

Panaudoto branduolinio kuro saugojimas ir jo laidojimo perspektyvos

Povilas Poškas,

Artūras Šmaižys

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinės inžinerijos problemų laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas,
el. paštas poskas@mail.lei.lt*

Šiame straipsnyje apžvelgtos panaudoto branduolinio kuro saugojimo ir tolesnio jo tvarkymo perspektyvos. Trumpai aptartos su PBK tarpiniu saugojimu susijusios technologijos: tiksliai saugojimo, saugojimo-transportavimo ir saugojimo-transportavimo-laidojimo. Pateikta informacija apie Ignalinos AE naudojamą ir naujai diegiamą saugojimo technologiją.

Daugiausia dėmesio straipsnyje skiriama panaudoto branduolinio kuro laidojimo galimybių Lietuvoje analizei. Tokia analizė buvo atlikta pagal 2003 m. patvirtintą programą Lietuvos mokslininkams bendradarbiaujant su Švedijos specialistais. Parodyta, jog kristalinės uolienos ir molingosios geologinės formacijos yra perspektyviausios geologiniam kapinynui įrengti Lietuvoje. Straipsnyje taip pat pateikiama geologinio kapinyno kristalinėse uolienose Lietuvoje bendrinė koncepcija. Trumpai apžvelgiami laidojimo konteinerio kritiškumo ir spinduliuotės dozių vertinimo rezultatai. Pateikti duomenys apie šilumos šalinimo ir radionuklidų sklaidos iš kapinyno RBMK-1500 kurui palaidoti kristalinėse uolienose preliminarių vertinimų rezultatai.

Raktažodžiai: Ignalinos AE, panaudotas branduolinis kuras, tarpinis saugojimas, laidojimas, kritiškumas, spinduliuotės dozės, šilumos šalinimas, radionuklidų sklaida

1. PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO SAUGOJIMAS

Eksplloatuojant AE, aišku, susidaro tam tikras panaudoto branduolinio kuro (PBK) kiekis. PBK tvarkymas visada buvo ir iki šiol išlieka viena svarbiausių branduolinio kuro ciklo dalių visose šalyse, turinčiose branduolinius reaktorius. Išimtas iš reaktoriaus PBK yra paprastai patalpinamas vandens baseine ir ten išbūna kurį laiką. Tik ką iš reaktoriaus išimto PBK radioaktyvumas yra labai didelis, be to, išsiskiria ir nemažas šilumos kiekis. Vandenyje PBK ataušta, o jam būnant baseine suskyla trumpaamžiai radionuklidai, sumažėja šilumos išsiskyrimas. Kadangi dauguma AE negali sutalpinti viso PBK, kuris susidaro eksploatuojant elektrinę (taip yra ir Ignalinos AE), tai reikia spręsti, ką su juo daryti dar AE eksploatacijos metu.

Tarptautinės atominės energetikos agentūros (TATENA) duomenimis, 2003 m. pradžioje pasaulyje įvairiose PBK saugyklose buvo saugojama 171 tūkst. t panaudoto branduolinio kuro [1]. Šiuo metu apie 95% pasaulyje susikaupusio PBK yra saugoma baseinuose, t. y. „šlapio“ tipo saugyklose. Tačiau pastaruosiu metu vis populiareesnės tampa „sausos“ tipo saugyklos ir nemažai šalių jas yra pasistačiusios arba numato ateityje statyti. Apie įvairiose šalyse taikomus PBK saugojimo būdus ir jų ypatumus rašoma darbuose [2, 3].

Dabar daugumos AE baseinai beveik pilni PBK (taip pat ir Ignalinos AE), o galutinio laidojimo saugyklų dar nėra. Todėl buvo pasirinktas kitas variantas – tarpinis 40–50 m. PBK saugojimas „šlapio“ arba „sausos“ tipo saugyklose. „Šlapios“ saugyklos – tai saugojimas specialiai tam skirtuose vandens baseinuose, į kuriuos saugoti PBK atveža keletas elektrinių, arba papildomai pastatytuose vandens baseinuose prie AE. „Sausos“ tipo saugyklos yra tokios, kuriose PBK saugomos ne vandenyje, o specialiose talpose, dažniausiai užpildytose inertinėmis dujomis. Toks tarpinis PBK saugojimas 40–50 m. yra patogus dar ir tuo, kad per tokį gana netrumpą laikotarpį galima tinkamai pasiruošti PBK laidojimui, t. y. atlikti išsamius vietovės tyrimus, suprojektuoti ir pastatyti galutinę saugyklą, atlikti jos saugos įvertinimą. Be to, per 40–50 m. PBK liekamasis radioaktyvumas ir šilumos išsiskyrimas labai sumažėja ir siekia tiksliai apie 10% tik ką iš reaktoriaus išimto PBK radioaktyvumo ir šilumos išsiskyrimo. Todėl tokį PBK palaidoti yra daug paprasčiau.

Iki šiol pasaulyje jau yra licencijuota keletas „sausos“ tipo PBK saugojimo technologijų. Pagal paskirtį jas galima suskirstyti į tris grupes: tiksliai PBK saugoti; PBK saugoti ir transportuoti; PBK saugoti, transportuoti ir laidoti. Žinoma, šių technologijų kainos bus skirtingos. Pigiausios yra „tik PBK saugoti“ skirtos technologijos, kadangi jos užtikrina tik vieną funkciją, t. y. PBK

saugojimą, bet neužtikrina jo pervežimo iš saugojimo vietos į laidojimo vietą, netinka PBK laidoti. Tokio tipo technologijos dažniausiai yra betoninės saugyklos, kurios gali būti specialaus pastato pavidalo dideliame PBK kiekiui saugoti arba specialios talpyklos pavidalo nedideliame PBK kiekiui saugoti lauko aikštelėje. Taigi naudojant tokias technologijas, PBK pervežimo ir dalis laidojimo išlaidų nukeliama vėlesniam laikui. Tokios technologijos AE yra ypač populiarios tose šalyse, kuriose AE naudoja natūralųjį neprisodrintą uraną. Naudojant tokį uraną susidaro daug daugiau PBK, negu naudojant įsodrintą uraną.

„Saugojimo-transportavimo“ technologijos užtikrina PBK saugojimą 40–50 m. ir jo nuvežimą į laidojimo vietą. Paprastai tai įvairūs konteineriai: metaliniai (geležies, ketaus) ir metalo–betono. Ši technologija dabar pasaulyje yra gana populiari. Tokių konteinerių (80 vnt.) yra įsigijusi ir Ignalinos AE. Tai Vokietijos GNB firmos pagaminti specialaus ketaus ir metalo–betono konteineriai. Jie yra laikomi atviro tipo saugykloje. Prognozuojama, kad iki 2010 m. Ignalinos atominėje elektrinėje bus sukaupta apie 22 tūkst. panaudoto branduolinio kuro rinklių. Todėl šiuo metu Ignalinos AE pradėtas vykdyti naujas projektas, kurio tikslas yra pastatyti naują PBK saugyklą visam likusiam Ignalinos AE PBK saugoti. Tam bus naudojami tos pačios firmos didesnės talpos konteineriai (apie 200 vnt.), kurie bus patalpinti specialiai pastatytame pastate-saugykloje.

„Saugojimo-transportavimo-laidojimo“ technologija yra vystymosi stadijos. Jos kūrimui daug dėmesio skiriamas JAV ir Vokietijoje. Ji yra patogi tuo, kad, vieną kartą pakrovus PBK į konteinerį ir jį užvirinus, tolesniuose darbo etapuose nebėra tiesioginio kontakto su PBK kasetėmis ir kuro strypais. Tokiu būdu gerokai supaprastėja PBK tvarkymo operacijos. Čia gali būti naudojami konteineriai, kurie tinka saugojimui, transportavimui ir laidojimui, arba gali būti saugoma betoniniuose statiniuose, o pervežama ir laidojama metaliniuose konteineriuose. Reikia tikėtis, kad netolimoje ateityje ši technologija bus pati populiariausia tvarkant PBK. Žinoma, ji bus brangesnė. Tačiau kaina yra gana reliatyvus dalykas, atsižvelgiant į tai, kad pagal visuotinai pripažintą principą lėšos AE susikaupusio PBK tvarkymui, įskaitant ir jo palaidojimą, turi būti sukauptos per jos eksploatavimo laikotarpį. Apskritai PBK tvarkymas gana brangiai kainuoja.

