

SU SAUGA SUSIJĘ GILUMINIO
ATLIEKYNO ĮRENGIMO LIETUVOJE
KRITERIJAI

TURINYS

Santrumpos / 3

01. ĮVADAS / 4

02. RA ATLIEKYNUI POTENCIALIOS FORMACIJOS / 4

03. SAUGOS KRITERIJŲ APIBRĖŽIMO METODAS / 5

04. SAUGOS FUNKCIJOS / 6

05. SCENARIJAI IR KONCEPTUALIEJI MODELIAI / 7

06. ILGALAIKĖS SAUGOS VERTINIMAS / 8

07. LIETUVOS GA SAUGOS KRITERIJAI / 8

08. IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS / 9

Literatūros sąrašas / 11

SANTRUMPOS

FEP	/ Savybės, įvykiai ir procesai	RA	/ Radioaktyviosios atliekos
GA	/ Giluminis radioaktyviųjų atliekų atliekynas	PBK	/ Panaudotas branduolinis kuras
IAE	/ VĮ Ignalinos atominė elektrinė	TATENA	/ Tarptautinė atominės energijos agentūra
IBS	/ Inžinerinių barjerų sistema	TRSK	/ Tarptautinė radiologinės saugos komisija
LGT	/ Lietuvos geologijos tarnyba prie Aplinkos ministerijos	VATESI	/ Valstybinė atominės saugos inspekcija
LR	/ Lietuvos Respublika	VĮ	/ Valstybės įmonė

Šią santrauką parengė VĮ Ignalinos atominė elektrinė pagal Suomijos įmonės „Posiva Solutions Oy“ 2022-2023 metais atliktą studiją-darbą „Bendrujų Giluminio atliekyno įrengimo Lietuvoje saugos kriterijų parengimas“.

01 ĮVADAS

1. Bendroji informacija

Darbo tikslas – vadovaujantis LR teisės aktais, reglamentuojančiais RA saugojimą atliekynuose, TATENA rekomendacijomis, geriausia tarptautine praktika ir atsižvelgiant į konkrečias Lietuvos sąlygas (geologines sąlygas, RA savybes, preliminarius RA priimtumo kriterijus ir kt.), atlikti geologinių formacijų, potencialiai tinkamų GA statybai Lietuvoje, bendrąjį saugos vertinimą ir parengti bendruosius saugos kriterijus GA statybai Lietuvoje.

Bendrieji saugos kriterijai – tai branduolinės saugos kriterijų rinkinys, privalomas bet kokio tipo ar koncepcijos giluminiam atliekynui, įrengiamam bet kurioje potencialiai tinkamoje geologinėje formacijoje. Potenciali formacija – tai geologinė formacija, potencialiai tinkama giluminiam atliekynui įrengti. Potencialios formacijos Lietuvoje yra kristalinis pamatas, kambro ir triaso moliai bei permio evaporitai (anhidritas ir akmens druska).

2. GA programa Lietuvoje

GA, skirta ilgą laiką saugoti radioaktyviuosius atliekus, įskaitant panaudotą branduolinį kūrą, įrengimas Lietuvoje numatytas naujoje 2021–2030 m. branduolinės energetikos objektų eksploatacijoje.

nutraukimo ir radioaktyviųjų atliekų tvarkymo plėtros programoje.

Plėtros programos tikslas – saugiai nutraukti branduolinės energetikos objektų eksploatacijoje ir sutvarkyti visus Lietuvoje esančius susidariusiančius radioaktyviuosius atliekus, siekiant apsaugoti žmones ir aplinką nuo žalingo jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio ir nepalikti nepelnytų naštos ateities kartoms.

Planuojama, kad iki 2030 m. VĮ IAE įgyvendins 30 % giluminio atliekyno aikštelių parinkimo tyrimų programos. Galutiniame etape bus atliktas poveikio aplinkai vertinimas ir alternatyvių aikštelių lyginamoji analizė. Konkreti aikštelė bus pasirinkta atsižvelgiant į technines, socialines ir ekonomines sąlygas. Planuojama GA aikštelės parinkimo tyrimų programą įvykdyti iki 2047 m.

3. Reguliavimo sistema

Teisinės ir reguliavimo sistemos analizė rodo, kad Lietuva turi pakankamai teisės aktų, pagrįstų gerą tarptautinę praktiką ir rekomendacijas, ir atsakingų institucijų, kad galėtų sėkmingai įgyvendinti giluminio atliekyno projektą. Nustatyti radioaktyviųjų atliekų atliekyno planavimo saugos reikalavimai.

Remiantis TATENA, kitais tarptautiniais standartais ir konvencijomis LR Vyriausybė paskirtai reguliavimo institucijai (VATESI) ir operatoriui (IAE) delegavo atitinkamas atsakomybes.

Lietuvos teisės aktai rodo, kad aukščiausio lygio reikalavimai nustatyti įstatymuose, teisės aktuose ir nutarimuose, o išsamesni RA atliekynams keliami reikalavimai nustatyti nacionalinės reguliavimo institucijos nuostatuose.

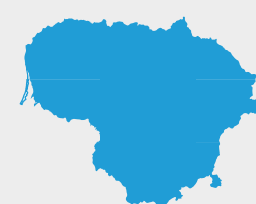
Poveikio aplinkai vertinimas atliekamas, kai planuojama ūkinė veikla yra įtraukta į planuojamos ūkinės veiklos rūšių, kurioms turi būti atliekamas poveikio aplinkai vertinimas, sąrašą arba kai atrankos metu nustatoma, kad planuojamai ūkinei veiklai poveikio aplinkai vertinimas yra privalomas.

Saugos kriterijai (apribotoji dozė) taip pat nustatyti nacionaliniuose teisės aktuose. Lietuvoje apribotoji dozė yra 0,2 mSv ir ji atitinka TRSK rekomenduojamą apribotosios dozės vertę – ne daugiau kaip 0,3 mSv.

Laikas, per kurį inžineriniai barjerai turi atlikti saugos funkciją, kad būtų veiksmingai apribotas radioaktyviųjų medžiagų patekimas į atliekyno talpinančias uolienas, jei tai yra panaudotas branduolinis kuras, Lietuvos teisės aktuose nėra apibrėžtas. Pagal Lietuvos teisės aktus atliekyno sauga vertinama tuo laikotarpiu, per kurį RA gali sukelti didžiausią galimą apšvitą visuomenei ir aplinkai.

4. Saugai svarbūs radionuklidai

Paprastai pradinis preliminarus sąrašas ir RA susidariusių radionuklidų kiekis vertinami eksperimentiškai ir skaitine išraiška. Paskui preliminarus sąrašas sutrumpinamas taikant pasirinktus atrankos kriterijus. Galutinis saugai svarbių radionuklidų sąrašas sudaromas atlikus pakartotinį atliekyno saugos vertinimą pagal įvairius atliekyno raidos scenarijus.



0,2 mSv

Apribotoji dozė
Lietuvoje



<0,3 mSv

TRSK rekomenduojama
apribotosios dozės vertė

02 RA ATLIEKYNUI POTENCIALIOS FORMACIJOS

1. Lietuvos geologinių sąlygų apžvalga

Lietuvos teritorija yra Rytų Europos platformos šiaurės vakarų dalyje.

Kristalinis pamatas Lietuvoje aptinkamas nuo 200 m po žemės paviršiumi rytinėje dalyje iki 2 600 m gylis vakaruose. Nuosėdinę dangą sudaro visų geologinių laikotarpių – nuo viršutinio proterozojaus (vendo) iki kvartero – nuogulos, kurias sudaro įvairios smėlingos ir molingos nuosėdinės uolienos, karbonatinės nuosėdinės uolienos ir evaporitai įvairiais deriniais. Nelitifikuotos nuogulos sudaro jauniausius darinius, tačiau vietomis jų yra ir kai kuriose senesnėse nuogulose¹.

