

Radionuklidų sklaida iš kristalinėse uolienose įrengto geologinio kapinyno RBMK-1500 panaudotam branduoliniam kurui laidoti

2. Geologinio kapinyno saugos vertinimui svarbių radionuklidų identifikavimas

Asta Brazauskaitė,

Povilas Poškas

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinės inžinerijos
problemų laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas*

Vertinant geologinių kapinynų saugą pirmiausia suformuluojamas saugos įvertinimo uždavinys ir aprašoma laidojimo sistema. Po to sudaromi ir pagrindžiami jos evoliucijos bei radionuklidų sklaidos scenarijai. Vėliau sudaromi juos atitinkantys konceptualūs modeliai, kurie išreiškiami matematiniais ir kompiuteriniais modeliais. Galiausiai atliekami skaičiavimai, gautų rezultatų analizė bei priimtimumo pagrindimas. Panaudotame branduoliniame kure yra daug radionuklidų, tačiau ne visi vienodai svarbūs vertinant ilgalaikę kapinynų saugą. Todėl pirmiausia yra identifikuojami kapinyno ilgalaikiai saugai svarbūs radionuklidai ir po to atliekami detalūs jų sklaidos iš kapinyno vertinimai.

Šiame straipsnyje pateikiamos kapinyno saugos vertinimui svarbių (reikšmingų) radionuklidų identifikavimo metodologijos bei šių radionuklidų, laidojant RBMK-1500 panaudotą branduolinį kurą, atrinkimo pagrindimas.

Raktažodžiai: laidojimas kristalinėse uolienose, RBMK-1500 panaudotas branduolinis kuras, reikšmingų radionuklidų identifikavimas

1. ĮVADAS

Dėl panaudotame branduoliniame kure (PBK) esančių ilgaamžių radionuklidų keliamo pavojaus žmonėms ir aplinkai šio kuro negalima laidoti žemės paviršiuje. Šiuo metu vyrauja nuomonė, kad jį geriausia laidoti geologinėse formacijose.

Vertinant geologinių kapinynų saugą pirmiausia suformuluojamas saugos įvertinimo uždavinys ir aprašoma laidojimo sistema. Po to sudaromi ir pagrindžiami jos evoliucijos bei radionuklidų sklaidos scenarijai. Vėliau sudaromi juos atitinkantys konceptualūs modeliai, kurie išreiškiami matematiniais ir kompiuteriniais modeliais. Galiausiai atliekami skaičiavimai, gautų rezultatų analizė bei priimtimumo pagrindimas.

Branduolinio reaktoriaus darbo metu branduolinį kurą veikiant intensyviais neutronų srautais skiliosios medžiagos dalijasi ir panaudotame branduoliniame kure susikaupia daug įvairių radionuklidų (dalijimosi produktų, aktinidų bei jų dukterinių radionuklidų). Patį branduolinį kurą bei kuro rinklės struktūrinės dalis sudarančios medžiagos ir jose esančios priemaišos, sąveikaudamos

su neutronais, taip pat gali tapti radioaktyviomis. Tačiau ne visi kure bei kuro rinklės struktūrinėse dalyse esantys radionuklidai yra vienodai svarbūs vertinant ilgalaikę kapinynų saugą. Todėl pirmiausia yra identifikuojami kapinyno ilgalaikiai saugai svarbūs radionuklidai ir po to atliekami detalūs jų sklaidos iš kapinyno vertinimai.

Kadangi nėra vieningos metodologijos, kaip atrinkti radionuklidus ir atlikti detalius jų sklaidos iš kapinyno skaičiavimus, pasirinktos trys skirtingos metodologijos svarbiems RBMK-1500 PBK esantiems radionuklidams atrinkti [1–3]. Šiame straipsnyje pateikiami kapinyno saugos vertinimui svarbių (reikšmingų) radionuklidų, laidojant RBMK-1500 panaudotą branduolinį kurą, analizės rezultatai. Analizė buvo atlikta 2,8% ^{235}U ir 0,6% Er_2O_3 pradinio įsodrinimo RBMK-1500 kurui, kurio išdegimas ~29 MW/kgU, o radionuklidų kiekis jame įvertintas naudojant kompiuterinę programą SAS2H (programų paketo SCALE 5 paketo dalį) [4]. Šis kompiuterinių programų paketas yra skirtas ir plačiai naudojamas panaudoto branduolinio kuro charakteristikoms įvertinti, įvairių sistemų branduolinės ir radiacinės saugos analizei.

2. RBMK-1500 PANAUDOTAS BRANDUOLINIS KURAS

RBMK-1500 kuro rinklę (1 pav.) sudaro du kuro elementų pluoštai (2, 3), centrinis strypas arba vamzdis (4) su pakaba (1), viršutinis ir apatinis gaubtai (11, 12), sąvaržos bei fiksatoriai, kurių paskirtis – laiduoti pluoštų sujungimą bei tinkamą kuro elementų išsidėstymą kuro rinklėje. Kiekvienas pluoštas yra sudarytas iš 18 kuro elementų (6), tvirtai pritvirtintų prie rinklės karkaso.

Kuro elementą sudaro apvalkalo vamzdis ir RBMK-1500 kuras. RBMK-1500 kurą sudaro sukepinotos, cilindrinės UO_2 tabletės, kurių išorinis skersmuo – 11,52 mm, aukštis – 15 mm. Kiekvieno apvalkalo vamzdžio galuose yra patalpintos dvi ekranuojančios tabletės (išsodrinimas 0,4%). Pradinis tarpas tarp UO_2 tablečių ir apvalkalo kinta nuo 0,22 iki 0,38 mm. Sukūrus 0,5 MPa helio slėgį vamzdžiuose, jie užsandarinami.

Rinklės karkasą sudaro karkasinis vamzdis bei prie jo pritvirtinamos distanciuojančios, šilumos mainus intensyvinančios, galinės rėtinės, šilumos mainų intensifikatoriai. Rėtinės, išskyrus galines, pagamintas iš cirkonio ir niobio (2,5%) lydinio (lydinys E125), yra pagamintos iš nerūdijančio plieno (plienas 08X18H10T). Karkaso pagalba kuro elementai išdėstomi dviem koncentriniais apskritimais. Vidiniame apskritime, kurio skersmuo – 3,2 cm, vienodais atstumais išdėstyti 6 strypai. Išoriniame apskritime, kurio skersmuo – 6,2 cm, vienodais atstumais išdėstyta 12 strypų. Apatinis ir viršutinis kuro pluoštai sujungiami į kuro rinklę pro karkasinį vamzdį einančiu centriniu strypu arba vamzdžiu su pakaba. Iš lydinio E125 pagamintas centrinis strypas arba vamzdis yra pagrindinis RBMK-1500 kuro rinklės nešantysis elementas.

Šiuo metu Ignalinos AE PBK iš pradžių saugomas vandens baseinuose, vėliau perkeliamas į metalinius arba metalo–betono saugojimo konteinerius (atitinkamai CASTOR, CONSTOR). Perkeliant RBMK-1500 PBK rinklės saugojimui minėtuose konteineriuose jos suskirstomos į segmentus (pluoštus), pašalinamas centrinis strypas (vamzdis) bei pakaba. Laidojant RBMK-1500 panaudotą branduolinį kurą kristalinėse uolienose, jo pluoštai turės būti perkelti į varinius laidojimo konteinerius [5]. Todėl laidojimo konteineryje bus patalpintas pats panaudotas branduolinis kuras bei struktūrinės kuro rinklės dalys (kuro strypų apvalkalai, karkasinis vamzdis, rėtinės).