2. TYRIMAI, SUSIJĘ SU PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO PALAIDOJIMU LIETUVOJE

Kaip jau minėjome, PBK galima laidoti specialiose giluminėse saugyklose, žinoma, prieš tai jį atitinkamai paruošus. Kadangi tokios laidojimo saugyklos parinkimas ir licencijavimas yra labai sudėtinga ir ilgai sprendžiama problema, tai iki šiol to dar nėra vienai šaliai nepavyko padaryti. Tikimasi, kad tokios PBK galutinio laidojimo saugyklos turėtų pradėti veikti apie 2020 m.

JAV, Švedijoje, Suomijoje, o po to ir kitose šalyse. Kaip šimtams tūkstančių metų izoliuoti nuo aplinkos Ignalinos AE susidariusį PBK – labai aktuali problema ir Lietuvai.

Radioaktyviųjų atliekų tvarkymo Lietuvoje strategija, kurią 2002 m. patvirtino LR Vyriausybė, kaip viena iš priemonių buvo numatyta parengti ir vykdyti ilgalaikę mokslinių tyrimų programą „Galimybės laidoti Lietuvoje panaudotą branduolinį kurą ir ilgaamžes didelio aktyvumo radioaktyvias atliekas“. 2003 m. tokia programa buvo parengta ir patvirtinta „Panaudoto branduolinio kuro ir ilgaamžių radioaktyviųjų atliekų laidojimo galimybių įvertinimo programa 2003–2007 m.“. Tuo pačiu metu Švedijos vyriausybė sudarė specialų pagalbos fondą Ignalinos AE eksploatavimo nutraukimo veiklai finansuoti. Kaip viena iš šios pagalbos kryptių buvo identifikuota ir nacionalinės kompetencijos išplėtojimas PBK laidojimo srityje.

2.1. Geologiniai ir hidrogeologiniai tyrimai

Šiuo metu įvairiose šalyse kaip potencialios formacijos kapinynams įrengti yra tyrinėjama akmens druskos, granitai ir panašios kristalinės uolienos, molingos uolienos, vulkaninis tufas. Šiandien labiausiai ištirtos uolienos, tinkančios kapinynui įrengti, yra kristalinės uolienos, pirmiausia granitai ir gneisai. Suomijos vyriausybė ir vietiniai gyventojai neseniai pritarė siūlomai PBK laidojimo granitei vietai (Olkiluoto) Baltijos jūros pakrantėje. Švedijoje vykdamas kapinyno vietos kristalinėse uolienose parinkimo programą toliau tyrinėjamos dvi vietovės. Kitos šalys, nagrinėjančios giluminio kapinyno įrengimui tinkančias kristalines uolienas, yra Prancūzija, Šveicarija, Ispanija, Kanada ir kt.

Lietuvoje remiantis ankstesnių Lietuvos geologinės struktūros tyrimų rezultatais buvo identifikuotos kelios potencialios geologinės formacijos giluminiam kapinynui įrengti [4] – tai kristalinio pamato uolienos, Apatinio triaso molis, Permo sulfato klodai (anhidritas), Permo druskos.

2001–2004 m. pagal pirmiau minėtą programą Lietuvos geologijos tarnyba ir Geologijos ir geografijos institutas atliko detalesnę šių geologinių formacijų analizę [5]. Tyrimai šioje pirmojoje geologinių tyrimų, susijusių su PBK kapinyno įrengimu, stadijoje (konceptualūs arba planavimo stadijos tyrimai) iš esmės buvo atliekami naudojantis turima informacija. Tyrimai buvo sukoncentruoti kriterijams parinkti bei geologinėms formacijoms įvertinti naudojantis archyvų ir publikuotų duomenų analize. 2001–2002 m. atlikta bendrinė geologinės struktūros bei nuosėdinių uolienų ir kristalinio pamato sudėties apžvalga kaip pradinė geologinių formacijų tinkamumo PBK kapinyno Lietuvos teritorijoje tyrimų proceso dalis. Tyrimams buvo parinkta keletas geologinių formacijų – molingos formacijos, kristalinio pamato uolienos, druskų ir anhidrito formacijos. Šių tyrimų pagrindu Lietuvos nuosėdinėse uolienose buvo išskirtos keturios perspektyvios molingos formacijos bei perspektyviomis laikytos anhidrito ir druskų formacijos.

Lietuvos teritorijos atranka buvo atlikta atsižvelgiant į tokius svarbiausius geologinius parametrus, apibrėžiančius formacijų tinkamumą, kaip paprasta tektoninė struktūra, vandeningų horizontų tarp skirtingų geologinių formacijų nebuvimas, mažas netektoninis ir seisminis aktyvumas, geros uolienų izoliacinės ir mechaninės savybės ir kt. Šiuo pagrindu buvo išskirtos tinkamiausių geologinių formacijų teritorijos. Atliekant šią atranką buvo atsižvelgta ir į tokius geologinius parametrus, kaip perspektyvinio sluoksnio litologinis homogeniškumas, jo storis, gylis, plotas, tektoninė struktūra ir kt. Po šių tyrimų buvo padaryta išvada, kad druskų klodų negalime vertinti kaip labai potencialių geologiniam kapinynui įrengti. O kristalinio pamato uolienos buvo įvertintos kaip viena perspektyviausių geologinių formacijų geologiniam kapinynui įrengti. Perspektyviausia kristalinio pamato zona yra pietrytinėje Lietuvos dalyje, kur uolienas dengia tik 200–300 metrų storio nuosėdinis sluoksnis. Po šių tyrimų taip pat liko tikrai dvi perspektyvios molingos formacijos – Kambro Baltijos ir Apatinio triaso formacijos, kadangi jos geriausiai tenkina tokius reikalavimus, kaip gylis, sluoksnio storis, nuosėdų homogeniškumas ir kt. Taigi geologinių formacijų parinkimo tyrimai 2001–2002 m. leido padaryti išvadą, kad kristalinės uolienos ir molingosios geologinės formacijos yra perspektyviausios geologiniam kapinynui įrengti Lietuvoje [5].

2.2. Panaudoto branduolinio kuro laidojimo kristalinėse uolienose koncepcija

PBK laidojimas giluminiuose kapinynuose yra grindžiamas stabilios geologinės aplinkos naudojimu. Pagrindinis laidojimo geologiniuose sluoksniuose principas – radioaktyviosios atliekos apgaubiamos keletu vienas kitą sustiprinančių ir papildančių pasyvių barjerų (daugiabarjerinės sistemos koncepcija). Laidojimo sistema turi užtikrinti, jog atliekos, įskaitant skylančias medžiagas, yra nepavojingos ir žmonija bei aplinka yra apsaugotos nuo pavojingo spinduliuotės poveikio. Laidojimas giluminiuose geologiniuose kapinynuose yra ir patikimas, ir saugus. Tokiuose kapinynuose patalpintos atliekos nepasiekiamos žmonėms, nes yra toli nuo žemės paviršiaus aplinkos. Toks kapinynas garantuoja apsaugą nuo tyčinio ir netyčinio žmogaus įsibrovimo, taip pat ir žemės paviršiaus reiškinių.

Panaudoto branduolinio kuro laidojimui kristalinėse uolienose Švedijoje buvo išvystyta KBS-3 koncepcija [6]. Remiantis ja PBK būtų patalpinamas variniame laidojimo konteineryje su ketaus intarpu. Konteineris su jį supančiu 0,35 m storio bentonito sluoksniu talpinamas 500 m gylyje kristalinėse uolienose. Šis metodas yra žinomas KBS-3V vardu. Pastaruoju metu nagrinėjamos dvi giluminio geologinio kapinyno alternatyvos (KBS-3V ir KBS-3H): konteinerį patalpinant vertikaliai ir horizontaliai. KBS-3H pranašumas, palyginti su pagrindiniu talpinimo būdu (KBS-3V), yra toks, kad nereikalingi transportavimo/patalpinimo tuneliai. Tokiu būdu iškasamos uolienos apimtis sumažėja iki 50%. Tai lemia

mažesnę poveikį aplinkai statybos metu, mažesnes kapinyno įrengimo išlaidas ir mažesnius ventiliacijos bei drenažo poreikius statybos ir vėliau eksploatavimo metu. KBS-3H alternatyva yra plėtojama šiuo metu bendradarbiaujant kompanijoms SKB (Švedija) ir POSIVA (Suomija).

