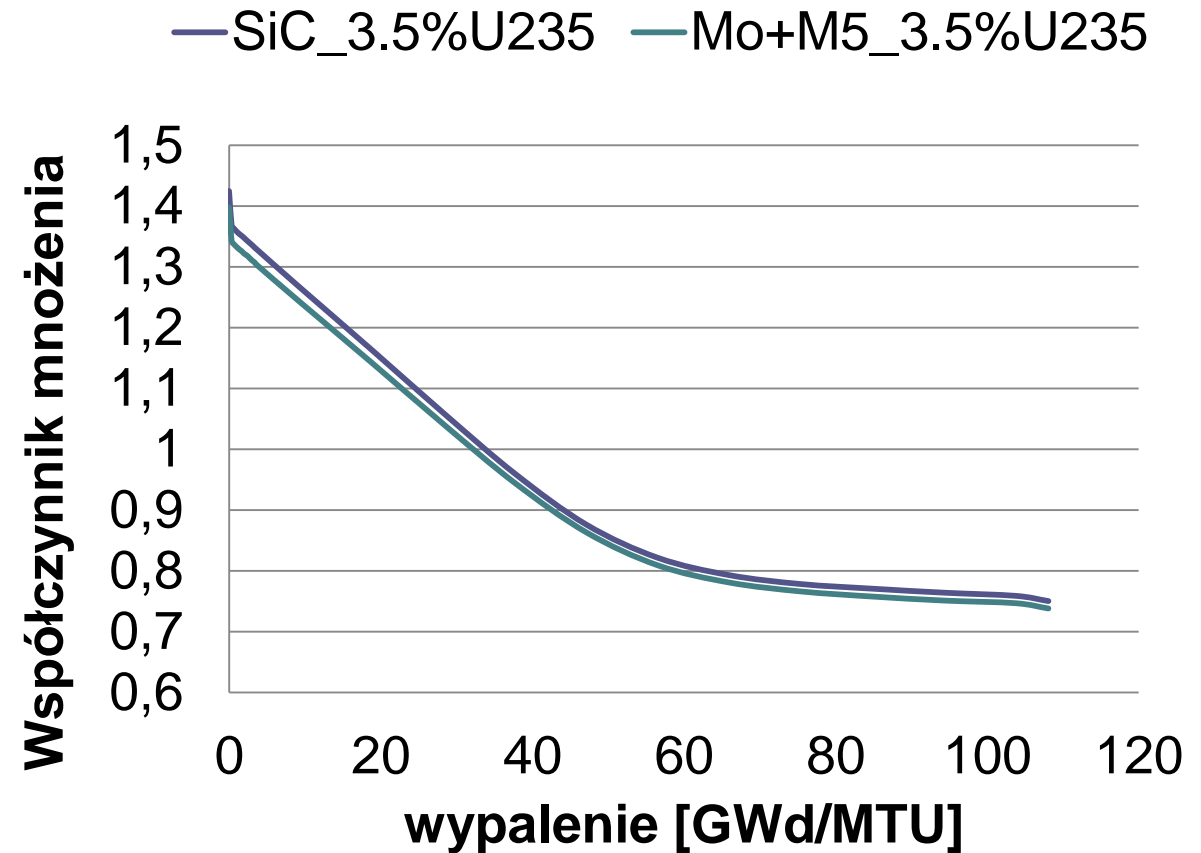


Ilustracja wykonana za pomocą kodu VISED.

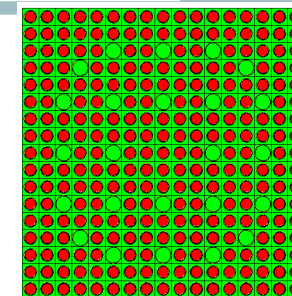
Zestaw paliwowy



- Dla wszystkich wariantów wzbogacenia przebieg wypalenia zbliżony.
- Różnice w rozkładzie mocy do 4%.