Identifikuojant geologinio kapinyno saugos vertinimui svarbius radionuklidus reikia žinoti laidojamo PBK bei rinklės struktūrinių dalių radionuklidinę sudėtį bei juose esančių radionuklidų kiekius.

Ignalinos AE iš pradžių buvo naudojamas 2% ^{235}U pradinio išsodrinimo kuras, vėliau imtas naudoti 2,4% ^{235}U ir 0,41% Er pradinio išsodrinimo kuras. 2,6% ^{235}U ir 0,5% Er pradinio išsodrinimo urano–erbio kuras pradėtas naudoti 2001 m. Šiuo metu numatoma pradėti naudoti 2,8% ^{235}U pradinio išsodrinimo kurą su 0,6% išdegančiu neutronų absorberiu erbiu. 2%, 2,4%, 2,8%

^{235}U pradinio išsodrinimo kuras su Er absorberiu yra tokių pačių matmenų bei masės, tačiau didesnio išsodrinimo laipsnio kuras po išėmimo iš reaktoriaus gali būti didesnio išdegimo laipsnio. Dėl to jame susidariusių radionuklidų aktyvumas gali būti didesnis bei išskirti daugiau liktinių šilumos [4]. Todėl šiame darbe analizuojami kapinyno saugos vertinimui svarbūs radionuklidai, esantys RBMK-1500 kuro rinklės struktūrinėse dalyse bei pačiame branduoliniame kure, kurio pradinis išsodrinimas buvo 2,8%, išdegimas ~29 MW/kgU.

Remiantis duomenimis apie galimus priemaišų kiekius kuro rinklės dalyse bei pačiame branduoliniame kure [6–10], priimta, kad nagrinėjamame PBK bei rinklės struktūrinėse dalyse yra didžiausi galimi priemaišų kiekiai (1 lentelė) [4].

3. SAUGOS POŽIŪRIU SVARBIŲ RADIONUKLIDŲ IDENTIFIKAVIMO METODOLOGIJOS

Vertinant kapinyno saugą būtina identifikuoti visus radionuklidus, kurie gali sąlygoti didelę gyventojų apšvitą po atliekų palaidojimo, arba tokių radionuklidų motininius radionuklidus. Geologiniuose kapinyuose laidojamose radioaktyviosiose atliekose yra pernelyg daug radionuklidų, kad būtų galima atlikti nuodugnius jų sklaidos iš kapinyno skaičiavimus, todėl optimizuojant kapinynų saugos vertinimo procesą išsamūs radionuklidų sklaidos vertinimai atliekami tik reikšmingiems radionuklidams. Saugos vertinimui svarbių radionuklidų identifikavimas yra pasikartojantis procesas. Pirmiausia atrenkami radionuklidai remiantis duomenimis apie jų savybes (kiekį, skiedimosi greitį, pusėjimo trukmę ir pan.), atliekami preliminarūs identifikuotų radionuklidų sklaidos vertinimai. Vėliau remiantis duomenimis bei skaičiavimų rezultatais saugos vertinimui svarbių radionuklidų sąrašas peržiūrimas ir patikslinamas.

3.1. SKB (Švedija) metodologija

Remiantis [1] metodologija radionuklido svarbą PBK kapinyno saugos vertinimui lemia trys veiksniai:

- kiekis;
- dozės koeficientas;
- mobilumas kapinyno aplinkoje.

Priklausomai nuo radionuklido šie veiksniai gali itin skirtis. Radionuklido kiekis kapinyne bet kuriuo laiko momentu bei jo dozės koeficientas yra nesunkiai įvertinami. Kita vertus, daug sudėtingiau įvertinti radionuklido mobilumą, nes jis priklauso nuo daugelio veiksnių, tokių kaip PBK matricos irimo procesas, radionuklido tirpumas vandenyje, difuzija, sorbcija įvairiose kapinyno dalyse ir kt.

Identifikuojant kapinyno saugos vertinimui svarbius radionuklidus, PBK bei struktūrinėse rinklės dalyse esantys radionuklidai padalijami į dvi grupes. Vieną grupę sudaro aktinidai ir jų dukteriniai radionuklidai, o kitą – dalijimosi produktai ir aktyvacijos produktai, kurių bran-

duoliai yra lengvi. Dalijimo į šias grupes priežastis yra tai, kad lengvųjų ir sunkiųjų branduolių radionuklidų mobilumas labai skiriasi, o toje pačioje grupėje esančių radionuklidų mobilumų skirtumai yra mažesni.

Kapinyno saugos vertinimui svarbūs dalijimosi ir aktyvacijos produktai identifikuojami pagal jų radiotoksiškumą [1]. i -ojo radionuklido radiotoksiškumas j prarijus (Sv) įvertinamas šitaip:

$$RT_{i,pr} = A_i \cdot e_{i,pr}(T); \quad (1)$$

čia A_i – i -ojo radionuklido aktyvumas Bq kapinyne, $e_{i,pr}(T)$ – dozės koeficientas prarijus i -ąjį radionuklidą Sv/Bq, priklausantis nuo žmogaus amžiaus grupės.

Radiotoksiškumas įvertinamas visam kapinyno saugos vertinimo laikotarpiui (geologinio kapinyno sauga vertinama ilgą laikotarpį po jo uždarymo ir gali siekti milijoną metų). Jei radionuklido toksiškumas bet kuriuo laiko momentu minėtame intervale didesnis kaip 0,1% bendrojo visų dalijimosi ir aktyvacijos produktų radiotoksiškumo tuo laiko momentu, toks radionuklidas įvardijamas kaip kapinyno saugos vertinimui svarbus radionuklidas. Riba 0,1% parinkta tam, kad būtų įvertinti radionuklidų mobilumo skirtumai. Darbe [1] buvo nustatyta, kad bendra radionuklido mobilumą lemiančių veiksnių įtaka skirtingiems lengviems radionuklidams skiriasi mažiau nei dydžiu 10^4 .

Aktinidams ir jų dukteriniams radionuklidams $4N$, $4N+1$, $4N+2$ ir $4N+3^1$ skilimo grandinėls yra įvardijamos kaip kapinyno saugos vertinimui svarbių radionuklidų skilimo grandinėls. Tokiu pačiu būdu, kaip dalijimosi ir aktyvacijos produktams, kiekvienai skilimo grandinei nustatomas didžiausias masės radionuklidas ir visi jo skilimo grandinėls radionuklidai įvardijami kaip svarbūs. Išsamūs dukterinių radionuklidų, kurių pusėjimo trukmė gerokai trumpesnė nei motininio radionuklido, sklaidos vertinimai (skaičiavimai) neatliekami laikantis prielaidos, kad yra jų ir jų motininų radionuklidų pusiausvyra, o jų dozės koeficientas (prarijus radionuklidą) pridedamas prie motininio radionuklido dozės koeficiento.