Pagrindiniai inžineriniai geologinio kapinyno barjerai yra: atliekų forma, ją supanti atliekų pakuotė (konteineris), buferio ar užpildo medžiaga, užpildanti ertmę tarp konteinerio ir uolienos. Kapinyną supančios uolienos bei paviršinis žemės sluoksnis yra natūralūs barjerai. Inžineriniai ir natūralūs barjerai funkcionuodami kartu izoliuoja atliekas ir užtikrina kapinyno saugą, nes:

- Konteineris izoliuoja atliekas ir apsaugo nuo sąlyčio su požeminiu vandeniu nuo kelių šimtų metų iki dešimčių ar šimtų tūkstančių metų (pagal pasirinktą koncepciją).

- Buferio medžiaga saugo laidojimo konteinerį nuo sąveikos su požeminiu vandeniu neleisdama vandeniui kontaktuoti su konteineriu ir saugo konteinerį nuo mechaninio suardymo absorbuodama uolienų poslinkius. Jei buferio medžiaga yra labai nepralaidi (pavyzdžiui, molis), joje sulaikomi iš laidojimo konteinerio dėl kokių nors priežasčių pasklidę radionuklidai.

- Kapinyną supančios uolienos ir kitos geologinės formacijos užtikrina stabilias mechanines, chemines ir vandens tekėjimo sąlygas aplink inžinerinius barjerus ilgą laiką, nes natūralūs pokyčiai jose labai lėti.

- Bet kuri radionuklidų sklaida yra sulėtinama, susilpninama ar net visiškai sustabdoma, radionuklidai išsklaidomi kapinyno aplinkoje ir virš jo esančiose uolienose, vandenyse, dirvožemyje, todėl nekelia pavojaus aplinkai.

Konteineris yra vienas svarbiausių daugiabarjerinės sistemos komponentų. Čia galimi du koncepciniai požiūriai: konteineris iš korozijai neatsparios ir atsparios medžiagos. Pirmuoju atveju konteineris gaminamas iš lengvai rūdijančių metalų (pvz., mažaanglio plieno ar ketaus), kai pasirenkamas pakankamas jo storis, konteineris nesuyra keletą tūkstančių metų, kol atliekose suskyla radionuklidai, kurių trumpesnė pusėjimo trukmė. Antruoju atveju konteineris gaminamas iš korozijai atsparių medžiagų (pvz., vario ar titano lydinių). Tokios medžiagos skirtos apsaugoti nuo vandens patekimo į konteinerio vidų kur kas ilgesnį laiką (iki 100 000 metų), galbūt net iki tol, kol dauguma mobilių radionuklidų suskils ir atliekų keliamas pavojus sumažės iki gamtinės urano rūdos lygio [7].

PBK laidojant kristalinėse uolienose dažnai pirmenybė teikiama konteineriams iš vario. Kristalinėse uolienose pratekančio vandens kiekis yra didesnis nei molingose formacijose, ypač jei uolienoje yra plyšių, todėl, kad atitiktų kapinyno saugos reikalavimus, reikia atsparesnio konteinerio. Esant redukciniams vandens sąlygoms, kurios paprastai vyrauja giliai kristalinėse uolienose, varis pasižymi dideliu atsparumu korozijai.

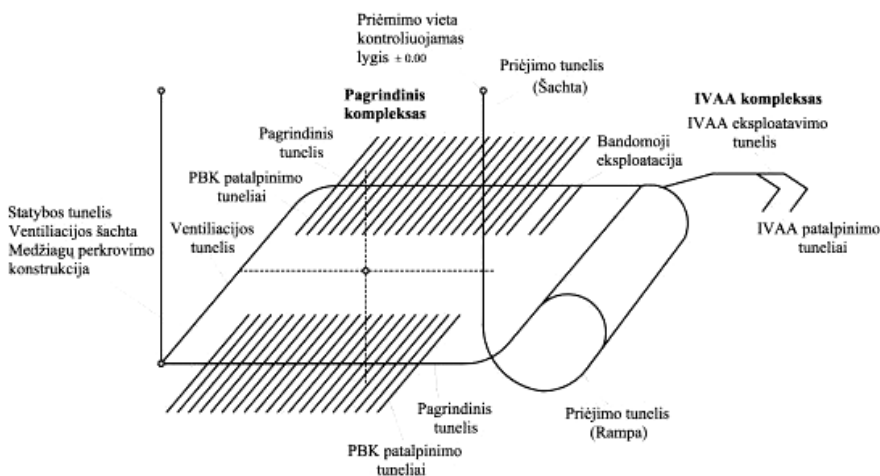
Detalus kapinyno planas labai priklauso nuo atliekų tipo ir geologinės aplinkos, tačiau yra tam tikri bendri

konstrukcijos principai. Dėl jau minėtų horizontalaus PBK patalpinimo būdo pranašumų horizontalus laidojimo konteinerių patalpinimas galėtų būti numatomas kaip pagrindinis talpinimo būdas Lietuvos kapinyne [8, 9]. Kadangi KBS-3H patalpinimo alternatyva Švedijoje ir Suomijoje dar yra plėtojama, todėl Lietuvoje vertikalus laidojimo konteinerių patalpinimas numatomas kaip alternatyva pagrindiniam patalpinimo būdai, jei KBS-3H pasirodytų negalimas ar nesaugus.

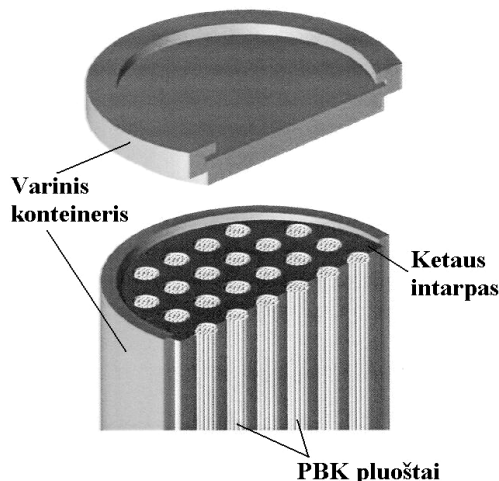
Lietuvoje dar nėra galutinai nuspręsta, ar ilgaamžės vidutinio aktyvumo atliekos (IVAA) bus laidojamos tame pačiame kapinyne kaip ir PBK, ar bus laidojamos atskirai. Pirmuoju atveju IVAA galėtų būti laidojamos uolienų erdmėse (16 m × 16 m), apie 1 km atstumu nuo PBK patalpinimo tunelių, kad būtų išvengta IVAA konteinerių betonui naudoto cemento įtakos pro PBK patalpinimo sritį tekančiam požeminiam vandeniui. Patalpinus IVAA tuneliai būtų užsandarinami cementiniu skiediniu arba žvyru.

Galimas Lietuvos kapinyno planas pateiktas 1 paveiksle. Pagrindinės kapinyno dalys yra:

- priėjimo šachta, pagrindiniai tuneliai;



1 pav. RBMK-1500 PBK kapinyno kristalinėse uolienose schema [8, 9]



2 pav. Varinis konteineris RBMK-1500 panaudojamam branduoliniam kurui laidoti kristalinėse uolienose [8, 9]

- PBK patalpinimo tunelių masyvas;
- IVAA patalpinimo tuneliai.

Iš pradžių kapinyne būtų patalpinama apie 5–10% viso kapinyne numatomo palaidoti PBK. Po pradinio eksploatacijos periodo būtų atliekamas išsamus kapinyno saugos įvertinimas. Jei pradinės eksploatacijos įvertinimas parodys, kad toks laidojimo metodas turi trūkumų arba galimi geresni metodai, laidojimo konteineriai būtų išimti. Jei kapinyno įvertinimas būtų teigiamas, kapinyne galima patalpinti visus laidojimo konteinerius.

