



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**

**Karolis Šlivinskas**

**RADIONUKLIDŲ SKLAIDA GAMTINĖJE BRANDUOLINIŲ  
ĮRENGINIŲ APLINKOJE**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

KTU emeritas Gediminas Adlys

**KAUNAS, 2016**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**

**RADIONUKLIDŲ SKLAIDA GAMTINĖJE BRANDUOLINIŲ  
ĮRENGINIŲ APLINKOJE**

Baigiamasis magistro projektas  
**Medicinos fizika (kodas 621B92002)**

**Vadovas**

KTU emeritas Gediminas Adlys

**Recenzentas**

Doc.dr. Judita Puišo

**Projektą atliko**

Karolis Šlivinskas

**KAUNAS, 2016**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas

(Fakultetas)

**Karolis Šlivinskas**

(Studento vardas, pavardė)

**Medicinos fizika (621B92002)**

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Radionuklidų sklaida gamtinėje branduolinių įrenginių aplinkoje“

**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Karolio Šlivinsko**, baigiamasis projektas tema „Radionuklidų sklaida gamtinėje branduolinių įrenginių aplinkoje“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

# MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO KALBOS TAISYKLINGUMO VERTINIMAS

Fakultetas

Darbo autorius ir pavadinimas

Klaidų tipai	Klaidų skaičius, psl.	Pavyzdžiai
Rašybos klaidos		
Skyrybos klaidos*		
Kalbos kultūros klaidos		
Formalieji dalykai** (korektūros, kompiuteriu renkamo teksto klaidos)		
Bendras klaidų skaičius		
Raštingumo lygis:		

\*Viena skyrybos klaida skaičiuojama kaip 0,5 klaidos.

\*\*Neįeina į bendrą klaidų skaičių, tačiau jei tokių pažeidimų daug, darbas nevertinamas kaip aukšto raštingumo.

Vertintojo vardas, pavardė

## PASTABOS:

1) Lentelėse nurodomas bendras klaidų skaičius. Pateikiama pavyzdžių.

2) Raštingumas aukštas – iki 8 klaidų, vidutinis – 8–15 klaidų, žemas – daugiau nei 16 klaidų.

## Turinys

IŽANGA .....	8
1. LITERATŪROS APŽVALGA .....	9
1.1. Branduolinio kuro ciklo elementai.....	9
1.1.1. Dalijimosi produktų masių pasiskirstymo dėsningumai.....	11
1.1.2. Nuklidų protonų ir neutronų diagrama .....	13
1.1.3. Izobarinės dalijimosi produktų skilimo grandinės .....	16
1.1.4. Branduolinio kuro išdegimas .....	18
1.1.5. Branduolinio kuro nuklidinio sąstato kitimas išdegimo metu .....	19
1.1.6. Aktinidų sudėties kitimas reaktoriaus darbo metu .....	20
1.1.7. Branduolių dalijimosi produktų sudėties kitimo modeliavimas .....	21
1.1.8. Ignalinos atominės elektrinės technologinė schema .....	25
1.1.9. Nuklidų radiotoksiškumas .....	27
1.2. Radioaktyvieji nuklidai produktuose .....	28
1.2.1. Radionuklidų identifikavimo ypatumai.....	30
2. MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODAI.....	33
2.1. Skystųjų scintiliatorių detektoriai .....	33
2.1.1. Skystųjų scintiliatorių veikimo principai.....	34
2.1.2. Prminiai ir antriniai scintiliatoriai .....	35
2.2. Darbo įranga, eiga ir metodika .....	35
2.2.1. Radioaktyvumo matavimas „Tri Carb“ skystųjų scintiliatorių spektrometru.....	36
2.2.2. Radioaktyvumo matavimas gama skaitikliu Compugamma .....	37
2.2.3. Gama spektrometras „CANBERRA .....	39
3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS .....	41
3.1. Rutininiai radiometriniai ir spektrometriniai matavimai.....	44
IŠVADOS .....	54
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	55

Šlivinskas, Karolis. *RADIONUKLIDŲ SKLAIDA GAMTINĖJE BRANDUOLINIŲ ĮRENGINIŲ APLINKOJE*. Magistro baigiamasis projektas / vadovas KTU Emeritas Gediminas Adlys; Kauno technologijos universitetas, matematikos ir gamtos mokslų fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Medicina ir sveikata, Biomedicinos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: atominė, elektrinė, užterštumas, radionuklidai, matavimas, aplinka.

Kaunas, 2016. 56 p.

## SANTRAUKA

Augalai kaupia cheminius elementus, tame tarpe ir radioaktyviuosius nuklidus, todėl juose akumuliuotų radionuklidų savitojo aktyvumo vertės gali būti geru aplinkos radioaktyviosios taršos indikatoriumi, tiriant radionuklidų sklaidą branduolinių objektų gamtinėje aplinkoje.

Darbe nagrinėjami gamtiniai ir dirbtiniai radioaktyvieji šaltiniai, analizuojami kiekybiniai ir kokybiniai radionuklidų susidarymo reaktoriaus branduoliniame kure aspektai, ir radionuklidų sklaida branduolinio objekto aplinkoje. Darbe pristatomi įvairių radionuklidų savitojo aktyvumo eksperimentinių tyrimų rezultatai, atlikti Ignalinos AE 2016 metais, kurie lyginami su kitų autorių gautais rezultatais, gautais ankstesniais metais. Kaip priemonė lyginamajai analizei buvo pasirinktas radioaktyviųjų stroncio ( $^{90}\text{Sr}$ ) ir cezio ( $^{137}\text{Cs}$ ) bei gamtinio radioaktyviojo kalio  $^{40}\text{K}$  savitojo aktyvumo tyrimas.

Nustatyta, kad laikotarpiu nuo Ignalinos AE eksploatacijos pradžios aplinkos užterštumas mažėjo beveik eksponentiškai, su aiškia išsiskiriančia "Černobilio" dedamąja po Černobilio atominės elektrinės avarijos 1986 metais. Nežymus radioaktyvumo padidėjimas buvo stebimas ir pradėjus Ignalinos AE demontavimo darbus.

Lygiagrečiai radioaktyvumo matavimams buvo įvertintas  $^{90}\text{Sr}$  ir  $^{137}\text{Cs}$  savitasis toksiškumas.

Šlivinskas, Karolis. *RADIONUCLIDIC DISPERSION IN NATURAL ENVIRONMENT OF NUCLEAR INSTALLATIONS: Master's thesis in Medical physics / supervisor KTU Emerit Gediminas Adlys. The Faculty of Mathematics and Natural Sciences Kaunas University of Technology.*

Research area and field: Medicine and Health, Biomedical Sciences.

Key words: nuclear plant, radioactive pollution, radionuclides, measurement, environment.

Kaunas, 2016. 56 p.

## **SUMMARY**

Plants accumulate different chemical elements during their vegetation processes, including the radionuclides, thus measurements of specific activity of different plants can be used as a good indicator of radioactive contamination in the environment, including the areas around nuclear industry objects.

In this work natural and man-made radioactive sources were analyzed. Quantitative and qualitative aspects of radionuclide emergence in spent nuclear fuel and their dispersion around the nuclear object was evaluated.

Results of specific activity measurements performed during 2016 in the Ignalina NPP and previously obtained results by other authors were compared and discussed. For comparative study Strontium ( $^{90}\text{Sr}$ ), Cesium ( $^{137}\text{Cs}$ ) and Potassium ( $^{40}\text{K}$ ) specific activities were selected.

It was determined that from the commissioning of the Ignalina NPP environmental contamination decreased almost exponentially with a clear “Chernobyl impact” (increase) after the Chernobyl NPP accident in 1986. Slight increase in radioactivity was detected after the start of the decommissioning process of the Ignalina NPP.

Together with the specific radioactivity, specific toxicity was evaluated for  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$ .

## IŽANGA

Branduolinė energija užima svarbią vietą Europos ir pasaulio energetiniame balanse. Analizė rodo, kad ši energijos forma yra vienu iš praktinių elektros gamybos be CO<sub>2</sub> emisijos sprendimų, todėl šių jėgainių poveikis aplinkai yra visą laiką stebimas ir analizuojamas.

2015 metais pasaulyje veikė 441 energetinis reaktorius, o 65 reaktoriai buvo statomi. Iš 28 Europos Sąjungos valstybių, 14-oje veikia atominės elektrinės su bendru 128 reaktorių skaičiumi. Bendras elektros gamybos atominėse elektrinėse indėlis į Europos Sąjungos balansą sudaro daugiau kaip ketvirtį visos ES gaminamos elektros energijos. Kai kuriose šalyse šis indėlis yra labai žymus: Prancūzijoje 76%, Slovakijoje 56%, Vengrijoje 53%, Švedijoje 42%, Belgijoje ir Slovėnijoje po 38%, Čekijoje 36%, Suomijoje 34%, Bulgarijoje 32%. Nemažą indėlį branduolinė energetika sudaro ir Ispanijoje (20%), Rumunijoje (18%), Didžiojoje Britanijoje (17%), Vokietijoje (14%). Europos valstybėse, nepriklausančiose Europos Sąjungai: Šveicarijoje, Ukrainoje ir Armenijoje šis indėlis atitinkamai yra lygus 33%, 59% ir 35%. [1]

Šiuolaikinė branduolinė energetika pagrįsta šiluminių neutronų sukeltu sunkiųjų branduolių (urano <sup>235</sup>U, plutonio <sup>239</sup>Pu ir kitų) dalijimusi. Visuma technologinių operacijų, pradedant urano rūdos kasimu ir baigiant panaudoto branduolinio kuro saugojimu yra vadinama branduolinio kuro ciklu.

**Darbo tikslas.** Šio darbo tikslas yra išanalizuoti dirbtinių ir gamtinių radionuklidų, darančių įtaką aplinkos radioaktyviam užterštumui, kilmę ir savybes, ir sklaidą gamtinėje Ignalinos atominės elektrinės aplinkoje panaudojant branduolinio kuro dedamųjų (aktinidų ir dalijimosi produktų) kiekio ir aktyvumo modeliavimo bei bandinių savitojo aktyvumo matavimo rezultatus.

### **Darbo uždaviniai:**

1. Išanalizuoti literatūroje pateiktus radionuklidų sklaidos gamtinėje branduolinių įrenginių aplinkoje rezultatus.
2. Susipažinti su branduolinio kuro aktinidų bei dalijimosi produktų kiekio ir aktyvumo modeliavimo pagrindais.
3. Išnagrinėti radionuklidų susidarymą ir jų dinamiką branduolinio reaktoriaus darbo metu ir kurui auštant.
4. Nustatyti atrامينius radionuklidus, leidžiančius įvertinti radioaktyviojo užterštumo lygį.
5. Įvertinti radionuklidų savitojo aktyvumo kitimą maistinės paskirties produktuose Ignalinos atominės elektrinės aplinkoje.



# 1. LITERATŪROS APŽVALGA

## 1.1. Branduolinio kuro ciklo elementai

Branduolinio kuro ciklas susideda iš pradinės dalies, apimančios kuro paruošimą, kuro naudojimo dalies, kurioje kuras yra naudojamas branduolinio reaktoriaus veikimui ir galutinės dalies, kuri apima saugų panaudoto branduolinio kuro laikymą.

Šiuolaikinė branduolinė energetika grindžiama urano ir plutonio daliųjų izotopų naudojimu. Žaliavinės medžiagos yra uranas ir toris [2].

Šiuolaikiniuose įprastuose lengvojo vandens reaktoriuose branduoliniu kuru naudojamas urano izotopas  $^{235}\text{U}$ . Gamtiniame urane jis sudaro 0,7%, o likusią dalį sudaro nedalus izotopas  $^{238}\text{U}$ , kuris šiluminių neutronų reaktoriuose turi daug mažesnę dalijimosi tikimybę, negu uranas  $^{235}\text{U}$ .

Įprasto lengvojo vandens reaktoriuose arba dujomis aušinamuose reaktoriuose grandinei dalijimosi reakcijai 0,7 %  $^{235}\text{U}$  izotopo koncentracija yra nepakankama. Šiems reaktoriams  $^{235}\text{U}$  koncentracija turi būti padidinta, dažniausiai iki 3–5%. Šis procesas vadinamas urano sodrinimu.

Urano kasyklose yra kasama urano rūda, iš jos yra išskiriamas uranas ir išgryninamas. Rūdos koncentratas, vadinamas geltonaisiais milteliais yra chemiškai paverčiamas urano heksafluoridu ( $\text{UF}_6$ ). Jis yra transportuojamas į gamyklas, kuriose uranas yra sodrinamas.

Vienetas, įvertinantis sąnaudas atskirti  $^{235}\text{U}$  nuo  $^{238}\text{U}$  yra vadinamas atskyrimo darbu. Gamyklų sodrinimo galios yra matuojamos atskyrimo tonomis per metus. Daugumai atominių elektrinių, kurių elektrinė galia 1300 MW per metus reikia maždaug 25 t prisodrinto urano, kurio  $^{235}\text{U}$  koncentracija būna maždaug 3,5%.

Kai kuriose gamyklose urano sodrinimui naudojamos centrifugos. Centrifuga yra sudaryta iš gaubto, kuriame dideliu greičiu sukasi cilindrinis rotorius. Uranas yra tiekiamas į rotorių dujinio urano heksafluorido ( $\text{UF}_6$ ) pavidalu. Dujos yra įsukamos. Išcentrinės jėgos prispaudžia sunkesnę urano izotopą  $^{238}\text{U}$  arčiau prie sienelių negu lengvesnę izotopą  $^{235}\text{U}$ . Tokiu būdu, dujos, esančios arčiau sienelių yra nuskurdintos  $^{235}\text{U}$  atžvilgiu, o dujos prie rotoriaus ašies yra prisodrintos uranu  $^{235}\text{U}$ .