Šiame darbe identifikuojant RBMK-1500 PBK esančius reikšmingus radionuklidus remiantis pateikta SKB metodologija, naudotos Lietuvos Respublikoje galiojančioje higienos normoje HN 73:2001 pateiktos dozės koeficientų reikšmės prarijus radionuklidą [11]. Prie motininų radionuklidų dozės koeficiento dukterinio radionuklido dozės koeficientas buvo pridedamas, jei pastarojo pusėjimo trukmė kur kas trumpesnė nei motininio radionuklido ir trumpesnė nei vieneri metai. Nesant tikslesnių nurodymų SKB metodologijoje [1], vienerių metų trukmė buvo priimta remiantis Japonijos metodologija [3].

2 ir 3 lentelėse pateikti panaudotame Švedijos BWR tipo branduoliniame kure esantys svarbūs radionuklidai,

identifikuoti remiantis išdėstyta metodologija [1, 12]. Kai kurie identifikuoti radionuklidai buvo įvardyti kaip turintys nedidelę įtaką žmonių apšvitai, todėl atliekant vėlesnį Švedijos PBK kapinyno saugos įvertinimą [12] reikšmingų radionuklidų sąrašė liko tik 32 radionuklidai.

2 paveiksle parodytas RBMK-1500 PBK radiotoksiškumo kitimas praėjus po reaktoriaus sustabdymo tam tikram laikui. Kaip matyti paveiksle, praėjus 50 metų po reaktoriaus sustabdymo bendrą PBK radiotoksiškumą sąlygoja ^{90}Sr (kartu su dukteriniu radionuklidu ^{90}Y), ^{137}Cs , aktinidai ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{239}Pu , ^{240}Pu . Ilgainiui, suskilus trumpesnės pusėjimo trukmės radionuklidams, radiotoksiškumą lemia ilgaamžiai radionuklidai ^{241}Am , ^{239}Pu , ^{240}Pu . BWR tipo panaudoto branduolinio kuro santykinį radiotoksiškumą ilgainiui taip pat lemia aktinidai ^{239}Pu ir ^{240}Pu [12].

3.2. NAGRA (Šveicarija) metodologija

Antru atveju preliminariai kapinyno saugos vertinimui svarbūs radionuklidai buvo identifikuoti remiantis Šveicarijoje naudota metodologija [2]. Reikšmingi radionuklidai, esantys PBK ar DAA², identifikuojami pagal jų sąlygojamos dozės galią įvertinus šiuos veiksnius:

- visiško radionuklidų sulaikymo periodą;
- vidutinę radionuklidų srauto iš artimo lauko zonos trukmę;
- skiedimąsi vandeningame horizonte;
- radionuklidais užteršto vandeningo horizonto vandens vartojimą.

Radionuklidų tirpumo riba, radionuklidų sklaida ir sorbcija bentonite, užlaikymas geologiniuose sluoksniuose, kaupimasis žemės paviršiuje esančiose sistemose ir kitos apšvitos trastos nei vandens vartojimas konservatyviai yra nevertinami. i -ojo radionuklido sąlygojamos apšvitos dozės galia D_i (Sv per metus) įvertinama taip:

$$D_i = \frac{A_i \cdot e_{i,pr}(T) \cdot I_{varr}}{T_c \cdot Q}; \quad (2)$$

čia A_i – i -ojo radionuklido kiekis kapinyne tuo metu, kai PBK laidojimo konteineriai netenka sandarumo, Bq. PBK atveju šis laikas priimtas lygus 10^3 metų;

T_c – nuolatinio radionuklidų srauto iš artimo lauko zonos trukmė. Priėmus labai pesimistines prielaidas, susijusias su PBK matricos irimu ir sklaida artimajame lauke, PBK atveju priimta trukmė 10^3 metų;

Q – vandens srautas vandeningame horizonte, priimtas 10^6 m³/metai;

I_{varr} – bendras vieno žmogaus išgeriamo vandens kiekis per metus, priimtas 0,73 m³/metai (2 l per dieną);

$e_{i,pr}(T)$ – dozės koeficientas prarijus i -ąjį radionuklidą Sv/Bq.

¹ N – sveikasis skaičius, 4N grandinėlei priklausančių radionuklidų atominė masė dalijasi iš keturių, 4N+1 atveju – atominė masė dalijasi iš keturių atėmus iš jos vieneta, 4N+2 atveju – atominė masė dalijasi iš keturių atėmus iš jos dvejetą ir t. t.

² Didelio aktyvumo atliekos (DAA) susidaro perdirbant PBK. Lietuvos Respublikos įstatymai draudžia perdirbti PBK Lietuvos teritorijoje.

Visi aktyvacijos ir dalijimosi produktai, kurių sąlygojamos apšvitos dozės galia yra didesnė nei $1 \cdot 10^{-5}$ mSv/metus, įvardijami kaip kapinyno saugos vertinimui svarbūs radionuklidai.

Minėta riba ($1 \cdot 10^{-5}$ mSv/metus) yra keturiomis eilėmis mažesnės dozės galia nei dozės riba. Be to, rekomenduojama radionuklidus ^3H , ^{90}Sr ir ^{137}Cs taip pat įtraukti į reikšmingų radionuklidų sąrašą. Jie gali indukuoti procesus, kurie gali prasidėti palyginti anksti po PBK palaidojimo (pavyzdžiui, radionuklidų sklaida pro laidojimo konteineryje esantį defektą).

Aktinidų ir jų dukterinių radionuklidų skilimo grandinės 4N , $4\text{N}+1$, $4\text{N}+2$ ir $4\text{N}+3$ įtraukiamos į reikš-

mingų radionuklidų sąrašą, nes aktinidams skylant gali atsirasti radiologiniu požiūriu pavojingi radionuklidai. Šveicarijos kapinyno, kuriame numatoma laidoti BWR, PWR ir MOX tipo panaudotą branduolinį kurą kartu, kaip reikšmingi identifikuoti 22 dalijimosi ir aktyvacijos produktai bei 29 aktinidai ir jų dukteriniai radionuklidai (2 ir 3 lentelės) [2].

Šiame darbe buvo daroma prielaida, kad iš menamo šulinio vandenį tiesiai gėrimui vartos nedaug žmonių (mažiau nei 50 žmonių). Tokiu atveju žalio³ vandens bendra metinė efektinė dozė turi būti ne didesnė kaip 0,1 mSv [13]. Pagal Lietuvoje galiojančius teisės aktus jau veikiančių ar planuojamų branduolinių objektų nor-

1 lentelė. RBMK branduoliniame kure bei struktūrinių rinklės dalių medžiagose esančios priemaišos