2. Kristalinis pamatas

Lietuvos kristalinis pamatas yra panašus į Fenoskandijos ir Kanados skydus, kurie laikomi perspektyvia formacija GA įrengti. Tik pietinė

¹ Lietuvos geologijos tarnyba (2004).

ir rytinė Lietuvos dalys, kuriose kristalinis pamatas yra po mažesnio nei 700 m storio nuosėdomis, laikomos perspektyviomis giluminiam atliekynui įrengti šioje formacijoje. Pietų Lietuvos kristalinį pamatą sudaro įvairių tipų uolienos, pavyzdžiui, migmatitai, kuriuose yra negausiai metamorfinių uolienų priemaišų (gneisai, amfibolitai) ir kiti litologiniai dariniai.

Pietų Lietuvos apatinio prekambro tektoninė sąranga yra labai sudėtinga. Didžiąja dalimi nuosėdinė danga apsaugojo kristalinio pamato lūžius ir lūžio zonas nuo dūlėjimo, tačiau Pietų Lietuvoje, kur kristalines uolienas dengia tik 200–300 m storio nuosėdinė danga, stipriai išdūlėjusios zonos atsekamos keliasdešimties metrų gylyje.

3. Apatinio kambro molio formacija

Seniausi kambro telkiniai, priskiriami apatinio kambro Baltijos formacijai, aptinkami tik rytinėje Lietuvos dalyje, formacijos kraigas yra 200–800 m gylyje. Rytinėje dalyje formacijos storis siekia 110 m, o vakaruose – 10–20 m.

Formacijos litologinė sudėtis yra nuo smėlio iki molio. Sluoksniai nėra vientisi, skirtinguose gyliuose yra daug skirtingos litologinės sudėties tarp sluoksnių. Apatinio kambro formacija yra labai tektoniškai suskaidyta. Apatinio kambro formacija palyginti menkai ištirta mechaninių bei inžinerinių savybių požiūriu.

4. Viršutinio permio evaporito formacijos

Viršutinio permio Priegliaus evaporito yra dvi perspektyvios giluminiam atliekynui įrengti formacijos – anhidritas ir akmens druska – abi pietvakarinėje Lietuvos dalyje.

• *Viršutinio permio anhidrito formacija.*

Pietų ir pietvakarių Lietuvoje 150–790 m gylyje paplitę ištisinis 40–60 m storio permio sulfatinių uolienų sluoksnis, kurio didžiąją dalį (70–80 %) sudaro anhidritas. Anhidrito sluoksnio kraigas Lietuvoje yra banguotas. Storio skirtumai maždaug 10 km atstumu kartais siekia iki 60 m. Sluoksnio padas palyginti lygus.

• *Viršutinio permio akmens druskos formacijos*

Viršutinio permio akmens druskos formacijos randamos pietvakarinėje Lietuvos dalyje. Akmens druskos kupolas yra 2,5 km pločio ir 3 km ilgio. Didžiausias akmens druskos sluoksnio storis centrinėje dalyje yra 56,5–69,0 m. Šios formacijos tinkamumo laipsnis giluminiam atliekynui įrengti yra labai mažas. Formacijos pasiskirstymas yra labai lokalus, o turimi duomenys apie formaciją labai nepatikimi.

5. Apatinio triaso molio formacija

Triaso nuosėdos Lietuvoje paplitusios didelėje teritorijoje, formacijos storis didėja nuo kelių metrų Lietuvos šiaurės rytuose ir rytuose iki 250 m į pietvakarius. Viršutinė triaso nuosėdų riba yra aiški – tamsiai pilkos jūros periodo terigeninės nuogulos dengia triaso raudonusius sluoksnius. Šioms nuoguloms susiformavus nevyko jokių didesnių tektoninių įvykių, tokių kaip raukšlėjimasis ir lūžiai, todėl ši formacija yra santykinai tektoniškai nepažeista.

6. Potencialių GA aikštelių atranka

2022 m. nustatyti geologinių formacijų ir potencialių aikštelių tinkamumo GA Lietuvoje geomoksliniai kriterijai. Geomoksliniai kriterijai apibūdinami kaip savybės, procesai ar reiškiniai, kuriuos galima nustatyti ir įvertinti, naudojant geomokslinių tyrimų duomenis. Geomoksliniai kriterijai suskirstyti į dvi pagrindines grupes:

- Pakankamo giluminio atliekyno stabilumo kriterijų rinkinys.
- Pakankamo giluminio atliekyno fizinės izoliacijos nuo biosferos kriterijų rinkinys.

Sukurtas geologinių kriterijų rinkinys bus toliau tobulinamas ir naudojamas tolesniems tyrimams parenkant GA aikštelę Lietuvoje.

03 SAUGOS KRITERIJŲ APIBRĖŽIMO METODAS

1. Metodo apžvalga

Šiame Lietuvos GA programos etape, kuriame vis dar renkama tinkama vieta, taikomas proporcingumo metodas, kuris pagrindžia, kad saugos kriterijai yra tinkami dabartiniam Lietuvos GA programos etapui, tačiau ateityje, gavus daugiau informacijos, juos reikės peržiūrėti.

Saugos koncepcija

Saugos koncepcija apibūdina skirtingų atliekyno projekto komponentų vaidmenis, o tai reiškia, kad ji apibūdina jų saugos funkcijas. Radioaktyviąsias atliekas nuo žmonių, jų veiklos ir nuo biosferos sulaikantis GA komponentas yra natūralus barjeras (talpinanti uoliena).

GA gylis yra ta savybė, kuri pasirenkama, siekiant pakankamai izoliuoti RA nuo aplinkos. Ji priklauso nuo talpinančios uolienos bei į radioaktyviųjų atliekų atliekyną dedamų atliekų tipo. GA pagrindinis barjeras, atsakingas už sulaikymą, yra atliekų pakuotė (įprastai metalinis konteineris). Jei neliktų pagrindinio barjero, sulaikymo ir

radionuklidų vėlinimo funkciją įprastai atliktų artimiausias antrinis barjeras bei natūralus barjeras, kurie yra GA komponentai, atsakingi už sulaikymą ir vėlinimą.

Saugos funkcijos

Saugos koncepcija grindžiama trimis aukšto lygio principais: sulaikymu, izoliavimu ir sulaikymu bei vėlinimu. Saugos koncepcija įgyvendinama natūralių ir dirbtinių barjerų forma. Kiekvienas barjeras saugos koncepcijoje atlieka vieną arba daugiau saugos funkcijų.

Biosfera yra vienintelis dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną sistemos komponentas, kuris neturi saugos funkcijų. Remiantis barjero suderinamumo reikalavimais, kita bendroji saugos funkcija – barjeras neturi daryti neigiamos įtakos kitų barjerų savybėms kelių barjerų sistemoje. Tai reiškia, pavyzdžiui, kad IBS medžiagos turi būti suderinamos tarpusavyje ir su natūraliu barjeru.

Apibrėžus saugos funkcijas, joms įtaką turintys FEP naudojami tikslinėms savybėms apibrėžti.

2. FEP ir tikslinės savybės

FEP yra naudinga priemonė saugos funkcijoms įtakos (teigiamos arba neigiamos) galintiems turėti veiksniams identifikuoti. FEP gali būti bendri (pvz., korozija) arba būdingi geografinėi vietai (pvz., su klimato sąlygomis susiję FEP), talpinančiai uolienai, atliekų tipui ir sąveikoms tarp GA komponentų.

