



VĮ Radioaktyviųjų atliekų tvarkymo agentūra



PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO IR ILGAAMŽIŲ RADIOAKTYVIŲJŲ ATLIEKŲ TVARKYMO IR DĖJIMO Į ATLIEKYNUS BŪDAI

Stasys MOTIEJŪNAS

TURINYS

ĮVADAS	5
1. RADIOAKTYVIŲJŲ ATLIEKŲ ŠALTINIAI, KLASIFIKAVIMAS IR TVARKYMO PRINCIPAI	6
2. PANAUDOTAS BRANDUOLINIS KURAS, JO SAUGOJIMAS IR TVARKYMAS	10
3. PANAUDOTO KURO PERDIRBIMAS, PAKARTOTINIS NAUDOJIMAS IR TRANSMUTAVIMAS	14
4. RADIOAKTYVIŲJŲ ATLIEKŲ APDOROJIMAS	16
5. RADIOAKTYVIŲJŲ ATLIEKŲ ŠALINIMO BŪDAI, ATLIEKYNŲ TIPAI	19
6. GILUMINIS RADIOAKTYVIŲJŲ ATLIEKŲ LAIDOJIMAS	22
7. AR ĮMANOMOS ALTERNATYVOS GILUMINIAM ILGAAMŽIŲ RADIOAKTYVIŲJŲ ATLIEKŲ LAIDOJIMUI?	32
PABAIGA	35
SVARBIAUSIOS SĄVOKOS	36
LITERATŪRA	40

ĮVADAS

Branduolinės energetikos atliekomis privalome pasirūpinti mes – karta, turėjusi naudoti iš branduolinės energetikos. Atliekos turi būti sutvarkytos taip, kad nekeltų pavojaus nei žmonėms, nei aplinkai ne tik dabar, bet ir po daugelio metų.

Jau šešis dešimtmečius žmonija naudoja branduolinių jėgainių energiją. Tolesnei branduolinės energetikos plėtrai ir jos raidai trukdo iki galo neišspręstos problemos, kylančios tvarkant branduolines atliekas. Atliekų tvarkymo pažangą dažnai stabdo nepakankamas informacijos kiekis. Visuomenės apklausos rodo, kad Europos, taip pat ir Lietuvos, žmonių žinios apie radioaktyvias atliekas ir jų keliamas grėsmes yra gana skurdžios. Tik apie 18 % Lietuvos gyventojų mano, kad yra pakankamai gerai informuoti apie radioaktyviųjų atliekų tvarkymą [1]. Net 93 % Europos Sąjungos gyventojų norėtų, kad jau dabar būtų taikomi saugūs ir tvarūs radioaktyviųjų atliekų tvarkymo būdai, tačiau tik 43 % jų galvoja, kad tinkamiausias būdas yra jas palaidoti žemės gelmėse. Lietuvoje tokių – mažuma; daugiau nei 60 % žmonių mano, kad atliekos turėtų būti saugomos, laukiant galutinio sprendimo.

Svarbiausias radioaktyviųjų atliekų tvarkymo tikslas – pasiekti, kad radioaktyviosios atliekos nepakenktų žmonėms ir aplinkai. Dažnai šios atliekos išlieka pavojingos šimtus ar tūkstančius metų, todėl privalome rūpintis ne tik savo saugumu, bet ir kitomis kartomis. Savo atliekomis privalome pasirūpinti patys, nepalikdami naštos ainiams.

1. RADIOAKTYVIŲJŲ ATLIEKŲ ŠALTINIAI, KLASIFIKAVIMAS IR TVARKYMO PRINCIPAI

Radioaktyviosios atliekos savo prigimtimi dažniausiai mažai skiriasi nuo kitų pramoninių atliekų. Tai gali būti netinkami naudoti įrenginiai, išmontuoti prietaisai, apsauginiai drabužiai, filtrai bei skysčiai, užteršti radionuklidais. Nuo kitų atliekų radioaktyviosios atliekos labiausiai skiriasi tuo, kad skleidžia žmonėms ir aplinkai žalingą jonizuojančiąją spinduliuotę. Ne visos atliekos yra vienodai pavojingos – radioaktyviųjų atliekų pavojingumą lemia skleidžiamos jonizuojančiosios spinduliuotės rūšis ir intensyvumas, kuris priklauso nuo atliekose esančių radionuklidų ypatybių ir kiekio. Skirtingo pavojingumo radionuklidų spinduliuotę sulaiko skirtingo lygio apsaugos barjerai – nuo labai paprastų apsaugos priemonių iki daugiabarjerių saugos sistemų. Kitas esminis radioaktyviųjų atliekų skirtumas nuo kitų atliekų yra jų kiekis. Radioaktyviųjų atliekų susidaro palyginti nedaug – šalyse, naudojančiose branduolinę energiją, branduolinės atliekos sudaro tik apie 1 % visų pavojingų atliekų kiekio. Dažnai šios atliekos išlieka pavojingos šimtus ar tūkstančius metų.

Jau 50 metų branduolinė energija pramoniniu būdu naudojama elektrai gaminti – apie 17 % pasaulio elektros energijos pagaminama branduolinėse jėgainėse. Branduolinė energetika neįmanoma be radioaktyviųjų atliekų. Jų susidaro visose fazėse, pradedant urano rūdos kasyba ir sodrinimu, elektros gamyba, ir baigiant branduolinių reaktorių išmontavimu bei panaudoto kuro tvarkymu ar perdirbimu. Iš viso pasaulyje per vienerius metus branduolinėse elektrinėse susidaro apie 200 tūkst. m³ mažo ir vidutinio aktyvumo ir apie 10 tūkst. m³ didelio aktyvumo (įskaitant panaudotą kurą) atliekų.

Radioaktyviųjų atliekų atsiranda jau kasant urano rūdą. Norint aprūpinti kuru įprastinį 1000 MW galios lengvojo vandens reaktorių (jo pagaminamos elektros pakanka milijoną gyventojų turinčiam miestui), per metus reikia iškasti 40–50 tūkst. t urano rūdos. Išgaunant uraną, apie 96 % iškastos rūdos tampa atliekomis. Praturtinant uraną – koncentruojant ²³⁵U – lieka daug taip vadinamo nuskurdinto urano (jame ²³⁵U yra santykinai mažiau negu iš rūdos išgaunamame gamtiniame urane). Gaminant kurą minėtam reaktoriui, per metus susidaro apie 200 t nuskurdinto urano, kuris irgi yra silpnai radioaktyvus.

Veikiant branduoliniams reaktoriams, susidaro pavojingiausios – didžiausio aktyvumo – atliekos. Jos būna kietos, skystos ir dujinės. Tipiškam 1000 MW galios reaktoriui per metus reikia apie 25–30 t branduolinio kuro. Taigi, veikiant šiam reaktoriui, per metus susidaro 25–30 t panaudoto kuro ir 200–300 t mažai ir vidutiniškai radioaktyvių atliekų. Apie 4 % panaudoto kuro masės sudaro branduolinės reakcijos produktai. Apie 99 % dalijantis ²³⁵U branduoliams susidariusių radionuklidų kiekio (aktyvumo) pasilieka panaudotame kure. Kiti radionuklidai patenka į mažo ir vidutinio aktyvumo atliekas arba į aplinką.

Labai įvairios atliekos susidaro išmontuojant branduolinius reaktorius: reaktorių konstrukcijos, vamzdynai, turbinos, pastatai ir kita įranga dažnai būna užteršti radionuklidais arba radionuklidai pasigamina pačiose minėtose reaktorių medžiagose, šioms sąveikaujant su neutronų srautu (aktyvaciniai radionuklidai).

Radioaktyviųjų atliekų būna ne tik branduolinėje energetikoje – nedideli jų kiekiai susidaro medicinoje, pramonėje, atliekant mokslo tyrimus. Medicinoje kai kuriems susirgimams diagnozuoti naudojami žymėtieji atomai, vėžiniams susirgimams gydyti – jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniai. Pramonėje šie šaltiniai dažnai naudojami radiografuose, dūmų jutikliuose ir kituose įrengimuose. Išgaunant ir transportuojant naftą, joje ištirpę ilgaamžiai gamtiniai radionuklidai (radis – 226) kaupiasi ant vamzdžių sienelių ir įrengimų paviršių. Panaudoti jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniai, radioaktyviosios medžiagos ir radionuklidais užteršti įrengimai virsta radioaktyviosiomis atliekomis.

Radioaktyviosios atliekos turi būti sutvarkytos taip, kad nekeltų pavojaus nei žmonėms, nei aplinkai ne tik dabar, bet ir po daugelio metų. Gyviems organizmams pavojų kelia išorinė apšvita ir vidinė apšvita (prarijus ar įkvėpus radioaktyviųjų medžiagų). Tarpau-

tinė atominės energetikos agentūra (TATENA), rūpindamasi žmonių ir aplinkos sauga, nustatė principus [2], kurių būtina laikytis tvarkant radioaktyvias atliekas:

- Būtina siekti, kad atliekų susidarytų kiek įmanoma mažiau, atliekos turi būti rūšiuojamos ir tvarkomos atsižvelgiant į jų pobūdį;
- Žmonės ir aplinka turi būti apsaugoti nuo atliekų keliamų radiologinių, cheminių ir kitų pavojų visose jų tvarkymo stadijose;
- Ateities kartos turi būti apsaugotos ne blogiau, negu dabartinė; ateities kartoms neturi būti paliekama nepelnyta atliekų tvarkymo našta;
- Atliekų tvarkymo įrenginių sauga turi būti garantuota tiek jų veikimo metu, tiek ir pasibaigus jų veikimui;
- Apie planuojamų radioaktyviųjų atliekų tvarkymo įrenginių saugą turi būti informuota visuomenė.

Nors paprastai radioaktyviųjų atliekų susidaro daug mažiau negu neradioaktyvių, tačiau jų kiekį būtina mažinti visais įmanomais būdais. Taip yra paprasčiausia sumažinti atliekų keliamą poveikį aplinkai ir jų tvarkymo bei laidojimo išlaidas. Atliekų kiekį daugiausiai lemia branduolinių reaktorių tipas, galia, eksploatavimo trukmė, pasirinkta atliekų tvarkymo strategija [3]. Pats efektyviausias būdas sumažinti atliekų kiekį yra priimti tinkamus sprendimus planuojant ir projektuojant naujus branduolinius įrenginius. Tačiau atliekų kiekius įmanoma sumažinti ir vėliau, pertvarkius gamybos procesą. Įprastinis praktinis veiksmas, leidžiantis sumažinti branduolinių atliekų kiekį, yra jų rūšivimas – jau atliekų susidarymo vietose būtina jas kruopščiai skirstyti į radioaktyvias ir neradioaktyvias bei panaikinti skirtingų atliekų susimaišymo galimybę. Kitas itin efektyvus atliekų kiekio sumažinimo būdas yra pakartotinis jų naudojimas.

Ne visos branduolinės atliekos yra vienodai pavojingos; atliekos, kuriose yra labai maži radionuklidų kiekiai, nelaikomos radioaktyviomis ir gali būti nesukeliant pavojaus šalintos įprastiniuose pramoninių ar buitinių atliekų sąvartynuose. Pavojingesnės atliekos yra atskiriamos ir tvarkomos specialiuose įrenginiuose. Kuo atliekos pavojingesnės, tuo patikimiau jos izoliuojamos. Pasaulyje nėra vieningos atliekų klasifikavimo sistemos – įvairiose šalyse ji šiek tiek skiriasi. Atliekos klasifikuojamos pagal jų pavojingumą: jose esančių radionuklidų kiekį, skleidžiamos jonizuojančiosios spinduliuotės pobūdį ir intensyvumą, ilgaamžiškumą. Radionuklidų pusėjimo trukmės (laikas, per kurį aktyvumas sumažėja du kartus) yra labai skirtingos: vienų radionuklidų ji trunka tik sekundes ar sekundes dalis, o kitų – tūkstančius metų. Priklausomai nuo atliekose esančių radionuklidų ilgaamžiškumo, vienos atliekos bus pavojingos tūkstančius metų, o kitos taps

nepavojingos per kelias dienas ar metus. Trumpaamžėmis atliekomis laikomos tokios atliekos, kuriose nėra reikšmingų kiekių radionuklidų, kurių pusėjimo trukmė yra ilgesnė negu ^{137}C (šiek tiek daugiau negu 30 metų). Labai radioaktyviomis atliekomis paprastai laikomos tokios atliekos, kurias būtina ne tik ekranuoti, bet ir aušinti (šiluma išsiskiria vykstant branduolinių virsmams – radioaktyviajam skilimui). Jos susidaro perdirbant panaudotą branduolinį kurą. Jeigu kuro neketinama perdirbti (išskirti uraną ir plutoną), tai jis irgi priskiriamas labai radioaktyvioms atliekoms. Šių atliekų negalima laidoti žemės paviršiuje ar arti jo – būtini giluminiai, keleto šimtų metrų gylyje įrengti atliekynai. Veikiant reaktoriams, tokių atliekų susidaro labai mažai, tačiau jose susikoncentruoja didžioji dalis radionuklidų – branduolinės reakcijos produktų.