Lydinys E110 [6]		Lydinys E125 [6, 7]		Plienas 08X18H10T [7, 8]		RBMK* branduoliniame kure esančios priemaišos [9, 10]	
Elementas	Kiekis (% masės)	Elementas	Kiekis (% masės)	Elementas	Kiekis (% masės)	Elementas	Kiekis % nuo urano masės
Nb	1,22	Fe	0,018	Cr	19	Fe	0,015
Al	0,008	Hf	0,04	Fe	65,625	Co	0,005
B	0,00002	Nb	2,5	Mn	2	Ni	0,004
Cd	0,00001	Ni	0,011	Ni	11	Mn	0,0005
C	0,05	Al	0,0046	Si	0,8	Cr	0,005
Co	0,00002	B	0,00008	Ti	0,8	Cu	0,001
Cu	0,0033	Be	0,002	C	0,08	Zn	0,005
Hf	0,0041	C	0,027	Co	0,04	Na	0,04
V	0,0002	Ca	0,03	Cu	0,3	Ca	0,015
Pb	0,0005	Cd	0,00004	N	0,3	Mg	0,005
Mg	0,0002	Co	0,025	P	0,035	Al	0,01
Mn	0,00008	Cu	0,005	S	0,02	Ag	0,0001
Mo	0,0005	Mn	0,004			Cd	0,00003
Fe	0,05	N	0,008			V	0,01
Ni	0,025	O	0,1			Sn	0,025
Sn	0,002	Pb	0,005			Pb	0,005
Cr	0,0061	Ti	0,006			W	0,005
Si	0,05	Zr	97,21428			Mo	0,01
Ti	0,007					Si	0,01
W	0,001					B	0,00003
U	0,0001					C	0,0075
H	0,002					P	0,02
O	0,099					N	0,0075
N	0,007					F	0,005
Zr	98,46387					Cl	0,0015
						Tc	0,000001
						Sm	0,00007
						Eu	0,00005
						Gd	0,00015
						Dy	0,0003

* Nesant duomenų apie RBMK-1500 PBK esančias priemaišas, jų kiekiai priimami remiantis RBMK-1000 branduolinio kuro gamintojų pateikiamais duomenimis.

³ Žalias vanduo – natūralioje aplinkoje susiformavęs paviršinis arba požeminis vanduo, kurį tiesiogiai savo poreikiams asmeniame namų ūkyje naudoja gyventojai ar atitinkamai paruoštas tiekiamas vartotojui.

2 lentelė. Geologinio kapinyno saugos vertinimui svarbūs dalijimosi ir aktyvacijos produktai

Radio-nuklidai	Šalis							
	Švedija (PBK)		Lietuva (PBK)*	Šveicarija (PBK) [2]	Lietuva (PBK)**	Japonija (DAA) [3]	Lietuva (PBK)***	Lietuva (apibendrintas sąrašas)
	SR95[1]	SR97[12]						
³ H				✓	✓			✓
¹⁰ Be				✓	✓			✓
¹⁴ C	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
³⁶ Cl	✓	✓		✓				
⁴¹ Ca				✓				
⁶⁰ Co	✓							
⁵⁹ Ni	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
⁶³ Ni	✓	✓		✓	✓		✓	✓
⁷⁹ Se	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
⁸⁵ Kr	✓							
⁹⁰ Sr	✓	✓	✓	✓	✓			✓
⁹³ Zr	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
^{93m} Nb			✓	✓	✓	✓	✓	✓
⁹⁴ Nb	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
⁹³ Mo				✓				
⁹⁹ Tc	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
¹⁰⁷ Pd	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
^{108m} Ag	✓	✓		✓				
^{113m} Cd	✓							
¹²⁶ Sn	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
¹²⁹ I	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
¹³⁵ Cs	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
¹³⁷ Cs	✓	✓	✓	✓	✓			✓
¹⁴⁷ Sm					✓			✓
¹⁵¹ Sm	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
¹⁵⁴ Eu	✓							
^{166m} Ho	✓	✓		✓	✓		✓	✓

* Atrinkta remiantis SKB (Švedija) siūloma metodologija.

** Atrinkta remiantis NAGRA (Šveicarija) siūloma metodologija.

*** Atrinkta remiantis JNC (Japonija) siūloma metodologija.

malios veiklos sąlygojama kritinės grupės narių apšvitės metinė dozė turi būti ne didesnė už apribotąją (0,2 mSv per metus). Kadangi radionuklidai gali sąlygoti kritinės grupės narių apšvitą pasklidę ore ir vandenyje, todėl kiekvienam radionuklidų srautui (vandeniui ar oru) taikoma dozės vertė, lygi pusei apribotosios dozės (0,1 mSv per metus) [14].

3.3. JNC (Japonija) metodologija

Remiantis [3] pateikta metodologija DAA esantys ir saugos vertinimui svarbūs radionuklidai identifikuojami įvertinant jų pusėjimo trukmę bei kriterijų, susijusį su didžiausia leistina radionuklido koncentracija menamo šulinio vandenyje.

Reikšmingi radionuklidai identifikuojami priėmus šias prielaidas:

- DAA matricos irimas (tirpimas) nevyks 10^3 metų iki kol atliekų pakuotė netaps nesandari;

- vandenyje ištirę radionuklidai iškart patenka į vandeningą horizontą, esantį netoli žemės paviršiaus;

- vandeningo horizonto vanduo per šulinį išgaunamas vartojimui (gėrimui).

Taigi remiantis šiomis prielaidomis tik DAA matricos irimo greitis ir vandens srauto greitis vandeningame horizonte turi įtakos radionuklidų koncentracijai šulinio vandenyje. Radionuklidų tirpumas vandenyje, radionuklidų užlaikymas inžineriniuose bei natūraliuose barjeruose, kaip ir NAGRA siūlomoje metodologijoje, konservatyviai nevertinami. Tokiu būdu radionuklidų koncentracija šulinio vandenyje įvertinama:

$$C_i = \left(\frac{A_i \cdot N}{T} \right) / Q ; \quad (3)$$

čia A – didžiausias i-ojo radionuklido aktyvumas Bq atliekų pakuotėje įvertinus jo radioaktyvųjį skilimą bei

padidėjimą po kapinyno uždarymo praėjus 10^3 metų ir iki kapinyno saugos vertinimo pabaigos (Japonijos atveju 10^7);

N – DAA pakuočių kiekis;

T – laikas, per kurį DAA matrica visiškai suyra (išstipsta). Priėmus konservatyvias prielaidas Japonijos atveju šis laikas priimtas lygus 6500 metų;

Q – vandens srautas vandeningame horizonte, priimtas 10^6 m³/metai.

DAA sudaro stiklo matricoje imobilizuoti radionuklidai, kurie, kaip ir PBK atveju, gali iš jos palaipsniui išsilaisvinti, kai stiklo matrica ima kontaktuoti su požeminiu vandeniu.

Remiantis JNC metodologija, apskaičiuota radionuklido koncentracija menamame šulinyje palyginama su didžiausia leistina radionuklido koncentracija vandenyje, kuri atitinka 1 mSv per metus efektingą dozę. Kapi-

nyno saugos vertinimui reikšmingi radionuklidai identifikuojami taip:

- Radionuklidai, kurių koncentracijos šulinio vandenyje santykis su didžiausia leistina koncentracija didesnis nei 10^{-3} , įvardijami kaip svarbūs radionuklidai;

- Dukteriniams radionuklidams, kurių pusėjimo trukmė trumpesnė nei vieneri metai, išsamūs sklaidos vertinimai artimojoje ir tolimojoje kapinyno zonoje (geosferoje) neatliekami laikantis prielaidos, kad egzistuoja dukterinių radionuklidų ir jų motininių radionuklidų pusiausvyra.

Išsamūs sklaidos vertinimai biosferoje atliekami identifiuotiems reikšmingiems radionuklidams ir dukteriniams radionuklidams, kurių pusėjimo trukmė ilgesnė nei 25 dienos. Remiantis JNC metodologija (Japonija) identifiuoti DAA esantys reikšmingi radionuklidai išvardyti 3 lentelėje.