Tikslinė savybė yra fizinė arba cheminė savybė, kuri prisideda prie vienos arba daugiau saugos funkcijų (sulaikymas, izoliavimas, laikymas arba vėlinimas). Paskui tikslinės savybės naudojamos apibrėžti radioaktyviųjų atliekų atliekyno statinių reikalavimams, įskaitant IBS bei natūralų barjerą (talpinančią uolieną).

04 SAUGOS FUNKCIJOS

1. Saugos koncepcija ir saugos funkcijos

Kiekvienas barjeras saugos koncepcijoje atlieka vieną arba daugiau vaidmenų. Šie vaidmenys sudaro saugos funkcijas.

Preliminarią dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną sistemą sudaro šie komponentai:

- Panaudotas branduolinis kuras.
- Pagrindinis konteineris.
- Antrinis barjeras.
- Talpinanti uoliena.
- Uždarymo konstrukcijos.
- Biosfera.

Pagrindinis PBK skirtas konteineris preliminarioje dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną koncepcijoje yra sandarus metalinis konteineris. Antrinis barjeras turėtų būti išsiplečiantis molio komponentas, kuris užtikrintų lėtą galimai koroziją sukeliančių medžiagų judėjimą iki pagrindinio konteinerio, apsaugotų konteinerį mechaniškai bei prisidėtų prie radionuklidų laikymo ir vėlinimo artimajame lauke.

Uždarymo konstrukcijos yra užpildymo medžiagos,

kamščiai ir izoliacijos, užpildančios visą likusias ertmes, kurių neužpildo antrinis barjeras. Šios priemonės naudojamos visoms jungtims su paviršiumi uždaryti. Uždarymo konstrukcijos prisideda prie geologinės formacijos izoliavimo funkcijos užtikrinimo, todėl jų saugos funkcijos yra panašios.

2. FEP ir tikslinės savybės

Lietuvos GA aktualių FEP pasirinkimas

Pagrindiniai dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną sistemai įtakos turintys FEP aprašomi kiekvienam aktualiam posistemės komponentui arba barjerui (t. y. išoriniai veiksniai, atliekų pakuotės veiksniai, atliekyno veiksniai, biosferos veiksniai). Kartu su pagrindinėmis dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną sistemos savybėmis, galinčiomis turėti įtakos įvykimui arba reikšmingumui, aprašomas kiekvieno FEP konceptualusis suvokimas ir veikimas.

3. Preliminarus GA gylis ir RA dėjimo būdas

Dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną gylis

Remiantis bendru susitarimu dėl GA gylis, numatomas visiškai preliminarus kelių šimtų metrų žemiau jūros lygio gylis, kuriame vyrauja vandeniui prisotintos ir bedeguonės sąlygos, o stipraus uolienų dūlėjimo ir erozijos rizika atliekyno viršuje maža, kaip ir atsitiktinio žmonių įsibrovimo rizika. Numatyti GA gyliai skiriasi, priklausomai nuo galimos geologinės formacijos:

- Kristalinė talpinanti uoliena (gylis 200–600 m rytų ir pietryčių Lietuvoje).
- Molio talpinanti uoliena (kambro molis: gylis

300–500 m, storis 80–100 m rytų Lietuvoje. triaso molis: gylis 200–500 m, storis 200–250 m pietvakarių Lietuvoje).

- Evaporitų / druskų talpinanti uoliena (gylis: 300–380 m, storis 10–80 m).

Dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną būdas

Šio tyrimo tikslu pagrindiniu konteineriu laikomas konteineris, pagamintas iš metalo komponentų (pvz., vario arba nerūdijančiojo plieno, kad būtų apsaugota nuo korozijos, o intarpai iš ketaus, kad užtikrintų tvirtumą). Pagrindinį konteinerį supa bendras antrinis barjeras, pagamintas iš brinkstančio molio. Papildomi projekto duomenys, pavyzdžiui, apie antrinių barjerų naudojimą (pvz., cemento) ir atliekyno išdėstymą, priklauso nuo konkrečios vietos, todėl šiame Lietuvos GA programos etape jų apibrėžti negalima (ir nereikia). Jie tikslinami vietą pasirinkus pagal šiluminės, hidraulinės ir mechaninės atliekyno talpinančios uolienos savybes bei atliekų pakuotės apribojimus. Nepaisant to, didžiausias GA plotas neturėtų būti didesnis nei 10 kv. km, atsižvelgiant į paviršiaus infrastruktūros poreikius.

Dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną metodą ir GA komponentų medžiagas, skirtas pagrindinio ir papildomo sulaikymo funkcijoms užtikrinti, reikia rinktis atsižvelgiant į šalyje pasirinktų geologinių formacijų savybes (teigiamas ir neigiamas apribojimus).

05

SCENARIJAI IR KONCEPTUALIEJI MODELIAI

1. Scenarijaus formulavimo apžvalga

Scenarijai sudaromi, remiantis turimomis geologinių formacijų ir įvairių FEP, darančių įtaką (arba galinčių daryti įtaką) GA komponentų funkcijoms, charakteristikomis. Šiame skyriuje pateikiami skirtingoms geologinėms formacijoms skirti pagrindinis ir įsibrovimo scenarijai bei jų konceptualieji modeliai. Šiame Lietuvos GA programos etape dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną būdas ir atliekyno koncepcija dar nėra pasirinkti, todėl šioje ataskaitoje aprašomuose scenarijuose daugiausia dėmesio skiriama turimų geologinių formacijų savybėms bei pagrindinėms neapibrėžtims.

Siekiant įvertinti GA ilgalaikę saugą, būtina apibrėžti pirmąjį pagrindinį scenarijų, kuriuo bus remiamasi, lyginant įsibrovimo scenarijų rezultatus. Pagrindiniame scenarijuje aprašoma pagrįstai tikėtina dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną sistemos raida, o įsibrovimo scenarijuose pateikiamos mažiau tikėtinos raidos linijos bei neapibrėžtys (arba informacijos trūkumas), susijusios potencialiose geologinėmis formacijomis.

2. Konceptualieji radionuklidų pernašos modeliai

Pagrindiniame ir įsibrovimo scenarijuose naudojami konceptualieji modeliai, skirti radionuklidų pernašai radioaktyviųjų atliekų atliekyną sistemoje vertinti.

Konceptualusis panaudoto branduolinio kuro modelis

PBK konceptualųjį modelį sudaro 50 metų aušinto 2 tU (16 RBMK kuro rinklių) kuro matrica. Ilgalaikės saugos vertinime vertinami pagrindiniai radionuklidai. Remiantis „Posiva“ duomenimis, dalis radionuklidų išmetami po konteinerio pažeidimo. Likusi kure esančių radionuklidų kiekio dalis išsiskiria pastoviu greičiu dėl kuro matricos tirpimo. Visose radionuklidų pernašos modelio dalyse, pradedant nuo PBK, atsižvelgiama į radioaktyvųjų skilimą ir daugėjimą.

Konceptualusis artimojo lauko modelis

Pagrindinį konteinerį supa antrinis bentonito (molio) barjeras, kuriame pernaša vyksta daugiausiai difuziniu, o ne advekciniu būdu. Artimojo lauko geometriją sudaro antrinis barjeras, kurio plotas ir storis užtikrina difuzinę ir konvekcinę pernašą, paremtą pagrindinio RBMK kurui skirto konteinerio geometrija, bei numatyto storio konteinerį supantis barjeras. Norint apskaičiuoti konvekcines pernašos barjere greičius, naudojamas spūdzio gradientas.

