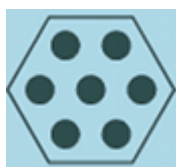


Výpočet indukovanej aktivity tieniacej kazety reaktora VVER-440/V230 na konci prvej kampane po zavedení do reaktora

Bouhaddane Amine · Elektrotechnika

04.01.2013



Príspevok sa zaoberá výpočtom indukovanej aktivity konkrétneho komponentu reaktora – tieniacej kazety. Prvá časť sa venuje popisu reaktora VVER-440/V230 a JE V1 v Jaslovských Bohuniciach, pre ktorú bol výpočet uskutočnený. Nachádza sa tu kapitola venujúca sa stručnej prevádzkovej histórii, ktorá je dôležitá z hľadiska zdrojového člena pre výpočet indukovanej aktivity. Druhá časť je venovaná popisu samotných tieniacich kaziet a dôvodom ich inštalácie do reaktora.

Za účelom výpočtu bol použitý transportný kód MCNP5. Výpočtová časť práce sa zaoberá stanovením mernej hmotnostnej aktivity rádionuklidov vznikajúcich počas aktivácie konštrukčnej ocele 08Ch18N10T. Za účelom výpočtu boli spracované geometrické výkresové dokumentácie a prevádzkové charakteristiky 1. bloku JE EBO. Výsledky boli analyzované a vyhodnotené na základe dostupných publikovaných výpočtov a odborných odhadov.

1. Úvod

Rastúca spotreba elektrickej energie spolu s ekologickými trendmi vo svete si vyžadujú zavedenie vyváženého energetického mixu, do ktorého je rozumné započítať aj energiu pochádzajúcu z jadra. Jadrová energetika je spoľahlivým zdrojom pomerne lacnej elektrickej energie, ktorý neprodukuje významné množstvá emisií oxidu uhličitého. V súčasnosti dochádza k zvyšovaniu už tak prísnych nárokov na bezpečnosť jadrových elektrární. Súčasťou tejto bezpečnosti je aj vhodná stratégia záverečnej časti mierového využívania jadrovej energie. Nakladanie s rádioaktívnymi odpadmi je jednou z najdiskutovanejších tém súčasnosti, s ktorou sa spája aj tento príspevok.

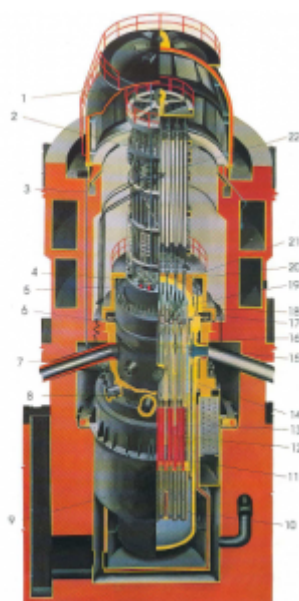
V súčasnosti sú na Slovensku vo fáze vyradovania jadrové elektrárne A1 a V1, obidve v lokalite Jaslovské Bohunice. Vyradovacie práce na jadrovej elektrárni A1 sú netypické kvôli havárii v primárnom okruhu v roku 1977. Tento príspevok je venovaný metodike výpočtu indukovanej aktivity tieniacich kaziet reaktora V-230 používaného v JE V1. Uvedený výpočet je dôležitou súčasťou vyradovania JE V1. Posúdenie indukovanej aktivity tieniacich kaziet reaktora V-230 je dôležité z hľadiska možnosti manipulácie s nimi ako s rádioaktívnym odpadom počas vyradovania JE V1.

2. Jadrová elektrárň V1 v Jaslovských Bohuniciach

Jadrová elektrárň V1 je elektrárň s dvoma tlakovodnými reaktormi moderovanými vodou (VVER, typ V230 - Obr. 1). Investičný zámer vznikol v roku 1969. O rok neskôr v januári bola zvolená lokalita a podpísaná dohoda o dodaní dvoch jadrových blokov VVER-440/V230. Nasledovne sa v marci 1973 začala výstavba dvoch blokov JE v Jaslovských Bohuniciach. Skúšobná prevádzka 1. bloku prebiehala medzi 1. aprílom 1979 a 30. januárom 1980 a 2. bloku od 1. júna 1980 do 30. novembra 1980. Po ukončení skúšobných prevádzok boli vydané kolaudačné rozhodnutia (1. blok - 30.6.1981, 2. blok - 7.10.1981). V rokoch 1991 až 1994 prebiehala tzv. malá rekonštrukcia počas plánovaných odstávok.

Vláda ČSFR prijala uznesenie č. 21/1991 k záverečnej správe o komplexnom hodnotení bezpečnosti elektrárne a dôsledkoch jej prípadného odstavenia požadujúce vypracovať projektovú štúdiu vyradovania. Tak bola v rokoch 1991 až 1992 uskutočnená projektová štúdiu vyradovania a v nadväznosti analýza ďalších variantov vyradovania. V roku 1994 prijala vláda SR uznesenie č. 466/1994 o tzv. postupnej rekonštrukcii a o zabezpečení odstavenia elektrárne po spustení EMO 1, 2, najneskôr v roku 2000. Rozhodnutia ÚJD SR umožnili prevádzku i po roku 1995 za podmienky postupnej rekonštrukcie.