Kapinyno saugos vertinimui svarbių radionuklidų identifikavimo požiūriu tiek PBK, tiek DAA yra lygia-verčiai. Išdėstytose metodologijose pažymėta, kokiams atliekoms (PBK, DAA ar abiejų rūšių atliekoms) buvo

3 lentelė. Geologinio kapinyno saugos vertinimui svarbūs aktinidai ir jų dukteriniai radionuklidai

Skilimo grandinė	Šalis						
	Švedija (PBK)		Lietuva (PBK)*	Lietuva (PBK) remiantis [2]	Japonija (DAA) [3]	Lietuva (PBK)**	Lietuva (PBK, apibendrintas sąrašas)
	SR95 [1]	SR97 [12]					
4N	²⁴⁴ Cm ²⁴⁰ Pu ²³⁶ U ²³² Th	²⁴⁰ Pu	²⁴⁴ Cm ²⁴⁰ Pu ²³⁶ U ²³² Th ²²⁸ Ra ²²⁸ Th	²⁴⁴ Cm ²⁴⁰ Pu ²³⁶ U ²³² Th ²²⁸ Ra/ ²³² U ²²⁸ Th	²⁴⁰ Pu ²³⁶ U ²³² Th ²²⁸ Ra*** ²²⁸ Th***	²⁴⁰ Pu ²³⁶ U ²³² Th ²²⁸ Ra ²²⁸ Th	²⁴⁴ Cm ²⁴⁰ Pu ²³⁶ U ²³² Th ²²⁸ Ra ²²⁸ Th
4N+ 1	²⁴⁵ Cm ²⁴¹ Am ²³⁷ Np ²³³ U ²²⁹ Th	²⁴⁵ Cm ²⁴¹ Am ²³⁷ Np ²³³ U ²²⁹ Th	²⁴¹ Pu ²⁴¹ Am ²³⁷ Np ²³³ U ²²⁹ Th	²⁴⁵ Cm ²⁴¹ Pu ²⁴¹ Am ²³⁷ Np ²³³ U ²²⁹ Th	²⁴⁵ Cm ²⁴¹ Pu ²⁴¹ Am ²³⁷ Np ²³³ U ²²⁹ Th	²⁴⁵ Cm ²⁴¹ Pu ²⁴¹ Am ²³⁷ Np ²³³ U ²²⁹ Th	²⁴⁵ Cm ²⁴¹ Pu ²⁴¹ Am ²³⁷ Np ²³³ U ²²⁹ Th
4N+ 2	²⁴⁶ Cm/ ^{242m} Am ²⁴² Pu/ ²⁴² Cm ²³⁸ U/ ²³⁸ Pu ²³⁴ U ²³⁰ Th ²²⁶ Ra	²⁴² Pu ²³⁸ U ²³⁴ U ²³⁰ Th ²²⁶ Ra	²⁴² Pu ²³⁸ U/ ²³⁸ Pu ²³⁴ U ²³⁰ Th ²²⁶ Ra ²¹⁰ Pb	²⁴⁶ Cm/ ^{242m} Am ²⁴² Pu ²³⁸ U/ ²³⁸ Pu ²³⁴ U ²³⁰ Th ²²⁶ Ra ²¹⁰ Pb ²¹⁰ Po	²⁴⁶ Cm/ ^{242m} Am ²⁴² Pu ²³⁸ U/ ²³⁸ Pu ²³⁴ U ²³⁰ Th ²²⁶ Ra ²¹⁰ Pb ²¹⁰ Po***	²⁴⁶ Cm/ ^{242m} Am ²⁴² Pu ²³⁸ U/ ²³⁸ Pu ²³⁴ U ²³⁰ Th ²²⁶ Ra ²¹⁰ Pb ²¹⁰ Po	²⁴⁶ Cm/ ^{242m} Am ²⁴² Pu ²³⁸ U/ ²³⁸ Pu ²³⁴ U ²³⁰ Th ²²⁶ Ra ²¹⁰ Pb ²¹⁰ Po
4N+ 3	²⁴³ Cm/ ²⁴³ Am ²³⁹ Pu ²³⁵ U ²³¹ Pa	²⁴³ Am ²³⁹ Pu ²³⁵ U ²³¹ Pa	²⁴³ Am ²³⁹ Pu ²³⁵ U ²³¹ Pa ²²⁷ Ac	²⁴³ Cm/ ²⁴³ Am ²³⁹ Pu ²³⁵ U ²³¹ Pa ²²⁷ Ac	²⁴³ Am ²³⁹ Pu ²³⁵ U ²³¹ Pa ²²⁷ Ac	²⁴³ Am ²³⁹ Pu ²³⁵ U ²³¹ Pa ²²⁷ Ac	²⁴³ Am ²³⁹ Pu ²³⁵ U ²³¹ Pa ²²⁷ Ac

* Atrinkta remiantis SKB (Švedija) metodologija.

** Atrinkta remiantis JNC (Japonija) metodologija.

*** Pagal [3] detalai vertinama šių radionuklidų sklaida biosferoje, o artimojoje ir tolimojoje kapinyno zonoje (geosferoje) jų sklaida detalai nevertinama.

pasiūlyta ir naudota metodologija, o tai iš esmės priklauso nuo to, kokios rūšies atliekos bus laidojamos minėtose šalyse. Todėl JNC siūloma metodologija taikyta ir RBMK-1500 PBK. Identifikuojant reikšmingus radionuklidus pagal JNC metodologiją, priimtos tokios pačios prielaidos kaip identifikuojant pagal SKB ir NAGRA metodologijas: kapinyno sauga vertinama milijono metų laikotarpiui; iš viso bus reikalingi 1400 PBK laidojimo konteinerių; PBK matrica suirs per 10^3 metų; vandens srautas vandeningame horizonte yra 10^6 m³ per metus.

Kaip jau minėta, pagal Lietuvos normatyvinius dokumentus žalio vandens bendra metinė dozė turi būti ne didesnė kaip 0,1 mSv. Didžiausia radionuklido koncentracija, atitinkanti 0,1 mSv metinę efektyvią dozę, ir priėmus prielaidą, kad žmogus išgeria vidutiniškai po 2 litrus tokio vandens per dieną, buvo įvertinama taip:

$$C_{i,maxs} = \frac{1 \cdot 10^{-4} (Sv)}{e_{i,pr} (Sv/Bq) \cdot 0,73 m^3} \quad (4)$$

Radono (²²²Rn) bei jo dukterinių radionuklidų leistina koncentracija geriamame vandenyje nurodyta Lietuvos higienos normoje HN 85:2003 [15]. Lietuvos PBK atveju identifikuoti reikšmingi radionuklidai išvardyti 2 ir 3 lentelėse.