Vienartinis sodrinimas su viena paprasta centrifuga nėra pakankamas gauti 3–5% urano  $^{235}\text{U}$  koncentracijai. Todėl centrifugos jungiamos nuosekliai. Našumo padidinimui eilė centrifugų dirba lygiagrečiai. Įrenginys iš nuoseklių ir lygiagrečių centrifugų yra vadinamas kaskadu. Sodrinimo gamyklose keletas kaskadų dirba lygiagrečiai.

Prisodrintas uranas yra gabenamas kuro gamintojams. Gamybos procese branduolinis kuras įgyja urano dioksido tablečių pavidalą. Taip pat naudojamas mišrus urano ir plutonio oksidų branduolinis kuras. Sutrumpintai jis vadinamas MOX kuru.

Branduolinio kuro tabletės yra sudedamos į metalo (cirkonio) vamzdžius, kurie yra hermetizuojami. Taip gaunami kuro strypai. Jie yra sujungiami į kuro rinkles. Pavyzdžiui, europinio suslėgtojo reaktoriaus EPR kuro strypė esančių tablečių bendras ilgis yra 4,2 m. Kuro kasetė sudaryta iš 265 kuro strypų. Kuro kasetės sudedamos į branduolinio reaktoriaus didelį slėgį atlaikančią talpą, vadinama aktyviąją zona.

Grandininės branduolių dalijimosi reakcijos metu, kuri vyksta reaktoriaus aktyviojoje zonoje, urano branduoliai, kaip taisyklė, dalijasi į dvi skeveldras.

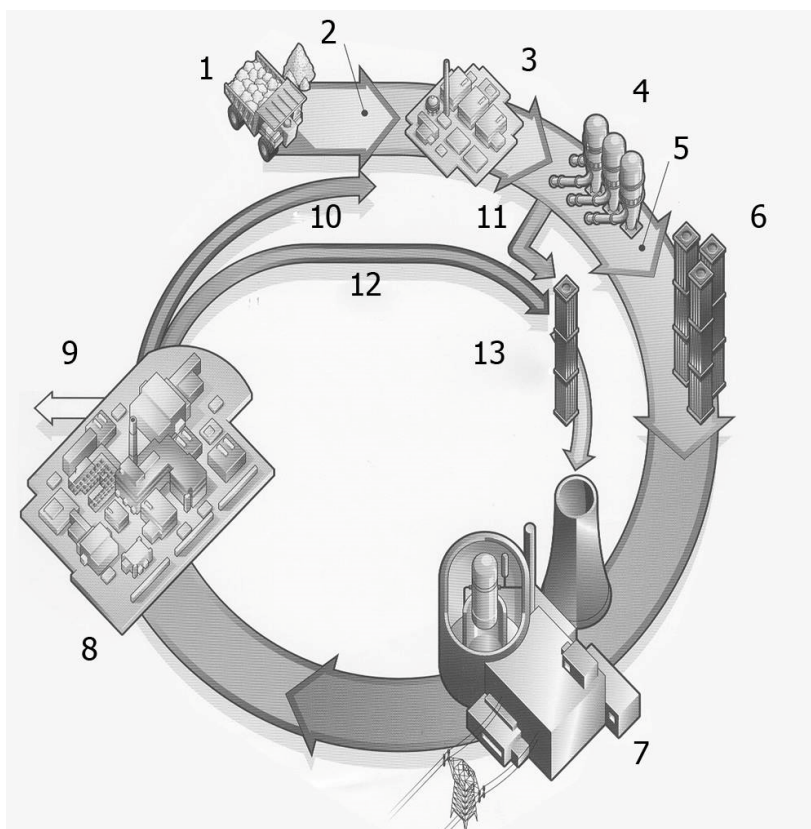
Šios skeveldros dideliu greičiu smogia į gretimus atomus ir atiduoda jiems savo kinetinę energiją. Skeveldrų kinetinė energija paverčiama šilumine energija ir branduolinis kuras yra labai įkaitinamas. Temperatūra kuro elemento viduje pasiekia daugiau kaip  $1200^{\circ}\text{C}$ .

Branduolio dalijimosi metu skeveldrų kinetinės energijos pavidalu ir spinduliuotės pavidalu išsiskiria maždaug 200 MeV energijos ( $1\text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$ ). Vieno vato galiai pasiekti reikia  $\cdot 3,2 \cdot 10^{10}$  tokių dalijimųsi per sekundę. Viename kilograme urano yra  $2,56 \cdot 10^{24}$  branduolių.

Šiuolaikiniuose reaktoriuose gaunama 3–4 tūkstančių milijonų vatų šiluminė galia, nes elektros energija virsta trečdalis šios energijos. Panaudotas kuras yra perdirbamas arba talpinamas saugyklose.

Panaudotas branduolinis kuras yra labai radioaktyvus ir toks gali išlikti šimtus ir tūkstančius metų. Šiuo metu planuojamas metodas yra pakrauti panaudotą kurą be tolesnio perdirbimo į specialius konteinerius ir saugoti juos stabiliose geologinėse saugyklose, kuriose radioaktyvios medžiagos gali skilti ilgą laiką su minimaliu išsiskyrimu į aplinką. Tai yra vienkartinio kuro ciklo pagrindai. Šio metodo rizika yra ta, kad radiotoksinės medžiagos gali išsiskirti į aplinką. Tarpiniam panaudoto branduolinio kuro laikymui yra naudojamos specialios sauso laikymo konteineriuose saugyklos.

Supaprastinta kuro ciklo schema parodyta 1 paveiksle [3]. Visi ciklo elementai yra gamtosauginio bei radiacinio užterštumo tyrimo objektai.



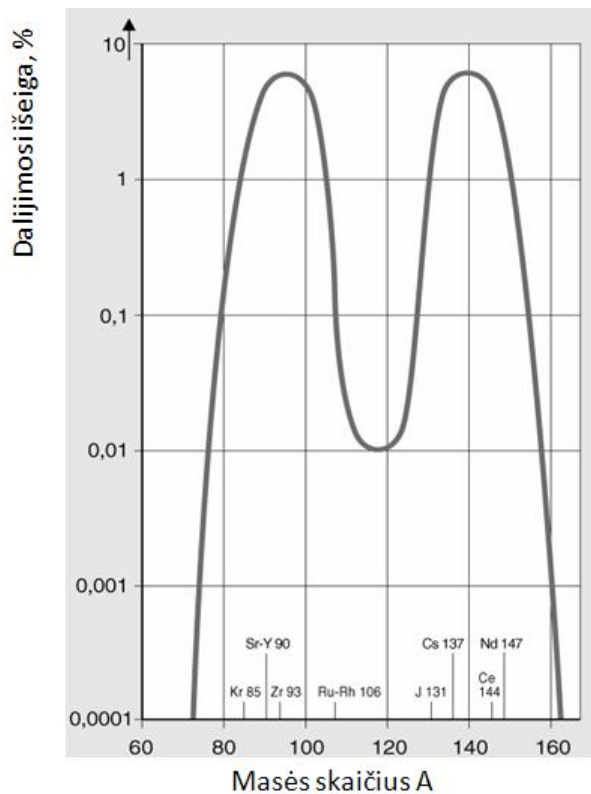
**1 pav.** Branduolinio kuro ciklo supaprastinta schema: 1 – urano rūdos kasimas, 2 – gamtinis uranas, 3 – cheminiai procesai, 4 - sodrinimas, 5 – prisodrintas uranas, 6 – kuro rinklių gamyba, 7 – kuro naudojimas reaktoriuose, 8 – kuro atgamimas, 9 – galutinis panaudoto kuro saugojimas, 10 – išskirtas uranas, 11 – nuskurdintas uranas, 12 – plutonis, 13 – MOX kuro gamyba [3]

### 1.1.1. Dalijimosi produktų masių pasiskirstymo dėsningumai

Sunkieji branduoliai dalijasi spontaniškai arba veikiant neutronais, protonais, fotonais į dvi nevienodų masių skeveldras. Šiuolaikiniuose branduoliniuose reaktoriuose jie dalijami šiluminiais neutronais.

Viena anksčiausiai pastebėtų sunkiųjų branduolių dalijimosi ypatybių yra jų dalijimosi produktų masių asimetrinis pasiskirstymas.

Pavaizdavus sunkiojo branduolio (tarkime, urano  $^{235}\text{U}$ ) dalijimosi produktų masių išėigų pasiskirstymą grafiškai yra gaunama dvikuprė kreivė (2 pav.).



**2 pav.** Urano  $^{235}\text{U}$  dalijimosi produktų išeių priklausomybė nuo masės skaičiaus

Eksperimentiškai nustatyta, kad dalijimosi produktų masių intervalas būna nuo 70 iki 170, o išeių reikšmės būna nuo  $10^{-5}\%$  iki 8%. Sunkiųjų branduolių dalijimosi produktai esant mažoms sužadavimo energijoms yra branduoliai, esantys maždaug tarp cinko Zn ( $Z = 30$ ) ir terbio Tb ( $Z = 65$ ).

Skeveldrų masių išeišos, susidarančios tiesiogiai branduolio dalijimosi procese, vadinamos nepriklausomomis ( $Y_{\text{ind}}$ ). Jos dažniausiai išreiškiamos procentinėmis dalimis nuo grandinėės pilnosios masės išeišos  $Y(A)$ . 2 paveiksle parodytas urano  $^{235}\text{U}$  dalijimosi produktų išeių pasiskirstymas, tenkantis (perskaičiuotas) vienam branduolio dalijimuisi.

Reaktoriaus darbo metu konkretūs dalijimosi produktai susidaro tiek tiesiogiai dalijantis sunkiesiems branduoliams (nepriklausomos išeišos), tiek ir skylant motininiam nuklidams, tiek nuklidui sugėrus neutroną. Tada duoto nuklido susidarymo tikimybė, t.y. jo absoliuti išeiša, apibrėžiama kumuliacine (sukauptąja) išeiša.

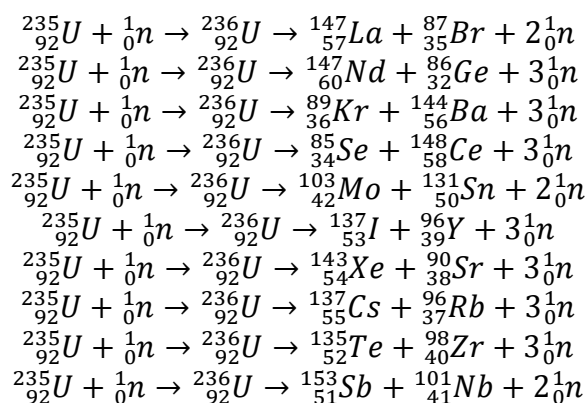
Išskyrus keletą išimčių, nepriklausoma nuklidų išeiša grandinėėje sudaro nedidelę kumuliacinės išeišos dalį (procentus arba dalį procentų). Priklausomai nuo grandinėės (o jų yra apie 80) joje susidaro 3–6 radioaktyvūs nuklidai. Dėl dalijimosi ir tolesnio kaupimosi grandinėėse iš viso susidaro šimtai radioaktyviųjų nuklidų. Galutinis radioaktyviosios grandinėės produktas apibūdinamas duoto masės skaičiaus pilnaja išeiša vienam sunkiojo branduolio dalijimosi aktui.

Paskutiniam (dauguma atvejų ir priešpaskutiniam) radioaktyviosios grandinės nariui kumuliacinė ir pilnoji išeiga sutampa.

Panagrinėjus dalijimosi produktų masių pasiskirstymo kreivę matyti, kad pradėdant dalijimosi išeigoms, didesnėms už 0,01%, galima aiškiai išskirti lengvąją (nuo A=70 iki A=116) ir sunkiąją (nuo A=117 iki A=166) dalijimosi produktų grupes. Masės su žymia išeiga (> 1%) užima dar mažesnę intervalą: 130–150 sunkiajai smailei ir 90–115 lengvajai smailei.

„Lengvosios“ grupės maksimumas apima masių skaičius nuo 85 iki 104, o „sunkiosios“ grupės maksimumas – nuo 130 iki 149. Labiausiai tikėtinas atsiradimas branduolių, kurių masių skaičiai artimi 95 ir 135. Simetriško dalijimosi daliai tenka tik 0,02%.

3 paveiksle pateikti urano  $^{235}\text{U}$  branduolio dalijimosi reakcijų pavyzdžiai [4]



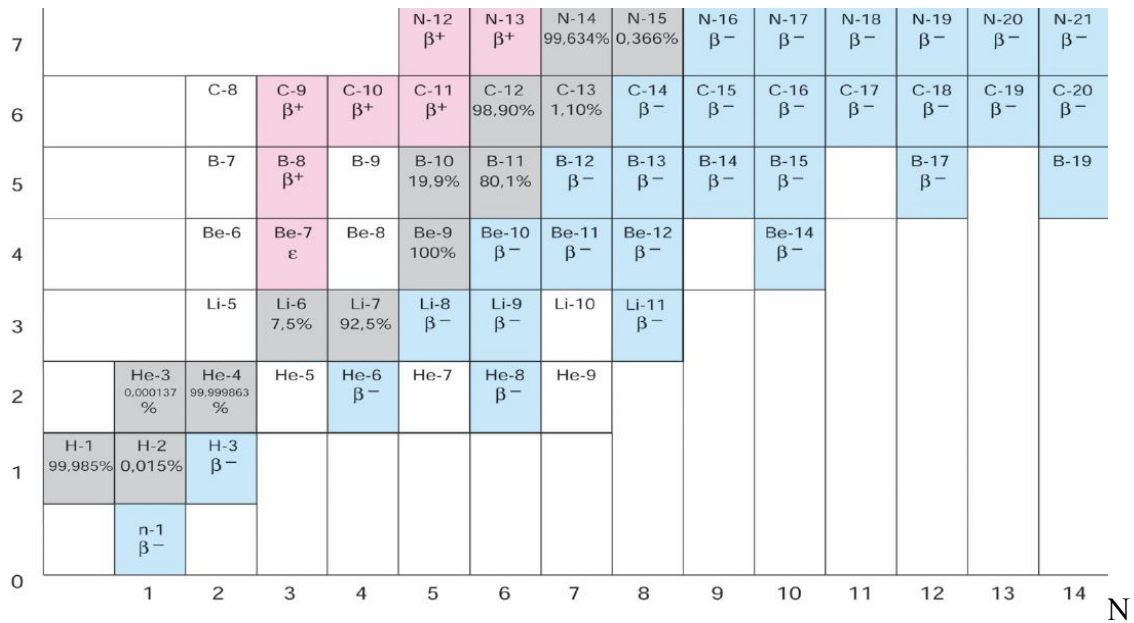
**3 pav.** Urano  $^{235}\text{U}$  branduolio dalijimosi reakcijos

Šios reakcijos vyksta veikiant šiluminiais neutronams. Kai urano branduolys  $^{235}\text{U}$  pagauna neutroną, susidaro trumpaamžis tarpinis branduolys  $^{236}\text{U}$ , kuris dalijasi į lengvąją ir sunkiąją skeveldrų poras. Tokių porų susidaro iki 80.