Radioaktyviosios atliekos paprastai tvarkomos vadovaujantis praktiniu principu „koncentruok ir sulauk, neleisk išplisti“ (angl. „concentrate and contain“). Įvairiais būdais mažinant atliekų tūrį, jose esantys radionuklidai sukaupti ir laikomi izoliuoti, kad nepasklistų ir nepadarytų žalos žmonėms bei aplinkai. Skystos atliekos pirmiausiai sukietinamos, o radionuklidų turinčios dujos filtruojamos arba valomos sorbentais. Apdorotos atliekos laikomos saugyklose arba laidojamos atliekynuose, kurie atliekas izoliuoja pakankamai ilgai (kol didžioji radionuklidų dalis suskils – pavirs stabiliais branduoliais ir nebekels pavojaus).

Kartais, kai atliekas koncentruoti neįmanoma ar netikslinga, vadovaujama principu „atskiesk ir paskleisk“ (angl. „dilute and disperse“) – praskiestos atliekos paskleidžiamos aplinkoje. Šiuo atveju turi būti įsitikinta, kad nesusikaups žmonėms ir aplinkai pavojingas radionuklidų kiekis, nebus pažeisti radiacinės saugos reikalavimai. Šis būdas gana dažnai taikomas dujinėms atliekoms, o kai kada ir skystoms bei kietoms. Branduoliniuose reaktoriuose pasigaminusios inertinės radioaktyvios dujos paprastai išleidžiamos pro tam tikslui įrengtus ventiliacijos vamzdžius. Prieš pasiekdami žemės paviršių, branduolinės reakcijos produktai atsiskiedžia iki nepavojingų lygių.

Išlaikymo būdas (angl. „delay and decay“) taikomas tvarkant atliekas, kuriose nėra ilgaamžių radionuklidų. Atliekos saugomos tol, kol trumpaamžiai radionuklidai suskils ir atliekos bus nepavojingos. Paprastai pakanka atliekas išlaikyti 10 pusėjimo trukmių. Per tą laiką aktyvumas sumažėja apie 1000 kartų. Pavyzdžiui, medicinoje itin dažnai naudojama ^{131}I pusėjimo trukmė – 8 dienos. Pakaks 80 dienų, kad šio šaltinio aktyvumas sumažėtų 1000 kartų. Kad ir koks atliekų tvarkymo metodas būtų pasirinktas, visais atvejais turi būti įsitikinta saugumu.

2. PANAUDOTAS BRANDUOLINIS KURAS, JO SAUGOJIMAS IR TVARKYMAS

Branduoliniuose reaktoriuose energijai gauti naudojamas branduolinis kuras. Jame yra medžiagų (daliųjų medžiagų), kurių atomų branduoliai gali dalytis veikiami neutronų ir dėl to gali vykti grandininė branduolių dalijimosi reakcija. Būtina branduolinio kuro sudėtinė dalis yra dalieji branduoliai. Tokie yra gamtinis urano izotopas ^{235}U ir kai kurie branduolinių reakcijų metu sukuriami izotopai. Svarbiausi jų – ^{239}Pu ir ^{238}U . Branduolinis kuras yra daliųjų medžiagų mišinys, jame paprastai yra urano ^{235}U ir urano ^{238}U arba torio ^{232}Th . Tai yra gamtinės medžiagos. ^{238}U ir ^{232}Th aktyviojoje reaktoriaus zonoje virsta plutoniu ^{239}Pu ir uranu ^{233}U . Dalijantis 1 g urano arba plutonio izotopų branduolių, gaunama apie 22,5 MWh šiluminės energijos. Nenaudotas branduolinis kuras yra beveik neradioaktyvus. Tačiau branduoliniame reaktoriuje kure susikaupia didžioji dalis branduolių dalijimosi produktų bei aktinidų, todėl branduolinis kuras tampa ypatingai radioaktyvus.

Išimtas iš reaktorių kuras yra tuojau pat panardinamas į vandens baseinus, esančius greta branduolinių reaktorių, kad vanduo jį nepertraukiamai aušintų – panaudotame kure esančios radioaktyvios medžiagos išskiria didelį šilumos kiekį. Panardintas į vandenį kuras laikomas nuo keleto iki kelių dešimčių metų (1 pav.) ir tik tada gali būti išimtas iš vandens ir sudėtas į masyvius oru aušinamus konteinerius – taip vadinamas „sausas“ saugyklos. Konteineriai būna metaliniai arba betoniniai (2 pav.) ir gali būti skirti tiek kurui saugoti, tiek ir jį transportuoti.



1 pav. Saugykloje po vandeniu saugomos panaudoto kuro rinklės

Abu panaudoto kuro saugojimo būdai turi esminių skirtumų. Panaudoto kuro saugyklos su vandens baseiniais reikalauja daug griežtesnės priežiūros, nes jose yra daug mechaninių sistemų (vandens siurblių, vamzdynų ir pan.), sauga užtikrinama aktyviomis priemonėmis. „Sausose“ saugyklose sauga užtikrinama beveik vien tik pasyviomis priemonėmis, todėl yra minimali incidentų ar žmogiškųjų klaidų tikimybė. Kol iš reaktorių išimtas kuras laikomas vandens baseinuose, didžiausią pavojų kelia galimybė prarasti aušinimo vandenį. Jeigu vanduo neapsemtų panaudoto kuro rinklių, šios būtų nepakankamai aušinamos ir galėtų įkaisti iki cirkonio lydinio, paprastai naudojamo gaminant kuro rinkles, užsiliepsnojimo temperatūros arba prasidėti įkaitusio cirkonio ir vandens garų reakcija, kurios metu išsiskiria vandenilio dujos [4]. Būtent tokiu būdu susidariusių vandenilio dujų sprogimai 2011 metais įvyko Fokušimos elektrinėje Japonijoje. Šitokių avarių metų į orą patenka lakūs radionuklidai. Avarių pavojus sumažėja pakankamai ilgai (apie 5 metus) aušinimo baseinuose išlaikytą panaudotą kurą perkėlus iš baseinų į konteinerius.

Šiuo metu pasaulyje sukaupta apie 280 000 tonų panaudoto kuro, skaičiuojant pradinę sunkiųjų metalų – U, Pu, Th ir kitų aktinidų – masę (toliau – t(SM)). Kiekvienais metais šis kiekis padidėja 10 500 t(SM) – tiek branduolinio kuro panaudoja branduolinės elektrinės. Apie 90 % kuro tebėra saugomas baseinuose, o kitas – konteineriuose. Daugiausiai panaudoto kuro sukaupta JAV ir Kanadoje (1 lentelė).



2 pav. Ignalinos AE saugykloje iškraunami konteineriai, skirti saugoti panaudotą kurą

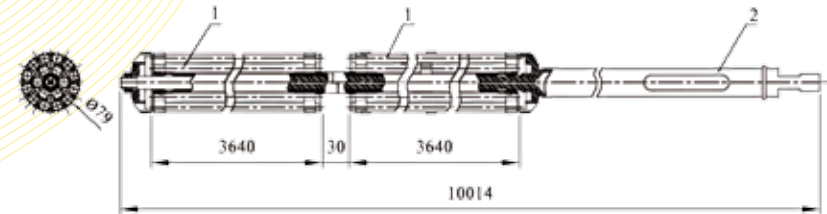
1 lentelė. Panaudotas kuras užsienio šalyse [5]

EIL. NR.	ŠALIS	PANAUDOTO KURO KIEKIS SAUGYKLOSE (2007 M. DUOMENYS), T(SM)	PANAUDOTO KURO TVARKYMO STRATEGIJA
1	JAV	61 000	Tiesioginis laidojimas
2	Kanada	37 400	Tiesioginis laidojimas
3	Japonija	19 000	Perdirbimas
4	Prancūzija	13 500	Perdirbimas
5	Rusija	13 000	Dalies kuro perdirbimas, sprendimas laidoti nepriimtas
6	Pietų Korėja	10 900	Saugojimas, sprendimas laidoti nepriimtas
7-8	Didžioji Britanija	5 850	Perdirbimas
7-8	Vokietija	5 850	Tiesioginis laidojimas, atsisakius perdirbimo Prancūzijoje
9	Švedija	5 400	Tiesioginis laidojimas
10	Suomija	1 600	Tiesioginis laidojimas

Panaudoto kuro sudėtis, radioaktyvumas ir šilumos išsiskyrimas priklauso nuo kuro išdegimo laipsnio, reiškiančio energijos kiekį, išsiskyrusį branduolinės reakcijos metu, tenkantį panaudoto kuro masės vienetui (mato vienetas $GW \text{ diena}/t(SM)$). Kuro išdegimo laipsnis priklauso nuo reaktoriaus konstrukcijos. Reaktoriuose su lengvojo vandens neutronų lėtikliu (šiuo metu tokių reaktorių daugiausia) įprastinis kuro išdegimo laipsnis yra $50 \text{ GW diena}/t(SM)$. Reaktoriuose su sunkiojo vandens lėtikliu (kanadietiški CANDU reaktoriai) ir grafito lėtikliu (RBMK reaktoriai) išdegimo laipsnis yra atitinkamai 7 ir $15 \text{ GW diena}/t(SM)$ [5]. Paprastai lengvojo vandens reaktorių panaudotame kure yra apie 93,4 % urano, 5,2 % branduolių dalijimosi reakcijos produktų, 1,2 % plutonio ir 0,2 % transuraninių elementų (neptunio, americio, kiurio). Laikui bėgant, radionuklidų kiekis (aktyvumas) natūraliai mažėja, kartu mažėja ir šilumos išsiskyrimo intensyvumas. Per pirmuosius keletą šimtmečių panaudotame kure vyrauja dalijimosi reakcijos produktai ^{90}Sr ir ^{137}Cs , kurių pusėjimo trukmės apytiksliai yra 30 metų. Vėliau, šiems suskilus, įsivyrąja transuraniniai (plutonio, americio, neptunio ir kiurio) radionuklidai, kurių pusėjimo trukmės yra labai didelės (plutonio ^{239}Pu pusėjimo trukmė 24000 metų).

Vystantis branduolinei energetikai, atsirado kelios panaudoto kuro tvarkymo strategijos (1 lentelė). Kai kurios šalys yra pasirinkusios panaudoto kuro perdirbimo bei pakartotinio naudojimo strategiją, dar vadinamą „uždaru“ kuro ciklu. Jose panaudotas kuras gabenamas į perdirbimo gamyklas, kur, veikiant chemiais reagentais, išskiriami sudėtiniai kuro komponentai, įskaitant ir pakartotinai naudoti tinkamus uraną ir plutonį. Šio proceso metu susidaro didelio aktyvumo atliekos į kurias patenka didžioji branduolinės reakcijos metu pasigaminusių radionuklidų dalis. Taip pat susidaro nemaži kitokių rūšių atliekų kiekiai, kurias būtina tvarkyti ir laidoti. Kitos šalys taiko tiesioginio laidojimo strategiją (kuras neperdirbamas) arba ilgalaikį saugojimą.

Per visą eksploataavimo laiką Ignalinos atominėje elektrinėje buvo panaudotos 21 646 branduolinio kuro rinklės (3 ir 4 pav.). Tai sudaro apie 2 400 t(SM) panaudoto kuro. Dalis susikaupusio kuro saugoma „sauso“ tipo saugykloje, tačiau didesnę dalis tebėra elektrinės reaktoriuje ir reaktoriaus baseine. Jis bus perkeltas į šiuo metu baigiamą statyti naują panaudoto branduolinio kuro saugyklą. Saugykloje naudojami konteineriai (2 pav.) tarnaus ne trumpiau negu 50 metų. Po to šis kuras turės būti laidojamas giluminiame atliekyne, jeigu, įvertinus besikeičiančias technines sąlygas, nebus nuspręsta kitaip.