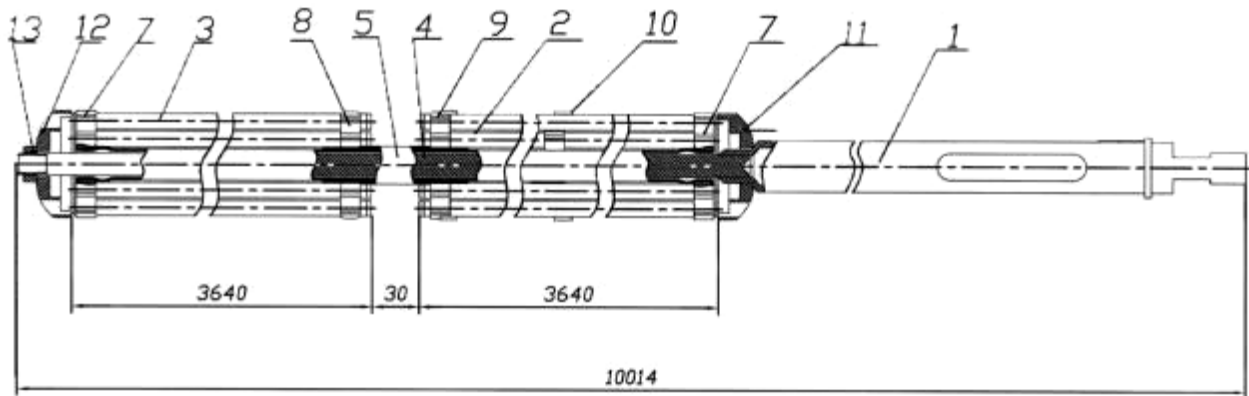
4. REZULTATAI

Remiantis SKB metodologija, Švedijos PBK atveju kaip reikšmingi buvo įvardyti 21 dalijimosi ir aktyvacijos produktas bei 23 aktinidai bei jų dukteriniai radionuklidai. Kai kurie identifikuoti radionuklidai buvo įvardyti kaip turintys nedidelę įtaką žmonių apšvitai, todėl atliekant vėlesnį Švedijos PBK kapinyno saugos įvertinimą [12] į reikšmingų radionuklidų sąrašą buvo įtraukti tik 32 radionuklidai (17 dalijimosi ir aktyvacijos produktų bei 15 aktinidų ir jų dukterinių radionuklidų). Remiantis SKB metodologija Lietuvos PBK atveju buvo identifikuoti 36 radionuklidai (13 dalijimosi ir aktyvacijos produktų bei 23 aktinidai ir jų dukteriniai radionuklidai) (2, 3 lentelės). Palyginus BWR ir RBMK tipo kurui identifikuotus reikšmingus dalijimosi ir aktyvacijos produktus matyti, kad RBMK atveju ⁶⁰Co, ⁸⁵Kr, ^{113m}Cd, ¹⁵⁴Eu, ³⁶Cl, ⁶³Ni, ^{108m}Ag, ¹⁵¹Sm, ^{166m}Ho neidentifikuoti kaip reikšmingi. Pirmieji keturi radionuklidai yra trumpaamžiai radionuklidai, jų aktyvumas kure sparčiai mažėja laikui bėgant ir RBMK-1500 PBK, kuri numatoma saugoti 50 metų po išėmimo iš reaktoriaus, jie neidentifikuoti kaip reikšmingi. Kaip matyti 2 lentelėje, ³⁶Cl, susidarantis chlorui prisijungus neutroną, RBMK-1500 nebuvo identifikuotas kaip kapinyno saugos vertinimui svarbus radionuklidas, t. y. susidaręs jo kiekis yra nepakankamas, kad radionuklidas būtų įvardytas reikšmingas. Lietuvos PBK atveju Cl priemaišų esti tik pačiame kure ir nėra struktūrinėse rinklės dalyse (1 lentelė). Kadangi [1] šaltinyje nepateikta informacijos apie BWR kure ir struktūrinėse rinklės dalyse esančių priemaišų koncen-

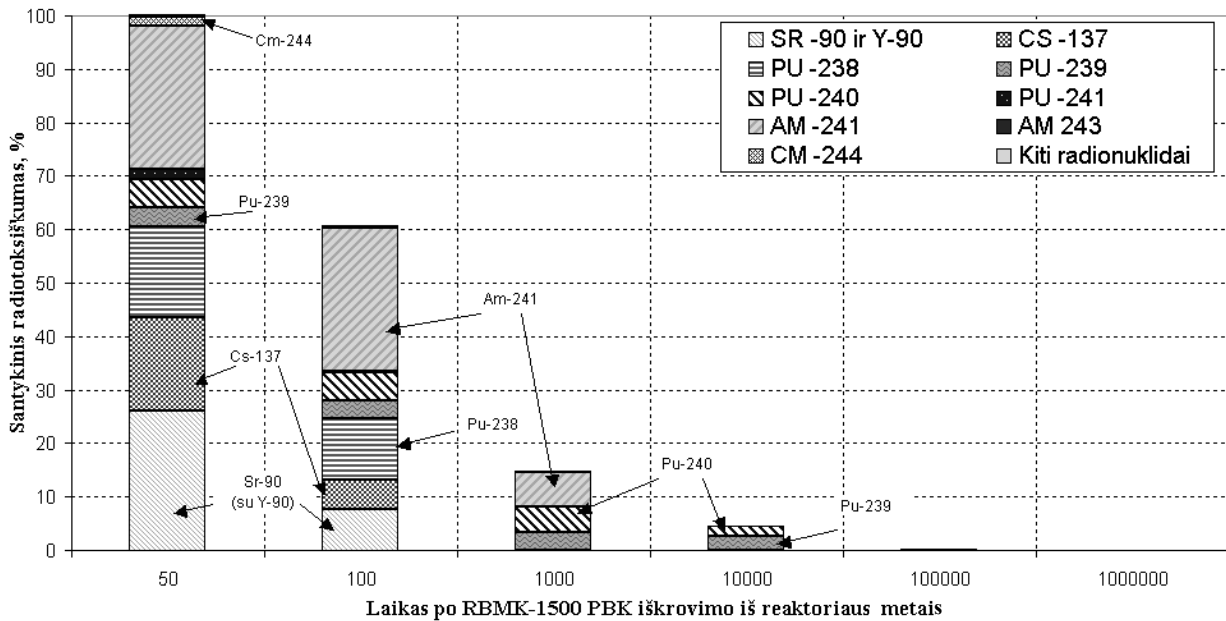
tracijos, negalima teigti, ar tai, kad ³⁶Cl yra reikšmingas radionuklidas Švedijos PBK kapinyno atveju, nulėmė didesnė chloro priemaišų koncentracija kure ar chloro priemaišų buvimas struktūrinėse rinklės dalyse. ⁶³Ni taip pat susidaro nikelio neutroninės aktyvacijos metu. RBMK atveju Ni priemaišų esti ir pačiame kure, ir struktūrinėse rinklės dalyse. Kadangi jo radiotoksiškumas bendro radiotoksiškumo atžvilgiu nėra didelis, jis nebuvo identifikuotas kaip reikšmingas radionuklidas. ²³⁵U dalijimosi procesų metu susidarantių radionuklidų ¹⁵¹Sm, ^{108m}Ag, ^{166m}Ho kiekiai matyti priklauso nuo reaktoriaus darbo sąlygų, pradinio įsodrinimo ir pan., o įvertinus kiekvieno jų radiotoksiškumą bendro radiotoksiškumo atžvilgiu, jie nebuvo identifikuoti kaip svarbūs kapinyno saugos vertinimui.

Radionuklidas ^{93m}Nb ($T_{1/2}=16,13$ metų) susidaro radionuklido ⁹³Zr ($T_{1/2}=1,53 \cdot 10^6$ metų) savaiminio radioaktyviojo skilimo metu. Kadangi ^{93m}Nb pusėjimo trukmė yra ilgesnė nei kaip priimta vieneri metai, jis buvo vertinamas atskirai nuo savo motininio radionuklido. Nesant tikslesnių duomenų, remiantis [1], negalima pasakyti, ar Švedijos PBK atveju ^{93m}Nb vertinamas kartu su motininiu radionuklidu, ar atskirai.