### 1.1.2. Nuklidų protonų ir neutronų diagrama

Jeigu abscisių ašyje atidėtume visų žinomų nuklidų neutronų skaičių, o ordinačių ašyje jų protonų skaičių, tai gautume nuklidų protonų ir neutronų diagramą. Yra maždaug 275 skirtingi nuklidai, kurie nepasižymi radioaktyviu skilimu ir todėl jie priskiriami stabiliems radioaktyviojo skilimo požiūriu. Jeigu sudarytume grafiką, kuriame taškais pažymėtume visus stabilus nuklidus pagal jų protonų ir neutronų skaičių, tai gautume beta stabilumo takelį. Dešinėje takelio esantys nuklidai pasižymi beta minus (elektroniniu) radioaktyvumu, o kairėje pusėje – beta plus (pozitroniniu) radioaktyvumu.

Diagramos fragmentas lengviems branduoliams parodytas 4 paveiksle.



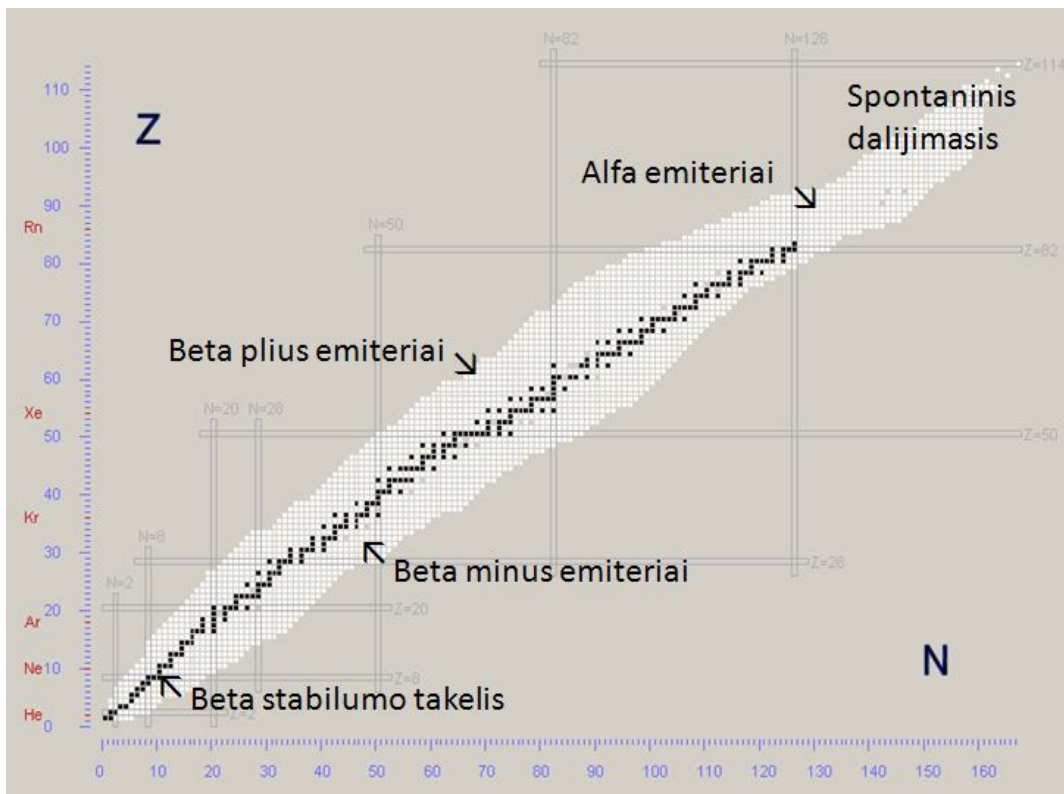
4 pav. Nuklidų protonų ir neutronų diagramos fragmentas [4]

Tamsia spalva pavaizduoti stabilūs (neradioaktyvūs) nuklidai, dešinėje –  $\beta^-$  aktyvūs nuklidai, kairėje –  $\beta^+$  ir elektrono pagavimu pasižymintys nuklidai.

To paties elemento nuklidai, kurių protonų skaičius  $Z$  yra vienodas, o skiriasi masės skaičiai  $A$  ir neutronų skaičiai  $N$ , yra vadinami izotopais. Nuklidai, turintieji vienodą nukleonų skaičių  $A$ , bet priklausantys skirtingiems elementams, vadinami izobarais. Izobarai yra branduolių dalijimosi produktų genetinių grandinėlių nariai. Nuklidai, turintys vienodą neutronų skaičių, vadinami izotonais.

Tokiu būdu, nuklidų protonų ir neutronų diagramoje vertikalūs stulpeliai atitinka izotonus, horizontalios eilutės – izotopus, o įstriža kryptis – vienodo masės skaičiaus nuklidus – izobarus.

5 paveiksle parodyta apibendrinta nuklidų protoninė neutroninė diagrama.



5 pav. Nuklidų protonų ir neutronų diagrama

Iš protonų ir neutronų diagramos matyti, kad lengvųjų elementų stabilumas pasiekiamas, kai neutronų ir protonų skaičius yra maždaug lygus:  $N=Z$ . Tačiau nagrinėjant sunkesnių stabilių elementų neutronų ir protonų santykį matyti, kad šis santykis  $N/Z$  branduolių stabilumo diagramoje didėja nuo vieneto iki maždaug 1,5 bismuto branduoliui. Esant didelėms  $Z$  reikšmėms, didesnėms negu bismuto, ima reikštis alfa radioaktyvumo rūšis –  $\alpha$  (alfa) dalelių emisija, o dar didesnėms – ir spontaninis branduolių dalijimasis (4 pav.).

Jeigu branduolys turi  $N/Z$  santykį per didelį, kad būtų stabilus, tada sakoma, kad jis turi neutronų perteklių. Jame vyksta toks radioaktyvus skilimas, kad sumažėtų neutronų ir protonų santykis ir kad naujas nuklidas priartėtų prie stabilesnės reikšmės (arčiau stabilumo takelio). Tokiu atveju branduolys turi sumažinti  $N$  reikšmę ir padidinti  $Z$  reikšmę. Tai gali būti pasiekta, kai neutronas virsta protonu. Kai tokia transformacija vyksta branduolyje, tada jos rezultatas yra neigiamo krūvio emisija – neigiamos  $\beta$  dalelės emisija. Ji žymima  $\beta^-$  arba  ${}_{-1}^0e$ .

Pavyzdžiui, indžio  ${}_{49}^{116}\text{In}$  skilimo metu susidaro alavas  ${}_{50}^{116}\text{Sn}$  ir neigiama beta dalelė:



Tarpiniame branduolyje  ${}^{236}\text{U}$  neutronų  $N$  ir protonų  $Z$  santykis yra  $N/Z=1,57$ , o stabilumui reikalingas santykis tokiems elementams, kurie atsiranda dalijimosi metu, yra  $1,2 \div 1,4$ . Todėl dalijimosi fragmentai visada turi per didelį  $N/Z$  santykį. Šis santykis sumažėja išlėkus keliems momentiniams neutronams. Tolesnis neutronų ir protonų santykio mažėjimas vyksta dėl nuoseklių beta skilimų grandinėles.

Išlėkus beta dalelei, branduolys lieka sužadintoje būsenoje, iš kurios pereina į pagrindinę, emituodamas gama kvantą. Sudėtingų virsmų metu emituojama visa eilė įvairių energijų gama kvantų. Jie dažniausiai yra emituojami per  $10^{-13}$  s po pozitroninio ar elektroninio beta skilimo, elektrono pagavimo ar alfa skilimo. Vidutinė nuklido emituotų gama kvantų energija yra apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$\overline{E}_\gamma = \sum_i \varepsilon_{\gamma i} I_{\gamma i}, \quad (2)$$

čia  $\varepsilon_{\gamma i}$  – i-tojo gama virsmo energija,  $I_{\gamma i}$  – jo procentinė išeiga.

Branduolių dalijimosi metu susidarę dalijimosi fragmentai daugumoje atvejų turi per didelį neutronų N ir protonų Z santykį N/Z, todėl dauguma pirminių skeveldrų būna radioaktyvios.

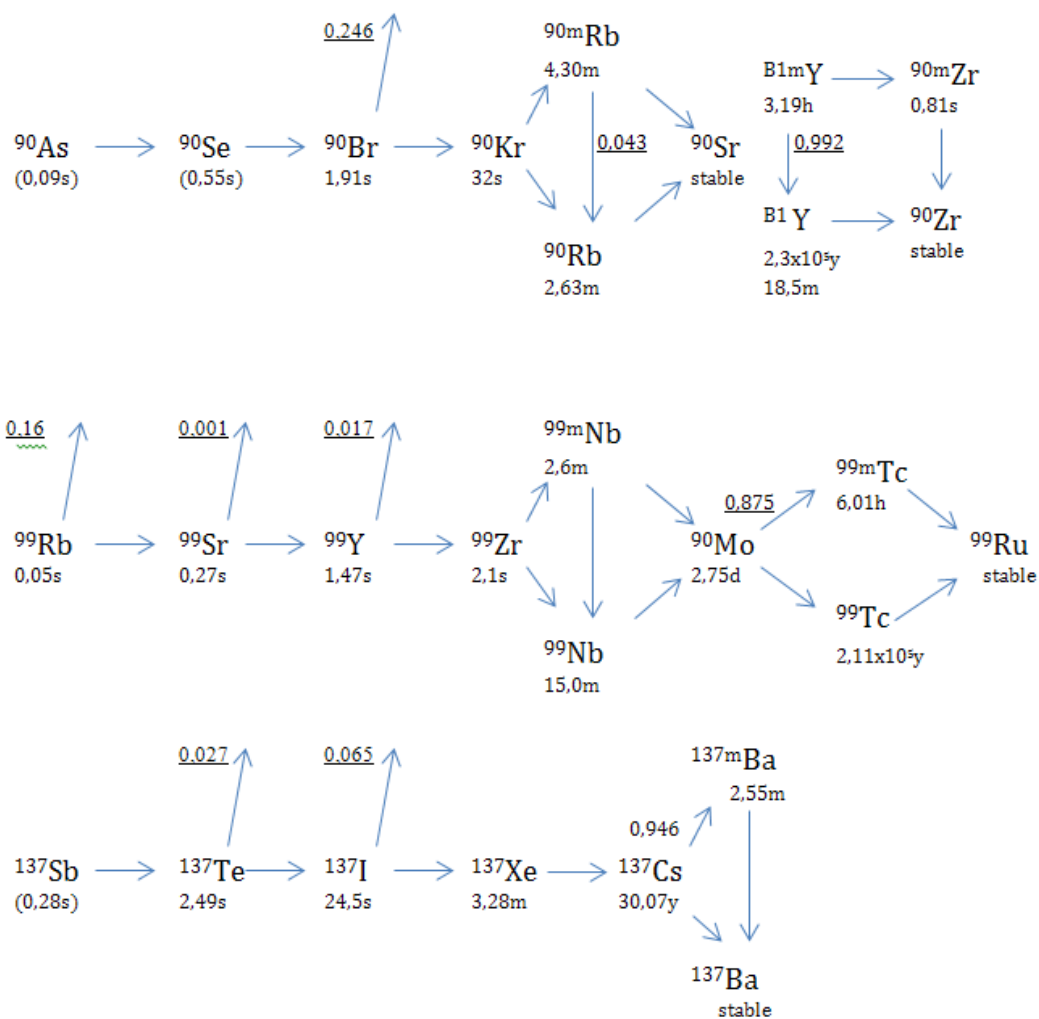
Net ir emitavus momentinius ir vėluojančius neutronus, dalijimosi produktai yra nutolę nuo  $\beta$  stabilumo takelio nuklidų ZN diagramoje, todėl pagrindinis neutronų ir protonų santykio mažėjimas vyksta nuosekliai  $\beta^-$  skilimų grandinėle. Kiekviena iš dviejų pirminių radioaktyvių skeveldrų, kaip taisyklė, turi trumpą pusamžį, matuojamą sekundėmis arba minutėmis, tačiau ji yra pradininkė radioaktyvių nuklidų grandinės su pačiais įvairiausiais pusamžiais: nuo keleto sekundžių iki keleto metų ir daugiau. Kai kurių radionuklidų skilimo pusamžis siekia milijonus metų.  $\beta^-$  skilimo metu masės skaičius išlieka pastovus, o krūvis padidėja dydžiu  $\Delta Z = +1$ . Šie  $\beta^-$  skilimai vyksta izobarine grandinėle (t.y. nekintant masės skaičiui A ir nuosekliai didėjant atominiam numeriui Z) iki pasiekiamas  $\beta$  stabilumo takelis (5 pav.).