3 pav. Ignalinos AE (RBMK-1500 reaktorių) kuro rinklė su 111 kg urano: 1 – 36 cirkonio lydinio vamzdeliai su urano dioksido tabletėmis (kuro „strypai“), 2 – prailginimo strypas [6]



4 pav. RBMK reaktoriaus branduolinio kuro rinklės maketas Ignalinos atominėje elektrinėje

3. PANAUDOTO KURO PERDIRBIMAS, PAKARTOTINIS NAUDOJIMAS IR TRANSMUTAVIMAS

Viena esminių branduolinės energetikos ypatybių yra ta, kad panaudotas kuras gali būti perdirbtas ir iš jo išskirtos daliosios medžiagos – uranas ir plutonis. Iš jų galima gaminti branduolinį kurą ir vėl naudoti branduolinėse elektrinėse. Dar branduolinės eros pradžioje panaudotas kuras buvo pradėtas perdirbti kariniais tikslais – buvo siekiama pagaminti branduolinėms bomboms tinkantį plutonį. Šiuo metu svarbiausias panaudoto kuro perdirbimo tikslas yra tausoti gamtos išteklius (pakartotinai naudojant kurą galima iš to paties urano kiekio išgauti 25-30 % daugiau energijos). Kitas perdirbimo tikslas – sumažinti radioaktyviųjų atliekų, kurias reikės laidoti žemės gelmėse, kiekį. Perdirbus kurą gautas labai aktyviųjų atliekų kiekis apytiksliai sudaro tik vieną penktąją pradinio kuro kiekio. Be to, šių atliekų savitasis aktyvumas yra mažesnis už panaudoto kuro – jame mažiau ilgaamžių radionuklidų. Perdirbant panaudotą kurą, uranas ir plutonis atskiriami nuo kitų elementų. Branduolinės reakcijos produktai patenka į atliekas – lieka didelio aktyvumo atliekos, kurios paprastai įstiklinamos, ir daug mažo bei vidutinio aktyvumo skystų ir kietų atliekų.

Iki šiol pasaulyje buvo perdirbta apie 90 000 t(SM) panaudoto kuro [7] (komercinių perdirbimo gamyklų pajėgumai apžvelgti 2 lentelėje). Daugelis šalių – JAV, Argentina, Brazilija, Pietų Korėja, Švedija ir Taivanas – nutraukė kuro perdirbimo programas. Tai buvo padaryta, nes nukrito urano kainos bei įsigalėjo branduolinio ginklo neplatavimo principas [5]. Siųsti panaudotą kurą į kaimyninių šalių perdirbimo gamyklas nustojo ir Vokietija, nes tam prieštaravo visuomenė.

2 lentelė. Panaudotas kuras užsienio šalyse [5]

ŠALIS	PERDIRBIMO CENTRAI	PAJĖGUMAS, T(SM) PER METUS
Didžioji Britanija	Sellafield	2 400
Prancūzija	La Hague	1 700
Japonija	Rokkasho	800 (veikia nuo 2013 m.)
Rusija	Ozersk („Majak“)	400
Indija	4 gamyklos	330
	Viso:	5 630

Be jau minėtų privalumų, panaudoto kuro perdirbimas turi nemažai trūkumų. Panaudotame kure esama įvairiausių nuklidų, daugelis kurių yra radioaktyvūs. Tai komplikuoja kuro perdirbimo procesą. Perdirbant kurą, susidaro antrinės atliekos, kurias, kaip ir neperdirbtą kurą, būtina laidoti giluminiam atliekynė. Taigi perdirbimas nesumažina socialinės įtampos, susijusios su giluminio atliekyno vietos parinkimu [5]. Be to, perdirbant išgautame urane aptinkama radioaktyviųjų priemaišų, kurios sunkina jo panaudojimą, tai yra blogina kokybę. Todėl perdirbimo metu išgauto urano vertė apytiksliai sudaro tik pusę gamtinio urano vertės [7]. Dėl minėtų techninių priežasčių tik nedidelė išskirto urano dalis yra panaudota reaktoriuose, o didžioji dalis tebėra saugoma saugyklose.

Perdirbimo metu išgauto plutonio izotopinė sudėtis priklauso nuo panaudoto kuro išdegimo laipsnio. Kuo išdegimo laipsnis didesnis, tuo daugiau susikaupia branduolinio kuro kokybę bloginančių priemaišų ir tuo pačiu mažėja plutonio vertė. Iš panaudoto kuro išskirtas plutonis yra naudojamas iš karto. Jo negalima ilgai saugoti, nes laikui bėgant didėja skleidžiamos gama spinduliuotės intensyvumas (didėjant priemaišinio ²⁴¹Am radionuklidų kiekiui). Paprastai plutonis maišomas su uranu ir gaminamas MOX kuras, kuris naudojamas lengvojo vandens reaktoriuose. Kadangi plutonyje yra įvairių priemaišų, kurios nesuskyla dabartiniuose reaktoriuose, tai naudojant MOX kurą susidaro labiau radiotoksiškos, pavojingesnės ir didesnio ilgaamžiškumo atliekos, negu naudojant įprastinį branduolinį kurą.

Panaudoto kuro perdirbimo derinimą su išskirtų urano ir plutonio naudojimu šiandieniniuose reaktoriuose galima laikyti tik pradine kuro pakartotinio naudojimo stadija. Geresnės galimybės naudoti išskirtą plutonį, tai yra taikyti „uždarą kuro ciklą“, atsiradę diegiant pažangius naujos kartos branduolinius reaktorius. Greitų neutronų reaktoriai sunaudos (suskaidys) ne tik uraną ir plutonį, bet ir kitus aktinidus. Dar didesnes galimybes turėtų atverti tobulesni panaudoto kuro perdirbimo būdai ir jų derinimas su radionuklidų transmutavimu.

Transmutavimo tikslai yra ilgaamžius aktinidus paversti dalijimosi produktais (neradioaktyviais arba radioaktyviais izotopais), o ilgaamžius dalijimosi radionuklidus – trumpaamžiais. Tokiu būdu pavyktų vietoje panaudoto kuro turėti atliekas, keliančias pavojų tik kelis šimtus metų. Atliekyno poreikis visiškai neišnyktų, tačiau jis turėtų būti mažesnis ir paprastesnis [7].

Paversti vienus radionuklidus kitais galima bombarduojant juos neutronais. Tai įmanoma padaryti branduoliniuose reaktoriuose arba naudojant neutronų greitintuvus. Paprastai radionuklidai efektyviausiai transmutuoja veikiami didelės energijos neutronų. Todėl radionuklidų transmutavimo taikymo pažanga siejama su greitų neutronų reaktorių vystymu.

4. RADIOAKTYVIŲJŲ ATLIEKŲ APDOROJIMAS

Dujinio ar skysto pavidalo radioaktyviausias atliekas būtina paversti kietomis – jas sukietinti. Sukietinus sukuriama fiziškai stabili, nedispersiška medžiaga, kurią patogiu ir saugu kilnoti, prižiūrėti, saugoti ir laidoti. Atliekynuose atliekų rišamoji terpė atlieka barjero, neleidžiančio atliekoms pasklisti iš atliekyno, funkciją. Tipiški skystų atliekų sukietinimo būdai yra nusodinimas, išgarinimas, bitumavimas, cementavimas, įstiklinimas [3]. Galutinis radioaktyviųjų atliekų apdorojimo tikslas – pagaminti pakuotes, tinkančias saugoti, transportuoti ir padėti į atliekyną.

Jau 50 metų didelio aktyvumo radioaktyviosios atliekos įstiklinamos. Šis metodas taikomas visuose panaudoto kuro perdirbimo centruose: perdirbant panaudotą kurą susidariusios skystos atliekos išgarinamos ir sausos liekanos sumaišomos su išlydytu stiklo mase arba stiklą formuojančiomis medžiagomis (pavyzdžiui, susmulkintu stiklu). Aukštoje temperatūroje išlydytas mišinys supilamas į patvarius nerūdijančio plieno cilindrus (paprastai apie 150 L talpos), kurie, masei atvėsus, sandariai užvirinami. Taip apdorotas atliekas galima saugoti ir laidoti. Cilindrai su atliekomis (5 pav.) saugomi specialiai įrengtose saugyklose, kuriose užtikrinamas patikimas cilindrų aušinimas. Įstiklintų atliekų saugojimo trukmė – 50 metų. Per tą laiką sumažėja atliekų išskiriamas šilumos kiekis. Dėl to tampa paprastesnis atliekų transportavimas ir jų laidojimas.



5 pav. Nerūdijančio plieno cilindras su įstiklintomis labai radioaktyviomis atliekomis

Kaip sukietinanti terpė stiklas buvo pasirinktas dėl šių priežasčių: stiklas yra atsparus didelio intensyvumo jonizuojančiosios spinduliuotės poveikiui, šiuo būdų sukietintos atliekos užima nedidelį tūrį ir yra labai mažai tirpios. Taip sumažėja pavojus radionuklidais užteršti gruntinį vandenį.

Vidutinio ir mažo aktyvumo atliekos taip pat yra apdorojamos. Tai daroma atliekas sudeginant, sulydant, cementuojant, bitumuojant, presuojant ir kitais būdais.

Iš visų skystų atliekų ir jų koncentratų sukietinimo būdų dažniausiai pirmenybė teikiama cementavimui. Šis metodas tinka tiek kietoms atliekoms, tiek įvairių formų nuosėdoms ar skystų atliekų koncentratams apdoroti. Kietos atliekos kraunamos į konteinerius ir užliejamos paruoštu cemento skiediniu. Tyrės pavidalo atliekos sumaišomos su cementu bei kitais priedais ir supilamos į konteinerius ar statines. Pakuotės su monolitiniais atliekų blokais tinka saugoti, transportuoti ir laidoti.

Cementavimas turi daug privalumų. Beveik visų rūšių atliekos gali būti arba sumaišytos su cemento mišiniu, arba užlietos skiediniu. Sucementuotos atliekos yra atsparios aplinkos poveikiui ir labai gerai sulaiko kai kuriuos radionuklidus. Cemento mišiniams yra būdingos didelės pH vertės, o tokios sąlygos užtikrina labai mažą daugumos radionuklidų tirpumą ir mobilumą, stabdo mikrobiologinius procesus. Cementinė rišančioji terpė yra nedegi ir termiškai, chemiškai, biochemiškai stabili. Cementavimo procesas paprastas ir ekonomiškai. Didžiausias jo trūkumas – cementavimo mišinyje atliekos gali sudaryti tik nedidelę dalį, todėl cementuojant labai padidėja atliekų tūris ir dėl to išauga atliekų tolimesnio saugojimo ir laidojimo kaina. Šis metodas nelabai tinka apdoroti organines atliekas ir atliekas, kuriose didelė druskų koncentracija – didėjant druskų koncentracijai, mažėja cementinės terpės patvarumas, mechaninis tvirtumas, ilgaamžiškumas. Cementuotos atliekos nėra itin atsparios vandens poveikiui, todėl šiuo būdu apdorotas atliekas būtina saugoti nuo drėgmės.

Atliekų maišymas su išlydytu bitumu taip pat yra dažnai taikomas radionuklidų sukietinimo būdas. Bitumuota masė yra vandenyje labai mažai tirpi ir labai mažai pralaidi, todėl labai gerai sulaiko radionuklidus. Tačiau kyla abejonių dėl bitumo terpės stabilumo. Kitas pavojus – bitumo degumas. Įvairūs polimerai (polietilenas, poliesteris, poliuretanas, epoksidinės dervos ir pan.) yra naudojami sukietinti garinimo koncentratams, panaudotas jonų pakaitos dervas, nuosėdas ir pelenus. Metodas tinka tirpioms druskoms ar organinėms medžiagoms apdoroti. Jo trūkumas yra tas, kad polimerizuotoje masėje būna nedidelė atliekų dalis. Kaip ir bitumuojant, tenka rūpintis priešgaisrine sauga. Iš visų polimerų dažniausiai taikomi poliesteris ir epoksidinės dervos. Abiem atvejais procesas vyksta normalioje temperatūroje, naudojama gana nesudėtinga įranga.

