

Pregled možnosti za obsevanje γ na reaktorju TRIGA IJS

...

Klemen Ambrožič

4.1 Motivacija

S sevanjem žarkov γ se srečujemo v različnih panogah, kjer sevanje povzroča poškodbe na vitalnih in aktivnih komponentah večjih sistemov. Zato si želimo te komponente predhodno ustrezno projektirati, ščititi in testirati (komponente pospeševalnikov delcev, umetnih satelitov, jedrske instrumentacije ipd.). Testiramo jih lahko v fisiskem jedrskem reaktorju, ki je izdaten vir sevanja žarkov γ in nevtronov.

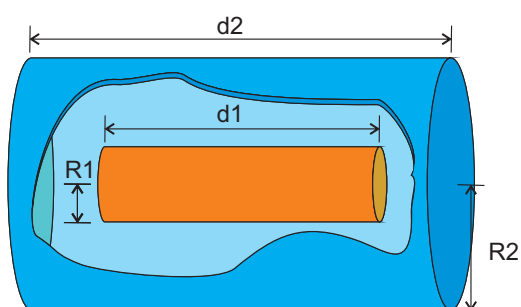
4.2 Metode obsevanja

V samem reaktorju imamo dve glavni polji ionizirajočega sevanja, nevtronsko in fotonsko, mi pa bi si želeli samo polje žarkov γ oziroma čim večji delež. To lahko dosežemo na več načinov:

- Uporaba nevtronskih ščitov v mešanem polju. Pri tem uporabljamo ščite, ki imajo visok presek za zajetje nevtrona ter visok presek za zajetje nevtrona in produkcijo promptnih γ žarkov. Ker so navadno preseki za reakcije tega tipa največji pri vpadnih nevtronih z nizko energijo, lahko nevtrone še termaliziramo z uporabo sipalca nevtronov, npr. polietilenom. Vseh nevtronov sicer ne zaustavimo, lahko pa se čim bolj potrudimo.
- Obsevanje z zakasnelimi žarki γ . V nevtronskem polju se material lahko močno aktivira, aktivni produkti pa oddajajo sevanje γ . Ko se material enkrat aktivira, ga lahko odmaknemo iz nevtronskega polja, tako da nam ostane le polje žarkov γ . Materiali, primerni za takšno aktivacijo, imajo visok presek za zajetje nevtronov ter nizek razpadni čas, da so močno aktivni. Tudi v jedrskem gorivu nastajajo radioaktivni izotopi, ki pa so le delno posledica nevtronske aktivacije. Večino jih dobimo pri jedrskem razcepu težkega jedra.

4.3 Simuliranje metod obsevanja

Metode obsevanj sem testiral s programom za časovno neodvisen Monte Carlo transport delcev MCNP (Goorley in sod., 2013). V model reaktorja TRIGA sem vstavil vzorce silicija in ščite. Pri časovno odvisnih problemih (aktivacija, transmutacija) pa sem poleg transporta Monte Carlo uporabil tudi programski paket FISPACT-II (Sublet, Eastwood & Morgan, b.d.) za izračun časovne propagacije aktivacije, transmutacije in razpada.



d1	20 cm
d2	30 cm
R1	2,5 cm
R2	7,7 cm

Slika 4.1: Shema postavitve vzorca v obsevalno posodo.

Tabela 4.1: Tabela mer simulirane posode in vzorca.

Tabela 4.2: Tabela vrednosti \dot{D}_n , \dot{D}_γ ter $\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_n}$ v vzorcu silicija brez in z uporabo različnih nevtronskih ščitov:

	TanC			RPP			RBP		
	\dot{D}_n [$\frac{\text{Gy}}{\text{h}}$]	\dot{D}_γ [$\frac{\text{Gy}}{\text{h}}$]	$\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_n}$	\dot{D}_n [$\frac{\text{Gy}}{\text{h}}$]	\dot{D}_γ [$\frac{\text{Gy}}{\text{h}}$]	$\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_n}$	\dot{D}_n [$\frac{\text{Gy}}{\text{h}}$]	\dot{D}_γ [$\frac{\text{Gy}}{\text{h}}$]	$\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_n}$
Brez	404	$2,35 \cdot 10^4$	58,3	255	$1,78 \cdot 10^4$	69,9	6,80	$2,24 \cdot 10^3$	330
Ag	393	$3,35 \cdot 10^4$	85,4	247	$2,40 \cdot 10^4$	97,0	6,57	$2,74 \cdot 10^3$	418
Gd	394	$3,58 \cdot 10^4$	90,9	248	$2,49 \cdot 10^4$	100	6,63	$2,69 \cdot 10^3$	406
Hf	393	$1,65 \cdot 10^4$	41,9	247	$1,18 \cdot 10^4$	47,7	6,62	$1,35 \cdot 10^3$	203
Cd	394	$1,79 \cdot 10^4$	45,5	249	$1,31 \cdot 10^4$	52,5	6,64	$1,45 \cdot 10^3$	218
In	395	$1,81 \cdot 10^4$	45,8	249	$1,32 \cdot 10^4$	53,0	6,65	$1,47 \cdot 10^3$	221

4.4 Obsevanje s promptnimi žarki γ v horizontalnih obsevalnih kanalih reaktorja TRIGA

Horizontalni obsevalni kanali so blizu sredice reaktorja, tako da imamo mešano polje nevtronov in žarkov γ . Z uporabo nevtronskega ščita lahko zmanjšamo fluks nevtronov, pri tem pa pridobimo na fluksu promptnih žarkov γ , ki se proizvajajo v ščitu. Najbolj primerni materiali so materiali z visokim presekom za zajetje nevtrona σ_c .

Če zapremo vzorec silicija v posodo iz takšnega materiala, se zmanjša nevtronski fluks ter poveča fluks žarkov γ . Posledično se tudi zmanjša hitrost doze nevtronov \dot{D}_n in poveča hitrost doze žarkov γ , torej \dot{D}_γ . Na sliki 4.1 lahko vidimo shemo postavitve vzorca v posodi za obsevanje. Debelina stene posode je 2 mm.

V tabeli 4.2 si pogledjmo, kako se v simulaciji spreminjajo \dot{D}_n in \dot{D}_γ ter njuno razmerje $\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_n}$ brez ščita ter z uporabo ščita iz različnih materialov: vrednosti pri materialih, katerih ščit da največje razmerje $\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_n}$ so podčrtani. Srebro (Ag) in gadolinij (Gd) sta najboljša kandidata za ščitenje. V delu 4 bo razvidno, da se srebro močno aktivira, ter je dolgo časa aktiven. Gadolinij se aktivira manj in je tudi manj časa aktiven, zato je s stališča jedrskih odpadkov in varstva pred sevanji kot ščit mnogo primernejši.

Tabela 4.3: Tabela vrednosti fluksa in doze nevtronov in γ žarkov na siliciju, z in brez ščita na polni moči reaktorja (250 kW).

	n fluks [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]	γ fluks [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]	\dot{D}_n [$\frac{\text{Gy}}{\text{h}}$]	\dot{D}_γ [$\frac{\text{Gy}}{\text{h}}$]	$\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_n}$
Brez ščita	$5,37 \times 10^8$	$4,35 \times 10^8$	$4,35 \times 10^{-2}$	8,24	$1,90 \times 10^2$
S ščitom	$8,15 \times 10^5$	$5,58 \times 10^8$	$4,88 \times 10^{-4}$	9,30	$1,91 \times 10^4$

4.5 Obsevanje s promptnimi žarki γ v suhi celici reaktorja TRIGA

Poleg tega da izberemo material z visokim presekom za zajetje nevtrona σ_c , pa je le ta odvisen od energije. Želeli bi si, da ima čim več vpadnih nevtronov energijo, pri kateri je σ_c največji. Izkazuje se, da so preseki za to reakcijo navadno največji pri najnižjih energijah vpadnih nevtronov. Ker pa imajo vpadni nevtroni vse mogoče energije, jih lahko z uporabo sipalca nevtronov termaliziramo oziroma jim znižamo kinetično energijo. Materiali, ki sipajo nevtrone, so navadno sestavljeni iz materialov z majhnim vrstnim številom, kar pa je ugodno za prehod žarkov γ , saj je tak material zanje skoraj prozoren.