Zestaw paliwowy



wypalanie 18.86[GWd/MTU]

kaseta paliwowa z koszulką SiC

0.29	0.28	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.31	0.31	0.30	0.31	0.31	0.30	0.30	0.30	0.29	0.29
0.29	0.30	0.31	0.31	0.32	0.34	0.32	0.32	0.35	0.32	0.32	0.34	0.32	0.31	0.31	0.30	0.29
0.29	0.30	0.32	0.34	0.36	W	0.35	0.34	W	0.35	0.35	W	0.35	0.34	0.31	0.30	0.29
0.30	0.31	0.34	W	0.36	0.36	0.33	0.33	0.35	0.33	0.33	0.36	0.36	W	0.34	0.31	0.30
0.31	0.32	0.35	0.36	0.35	0.36	0.33	0.33	0.35	0.32	0.33	0.34	0.34	0.36	0.35	0.32	0.30
0.31	0.33	W	0.36	0.35	W	0.35	0.34	W	0.35	0.35	W	0.35	0.36	W	0.33	0.30
0.30	0.32	0.34	0.33	0.33	0.35	0.32	0.32	0.34	0.32	0.33	0.34	0.33	0.33	0.35	0.32	0.31
0.30	0.32	0.34	0.33	0.33	0.34	0.32	0.31	0.30	0.31	0.32	0.34	0.32	0.32	0.34	0.32	0.31
0.31	0.34	W	0.35	0.35	W	0.34	0.30	0.30	0.30	0.33	W	0.34	0.34	W	0.33	0.30
0.30	0.32	0.34	0.33	0.33	0.34	0.32	0.31	0.30	0.31	0.32	0.34	0.32	0.32	0.34	0.32	0.31
0.30	0.32	0.34	0.33	0.33	0.35	0.32	0.32	0.34	0.32	0.33	0.34	0.33	0.33	0.35	0.32	0.31
0.31	0.33	W	0.36	0.35	W	0.35	0.34	W	0.35	0.35	W	0.35	0.36	W	0.33	0.30
0.31	0.32	0.35	0.36	0.35	0.36	0.33	0.33	0.35	0.32	0.33	0.34	0.34	0.36	0.35	0.32	0.30
0.30	0.31	0.34	W	0.36	0.36	0.33	0.33	0.35	0.33	0.33	0.36	0.36	W	0.34	0.31	0.30
0.29	0.30	0.32	0.34	0.36	W	0.35	0.34	W	0.35	0.35	W	0.35	0.34	0.31	0.30	0.29
0.29	0.30	0.31	0.31	0.32	0.34	0.32	0.32	0.35	0.32	0.32	0.34	0.32	0.31	0.31	0.30	0.29
0.29	0.28	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.31	0.31	0.30	0.31	0.31	0.30	0.30	0.30	0.29	0.29

rozkład mocy dla kasety EPR w siatce nieskończonej, wzbogacenie 5% U-235
kaseta paliwowa z koszulką Mo+M5

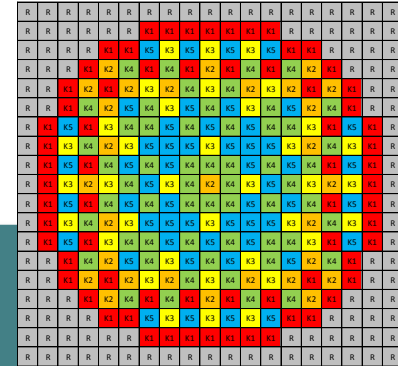
0.28	0.29	0.29	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28
0.29	0.29	0.29	0.30	0.31	0.33	0.31	0.31	0.33	0.31	0.31	0.33	0.31	0.30	0.29	0.28	0.28
0.29	0.29	0.31	0.34	0.35	W	0.34	0.34	W	0.34	0.34	W	0.35	0.34	0.31	0.29	0.28
0.29	0.30	0.34	W	0.36	0.35	0.32	0.32	0.34	0.32	0.32	0.35	0.35	W	0.34	0.30	0.29
0.29	0.31	0.34	0.36	0.34	0.35	0.32	0.32	0.34	0.32	0.32	0.35	0.34	0.35	0.34	0.31	0.30
0.30	0.33	W	0.35	0.35	W	0.34	0.34	W	0.34	0.34	W	0.35	0.35	W	0.33	0.30
0.30	0.31	0.34	0.32	0.33	0.34	0.32	0.32	0.33	0.32	0.32	0.34	0.32	0.32	0.34	0.31	0.30
0.30	0.31	0.34	0.32	0.32	0.34	0.31	0.30	0.30	0.30	0.32	0.34	0.32	0.32	0.34	0.31	0.30
0.30	0.33	W	0.34	0.34	W	0.33	0.30	0.30	0.30	0.33	W	0.34	0.34	W	0.33	0.30
0.30	0.31	0.34	0.32	0.32	0.34	0.31	0.30	0.30	0.30	0.32	0.34	0.32	0.32	0.34	0.31	0.30
0.30	0.31	0.34	0.32	0.33	0.34	0.32	0.32	0.33	0.32	0.32	0.34	0.32	0.32	0.34	0.31	0.30
0.30	0.33	W	0.35	0.35	W	0.34	0.34	W	0.34	0.34	W	0.35	0.35	W	0.33	0.30
0.29	0.31	0.34	0.36	0.34	0.35	0.32	0.32	0.34	0.32	0.32	0.35	0.34	0.35	0.34	0.31	0.30
0.29	0.30	0.34	W	0.36	0.35	0.32	0.32	0.34	0.32	0.32	0.35	0.35	W	0.34	0.30	0.29
0.29	0.29	0.31	0.34	0.35	W	0.34	0.34	W	0.34	0.34	W	0.35	0.34	0.31	0.29	0.28
0.29	0.29	0.29	0.30	0.31	0.33	0.31	0.31	0.33	0.31	0.31	0.33	0.31	0.30	0.29	0.28	0.28
0.28	0.29	0.29	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28