PBK patalpinimo tuneliai, pagrindiniai ir transportavimo tuneliai būtų iškasami 300–500 m gylyje kristaliniame pamate. Laidojimo konteineriai patalpinami vienas po kito 1,2 m atstumu horizontaliai iškastuose PBK patalpinimo tuneliuose, kurių ilgis rekomenduojamas iki 300 m. Šiame etape priimtas PBK patalpinimo tunelių ilgis yra 250 m. Numatoma, kad PBK patalpinimo tuneliai bus 1,85 m skersmens, kaip ir Švedijoje. Atstumas tarp patalpinimo tunelių centrų būtų apie 40 m. Priėjimo šachtų ilgis priklauso nuo kapinyno plano ir parinktos kapinyno vietos. Įvertinus atstumą tarp PBK patalpinimo tunelių ir PBK laidojimo konteinerių, numatomą PBK laidojimo konteinerių kiekį, PBK patalpinimo plotas apimtų apie 0,4 km² plotą.

Šiame tyrimų etape atliekant konceptualius saugos tyrimus remiantis atlikta analize buvo priimta, kad PBK laidojimui kristalinėse uolienose Lietuvoje bus naudojamas varinis PBK laidojimo konteineris [8, 9] (2 pav.). Siūlomas PBK laidojimo konteineris, kaip ir Švedijoje, Suomijoje, sudarytas iš dviejų komponentų: išorinės korozijai atsparios varinės dalies ir ketaus intarpo, kuriame yra kuro pluoštams skirti kanalai ir kuris yra skirtas padidinti laidojimo konteinerio me-

chaninį atsparumą. Atlikus kituose skyriuose pateiktus kritiškumo, dozės ant konteinerio paviršiaus, šilumos šalinimo įvertinimus, taip pat atsižvelgiant į esamą konteinerių perkėlimo ir patalpinimo technologijų patirtį, buvo priimta, kad į laidojimo konteinerį tikslinga talpinti 32 RBMK-1500 PBK pluoštus. Varinė 50 mm storio konteinerio dalis turėtų būti pagaminta iš bedegonio vario su fosforo priemaišomis mechaniniam atsparumui padidinti. Numatomo konteinerio intarpo iš ketaus sienelės storis turėtų būti ne mažesnis nei 50 mm. Remiantis preliminariais įvertinimais, laidojimo konteinerio skersmuo būtų 1050 mm, aukštis 4070 mm. Ignalinos AE PBK laidojimo reikmėms reikėtų apie 1400 laidojimo konteinerių.

Lietuvos PBK kapinyne kristalinėse uolienose buferio medžiaga pasirinktas bentonitas, o užpildo medžiaga – bentonito ir smulkintos uolienos mišinys (15% bentonito / 85% smulkintos uolienos). Tose PBK patalpinimo tunelio dalyse, kuriose nebus talpinami laidojimo

konteineriai, pavyzdžiui, dėl nepalankių uolienos savybių (sąlygų), patalpinimo tunelis užsandarinamas suspaustu bentonitu. Ties PBK patalpinimo tunelių susijungimu su pagrindiniais tuneliais patalpinimo tuneliai užsandarinami betonu. Užpildu užpildyti pagrindiniai tuneliai ir priėjimo šachtos užsandarinami betono ar stipriai suspausto bentonito bloku.

Norint įrengti kapinyną reikia atlikti daug tyrimų ir bandymų. Todėl reikalinga požeminė laboratorija. Atsižvelgus į įgyvendinimo strategiją, bandymų kompleksas gali būti įrengtas kapinyne vietovėje arba tyrimai ir bandymai gali būti atlikti ne kapinyne vietovėje esančioje požeminėje laboratorijoje. Šiame etape bandymų komplekso vieta nėra fiksuojama ir gali būti nustatyta vėlesniuose tyrimų etapuose.

Kad visos atvežamos į kapinyną atliekos būtų patalpintos jame saugiai, turi būti atlikta nemažai operacijų nuo atliekų priėmimo ir talpinimo laidojimo konteineriuose iki konteinerių patalpinimo galutinio laidojimo vietoje bei užsandarinimo. Visuose požeminiuose įrenginiuose reikia ventilacijos, maitinimo, saugojimo ir avariinių sistemų. Taip pat reikalinga PBK talpinimo į laidojimo konteinerius gamykla, užpildo medžiagų paruošimo gamykla, monitoringo ir transporto priemonių dezaktyvacijos zonos ir visos administracijos bei parkavimo zonos, susijusios su moderniomis pramoninėmis operacijomis. Šie įvairūs pastatai bus pastatyti įrengiant kapinyną. Baigus statybos darbus, kai kurie pastatai bus išmontuoti arba sumažinti, o kiti pastatai bus palikti.

2.3. Varinio laidojimo konteinerio branduolinio kritiškumo analizė

Varinio laidojimo konteinerio branduolinio kritiškumo analizė buvo atliekama SCALE 4.3 kompiuterinių kodų sistemos seka CSAS25 [10]. Atliekant kritiškumo įvertinimą, uždavinio sąlygos bei prielaidos buvo formuojamos taip:

- Laidojimo konteineris yra maksimaliai užpildytas, t. y. laidojimo konteinerio intarpe yra 32 cilindrinės formos kiaurymės ir kiekvienoje iš jų viduje yra kuro pluoštas;

- Aprašant geometriją, laikoma, kad kiekvieną pluoštą sudaro 18 šilumą išskiriančių elementų, t. y. nėra atliekamas homogenizavimas;

- Intarpo kiaurymės ir vidinė sritis tarp intarpo ir kanistro korpuso yra homogeniškai užpildyta vandeniu. Laikoma, kad vandens tankis kinta nuo 0,1 g/cm³ iki 1,0 g/cm³. Vandens tankio variacija įgalina sumodeliuoti sistemos kuras–intarpas–kanistro korpusas reaktyviausią būseną;

- Kuro pluoštus sudaro tik šviežias, neišdegęs kuras (išdegimas nevertinamas), kuriame ²³⁵U įsodrinimas yra 2,8%;

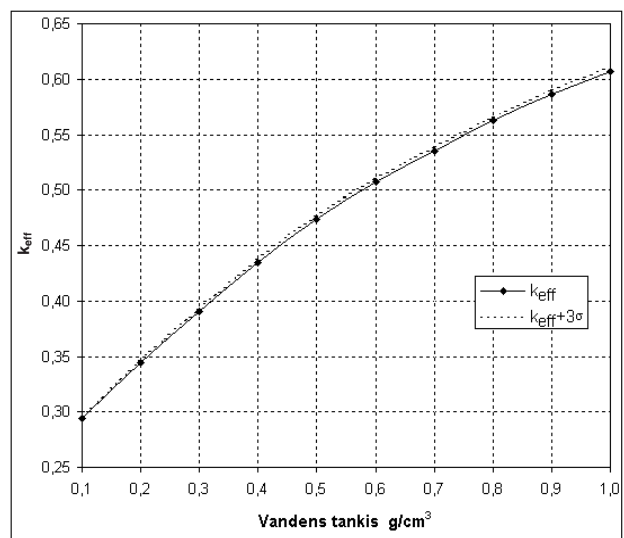
- Laikoma, kad pluoštuose esantys kuro strypai, pluoštai, kanistro intarpas bei korpusas yra nepažeisti;

- Nėra neutronų nuotėkio iš sistemos, tai realizuojama nustatant kraštinę visiško atspindžio nuo išorinio kanistro paviršiaus sąlygą;

- Laikoma, kad kuro strypus sudaro cilindrinės UO₂ tabletės ir jas supantis apvalkalas (Zr+1% Nb), laidojimo konteinerio intarpas yra anglinio plieno (sudėtiniai elementai: Fe, C), o korpusas yra varinis (Cu);

- Laidojimo konteinerio intarpo kiaurymės išdėstytos kvadratinio tinklelio mazguose. Nominalus atstumas tarp kiaurymių centrų yra 140 mm.