### 1.1.3. Izobarinės dalijimosi produktų skilimo grandinės

Kiekviena iš dviejų pirminių radioaktyvių skeveldrų yra pradininkė radioaktyvių nuklidų grandinės su pačiais įvairiausiais pusamžiais: nuo keleto sekundžių iki keleto metų ir daugiau. Kai kurių radionuklidų skilimo pusamžis siekia milijonus metų.  $\beta^-$  skilimo metu masės skaičius išlieka pastovus, o krūvis padidėja dydžiu  $\Delta Z = +1$ . Šie  $\beta^-$  skilimai vyksta izobarine grandinėle (t.y. nekintant masės skaičiui A ir nuosekliai didėjant atominiam numeriui Z) iki pasiekiamas  $\beta$  stabilus nuklidas. Svarbiausių aplinkos radioaktyvaus užterštumo požiūriu pirminių dalijimosi produktų izobarinės skilimo grandinės pateiktos 6 paveiksle [5].

Ištisinėmis linijomis pažymėtas  $\beta^-$  skilimas, punktyrinėmis pasviromis linijomis pažymėtas elektroninis pagavimas, taškinėmis punktyrinėmis vertikaliomis linijomis pažymėti izomeriniai virsmai. Skaičiai virš juodų brūkšnelių žymi virsmo tikimybę. Skilimo pusamžio reikšmės surašytos po cheminio elemento ženklu (s – sekundėmis, m – minutėmis, d – dienomis, y – metais).

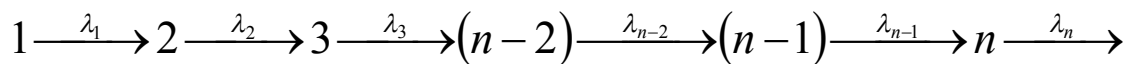




6 pav. Izobarinių genetinių grandinelių (A=90, A=99, A=137) skilimo schemas

Radioaktyviųjų branduolių skaičius kinta pagal eksponentinę dėsnį. Nesuskilusių branduolių skaičius:  $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ , o suskilusių branduolių skaičius:  $N = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$ . Čia  $N_0$  – pradinis branduolių skaičius,  $\lambda$  – radioaktyvaus skilimo konstanta,  $t$  – laikas.

Radioaktyvioji grandinė, sudaryta iš  $n$  narių, iš nuklido 1 į nuklidą  $n$  pereina pagal tokią schemą:



Tokios sudėtingos genetiškai susijusios skirtingų nuklidų branduolių skaičiaus kitimas laike apskaičiuojamas naudojant Beitmeno formulę [6]:

$$N_n = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1} N_1(0) \left[ \begin{array}{l} \frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} + \\ \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)} + \dots \\ \frac{e^{-\lambda_n t}}{(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_2 - \lambda_n) \dots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)} \end{array} \right] \quad (3)$$

čia  $N_1(0)$  – pradinė grandinėlės pirmojo radionuklido koncentracija,  $\lambda_i$  – nuklido radioaktyvaus skilimo konstanta.

Dalijimosi produktai yra įvairių nuklidų mišinys. Jų skilimo pusamžiai apima intervalą nuo dešimtųjų sekundės iki tūkstančių metų. Pirmu momentu pilnasis dalijimosi produktų aktyvumas yra didelis, nes skyla daug susidariusių trumpaamžių radionuklidų. Po kelių parų pilnasis aktyvumas sumažėja, nes trumpaamžiai nuklidai virsta ilgaamžiškesniais. Tačiau ir po metų ši liktinė šiluma yra saugumo problema.

Tik praėjus tam tikram laikui, ima ryškėti ilgaamžių radionuklidų vaidmuo, o bendras radioaktyvių nuklidų skaičius ima mažėti.

#### 1.1.4. Branduolinio kuro išdegimas

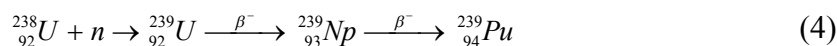
Energijos išgavimo iš branduolinio kuro reaktoriaus darbo metu kiekis yra charakterizuojamas kuro išdegimu. Išdegimo vienetas yra megavatdienė kuro masės vienetai, pavyzdžiui pradinio urano tonai: MW·d/tU arba kilogramui: MW·d/kg.

Energijos vienetų, megavatdienės ir džaulio sąryšis yra toks:

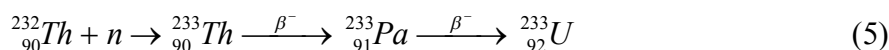
$$1 \text{ MW} \cdot \text{d} = 3\,600 \cdot 24 \cdot 10^6 = 8,6 \cdot 10^{10} \text{ J.}$$

Projektinis kuro išdegimas Ignalinos atominės elektrinės RBMK1500 reaktoriuje su 2%  $^{235}\text{U}$  prisodrinimu buvo 21,6 MWd/kg, tačiau įvedus papildomas saugumo priemones, jis tapo mažesnis. Realus kuro išdegimas tapo lygus (12–16) MWd/kg.

Kuro buvimo veikiančiame reaktoriuje laikui bėgant, palaipsniui mažėja pradinio branduolinio kuro branduolių skaičius ir susidaro nauji. Tarp pastarųjų branduolinės energetikos požiūriu pirmiausia reikia išskirti daliosius branduolius ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ). Šių branduolių kaupimasis yra vadinamas daliosios medžiagos atgaminimu. Plutonio  $^{239}\text{Pu}$  susidarymas urano kuro cikle aprašomas tokia formule:



Naujo daliojo urano izotopo  $^{233}\text{U}$  susidarymas torio kuro cikle aprašomas tokia formule:



Kai kurie branduoliai, susidarę dalijantis uranui ir plutoniui su didele tikimybe turi didelį sugėrimo skerspjūvį šiluminių neutronų srityje. Neutronų sugėrimas juose, kuriuose koncentracija palyginti greitai pasiekia pusiausvyros padėtį, vadinamas reaktoriaus nuodijimu. Visi kiti nauji branduoliai dažnai apjungiami į vieną grupę ir vadinami jų šlaku, o neutronų sugėrimas šlake vadinamas reaktorių šlakavimu.

Šiuolaikiniai branduoliniai reaktoriai pasiekia 60 MWd/kg kuro išdegimo lygį per buvimo reaktoriuje laikotarpį.

### 1.1.5. Branduolinio kuro nuklidinio sąstato kitimas išdegimo metu

Reaktoriaus darbo metu nuolat vyksta procesai, sukeltieji reaktoriaus branduolinio kuro nuklidinio sąstato kitimą. Daugumą tokių procesų sukelia neutronų sąveika su kuro elementų branduoliais ir savaiminis radioaktyviųjų branduolių skilimas.

Nuklidų koncentracijos kitimas išreiškiamas formule [Robert Barjon. Physique des reacteurs nucleaires. Institut des Sciences Nucleaires, 1993]:

$$\frac{d N_i(t)}{\phi dt} = \sum_j b_{j \rightarrow i}^\lambda \frac{\lambda_j}{\phi} N_j(t) + \sum_k b_{k \rightarrow i}^\sigma \sigma_{c,k} N_k(t) - \left( \frac{\lambda_i}{\phi} + \sigma_{a,i} \right) N_i(t) \quad (6)$$

Pirmasis dešinės pusės narys išreiškia i-tojo nuklido atsiradimą dėl j-tojo motininio branduolio skilimo. Antrasis narys išreiškia atsiradimą dėl neutrono pagavimo k-tajame motininiam nuclide, o trečias narys – i-tojo branduolio praradimą dėl absorbcijos ir (arba) dėl skilimo. Čia  $N_j(t)$ ,  $N_j(t)$ ,  $N_j(t)$  yra i, j ir k nuklidų koncentracijos priklausomai nuo laiko;  $\lambda_i$ ,  $\lambda_j$  yra i ir j nuklidų skilimo konstantos;  $b_{j \rightarrow i}^\lambda$  – elemento j skilimo į elementą i šakojimosi santykis;  $b_{k \rightarrow i}^\sigma$  – elemento k virtimo elementu i dėl neutrono pagavimo šakojimosi santykis;  $\sigma_{c,k}$  – nuklido k pagavimo ( $n, \gamma$ ) skerspjūvis;  $\sigma_{a,i}$  – absorbcijos nuklide i skerspjūvis;  $\phi$  – neutronų srauto tankis;  $\phi dt$  – neutronų įtėkis.

Aušimo metu sunkiųjų branduolių koncentracija priklauso nuo jų radioaktyviojo skilimo. Diferencialinė lygtis turi tokį pavidalą:

$$\frac{d N_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^{i-1} b_{j \rightarrow i}^\lambda \lambda_j N_j(t) - \lambda_i N_i(t) \quad (7)$$

Daugiausia nuklidų transmutacijų dalijimosi reaktoriuose vyksta dėl neutronų pagavimo, sukeltieji arba dalijimosi arba dalijimosi produktų izotopų įvairovės didėjimą, paliekant branduolį tam pačiam cheminiam elementui, tačiau su vienu papildomu neutronu reakcijos [Z, N] ( $n, \gamma$ ) [Z, N+1] metu. Taip pat gali vykti transmutacijos reakcijos [Z, N] ( $n, 2n$ ) [Z, N-1], duodančios tą patį elementą, tačiau su mažesniu neutronų skaičiumi.

Papildomi Z ir N pasikeitimo virsmai yra  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  ir  $\alpha$  skilimai, dėl to atitinkamai susidaro [Z+1, N], [Z-1, N] ir [Z-2, N-2] nuklidai.

Kai izotopas  $j$  pagauna neutroną, jis virsta  $j+1$  izotopu ir išspinduliuoja  $\gamma$  kvantą. Naujai atsiradęs izotopas gali pagauti neutroną ir virsti  $j+2$  izotopu ir būti radioaktyviu.

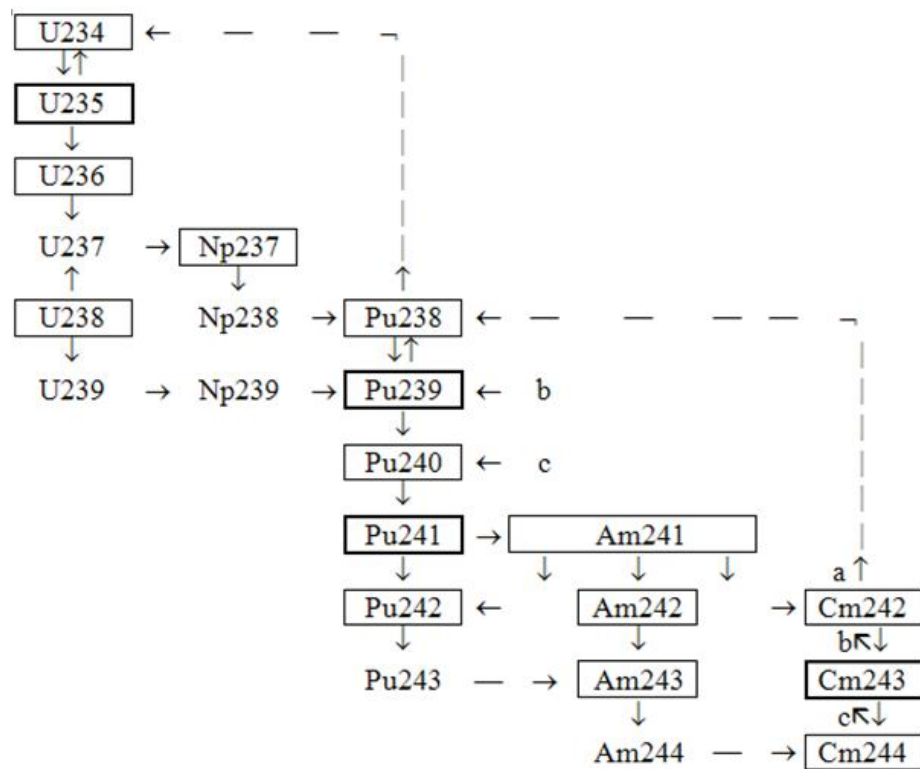
Transuraniniai elementai ir dalijimosi produktai yra dvi pagrindinės dedamosios panaudotame branduoliniame kure.

#### 1.1.6. Aktinidų sudėties kitimas reaktoriaus darbo metu

Urano ciklo naujo branduolinio kuro sudėtyje būna keletas urano izotopų.  $^{235}\text{U}$  yra pagrindinis energijos šaltinis reaktoriuose su šiluminiais neutronais. Didžiausią urano kuro dalį sudaro  $^{238}\text{U}$ , kuris yra žaliavinė medžiaga naujo daliaus nuklido  $^{239}\text{Pu}$  gamybai reaktoriaus darbo metu. Be šių dedamųjų branduoliniame kure būna nedidelis kiekis  $^{234}\text{U}$  ir  $^{236}\text{U}$  izotopų. Taigi, pagrindiniai izotopai pradiniam branduoliniame urano ciklo kure yra  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ . Reaktoriaus darbo metu kinta minėtų izotopų koncentracijos, be to, dėl neutronų pagavimo reakcijų ir branduolių skilimo atsiranda naujų sunkiųjų branduolių. Dalis jų taip pat dalijasi, veikiant šiluminiais neutronams, o kiti tampa tik neutronų nuostolių šaltiniais.

Veikiant neutronų srautui reaktoriaus darbo metu atsiranda nauji branduoliai, kurių pradinėje kuro sudėtyje nebuvo: neptunis  $^{239}\text{Np}$ , plutonis  $^{239}\text{Pu}$ , americis  $^{241}\text{Am}$ , kiuris  $^{244}\text{Cm}$  ir t.t. Kai kurie iš jų yra dalieji, kiti veikia kaip absorbentai ir mažina aktyviosios zonos reaktyvumą. Neptūnis  $^{239}\text{Np}$  gali būti padalintas tik veikiant greitiesiems neutronams, tačiau jis yra svarbus tarpinis radionuklidas formuojant  $^{239}\text{Pu}$  iš  $^{238}\text{U}$ . Panašiai elgiasi neutronų pagavimo grandinė, prasidedanti nuo  $^{239}\text{Pu}$ . Po dviejų neutronų pagavimo susidaręs dalusis radionuklidas  $^{241}\text{Pu}$  beta skilimo metu virsta  $^{241}\text{Am}$ , kuris veikia kaip neutronų absorberis.