Konceptualieji geologinių formacijų modeliai

Geologinės formacijos konceptualizuojamos į 3 skirtingus modelius, remiantis kiekvienos formacijos tipo savybėmis (kristalinė talpinanti uoliena, molio ir evaporito talpinančios uolienos).

Remiantis ištirta molio formacijų stratigrafija, negalima atmesti vandeningojo sluoksnio buvimo arti atliekyno galimybės ir todėl molio talpinanti uoliena taip pat modeliuojama vandeningąjį sluoksnį naudojant kaip galimą radionuklidų pernašos kelią. Laikoma, kad kristalinėje talpinančioje uolienoje yra plyšys, o gretimos uolienos matrica sudaro radionuklidų išmetimo kelią iš artimojo lauko antrinio barjero į biosferą. Plyšys charakterizuojamas konvekciniu judėjimo greičiu bei su srautu susijusiu pernašos geosferoje pasipriešinimu, kuris reprezentuoja bendras išmetimo iš artimojo lauko į biosferą kelio vertes.

Dėl tirtose GA vietose dengiančių kelių nuosėdinių uolienų sluoksnių kristalinės talpinančios uolienos tolیمasis laukas pagrindiniame scenarijuje konceptualizuojamas kaip du komponentai – kristalinė talpinanti uoliena ir ją dengiantis nuosėdinės uolienos sluoksnis. Įsibrovimo scenarijuose modelio konfigūracija pakeičiama į pesimistiškesnę be nuosėdinės uolienos dangos.

Konceptualiajame evaporito talpinančios uolienos modelyje tolیمasis laukas yra nelaidus požeminiams vandenims. Tokio tipo geologinei formacijai pagrindiniame scenarijuje radionuklidų pernaša nemodeliuojama, nes geosferoje arba artimajame lauke pernašos potencialas yra nereikšmingas. Galimuose įsibrovimo scenarijuose radionuklidai iš evaporito talpinančios uolienos pernešami atsiradus sulaikymo (arba izoliavimo) pažeidimui.

Konceptualusis biosferos modelis

Palyginti su konceptualiuoju suvokimu, biosferos dalis radionuklidų pernašos modelyje yra labai supaprastinta. Taikomą radiologinio poveikio vertinimo modelį sudaro menamas šulinys ir potenciali individualioji gyventojų, kurie šulinį naudoja geriamajam vandeniui, apšvita. Dozės,

gautos vartojant vandenį iš šulinio, parodo radiologinio poveikio, susijusio su radionuklidų srautu iš geosferos, vertinimą.

3. Įsibrovimo scenarijai ir susiję konceptualieji modeliai

Įsibrovimo scenarijai

Jieformuluojami remiantis neigiamomis savybėmis arba informacijos apie konkrečią geologinę formaciją trūkumu. Įsibrovimo scenarijuose vertinami trumpesni išmetimo laikai nei tikslinė savybė: 10 tūkst. metų ir 1 000 000 metų.

Mechaninio pažeidimo įvykiai priklauso nuo geologinės formacijos. Tai gali būti žemės drebėjimai kristalinių ir molio talpinančios uolienos atveju. Atsiradus konteinerio pažeidimui, dozėms apskaičiuoti saugos vertinimo modelyje atsižvelgiama į artimojo lauko ir talpinančios uolienos radionuklidų laikymo ir vėlinimo savybes. Šios dozės paskui palyginamos su saugos kriterijumi (0,2 mSv per metus).

Įsibrovimo scenarijų konceptualizavimas

Neigiamos geologinių formacijų savybės laikomos pagrindiniu ilgalaikės Lietuvos GA saugos neapibrėžties šaltiniu. Savybės suformuluojamos pagal scenarijaus neapibrėžtis ir naudojamos rengiant kiekvienos geologinės formacijos įsibrovimo scenarijus.

4. Radionuklidų išmetimo ir pernašos skaitiniai modeliai

Siekiant gauti bendrajam skirtingų Lietuvos GA potencialių geologinių formacijų saugos vertinimui pagrįsti reikalingus rezultatus, taikomi radionuklidų pernašos skaitiniai modeliai.

Įsibrovimo scenarijaus atvejams kristalinėje talpinančioje uolienoje taikoma atsargesnė modelio konfigūracija, iš pernašos grandinės pašalinant kambro nuosėdinį sluoksnį. Taip parodomas sutrikdymas dėl uolienų šlyties ir kitų kristalinei talpinančiai uolienai būdingų veiksnių bei potencialaus kaupimosi.

Molio formacijoms pagrindiniame ir įsibrovimo

scenarijuose savybės parinktos, atsižvelgiant į surinktas kambro bei triaso molio formacijų savybes. Molio formacijų sluoksniai yra nevienodi, todėl dėl galimų vandeningųjų sluoksnių atsiranda pernašos kelių neapibrėžtis. Viršutinio sluoksnio savybės panašios į kitų molio formacijų savybes pagrindiniame ir įsibrovimo scenarijuose, tačiau apatinio sluoksnio storis yra mažesnis (20 m). Abiem keliais iš PBK konteinerio juda vienoda dalis

radionuklidų, jie atsiduria formacijas supančiame vandeningajame sluoksnyje, iš kurio galiausiai patenka į biosferą.

Evaporito talpinančios uolienos modelio konfigūracija taikoma tik įsibrovimo scenarijuose, kurie skirti parodyti pernašą vien iš PBK konteinerio.

06

ILGALAIKĖS SAUGOS VERTINIMAS

1. Bendrasis ilgalaikės saugos vertinimas

Ilgalaikės saugos vertinimo skaičiavimai atlikti trimis konceptualiai skirtingoms talpinančioms uolienoms, atsižvelgiant į pagrindinį ir įvairius įsibrovimo scenarijus. Daugiausia dėmesio skirta svarbiausioms duomenų neapibrėžtims, nuo kurių priklauso radionuklidų pernašos iš PBK matricos į biosferą rezultatai, pateikiamas ir aptariamas talpinančių uolienų ir jas sudarančių geologinių formacijų palyginimas pagal skirtingus scenarijus.

2. Saugos vertinimo rezultatas apibendrinimas

Pagal pagrindinius scenarijus abiejų tipų talpinančios uolienos (molio ir kristalinės), esant požeminio vandens srautui, užtikrina apytikriai identišką saugos ribą, lyginant rezultatus su teisės aktuose nustatyta apribotą dozę – 0,2 mSv per metus.

Esant dabartiniams pesimistiniams parametrų, kristalinės talpinančios uolienos turi didžiausią saugos ribą pagal pagrindinį scenarijų, kuris apima nuosėdinę dangą pernašos kelyje. Dėl neapibrėžties, susijusios su molio talpinančių uolienų heterogeniškumu, gaunami labai įvairūs rezultatai. Mažiausia saugos riba nustatyta kambro molio modelio konfigūracijai su dviem lygiagrečiais pernašos keliais

iš artimojo lauko į tolimąjį lauką ir toliau į vandeningąjį sluoksnį, per kurį medžiagos gali patekti į paviršių.

Lyginant talpinančių uolienų vertinimo rezultatus, akivaizdu, kad evaporito talpinančios uolienos kelia didžiausią pavojų, susijusį su įrengtų barjerų sandarumo pažeidimais. Be to, žmonių įsibrovimas labiau tikėtinas dėl galimo gamtinių išteklių, kuriuose gausu evaporitų, naudojimo. Dėl šios priežasties evaporito ir druskos uolienos neturėtų būti laikomi potencialiomis geologinėmis formacijomis.