Varinio laidojimo konteinerio efektyviojo neutronų daugėjimo koeficiento priklausomybė (įvertinant 3 standartinius nuokrypius) nuo vandens tankio pavaizduota 3 pav. Matyti, kad k_{eff} reikšmės monotoniškai didėja didėjant vandens tankiui ir pasiekia 0,61 reikšmę, kai vandens tankis yra 1,0 g/cm³. Pagrindinis branduolinės saugos reikalavimas teigia, kad sistemos, kurioje yra skylanti medžiaga, efektyvusis neutronų daugėjimo koeficientas turi būti mažesnis nei 0,95. Taigi, kai ilgalaikiai procesai (korozija, degradavimas ir t. t.) nėra vertinami, varinio laidojimo kanistro efektyvusis neutronų daugėjimo koeficientas k_{eff} yra mažesnis nei leistina 0,95 reikšmė.



3 pav. Efektyviojo neutronų daugėjimo koeficiento k_{eff} priklausomybė nuo vandens tankio

2.4. Varinio laidojimo konteinerio dozės galios įvertinimas

Dozės galios reikšmės bus svarbios, kai PBK po saugojimo periodo bus patalpintas į laidojimo konteinerius ir perkeltas į kapinyną. Kapinyne su laidojimo konteineriais yra atliekamos įvairios operacijos, todėl turi būti įvertinta radioaktyvi personalo apšvita. Paprastai dozės galia yra apskaičiuojama ant laidojimo konteinerio paviršiaus ir tam tikru atstumu nuo jo. Apskaičiuotas dozės galios lygis parodo, kokios priemonės (pvz., nuotolinis valdymas, papildoma apsauga) turėtų būti įdiegtos, kad atitiktų radiacinės saugos reikalavimus.

Norint apskaičiuoti dozės galios reikšmes, reikia spręsti du uždavinius. Pirmia, reikia apskaičiuoti apšvitintos kuro rinklės charakteristikas (skilimo produktų bei aktinoidų koncentracijas, neutronų ir γ -kvantų

emisiją iš šaltinio ir t. t.). Antra, apskaičiavus PBK charakteristikas, atlikti dozės galios skaičiavimus ant laidojimo konteinerio paviršiaus ir tam tikru atstumu nuo jo. Šių uždavinių sprendimui buvo panaudotos SCALE 4.3 kompiuterinių kodų sistema [10].

Pagrindiniai duomenys, kurie įvedami į SCALE 4.3 sistemos SAS2H seką, yra kuro rinklę, reaktoriaus technologinį kanalą ir laidojimo kanistrą sudarančių medžiagų elementinė sudėtis, cheminių elementų koncentracijos, temperatūros; geometriniai rinklės, technologinio kanalo ir konteinerio matmenys; specifinis technologinio kanalo galimumas, kuro rinklės buvimo reaktoriuje laikas, ciklų skaičius, aušinimo laikas; dozės galios skaičiavimo taškų koordinatės.

SAS4 sekos įvedimo duomenys yra kuro rinklę, laidojimo kanistrą ir jo konstrukcijas sudarančių cheminių elementų koncentracijos; temperatūros; spinduliuotės šaltinio charakteristikos; dozės galios skaičiavimo taškų koordinatės.

Atliekant kuro rinklės apšvitinimo modeliavimą, buvo priimamos tokios prielaidos:

- RBMK-1500 kuro rinklė, kurią sudaro 18 kuro strypų, buvo homogenizuota ir reaktoriaus technologiniame kanale aprašyta kaip 5 koncentrinė cilindrinė sistema;
 - 2,8% ^{235}U kuro įsodrinimas, išdegimas – 30 MWd/kgU, apšvitinimo laikas – 3 metai, aušinimo laikas – 50 metų;
 - Ašinis kuro rinklės išdegimo netolygumas nebuvo vertinamas.
- Skaičiuojant dozės galios vertes, prielaidos buvo šios:
- Trimatis geometrijos aprašymas SAS4 sekoje ir vienmatis aprašymas – SAS2H sekoje;
 - Spinduliuotės šaltinis modeliuojamas kaip homogeninis cilindro formos kūnas, kurį sudaro 32 kuro pluoštai ir kanistro tarpas;
 - Skaičiavimo taškai parinkti taip, kad būtų ties kanistro šoninio paviršiaus pusiauju, dangčio, dugno centrais, 0, 1, 2 metrų atstumais nuo paviršiaus;
 - PBK aušinimo (arba saugojimo) laikas – 50 metų.

Panaudojus anksčiau minėtas prielaidas, buvo apskaičiuota PBK nuklidinė sudėtis, aktyvumai, neutronų ir gama šaltinių charakteristikos ir dozės galios reikšmės ant varinio kanistro paviršiaus ir tam tikru atstumu nuo jo.

Lygiavertės dozės galios skaičiavimo rezultatai yra pateikti 4 paveiksle, kuriame pavaizduotos suminės lygiavertės dozės galios reikšmės įvairiomis kryptimis ir atstumais varinio kanistro atžvilgiu. Kaip matyti, ant paviršiaus jos yra gana didelės – per 500 mSv/h. Pagal švedų KBS-3 koncepciją, maksimali leistina dozės galios reikšmė ant laidojimo konteinerio paviršiaus yra 1 Sv/h [6]. Ant plieninio šveicariško laidojimo konteinerio paviršiaus dozės galia yra 35 mSv/h [11]. Tuo tarpu maksimali projektinė dozės galios reikšmė ant saugojimo konteinerių CASTOR RBMK-1500 ir CONSTOR RBMK-1500 paviršiaus yra 1 mSv/h.

Suminę lygiavertę dozės galią sukelia neutronai ir gama spinduliuotė. Duomenų analizė parodė, kad gama

spinduliuotės sukelta dozės galia vyrauja visomis kryptimis ir atstumais.

2.5. Temperatūros pasiskirstymo panaudoto branduolinio kuro patalpinimo tuneliuose modeliavimas

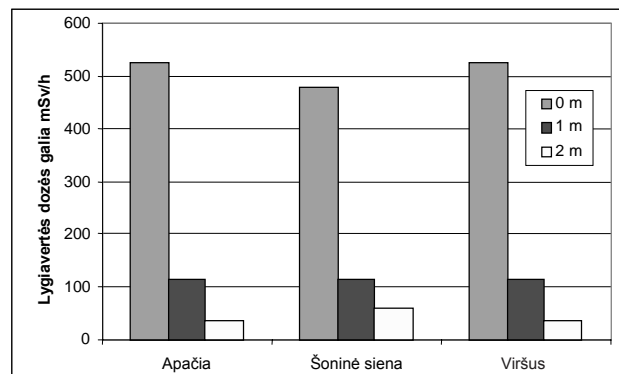
Šiame skyriuje apžvelgiami temperatūros kitimo PBK talpinimo tuneliuose skaičiavimai, naudojant FLUENT 6.1 kompiuterinį kodą [9].

Laidojimo konteineris turi atitikti ne tik mechaninius, cheminius ir kt., bet ir šiluminius reikalavimus. Priimama, kad maksimali konteinerio paviršiaus temperatūra turi būti ne aukštesnė kaip 100°C, siekiant išvengti virimo prie konteinerio paviršiaus (virimo metu konteinerio paviršius gali prisisotinti druskomis, kurios gali sukelti koroziją, taip pat pakeisti bentonito savybes ir pan.).

Lietuvos kapinyno kristalinėje uolienoje koncepcija aptarta ankstesniame skyriuje ir numatyta konteinerius talpinti horizontaliai. Temperatūros pasiskirstymas PBK tuneliuose buvo skaičiuojamas naudojant FLUENT 6.1 kompiuterinį kodą. FLUENT – tai šiuolaikinė kompiuterinės fluidų dinamikos programa, kuri plačiai taikoma visame pasaulyje modeliuojant fluidų tėkmes ir šilumos mainus sudėtingose dvimatėse arba trimatėse geometrijose. Kadangi šiuo atveju buvo analizuojamas trimatis modelis, tai FLUENT tokiu atveju sprendžia trimatę šilumos laidumo lygtį, aprašančią temperatūros pasiskirstymą. Buvo priimta, kad šiluma plis vien laidumu, nes konvekcijos įtaka bus nedidelė, dėl mažo dujų ir hidraulinio supančiųjų uolienu bei bentonito laidumo.