SKALA [MeV/g]
0.427
0.395
0.363
0.326
0.304
0.299
0.281
0.247
0.238
0.200
0.197
0.193
0.163
0.159

odchylenie SiC v. Mo+M5

-2%	1%	-3%	-3%	-1%	-1%	0%	-3%	-3%	-2%	-5%	-3%	-2%	-2%	-3%	-3%	-2%
-1%	-3%	-5%	-3%	-3%	-2%	-1%	-4%	-5%	-5%	-4%	-5%	-4%	-2%	-4%	-4%	-2%
-2%	-3%	-2%	-2%	-3%	W	-3%	-2%	W	-2%	-4%	W	-2%	-1%	1%	-3%	-3%
-2%	-2%	-1%	W	-1%	-3%	-2%	-3%	-3%	-2%	-3%	-3%	-2%	W	-1%	-1%	-4%
-4%	-4%	-2%	-2%	-3%	-2%	-1%	-2%	-3%	0%	-2%	1%	0%	-2%	-3%	-3%	-2%
-3%	-1%	W	-2%	-1%	W	-2%	-1%	W	-2%	-1%	W	-2%	-3%	W	-1%	-1%
-1%	-2%	-2%	-1%	-2%	-1%	-2%	-2%	-4%	-2%	-3%	-1%	-2%	-2%	-3%	-4%	-4%
-2%	-2%	-1%	-1%	-2%	-1%	-2%	-1%	0%	-1%	-2%	-1%	0%	0%	-1%	-3%	-3%
-4%	-2%	W	-3%	-3%	W	-2%	-1%	-1%	0%	-1%	W	0%	1%	W	1%	0%
-2%	-2%	-1%	-1%	-2%	-1%	-2%	-1%	0%	-1%	-2%	-1%	0%	0%	-1%	-3%	-3%
-1%	-2%	-2%	-1%	-2%	-1%	-2%	-2%	-4%	-2%	-3%	-1%	-2%	-2%	-3%	-4%	-4%
-3%	-1%	W	-2%	-1%	W	-2%	-1%	W	-2%	-1%	W	-2%	-3%	W	-1%	-1%
-4%	-4%	-2%	-2%	-3%	-2%	-1%	-2%	-3%	0%	-2%	1%	0%	-2%	-3%	-3%	-2%
-2%	-2%	-1%	W	-1%	-3%	-2%	-3%	-3%	-2%	-3%	-2%	W	-1%	-1%	-4%	-4%
-2%	-3%	-2%	-2%	-3%	W	-3%	-2%	W	-2%	-4%	W	-2%	-1%	1%	-3%	-3%
-1%	-3%	-5%	-3%	-3%	-2%	-1%	-4%	-5%	-5%	-4%	-5%	-4%	-2%	-4%	-4%	-2%
-2%	1%	-3%	-3%	-1%	-1%	0%	-3%	-3%	-2%	-5%	-3%	-2%	-2%	-3%	-3%	-2%