Metalu atliekos dažnai išlydomos. Perlydant radioaktyvų metalo laužą, sumažėja užimamas tūris ir susidaro vientisi metalo blokai, kuriuos patogiau saugoti ir laidoti. Lydymo proceso metu didžioji dalis lakiųjų radionuklidų išgaruoja. Dalis radionuklidų koncentruojasi šlako sluoksnyje. Taigi metalo liejinių aktyvumas būna mažesnis už pradinį metalo laužo aktyvumą – metalas dalinai deaktyvuojamas. Lydymo privalumai yra žymus atliekų tūrio sumažinimas ir galimybė pakartotinai naudoti metalą. Tačiau šis metodas turi ir trūkumų – lydymo įrenginys privalo turėti efektyvią išmetamųjų dujų valymo sistemą. Proceso metu susidaro antrinių radioaktyviųjų atliekų (šlako ir filtrų) bei sunaudojama daug energijos.

Naujas ir labai efektyvus (deja, labai brangus) kietųjų atliekų apdorojimo metodas – plazminis deginimas. Plazmos krosnyse atliekos yra ne tik sudeginamos, bet aukštoje temperatūroje (iki 20 000 °C) suskaidomos ir išlydomos [8]. Tai universalus metodas, tinkantis įvairių atliekų mišiniams – plazma galima apdoroti tiek organines, tiek neorganines medžiagas (metalus, betoną, oro filtrus, asbestą, plastiką, jonitines dervas). Akivaizdu, kad deginant nesumažėja atliekų radioaktyvumas, tačiau sumažėja jų tūris, o atliekos tampa labiau tinkamomis transportuoti, saugoti ir laidoti. Plazma apdorotų atliekų terpė pasižymi dideliu cheminiu stabilumu ir atsparumu radionuklidų išplovimui. Todėl tokios atliekos gali būti dedamos į giluminius atliekynus.

5. RADIOAKTYVIŪJŲ ATLIEKŲ ŠALINIMO BŪDAI, ATLIEKYNŲ TIPAI

Klausimas, kaip atsikratyti susidarančių radioaktyviųjų atliekų, iškilo jau branduolinės eros pradžioje. Kietos neapdorotos atliekos dažniausiai buvo užkasamos paprasčiausiose duobėse, o skystos – laikomos tvenkiniuose [9]. Tai nebuvo saugus būdas – žinoma ne viena avarija, kurių metu išsiliejusios atliekos užteršdavo nemažus plotus. Vėliau buvo pradėta taikyti tobulesnius ir saugesnius būdus: skystas atliekas pradėta švirkšti į įvairaus gylio gręžinius (taikyta Tarybų Sąjungoje, Rusijoje); kietos atliekos buvo talpinamos į nebenaudojamų kasyklų šachtas ar į žemės paviršiuje specialiai įrengtus inžinerinius įrenginius. Kelis dešimtmečius, iki 1983 metais priimto moratoriumo, daugelis valstybių kietas atliekas skandino vandenynų gelmėse. Nuo 1994 metų tai daryti draudžia tarptautinė Londono konvencija.

Dabar, nustojus atliekas skandinti, nagrinėjami tik jų laidojimo įvairiuose atliekynuose variantai. Laidojimo tikslas – izoluoti atliekas nuo žmonių ir aplinkos tol, kol atliekose esančių radionuklidų aktyvumas natūraliai (vykstant branduolių virsmams ar dėl radionuklidų atskiedimo) sumažės ir žemės paviršiuje nesusidarys pavojingų kokio nors radionuklido aktyvumų. Atliekos laidojamos tik visapusiškai įsitikinus sauga. Atliekynai paprastai turi įvairaus sudėtingumo inžinerinius ir kitokius barjerus, apsaugančius nuo radionuklidų migracijos aplinkoje.

Radioaktyviųjų atliekų laidojimo būdai išnagrinėti TATENA techninėje ataskaitoje [10]. Laidojimo gylį ir atliekyno sudėtingumą lemia atliekų pavojingumas – kuo atliekos pavojingesnės, tuo jos laidojamos giliau, o atliekyno konstrukcija patikimesnė. Pagal gylį skiriami paviršiniai ir giluminiai (dar vadinami geologiniais) atliekynai. Paviršiniai įrengiami žemės paviršiuje arba kelių dešimčių metrų gylyje. Pasaulyje yra virš šimto tokių atliekynų. Jie yra skirti trumpaamžiams mažo ir vidutinio aktyvumo atliekoms. Modernios giluminių ir paviršinių atliekynų koncepcijos yra grindžiamos daugiabarjeriškumo principu. Laidojamos atliekos apgaubiamos keletu vienas kitą papildančių ar dalinai pakeičiančių barjerų – grėsmės nebūtų netgi viename barjerų atsiradus defektų. Tinkamai įrengti barjerai ne tik neleidžia atliekoms pasklisti aplinkoje, bet jie yra gana patikima kliūtis, sauganti nuo uždaryto atliekyno pažeidimo.

Konkreto atliekyno tipo ir jo koncepcijos pasirinkimas tiesiogiai priklauso nuo šalies specifinių reikmių (atliekų kiekio ir jų ypatybių) bei gamtinių (geologinės aplinkos) ir socialinių sąlygų. Atliekyno įrengimo, eksploataavimo, uždarymo ir priežiūros kaina taip pat yra vienas svarbių veiksnių.

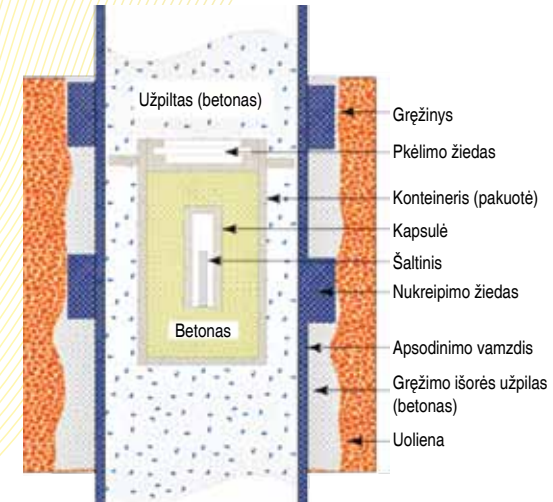
PAVIRŠINIAI ATLIEKYNAI

Egzistuoja maži ir vidutiniškai aktyvių atliekų laidojimo būdų įvairovė – nuo paprastos duobės ar sąvartyno iki sudėtingos konstrukcijos požeminio atliekyno. Dalis atliekynų neturi inžinerinių barjerų, o kiti – žemės paviršiuje ar nedideliame gylyje įrengtos inžinerinės struktūros. Nedidelė dalis atliekynų yra požeminiai tuneliai, šachtos ar ermtės. Pastebima bendra tendencija, kad laikui bėgant daugiabarjerėmis inžinerinėmis sistemomis pasitikima vis labiau negu vienu, dažniausiai gamtiniu, barjeru [11]. Sudėtingesni paviršiniai atliekynai dažniausiai turi patvarius gelžbetonio barjerus, kurie daug geriau negu vien tik gamtinė aplinka apsaugo radioaktyvias atliekas. Todėl į juos galima saugiai dėti didesnio aktyvumo atliekas. Tačiau jas palaidojus paviršiniame atliekynuose vistiek išlieka grėsmė, kad laikui einant barjerai savaime suirs ar atliekyną ir jame esančias atliekas nesąmoningai ar sąmoningai pažeis žmonės, radionuklidai pasklis geosferoje ir biosferoje, užterš vandens telkinius ir maisto produktus. Dėl to paviršiniuose atliekynuose galima laidoti tik tokias atliekas, kuriose nėra ilgaamžių radionuklidų (tokių, kurių pusėjimo trukmė yra daugiau nei 30 metų). Atliekynai su palaidotomis atliekomis bus prižiūrimi ne mažiau kaip 300 metų. Per šį laikotarpį radioaktyviųjų atliekų aktyvumas natūraliai sumažės iki nepavojingo lygio.

GRĘŽINIAI

Įvairaus gylio ir skersmens gręžiniai gali būti naudojami didesnio aktyvumo atliekoms palaidoti, ypač jeigu atliekų tūris nedidelis; panaudoti uždarieji jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniai daugelyje šalių buvo laidojami gręžiniuose [9]. Ypatingo dėmesio susilaukė mažo skersmens gręžinių pritaikymas panaudotiems šaltiniams laidoti. Tarpautinė atominės energetikos agentūra, bendradarbiaudama su Pietų Afrikos Respublikos Branduolinės energetikos bendrove NESCSA, parengė taip vadinamą BOSS (angl. „borehole disposal of sealed sources“) koncepciją. Pagal ją siūloma šaltinius laidoti nedidelio skersmens apie 80 m gylio gręžiniuose [12, 13]. Uždarieji šaltiniai būtų užsandarinami nerūdijančio plieno kapsulėse, o šios sudedamos į betonų užpildytus

konteinerius (6 pav.). Užvirinti nerūdijančio plieno konteineriai su šaltiniais nuleidžiami į specialios konstrukcijos gręžinį ir užliejami betonu mase. Sandarumo bandymai parodė, kad kapsulė, betonas ir konteineris gerai sulauko radionuklidus – iš korozijai atsparaus plieno pagamintos kapsulės prakurs ne anksčiau kaip po kelių šimtų tūkstančių metų. Todėl ši sistema tinka netgi ilgaamžiams radionuklidams laidoti.



6. Pav. Panaudotų uždarytųjų šaltinių laidojimas „BOSS“ sistemos gręžinyje – atliekų pakuotė turi tris saugos barjerus: cilindro formos nerūdijančio plieno kapsulę, betoną ir nerūdijančio plieno konteinerį

GILUMINIAI ATLIEKYNAI

Giluminio geologinio atliekų laidojimo idėją pirmą kartą pasiūlė JAV Nacionalinė mokslų akademija 1957 metais [14]. Giluminiai atliekynai turėtų būti įrengti stabiliose geologinėse formacijose kelių šimtų metrų gylyje. Žemės uolienos ilgą laiką apsaugos biosferą nuo atliekų poveikio. Tokie atliekynai yra skirti panaudotam kurui ir labai aktyvioms atliekoms laidoti. Giluminių atliekynų koncepcijose be kitų dalykų paprastai atsižvelgiama ir į šiluminį atliekų poveikį – labai aktyviomis atliekomis paprastai laikomos tokios, kurių išskiriamos šilumos galia yra daugiau negu 2 kW/m³. Šiuo metu pasaulyje tėra vienintelis giluminis atliekynas Jungtinėse Amerikos Valstijose, kuriame nuo 2001 metų laidojamos karinės programos transuraninės atliekos.

6. GILUMINIS RADIOAKTYVIŲJŲ ATLIEKŲ LAIDOJIMAS

Pasaulyje vyrauja nuomonė, kad laidojimas giluminiuose (geologiniuose) atliekynuose šiuo metu yra vienintelis tvarus ir pats saugiausias, dabartinėmis priemonėmis techniškai įgyvendinamas radioaktyviųjų atliekų galutinio sutvarkymo būdas, leidžiantis pakankamai ilgai izoliuoti didelio aktyvumo atliekas.

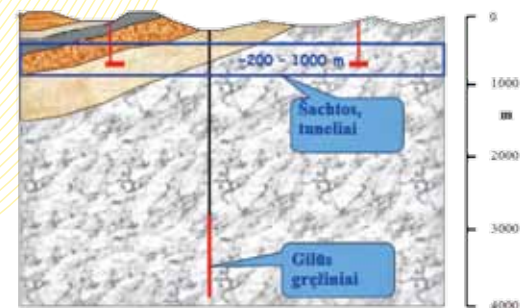
Laidojimas giluminiuose (geologiniuose) atliekynuose yra intensyviausiai nagrinėjamas atsikratymo panaudotu kuru ir ilgaamžėmis atliekomis būdas. Jis yra labiausiai priimtinas todėl, kad giluminiuose atliekynuose atliekos izoliuojamos nuo žmonių ir biosferos pakankamai ilgai, kad joks įmanomas radionuklidų nutekėjimas nesukeltų reikšmingo poveikio. Tik palaidojus atliekas, ateities kartos nepaveldės nepelnytos radioaktyviųjų atliekų tvarkymo naštos. Giluminiame atliekynuose palaidotos didelio aktyvumo atliekos bus daug mažiau pažeidžiamos negu laikomos nuolatos prižiūrimose laikinose antžeminėse saugyklose. Išaugusi pasaulinio terorizmo grėsmė yra papildomas veiksnys, verčiantis sparčiau ieškoti saugių sprendimų.