7 paveiksle parodyta urano evoliucijos grandinė, įvertinanti neutronų pagavimą ir radionuklidų radioaktyvųjų skilimą [7]:



7 pav. Urano evoliucijos grandinės schema

Pastorinta linija apibrėžti dalieji branduoliai. Plona linija apibrėžti branduoliai nesidalina, veikiant lėtiesiems neutronams. Punktyrine linija apibrėžti efemeriški (trumpaamžiai) branduoliai. Žemyn nukreiptos rodyklės reiškia neutronų pagavimą:  $(n, \gamma)$  reakciją. Į viršų nukreiptos rodyklės reiškia  $(n, 2n)$  reakciją. Horizontalios strėlės reiškia radioaktyvų  $\beta$  skilimą. Įstrižos rodyklės parodo trumpų pusamžių alfa skilimus.

Reakcijos  $(n, \gamma)$  ir  $(n, 2n)$  vyksta, kai branduolius veikia neutronų srautas. Tačiau branduoliniame kure esantys radionuklidai pasižymi ir tam tikromis savaiminio dalijimosi ir alfa skilimo tikimybėmis. Jų metu  $^{242}\text{Cm}$  virsta  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Cm}$  virsta  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{244}\text{Cm}$  virsta  $^{240}\text{Pu}$ . Nuklidai  $^{242}\text{Am}$  pavaizduoti trijuose langeliuose dėl skirtingų reakcijos išėjimo kanalų. Kai  $^{241}\text{Am}$  pagauna neutroną, tada 11% atvejų susidaro  $^{242}\text{Am}$  branduoliai pagrindinėje būsenoje, o 89% atvejų – metastabilioje būsenoje.  $^{242}\text{Am}$  branduoliai turi du skirtingus beta skilimo kanalus. 83% atvejų vyksta  $\beta^+$  skilimas ir atsiranda  $^{242}\text{Cm}$ , o 17% atvejų vyksta  $\beta^-$  skilimas ir atsiranda  $^{242}\text{Pu}$ . Šių  $\beta$  virsmų pusamžis yra 16 valandų. Metastabilioje būsenoje esantys branduoliai turi ilgą pusamžį (152 metus) ir pagavę po neutroną tampa  $^{243}\text{Am}$ .

Branduoliniame kure susidariusių radionuklidų koncentracijos n bet kurioje reaktoriaus vietoje priklauso nuo neutronų srauto, pradinių koncentracijų ir nuo apšvitinimo trukmės (kuro išdegimo).

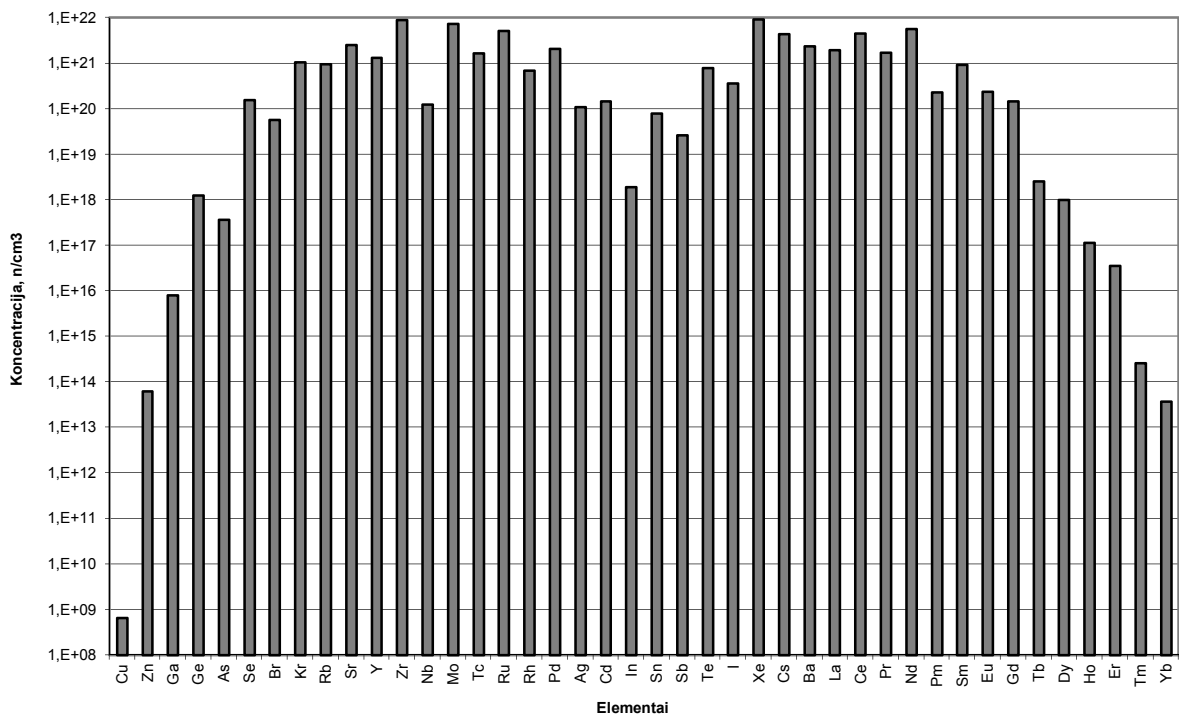
### 1.1.7. Branduolių dalijimosi produktų sudėties kitimo modeliavimas

Modeliavimas atliekamas su specialiomis kompiuterinėmis skaičiavimo programomis, įvertinančiomis pradinį branduolinio kuro izotopinį sąstatą, branduolinio kuro rinklių ir kuro

tablečių geometriją ir sąstatą, branduoliniame reaktoriuje vykstančius procesus, veikiant neutronų srautui, to veikimo trukmę, savaiminį nuklidų skilimą. Modeliuojant yra įvertinamas radionuklidų įvairovės, jų koncentracijų, aktyvumų, masių susidarymas ir kitimas priklausomai nuo kuro įsodrinimo, nuo vandens ir garo santykio kuro kanale, nuo išdegimo [8], [9]. Modeliuojant buvo nustatyta radioaktyvių inertinių dujų pernašos trukmė nuo išsihermetizavusios kuro rinklės iki ventiliacijos kamino [10].

Dažnai yra nagrinėjama susidariusių nuklidų koncentracijos priklausomybė nuo kuro išdegimo, nes tai svarbu nustatant tiek kuro aktyvumą, tiek liktinę kuro galią.

8 paveiksle pateikti dalijimosi produktų koncentracijų modeliavimo rezultatai, kai išdegimas RBMK reaktoriaus tipui yra lygus 18 MWd/kg reaktoriaus stabdymo momentui, kitaip tariant, esant nulinei aušinimo trukmei.



**8 pav.** Dalijimosi produktų koncentracijų pasiskirstymas esant 18 MWd/kg išdegimui ir nulinei aušinimo trukmei

Modeliavimo rezultatai apima dalijimosi produktų cheminius elementus nuo vario iki iterbio.

Pagal dvinarį sunkiųjų branduolių dalijimosi modelį kiekviename maksimume galima išskirti labiausiai paplitusius elementus. Jų suma sudaro per 90 % pilnosios dalijimosi elementų masės. Pirmame maksimume yra Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd – 49 %; antrame – Te, I, Xe, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd – 50 % visų skeveldrų masės.

1 lentelėje pateikiami po 5 metų aušinimo branduoliniame kure esantys nuklidai ir jų charakteristikos. 1 stulpelyje parašytas cheminis elementas, antrame šio elemento masinė dalis procentais atžvilgiu visų elementų masių sumos, esančių 18 GWd/t išdegimo branduoliniame

kure po 5 metų aušinimo, trečiame surašyti kure esantys cheminių elementų izotopai, o skliausteliuose – jų procentinė dalis šio cheminio elemento masės atžvilgiu. Nuklidai, kurių skilimo pusamžis yra ilgesnis už  $10^{10}$  metų ( $1E+10$  y) yra priskiriami prie stabilių nuklidų.

**1 lentelė.** Branduolinio kuro dalijimosi produktų masių sudėtis po 5 metų aušimo

X	m, %	A (%)
Galis Ga	8,15E-6	<b>71 (100 %)</b>
Germanis Ge	1,1E-3	<b>72 (1,27 %), 73 (3,72 %), 74 (10,37 %), 76 (84,64 %)</b>
Arsenas As	3,59E-4	<b>75 (100 %)</b>
Selenas Se	1,60E-1	<b>76 (1,53E-3 %), 77 (1,37 %), 78 (4,74 %), 79 (9,30 %), 80 (24,9 %), 82 (59,66 %)</b>
Bromas Br	6,10E-2	<b>79 (1,75E-3 %), 81 (100 %)</b>
Kriptonas Kr	1.08	<b>80 (1,64E-4 %), 81 (7,64E-6 %), 82 (0,53 %), 83 (11,27 %), 84 (31,29 %), 85 (4,89 %), 86 (52,49 %)</b>
Rubidis Rb	4.74e-4	<b>85 (29,7 %), 87 (70,3 %)</b>
Stroncis Sr	2,43	<b>86 (0,20 %), 87 (6,65E-4 %), 88 (42,55 %), 89 (4,52E-11 %), 90 (57,4 %)</b>
Itris Y	1,37	<b>89 (99,97 %), 90 (2,56E-2 %), 91 (3,86E-11 %)</b>
Cirkonis Zr	10,7	<b>90 (2,19 %), 91 (16,66 %), 92 (18,1 %), 93 (20,3 %), 94 (20,65 %), 95 (5,02E-9 %), 96 (22,18 %)</b>
Niobis Nb	2,24E-5	<b>93m (25,0 %), 93 (6,42 %), 94 (68,57 %), 95 (2,91E-3 %)</b>
Molibdenas Mo	9.86	<b>94 (4,0E-7 %), 95 (23,63 %), 96 (0,383 %), 97 (23,77 %), 98 (24,43 %), 100 (27,8 %)</b>
Techneis Tc	2,51	<b>98 (3,9E-5 %), 99 (100 %)</b>
Rutenis Ru	6,19	<b>98 (2,0E-9 %), 99 (8,34E-4 %), 100 (1,13 %), 101 (38,0 %), 102 (35,25 %), 103 (2,3E-14 %), 104 (25,33 %), 106 (0,246 %)</b>
Rodis Rh	1.69	<b>103m (8,4E-17 %), 103 (100 %), 106 (8,4E-7 %),</b>
Paladis Pd	3.50	<b>104 (8,03 %), 105 (31,51 %), 106 (27,83 %), 107 (17,70 %), 108 (11,28 %), 110 (3,65 %)</b>
Sidabras Ag	0.276	<b>107 (1,5E-4 %), 108m (1,3E-4 %), 108 (4,1E-13 %), 109 (99,999 %), 110m (1,9E-3 %), 110 (2,8E-11 %)</b>
Kadmis Cd	0,168	<b>108 (9,3E-5 %), 109 (1,1E-7 %), 110 (16,94 %), 111 (36,35 %), 112 (17,44 %), 113m (0,12 %), 113 (0,32 %), 114 (20,82 %), 115m (1,3E-15 %), 116 (8,0 %)</b>
Indis In	7,8E-3	<b>113 (0,93 %), 114m (2,6E-15), 114 (4,2E-20 %), 115m (8,2E-21 %), 115 (99,07 %)</b>
Alavas Sn	0,136	<b>114 (1,3E-4 %), 115 (0,36 %), 116 (1,61 %), 117 (8,34 %), 118 (6,84 %), 119m (1,1E-5 %), 119 (7,19 %), 120 (7,11 %), 121m (0,92 %), 121 (4,0E-5 %), 122 (9,48 %), 123 (8,0E-6 %), 124 (16,46 %), 126 (41,69E-4 %)</b>
Stibis Sb	0.298	<b>121 (33,45 %), 123 (44,25 %), 124 (5,1E-11 %), 125 (22,31 %), 126m (6,9E-8 %), 126 (9,1E-6 %),</b>
Telūras Te	1.34	<b>122 (7,6E-3 %), 123m (9,3E-11 %), 123 (1,8E-5 %), 124 (9,3E-3 %), 125m (6,9E-3 %), 125 (1,79 %), 126 (0,10 %), 127m (2,6E-6 %), 127 (8,9E-9 %), 128 (19,17 %), 129m (2,2E-17 %), 129 (2,0E-20 %), 130 (78,91 %)</b>
Jodas J	0,649	<b>127 (20,87 %), 129 (79,13 %)</b>
Ksenonas Xe	15,8	<b>128 (6,6E-3 %), 129 (2,7E-5 %), 130 (0,107 %), 131 (10,18 %), 132 (17,81 %), 134 (28,22 %), 136 (43,67 %)</b>
Cezis Cs	7,79	<b>133 (47,37 %), 134 (0,252 %), 135 (12,16 %), 137 (40,22 %)</b>
Baris Ba	4,52	<b>134 (2,61 %), 135 (1,9E-3 %), 136 (1,42 %), 137m (1,1E-5 %), 137 (10,96 %), 138 (85,0 %), 140 (2E-43 %)</b>
Lantanas La	3.55	<b>139 (100 %)</b>
Ceris Ce	6,85	<b>140 (51,62 %), 141 (2,8E-17 %), 142 (48,20 %), 144 (0,18 %)</b>
Prazeodimis Pr	3,32	<b>141 (100 %), 143 (7,2E-41 %), 144 (1,6E-5 %)</b>
Neodimis Nd	11,8	<b>142 (0,36 %), 143 (19,40 %), 144 (33,31 %), 145 (17,89 %), 146 (15,83 %), 148 (8,96 %), 150 (4,25 %)</b>
Prometis Pm	0.15	<b>147 (100 %), 148m (1,1E-13 %), 148 (7,2E-16 %)</b>
Samaris Sm	2,47	<b>147 (36,73 %), 148 (7,44 %), 149 (0,44 %), 150 (28,91 %), 151 (0,60 %), 152 (21,85 %), 154 (4,03 %)</b>

X	m, %	A (%)
Europis Eu	0.265	<b>151 (0,221 %)</b> , 152 (9,0E-3 %), <b>153 (88,29 %)</b> , 154 (8,09 %), 155 (3,39 %), 156 (1,3E-36 %)
Gadolinis Gd	0.177	<b>152 (3,6E-2 %)</b> , 153 (2,1E-6 %), <b>154 (7,03 %)</b> , <b>155 (5,14 %)</b> , <b>156 (64,73 %)</b> , <b>157 (5,5E-2 %)</b> , <b>158 (21,47 %)</b> , <b>160 (1,54 %)</b>
Terbis Tb	6,25E-3	<b>159 (100 %)</b> , 160 (1,5E-8 %)
Disprozis Dy	2.34E-3	<b>160 (6,42 %)</b> , <b>161 (36,13 %)</b> , <b>162 (39,74 %)</b> , <b>163 (16,17 %)</b> , <b>164 (1,54 %)</b>
Holmis Ho	1.33E-4	<b>165 (97,12 %)</b> , 166m (2,88 %)
Erbis Er	4,20E-5	<b>166 (60,37 %)</b> , <b>167 (9,30 %)</b> , <b>168 (29,60 %)</b> , <b>170 (0,73 %)</b>
Tulis Tu	9.34E-7	<b>169 (100 %)</b> , 170 (1,6E-4 %)
Iterbis Yb	1,67E-6	<b>170 (100 %)</b>

1 lentelėje paryškintu šriftu pažymėti stabilūs nuklidai. Akivaizdu, kad po 5 metų aušinimo daugumos elementų izotopai yra stabilūs.