Nová vláda zvolená v roku 1998 prijala uznesenie č. 302/1999 a uznesenie č. 801/1999 o odstavení I. bloku v roku 2006 a II. bloku v roku 2008. V rokoch 2000 až 2006 boli prijaté ďalšie uznesenia vlády týkajúce sa vyradovania JE V1, zriadenia a fungovania BIDSF na financovanie prípravných prác na vyradovaní. Od roku 2003 sa realizovali prípravné práce smerujúce k vyradovaniu elektrárne. V dôsledku privatizácie SE, a. s. sa prevádzkovateľom JE V1 od roku 2006 stala štátna akciová spoločnosť JAVYS, a. s.. 31. decembra 2006 bol definitívne odstavený 1. blok a 31. decembra 2008 aj 2. blok [1].

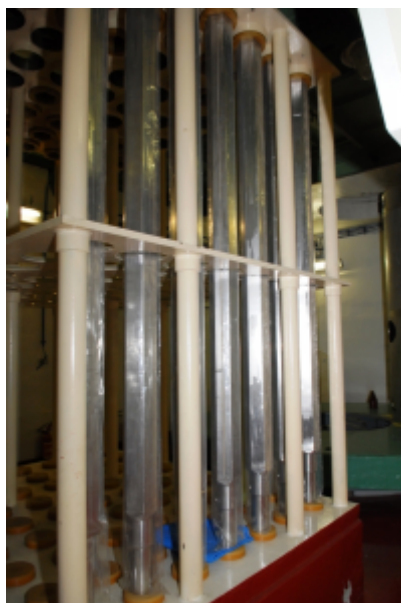


Obr. 1: Reaktor typu VVER-440/V230. 1 - ochranný príklop, 2 - horný blok, 3 - kanál ionizačnej komory, 4 - kanály vnútroreaktorového merania hustoty toku neutrónov, 5 - kanály merania teploty, 6 - membránový ventil, 7 - teleso reaktora, 8 - hlavné cirkulačné potrubia, 9 - nádrž vodnej biologickej ochrany, 10 - dno šachty, 11 - kôš

aktívnej zóny, 12 - palivové kazety, 13 - palivová časť HRK, 14 - absorpčná časť HRK, 15 - medzityč, 16 - blok ochranných rúr, 17 - tesniaci prstenec, 18 - prítlačný prstenec, 19 - kanály merania teploty, 20 - tepelná izolácia, 21 - hrebeňová tyč, 22 - pohony HRK [2].

3. Charakteristika tieniacich kaziet

Tieniace kazety (Obr. 2) boli do JE V1 nainštalované za účelom ochrany tlakovej nádoby reaktora voči znižovaniu odolnosti proti krehkému lomu. Ich zavedenie do reaktora zvýšilo absorpciu neutrónov a tým sa znížila hustota toku neutrónov na tlakovú nádobu reaktora. Vonkajší tvar tieniacich kaziet je rovnaký ako u palivových článkov, avšak neobsahujú palivo. Tridsaťšesť takýchto kaziet bolo umiestnených na okraji aktívnej zóny (AZ).



Obr. 2: Tieniace kazety [3].

Priebeh inštalácie:

- na 1. bloku v roku 1992 v počte 36 kusov a nepredpokladala sa ich výmena do odstavenia bloku JE V1 v roku 2006,
- na 2. bloku v roku 1985 v počte 36 kusov a nepredpokladal sa ich výmena do odstavenia bloku JE V1 v roku 2008. Pri hmotnosti jednej tieniacej kazety 290 kg bude ich celková hmotnosť $72 \times 290 \text{ kg} = 20,88 \text{ t}$.

S tieniacimi kazetami nebolo manipulované (neboli vymieňané, vyberané ani otáčané) počas celej doby ich pobytu v reaktore. Tieniace kazety majú hexagonálny prierez. Vonkajšie ocelové plášte obklopujú vložku pozostávajúcu zo 7 pevných ocelových tyčí. Vnútorne usporiadanie tyčí imituje hydraulický odpor palivových kaziet. Tieniace kazety sú vyrobené z austenitickej ocele. Sú významne aktivované po celej ich dĺžke.

- Celková hmotnosť 1 kazety: 290 kg.
- Maximálne rozmery: výška: 3 216 mm, rozmer kľúča 144 mm.
- Materiál: zodpovedá austenitickej oceli typu 08Ch18N10T [4].

4. Výpočet indukovanej aktivity tieniacej kazety

4.1. Predpoklady na základe výpočtov pre JE Loviisa

Kompletné údaje o reaktore, vnútroreaktorových častiach a vonkajších tieneniach boli vytvorené a prevzaté z Koncepčného plánu vyradovania JE V1 z prevádzky (2006) a doplnené skúsenosťami z vyradovania JE Greifswald. Údaje o hmotnostnej indukovanej aktivite jednotlivých komponentov reaktora vychádzajú z výpočtov aktivácie komponentov reaktorov VVER-440 v JE Loviisa vo Fínsku, pretože výpočty aktivácie pre JE V1 v roku 2006 neexistovali.