Giluminiai atliekynai dažnai skirti panaudotam kuru – pačioms pavojingiausioms atliekoms – laidoti. Net 99 % branduoliniame reaktoriuje susidariusių radionuklidų bendro kiekio pasilieka panaudotame kure. Daugelis panaudotame kure esančių radionuklidų spinduliuoja alfa daleles ir pasižymi ilga pusėjimo trukme, pavyzdžiui, plutonio ^{239}Pu pusėjimo trukmė – 24 000 metų. Todėl turi praeiti keli šimtai tūkstančių metų, kad panaudotas branduolinis kuras taptų nepavojingas. Giluminiuose atliekynuose turi būti laidojamas ne tik panaudotas kuras, bet ir įstiklintos labai aktyvios panaudoto kuro perdirbimo atliekos, ilgaamžės vidutinio aktyvumo atliekos (kai kurios reaktorių eksploatavimo ir išmontavimo atliekos: reaktorių struktūriniai komponentai, grafito atliekos), nuskurdintas uranas, plutonio, radžio atliekos.

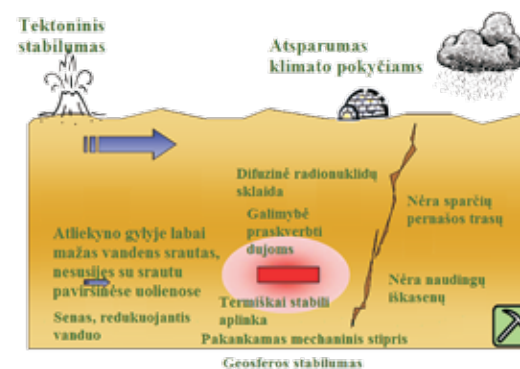
Atliekynų vystymo programos – tai ištisa procesų, įgyvendinamų „žingsnis po žingsnio“ principu, seka. Svarbiausi yra šie: laidojimo koncepcijos parengimas, atliekynų vietos parinkimas, projektavimas, statyba (kasyba), eksploatavimas ir uždarymas [15]. Atliekynai turi būti suprojektuoti taip, kad būtų saugūs tiek juos eksploatuojant (dedant atliekas), tiek ir ilgą laiką uždarius.

ATLIEKYNŲ VIETŲ PARINKIMAS

Giluminiam atliekynui tinka tik senos, per milijonus metų mažai pakitusios, stabilios, pakankamai giliai slūgsančios geologinės formacijos, kurių savybes galima patikimai įvertinti ir kurių stabilumu kelis šimtus tūkstančių metų galima neabejoti (7 pav.). Kad atliekynas patikimai atliktų savo funkcijas, geologinė atliekyno aplinka turi tenkinti tam tikrus techninius kriterijus [15, 16]. Palankios geologinės aplinkos ypatybės ir reikšmingiausi faktoriai, galintys neigiamai paveikti atliekyno aplinką [17] pavaizduoti 8 pav.



7 pav. Galima giluminių atliekynų padėtis geologinėje struktūroje



8 pav. Esminės palankių geologinių aplinkų ypatybės ir reikšmingiausi faktoriai, galintys neigiamai paveikti geologinę atliekyno aplinką

Viena svarbiausių atliekyno funkcijų - izoliuoti atliekas nuo biosferos tol, kol atliekų radioaktyvumas natūraliai sumažės. Tik pakankamai giliai stabilioje geologinėje struktūroje įrengtas atliekynas šią funkciją patikimai atliks ir dėl geologinių procesų (pvz., vykstant žemės paviršiaus erozijai, kylant žemės paviršiui ar veikiant ledynams) atliekos neatsidurs žemės paviršiuje. Atliekyno gylis pasirenkamas atsižvelgus į laidojamų atliekų bei geologinės aplinkos ypatybes (Švedijos KBS-3 koncepcijoje buvo pasirinktas 500 m gylis). Erozijos procesai intensyviausi ten, kur didžiausi žemės paviršiaus kilimo greičiai – čia yra didžiausia tikimybė, kad atliekos atsидurs žemės paviršiuje, todėl tokių vietovių vengiama. Atliekynui pasirenkama vietovė turi būti tektoniškai ir seismiškai stabili.

Geologinė formacija turi būti pakankamo storio, o joje turi būti pakankamo dydžio vienalyčiai blokai, kuriuose būtų galima įrengti atliekyną. 50 m storio vienalyčio sluoksnio pakaktų atliekyno tuneliams įrengti. Geologinė formacija turėtų būti be didesnių defektų: lūžių, vandeningų tarp sluoksnių ar tirpių vandenyje intarpų ir skirtingos mineralinės sudėties lęšių.

Geologinė terpė turi atlikti geologinio barjero funkciją, todėl vandens srautas atliekyno aplinkoje turi būti kuo mažesnis, kad net ir pažeidus inžinerines atliekyno konstrukcijas (inžinerinius barjerus) būtų minimali galimybė, kad radionuklidai pateks į aplinką. Didelis uolienu tankis užtikrina mažą vandens laidumą ir lėtą radionuklidų migraciją. Geologinėje aplinkoje vandens slėgio kitimas turėtų būti nedidelis. Uolienu plastiškumas ir savisandarumas – pageidautinos mechaninės savybės, kad dirbtiniai pažeidimai, atsiradę įrengiant atliekyną, ar natūralūs trūkiai savaime užsisandarintų ir neturėtų reikšmingos įtakos radionuklidų pernašai. Atliekynui pasirinkta geologinė formacija turėtų slūgsoti sulėtintos požeminio vandens apykaitos zonoje. Geriausia, kad vertikali filtracija per mažai laidžius sluoksnius atliekyno vietoje būtų iš viršaus į apačią, t. y. žemiau slūgsančių vandeningų horizontų spūdžiai būtų mažesni už aukščiau slūgsančių. Atliekyno aplinkoje hidrogeocheminės sąlygos ir uolienose esančio vandens cheminė sudėtis turi būti tokia, kad nekiltų inžinerinių barjerų korozijos grėsmė. Vanduo uolienoje turi būti neagresyvus, o aplinka redukcinė.

Geologinėje formacijoje neturi būti naudingų išteklių. Giluminis atliekynas turi būti įrengtas tokioje vietoje, kur ateityje nebūtų tikslinga vykdyti paieškos ir žvalgybos darbus, galinčius pažeisti atliekyno sandarumą. Gamtiniai ištekuliai neturi kelti padidinto susidomėjimo nei dabar, nei ateityje.

Kadangi giluminiuose atliekynuose bus laidojamas labai aktyvios, daug šilumos išskiriančios atliekos, parenkant formaciją svarbu atsižvelgti į uolienu šiluminį laidumą ir geotermines sąlygas. Nepageidautinos geoterminių anomalijų vietos.

Pirmenybė teiktina paprastai geologinei aplinkai, kad jos pokyčius būtų įmanoma patikimai numatyti tiek laike, tiek ir erdvėje. Paprastoje geologinėje aplinkoje yra daug lengviau pagrįsti ilgalaikę saugą. Paprasta aplinka reikalauja mažiau sudėtingų tyrimų. Galimi vietovės charakteristikų pokyčiai dėl apledėjimų, žemės drebėjimų ar neotektoninių judesių neturi daryti įtakos atliekyno saugai.

Renkantis geologinę formaciją, taip pat svarbios uolienu inžinerinės savybės, nulemiančios aplinkos „statybiškumą“. Geologinė sistema turi be žymių deformacijų išlaikyti papildomas apkrovas. Nuo uolienu mechaninio stiprio priklauso, ar kelių šimtų metrų gylyje bus įmanoma įrengti tunelius ir ar šiems tuneliams nereikės sutvirtinimų. Nuo šių savybių labai priklauso atliekyno kaina.

Užsienio šalių giluminių atliekynu programose nagrinėjamos ar buvo nagrinėtos įvairios geologinės formacijos: kietos kristalinio pagrindo uolienos (granitas, gneisai ir pan.), nuosėdinės uolienos (moliai, mergeliai, skalūnai, vulkaninės nuosėdos) ir moliai, evaporitai (akmens druskos klodai). Šių geologinių uolienu tinkamumas atliekoms laidoti yra geriausiai išnagrinėtas; jų savybės palygintos 3 lentelėje.

3 lentelė. Geologinių uolienu tinkamumo atliekoms laidoti palyginimas [17, 18]

REIKALINGOS SAVYBĖS	SĄLYGOS		
	KIETOSE UOLIENOSE	NUOSĖDINĖSE UOLIENOSE	EVAPORITUOSE
Didelis šilumos laidumas	Geros	Įvairuoja	Ypatingai geros
Mažas vandens laidumas	Geros	Labai geros	Ypatingai geros
Stabilios hidrocheminės savybės	Įvairuoja	Labai geros	Ypatingai geros
Mažas vandens srautas geologinėje terpėje	Įvairuoja	Ypatingai geros	Ypatingai geros
Atsitiktinio pažeidimo grėsmė	Geros	Įvairuoja	Prastos
Galimybės kasti, statyti	Ypatingai geros	Įvairuoja, dažniausiai blogos	Geros
Dujų dispersijos sąlygos	Ypatingai geros	Įvairuoja, dažniausiai blogos	Nėra svarbu

Atliekynai gali būti įrengiami specialiai parinktose vietose arba jiems pritaikomos esamos požeminės erkmės. Panaudotam kurui ir labai radioaktyvioms atliekoms atliekynai paprastai planuojami naujose vietose – neliečose geologinėse struktūrose. Giluminiai atliekynai gali būti skirti tik vienos rūšies atliekoms (pavyzdžiui, įstiklintoms atliekoms ar neperdirbtam panaudotam kurui). Tačiau kartais, priklausomai nuo šalyje esančių atliekų kiekių ir jų tvarkymo strategijos, atliekynai planuojami įvairių rūšių ir aktyvumų atliekoms. Labiausiai pažengusių šalių pasiekimai ir planai apžvelgti 4 lentelėje.

Lietuvoje aptinkamos kelios atliekoms laidoti perspektyvios geologinės terpės: kristalinio pamato uolienos, įvairūs moliai bei anhidritas [19]. Pasaulyje iš visų geologinių terpių bene geriausiai ištirtas kristalinio pamato tinkamumas panaudotam kurui laidoti. Lietuvoje kristalinį pamatą dengia nuosėdinės uolienos, kurių storis kinta nuo 200–300 m Pietryčių Lietuvoje iki 2000 m Baltijos pajūryje. Giluminiam atliekynui tinkamiausias kristalinio

4 lentelė. Užsienio šalių pasiekimai ir planai

ŠALIS	SITUACIJA	GILUMINIO ATLIEKYNŲ EKSPLOATAVIMO PRADŽIA
JAV	WIPP atliekyno įrengimo darbai pradėti 2001 m. Nuo 2006 m. jame laidojamos transuraninės atliekos. „Mėlynojo kaspi-no“ komisija užbaigė darbą ir rekomendavo taikyti geologinį panaudoto kuro laidojimą. Tęsiasi teismo procesas prieš prezidento B. Obamos sprendimą nutraukti atliekyno Yucca kalnuose projektą. Neaišku, ar būtų įmanoma atnaujinti šio projekto įgyvendinimą, jeigu proceso baigtis būtų teigiama.	2001
Švedija	1992 m. išreikšti ketinimai statyti geologinį atliekyną. Parinkta atliekyno vieta ir pateikti dokumentai licencijai gauti.	2023
Suomija	Vietos paieška pradėta 1983 m. Atliekynui parinktoje vietoje įrengta požeminė tyrimų laboratorija, kurią planuojama išplėsti į atliekyną. Pateikti dokumentai licencijai gauti.	2020
Prancūzija	Vietos paieška pradėta 1993 m. Tikimasi netrukus užbaigti vietos parinkimo procesą (šalia Bure požeminės tyrimų laboratorijos) ir 2015 m. pateikti paraišką licencijai.	~2025
Šveicarija	Įgyvendinama vietos parinkimo programa, pasiūlyta atliekyną įrengti Opalinus molyje.	Apie 2040
Belgija	Tęsiasi Boom molio tinkamumo tyrimai.	Apie 2040
Vokietija	Moratoriumas Gorleben atliekynui sustabdytas 2009 m., tyrimai atnaujinti.	—
Japonija	Atliekyno vietai parinkti taikomas savanoriškumo principas, tačiau kol kas rezultatų nėra.	—