Didesnė molio talpinančių uolienų įsibrovimo scenarijų rezultatų įvairovė taip pat rodo, kad GA gali būti labai saugus (ypač apatinio triaso formacijos atveju). Mažą filtracijos koeficientą turinčioms molio formacijoms reikia tik kelių dešimčių metrų (vienodos sudėties) storio, kad būtų galima sumažinti radionuklidų srautą, išsiskiriančią iš PBK netrukus po konteinerio sandarumo pažeidimo, ir atitolinti jų išmetimą.

07

LIETUVOS GA SAUGOS KRITERIJAI

Atsižvelgiant į tai, kad dar nepasirinkta vieta ir nenustatytas dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną būdas, GA talpinančių uolienų tikslinės savybės suformuluotos preliminariai, kad jas būtų galima taikyti visoms geologinėms formacijoms ir dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną būdams.

Preliminariomis tikslinėmis savybėmis ir prielaidomis, naudojamomis formuluojant scenarijus, ir saugos vertinimo modeliavimo rezultatais remiamasi, apibrėžiant kitus su sauga susijusius kriterijus – tiek bendruosius, tiek specifinius – tam tikro tipo geologinei formacijai. Bendrieji su sauga susiję kriterijai, taikomi visų tipų talpinančioms uolienoms (pvz. talpinančioji uoliena turėtų būti kelių šimtų metrų gylyje žemiau žemės paviršiaus ir pasižymėti pakankamai dideliu homogeniniu tūriu, kad jame būtų galima įrengti GA). Su konkrečiomis formacijomis susijusiais kriterijais nustatomi papildomi apribojimai sąlygoms ir savybėms, susijusioms su hidrogeologija ir pernaša, taip pat laikymu ir vėlinimu įvairių talpinančių uolienų formacijose (pvz. kristalinėms uolienoms – talpinančios uolienos filtracijos koeficientas turėtų būti $\leq 1E-8$ m/s).

Tikslinės savybės ir su sauga susiję kriterijai papildo anksčiau LGT pateiktus² kriterijus ir kartu su jais gali būti naudojami kaip pagrindas atrenkant kelias potencialiausias vietas, kurios ateityje bus nuodugniau nagrinėjamos.

²Lietuvos geologijos tarnyba (2004).

08

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Rezultatų apibendrinimas

Pagrindinės šio darbo išvados:

- Triaso molio uoliena turi didžiausią GA įrengimo potencialą, nes ji turi geras saugos ribas tiek pagal pagrindinį, tiek pagal įsibrovimo scenarijų.
- Antroje vietoje yra kristalinės uolienos, kurios pagal pagrindinį scenarijų turi geriausias saugos ribas, tačiau reikėtų atsižvelgti į galimus didelius srautus ir uolienų šlyties judesius.
- Kambro molio uoliena yra heterogeninė ir pasižymi nepalankiomis mineraloginėmis savybėmis, o tai apsunkina GA projektavimą ir saugos vertinimą. Tačiau, atlikus tolesnį vertinimą, šiai formacijai galėtų būti suteiktas toks pat palankus prioritetas kaip ir kristalinėms uolienoms.
- Galiausiai į nagrinėjamų geologinių formacijų sąrašą neturėtų būti įtraukti evaporitai (anhidritas ir akmens druska) dėl nepalankaus įsibrovimo scenarijaus pobūdžio.
- Visi būsiami tyrimai ir (arba) vertinimai turėtų būti susiję tik su likusiomis trimis geologinėmis formacijomis: triaso molio, kristalinio pamato ir kambro molio.

2. Ankstesniuose skyriuose nustatytas tyrimų poreikis

Rekomendacijos, susijusios su skirtingais atliekų srautais, kurie turi būti dedami į GA

- Šiame tyrime, atliekant PBK saugyklų saugos vertinimus, radioaktyvųjų šaltinį sudaro radionuklidų inventorių, kuris yra papildytas duomenimis, gautais iš viešai prieinamų literatūros šaltinių. Siekiant atnaujinti būsimoje saugos vertinimuose naudojamą radioaktyvųjų šaltinį, reikėtų atnaujinti radionuklidų inventoriaus sąrašą PBK iškrovimo metu.
- Parenkant vietą, reikėtų patvirtinti prielaidas, susijusias su junginių susidarymu, tirpumu, efektyviuoju difuzijos koeficientu ir sorbcija.
- C-14 sorbcijos (neorganinių ir organinių formų) cementinėje aplinkoje pagal konkrečias vietas sąlygas tyrimai gerokai sumažintų neapibrėžtį, susijusią su C-14 pernaša artimojo lauko aplinkoje, ir padidintų atliekyno saugos vertinimo patikimumą.
- Siekiant išsamiai suplanuoti atliekų tvarkymą, reikėtų išsamiau apibūdinti kitus atliekų srautus, kurie bus dedami į GA, ir suformuluoti dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną strategiją, susijusią su IAE blokų išmontavimo planais. Būsimoje GA programos iteracijose taip pat reikėtų atsižvelgti į chemotoksiškumą, tačiau reikia atkreipti dėmesį, kad kiti atliekų srautai, išskyrus PBK, gali sukelti GA apribojimų, susijusių su atliekų tūriu.
- Įvairių šaltinių reikalavimai, susiję su PBK ir kitų rūšių atliekų tvarkymu ir dėjimu į radioaktyviųjų

atliekų atliekyną, turėtų būti kaupiami valdymo sistemoje.

Rekomendacijos, susijusios su vietos tyrimais

- Vykstant vietos parinkimo procesui, būtina atlikti tolesnius geomokslinius tyrimus tose vietose, kurios laikomos potencialiai tinkamiausiomis GA statybai, kad būtų gauti konkrečios vietos duomenys. Reikėtų surinkti daugiau informacijos apie stratigrafinių vienetų litologinę įvairovę ir storį, taip pat apie atskirų vienetų vidinį heterogeniškumą ir savybes (pavyzdžiui, mineraloginę sudėtį, poringumą, difuzijos ir filtracijos koeficientus), nes tai turi tiesioginį poveikį radionuklidų pernašai ir sulaikymui.
- Atsižvelgiant į kristalinį pamatą, reikėtų ištirti uolienų litologinę įvairovę, petrologines ir petrofizikines savybes, nes jos turi įtakos GA statybai ir funkcionalumui.
- Talpinančių uolienų struktūros gali kelti mechaninę riziką GA vientisumui, jei ateityje įvyktų didelis žemės drebėjimas. Todėl ateityje reikėtų įvertinti būsimas mechanines sąlygas (įtempius) ir jų poveikį trapiųjų ir plastiškųjų struktūrų stabilumui, nes galimi žemės drebėjimai ir sukeltas uolienų slinkimas gali turėti įtakos pasirinktos GA koncepcijos IBS funkcionalumui. Dėl šios priežasties taip pat reikės apibūdinti trapiąsias ir plastiškąsias GA supančio uolienos masyvo struktūras. Kristaliniame pamate trapiosios struktūros (lūžių zonos ir plyšiai) taip pat yra pagrindiniai požeminio vandens tekėjimo kanalai. Todėl taip pat reikėtų apibūdinti jų hidrogeologines savybes, pavyzdžiui, laidumą ir sandarumą. Šis apibūdinimo poreikis taip pat taikytinas molio formacijose esančioms trapiosioms struktūroms.
- Turėtų būti atliktas pakankamai išsamus įvairių

litologinių vienetų, tiek molio formacijų, tiek kristalinio pamato, termohidromechaninis parametrizavimas.