Kadangi Lietuvoje nepakanka informacijos apie geologinių formacijų geotechnines savybes, todėl skaičiavimams buvo naudojami Švedijos [6] bei Šveicarijos [11] planuojamų kapinynų aplinkos parametrai. Nors tikėtina, kad kristalinė uoliena prasideda arčiau žemės paviršiaus (apie 300 m gylyje) negu opalinis molis Šveicarijoje (apie 550 m gylyje), tačiau šiuo atveju, konservatyviai, temperatūros gradientas buvo toks pat kaip ir modeliuojant su šveicarų aplinkos parametrais.

Horizontaliam laidojimo konteinerių patalpinimui Lietuvoje pasirinkta technologija naudojant vandens pagalves kaip ir Švedijoje. Naudojant šią techniką laidojimo konteineris bei jį supantis suspaustas bentonitas patalpinamas tunelyje tuo pačiu metu, todėl tarp bentonito ir kasimo



4 pav. Suminės lygiavertės dozės galios reikšmės ant varinio laidojimo konteinerio paviršiaus ir tam tikru atstumu nuo jo

sutrikdytos zonos (KSZ) susidaro tarpelis. Maždaug per 10 metų po konteinerio ir bentonito patalpinimo tunelyje šis tarpelis išnyksta dėl bentonito brinkimo. Dėl to, kad tarpelis greitai užsipildo, atliekant skaičiavimus buvo priimta, kad tarpelio nėra. Vis dėlto ateityje, skaičiuojant temperatūros pasiskirstymą PBK patalpinimo tuneliuose, būtų tikslinga įvertinti ir tarpelio įtaką. Skaičiavimuose konservatyviai priimta, jog tunelio skersmuo ne 1,85 m, o 1,75 m. Atstumas tarp konteinerių – 1,2 m.

Kadangi analizuojamas objektas yra simetriškas, todėl siekiant pagreitinti kompiuterinius skaičiavimus modeliuojama tik $\frac{1}{4}$ jo dalis. Trimačio modelio tinklėly sudaro maždaug 400000 aštuonmazgių elementų. Tinklėlis sutankintas labiausiai dominančiose vietose, t. y. vario, bentonito ir KSZ zonos.

Šilumos srautai ant vertikalių modelio pusių (simetrijos plokštumų) buvo priimti lygūs nuliui.

Konteineriai yra skirti saugoti 16 (32 pluoštus) panaudoto RBMK-1500 branduolinio kuro rinklių, kurių pradinis išsodinimas 2,8%, o išdegimas 30 MWd/kgU. Naudojant SCALE 4.3 sistemos kompiuterinio kodo ORIGEN-S seką [10] buvo įvertinta liekamojo šilumos išsiskyrimo iš laidojimo konteineriye esančio PBK priklausomybė nuo laiko, praėjus 50 metų po laikino saugojimo (palaidojimo) kapinyne atskaitymo pradžia – nulis metų).

Modelyje naudojamų medžiagų (vario ir uolienų) šilumos laidumai, specifinės šilumos ir tankiai buvo paimti iš [6] bei [11] literatūros. Priimta, kad šilumos laidumas tiek vertikalia, tiek horizontalia kryptimi šiuo atveju yra vienodas.

Skaičiavimai buvo atlikti esant vienodam atstumui tarp konteinerių, tačiau skirtingam bentonito drėgnumui. Iš viso analizuoti du atvejai, kai bentonitas yra dalinai drėgnas ir kai yra pilnai prisotintas vandeniu (drėgnas). Mažas šilumos laidumas yra tada, kai bentonitas yra dalinai drėgnas (su mažu drėgmės kiekiu), ir apie 3 kartus didesnis, kai bentonitas yra pilnai prisotintas vandeniu [6]. Panašūs skirtumai yra ir tarp bentonito specifinių šilumų.

Temperatūros horizontaliuose PBK patalpinimo tuneliuose kitimas laike pavaizduotas 5 paveiksle. Rezultatai rodo, kad esant dalinai drėgnam ir turinčiam mažesnę šilumos laidumą bentonitui, aukščiausia ($\approx 92^\circ\text{C}$) varinio konteinerio išorės temperatūra (T1) pasiekama per keletą metų. Maždaug po 100 metų ši temperatūra nukrenta iki 66°C . Temperatūra bentonito sluoksnio centre (T2) visą laiką išlieka žemesnė nei 76°C . Kristalinės uolienos temperatūra (T6) viduryje tarp tunelių pasiekia didžiausią 47°C reikšmę maždaug praėjus 100 metų nuo konteinerio patalpinimo į tunelį. Modeliavimo rezultatai taip pat rodo, jog temperatūra vidurio taške tarp konteinerių (T7) niekada nepakyla aukščiau kaip 74°C . Tai didžiausia taško T7 reikšmė, pasiekama po maždaug 30 metų.

2.6. Radionuklidų sklaidos iš konceptualaus kapinyno modeliavimas

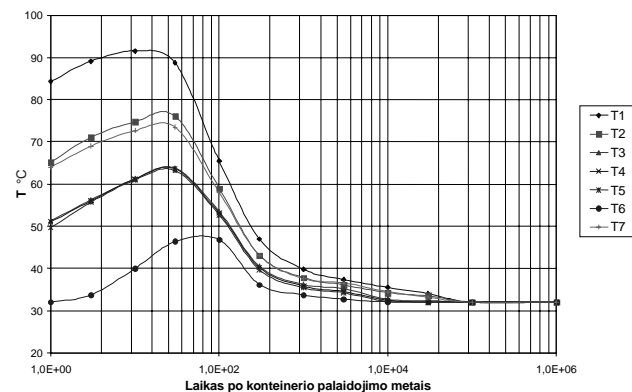
Defektuoto laidojimo konteinerio scenarijus yra vienas pagrindinių scenarijų vertinant kapinyno saugą. Jei į nesandarų laidojimo konteinerį patenka vanduo, jame iš-

tirpę radionuklidai gali skliti iš laidojimo konteinerio daugiausia difuzijos būdu ir pro esantį konteinerio defektą pasiekia buferį. Kai buferio medžiaga yra prisotinusis vandens, radionuklidai buferiu sklinda tik difuzijos buferio porose esančiame vandenyje būdu ir galbūt buferį sudarančio molio dalelių paviršiumi. Dėl buferio medžiagos savybių nevyksta nei advekcija, nei pernešimas kartu su koloidinėmis dalelėmis. Radionuklidai gali sorbuotis ant montmorilonito paviršiaus. Šio proceso atžvilgiu svarbi yra radionuklido cheminė forma (būseną), kurią lemia buferiye esančios cheminės sąlygos.

Pernešimo (sklaidos) keliai defektuoto laidojimo konteinerio viduje priklauso nuo pirminės konteinerio ir PBK geometrijos ir nuo korozijos sąlygotų pokyčių. Kad į konteinerį patenkantis vanduo pasiektų PBK matricą ir dėl to išsilaisvintų radionuklidai, turi būti susidaręs kelias (defektas) ketaus intarpe ir cirkonio lydinio kuro apvaskale. Netgi jei tokių defektų ir būtų, tikėtina, kad likusios intarpo ir apvaskalo dalys bus efektyvūs barjerai tiek vandens įtekėjimo, tiek radionuklidų sklaidos atžvilgiu. Kadangi pernešimo kelių geometrijos įvertinimas yra labai neapibrėžtas, atliekant radionuklidų sklaidos vertinimus priimami supaprastinimai.

Dėl mažo buferio hidraulinio laidumo tikėtina, kad radionuklidai sklis buferiu difuzijos būdu. Kai kurie kationai yra mobilūs netgi ant molio dalelių susidariusiame (sorbuotame) sluoksnyje. Šį procesą paaiškinti galima remiantis paviršinės difuzijos teorija. Taip pat kai kuriems radionuklidams gali vykti anijonų išstūmimo efektas dėl stūmos tarp neigiamą krūvį turinčių radionuklidų ir neigiamą krūvį turinčių porų paviršių.

Radionuklidai iš buferio/užpildo į uolienose tekantį požeminį vandenį sklinda difuzijos būdu. Taigi radionuklidų pernešimo efektyvumas priklauso nuo kontakto tarp buferio ar užpildo su požeminiu vandeniu geometrijos.