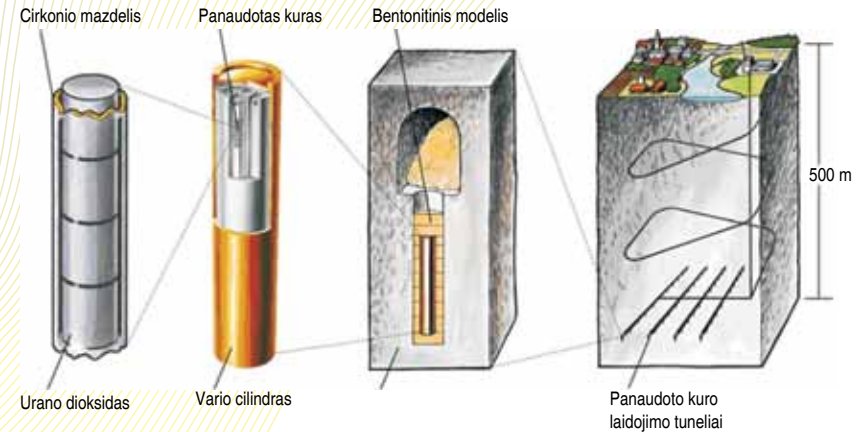
pamato gylis yra Pietryčių Lietuvoje. Čia esama gana didelių kristalinio pamato blokų, mažai paveiktų tektoninių procesų [19]. Molis yra kur kas mažiau laidus vandeniui ir geriau sulaiko radionuklidus. Lietuvoje perspektyviausi molio klodai aptinkami Pietvakarių Lietuvoje (Pietinėje Žemaitijoje ir Suvalkijoje) ir Šiaurės Rytų Lietuvoje [16, 19]. Nors moliai pasižymi labai geromis izoliacinėmis ir sorbcinėmis savybėmis, tačiau jie ne tokie tvirti ir mažiau stabilūs už kristalinio pamato uolienas. Todėl molio formacijoje įrengti atliekyną būtų sudėtingiau. Anhidrito tinkamumas atliekoms laidoti pasaulyje nėra tyrinėtas, todėl apie šią geologinę formaciją informacijos nėra daug.

GILUMINIŲ ATLIEKŲ KONCEPCIJOS

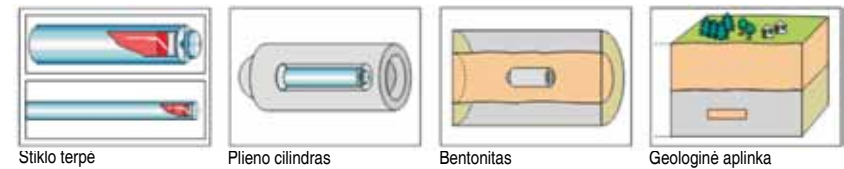
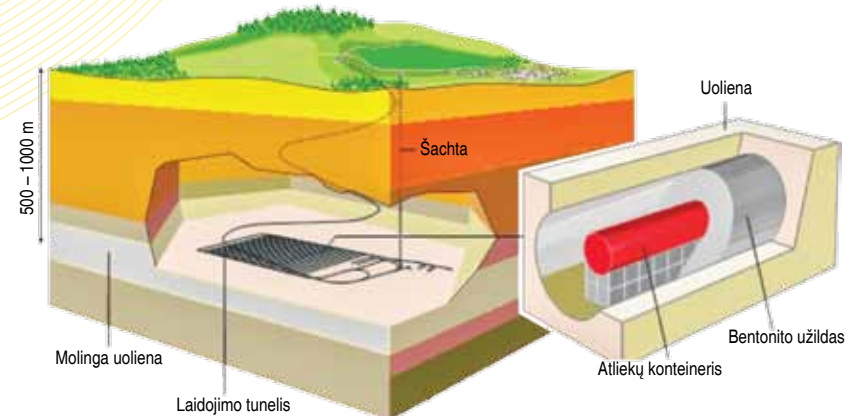
Kadangi ilgaamžės radioaktyviosios atliekos grėsmę kelia labai ilgą laiką, todėl atliekynai, skirti ilgaamžėms didelio aktyvumo atliekoms laidoti, turi patikimai atlikti savo funkcijas šimtus tūkstančių metų. Giluminių atliekynų projektai rengiami remiantis šiais principais: patvarumo, paprastumo, techninio įgyvendinamumo ir pasyvumo [15]. Atliekynų ilgaamžiškumas ir patikimas atliekų palaidojimas pasiekiamas suderinus gamtinio (geologinės aplinkos) ir inžinerinių barjerų savybes. Giluminiuose atliekynuose vienas kitą papildo keletas barjerų: atliekas rišanti terpė, atliekų konteineris, užpildas ir natūrali geologinė aplinka. Tikimasi, kad kiekvienas barjeras bus efektyvus tam tikrais laiko tarpais. Atliekas palaidojus dideliame gylyje, geologinė aplinka sumažins neplanuotų pažeidimų tikimybę bei klimato ir kitų paviršinių aplinkos veiksnių įtaką atliekyno saugai. Geologiniai atliekynai turi būti projektuojami taip, kad juos uždarius, sauga būtų užtikrinta vien tik pasyviomis priemonėmis – sauga neturi remtis kokiais nors aktyviais veiksmais ir nuo jų priklausyti.

Brandžiausią, labiausiai išbaigtą giluminio atliekyno koncepciją parengė Švedijos Branduolinio kuro ir atliekų tvarkymo įmonė. Pagal šią koncepciją (9 pav.) atliekynus ruošiami statyti Švedijoje ir Suomijoje. Ji yra gerai pritaikyta kietoms uolienoms – abiejose šalyse giluminiai atliekynai bus įrengti mažai tektoninių lūžių pažeistuose kristalinio pagrindo blokuose [20, 21]. Panaudoto kuro rinklės bus talpinamos į 1 m skersmens vario konteinerius ir jų dangčiai hermetiškai užvirinami (pagal koncepciją vario konteineris yra pats svarbiausias radionuklidus sulaikantis barjeras). Konteineriai su kuru bus nuleidžiami į 500 m gylyje įrengtą šachtą ir įstatomi į granite išgręžtas kiaurymes. Tarpams tarp konteinerio sienelių ir uolienos užsandarinti naudojami bentonito blokai. Iš tokiu būdu įrengto atliekyno radionuklidams sklirti į aplinką neleis šie barjerai: kuro medžiaga (keraminis urano dioksidas, cirkonio lydinio vamzdeliai, vario konteineris, bentonitas) ir geologinis barjeras – natūrali aplinka. Jeigu vienas barjerų būtų pažeistas ar neefektyvus, saugą užtikrintų kiti barjerai. Atlikti tyrimai parodė, kad netgi esant pažeistam variniam konteineriui, aplinka nebūtų užteršta, o gyventojų apšvitosis dozės neviršytų nustatytų ribinių verčių.

Kitokias koncepcijas renkasi šalys, kuriose vyrauja moliai ar evaporitai. Molio atveju viena labiausiai išbaigtų yra Šveicarijos koncepcija (10 pav.). Panašias turi ir kitos šalys, pasirinkusios molingas uolienas (Prancūzija, Belgija). Vokietija planuoja laidoti panaudotą kurą druskos klotuose ir taip pat yra parengusi atliekyno koncepciją. Pasirenkant atliekyno koncepciją, būtina atsižvelgti į naudojamų medžiagų ir geologinės aplinkos suderinamumą.



9 pav. Švedijos ir Suomijos panaudoto kuro atliekynų koncepcija KBS-3 [21]: panaudotas kuras talpinamas į 5 cm storio vario konteinerius, šie – į granite įrengtus tunelius, o likę tarpai užsandarinami bentonitu



10 pav. Šveicarijos giluminio atliekyno koncepcija [22]

Kol kas šalys neturi vieningos nuomonės, ar palaidotas panaudotas kuras ir kitos atliekos turi būti lengvai išimami iš giluminių atliekynų. Viena iš priežasčių, kodėl neapsispręsta, yra tai, kad ateities kartos palaidotą kurą gali laikyti vertinga žaliava. Antra vertus, galutinis atliekynų uždarymas pagerina ilgalaikę saugą ir užtikrina branduolinių medžiagų neplatšinimą. Praėjus tūkstančiui metų, didžioji dalis panaudotame kure esančių radionuklidų natūraliai suskils ir jo aktyvumas bus panašus į gamtinio urano rūdos, iš kurios šis kuras buvo kažkada pagamintas.

Tenka pastebėti, kad galimybė išimti atliekas gali būti numatyta įvairiose atliekyno stadijose. Nors atliekų laidojimas yra suprantamas kaip radioaktyviųjų atliekų arba panaudoto branduolinio kuro patalpinimas į įrenginį, neketinant jų iš ten išimti, tačiau kai kuriais atvejais reikalaujama, kad būtų galimybė palaidotas atliekas išimti bent jau tol, kol atliekynas nėra užsandarintas ir uždarytas. Šveicarijoje, Kanadoje, Japonijoje, Prancūzijoje ir JAV reikalaujama, kad palaidotą kurą būtų galima išimti iš atliekynų. Kai kuriose šalyse reikalaujama, kad atliekas ypatingais atvejais būtų galima išimti netgi iš jau uždaryto atliekyno; Prancūzijoje 2006 metais priimtas įstatymas numato, kad laidojimas atliekynuose būtų grįžtamas. Atliekų išėmimo galimybė, numatyta atliekyno projekte, neturi mažinti jo patvarumo, patikimumo ir ilgaamžiškumo [15]. Būtina pastebėti, kad šie reikalavimai atliekyno konstrukciją ir statybą daro gerokai sudėtingesnę bei didina atliekų laidojimo kainą. Dažnai tokie sprendimai gali turėti neigiamos įtakos atliekyno saugai.

ATLIEKYNŲ UŽDARYMAS IR TOLESNĖ RAIDA

Atliekomis užpildyto atliekyno uždarymas – administracinės ir techninės priemonės, užbaigiančios atliekyno eksploatavimo laikotarpį. Sukrovus atliekas atliekynuose, užpildomos ir patikimai užsandarinamos visos požeminės ertmės, tuneliai ir šachtos. Įrengus visus koncepcijoje numatytus barjerus, uždaryto geologinio atliekyno sauga užtikrinama pasyviomis priemonėmis, nereikalaujančiomis žmogaus įsikišimo (įskaitant ir geologines aplinkos savybes). Tačiau ir uždarius giluminį atliekyną gali būti numatytos tam tikros laikinos kontrolės ir priežiūros priemonės, pavyzdžiui, kurį laiką tęsiamas aplinkos monitoringas, kad visuomenei būtų parodyta atliekyno sauga.

Atliekyno su jame esančiomis atliekomis būsena kinta lėtai. Preliminariais vertinimais per pirmuosius 100 metų po atliekyno uždarymo gruntiniu vandeniu prisotinta medžiagos, panaudotos atliekoms užsandarinti (pavyzdžiui, smektitinis molis), pasireiškia mikrobiologiniai procesai, sunaudojamas į uolienas pakliuvęs deguonis. Per 1000 metų koroduoja plieniniai ar ketaus konteineriai, dėl korozijos gaminasi vandenilio dujos, branduolių dalijimosi reakcijos produktai suskyla, sumažėja šilumos išsiskyrimas. Laikotarpiu nuo 1000 iki 100 000 metų panaudoto kuro radioaktyvumas artėja prie lygio, būdingo urano rūdai, vanduo lėtai tirpina radioaktyvias medžiagas, nedideli mobilių radionuklidų (daugiausiai jodo ir chloro) kiekiai patenka į aplinkos grunto vandenį. Šiuo laikotarpiu tikėtini esminiai klimato ir aplinkos pokyčiai – galimas ledynmetis. Žemės paviršiaus apledėjimas yra vienas svarbiausių giluminio atliekyno saugai neigiamą įtaką darančių veiksnių: virš atliekyno susiformavus ledynui, atliekyno barjerus gali paveikti padidėjęs slėgis, giluminis įšalas, gruntinio vandens sistemos pokyčiai. Laikotarpiu nuo 100 000 iki 1 000 000 metų suyra vario konteineriai ir galimi geologiniai pokyčiai (paviršiaus pakilimas, erozija). Tačiau jų poveikis negali būti reikšmingas, nes dauguma radionuklidų jau bus suskilę.