Dėl dalijimosi ir radioaktyviojo beta ir alfa skilimo atsiranda nuklidai su visiškai skirtingomis agregatinėmis ir radiacinėmis. Pavyzdžiui, kieta medžiaga radis skyla į radoną, kuris yra dujos.

Dalijimosi produktai apima dujas (kriptonas Kr ir ksenonas Xe), halogenus, tokius kaip jodas I ir daugelį metalų pavyzdžių (Mo, Fe, Cr, Sr ir t.t.).

Technecis neturi nė vieno stabilaus nuklido.

Kai kurie nuklidai yra labai trumpaamžiai.

Pagal modeliavimo rezultatus, po 5 metų aušinimo susidaro maždaug vienodas kiekis radioaktyvaus  $^{129}\text{I}$  ir stabilaus  $^{127}\text{I}$ . Radioaktyvaus izotopo skilimo pusamžis yra didelis  $1,57 \cdot 10^7$  metų. Ksenono dujas po 5 metų galima laikyti esant neradioaktyviomis, nes skilimo procese susidaro ir išlieka stabilūs izotopai, o vienas yra kvazistabilus su pusamžiu lygiu  $9,30 \cdot 10^9$  metų.

Po 5 metų iš 13 lantano izotopų lieka tik vienas izotopas – stabilusis  $^{139}\text{La}$ . Prazeodimis turi tik vieną stabilų izotopą  $^{141}\text{Pr}$ . Neodimis turi net 7 stabilus izotopus, iš jų du kvazistabilūs.

Branduoliniame kure susidaro net 11 skirtingų promečio izotopų, tačiau net ir gamtiniame urane nėra nė vieno stabilaus izotopo. Po 5 metų branduoliniame kure radioaktyvaus promečio iš viso nebelieka. Jie pavirsta atitinkamais samario izobarais. Gamtiniame mišinyje ilgaamžiškiausias yra 17,7 metų pusamžį turintis  $^{145}\text{Pm}$ . Branduoliniame kure aptiktas  $^{149}\text{Pm}$ , turintis mažiausią masės skaičių ir didžiausią pusamžį, lygų 53,08 h.

Branduoliniame kure iš 7 gadolinio izotopų 6 yra stabilūs, o nestabilus  $^{153}\text{Gd}$  kiekis yra palyginti mažas, o pusamžis nedidelis: 241,6 paros [11].

Kriptono dujos ir po 5 metų yra radioaktyvios, jų sudėtyje yra  $^{85}\text{Kr}$ . Jis sudaro maždaug 5 procentus nuo visos kriptono izotopų masės po 5 metų aušimo. Yra ir  $^{81}\text{Kr}$ . Jo masinė dalis yra maža. Iš kriptono radionuklidų susidaro rubidžio nuklidai.



Holmis turi tik vieną stabilų nuklidą  $^{165}\text{Ho}$ . Branduoliniame kure po 5 metų aušinimo apart jo egzistuoja ir maždaug tris kartus mažesnę masę turintis nestabilus izotopas  $^{166\text{m}}\text{Ho}$  su palyginti dideliu skilimo pusamžiu, lygiu  $1,20 \cdot 10^3$  metų.

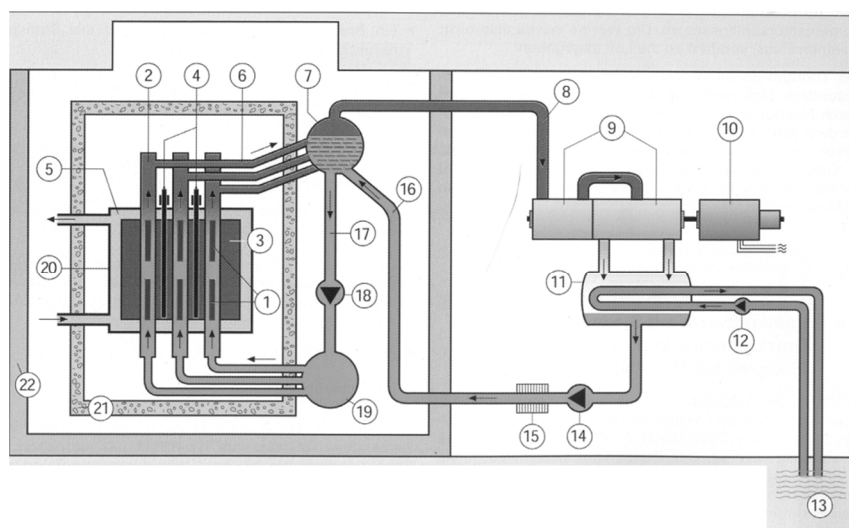
Iš 6 branduoliniame kure susidariusių erbio izotopų, po 5 metų lieka 4 ir visi stabilūs.

Po 5 metų laikymo branduoliniame kure esančių dalijimosi produktų masių tarpe stabilių nuklidų masė sudaro 85,5 procentus, o nestabilių likusią 14,5 procentų dalį. Iš visos masės Kr ir Xe dujos sudaro maždaug 17 procentų, tame tarpe radioaktyvusis kriptonas  $^{81}\text{Kr}$  ir  $^{85}\text{Kr}$  sudaro tik maždaug 0,05 procento.

Pilnoji cheminių elementų masė aušimo metu išlieka tokia pati, tik persiskirto, vieniems mažėjant, o kitų daugėjant. Dalis jų išlieka beveik nepakitę.

### 1.1.8. Ignalinos atominės elektrinės technologinė schema

Ignalinos atominėje elektrinėje buvo naudojami RBMK tipo reaktoriai. Supaprastinta elektrinės su RBMK reaktoriumi struktūrinė schema yra parodyta 9 paveiksle [12]:



**9 pav.** Atominės elektrinės su RBMK reaktoriumi struktūrinė schema: 1 – urano kuro elementai, 2 – kuro kanalas, 3 – grafitas (neutronų lėtiklis), 4 – valdymo strypai, 5 – apsauginės dujos (helio ir azoto mišinys), 6 – vandens ir garo mišinys, 7 – garo atskyriklis (būgnas separatorius), 8 – garas į turbiną, 9 – garo turbina (aukšto slėgio ir žemo slėgio), 10 – elektros generatorius, 11 – kondensatorius, 12 – aušinančiojo vandens siurblys, 13 – aušinantis ežeras arba aušinimo bokštas, 14 – kondensato siurblys, 15 – deaeratorius, 16 – kondensatas (vanduo), 17 – atgalinis vanduo, 18 – pagrindinis cirkuliacijos siurblys, 19 – vandens skirstytuvai, 20 – reaktoriaus metalinė apsauga, 21 – betoninė apsauga, 22 – reaktoriaus pastatas

RBMK reaktoriai priklauso verdančiojo vandens (BWR) reaktorių tipui. Reaktorių aušinantis vanduo teka per aktyviąją zoną ir yra užvirinamas ir dalinai paverčiamas garu. Šis vandens ir garo mišinys patenka būgnus separatorius. Juose vanduo lieka, o garas paduodamas į turbinas. Dalį savo energijos garas sunaudoja turbinai sukurti. Iš turbinos išėjęs garas kondensatoriuje kondensuojamas. Panaudotas turbinoje garas kondensuojamas kondensatoriuje. Toliau maitinimo siurbliu kondensatas grąžinamas į tą patį būgną separatorių. Jame kondensatas susimaišo su prieš tai iš garo atskirtu vandeniu. Taip susidaręs šilumnešis pagrindiniais

cirkuliaciniais siurbliais grąžinamas į aktyviają zoną, kur jo dalis vėl paverčiama garu. Taip sudaromas uždaras vandens ir garo ciklas.

Branduolinis kuras reaktoriaus darbo metu būna kuro elementuose. Į reaktorių RBMK talpinama per 60 tūkstančių kuro elementų. Pagrindinė kuro rūšis pasaulinėje branduolinėje energetikoje yra urano dioksidas  $UO_2$ . Dažniausiai urano dioksidas yra naudojamas sukepintų kompaktinių gaminių – tablečių pavidalu. RBMK reaktoriuje naudojamų urano dioksido tablečių skersmuo yra 11,5 mm, o tabletės aukštis 15 mm. Tabletės viduje geresniam šilumos nuvedimui yra 2 mm skersmens kiaurymė. Kuro tabletės tankis  $10400 \text{ kg/m}^3$ . Sukepintos  $UO_2$  tabletės patalpinamos į kuro elemento apvalkalo vamzdį. RBMK reaktoriaus kuro elemento apvalkalas yra sudarytas iš Zr + 1% Nb lydinio vamzdžio. Kuro elementai yra sujungiami į kuro rinkles. Rinklės yra įleidžiamos į technologinius kanalus. Technologiniai kanalai yra įtvirtinti reaktoriaus konstrukcijoje ir sudaro traktą šilumnešiu. Į reaktoriaus kuro kanalą talpinama 7 m ilgio kuro kasetė, sudaryta iš dviejų rinklių, pritvirtintų prie centrinio kasetės strypo. Rinklės aktyvusis ilgis 3,5 m.

Kiekvienoje RBMK reaktoriaus rinklėje patalpinta po 18 strypo formos kuro elementų, išdėstytų dviem koncentriniais apskritimais apie centrinį vamzdį. Pirmame žiede yra patalpinti 6 kuro elementai, o antrame žiede – 12 kuro elementų. RBMK reaktoriuje šilumnešis yra vanduo, o lėtiklis yra grafitas. Lėtiklyje tam tikra tvarka išdėstyti kuro elementai arba kuro kanalai sudaro atitinkamas gardeles. RBMK reaktoriuje gardelės žingsnis yra 25 cm.

Ignalinos atominės elektrinės pirmasis blokas buvo pradėtas eksploatuoti 1983 m. gruodžio 31 d. [13]. 1986 m. buvo užbaigti antrojo reaktoriaus montavimo darbai, tačiau dėl 1986 m. balandžio 26 d. įvykusios avarijos Černobylio atominėje elektrinėje, taip pat turinčioje RBMK tipo reaktorių, IAE antrojo bloko eksploatavimo pradžia buvo nukelta ir blokas pradėjo dirbti 1987 m. rugpjūčio 31 d. Tuo metu jau buvo atlikta apie 60 proc. trečiojo bloko statybos darbų, tačiau po Černobylio avarijos Ignalinos AE trečiojo bloko statyba buvo užkonservuota, o 1989 m. visiškai sustabdyta

Lietuvai vykdant stojimo į Europos Sąjungą sutartyje numatytus įsipareigojimus, 2009 m. gruodžio 31 d. elektrinė visiškai nutraukė elektros energijos gamybą. Pirmasis blokas nebeveikia nuo 2004 m. gruodžio 31 d. 20 val. 2 min., o antrasis sustabdytas 2009 m. gruodžio 31 d. 22 val. 54 min.

IAE reaktoriai buvo vieni galingiausių pasaulyje. Kiekvieno jų instaliuota galia – 1500 MW. 2008 m. IAE gamino apie 70 proc. Lietuvai reikalingos elektros energijos.

Vietoje uždarytos Ignalinos atominės elektrinės yra planuojama statyti naują Visagino atominę elektrinę su pažangiu šiuolaikiniu verdančiojo vandens reaktoriumi ABWR [14].

### 1.1.9. Nuklidų radiotoksiškumas

Žalingas tam tikras radioaktyvios medžiagos kiekis yra vertinamas doze, kurią galėtų gauti visi žmonių grupės nariai, jeigu į juos patektų duotas elemento kiekis. Šia prasme yra naudojami medžiagos radiotoksiškumo ir galimo radiotoksiškumo potencialo terminai. Nuklido radiotoksiškumas yra apibūdinamas jo efektyviuoju dozės koeficientu  $e(T)$  arba doze vienetiniam patekimui, išreikšta sivertais bekereliui (Sv/Bq). Sivertas yra lygiavertės dozės vienetas, o bekerelis yra aktyvumo vienetas. Efektyvusis dozės koeficientas atitinka dozei, kurią sukelia 1 Bq aktyvumo radionuklido patekimas. Jis įvertina medžiagų apykaitą organizme, kai jos nuryjamos arba įkvepiamos, emituojamos spinduliuotės energiją ir tipą. Trukmė T yra kaupimo laikas metais po patekimo. Suaugusiems integravimo trukmė yra 50 metų [15].

Radiotoksiškumas (sivertais), sukeltas tam tikro nuklido patekimo, yra lygus efektyviojo dozės koeficiento (Sv/Bq vienetais) ir šio nuklido aktyvumo, išreikšto bekereliais, sandauga.

$$\text{Radiotoksiškumas} = \text{Aktyvumas} \cdot e(50)$$

Efektyvieji dozės koeficientai yra nustatomi naudojant modelius, aprašančius radionuklidų judėjimą kūno dalimis. Dozinių koeficientų reikšmės yra nuolat patikslinamos. Tai atlieka Tarptautinė radiologinės apsaugos komisija (ICRP).