- Norint tiksliau įvertinti kambro ir triaso molio formacijų hidraulines ir sorbcines savybes, svarbu atlikti tolesnius mineraloginės sudėties tyrimus. Kadangi įvairių molio mineralų rūšių savybės yra labai skirtingos, molio mineralų rūšių ir proporcijų konkrečiame molio telkinyje nustatymas yra vienas iš pirmųjų ir svarbiausių žingsnių, kuriuos būtina atlikti tiriant įvairias molio formacijas.
- Reikėtų apibūdinti potencialios vietos hidrogeochemines savybes (deguonės/bedeguoanės sąlygos, įvairių tipų požeminio vandens sudėtis ir jos pasiskirstymas laiko ir erdvės atžvilgiu, geocheminiai srautai į atliekyną ir iš jo), nes tai turi didelę įtaką pasirenkant RA dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną koncepciją.
- Parenkant GA vietą pereinama prie etapo, nustatytose zonose turėtų būti gręžiami gręžiniai, kad būtų galima gauti tiesioginę ir išsamesnę informaciją apie talpinančią uolieną. Gręžiniai suteiks informacijos apie litologinius pokyčius, taip pat apie trapiąsias struktūras ir jų charakteristikas, be to, iš gręžinių galima imti mėginius termohidromechaniniams parametrų nustatymui.
- Gavus daugiau informacijos apie geologines formacijas, skatinama kuo anksčiau pradėti geologinį ir hidrogeologinį modeliavimą. Turėtų būti plėtojama duomenų bazė geologinio ir hidrogeologinio modeliavimo ir bendro duomenų tvarkymo tikslais.
- Tolesnės potencialių vietų analizės ir saugos

vietos ilgalaikius pokyčius formacijose ir leis ateityje atlikti pakartotines iteracijas bei optimizuoti GA projektavimą. Be to, biosferos aprašymo plėtojimas yra būtinas, siekiant sumažinti konservatyvumo lygį būsimose GA projektavimo ir saugos vertinimo iteracijose. Dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną programoje turėtų būti pripažįstama, kad saugos vertinimo duomenis reikia nuolat atnaujinti ir patvirtinti, remiantis papildomais moksliniais duomenimis, gautais atlikus vietos aprašymą.

3. Išvados ir rekomendacijos dėl būsimų saugos vertinimų

Remiantis TATENA 2012 m. rekomendacijomis, modelio išsamumo lygis ir su juo susijęs reikalingų duomenų kiekis bei kokybė priklausytų nuo vertinimo konteksto. Ateityje saugos vertinimai turėtų būti toliau tobulinami atsižvelgiant į neapibrėžties ir jautrumo analizę, taip pat į metodus, modeliavimo ir duomenų plėtrą ir pokyčius. Konkrečiai turėtų būti parengta vieno PBK konteinerio ir kartu su kitomis GA atliekomis kritiškumo saugos analizė, siekiant užtikrinti, kad per visą GA eksploatavimo laikotarpį būtų užtikrinta būklė, esanti žemiau kritiškumo ribos.

Neapibrėžties ir jautrumo atvejų analizė

Dėl daugybės neapibrėžties šaltinių, susijusių su ilgalaikiais saugos vertinimais, pasirinkus bendro GA projekto alternatyvas, reikėtų atlikti išsamesnę atliekyno veiksmingumo vertinimą. Be to, rekomenduojama skaičiavimus papildyti tikimybiniais atvejais, kuriais parodoma neapibrėžčių (paprastai tik su duomenimis susijusių neapibrėžčių) įtaka galutiniams vertinimo rezultatams. Šiame etape daugiau dėmesio reikėtų skirti projektavimo pagrindui ir veiksmingumo vertinimui, pagrįstam alternatyviu ilgalaikiai saugai

svarbių sąlygų kitimu. Taip galima sumažinti su scenarijais ir konceptualiaisiais modeliais susijusių neapibrėžčių.

Metodai, modeliavimas ir duomenys

- Pagal TATENA 2012 m. rekomendacijas saugos vertinimas po uždarymo turėtų būti atliekamas taikant keletą tinkamai parinktų metodų, kurie, kai naudojami vienas kitą papildant, gali padidinti atliekyno saugos patikimumą.
- Atliekant kitą saugos vertinimą, daugiau dėmesio reikėtų skirti projektavimo pagrindo plėtojimui, atsižvelgiant į ilgalaikiai saugai svarbių apkrovų ir sąlygų pokyčius. Tokiu būdu, pasirenkant dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną koncepciją ir projektuojant GA, galima išspręsti svarbiausias su ilgalaikiai sauga susijusias neapibrėžtis.
- Rengiant modelius reikėtų nustatyti pagrindinius parametrus ir priskirti jiems skaitines vertes.
- Ateityje atliekant saugos vertinimus taip pat rekomenduojama sukurti tinkamas sistemas, skirtas vertinimuose naudojamiems duomenims saugoti. Sistema turėtų užtikrinti, kad vertinimo skaičiavimams modeliuose naudojamos parametrų vertės būtų dokumentuotos ir pagrįstas jų naudojimas.

4. Rekomendacijos dėl tolesnės GA programos plėtros

GA vietos parinkimas

Vietos parinkimo etapo pabaigoje bus parinkta tinkama vieta, o pagal šios vietos ir atliekų charakteristikas bus nustatytas tinkamiausias dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną būdas ir parengti

konkretesni eksploataciniai tikslai ir reikalavimai IBS ir atliekyno projektavimui. Tai yra pirmojo saugos scenarijaus, kuris paprastai pateikiamas kartu su pasiūlymu dėl vietos parinkimo, pagrindas.

GA projekto valdymas

Pasirinkus vietą, projektavimo pagrindas turėtų būti atnaujintas, atsižvelgiant į ankstesnės vietos parinkimo grįžtamąją informaciją, taip pat turėtų būti atliktas išsamus atliekyno ir IBS projektavimas ir nustatyti dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną sistemos reikalavimai.

Reikalavimų valdymo sistema yra būtina siekiant valdyti reikalavimų (projektavimo pagrindo), kurie bus nuolat peržiūrimi ir atnaujinami, kūrimą. Kai reikalavimų skaičius didelis ir tarp jų yra labai įvairių sąsajų, jų valdymui reikalinga duomenų bazės tipo sistema.

GA statyba

Rengiant paraišką statybos leidimui gauti, turėtų būti atnaujintas vietos aprašas, taip pat talpinančių uolienu ir IBS pažeidimų ir atsako įvertinimas, iš naujo įvertintas ilgalaikis talpinančių uolienu stabilumas ir atnaujinta geosintezė, kad būtų galima parengti atnaujintą saugos analizę, kuri bus pateikta kartu su paraiška statybos leidimui gauti.

Statybos etapo metu svarbu stebėti vietos sąlygas, kad būtų galima pastebėti galimus dėl statybos atsiradusius sąlygų pakitimus.

Statybos etape planuojama įranga, skirta IBS komponentų gamybai ir įrengimui bei atliekyno statybai, galėtų būti toliau bandoma realiomis sąlygomis, o pramoninio pritaikymo ir (arba) optimizavimo pakeitimai galėtų būti įdiegti į atliekyno komponentus ir procesus.

GA eksploatavimas

Eksploatavimo etapą sudarys lygiagrečiai vykdoma statybos ir dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną veikla. Šio etapo metu bus optimizuojami gamybos ir atliekų išdėstymo arba kontrolės procesai, todėl bus atnaujintas projektavimo pagrindas arba pats projektas.