Uždarymo sistemos efektyvumas ir kokybė įrodomi tokiomis priemonėmis: gamtinės aplinkos natūralios evoliucijos supratimu, tyrimų, atliktų požeminėse laboratorijose, duomenimis, skaitmeninio modeliavimo rezultatais ir tinkamais gamtiniais analogais. Vienas svarbiausių būdų įsitikinti giluminių atliekynų ilgalaikę saugą – skaitmeninis modeliavimas. Modeliuojant atsižvelgiama į visus įmanomus atliekyno raidos scenarijus ir neigiamus veiksnius. Skaitmeniniais būdais įvertinami radionuklidų srautai iš planuojamo atliekyno į aplinką ir įsitikinama, kad žmonių jonizuojančios apšvitos dozės neviršys nustatytų ribinių lygių. Saugai pademonstruoti paprastai taikomi konservatyvūs vertinimo metodai.

7. AR ĮMANOMOS ALTERNATYVOS GILUMINIAM ILGAAMŽIŲ RADIOAKTYVIŲJŲ ATLIEKŲ LAIDOJIMUI?

Egzistuoja nemažai įvairių pasiūlymų, kaip atsikratyti radioaktyviosiomis atliekomis. Daugiausiai vilčių teikia ilgaamžių radionuklidų transmutacijos (pavertimo trumpaamžiais veikiant elementariosiomis dalelėmis), kurias intensyviai tyrinėja daugelio šalių mokslininkai. Tai yra techniškai įmanoma, tačiau praktiškai – sunkiai įgyvendinama. Taikant transmutacijas, įmanoma sumažinti ilgaamžių atliekų pobūdį ir kiekį. Kaip ir panaudoto kuro perdurbimas, transmutacijos gali tik papildyti atliekų laidojimą, tačiau jo visiškai pakeisti negali.

Praeityje buvo galvojama ir apie kitus radioaktyviųjų atliekų šalinimo būdus (5 lentelė). Vienas jų – paleidimas į kosminę erdvę. Tačiau tai ne tik labai brangu, bet ir nesaugu (tai patvirtina liūdna erdvėlaivių avarių statistika).

Nagrinėtos ir laidojimo kontinentiniuose ledynuose ar daugiamečio įšalo zonose galimybės. Tai būtų pigus ir paprastas būdas – kapsulės su šilumą išskiriančiomis atliekomis savaime nugrimztų į ledyną. Tačiau nepavyko pademonstruoti šio būdo saugos ir buvo nuspręsta, kad jis nepriimtinas. Iš tebenagrinėjamų panaudoto kuro laidojimo būdų, alternatyvių laidojimui žemės gelmėse, dar paminėtinas laidojimas litosferos plokštėje, nyrančioje gilyn po kita plokšte [9].

Perspektyvus radioaktyviųjų atliekų šalinimo būdas yra jų laidojimas po vandenyno dugnu [28]. Jis skiriasi nuo tarptautinės konvencijos draudžiamo atliekų skandinimo. Kaip ir laidojant žemės gelmėse, šioje koncepcijoje siūloma taikyti daugiabarjerę saugos sistemą. Barjerus sudarytų atliekų terpė (pavyzdžiui, stiklas), korozijai atspari pakuotė ir geologinė aplinka. Suirus pakuotėms, radionuklidus sulaukytų smulkiagrūdės gilia-vandenės nuosėdinės uolienos. Šios uolienos pasižymi gebėjimu sorbuoti daugumą radionuklidų ir tokiu būdu sulėtinti jų migravimą. Radionuklidų pernaša būtų labai lėta dar ir dėl to, kad po vandenyno dugnu gruntinio vandens tėkmė yra ypatingai lėta, nes nėra vandens slėgio skirtumų. Šiuo būdu atliekas siūloma laidoti 4 km gylyje, vietoje, kur smulkiagrūdžių nuosėdų sluoksnis yra storas, nesukietėjęs ir vienalytis. Atliekų laidojimo vietas turi būti toli nuo tektoninių plokščių sandūrų, ties kuriomis pasireiškia seisminiai ir vulkaniniai procesai, dėl kurių atliekos galėtų patekti į paviršių. Jose neturi pasireikšti erozija.

5 lentelė. Nagrinėti alternatyvūs atsikratymo branduolinėmis atliekomis būdai

BŪDAS	KOMENTARAS
Ilgalaikis saugojimas žemės paviršiuje	<ul style="list-style-type: none"> Tyrinėjo Prancūzija, Šveicarija, Didžioji Britanija, JAV Įgyvendinta Olandijoje
Pasiuntimas į kosminę erdvę	<ul style="list-style-type: none"> Nagrinėjo JAV. Tyrimai nutraukti dėl erdvėlaivių avarių rizikos ir ypatingai didelės kainos
Sulydymas su uolienomis (kai atliekos išskiria daug šilumos)	<ul style="list-style-type: none"> Tyrinėjo Rusija, Didžioji Britanija ir JAV Laboratoriniai tyrimai atlikti Didžioje Britanijoje
Laidojimas subdukciniuose zonuose	<ul style="list-style-type: none"> Tyrinėjo JAV
Skandinimas jūroje	<ul style="list-style-type: none"> Taikė Belgija, Prancūzija, Vokietija, Italija, Japonija, Olandija, Rusija, Pietų Korėja, Šveicarija, Didžioji Britanija, JAV Draudžia tarptautiniai susitarimai
Laidojimas po jūros dugnu	<ul style="list-style-type: none"> Nagrinėjo Švedija ir Didžioji Britanija
Laidojimas ledynuose (siūlyta šilumą išskiriančioms atliekoms)	<ul style="list-style-type: none"> Nagrinėjo JAV Tarptautinė konvencija draudžia tai daryti Antarktidoje
Tiesioginis skystų atliekų įšvirkštimas į grėžinius	<ul style="list-style-type: none"> Tyrinėjo JAV ir Rusija 4 dešimtmečius taikė Rusija ir JAV

Istoriškai vienas pirmųjų nagrinėtų atliekų laidojimo būdų buvo laidojimas grėžiniuose. JAV Nacionalinė mokslų akademija jį nagrinėjo dar 1957 metais. Progresas, pasiektas grėžiant giluminius grėžinius dujoms, naftai ir geoterminiai energija išgauti leidžia naujai pažvelgti į šį metodą. Kaip alternatyvą giluminio atliekyno projektui šį metodą siūlo Sandia National Laboratories [23]. Pagal šią koncepciją panaudotą kurą ir įstiklintas didelio aktyvumo atliekas siūloma laidoti didelio skersmens 5 km gylio grėžiniuose. Panaudoto kuro ar atliekų konteinerius siūloma laidoti gylyje tarp 3 ir 5 km, o viršutinę grėžinio dalį patikimai užsandarinti.

Kai kurios šalys renkasi ilgalaikio saugojimo strategiją (pavyzdžiui, Olandija). Tačiau tai negali būti laikoma tvairiu sprendimu ir alternatyva giluminiam laidojimui [24]. Tai yra problemos atidėjimas, nes panaudotą kurą ir ilgaamžes atliekas vis tiek teks laidoti giluminiame atliekyne. Radioaktyviųjų atliekų saugojimas, įskaitant ilgalaikį saugojimą, yra ne dėjimo į atliekynus alternatyva, o laikinas sprendimas.

PABAIGA

Lietuvoje kol kas turime tik radioaktyviųjų atliekų saugyklas, bet neturime atliekynų. Nuo Ignalinos atominės elektrinės eksploatavimo pradžios susikaupusios atliekos ir panaudotas kuras saugomi šalia esančiose saugyklose. Kuras ir atliekos iš šių saugyklų bus išimti ir visam laikui perkelti į specialiai įrengtus atliekynus, nes radioaktyviųjų atliekų laidojimas yra vienintelis šiuo metu žinomas aplinkosaugos požiūriu darnus ir saugus sprendimas.

Labai mažo aktyvumo radioaktyviosios atliekos gali būti laidojamos neapdorotos, gana paprastai įrengtame labai mažo aktyvumo radioaktyviųjų atliekų atliekyne (sąvartyne). Prieš pradėdant laidoti atliekas turi būti parodyta, kad visą laiką (tiek eksploatuojant sąvartyną, tiek ir užbaigus eksploatavimą) radioaktyviosios atliekos nepasklis aplinkoje ir nei žmonės, nei aplinkos objektai nepatirs žalingos, radiacinės saugos normas viršijančios apšvitos. Šiuo metu Ignalinos atominė elektrinė rengia tokio atliekyno projektą.

Labiau pavojingos mažo ir vidutinio aktyvumo trumpaamžės radioaktyviosios atliekos bus laidojamos daugiabarjeriame paviršiniame atliekyne. Čia atliekos bus dedamos į sandarius gelžbetonio rūsius. Šio atliekyno projektas taip pat rengiamas. Atliekynas su palaidotomis atliekomis bus prižiūrimas ne trumpiau kaip 300 metų. Per šį laikotarpį radioaktyviųjų atliekų aktyvumas natūraliai sumažės iki nepavojingo lygio.

Labiausiai pavojingos atliekos – panaudotas branduolinis kuras ir kitos ilgaamžės radioaktyviosios atliekos – gali būti saugiai laidojamos tik giluminiame atliekyne. Kol kas pasaulyje dar nėra nei vieno panaudotam kurui skirto giluminio atliekyno, tačiau kelios šalys jau yra pasirengusios pradėti įgyvendinti šių atliekynų projektus. Lietuva yra pasirinkusi laikino saugojimo strategiją – iš reaktorių iškrautas ir vandenyje ataušintas panaudotas kuras talpinamas į gelžbetonio konteinerius, kurie saugą užtikrins 50 metų. Per tą laiką turi būti surasti galutiniai sprendimai. Europos Sąjungos direktyva [24] skelbia, kad tai turi būti kiekvienos valstybės narės etikos įsipareigojimas, kuriuo ji privalėtų vengti ateities kartoms nepagrįstai užkrauti bet kokią našta, susijusią su esamu panaudotu branduoliniu kuru ir radioaktyviuosiomis atliekomis.

SVARBIAUSIOS SĄVOKOS

Apšvita – procesas, kurio metu jonizuojančiosios spinduliuotės srautas apšvitina žmogų ir aplinką.

Atliekynas (kapinynas) – bet koks įrenginys ar įranga, kurios pagrindinė paskirtis – radioaktyviųjų atliekų šalinimas [24];

Giluminis atliekynas – stabilioje geologinėje formacijoje po žemės paviršiumi esantis atliekynas, kurio gamtinės apsauginės dangos ir inžinerinių barjerų storis gali siekti šimtus metrų, skirtas panaudotam kurui ir ilgaamžėms didelio aktyvumo radioaktyviosioms atliekoms laidoti.

Paviršinis atliekynas – Žemės paviršiuje esantis radioaktyviųjų atliekų atliekynas, kurio natūralios apsauginės dangos ir/arba inžinerinių barjerų storis neviršija kelių ar kelių dešimčių metrų.

Atliekų apdorojimas – operacijos, kurių tikslas – saugiau ir pigiau tvarkyti radioaktyviąsias atliekas mažinant jų tūrį, šalinant radionuklidus iš radioaktyviųjų atliekų, keičiant sudėtį.

Pradinis radioaktyviųjų atliekų apdorojimas – vienas ar keli veiksmai, atliekami prieš pagrindinį radioaktyviųjų

atliekų apdorojimą: surinkimas, rūšiavimas, cheminis apdorojimas, deaktyvacija.

Pagrindinis radioaktyviųjų atliekų apdorojimas – procesas, kurio metu keičiamos radioaktyviųjų atliekų savybės (mažinamas tūris, šalinami radionuklidai, keičiama sudėtis), siekiant saugiai ir pigiau jas tvarkyti.

Galutinis radioaktyviųjų atliekų apdorojimas – radioaktyviųjų atliekų kietinimas, dėjimas į specialius kontenerius ir, prireikus, papildomas pakavimas, siekiant jas vežti, saugoti ir dėti į atliekyną.