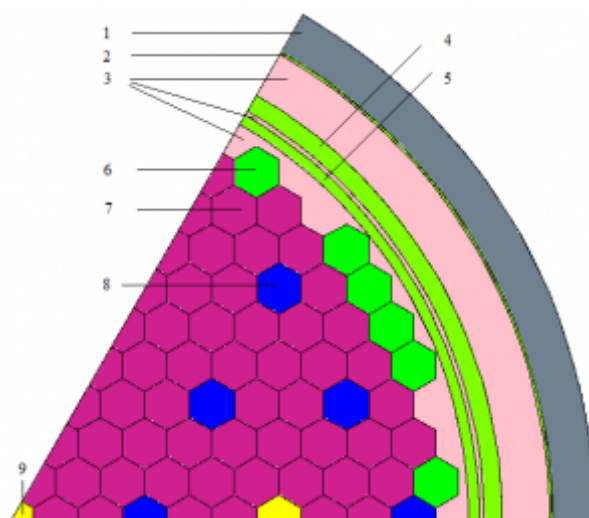
Pre úroveň kontaminácie vnútroreaktorových častí bola zvolená konzervatívne hodnota vnútornej kontaminácie primárneho okruhu $3,00 \cdot 10^8 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ a vo výpočtoch indukovanej aktivity sa uvažovalo s 30 ročnou prevádzkou reaktora, čo je mierne konzervatívnejší predpoklad oproti skutočnosti (28 rokov). Pre tieniace kazety bola v čase konečného odstavenia a odstránenia médií vypočítaná predpokladaná hodnota indukovanej aktivity $1,33 \cdot 10^{13} \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ [2], [4].

4.2. Zjednodušený model AZ reaktora VVER-440/V230 v MCNP5

Výpočtový kód MCNP5 umožňuje precízne trojrozmerné modelovanie aktívnej zóny a vnútorných konštrukčných častí reaktora. Vytvorený zjednodušený model reaktora VVER-440/V230, ktorý je možné použiť aj pre ďalšie výpočty. Výpočtový model bol vytvorený na základe technickej dokumentácie z 1. a 2. bloku EBO.

4.2.1. Popis geometrického modelu

Vytvoril som zjednodušený model reaktora VVER-440/V230 pozostávajúci z aktívnej zóny a vnútorných konštrukčných častí. Ide o šestinový model využívajúci symetrickú geometriu reaktora tohto typu (Obr. 3). Požadovaný rozsah práce viedol k zjednodušeniam pri tvorbe modelu. Jeho súčasťou sú modely tieniacej kazety, palivovej kazety predchádzajúcich dodávok (PK-PD), kazety automatickej ochrany, regulovania a kompenzácie predchádzajúcich dodávok (ARK-PD) a vnútorných konštrukčných častí (kôš aktívnej zóny, šachta reaktora, austenitický a silový návar TNR a základný materiál TNR). Zachované boli základné konštrukčné prvky [5].



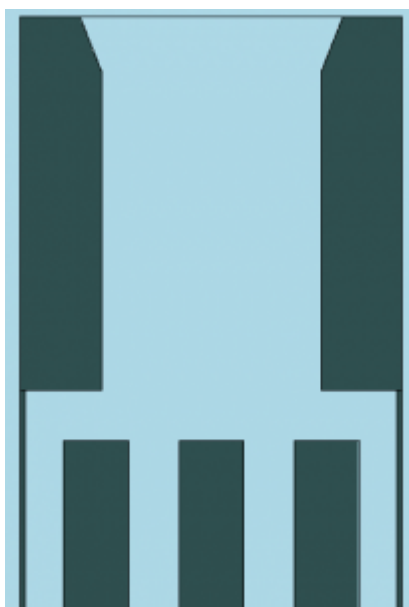
Obr. 3: Horizontálny rez MCNP5 modelom šestiny aktívnej zóny. 1 - TNR, 2 - austenitický a silový návar výstelky TNR, 3 - chladiivo, 4 - šachta reaktora, 5 - kôš

aktívnej zóny, 6 - tieniaca kazeta, 7 - palivová kazeta, 8 - ARK, 9 - ARK 6. skupiny [5].

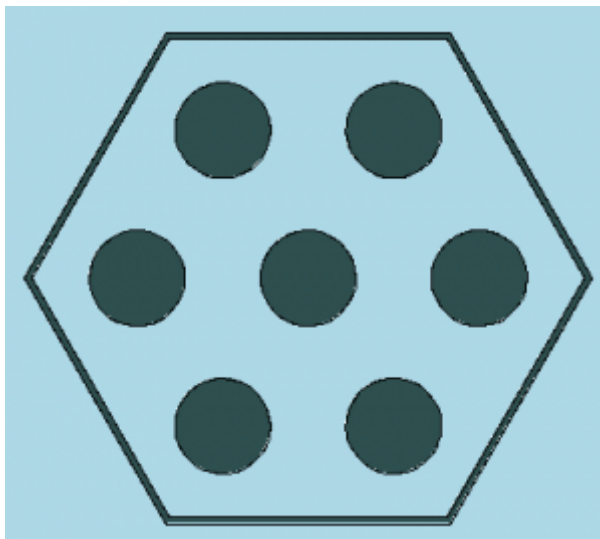
4.2.2. Model tieniacej kazety

Geometrický model tieniacej kazety (TK) je tvorený siedmimi oceľovými tyčami, obalovou rúrou, pätkou a hlavicom. Oceľové tyče sú použité za účelom zachovania podobného hydraulického pomeru ako pri palivových kazetách. Tieniaca kazeta neobsahuje žiadne palivové časti. V modeli sú vykonané určité zjednodušenia, najmä v oblasti pätky a hlavice, ktoré však nemajú vážny vplyv na výsledok výpočtu. Hlavica kazety je na šesťhrannom povrchu pevne spojená s obalovou rúrou (vynechanie kolíkov pre prepravný záves zavážacieho stroja). Rozmer „pod kľúč“ je 144 mm. Geometrické charakteristiky modelovanej tieniacej kazety sú uvedené v Tab. 1 [5].