GA uždarymas

Pasibaigus eksploataavimo etapui, gali būti vykdoma stebėseną, kuri tęsiasi tol, kol nusprendžiama, kad galima pateikti licenciją uždarymui.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Economic Commission for Europe Inland Transport Committee 2019. ADR European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road. Volume I and II. ISSN: 2411-8605.
2. HN 73:2018. Lietuvos higienos norma HN 73:2018 „Pagrindinės radiacinės saugos normos“, patvirtinta LR Sveikatos apsaugos ministro 2001 m. gruodžio 21 d. įsakymu Nr. 663 (paskutiniai pakeitimai 2021-10-21 Nr. V-2376, paskelbta TAR, 2021-10-21, Nr. 22003) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.751B6F8BF451/asr>

3. HN 99:2019. Lietuvos higienos norma HN 99:2019 „Gyventojų apsauga įvykus branduolinei ar radiologinei avarijai“, patvirtinta Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministro 2011 m. gruodžio 7 d. įsakymu Nr. V-1040 (paskutiniai pakeitimai 2019-12-05, Nr. V-1398, paskelbta TAR, 2019-12-06, Nr. 19659) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.619C37ED47F0/asr>
4. IAEA (TATENA) 1985. Deep Underground Disposal of Radioactive Wastes: Near-Field Effects. Technical reports series No. 251, IAEA, Vienna, 1985. 60 p.
5. IAEA (TATENA) 1997. The Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA). Information Circular INFCIRC/546. 36 p. 24 December 1997.
6. IAEA (TATENA) 2001. Model formulation, implementation and data for safety assessment or near surface disposal facilities. Working document: ISAM/MDWG/WD01, Version 0.4, Modelling and Data Working Group, 2001. 192 p.
7. IAEA (TATENA) 2004. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities. Results of a co-ordinated research project. Volume 1: Review and enhancement of safety assessment approaches and tools. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA). 413 p.
8. IAEA (TATENA) 2006. Fundamental safety principles: Safety fundamentals. IAEA Safety Standards Series No. SF-1. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA). ISBN 92-0-110706-4. 21 p.
9. IAEA (TATENA) 2011a. Disposal of radioactive waste: Specific Safety Requirements. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA

- (TATENA)). IAEA Safety Standard Series No. SSR-5. 62 p. ISBN 978-92-0-103010-8.
10. IAEA (TATENA) 2011b. Geological disposal facilities for radioactive waste – Specific safety guide. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA). IAEA Safety Standard Series No. SSG-14. 104 p. ISBN 978-92-0-111510-2.
11. IAEA (TATENA) 2012. The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste – Safety specific guide. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA). IAEA Safety Standard Series No. SSG-23. 120 p. ISBN 978-92-0-128310-8.
12. IAEA (TATENA) 2013: The Safety Case and Safety Assessment for the Pre-disposal Management of Radioactive Waste. General Safety Guide Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA). No GSG-3.151 p. ISBN 978-92-0-134810-4.
13. IAEA (TATENA) 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA). No. GSR Part 3. 436 p. ISBN 978-92-0-135310-8.
14. IAEA (TATENA) 2016a. Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety. General Safety Requirements. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA). No. GSR Part 1 (Rev. 1). 42 p. ISBN 978-92-0-108815-4.
15. IAEA (TATENA) 2016b. Safety Assessment for Facilities and Activities. General Safety Requirements. General Safety Requirements Part 4. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA). No. GSR Part 4 (Rev. 1). 38 p. ISBN 978-92-0-109115-4.
16. IAEA (TATENA) 2018. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2018 Edition. Specific Safety Requirements No. SSR-6 (Rev. 1).

- IAEA Safety Standards for protecting people and the environment, Vienna.
17. IAEA (TATENA) 2018. Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection. 2018 Edition.
18. ICRP (TRSK) 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP. Publication 103. The International Commission on Radiological Protection (ICRP). March 2007.
19. LRS 1995. Lietuvos Respublikos žemės gelmių įstatymas, priimtas Lietuvos Respublikos Seimo 1995-07-05 nutarimu Nr. I-1034 (paskutiniai pakeitimai 2022-04-26, Nr. XIV-1049, paskelbta TAR, 2022-05-06, Nr. 9662) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.13E108ED3981/asr>.
20. LRS 1996a. Lietuvos Respublikos branduolinės energijos įstatymas, priimtas Lietuvos Respublikos Seimo 1996-11-14 nutarimu Nr. I-1613 (paskutiniai pakeitimai 2021-10-14, Nr. XIV-573, paskelbta TAR, 2021-10-20, Nr. 21913) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.6286F15970B3/fYIkXlhedY>.
21. LRS 1996b. Lietuvos Respublikos planuojamos ūkinės veiklos poveikio aplinkai vertinimo įstatymas, priimtas Lietuvos Respublikos Seimo 1996-08-15 nutarimu Nr. I-1495 (paskutiniai pakeitimai 2022-06-23, Nr. XIV-1172, paskelbta TAR, 2022-07-07, Nr. 14910) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.0539E2FEB29E/asr>.
22. LRS 1996c. Lietuvos Respublikos statybos įstatymas, priimtas Lietuvos Respublikos Seimo 1996-03-19 nutarimu Nr. I-1240 (paskutiniai pakeitimai 2019-06-06, Nr. XIII-2187, paskelbta TAR, 2019-06-20, Nr. 9971) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.F31E79DEC55D>
23. LRS 1999a. Lietuvos Respublikos radioaktyviųjų atliekų tvarkymo įstatymas, priimtas Lietuvos Respublikos Seimo 1999-05-20 nutarimu Nr. VIII-1190 (paskutiniai pakeitimai 2020-06-25, Nr. XIII-

3121, paskelbta TAR, 2020-07-09, Nr. 15364) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.951DF53F837F/asr>.

24. LRS 1999b. Lietuvos Respublikos radiacinės saugos įstatymas, priimtas Lietuvos Respublikos Seimo 1999-01-12 nutarimu Nr. VIII-1019 (paskutiniai pakeitimai 2020-11-05, Nr. XIII-3364, paskelbta TAR, 2020-11-20, Nr. 24520) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.7083DB116A2E/asr>.

25. LRS 2000. Lietuvos Respublikos Ignalinos atominės elektrinės eksploatavimo nutraukimo įstatymas, priimtas Lietuvos Respublikos Seimo 2000-05-02 nutarimu Nr. VIII-1661 (paskutiniai pakeitimai 2020-06-25, Nr. XIII-3112, paskelbta TAR, 2020-07-09, Nr. 15322) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.00FD7CCA5785/asr>.

26. LRS 2001. Lietuvos Respublikos pavojingų krovinių vežimo automobilių, geležinkelių ir vidaus vandenų transportu įstatymas, priimtas Lietuvos Respublikos Seimo 2001-12-11 nutarimu Nr. IX-636 (paskutiniai pakeitimai 2011-05-24, Nr. XI-1401, paskelbta Valstybės žinios, 2011-06-11, Nr. 71-3368) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.309A34330EAD/asr>.

27. LRS 2001. Lietuvos Respublikos pavojingų krovinių vežimo automobilių, geležinkelių ir vidaus vandenų transportu įstatymas, priimtas Lietuvos Respublikos Seimo 2001-12-11 nutarimu Nr. IX-636 (paskutiniai pakeitimai 2011-05-24, Nr. XI-1401, paskelbta Valstybės žinios, 2011-06-11, Nr. 71-3368) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.309A34330EAD/asr>.