Palyginus pagal SKB metodologiją identifikuotus reikšmingus aktinidus bei jų dukterinius radionuklidus BWR ir RBMK tipo panaudotame kure matyti kai kurie skirtumai (3 lentelė). Skilimo grandinėle 4N Lietuvos PBK atveju ilgesnė dėl į reikšmingų radionuklidų sąrašą įtrauktų ²²⁸Ra, ²²⁸Th, kurių pusėjimo trukmė ilgesnė nei vieneri metai (žr. 3.1 skyrelį). Analizės metu buvo nuspręsta, kad tas skilimo grandinės išsišakojimas, kai ²³²Th skyla į ²³²U, o šis į ²²⁸Ra, nėra reikšmingas, nes ²³²Th skilimo į ²³²U tikimybė yra nykštamai maža ($\ll 1 \cdot 10^{-10}$). Tai reiškia, kad ²³²U kiekio padidėjimas dėl ²³²Th skilimo bus nykštamai mažas ir jis gali būti traktuojamas kaip atskira grandinės atšaka. Įvertinus jo radiotoksiškumą bendro aktinidų ir jų dukterinių radionuklidų radiotoksiškumo atžvilgiu, jis neidentifikuotas kaip reikšmingas radionuklidas, todėl neįtraukiamas į svarbių radionuklidų sąrašą. Skilimo grandinėleje 4N+1 pirmas reikšmingas, kitaip nei BWR kuro atveju identifikuotas ²⁴¹Pu, nes RBMK atveju ²⁴⁵Cm indėlis į bendrą radiotoksiškumą yra mažesnis nei 0,1%. Skilimo grandinėle 4N+2 turi kelias atšakas bei išsišakojimus. Kiekvienai atšakai randamas didžiausios masės radionuklidas, kurio radiotoksiškumas bendro radiotoksiškumo atžvilgiu didesnis kaip 0,1%. Tokiu būdu, kitaip nei BWR kuro atveju, buvo identifikuoti reikšmingi radionuklidai ²⁴²Pu ir ²³⁸Pu, kurių skilimo produktai įvardijami kaip svarbūs atliekant kapinyno saugos vertinimą. Šiam skirtumui nuo BWR kuro įtakos turi radionuklidų kiekis PBK matricoje bei jų radiotoksiškumas bendro radiotoksiškumo atžvilgiu. Iš RBMK identifikuotų reikšmingų skilimo grandinės 4N+3 radionuklidų matyti, kad RBMK atveju ²⁴³Cm nėra reikšmingas. Aktinido ²³¹Pa dukterinis radionuklidas ²²⁷Ac identifikuotas kaip reikšmingas, nes jo pusėjimo trukmė ($T_{1/2}=23,79$ metų) nors ir gerokai trumpesnė nei motininio radionuklido,



1 pav. RBMK-1500 kuro rinklė (1 – rinklės pakaba, 2 – viršutinis kuro elementų pluoštas; 3 – apatinis kuro elementų pluoštas; 4 – centrinis vamzdis (strypas); 5 – apsauginė mova; 6 – kuro elementas; 7 – galinės rėtinės; 8 – distancionuojančios rėtinės; 9 – šilumos mainus intensyvinančios rėtinės; 10 – šilumos mainų intensifikatoriai; 11 – viršutinis gaubtas; 12 – apatinis gaubtas; 13 – fiksavimo veržlė)



2 pav. RBMK-1500 PBK radiotoksiškumo kitimas po išėmimo iš reaktoriaus

tačiau ilgesnė nei vieneri metai (kaip priimta 3.1 skyrelyje).

Šveicarijos geologiniame kapinyne numatoma laidoti BWR, PWR ir MOX tipo panaudotą branduolinį kurą ir šaltinyje [2] yra nurodyti reikšmingi radionuklidai visų rūšių panaudotam branduoliniam kurui kartu. Remiantis NAGRA metodologija, kaip reikšmingi identifiukuoti 22 dalijimosi ir aktyvacijos produktai bei 29 aktinidai ir jų dukteriniai radionuklidai. Palyginus Šveicarijos ir Lietuvos PBK identifiukuotus reikšmingus dalijimosi ir aktyvacijos produktus, pastebima kai kurių skirtumų. Kaip ir pirmuoju atveju (identifiukuojant reikšmingus radionuklidus pagal SKB metodologiją), RBMK kurui ^{36}Cl nėra reikšmingas. Lietuvos PBK atveju, remiantis literatūros šaltiniais, lydiniuose E110, E125, pliene 08X18H10T nėra chloro priemaišų, o Šveicarijos PBK atveju struktūrinėse kuro rinklės dalyse susidariusio ^{36}Cl aktyvumas yra tos pačios eilės ar net didesnis nei pa-

čiame branduoliniame kure. Tai gali paaiškinti, kodėl Šveicarijos PBK atveju ^{36}Cl buvo identifiukuotas kaip reikšmingas radionuklidas. Radionuklidas ^{41}Ca susidaro aktyvuojantis kalcio priemaišoms, kurių gali būti struktūrinėse kuro rinklės dalyse bei pačiame kure. Kaip pateikta [2], ^{41}Ca aktyvumas kure yra vidutiniškai viena eile didesnis nei struktūrinėse dalyse, o Lietuvos PBK atveju Ca priemaišų esti ne visose struktūrinių elementų medžiagose, susidariusio ^{41}Ca aktyvumas, atsižvelgus ir į jo sąlygojamą apšvitos dozę, nėra didelis ir šis radionuklidas neidentifiukuotas kaip reikšmingas. Radionuklidai ^{93}Mo , $^{108\text{m}}\text{Ag}$, susidarantys skiliosios medžiagos dalijimosi metu, priešingai nei Šveicarijos PBK atveju, nebuvo identifiukuoti kaip reikšmingi. Tuo tarpu radionuklido ^{147}Sm , identifiukuoto RBMK tipo kuro atveju, tarp Švedijos, Šveicarijos PBK, Japonijos DAA kapinyno saugos vertinimui svarbių radionuklidų nėra. Kaip jau minėta, pagal NAGRA metodologiją svarbios yra

aktinidų skilimo grandinėls 4N, 4N+1, 4N+2, 4N+3, pateiktos šaltinyje [2].

JNC siūloma metodologija Japonijoje buvo taikyta didelio aktyvumo atliekomis, kurios susidaro PBK perdirbimo metu iš jo išgaunant U ir Pu, o jose yra daugelis panaudotame branduoliniame kure esančių radionuklidų. Susidariusios skystos DAA yra garinamos, kalcinuojamos bei sumaišomos su stiklą sudarančiais priedais. DAA matricoje nėra struktūrinių PBK rinklės dalių bei jose esančių radionuklidų. Tuo paaiškinama, kodėl taikant JNC metodologiją RBMK-1500 PBK, buvo identifikuoti tokie radionuklidai, kaip ^{14}C , ^{59}Ni , ^{63}Ni , o Japonijos DAA atveju ne. RBMK atveju, kitaip nei Japonijos DAA atveju, kaip reikšmingi buvo identifikuoti ^{129}I , $^{166\text{m}}\text{Ho}$ radionuklidai. Tai matomai galima paaiškinti didesniu jų aktyvumu nei esančių Japonijos didelio aktyvumo atliekose.