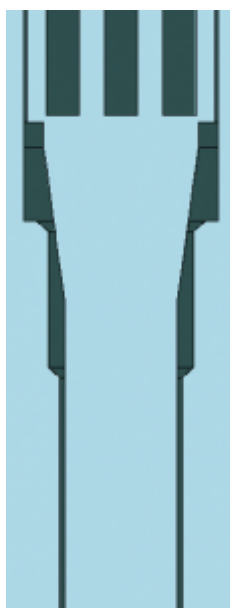
Charakteristiky/parameter kazety	Rozmer [mm]
Rozmer obalovej rúry „pod kľúč“	144
Hrúbka obalovej rúry	2
Priemer oceľovej tyče	28
Výška oceľovej tyče	2586



Obr. 4: Zvislý rez v mieste hlavice TK.



Obr. 5: Horizontálny rez TK.



Obr. 6: Zvislý rez pätkou TK.

4.2.3. Popis materiálového modelu

Prevádzkyschopnosť a spoľahlivosť konštrukcie kaziet, palivových prútikov, absorpčných materiálov pri namáhaniach a vplyvoch v podmienkach reaktorového zariadenia je tiež zabezpečovaná výberom konštrukčných materiálov, paliva a absorbátora. Materiálový model špecifikuje chemické zloženie paliva, chladiva, konštrukčných a absorpčných materiálov. Zároveň definuje účinnno-prierezne knižnice materiálov a zodpovedajúce pracovné teploty prostredí. V konštrukcii pracovnej kazety, tieniacich kaziet, palivovej časti a nadstavca kazety ARK a vnútorných častí reaktora (kôš aktívnej zóny, šachta reaktora) je použitá nehrdzavejúca austenitická chrómniklová oceľ 08Ch18N10T.

Uvedený materiál sa vyznačuje koróznou a radiačnou odolnosťou a veľmi dobrými technologickými vlastnosťami. Všetky modelované časti kompletu spojovacej tyče sú z materiálu 08Ch18N10T. Materiálom valcového telesa tlakovej nádoby reaktora je chróm-molybdén-vanádová oceľ s označením 15Ch2MFA. Na zabezpečenie korózne odolnosti materiálu TNR v prostredí chladiva a zníženie expozície od aktivovaných

korózných produktov v primárnom okruhu je na vnútornom povrchu, kde dochádza k styku s chladivom, realizovaný austenitický návar z materiálu 08Ch18N10T. Ďalej nasleduje vrstva tzv. silového návaru z materiálu Sv07Ch25N13 [5].

5. Výpočet

5.1. Konfigurácia paliva v aktívnej zóne

Palivo tvoril obohatený urán vo forme UO_2 . Rozmery aktívnej zóny sú: priemer 2880 mm a výška 2500 mm. Obsahovala 312 palivových článkov a 37 regulačných kaziet. V každom palivovom článku sa nachádza 126 palivových prútikov o priemere 9,1 mm, v ktorých sú uložené valčekovité tabletky UO_2 (\varnothing 7,57 mm). Usporiadanie palivových prútikov v palivovom článku bolo v trojuholníkovej mreži s krokom 12,2 mm.

Výpočet bol vykonaný pre prvú kampaň po vložení tieniacich kaziet do reaktora, t.j. pre kampaň č. 13. Pre časovú náročnosť výpočtu som uvažoval zjednodušenie v podobe zavedenia stredného vyhorenia $\overline{B_{str}}$ pre všetky palivové články (16000 MWd/ t_{TK} na kampaň). Toto som vypočítal z údajov uvedených vo Vyhodnotení prevádzkových charakteristík AZ reaktora VVER-440 1. bloku v 13. kampani [6]. Po vytvorení a otestovaní zjednodušeného modelu aktívnej zóny reaktora VVER-440/V230 bol prvým krokom výpočet kritickej koncentrácie kyseliny boritej c_B . Stanovenie c_B bolo vykonané iteračnou metódou. Nasledoval výpočet výťažkov jadrových reakcií v cieľových bunkách tvoriacich tieniace kazety, zadaných vo vstupnom súbore [5].

5.2. Výber rádionuklidov

Rádionuklidy, ktoré treba brať do úvahy sú limitované zložením materiálov. Niektoré z nich môžu byť pre výpočet aktivácie zanedbané z dôvodu ich neutrónovo-fyzikálnych vlastností, ako sú nízka rýchlosť aktivácie alebo krátky polčas rozpadu. Po odstavení reaktora sa inventár rádionuklidov vyprodukovaných aktiváciou znižuje rádioaktívnym rozpadom. A tak rádionuklidy so stredným a dlhým polčasom rozpadu sú významné a dôležité pre proces vyradovania.

- Rádionuklidy Co-60, Fe-55, Ni-63, ako príklady, sa musia uvažovať.
- Množstvá povrchovej kontaminácie rádioaktívnymi štiepnymi produktmi a transuránovými prvkami z dôvodu stôp štiepných izotopov v materiáli a taktiež uvoľnených z defektov paliva sa odhadujú z meraní.

5.3. Výpočet výťažkov jadrových reakcií

Vo svojej práci som sledoval výťažky reakcií pre izotopy chrómu (50, 52, 53 a 54), mangánu (55), železa (54,56,57,58), kobaltu (59), niklu (58, 60, 61, 62, 64) a molybdénu (92, 94, 95, 96, 97, 98 a 100). Práve tieto nuklidy obsiahnuté v konštrukčnej oceli 08Ch18N10T sa najväčšou mierou podieľajú na vzniku hlavných aktivačných produktov, ktorými sú pre ocele: Fe-55, Ni-59, Co-60, Ni-63, Mo-93, Nb-94 a Ag-108m [7]. Zvolil som výťažky tých reakcií, ktoré sú pri energiách neutrónov v tlakovodnom reaktore najpravdepodobnejšie, akými sú: (n, γ), (n,p), (n,d), (n,t) a (n, α), naopak výpočet nezahrňa reakcie napr.: (n,2n) alebo (n,n'p). Absolútne údaje o výťažkoch jednotlivých reakcií dostaneme pre násobenie vypočítaných hodnôt produkciou neutrónov (pre daný reaktor: $1,871 \cdot 10^{19} \text{ s}^{-1}$ [5]).