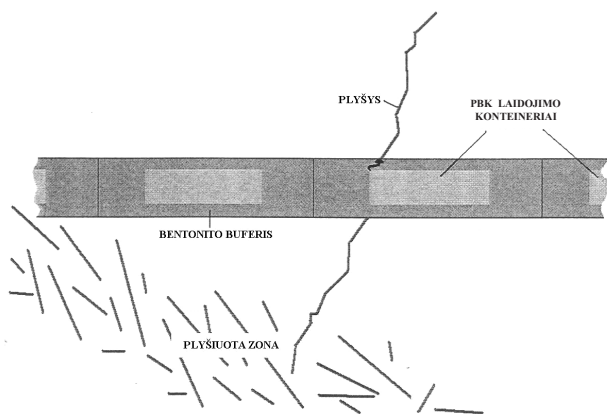


5 pav. Temperatūros PBK patalpinimo tuneliuose kitimas laike, esant mažam bentonito šilumos laidumui (dalinai vandeniu prisotintas bentonitas) [9]. Taškai T1–T7 žymi vietas, kuriose buvo skaičiuojamos temperatūros: T1 – temperatūra ant išorinio konteinerio paviršiaus, T2 – temperatūra bentonito sluoksnio centre, T3 – temperatūra ant išorinio bentonito paviršiaus, T4 – temperatūra KSZ sluoksnio centre, T5 – temperatūra KSZ sluoksnio išorėje, T6 – temperatūra kristalinėje uolienoje viduryje tarp tunelių, T7 – temperatūra vidurio taške tarp konteinerių

Uolienose radionuklidai gali sklisti kartu su tekančiu požeminiu vandeniu advekcijos būdu. Tačiau tarp plyšių esančios uolienos turi mikroplyšelių, kuriuose požeminis vanduo nejuda. Radionuklidai gali difunduoti į šiuos mikroplyšelius, o šis reiškinys vadinamas matricine difuzija. Dėl matricinės difuzijos radionuklidai difunduoja į nejudantį uolienos mikroplyšiuose esantį vandenį ir todėl yra užlaikomi ir pernešami lėčiau nei kartu su tekančiu vandeniu. Radionuklidų sklaidos atžvilgiu svarbus yra radionuklidų sorbcijos ant uolienos porų paviršiaus ir plyšių paviršiaus procesas. Sorbcijos sąvoka apima daug įvairių sulaikymo procesų ir mechanizmų, dėl kurių radionuklidai sukimba su uolienų paviršiumi ar kitų medžiagų paviršiumi, pvz., ant plyšių paviršiaus galimų molio mineralų. Sorbcijos stiprumas priklauso nuo jonų cheminių savybių ir bet kurių kompleksinių reagentų buvimo.

Jei radionuklidai ištirpę vandenyje ir nesąveikauja su supančia aplinka, jų pernešimo greitį lemia vandens tekėjimo greitis. Jei radionuklidai gali difunduoti į uolienos matricą ir čia sorbuotis, tai reikš didelį radionuklidų užlaikymą ir jų pernešimo greitį iš esmės lems plyšių geometrija ir vandens greitis, taip pat ir matricos sorbcinės ir difuzinės savybės.

Sorbuojami radionuklidai iš esmės gali nebūti suvėlinami (užlaikomi) ir sklisti vandens tekėjimo greičiu, jeigu jie prisijungia prie požeminiame vandenyje esančių koloidinių dalelių. Atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad Švedijos uolienose kapinyno įrengimo gylyje esančiame vandenyje koloidų koncentracija yra maža. Jei radionuklidų sorbcija ant koloidinių dalelių yra grįžtama, tai šis procesas gali būti įvertinamas sumažinant sorbcijos koeficiento K_d reikšmę, čia sumažinimo veiksnys yra atvirkščiai proporcingas koloidų koncentracijai ir polinkio sorbuotis ant koloidinių dalelių. Buvo nustatyta, kad sumažinimo veiksnys yra nereikšmingas esant didžiausiai koloidų koncentracijai Švedijos kristalinėse uolienose. Netgi jei radionuklidų sorbcija ant koloidų yra negrįžtama, tai remiantis apibendrintais skaičiavimų rezultatais proceso galima nevertinti dėl mažos koloidinių dalelių koncentracijos. Tuo remiantis nebuvo priežasčių įvertinti radionuklidų pernešimą kartu su koloidinėmis dalelėmis.

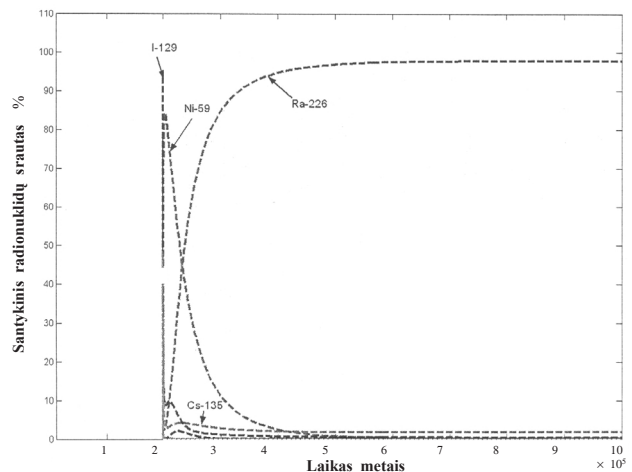


6 pav. Bufertį, supantį PBK laidojimo konteinerį, kertančio plyšio scheminis vaizdas [12]

Radionuklidams patekus į biosferą, jie toliau sklinda įvairiose ekosistemose, kuriose gali ne tik skiestis (pvz., paviršiniuose vandenyse ir pan.), bet ir kauptis (pvz., ežero dugno nuosėdose ir pan.), pasiekti augalus, gyvūnus ir taip sąlygoti žmonių apšvitą. Vertinant radionuklidų sklaidą buvo priimta, kad svarbiausias radionuklidų pernešimo kelias yra jų sklaida patalpinimo tunelį kertančiu plyšiu, kertančiu buferį ties defektu (6 pav.).

Preliminarūs radionuklidų sklaidos artimojo lauko aplinkoje vertinimo rezultatai parodė, kad daugelis saugos požūriū svarbių (reikšmingų) radionuklidų bus efektyviai sulaikomi artimojo lauko aplinkoje (bentonito buferyje), žymesni yra ^{59}Ni , ^{135}Cs , ^{129}I , ^{226}Ra , ^{94}Nb , ^{10}Be srautai. Iškart kai tik vanduo pasiekia PBK matricą, radionuklidų srautą nulemia radionuklidai ^{14}C , ^{129}I , o labai greitai po to suminių radionuklidų srautą nulemia ^{59}Ni . Šių radionuklidų akimirksniu tirpstanti dalis (IRF) greičiau pereina artimojo lauko aplinką (struktūrinėse PBK rinklės dalyse esančio radionuklidų ^{59}Ni atveju priimta, kad struktūrinės rinklės dalys yra sukorodavusios ir nesudaro barjero ^{59}Ni sklaidai, ^{59}Ni IRF prilygintas lygus 100%). Praėjus apie 15 tūkst. metų suminių radionuklidų srautą nulemia ^{226}Ra radionuklidas, susidarantis ^{238}U PBK matricoje skilimo grandinėės metu (7 pav.). Jo srauto neriboja tirpumo riba, nes radionuklidų koncentracija laidojimo konteineryje esančiame vandenyje nepasiekia tirpumo ribos. Radionuklidų sklaidos analizė parodė, kad radionuklidų ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{229}Th , ^{230}Th , ^{232}Th , ^{242}Pu , ^{231}Pa , ^{79}Se , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd koncentracija konteineryje esančiame vandenyje pasiekia savo tirpumo ribą ir tokiu būdu riboja radionuklidų srautą iš artimojo lauko.