Rdzeń reaktora PWR



RDZEŃ	CZP	HFP	Odchylenie standardowe	Współczynnik temperaturowy α_{TF} [pcm/K]	Współczynnik temperaturowy α_{TW} [pcm/K]
	keff				
TEPR1	1.2177	1.1790	0.00007	-1.81435	-7.44886
TEPR2	1.2103	1.1705	0.00007	-1.85945	-7.82653
TEPR3	1.2040	1.1640	0.00007	-1.82568	-8.13928
TEPR4	1.2006	1.1610	0.00007	-1.83591	-8.12424
TEPR5	1.1938	1.1586	0.00007	-1.31350	-7.36062
TEPR6	1.1909	1.1557	0.00007	-1.23989	-7.47798

- Zgodnie ze specyfikacją techniczną [30] zakłada się, że dla reaktora EPR $\alpha_{TF} \in \langle -4,03; -1,98 \rangle$ [pcm/K] natomiast $\alpha_{TW} \leq 0$ [pcm/K].

Rdzeń reaktora PWR

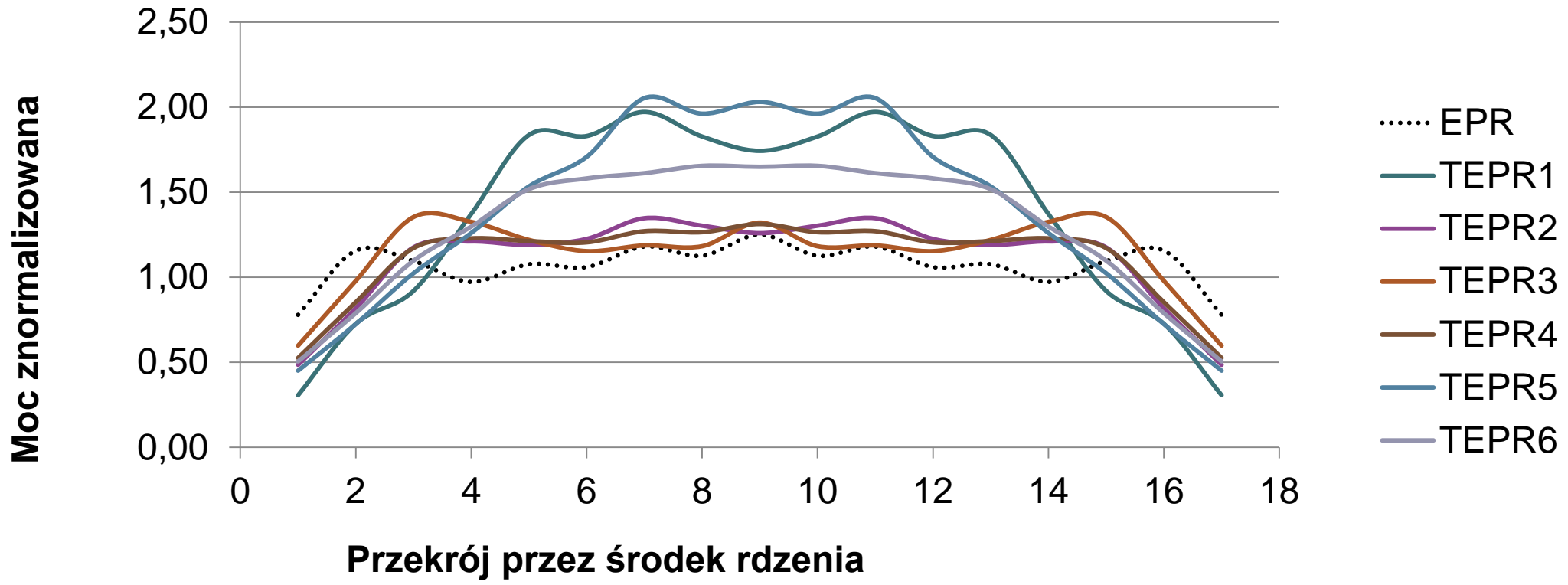
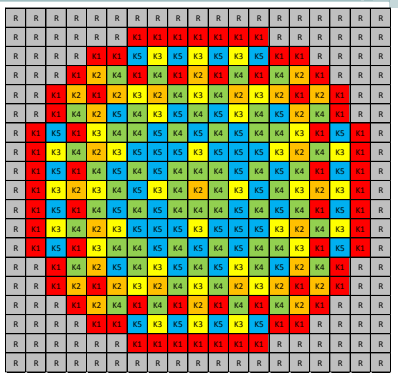
Konfiguracja rdzenia TEPR3																			
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	K1	K1	K1	K1	K1	K1	K1	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	K1	K1	K5	K3	K5	K3	K5	K3	K5	K1	K1	R	R	R	R	R
R	R	R	K1	K2	K4	K1	K4	K1	K2	K1	K4	K1	K4	K2	K1	R	R	R	R
R	R	K1	K2	K1	K2	K3	K2	K4	K3	K4	K2	K3	K2	K1	K2	K1	R	R	R
R	R	K1	K4	K2	K5	K4	K3	K5	K4	K5	K3	K4	K5	K2	K4	K1	R	R	R
R	K1	K5	K1	K3	K4	K4	K5	K4	K5	K4	K5	K4	K4	K3	K1	K5	K1	R	R
R	K1	K3	K4	K2	K3	K5	K5	K5	K3	K5	K5	K5	K3	K2	K4	K3	K1	R	R
R	K1	K5	K1	K4	K5	K4	K5	K4	K4	K4	K5	K4	K5	K4	K1	K5	K1	R	R
R	K1	K3	K4	K2	K3	K5	K5	K5	K3	K5	K5	K5	K3	K2	K4	K3	K1	R	R
R	K1	K5	K1	K3	K4	K4	K5	K4	K5	K4	K4	K3	K1	K5	K1	R	R	R	R
R	R	K1	K4	K2	K5	K4	K3	K5	K4	K5	K3	K4	K5	K2	K4	K1	R	R	R
R	R	K1	K2	K1	K2	K3	K2	K4	K3	K4	K2	K3	K2	K1	K2	K1	R	R	R
R	R	R	K1	K2	K4	K1	K4	K1	K2	K1	K4	K1	K4	K2	K1	R	R	R	R
R	R	R	R	K1	K1	K5	K3	K5	K3	K5	K3	K5	K1	K1	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	K1	K1	K1	K1	K1	K1	K1	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