Za najpravdepodobnejšiu jadrovou reakciou neutrónov, vzhľadom na ich energiu, v konštrukčných materiáloch reaktora bola zvolená reakcia (n,γ). S odstupom jedného (pri ⁵⁴Fe) až šiestich (pri ⁶²Ni resp. ¹⁰⁰Mo) rádov nasledujú reakcie (n,p) a (n,α). Z vypočítaných hodnôt boli najnižšie výťažky pre reakcie (n,d) a (n,t) [5].

5.4. Výpočet mernej aktivity

Na základe hodnôt výťažkov reakcií získaných prostredníctvom kódu MCNP5 je možné výpočtom určiť hodnoty merných aktivít jednotlivých rádionuklidov ako aj sumárnu mernú (objemovú alebo hmotnostnú) aktivitu celého komponentu (tieniacej kazety) v stanovenom čase počas alebo po ožiarení. Pre aktiváciu platí rovnica:

$$A_i = (1 - e^{-\lambda\tau}) \cdot R \quad (1)$$

alebo pri dosadení doby polpremeny $T_{1/2}$ do konštanty premeny λ [s^{-1}]:

$$A_i = \left(1 - e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}}\tau}\right) \cdot R \quad (2)$$

kde R (angl. reaction rate) predstavuje výťažok reakcie [počet reakcií/cm³] a τ je doba aktivácie [s]. Pokles aktivity je vyjadrený rozpadovým zákonom:

$$A'_i = A_i \cdot e^{-\lambda \cdot t} \cdot R \quad (3)$$

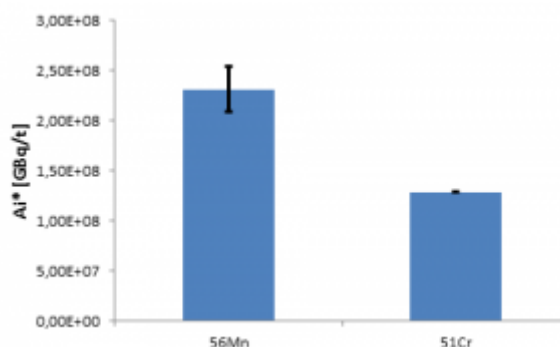
pričom t je doba počas ktorej sa i-ty rádionuklid rozpadá. V Tab. 2 sú uvedené merné hmotnostné aktivity vybraných rádionuklidov vzniknutých počas prvej kampane inštalácie tieniacich kaziet do 1. bloku JE V1. Celkovo išlo o trinástu kampaň tohto reaktora, ktorá trvala 268,1 efektívnych dní.

Tab. 2: Merné aktivity vybraných rádionuklidov (σ - smerodajná odchýlka).

Rádionuklid	$T_{1/2}$, typ žiarenia	A_i^* [GBq/t]	σ [GBq/t]
⁵⁶ Mn	2.5785 h, β^-	2,31E+08	2,27E+07
⁵¹ Cr	27.7025 d, EC	1,29E+08	1,39E+05
⁵⁵ Fe	2.73 r, EC	1,63E+07	2,63E+04
⁵⁸ Co	70.86 d, EC, β^+	4,10E+06	4,05E+05
⁵⁹ Fe	44.503 d, β^-	2,69E+06	1,81E+04
⁵⁵ Cr	3.497 min, β^-	1,74E+06	4,25E+04
⁵⁴ Mn	312.3 d, EC, β^-	1,73E+06	2,51E+02
⁶⁵ Ni	2.5172 h, β^-	1,67E+06	1,00E+03
⁶⁰ Co	5.2714 r, β^-	1,36E+06	1,94E+05
⁶³ Ni	100.1 r, β^-	2,97E+05	1,78E+02
⁵² V	3.743 min, β^-	2,35E+05	3,74E+03
⁵⁷ Mn	85.4 s, β^-	1,49E+04	7,00E+01
⁵³ V	1.16 min, β^-	9,54E+03	4,71E+00

⁶¹ Co	1.560 h, β-	4,13E+03	2,89E+02
⁵⁹ Ni	7.6E04 r, EC	2,24E+03	1,34E+00
⁹⁵ Nb	34.975 d, β-	9,73E+02	7,08E+01
⁵⁷ Co	271.79 d, EC	6,48E+02	1,50E+01
⁶² Co	1.50 min, β-	2,36E+02	3,28E+01
⁹⁶ Nb	23.35 h, β-	1,61E+02	1,93E+00
⁹³ Mo	4.0E03 r	1,56E+02	9,39E-02
⁵⁸ Mn	3.0 s, β-	6,50E+01	1,05E+00
⁵⁴ V	49.8 s, β-	6,12E+01	1,18E+00
⁵¹ Ti	5.76 min, β-	5,33E+01	1,03E+00
⁹⁷ Nb	72.1 min, β-	3,58E+01	3,08E-01
⁸⁹ Zr	78.41 h, EC, β+	2,80E+01	5,45E-01
⁴⁹ V	330 d, EC	1,49E+01	5,12E-01
⁶⁴ Co	0.30 s, β-	4,90E+00	8,42E-02
⁹⁸ Nb	2.86 s, β-	4,50E+00	9,91E-02
⁵⁶ Co	77.27 d, EC, β+	1,41E+00	1,65E-01
⁵² Mn	5.591 d, EC	8,65E-01	7,94E-02
¹⁰⁰ Nb	1.5 s, β-	5,49E-01	2,01E-02
⁴⁸ V	330 d, EC	1,55E-01	2,72E-02
⁹⁴ Nb	2.03E04 r, β-	9,32E-03	5,32E-04
⁹⁰ Nb	14.60 h, EC, β+	7,52E-03	6,03E-04
⁹¹ Nb	680 r, EC, β+	3,87E-03	1,49E-04
⁵³ Mn	3.74E06 r, EC	3,14E-05	8,33E-07
⁹² Nb	3.47E07 r, EC, β+	1,15E-05	1,29E-06
⁹³ Zr	1.53E06 r, β-	7,36E-06	1,24E-07
Sumárna merná aktivita:		3,901925E+08	2,268372E+07