Vertinant radionuklidų sklaidą tolimajame lauke, radionuklidų sklaidą veikiančių parametų vertės parinktos būdingos pietinei, pietrytinei Lietuvos teritorijai, kuri atsižvelgiant į kristalinio pamato uolienų slūgsojimo gylį yra įvardijama kaip galima kapinyno įrengimo vieta. Jei tokie duomenys neprieinami, priimtoms Beberg vietai (Švedija) būdingos parametų vertės. Skaičiavimo rezultatai parodė, kad radionuklidų srautas iš tolimojo



7 pav. Radionuklidų indėlis į suminių radionuklidų srautą iš artimojo lauko [12]

lauko aplinkos yra panašus į srautą iš artimojo lauko, pastebėta kai kurių radionuklidų srauto sumažėjimas (^{94}Nb , ^{59}Ni , ^{135}Cs) ir vėlinimas (^{94}Nb). Srauto sumažėjimui ir vėlinimui įtakos turėjo radionuklidų sorbcija ant plyšių paviršiaus, difuzija į uolienas ir sorbcija ant uolienose esančių porų paviršiaus. Radionuklidų srauto iš artimojo ir tolimojo lauko priklausomybių nuo laiko panašumas gali būti paaiškintas tuo, kad defektuotas laidojimo konteineris buvo patalpintas plyšiuotoje zonoje ir radionuklidai iš bentonito buferio išorinės dalies difunduoja į bentonitą kertantį plyšį, esantį toje plyšiuotoje aplinkoje. Dėl tokių procesų, kaip matricinė difuzija ir sorbcija (sorbuojamiems radionuklidams), radionuklidai yra užlaikomi geosferoje, todėl daugiau jų suskyla dėl radioaktyviojo skilimo. Sorbcijos ir matricinės difuzijos procesų įtaka (poveikis) priklauso nuo to, kiek laiko jie sklinda nagrinėjamoje aplinkoje. Iš gautų rezultatų matyti, kad radionuklidų pernaša modeliuojamoje kristalinio pamato srityje yra sparti. Pradžioje radionuklidų srautą iš tolimojo lauko aplinkos lemia daugiausia jodas ^{129}I , o po kurio laiko ^{226}Ra . Tai nėra tikėtina situacija kapinyno eksploatacijos pradžioje, nes laidojimo konteinerių patalpavimo kapinyne metu patalpavimo plyšiuotose zonose bus išvengta. Tačiau negalima paneigti, kad tokia situacija nesusidarys ateityje.

3. IŠVADOS

Panaudoto branduolinio kuro (PBK) tarpiniam saugojimui Ignalinos AE įdiegta sauso tipo „saugojimo-transportavimo“ technologija, t. y. PBK saugomas metaliniuose ir metalo–betono konteineriuose. Tokių Vokietijos GNB firmos pagamintų specialaus ketaus ir metalo–betono konteinerių išgyta 80 vnt. Jie yra laikomi atviro tipo saugykloje. Šiuo metu Ignalinos AE pradėtas įgyvendinti naujas projektas, kurio tikslas yra pastatyti naują PBK saugyklą visam likusiam Ignalinos AE PBK saugoti. Tam bus naudojami tos pačios firmos didesnės talpos konteineriai (apie 200 vnt.), kurie bus patalpinti specialiai pastatytame pastate-saugykloje.

2003 m. buvo parengta ir patvirtinta „Panaudoto branduolinio kuro ir ilgalaikių radioaktyviųjų atliekų laidojimo galimybių įvertinimo programa 2003–2007 m.“. Vykdamas šią programą atlikti geologiniai ir hidrogeologiniai tyrimai leido padaryti išvadą, kad kristalinės uolienos ir molingosios geologinės formacijos yra perspektyviausios geologiniam kapinynui įrengti Lietuvoje. Taip pat vykdamas šią programą buvo pasiūlyta preliminari kapinyno koncepcija, atlikti preliminarūs radionuklidų sklaidos, šilumos nuvedimo, kritiškumo ir radiacinės situacijos vertinimai.

Gauta 2006 08 31

Parengta 2006 09 27

Literatūra

1. Danker W. J. Current Status of IAEA Activities in Spent Fuel Management // Proceedings of the 7th International Conference on Nuclear Criticality Safety (ICNC 2003). Tokai, Ibaraki, Japan, October 20–24, 2003. P. 17–22.
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of spent fuel from power reactors // Proceedings of a Symposium held in Vienna, 9–13 November 1998. IAEA-TECDOC-1089. Vienna, 1999.
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent fuel performance assessment and research. IAEA-TECDOC-1343. Vienna, 2003.
4. Kanopiene R., Marcinkevičius V. Possibilities for developing deep radioactive waste repository in Lithuania // Proc. Conf., Budapest, Hungary. 2000. P. 251–261.
5. Suitability of Geological Environment in Lithuania for Disposal of Spent Nuclear Fuel // Investigations of Possibilities to Dispose of Spent Nuclear Fuel in Lithuania: a Model Case. 2005. Vol. 1. P. 66.
6. SR 97. Waste, repository design and sites // Technical Report TR-99-08, Stockholm: SKB, 1999. P. 90.
7. Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes // Technical report series No. 413. Vienna: IAEA, 2003. P. 80.
8. Brazauskaitė A., Poškas P. Radionuklidų sklaida iš kristalinės uolienose įrengto geologinio kapinyno RBMK-1500 panaudotam branduoliniam kurui laidoti. 1. Kapinyno koncepcija // Energetika. 2005. Nr. 3. P. 70–78.
9. Poškas P., Brazauskaitė A., Narkūnas E., Šmaižys A., Sirvydas A. Generic repository concept for RBMK-1500 spent nuclear fuel disposal in crystalline rocks in Lithuania // TopSeal 2006 Conference, September 17–20, 2006, Olkiluoto, Finland.
10. SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, Vols. I–III, NUREG/CR-0200, Rev. 5 (ORNL/NUREG/CSD-2/R5), March 1997.
11. 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, Wetztingen, 2002.
12. Brazauskaitė A., Poškas P. Modeling of radionuclide releases from the near field of the geological repository in crystalline rocks for RBMK-1500 spent nuclear fuel // TopSeal 2006 Conference, September 17–20, 2006, Olkiluoto, Finland.

Povilas Poškas, Artūras Šmaižys

STORAGE OF SPENT NUCLEAR FUEL AND PERSPECTIVES FOR IT DISPOSAL

Summary

For the interim storage of spent nuclear fuel (SNF), a dry storage-transportation technology in cast iron and metal–concrete casks is implemented at the Ignalina NPP. At the moment, 80 GNB (Germany) casks are stored at an open type facility. A

new project of a storage facility for the remaining SNF has been started recently. Higher capacity metal concrete containers (about 200 units) of the same company will be stored in a closed type (special building) facility.

In 2003, The Programme of Assessment of Possibilities of the Disposal of Spent Nuclear Fuel and Long-lived Radioactive Waste for the years 2003–2007 was prepared and approved. Geological and hydrogeological investigations performed in the frame of this program revealed that crystalline rocks and clayey geological formations are most promising for the geological disposal of SNF in Lithuania. The preliminary concept of the repository was developed, and preliminary investigations on nuclide migration, heat removal, criticality and radiation fields have been performed.

Key words: Ignalina NPP, spent nuclear fuel, intermediate storage, disposal, criticality, radiation doses, heat removal, nuclide migration

Повилас Пошкас, Артурас Шмайжис

ХРАНЕНИЕ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ЗАХОРОНЕНИЯ

Резюме

На Игналинской АЭС для промежуточного хранения отработанного ядерного топлива (ОЯТ) внедрена техноло-

гия его сухого хранения-транспортирования в металлических (чугунных) и металлобетонных контейнерах. В настоящее время на открытой площадке хранятся 80 контейнеров фирмы *GNB* (Германия). Недавно начато строительство нового хранилища для остального ОЯТ. Будут использоваться металлобетонные контейнеры той же фирмы (около 200 шт.) большей емкости, которые будут храниться в специальном здании.

В 2003 г. была подготовлена и утверждена „Программа на 2003–2007 гг. для оценки возможности захоронения отработанного ядерного топлива и долгоживущих радиоактивных отходов“. Проведенные в рамках этой программы геологические и гидрогеологические исследования показали, что кристаллические и глиняные породы являются наиболее перспективными для захоронения ОЯТ в Литве. Была также разработана предварительная концепция могильника и проведены прелиминарные исследования миграции радионуклидов, отвода тепла, критичности и радиационных полей.

Ключевые слова: Игналинская АЭС, отработанное ядерное топливо, промежуточное хранение, захоронение, критичность, радиационные дозы, отвод тепла, миграция радионуклидов