Rdzeń TEPR3, rozkład mocy [MeV/g], stan CZP																			
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	0.53	0.79	0.89	0.93	0.89	0.79	0.53	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	0.67	1.01	1.08	1.33	1.37	1.53	1.37	1.33	1.08	1.01	0.67	R	R	R	R	R
R	R	R	R	0.82	1.42	1.57	1.95	1.76	2.13	2.09	2.13	1.76	1.95	1.57	1.42	0.82	R	R	R
R	R	0.67	1.42	2.08	2.07	1.93	2.00	1.78	1.83	1.78	2.00	1.93	2.07	2.08	1.42	0.67	R	R	R
R	R	1.01	1.57	2.07	1.73	1.64	1.60	1.39	1.39	1.39	1.60	1.64	1.73	2.07	1.57	1.01	R	R	R
R	0.53	1.08	1.95	1.93	1.64	1.39	1.21	1.18	1.12	1.18	1.21	1.39	1.64	1.93	1.95	1.08	0.53	R	R
R	0.79	1.33	1.76	2.00	1.60	1.21	1.06	1.04	1.14	1.04	1.06	1.21	1.60	2.00	1.76	1.33	0.79	R	R
R	0.89	1.37	2.13	1.78	1.39	1.18	1.04	1.11	1.15	1.11	1.04	1.18	1.39	1.78	2.13	1.37	0.89	R	R
R	0.93	1.53	2.09	1.83	1.39	1.12	1.14	1.15	1.32	1.15	1.14	1.12	1.39	1.83	2.09	1.53	0.93	R	R
R	0.89	1.37	2.13	1.78	1.39	1.18	1.04	1.11	1.15	1.11	1.04	1.18	1.39	1.78	2.13	1.37	0.89	R	R
R	0.79	1.33	1.76	2.00	1.60	1.21	1.06	1.04	1.14	1.04	1.06	1.21	1.60	2.00	1.76	1.33	0.79	R	R
R	0.53	1.08	1.95	1.93	1.64	1.39	1.21	1.18	1.12	1.18	1.21	1.39	1.64	1.93	1.95	1.08	0.53	R	R
R	R	1.01	1.57	2.07	1.73	1.64	1.60	1.39	1.39	1.39	1.60	1.64	1.73	2.07	1.57	1.01	R	R	R
R	R	0.67	1.42	2.08	2.07	1.93	2.00	1.78	1.83	1.78	2.00	1.93	2.07	2.08	1.42	0.67	R	R	R
R	R	R	0.82	1.42	1.57	1.95	1.76	2.13	2.09	2.13	1.76	1.95	1.57	1.42	0.82	R	R	R	R
R	R	R	R	0.67	1.01	1.08	1.33	1.37	1.53	1.37	1.33	1.08	1.01	0.67	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	0.53	0.79	0.89	0.93	0.89	0.79	0.53	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