Nakoľko zahrňal výpočet iba prvú kampaň po inštalácii tieniacich kaziet, má zmysel zaoberať sa podrobnejšie hlavne kratšie žijúcimi rádionuklidmi, ktoré dosiahli počas doby ožarovania stav nasýtenia, čiže pri ktorých sa trvanie ožarovania aspoň priblížilo desiatim dobám polpremeny.



Obr. 7: Merná hmotnostná aktivita rádionuklidov ⁵⁶Mn a ⁵¹Cr.

Najvyššiu mernú aktivitu ($A_{Mn56^*} = (2,311730E+08 \pm 2,267878E+07)$ GBq/t) dosiahol ^{56}Mn , ktorý však z hľadiska vyradovania nie je významný kvôli veľmi krátkej dobe polpremeny 2,5785 h. Druhým v poradí je ^{51}Cr s dobou polpremeny 27,7025 dní. Je teda významný počas prvých mesiacov po odstavení reaktora. Tento rádionuklid vzniká najmä neutrónovým záchyтом na stabilnom izotope ^{50}Cr , ale aj reakciou (n, α) na ^{54}Fe avšak s o tri rády nižším výťažkom. Podlieha rádioaktívnej premene v podobe záchyту elektrónu a mení sa na stabilný ^{51}V .

Vypočítaná hodnota mernej aktivity $A_{Cr51^*} = (1,288886E+08 \pm 2,788286E+05)$ GBq/t sa bliži hodnote z fínskych výpočtov pre JE v Loviise z publikácie [8], v ktorej je pre strednú špecifickú aktivitu ^{51}Cr v tieniacich kazetách uvedená hodnota $1,95E+07$ GBq/t. Išlo o prvý komplexný výpočtový odhad inventáru rádionuklidov nachádzajúcich sa v RAO pri vyradovaní reaktora VVER-440. Bol uskutočnený v rokoch 1988 až 1989 vo výskumnom centre VTT energy (Nuclear Engineering Laboratory of the Technical Research Center of Finland) [8].

Počas nasledujúcich rokov boli vykonané ďalšie analýzy, vrátane merania materiálového zloženia. Výpočet rozloženia hustoty toku neutrónov a energetických spektier neutrónov v aktívnej zóne a v jej okolí bol uskutočnený pre JE Loviisa prostredníctvom programov ANISN (v AZ) a REPVICS. Tento systém bol pôvodne vyvinutý pre odhad fluencie rýchlych neutrónov v TNR reaktora v Loviise. Predpokladaný inventár rádionuklidov (Tab. 3) bol vypočítaný za pomoci kódu ORIGEN-S. Pre výpočet sa použili ako vstupné údaje rozloženie hustoty toku neutrónov a spektrá z jednorozmerného kódu ANISN [9]. Výpočty boli vykonané pre 30 ročnú prevádzku reaktora s originálnou záťažkou a s 80 percentným využitím elektrárne [10].

Tieniace kazety, vnútorné konštrukčné časti reaktora, TNR, tepelné a biologické tienenie, ktoré vzniknú z vyradovania 1. a 2. bloku ruskej JE Kola boli klasifikované ako vysokorádioaktívne odpady. Ich celková aktivita sa odhaduje na 47,7 TBq (výsledky pre rok 2010) pri hmotnosti 717 ton [11].

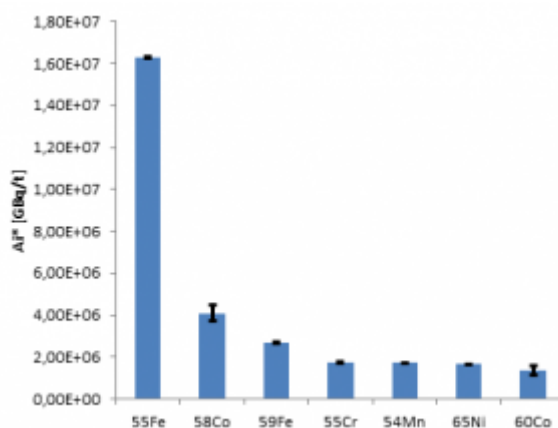
Tab. 3: Stredná merná aktivita vybraných rádionuklidov v TK reaktora JE Loviisa [8].