V začetnih simulacijah sem si zamislil ploščinski izvor nevtronov, katerih energijski spekter ustreza tem na koncu termalizirajoče kolone (Ambrožič, Žerovnik & Snoj, b.d.). Za izvor sem postavil 20 cm debelo ploščo, ki je homogena mešanica polietilena, ki je v tem primeru sipalec nevtronov, ter Gd kot atenuator in sekundarni material, katerega energijska odvisnost za preseka za zajetje ima vrh drugje kot Gd. Pri tem sem za merilo koncentracije uporabil nadomestno debelino atenuacijskega materiala (kakršna bi bila skupna debelina materialne plošče, če bi imeli ščit sestavljen iz tankih plošč posameznega materiala), ostalo pa je polietilen. Za ščitom imamo ploščo iz silicija, na kateri opazujemo hitrost doze.

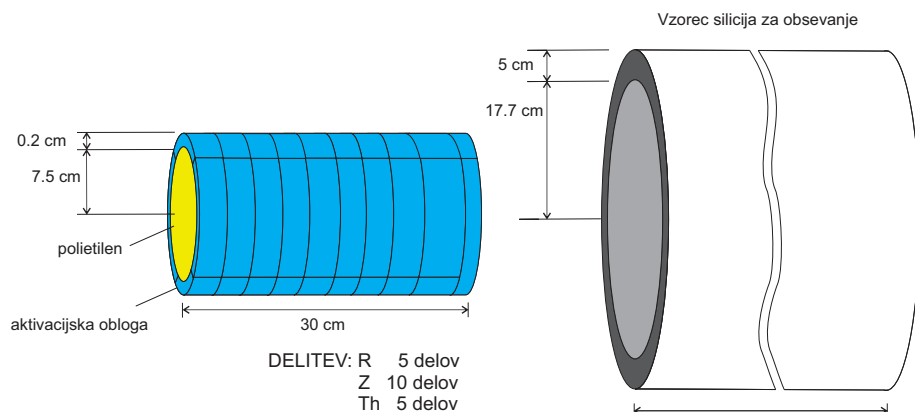
Izkazuje se, da sekundarni atenuator ne prispeva k izboljšanju razmerja $\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_n}$, saj sam Gd absorbira praktično vse nevtrone, katere bi lahko absorbirali drugi materiali. Nadomestna debelina Gd, pri kateri je razmerje $\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_n}$ največje, je 0,5 mm.

Sedaj lahko simuliramo celoten model reaktorja TRIGA, kjer na koncu termalizirajoče kolone postavimo ščit, v katerem je nadomestna debelina Gd 0,5 mm, ostalo pa je polietilen. Debelina ščita je še vedno 20 cm. V tabeli 4.3 lahko primerjamo vrednosti brez ščita in s ščitom. Opazimo lahko, da se razmerje $\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_n}$ močno poveča, predvsem na račun atenuacije nevtronov (skoraj dva velikostna reda), nekaj malega (15 %) pa na račun dodatne produkcije promptnih žarkov γ v ščitu.

4.6 Obsevanje z zakasnelimi žarki γ

Zakasneli žarki γ nastajajo pri razpadih γ , ki sledijo kakemu drugemu razpadu, bodisi β , α , cepitvi ipd. Torej lahko nek material aktiviramo z nevtroni, da postane radioaktiven in razpada ter seva žarke γ . Tak vir oddaja žarke γ , tudi ko ni več izpostavljen nevtronom, torej ga lahko odstranimo iz nevtronskega polja. Za izračun sem uporabil metodo R2S (Davis, 2010): aktivni del sem razdelil na 250 delov, v vsakem izračunal spekter in totalni fluks nevtronov ter gledal časovni razvoj aktivnosti in spektra emitiranih žarkov γ , nato pa vse dele združil in izračunal \dot{D}_γ na vzorcu.

Najprej si pogledjmo simulacijo aktivacije materiala, če ga z nevtroni obsevamo v hori-



Slika 4.2: Shema poteka simulacije obsevanja z zakasnelimi žarki γ , po aktivaciji v horizontalnih obsevalnih kanalih reaktorja TRIGA.

zontalnih kanalih. Po obsevanju lahko tak material izvlečemo iz obsevalnega kanala ter obsevamo kos silicija. Sevalec je sestavljen iz aktivnega cilindričnega plašča, debeline 2 mm, notranjost pa iz polietilena, da termaliziramo kar največ nevtronov, ki jih lahko aktivni material zajame. Shemo poteka simulacije si lahko pogledamo na sliki 4.2. Sedaj si na sliki 4.3 pogledajmo še aktivnosti in hitrosti doze na silicijevem vzorcu, po 10 h obsevanju v horizontalnih kanalih. Vidimo, da se najbolj aktivirata kobalt (Co) in indij (In), vendar kobalt hitro razpade, zato se zdi bolj primerna izbira.