28. LRS 2011. Lietuvos Respublikos branduolinės saugos įstatymas, priimtas Lietuvos Respublikos Seimo 2011-06-28 nutarimu Nr. XI-1539 (paskutiniai pakeitimai 2020-10-15, Nr. XIII-3332, paskelbta TAR, 2020-10-26, Nr. 22201) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.424F7C72601E/GwLXgVAvns>.

29. LRV 2012. Dėl Branduolinės energetikos srities veiklos licencijų ir leidimų išdavimo taisyklių patvirtinimo, patvirtinta Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2012-06-20 nutarimu Nr. 722 (paskutiniai pakeitimai 2021-04-28, Nr. 283, paskelbta TAR, 2021-04-29, Nr. 9042) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.751B037A9885/asr>.

30. LRV 2021. Dėl 2021–2030 metų branduolinės energetikos objektų eksploatavimo nutraukimo ir radioaktyviųjų atliekų tvarkymo plėtros programos patvirtinimo, patvirtinta Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2021 m. vasario 3 d. nutarimu Nr. 76 (paskutiniai pakeitimai 2021-09-29, Nr. 798, paskelbta TAR, 2021-10-08, Nr. 21169) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/0d6ee9606aa611eb9dc7b575f08e8bea/asr>.

31. NAGRA 2002. Project Opalinus Clay. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste. Technical report 02-05.

32. Narkuniene, A., Poskas, P. & Justinavicius, D. 2019. Uncertainty and Sensitivity Analysis at Low Value of Determination Coefficient of Regression Analysis: Case of I-129 Release from RBMK-1500 SNF under Disposal Conditions. Minerals 2019, 9, 521; doi:10.3390/min9090521

33. Narkuniene, A., Poskas, P., Kilda, R. & Bartkus, G. 2015. Uncertainty and sensitivity analysis of radionuclide migration through the engineered barriers of deep geological repository: Case of RBMK-1500 SNF. Reliability Engineering and System Safety. 136. 8–16.

34. OECD 2001. Scenario Development Methods and Practice. An evaluation based on the NEA Workshop on scenario development, Madrid, Spain, 1999, Nuclear Energy Agency, OECD, Paris. 241 p.

35. SKB 1999. SR 97. Deep Repository for Spent Nuclear Fuel. SKB Technical Report TR-99-06, 1999.

36. SKB 2011. SR-Site. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. Volume III. SKB Technical Report TR-11-01.

37. STUK 2016. Radiological monitoring of the environment of a nuclear facility. Helsinki, Finland: Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK). Guide YVL C.7 (19.12.2016). <https://www.stuklex.fi/en/ohje/YVLC-7>

38. STUK 2018a. Disposal of nuclear waste. Helsinki, Finland: Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK). Guide YVL D.5 (13.2.2018). <https://www.stuklex.fi/en/ohje/YVLD-5>

39. STUK 2018b. Radiation and Nuclear Safety Authority Regulation on the safety of disposal of nuclear waste. Helsinki, Finland: Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK). Regulation STUK Y/4/2018 (10.12.2018). <https://www.stuklex.fi/en/maarays/stuk-y-4-2018>.

40. VATESI 2008. Radioaktyviųjų medžiagų, radioaktyviųjų atliekų ir panaudoto branduolinio kuro įvežimo, išvežimo, vežimo tranzitu ir vežimo Lietuvos Respublikoje taisyklės, patvirtinta Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministro ir Valstybinės atominės energetikos saugos inspekcijos viršininko 2008 m. gruodžio 24 d. įsakymu Nr. V-1271/22.3-139 (paskutiniai pakeitimai 2021-11-10, Nr. V-2539/22.3-182, paskelbta TAR, 2021-11-10, Nr. 23306) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.C48C1A7780A9/asr>.

41. VATESI 2010. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-3.1.2-2017: Radioaktyviųjų atliekų tvarkymas branduolinės energetikos objektuose iki jų dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną,

patvirtinta Valstybinės atominės energetikos saugos inspekcijos viršininko 2010 m. gruodžio 31 d. įsakymu Nr. 22.3-120 (paskutiniai pakeitimai 2021-07-02, Nr. 22.3-105, paskelbta TAR, 2021-07-02, Nr. 15210) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.664E893AAD11/asr>.

42. VATESI 2011a. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-1.9.3-2016: Radiacinė sauga branduolinės energetikos objektuose, patvirtinta Valstybinės atominės energetikos saugos inspekcijos viršininko 2011 m. spalio 6 d. įsakymu Nr. 22.3-95 (paskutiniai pakeitimai 2021-09-13, Nr. 22.3-142, paskelbta TAR, 2021-09-13, Nr. 19232) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.B42A908DF1B2/asr>.

43. VATESI 2011b. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-1.9.1-2017: Radionuklidų išmetimo į aplinką iš branduolinės energetikos objektų normos ir reikalavimai radionuklidų išmetimo į aplinką planui, patvirtinta Valstybinės atominės energetikos saugos inspekcijos viršininko 2011 m. rugsėjo 27 d. įsakymu Nr. 22.3-89 (paskutiniai pakeitimai 2017-10-31, Nr. 22.3-198, paskelbta TAR, 2017-10-31, Nr. 17207) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.FC5AAF914979/asr>.

44. VATESI 2015. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-3.2.1-2015: Radioaktyviųjų atliekų priėmimo į paviršinį radioaktyviųjų atliekų atliekyną kriterijai, patvirtinta Valstybinės atominės energetikos saugos inspekcijos viršininko 2015 m. gegužės 27 d. įsakymu Nr. 22.3-103 (paskutiniai pakeitimai 2018-08-30, Nr. 22.3-206, paskelbta TAR, 2018-08-31, Nr. 13688) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/b91cfee0047811e588da8908dfa91cac/asr>.

45. VATESI 2016. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-3.2.2-2016: Radioaktyviųjų atliekų atliekynai, patvirtinta Valstybinės atominės energetikos saugos inspekcijos viršininko 2016 m. lapkričio 30 d. įsakymu Nr. 22.3-188 (paskutiniai pakeitimai

2020-05-19, Nr. 22.3-99, paskelbta TAR, 2020-05-19, Nr. 10625) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/b55b1280b6d611e6aae49c0b9525cbbb/asr>.

46. VATESI 2017. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-4.1.1-2017: Branduolinio kuro ciklo, branduolinių ir daliųjų medžiagų vežimo sertifikatų išdavimo taisyklės, patvirtinta Valstybinės atominės energetikos saugos inspekcijos viršininko 2017 m. liepos 31 d. įsakymu Nr. 22.3-133 <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/d737fa2075e511e7827cd63159af616c>.

47. VATESI 2019. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-1.6.1-2019: Branduolinės energetikos objektų, branduolinės energetikos objektų aikštelių, branduolinių ir branduolinio kuro ciklo medžiagų fizinė sauga, patvirtinta Valstybinės atominės energetikos saugos inspekcijos viršininko 2019 m. lapkričio 5 d. įsakymu Nr. 22.3-271

48. VATESI 2020. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-1.8.7-2020: Valstybinės atominės energetikos saugos inspekcijos licencijomis reguliuojamos veiklos su branduolinėmis ir daliosiomis medžiagomis sauga, patvirtinta Valstybinės atominės energetikos saugos inspekcijos viršininko 2020 m. sausio 17 d. įsakymu Nr. 22.3-15 (paskutiniai pakeitimai 2020-07-01, Nr. 22.3-143, paskelbta TAR, 2020-07-01, Nr. 14722) <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/fe3ff7d0390b11ea829bc2bea81c1194>.