Tieniace kazety	Izotop	^3H	^{14}C	^{32}P	^{35}S	^{45}Ca
	[GBq/t]	6,15E-02	2,74E+02	4,55E+04	4,05E+02	3,09E+01
	Izotop	^{54}Mn	^{55}Fe	^{59}Fe	^{58}Co	^{60}Co
	[GBq/t]	1,55E+06	1,00E+07	4,68E+05	2,69E+06	1,53E+06
	Izotop	^{46}Sc	^{51}Cr	^{59}Ni	^{63}Ni	
	[GBq/t]	3,69E+03	1,95E+07	1,76E+03	2,50E+05	

Rádionuklidom s treťou najvyššou mernou aktivitou v mojom výpočte bol ^{55}Fe ($T_{1/2} = 2,73$ r) nasledovaný ^{58}Co ($T_{1/2} = 70,86$ d) s mernou hmotnostnou aktivitou rádovo 10^7 resp. 10^6 GBq/t. Tieto hodnoty sú opäť v dobrej zhode s údajmi v Tab. 3. ^{55}Fe je rádionuklid produkovaný najčastejšie reakciou $^{54}\text{Fe}(n, \gamma)^{55}\text{Fe}$ s účinným prierezom interakcie 2,25b ($2,25 \times 10^{-24}$ cm²). Rozpadá sa elektrónovým záchyтом (slabá emisia röntgenového žiarenia) na stabilný ^{55}Mn . ^{55}Fe je hlavným krátkožijúcim komponentom inventáru rádioaktivity po odstavení reaktora. Ide však o ťažko detekovateľný

rádionuklid, ktorého meranie sa môže prekrývať s ľahko namerateľným ^{60}Co . Je možné ho merať v laboratórnych podmienkach RTG spektrometriou po chemickej separácii [9].

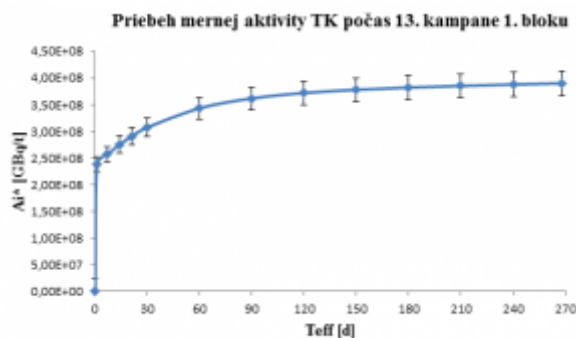
Z ďalších rádionuklidov sa vypočítané hodnoty približovali predpokladaným aj pre ^{59}Fe (44,503 d), ^{54}Mn (312,3 d), ^{60}Co (5,2714 r) a ^{63}Ni (100,1 r). ^{54}Mn je vytváraný prevažne reakciou $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$, ktorá má stredný účinný prierez v spektre štiepných neutrónov 53 mb ($5,3 \times 10^{-26} \text{ cm}^2$) a rozpadá sa prostredníctvom elektrónového záchytu a emisiou gama žiarenia o energii 835 keV. Rodičovským izotopom je ^{54}Fe (5,8% zastúpenie), ktorý je prítomný v ocelových konštrukčných materiáloch TNR, oporných palivových štruktúr a primárneho okruhu. Korózia ocelových komponentov môže viesť k prenosu železa do oblastí s vyšším podielom rýchlych neutrónov, kde sa tvorí ^{54}Mn reakciou (n,p). Kvôli pomerne krátkej dobe polpremeny môže byť ^{54}Mn významným len krátko po odstavení reaktora. Možno ho namerať pomocou γ -spektrometrie [9].



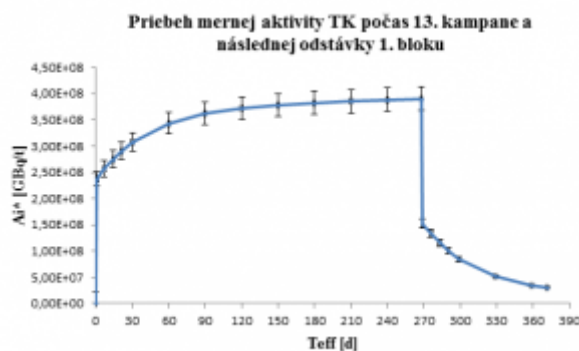
Obr. 8: Merná hmotnostná aktivita vybraných rádionuklidov.

^{60}Co vzniká najčastejšie reakciou $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$. Prírodné zastúpenie izotopu ^{59}Co je 100% a jeho účinný prierez interakcie je 18,7 b ($1,87 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$). ^{60}Co sa rozpadá emisiou β -žiarenia (maximálna energia 318 keV) na vzbudené hladiny ^{60}Ni a tvorí dve hlavné γ -žiarenia: 1,17 MeV a 1,33 MeV. Kobalt je stopovým prvkom v karbónových a v nehrdzavejúcich oceliach (s obsahom od 80 do 150, resp. 230 až 2600 ppm [12]). Je taktiež prítomný v Inconeli a Moneli. Tento izotop je dominantným rádionuklidom z hľadiska dávkového príkonu vo vnútorných konštrukčných častiach reaktora v rozsahu 10 až cca 50 rokov. Produkcia ^{60}Co je taká vysoká, že v oblastiach s vysokou hustotou toku neutrónov v priebehu celej prevádzky reaktora dôjde v blízkosti AZ k premene až jednej tretiny stabilného ^{59}Co . Detekcia je jednoduchá pomocou γ -spektrometrie [9].