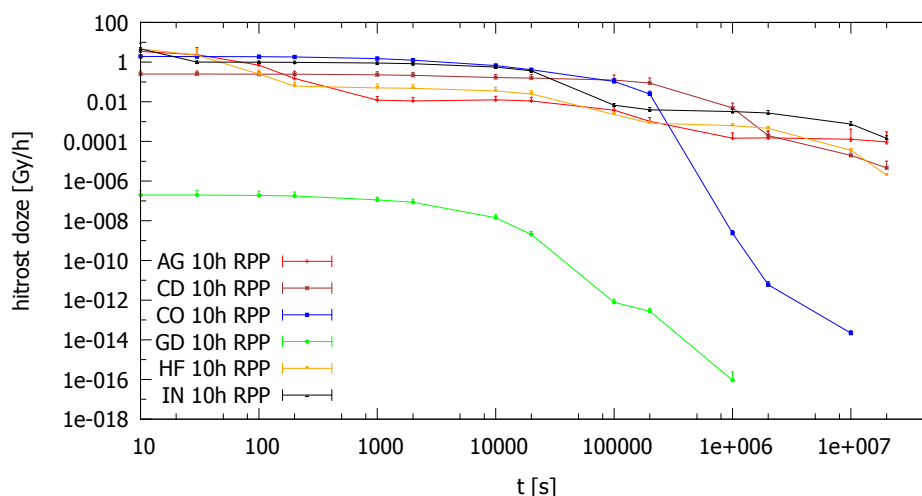
Aktiviranega materiala pa ne dobimo samo pri nevtronski aktivaciji, ampak nastaja tudi v jedrskem gorivu pri jedrskih cepitvah. Poleg tega se aktivirajo tudi težki elementi v gorivu, ki postanejo zelo dolgoživi sevalci. Pri večjih izgorelostih bo torej njihov prispevek večji.

Z metodo R2S sem simuliral standardna gorivna elementa v dveh radialnih pozicijah, B2 in E5, po 20 h obsevanju ter pri izgorelostih 1 MW d in 10 MW d, ki sem ju izračunal iz moči na posameznem gorivnem elementu (Snoj & Ravnik, 2008). Na sliki 4.4 si pogledajmo časovni potek aktivnosti gorivnih elementov. Opazimo lahko, da je aktivnost po približno osmih mesecih (približno 2×10^7 s) pri izgorelosti 10 MW d približno za velikostni red večja kot pri izgorelosti 1 MW d ter za dva velikostna reda večja od aktivnosti po 20 h obsevanju goriva. Ta razlika pride od aktivacije težkih jeder, ki tvorijo dolgožive radioizotope. Podobno velja tudi za hitrost doze.

4.7 Povzetek rezultatov

Sedaj lahko povzamemo in komentiramo vse rezultate.

- Pri obsevanju s promptnimi žarki γ se ne moremo popolnoma znebiti nevtronov, lahko pa jih poskušamo odfiltrirati z nevtronskimi filtri. V primeru horizontalnih obsevalnih kanalov je nevtronski ščit le posodica iz materiala z visokim σ_c . Ti obsevalni kanali imajo radij 7,7 cm, tako da lahko v njih obsevamo le dovolj majhne vzorce. Hitrosti nevtronske doze v teh kanalih so $\dot{D}_n = 10^1 \rightarrow 10^2 \frac{\text{Gy}}{\text{h}}$, hitrosti doze



Slika 4.3: Hitrost doze na vzoru silicija v odvisnosti od časa po 10 h aktivaciji v RPP na polni moči reaktorja (250 kW). Črte kažejo razpon hitrosti doze na vzorcu. V TanC so primerljive z rezultati za RPP, v RBP pa so vrednosti približno dva velikostna reda manjše.