Rdzeń TEPR3, rozkład mocy [MeV/g], stan HFP																			
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	0.47	0.68	0.78	0.82	0.78	0.68	0.47	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	0.51	0.80	0.93	1.16	1.24	1.34	1.24	1.16	0.93	0.80	0.51	R	R	R	R	R
R	R	R	R	0.60	1.03	1.23	1.61	1.54	1.88	1.85	1.88	1.54	1.61	1.23	1.03	0.60	R	R	R
R	R	0.51	1.03	1.54	1.68	1.68	1.86	1.75	1.81	1.75	1.86	1.68	1.68	1.54	1.03	0.51	R	R	R
R	R	0.80	1.23	1.68	1.61	1.64	1.72	1.65	1.66	1.65	1.72	1.64	1.61	1.68	1.23	0.80	R	R	R
R	0.47	0.93	1.61	1.68	1.64	1.60	1.56	1.58	1.57	1.58	1.56	1.60	1.64	1.68	1.61	0.93	0.47	R	R
R	0.68	1.16	1.54	1.86	1.72	1.56	1.53	1.54	1.62	1.54	1.53	1.56	1.72	1.86	1.54	1.16	0.68	R	R
R	0.78	1.24	1.88	1.75	1.65	1.58	1.54	1.59	1.61	1.59	1.54	1.58	1.65	1.75	1.88	1.24	0.78	R	R
R	0.82	1.34	1.85	1.81	1.66	1.57	1.62	1.61	1.80	1.61	1.62	1.57	1.66	1.81	1.85	1.34	0.82	R	R
R	0.78	1.24	1.88	1.75	1.65	1.58	1.54	1.59	1.61	1.59	1.54	1.58	1.65	1.75	1.88	1.24	0.78	R	R
R	0.68	1.16	1.54	1.86	1.72	1.56	1.53	1.54	1.62	1.54	1.53	1.56	1.72	1.86	1.54	1.16	0.68	R	R
R	0.47	0.93	1.61	1.68	1.64	1.60	1.56	1.58	1.57	1.58	1.56	1.60	1.64	1.68	1.61	0.93	0.47	R	R
R	R	0.80	1.23	1.68	1.61	1.64	1.72	1.65	1.66	1.65	1.72	1.64	1.61	1.68	1.23	0.80	R	R	R
R	R	0.51	1.03	1.54	1.68	1.68	1.86	1.75	1.81	1.75	1.86	1.68	1.68	1.54	1.03	0.51	R	R	R
R	R	R	0.60	1.03	1.23	1.61	1.54	1.88	1.85	1.88	1.54	1.61	1.23	1.03	0.60	R	R	R	R
R	R	R	R	0.51	0.80	0.93	1.16	1.24	1.34	1.24	1.16	0.93	0.80	0.51	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	0.47	0.68	0.78	0.82	0.78	0.68	0.47	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

SKALA [MeV/g]
3.424
2.947
2.354
2.301
2.254
2.181
2.106
1.855
1.830
1.644
1.107
0.897
0.876
0.668
0.528
0.462
0.356
0.226
0.187

Rdzeń reaktora PWR



Porównanie rozkładu mocy w zaprojektowanych rdzeniach oraz w reaktorze EPR

Dziękuję za uwagę