Pri rádionuklidoch s dobou polpremeny dlhšou ako 30 dní, by však pre presnejšiu analýzu boli potrebné doplňujúce výpočty sledujúce ďalšie kampane počas pobytu tieniacich kaziet v aktívnej zóne reaktora. Po 13. kampani 1. bloku nasledovala odstávka s trvaním 103,45 dňa. Počas tejto odstávky sa znížila sumárna merná aktivita o jeden rád. Treba však povedať, že ide o idealizovaný odhad, nakoľko v skutočnosti nie je ani počas odstávky produkcia neutrónov v reaktore nulová. Strmý nábeh mernej aktivity na Obr. 9 a 10, resp. prudký pokles mernej aktivity na Obr. 10 je spôsobený aktiváciou/rozpadom krátkožijúcich rádionuklidov.



Obr. 9: Sumárna merná aktivita tieniacich kaziet počas 1. kampane po ich inštalácii.



Obr. 10: Sumárna merná aktivita tieniacich kaziet počas 13. kampane a následnej odstávky.

6. Záver

V práci som sa zaoberal výpočtom indukovanej aktivity tieniacej kazety reaktora VVER-440/V230 v JE V1 v Jaslovských Bohuniciach s využitím transportného kódu MCNP. Súčasťou práce je aj základný popis reaktora VVER-440/V230 a stručná história JE V1 v Jaslovských Bohuniciach. Praktická časť začína popisom zjednodušeného modelu reaktora VVER-440/V230 v MCNP5, ktorý som vytvoril. Spracoval som údaje z 13. kampane 1. bloku, t.j. prvej kampane s nainštalovanými tieniacimi kazetami. Na základe literatúry publikovanej v danej problematike som sledoval rádionuklidy majúce najväčší význam pri vyradovaní jadrových elektrární. Výstupmi z MCNP5 výpočtu boli výťažky neutrónových reakcií s nuklidmi konštrukčnej ocele 08Ch18N10T, z ktorej sú tieniace kazety vyhotovené. Za pomoci prevádzkových charakteristík som určil mernú hmotnostnú aktivitu jednotlivých rádionuklidov s ohľadom na definované okrajové podmienky. Výsledky výpočtu sú uvedené v tabuľkách a grafoch.

Pri analýze výpočtov som si pomohol údajmi z podobných výpočtov vo Fínsku (JE Loviisa, [8]) a v Rusku (JE Kola, [11]). Vypočítané hodnoty sa rádovo zhodujú. Rozdiely sú spôsobené predovšetkým rozdielnymi okrajovými podmienkami výpočtu. Najvyššiu mernú hmotnostnú indukovanú aktivitu dosiahli rádionuklidy ^{56}Mn ($T_{1/2} = 2,5785$ h) a ^{51}Cr ($T_{1/2} = 27,7025$ dní). Sú to však krátko žijúce izotopy menej dôležité v procese vyradovania JE. Zaujímavejším už je rádionuklid ^{55}Fe ($T_{1/2} = 2,73$ r), ktorého merná aktivita vo výpočte bola tretia najvyššia. Pri ňom sa dá predpokladať veľký význam v prvej dekáde vyradovania.

V prvej fáze vyradovania budú zohrávať svoju úlohu aj ^{59}Fe ($T_{1/2} = 44,503$ d) a ^{54}Mn ($T_{1/2}$

= 312,3 d). Z dlhodobejšieho hľadiska budú mať značný vplyv najmä ^{60}Co ($T_{1/2} = 5,2714$ r) v horizonte 10 až 50 rokov a dlhožijúci ^{63}Ni (100,1 r) počas celého vyradovania. Pre verifikáciu výsledkov je nutné vykonať výpočty pomocou ďalších výpočtových prostriedkov, takisto je potrebná validácia údajov vhodným experimentom. V súčasnosti sú podobné analýzy dôležité s ohľadom na veľké množstvo JE vo svete, ktoré sa blížia k hranici svojej životnosti a budú postupne odstavované a vyradované.

Zoznam použitej literatúry

1. NÁRODNÝ JADROVÝ FOND, Stratégia záverečnej časti jadrovej energetiky., Bratislava, 2008.
2. GovCo, a.s. (Javys, a.s.), „Správa o hodnotení vplyvov vyradovania JE V1 na životné prostredie,“ 2006.
3. Javys, a.s. 2010. [Online].cit. 13 November 2012 Available: <http://www.javys.sk/data/web/prilohy/predaj-z-je-v1/foto/034-tien-kazety/asc-8635.jpg>
4. POLÁK, V. a kol. „Koncepčný plán vyradovania JE V1 z prevádzky. Dokumentácia pre vyradovanie JE V1 z prevádzky - prvá etapa. Projekt B6.1 BIDSF.,“ Konzorcium EWN STM POWER, Trnava, máj 2006.
5. BOUHADDANE, A. Výpočet indukovanej aktivity tieniacich kaziet reaktora VVER-440/V230, Diplomová práca. Bratislava: FEI STU, 2012.
6. Atómové elektrárne Bohunice, „Vyhodnotenie prevádzkových charakteristík AZ reaktora VVER-440 1. bloku EBO v 13. kampani,“ Jaslovské Bohunice, 1993.
7. DECONTA, a.s., Plán II. etapy vyradovania JE A-1., Trnava, 2007.
8. ANTILLA, M. et. a., Activity Inventory of the Activated Decommissioning Waste of the Loviisa Nuclear Power Plant, Rep. YJT-89-02, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, 1989.
9. IAEA, „Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactors for Decommissioning Purposes,“ Vienna, October 1998.
10. IAEA, The decommissioning of WWER type nuclear power plants, Vienna, January 2000.
11. ENGELMANN, H. a MELNIKOV, N., „Decommissioning Plans of Nuclear Facilities in the Regions of Murmansk and Archangelsk in Northwest Russia,“ 1997.
12. UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Decommissioning Handbook, Washington, DC: DOE, 1994.