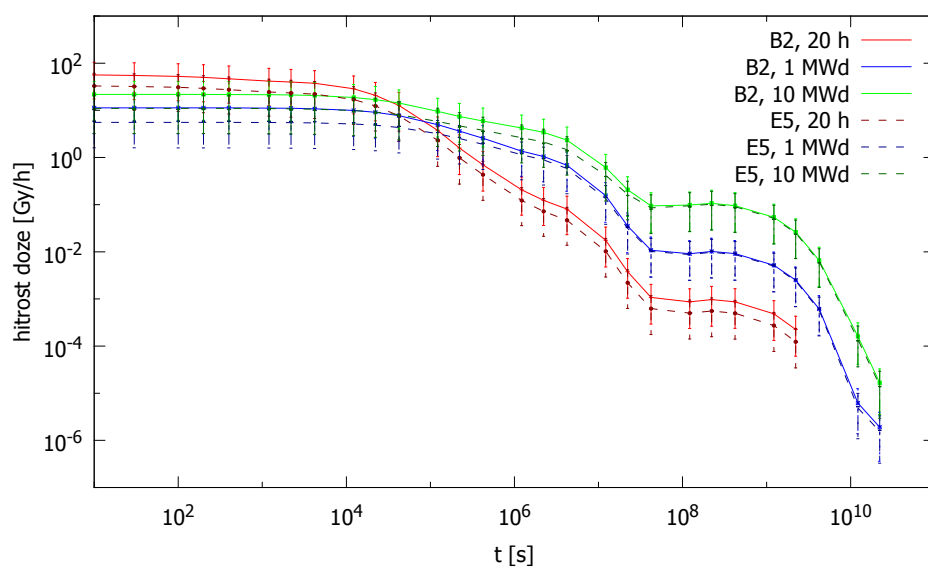
žarkov γ so $\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_n} = 10^2 \rightarrow 4 \cdot 10^2 \frac{\text{Gy}}{\text{h}}$, razmerje $\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_n}$ pa je $10^2 \rightarrow 4 \times 10^2 \frac{\text{Gy}}{\text{h}}$.

- Če pri obsevanju v suhi celici uporabimo nevtronski ščit, ki je kombinacija atenuatorja in sipalca nevtronov, se razmerje $\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_n}$ poveča za dva velikostna reda in je izjemno visoko v korist žarkov γ . Poleg tega je suha celica precej velik obsevalni prostor. Sam gadolinij v ščitu se zelo počasi in zelo malo aktivira, tko da nimamo težav z razgradnjo po uporabi. Hitrost nevtronske doze $\dot{D}_n \approx 500 \frac{\mu\text{Gy}}{\text{h}}$, hitrost doze žarkov γ pa $\dot{D}_\gamma \approx 10 \frac{\text{Gy}}{\text{h}}$ medtem ko je razmerje hitrosti doz $\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_n} \approx 2 \times 10^4$.
- Pri obsevanju z zakasnelimi žarki γ nimamo težav. Tudi velikosti vzorcev so poljubne, saj sevalec lahko prestavljamo. Pri 20 h aktivaciji materialov v horizontalnih obsevalnih kanalih dosežemo hitrost doze na vzorcu do $10 \frac{\text{Gy}}{\text{h}}$, pri obsevanju z izrabljenim gorivom pa okrog $100 \frac{\text{Gy}}{\text{h}}$. Pri tem upoštevamo še, da smo izrabljeno jedrsko gorivo, ki je jedrski odpadke, koristno uporabili. Če je njegova izgorelost visoka, je uporaben precej časa.

...

Literatura

- Ambrožič, K., Žerovnik, G. & Snoj, L. (b.d.). *Computational analysis of the dose rates at JSI TRIGA reactor irradiation facilities*. Delovno poročilo IJS-DP-11677.
- Davis, A. (2010). *Radiation shielding of fusion systems* (Doktorska disertacija, The University of Birmingham).
- Goorley, J. T., James, M. R., Booth, T. E., Brown, F. B., Bull, J. S., Cox, L. J., ... Zukaitis, A. (2013). *MCNP6 user's manual*. Manual Rev. 0. Ver. 1.0.
- Snoj, L. & Ravnik, M. (2008). Power peakings in mixed TRIGA cores. *Nuclear Engineering and Design*, 238, 2473–2479.



Slika 4.4: Časovni potek hitrosti doze na siliciju za pozicije gorivnega elementa B2 in E5 pri različnih obsevanjih.

Sublet, J.-C. C., Eastwood, J. W. & Morgan, J. G. (b.d.). *The FISPACT-II user manual*. Issue 3.