Atliekų dėjimas į atliekyną (laidojimas, šalinimas) – radioaktyviųjų atliekų arba panaudoto branduolinio kuro patalpinimas į įrenginį, neketinant jų iš ten išimti.

Atliekyno uždarymas – visų operacijų užbaigimas praėjus tam tikram laikotarpiui po to, kai panaudotas branduolinis kuras ir radioaktyviosios atliekos patalpinami į atliekyną, įskaitant baigiamuosius inžinerinius ar kitus darbus, kurių reikia, kad būtų užtikrinta ilgalaikė saugi įrenginio būklė.

Barjeras – fizinė kliūtis, kuri užkerta kelią arba sulėtina radionuklidų ar radionuklidų turinčių medžiagų judėjimą tarp radioaktyviųjų atliekų tvarkymo įrenginio elementų; barjerai gali būti inžineriniai ir gamtiniai.

Branduolių dalijimosi reakcijos produktai – tai didelės masės branduolių (pavyzdžiui, urano) fragmentai, susidareję suskilus branduoliams. Paprastai vykstant branduolių dalijimosi reakcijai didelės masės branduoliai suskyla į du branduolius, kurie dažniausiai yra nestabilūs (radioaktyvūs). Dauguma susidariusių radionuklidų yra trumpaamžiai ir greit suskyla, tačiau kai kurie (pavyzdžiui, cezio ir stroncio radionuklidai) turi gana ilgą pusėjimo trukmę.

Dalioji medžiaga – ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{233}U , ^{235}U ir bet kuri kita medžiaga, kurioje gali vykti branduolių dalijimosi grandininė reakcija.

Greitų neutronų reaktorius – tai branduolinis reaktorius, kuriame branduolių dalijimosi reakciją palaiko didelės energijos greiti neutronai. Šiuo metu tokie reaktoriai yra neekonomiški.

Ilgamžės radioaktyviosios atliekos – radioaktyviosios atliekos, kuriose ilgaamžių radionuklidų (radionuklidų,

kurių pusėjimo trukmė ilgesnė nei 30 metų) aktyvumas yra didesnis, nei leistinas trumpaamžėse radioaktyviosiose atliekose.

Jonizuojančioji spinduliuotė – spinduliuotė, kuriai susidūrus su medžiaga sukuriama elektronai ir įvairiarūšiai jonai. Radiacinėje saugoje – tai spinduliuotė, galinti sukurti jonų poras biologinėse medžiagose arba terpėse (regimoji šviesa ir ultravioletinė spinduliuotė nelaikomos jonizuojančiąja spinduliuote).

Lengvojo vandens reaktorius – branduolinis reaktorius neutronų lėtinimui bei aušinimui naudoja įprastinį – nepraturtintą sunkiuoju vandenilio izotopu – vandenį. Tai yra labiausiai paplitusi branduolių reaktorių rūšis. Branduoliniam kurui naudojamas sodrintas apie 3 % ^{235}U . Kadangi ^{235}U branduoliai daug efektyviau (apie 1000 kartų) sąveikauja su nedidelės energijos lėtais neutronais, reaktoriuose naudojami lėtikiai – medžiagos, mažinančios neutronų energiją. Dažniausiai naudojami lengvojo vandens reaktoriai: suslėgto vandens reaktoriai (angl. PER – Pressurized Water Reactor) ir verdančio vandens reaktoriai (angl. BWR – Boiling Water Reactor).

MOX kuras (angl. „mixed oxide fuel“) – branduolinis kuras, susidedantis iš kelių daliųjų medžiagų oksidų (paprastai tai plutonio ir urano oksidų mišinys, pavyzdžiui, 7 % plutonio ir 93 % gamtinio urano).

Nebekontroliuojamieji radioaktyvumo lygiai – nustatytos savitojo aktyvumo ir paviršinio aktyvumo vertės, kurių nebeviršijant medžiagoms, susidariusioms reglamentuojamos veiklos metu ir užterštoms radionuklidais ar turinčioms jų savo sudėtyje, nebetaikomi apsaugos nuo jonizuojančiosios spinduliuotės žalingo poveikio reikalavimai.

Panaudotas kuras – branduolinis kuras, apšvitintas reaktoriaus aktyviojoje zonoje ir visam laikui iš jos pašalintas.

Panaudoto kuro tvarkymas – visa veikla, susijusi su panaudoto branduolinio kuro tvarkymu, saugojimu, perdirstimu ar dėjimu į atliekyną.

Perdirstymas – procesas arba operacija, kurios tikslas – iš panaudoto branduolinio kuro tolesniam naudojimui išskirti daliąsias medžiagas.

Radioaktyviosios atliekos – dujų, skysčio arba kieto pavidalo radioaktyviosios medžiagos, kurių nenumatoma toliau naudoti.

Radioaktyviųjų atliekų pakuotė – konteineris arba keli vienas į kitą patalpinti konteineriai (įskaitant vidinių inžinerinių barjerų visumą) su jame patalpintomis apdorotomis radioaktyviosiomis atliekomis, kad būtų galima su jomis tinkamai atlikti vežimo, saugojimo, laidojimo ir kt. veiksmus.

Radioaktyviųjų atliekų tvarkymas – visa veikla, susijusi su radioaktyviųjų atliekų pradiniu apdorėjimu, pagrindiniu apdorėjimu, galutiniu apdorėjimu, saugojimu, vežimu ir dėjimu į atliekyną.

Saugojimas – radioaktyviųjų atliekų arba panaudoto branduolinio kuro saugojimas įrenginyje, ketinant juos iš ten paimti. Saugojimas visada supranta kaip laikina priemonė.

Saugykla – radioaktyviųjų atliekų tvarkymo įrenginys, skirtas saugoti radioaktyvias atliekas. Saugyklose yra saugu atliekas laikyti tam tikrą laiką (dažniausiai ne ilgiau kaip 50–60 metų), o atliekynų sauga turi būti užtikrinta neribotą laiką.

Sunkusis metalas – branduolinių technologijų srityje sunkiuoju metalu laikomi aktinidai (toris, uranas, plutonis ir t. t.), įskaitant ir daliuosius, ir nedaliuosius izotopus. Matuojant sunkiojo metalo masę, neįskaitoma kitų branduoliniame kure esančių cheminių elementų (deguonies, cirkonio ir pan.) masė.

Trumpaamžės radioaktyviosios atliekos – radioaktyviosios atliekos, kurių sudėtyje yra trumpaamžių radionuklidų (radionuklidų, kurių pusėjimo trukmė trumpesnė nei 30 metų, įskaitant ¹³⁷Cs), o ilgaamžių radionuklidų aktyvumas atliekose yra ribotas.

Uždarasis šaltinis – kietos būsenos ir hermetizuotas kapsulėje arba apvalkale jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinis, išskyrus kuro elementus.

Uždarytų atliekynų priežiūra – atliekyno aikštelės priežiūra baigus atliekyno eksploatavimą. Priežiūra gali būti aktyvi (monitoringas, priėjimo ribojimas, tvarkymo darbai ir t. t.) arba pasyvi (ribojimai naudoti žemę ir t. t.).

Radioaktyviųjų atliekų tvarkymo sąvokos užsienio kalbomis nurodytos TA-TENA terminų žodyne [25].

LITERATŪRA

1. Attitudes towards radioactive waste: Report (Special Eurobarometer 297), Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2008.
2. Geological disposal of radioactive waste. Safety Requirements: Safety Standard Series No. WS-R-4, Vienna: IAEA, 2006.
3. S. Motiejūnas, Radioaktyviųjų atliekų tvarkymo technologijos, Vilnius: RATA, 2007.
4. Fukushima Accident, World Nuclear Association, (<http://www.world-nuclear.org/info/Safety-and-Security/Safety-of-Plants/Fukushima-Accident>, žiūrėta: 2013-12-17).
5. Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Experience and Lessons from Around the World, Report of the International Panel on Fissile Material, Edited by Harold Feiveson, Zia Mian, M.V. Ramana and Frank von Hippel, September 2011, (<http://fissilematerials.org/library/rr10.pdf>, žiūrėta: 2013-12-17).
6. K. Almenas, A. Kaliatka, E. Užpuras, Ignalina RBMK-1500. A Source Book: extended and updated version, Kaunas: Lietuvos energetikos institutas, 1998.
7. Processing of Used Nuclear Fuel, World Nuclear Association, (www.world-nuclear.org, žiūrėta: 2013-12-10).
8. Safety locked up, Zwiilag Zwischenlager Wurentlingen AB, (www.zwiilag.ch/upload/cms/user/Zwiilag_Prospekt_EN.PDF, žiūrėta: 2013-12-11).
9. S. Motiejūnas, Radioaktyviųjų atliekų laidojimas, Vilnius: RATA, 2008.
10. Disposal Approaches for Long Lived Low and Intermediate Level Radioactive Waste. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.20, Vienna: IAEA, 2009.
11. W. H. Han, J. Heinonen, A. Bonne, „Radioactive Waste Disposal: Global Experience and Challenges“, in: IAEA Bulletin, Vol. 39, No. 1, 1997.
12. J.-M. Potier, „The IAEA programme on Assisting Member States with BOSS Borehole-type Disposal Facilities“, in: Proceedings of an International Conference: Safety of Radioactive Waste Disposal: Tokyo, 3-7 Oct. 2005, 2006, p. 331-340.
13. I. G. Crosland, „Small Diameter Borehole Disposal of Disused Sealed Sources“, in: Proceedings of an International Conference: Safety of Radioactive Waste Disposal: Tokyo, 3-7 Oct. 2005, 2006, p. 321-330.
14. H. H. Hoss et al. The disposal of radioactive waste on land. Report of the Committee on Waste Disposal of the Division of Earth Sciences. National Academy of Sciences, Publication 519, Washington, 1957.
15. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-14, Vienna: IAEA, 2011.
16. V. Račkauskas, V. Juodkasis, R. Mokrik, Ilgaamžių radioaktyviųjų atliekų laidojimo vietų ir geologinių formacijų giliose žemės sluoksniuose Lietuvos teritorijoje preliminarus apibendrinimas bei jų tinkamumo vertinimas, UAB „Grotā“ ataskaita, 2009.
17. T. McEwen, „The geological disposal of radioactive waste“, Geological Disposal of Radioactive Waste Seminar, London, 3-4 December 2013, <http://www.ibcenergy.com/geodisposal>, žiūrėta: 2013-12-17).
18. E. Weetjens, „Geological disposal in a clay host formation: Belgian approach“, Geological Disposal of Radioactive Waste Seminar, London, 3-4 December 2013, <http://www.ibcenergy.com/geodisposal>, žiūrėta: 2013-12-17).
19. R. Kanopienė et al. Investigation of possibilities to dispose of Spent Nuclear Fuel in Lithuania: A model Case, Vol. 1: Suitability of Geological Environment in Lithuania for Disposal of Spent Nuclear Fuel, Vilnius: LGT, 2005.
20. P. Poškas et al., Investigation of possibilities to dispose of Spent Nuclear Fuel in Lithuania: A model Case, Vol. 2: Concept of Repository in Crystalline Rocks, Kaunas: LEI, 2005.
21. Interim storage facility, encapsulation plant and final repository for spent nuclear fuel: Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation, Summary of the SR-Can project, Nov. 2006, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006.
22. T. Fries and all, The Swiss concept for the disposal of spent fuel and vitrified HLW, International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository, 16-18 June 2008, Prague.
23. P. V. Brady, M.J. Driscoll, Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: Report from a Sandia-MIT Workshop on March 15, 2010 in Washington, DC, (www.SNL_MIT_borehole_workshop_report_final_100507, žiūrėta 2011-01-26).
24. 2011 m. liepos 19 d. Tarybos direktyva 2011/70/Euratomas, kuria nustatoma panaudoto branduolinio kuro ir radioaktyviųjų atliekų atsakingo ir saugaus tvarkymo Bendrijos sistema, Oficialusis leidinys L 199, 02/08/2011 p. 0048–0056.
25. IAEA Safety Glossary. Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, Vienna: IAEA, 2007.

DIRBAME, KAD GYVENTUME SAUGIOJE APLINKOJE



Vļ Radioaktyviujų
atliekų tvarkymo
agentūra



2013

VĮ Radioaktyviųjų atliekų tvarkymo agentūra

P. Lukšio g. 5, LT-08221 Vilnius

Tel. 8 (5) 2133139

Faks. 8 (5) 2133141

El. paštas: info@rata.lt

www.rata.lt