Remiantis JNC metodologija, RBMK-1500 PBK atveju identifikuoti tie patys reikšmingi aktinidai ir jų dukteriniai radionuklidai kaip ir Japonijos DAA atveju.

Į apibendrintą svarbių radionuklidų sąrašą įtraukiami radionuklidai, identifikuoti remiantis bent viena metodologija ir rekomendacijomis. Aktinidai ^{232}U , ^{243}Cm buvo įvardyti kaip reikšmingi tik remiantis NAGRA metodologija neįvertinus RBMK-1500 PBK esančių aktinidų aktyvumo, o remiantis SKB bei JNC metodologijomis jie nebuvo identifikuoti kaip reikšmingi. Todėl nuspręsta jų į apibendrintą sąrašą netraukti. Iš lentelėse (žr. 2 ir 3 lenteles) pateiktų duomenų matyti, kad Lietuvos PBK kapinyno saugos vertinimui svarbūs yra 19 dalijimosi bei aktyvacijos produktų, 27 aktinidai ir jų dukteriniai radionuklidai. Daugiausia reikšmingų dalijimosi ir aktyvacijos produktų buvo identifikuota remiantis NAGRA metodologija. Įvertinant RBMK-1500 esančių aktinidų bei jų dukterinių radionuklidų aktyvumus, daugiau reikšmingų aktinidų buvo identifikuota remiantis JNC metodologija.

5. IŠVADOS

Atlikus preliminarą geologinio kapinyno saugos vertinimui svarbių radionuklidų, laidojant RBMK-1500 panaudotą branduolinį kurą, analizę galima padaryti šias išvadas:

- Pirmą kartą sudarytas RBMK-1500 PBK kapinyno saugos vertinimui svarbių radionuklidų sąrašas (19 dalijimosi ir aktyvacijos produktų bei 27 aktinidai ir jų dukteriniai radionuklidai).

- Dalijimosi ir aktyvacijos produktai ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{85}Kr , ^{60}Co , ^{93}Mo , $^{108\text{m}}\text{Ag}$, $^{113\text{m}}\text{Cd}$, ^{154}Eu , kitaip nei kitų rūšių PBK, neidentifikuoti kaip svarbūs kapinyno saugos vertinimui laidojant RBMK-1500 panaudotą branduolinį kurą.

- Kitaip nei kitų rūšių kurui, RBMK-1500 PBK reikšmingu identifikuotas radionuklidas ^{147}Sm .

Gauta 2006 05 20

Literatūra

1. SR 95. Template for safety reports with descriptive example. SKB Technical Report TR-96-05. Stockholm, 1995.

2. Project Opalinus Clay: Safety report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-05. Wettingen, 2002.
3. H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan. Supporting Report 3. Safety Assessment of the Geological Disposal System. 445 p.
4. Narkūnas E. Radionuclides inventory modeling in RBMK-1500 spent fuel assembly // Proceedings of Symposium during XVIII International Youth Nuclear Festival Dysnai, July 2-9, 2005 Lithuania.
5. Brazauskaitė A., Poškas P. Radionuklidų sklaida iš kristalinėse uolienose įrengto geologinio kapinyno, RBMK-1500 panaudotam branduoliniam kurui laidoti. Kapinyno koncepcija // Energetika. 2005. Nr. 3. P. 70-78.
6. Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. Москва: Энергоиздат, 1981.
7. Bylkin B. K. et al. Induced radioactivity and waste classification for components of Chernobyl Unit 1 // Nuclear technology. 2001. Vol. 136. P. 76-88.
8. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. ГОСТ 5632-72. Москва: Издательство стандартов, 1991.
9. <http://www.kazatomprom.kz/eng/uranium/services/us1.shtml>
10. http://www.ulba.kz/eng/umz3_1_3a.htm
11. HN 73:2001. Pagrindinės radiacinės saugos normos. Patvirtinta LR sveikatos apsaugos ministro 2001 m. gruodžio 21 d. įsakymu Nr. 663.
12. SR 97. Radionuclide transport calculations. SKB Technical Report TR-99-23. Stockholm, 1999.
13. HN 48:2001. Žmogaus vartojamo žalio vandens kokybės higieniniai reikalavimai. Patvirtinta LR sveikatos apsaugos ministro 2001 m. lapkričio 30 d. įsakymu Nr. 621.
14. LAND 42-2001. Radionuklidų išmetimo į aplinką iš branduolinės energetikos objektų ribojimas ir radionuklidų išmetimo leidimų išdavimo bei radiologinio monitoringo tvarka. Patvirtintas LR aplinkos ministro 2001 m. sausio 23 d. įsakymu Nr. 60.
15. HN 85:2003. Gamtinė apšvita. Radiacinės saugos normos. Patvirtinta LR sveikatos apsaugos ministro 2003 m. gruodžio 22 d. įsakymu Nr. V-749.

Asta Brazauskaitė, Povilas Poškas

RADIONUCLIDE MIGRATION FROM THE GEOLOGICAL REPOSITORY OF THE RBMK-1500 SPENT NUCLEAR FUEL IN CRYSTALLINE ROCKS

2. IDENTIFICATION OF SAFETY-RELEVANT RADIONUCLIDES FOR A GEOLOGICAL REPOSITORY

Summary

Performing safety assessment of the geological repositories, the assessment context is specified and a disposal system is described first. Then the scenarios of the system evolution and radionuclide migration are developed and justified. After identifica-

tion the scenarios are represented by equivalent conceptual, available mathematical and computer models. Eventually the analysis of results and building of confidence are performed. There are a lot of radionuclides in SNF, however, not all of them are equally important for assessing the long-term safety of a repository. Thus, safety-relevant radionuclides are identified and a detailed analysis of their migration from the repository is performed.

In this paper, methodologies for identification of safety-relevant radionuclides for the geological repository are discussed. Also, the results of identification of safety-relevant radionuclides for a geological repository of the RBMK-1500 spent nuclear fuel are presented.

Key words: disposal in crystalline rocks, RBMK-1500 spent nuclear fuel, identification of safety-relevant radionuclides

Аста Бразаускайте, Повилас Пошкас

МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОГИЛЬНИКА В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАССИВАХ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РБМК-1500

2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ, ВАЖНЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОГИЛЬНИКА

Резюме

При оценке безопасности геологического могильника прежде всего необходимо описать систему захоронения.

После этого составляются сценарии развития системы и миграции радионуклидов. Затем разрабатываются концептуальные, математические и компьютерные модели, проводятся расчёты и выполняются анализ полученных результатов и обоснование приемлемости. В отработавшем ядерном топливе будет множество радионуклидов, но не все они одинаково важны при определении долгосрочной безопасности могильника. Поэтому прежде всего определяются радионуклиды, важные для определения безопасности могильника, а также выполняется подробный анализ их миграции из могильника.

В данной статье проанализированы методологии по идентификации радионуклидов, важных для определения безопасности геологического могильника. С помощью этих методологий идентифицированы радионуклиды, важные для определения безопасности геологического могильника с отработавшим ядерным топливом РБМК-1500.

Ключевые слова: захоронение в кристаллических массивах, отработавшее ядерное топливо РБМК-1500, идентификация важных радионуклидов