Koeficientų reikšmės aktinidams yra keliomis eilėmis didesnės negu dalijimosi produktams. Tai akivaizdu, panagrinėjus koeficientų reikšmes, pateiktas 2 lentelėje

#### 2 lentelė. Efektyvieji doziniai koeficientai

Aktinidai	Nuklidas	e(50), Sv/Bq	Dalijimosi produktai	Nuklidas	e(50), Sv/Bq
	<sup>238</sup> U	4.5x10 <sup>-8</sup>		<sup>90</sup> Sr	2.8 x10 <sup>-8</sup>
<sup>239</sup> Pu	2.5x10 <sup>-7</sup>	<sup>99</sup> Tc	6.4x10 <sup>-10</sup>		
<sup>241</sup> Am	2.0x10 <sup>-7</sup>	<sup>131</sup> I	2.2 x10 <sup>-8</sup>		
<sup>237</sup> Np	1.1x10 <sup>-7</sup>	<sup>137</sup> Cs	1.3 x10 <sup>-8</sup>		

Efektyvieji doziniai koeficientai yra nustatyti radionuklidų įkvėpimo ir nurijimo atvejams. Jie yra skirtingi [16], [17].

Urano ir torio izotopų efektyviųjų dozės koeficientų reikšmės yra surašytos 3 lentelėje. Antrame ir penktame stulpeliuose pateiktos koeficientų reikšmės įkvėpimo atvejui, o trečiame ir šeštame stulpelyje – nurijimo atvejui.

#### 3 lentelė. Urano ir torio izotopų efektyvieji doziniai koeficientai

X	e(50) <sub>inh</sub>	e(50) <sub>ing</sub>	X	e(50) <sub>inh</sub>	e(50) <sub>ing</sub>
U 232	3.70E-05	3.30E-07	Th 227	1.00E-05	8.80E-09
U 233	9.60E-06	5.10E-08	Th 228	4.00E-05	7.20E-08
U 234	9.40E-06	4.90E-08	Th 229	2.40E-04	4.90E-07
U 235	8.50E-06	4.70E-08	Th 230	1.00E-04	2.10E-07
U 236	8.70E-06	4.70E-08	Th 231	3.30E-10	3.40E-10

## 1.2. Radioaktyvieji nuklidai produktuose

Vandenyje tirpūs gamtinio urano ir torio skilimo produktai dažniausiai aptinkami maisto produktuose, tokiuose kaip žuvis, grūdai ir lapinės daržovės. Kosmogeniniai radionuklidai, kaip antai anglis  $^{14}\text{C}$  ir tritis  $^3\text{H}$ , besigaminantys aukštesniuose atmosferos sluoksniuose, patenka į maisto junginius fotosintezės metu ir per vandenį, įsisavinamą augaluose.

Per orą augalai gali užsiteršti nuo sausų radioaktyvių aerozolių nuosėdų ar šlapių nuosėdų lyjant. Radionuklidai, pasklidę vandenyje, gali užteršti augalus, kai paviršinis vanduo naudojamas drėkinimui. Ilgalaikiai teršalai gali atsirasti dėl užteršto lietaus vandens, patenkančio į dirvožemį. Užterštumas gyvulinės kilmės produktuose (mėsoje, piene) atsiranda daugiausia per užterštą žolę ar pašarus. Teršalai, aptinkami žuvyje ir vėžiagyviuose, tiesiogiai susiję su radionuklidais paviršiniame vandenyje.

Grybai gali kaupti radionuklidus tokiu pačiu būdu kaip ir sunkiuosius metalus. Dažniausiai yra nagrinėjamas radioaktyviojo cezio kiekis grybų sudėtyje.

4 lentelėje pateikti antropogeninės kilmės radionuklidų, esančių grybuose, savitojo aktyvumo intervalai išmatuoti skirtingose šalyse [18]. Duomenys išreikšti Bq/kg, pakoreguoti naudojant sausumo/drėgmės koeficientą, lygų 0,1.

**4 lentelė.** Antropogeninių radionuklidų savitojo aktyvumo reikšmės grybuose skirtingose šalyse

Radionuklidas	Savitasis aktyvumas, Bq/kg	Valstybė
$^{103}\text{Ru}$	10–1480	Austrija
$^{131}\text{I}$	11–48	Italija
$^{137}\text{Cs}$	0,4– 50700000	Įvairios
$^{238,239 - 240}\text{Pu}$	0,0009–82,8	Ispanija, Lenkija, Suomija, Ukraina
$^{90}\text{Sr}$	0,25–1500	Ispanija, Lenkija, Ukraina, Vokietija
$^{241}\text{Am}$	0,0054–0,067	Ispanija, Suomija
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	1,5–1872	Italija, Slovėnija, Vengrija
$^{125}\text{Sb}$	130–10310	Ukraina

5 lentelėje pateikti gamtinės kilmės radionuklidų, esančių grybuose, savitojo aktyvumo intervalai išmatuoti skirtingose šalyse [18].

**5 lentelė.** Gamtinių radionuklidų savitojo aktyvumo reikšmės grybuose skirtingose šalyse

Radionuklidas	Savitasis aktyvumas, Bq/kg	Valstybė
$^{40}\text{K}$	70–3520	Airija, Austrija, Belgija, Brazilija, Bulgarija, Čekija, Ispanija, Italija, Japonija, Lenkija, Lietuva, Meksika, Norvegija, Prancūzija, Rumunija, Rusija, Taivanas, Ukraina, Vengrija, Vokietija
$^{226}\text{Ra}$	0,021–512	Brazilija, Ispanija, Prancūzija, Ukraina, Vokietija,
$^{234,235,236,238}\text{U}$	0,0011–259	Čekija, Ispanija, buvusi Jugoslavija, Lenkija, Ukraina, Vokietija
$^{228,230,232}\text{Th}$	0,0008–13	Čekija, Ispanija, Lenkija,
$^{210}\text{Pb}$	0,75–289	Ispanija, Lenkija, Norvegija, Suomija, Vokietija
$^{210}\text{Po}$	2,22–1174	Ispanija, Lenkija, Norvegija, Suomija, Vokietija
$^7\text{Be}$	1.5–380	Ispanija, Suomija

6 lentelėje pateikti cezio  $^{137}\text{Cs}$  savitojo aktyvumo (Bq/kg) intervalai grybuose skirtingose pasaulio šalyse po 1986 Černobylio avarijos, išreikšti [18].

**6 lentelė.**  $^{137}\text{Cs}$  savitojo aktyvumo intervalai grybuose įvairiose šalyse

Šalis	Intervalas, Bq/kg	Šalis	Intervalas, Bq/kg
Austrija	148–37370	Lenkija	40–156700
Baltarusija/Ukraina/Rusija	9,6–50700000	Lietuva	42–3400
Belgija	160–102000	Meksika	2–1521
Brazilija	1,45–10,6	Norvegija	9–445000
Bulgarija	41–990	Prancūzija	2,5–5595
Buvusi Jugoslavija	1,5–117000	Rumunija	70–360
Čekija	50–150700	Slovakija	323–966
Danija	212–13343	Suomija	10–121400
Didžioji Britanija	0,4–30500	Švedija	20–950000
Italija	95–135575	Šveicarija	3–2000
Japonija <sup>a</sup>	0,92–16300	Taivanas	1,1–7,3
JAV	30–50	Turkija	9,84–401
Ispanija	0,5–647	Vengrija	0,6–714
Kanada	2–560	Vokietija	90–11290
Kinija	2,1		

<sup>a</sup> Fukušimos avarijos duomenys nebuvo įtraukti.

Medaus sudėtyje  $^{238}\text{U}$  savitasis aktyvumas skirtingose vietovėse statistiškai svarbių skirtumų neturėjo [19].  $^{40}\text{K}$  intervalas buvo nuo 7,28 iki 101 Bq/kg (vidutinė vertė 28,1 Bq/kg). Polonio  $^{210}\text{Po}$  savitojo aktyvumo vidurkis 0,40 Bq/kg, kalio  $^{40}\text{K}$  – 28,1 Bq/kg.

Buvo nustatyta, kad gamtinių radionuklidų įvairovė medaus sudėtyje labiausiai priklauso nuo augalinės struktūros skirtumų, taip pat ir mineralinių dirvos, kurioje išauginami augalai, komponentų. Kiti faktoriai, lemiantys gamtinių radionuklidų įvairovę, yra naudojamos trąšos, drėkinimui naudojamas vanduo ir klimato sąlygos. Nustatytos vertės dažniausiai panašios į tas, kurios paminėtos kitų autorių apie kitus Europos regionus.

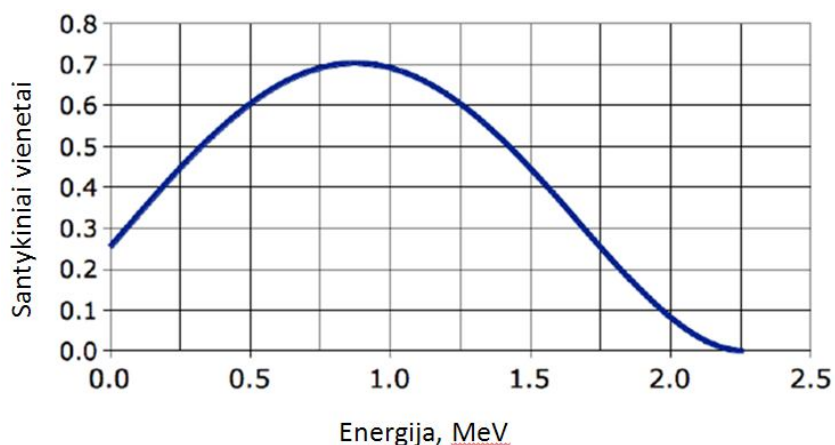
Radioaktyvūs nuklidai, aptinkami kituose produktuose, surašyti 7 lentelėje.

**7 lentelė.** Radionuklidai įvairiuose produktuose

Produkto nr.	Produktas	Produkte randami radioaktyvūs nuklidai
1.	Braziliški riešutai	$^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$
2.	Pupelės	$^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Rn}$
3.	Morkos	$^{226}\text{Rn}$ , $^{40}\text{K}$
4.	Bulvės	$^{226}\text{Rn}$ , $^{40}\text{K}$
5.	Natrio druska	KCl
6.	Mėsa	$^{40}\text{K}$
7.	Alus	$^{40}\text{K}$
8.	Geriamas vanduo	$^{226}\text{Ra}$
9.	Riešutų sviestas	$^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$
10.	Bananai	$^{226}\text{Rn}$ , $^{40}\text{K}$
11	Medus	$^{137}\text{Cs}$ , $^{40}\text{K}$ , $^{238}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{210}\text{Po}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{226}\text{Ra}$

### 1.2.1. Radionuklidų identifikavimo ypatumai

Nagrinėjami radionuklidai pasižymi alfa, beta ir gama spinduliuote. Beta spinduliuotės spektras yra ištisinis, o gama spinduliuotės spektras yra linijinis. 10 paveiksle parodytas radioaktyviojo stroncio  $^{90}\text{Sr}$  beta spektro vaizdas. Jis yra ištisinis, nes, Beta dalelių energija būna labai įvairi – nuo nulinės vertės iki tam tikros didžiausios vertės, vadinamos didžiausia beta spektro energija. Stroncio  $^{90}\text{Sr}$  beta spektro didžiausia energija lygi 2,3 MeV, o vidutinė beta dalelės kinetinė energija lygi 0,92 MeV.

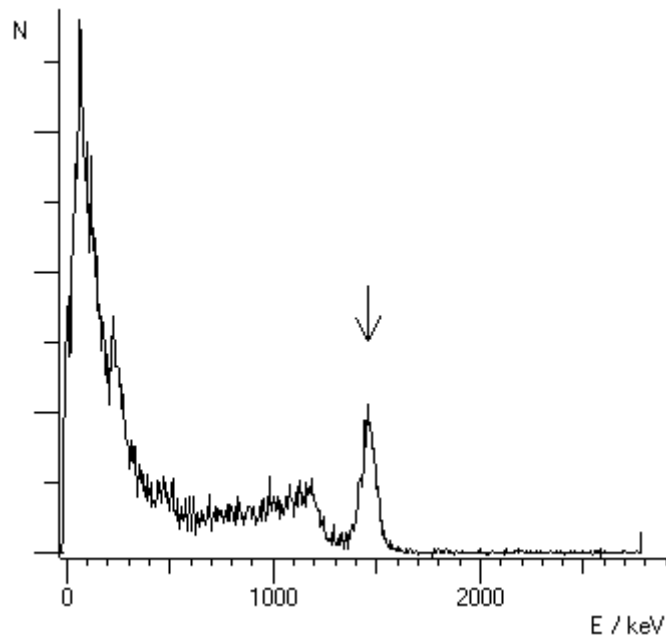


10 pav. Radioaktyviojo stroncio  $^{90}\text{Sr}$  ištisinis beta spektras

$^{40}\text{K}$  pasižymi visais trimis beta skilimo būdais: elektroniniu, pozitroniniu ir elektronų pagavimu. Maždaug 89.28 % atvejų jis skyla į kalcį  $^{40}\text{Ca}$ , emituodamas neigiamą beta dalelę (elektroną), kurio didžiausia energija 1,33 MeV ir antineutrą:

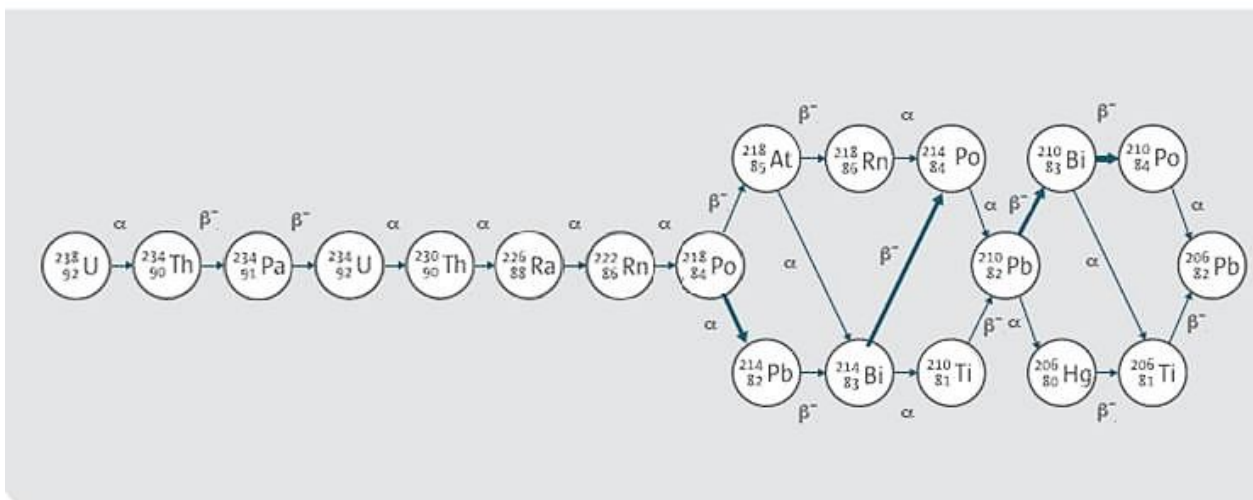


Maždaug 10.72 % atvejų kalis  $^{40}\text{K}$  skyla į argoną  $^{40}\text{Ar}$  elektrono pagavimo būdu ir emituoja 1,460 MeV gama fotoną ir neutrą. Ir tik 0.001 % atvejų jis skyla į  $^{40}\text{Ar}$  emituodamas teigiamą beta dalelę (pozitroną) ir neutrą. [20]. 11 paveiksle parodytas išmatuotas linijimis kalio  $^{40}\text{K}$  spektras. Elektroninio pagavimo esmė yra ta, kad motininis branduolys sugeria vieną iš savo orbitinių elektronų ir virsta dukteriniu branduoliu, emituodamas elektroninį neutrą. E pagavimas yra būdingas sunkiesiems branduoliams, nes šiais atvejais elektronų K apvalkalas yra labai arti branduolio.



11 pav. Išmatuotas linijinis kalio  $^{40}\text{K}$  spektras

Toryje Th ir urane U, visų pirma, vyksta alfa ir beta skilimai, todėl jie nėra paprastai aptinkami. Tačiau dauguma jų skilimo grandinėlės dukterinių produktų yra stiprūs gama emiteriai.  $^{232}\text{Th}$  yra detektuojamas panaudojant švino  $^{212}\text{Pb}$  239 keV energijos gama smailę bei 511 keV, 583 keV ir 2614 keV gama kvantus, emituojamus iš talio  $^{208}\text{Tl}$ -ir 911 keV, 969 keV – emituojamus iš aktinio  $^{228}\text{Ac}$ . Uranas  $^{233}\text{U}$  yra panašus, bet neturi aktinio  $^{228}\text{Ac}$  smailės, kuri jį skiria nuo urano  $^{232}\text{U}$ . Uranas  $^{238}\text{U}$  pasireiškia per 609 keV, 1120 keV ir 1764 smailės, sukeliamas bismuto  $^{214}\text{Bi}$ . Tai tokia pat smailė, kaip ir iš atmosferinio raudono skilimo grandinėlės. Kalis yra tiesiogiai detektuojamas, panaudojant jo 1461 keV gama smailę.



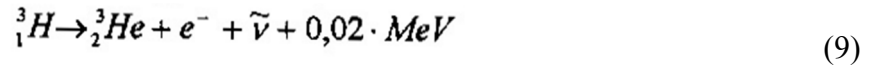
12 pav. Urano  $^{238}\text{U}$  skilimo grandinėlė

$^{214}\text{Pb}$  maksimumas gama spektre (352 keV) yra panašus į  $^{131}\text{I}$  364 keV energijos liniją, lemiantis nepakankamą smailių skirtumą tarp šių radionuklidų. Abu izotopai turi kitų energijų smailės, todėl ir šiomis smailėmis pagrįsta nuklidų analizė yra galima. Pirminė  $^{214}\text{Bi}$  (609 keV)

smaile sutampa su  $^{134}\text{Cs}$  (605 keV) smaile. Kadangi  $^{134}\text{Cs}$  antroji smaile lygi 796 keV energijai smaile, todėl galima patvirtinti identifikaciją, paremtą antrąja smaile.

Kitas būdas yra palaukti 5 valandas prieš pradėdant matavimus, per kurias  $^{214}\text{Pb}$  ir  $^{214}\text{Bi}$ , turinčių atitinkamai 26,8 min ir 19,9 min skilimo pusamžius, kiekis žymiai sumažėja ir dėl to sumažėja smailių interferencija. Žolės bandiniuose galima rasti natūralaus kosmogeninio izotopo berilio-7 ( $^7\text{Be}$ ), kurio skilimo pusamžis yra 53,3 dienos. Šis izotopas pastebimas dėl 478 keV energijos gama kvantų emisijos.

Tričio beta skilimo metu beta dalelių energijos būna iki 0,002 MeV.





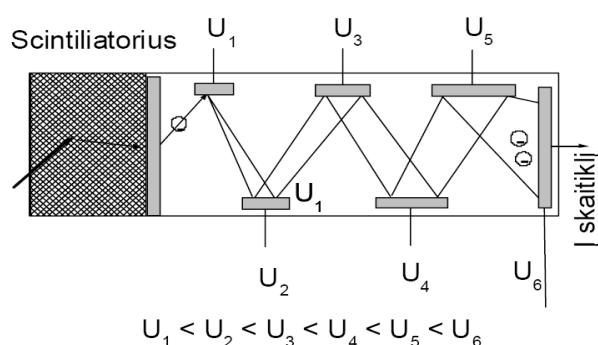
## 2. MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODAI

Gama kvantus spinduliuojantieji nuklidai buvo identifikuoti naudojant scintiliacinį spektrometrą Compugamma ir puslaidininkinį detektorių Canberra, sujungtą su energijos spektro analizatoriais. Beta aktyviųjų nuklidų identifikavimui buvo naudojami skystųjų scintiliacijų spektrometrai Rackbeta ir Carbon. Matavimai atlikti KTU Fizikos katedros Radiometrijos ir dozimetrijos laboratorijoje ir Ignalinos atominės elektrinės Radiacinės saugos skyriuje.

### 2.1. Skystųjų scintiliatorių detektoriai

Skystųjų scintiliatorių detektoriai yra plačiai naudojami moksliniuose tyrimuose biologijoje, medicinoje, farmacijoje. Mūsų naudojamas beta dalelių skystųjų scintiliatorių detektorius yra RackBeta 1217 [21].

Scintiliacinio jonizuojančios spinduliuotės matavimo prietaiso veikimas pagrįstas sužadintų atomų ir molekulių, kurios atsiranda dėl spinduliuotės sąveikos su medžiaga, susidarymu. Sužadinti atomai po tam tikro laiko grįžta į nesužadintą būseną išspinduliuodami elektromagnetinių bangų kvantą. Scintiliaciniuose detektoriuose naudojami labai jautrūs šviesos registravimo prietaisai – fotoelektroniniai daugintuvai (FED). Scintiliacinio detektoriaus schema yra parodyta 13 paveiksle.



13 pav. Scintiliacinio detektoriaus supaprastinta schema

Jonizuojanti spinduliuotė patenka į scintiliatorių ir sužadina jame molekules, kurios spinduliuoja šviesos kvantus. Šie kvantai, pasiekę fotokatodą, išmuša elektronus. Iš fotokatodo išmušti elektronai yra greitunami daugiapakope schema. Išmuštas elektronas įgreitėja ir susiduria su pirmuoju elektrodu, iš pastarojo kiekvienas elektronas išmuša antrinių elektronų, kurie greitėdami lekia link kito elektrodo, kurio įtampa yra didesnė. Kiekvienas šių elektronų įsibėgėjęs išmuša elektronus iš elektrodo, taip procesas kartojasi keliolika kartų ir elektronų skaičius padidėja  $10^6 - 10^9$  kartų. Taip grandinėje atsiranda srovės impulsas,

Vienas svarbiųjų scintiliatorių parametrų yra konversijos koeficientas  $\eta$ , rodantis kokia sugertos jonizuojančios spinduliuotės energijos  $E_a$  dalis paverčiama šviesos energija  $E_F$ .

Labai svarbi scintiliatoriaus charakteristika yra spinduliuavimo trukmė  $\tau$ . Kai dalelė

stabdoma, scintiliatoriuje kaupiasi sužadinti atomai. Kai elektringoji dalelė scintiliatoriuje visiškai sustoja, sužadintų atomų skaičius yra maksimalus. Todėl tuo metu ir stebimas didžiausias blyksnio intensyvumas. Kuo trumpesnė scintiliatorius išspinduliavimo trukmė, tuo geresnė laikinė skyra, tuo trumpesnis šviesos blyksnis. Parenkant atitinkamą scintiliatorių pagaminami scintiliaciniai skaitikliai, kurie jautrūs tam tikrai spinduliuotės rūšiai. Kuo didesnis  $\eta$ , tuo geresnis scintiliatorius ir tuo lengviau užregistruoti elektringą dalelę ar  $\gamma$  kvantą, patekusius į detektorių. NaI scintiliatorius konversijos koeficientas siekia net 6%. NaI scintiliatoriuje sugertas 1 keV energijos elektronas sukuria maždaug 20 fotonų.

Geriausia laikinė skyra yra skystų scintiliacinių skaitiklių – maždaug 3 ns. Stilbeno laikinė skyra ~ 6 ns, o NaI tik apie 20 ns.

Scintiliacinio skaitiklio registravimo efektyvumas labai didelis. Pavyzdžiui, scintiliaciniam skaitikliui su NaI kristalu, kurio aukštis ir skersmuo 40 mm, registravimo efektyvumas lygiagrečiam 5 MeV gama kvantų srautui yra apie 33%, 0,5 MeV ~ 70%, o 10 MeV neutronams stilbene ~ 45%.

Parenkant scintiliatorių galima pagaminti scintiliacinį skaitiklį, jautrų vienai spinduliuotės rūšiai ir nelabai jautrų kitai. Skystieji scintiliatoriai naudojami mažos energijos spinduliuotei registruoti, pavyzdžiui, radionuklidų  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{35}\text{S}$ , kurie plačiai naudojami biologijoje, biochemijoje, medicinoje. Scintiliacinių skaitiklių fonas neviršija keleto impulsų per minutę.

Scintiliacinis skaitiklis yra sudėtingesnis ir brangesnis jonizuojančiosios spinduliuotės registravimo prietaisas už dujinius jonizacinius detektorius, tačiau turi daug privalumų. Scintiliaciniu skaitikliu lengvai atskiriamos jonizuojančiosios spinduliuotės rūšys, jo registravimo efektyvumas žymiai geresnis (tai ypač svarbu gama kvantams ir neutronams), jie pasižymi maža laiko pastoviaja (gera laikinė skyra).

### **2.1.1. Skystųjų scintiliatorių veikimo principai**

Skystųjų scintiliatorių veikimo pagrindas yra radionuklido emituotos energijos pavertimas šviesos kvantu. Tam reikalingas tirpiklis ir liuminoformas. Tirpiklis sukaupia tūrinę energiją. Iš sužadinto lygmens sugrįžę į pradinę būseną molekulės išspinduliuoja šviesos kvantą.

Beta dalelė yra išspinduliuojama radioaktyviojo skilimo metu. Kad būtų efektyvus energijos perdavimas tarp dalelės ir tirpalo, tirpalas yra kaip tirpiklis šiai medžiagai.

Santykinais tankiame skystyje beta dalelė sklinda trumpais atstumais, tol kol išekvoja kinetinę energiją. Tai trunka nanosekundes. Kinetinė energija reikalinga: jonizacijai, šilumos perdavimui, sužadinimui. Dažnai yra sužadinamos tirpalo molekulės.

Po kurio laiko tirpiklio molekulė sugrįžta į pradinę būseną ir yra išspinduliuojami UV šviesos kvantai. Toks reiškinys vadinamas scintiliacija. Tačiau šios molekulės gali perduoti energiją ir kitoms tirpiklio molekulėms. UV spinduliuotė atsiranda dėl elektronų šuolių tarp

lygmenų. Išspinduliuojami 10 fotonų esant 1 keV energijai. Šviesos intensyvumas priklauso nuo beta dalelių energijos.

Mėlynos šviesos bangos ilgio kvantai krinta į fotokatodą fotodaugintojo vamzdelyje. Elektronai yra išspinduliuojami, pagreitinami ir sukuria impulsus, kurie yra proporcingi mėlynos šviesos fotonų kiekiui. Gaunamas analoginis impulsas su maksimumo ir minimumo (nulinio) verte.

Analoginis signalas paverčiamas skaitmeniniu, kuris nurodo beta dalelės energiją, siunčiamas į analizatorių ir ten signalas apdorojamas.

Beta dalelių skaičius, turintis tam tikrą energiją yra išvedamas išėjime: atspausdinamas, parodomas kompiuterio ar aparato ekrane [22]

Skystųjų scintiliatorių veikimui labai svarbus yra tirpiklis. Jis gali būti nuo 60 iki 99%. Tačiau tirpiklio medžiaga turi leisti, kad dalelės suteikta energija pasiektų liuminoforą ir neišnyktų. Dažnai naudojamas tirpiklis yra toluenas. Taip pat, geriausiai tinka aromatiniai organiniai junginiai. Tirpiklis neturi sugerti energijos.

### **2.1.2. Pirminiai ir antriniai scintiliatoriai**

Scintiliatoriai dažniausiai yra skirstomi į dvi grupes: pirminiai ir antriniai. Pirminis scintiliatorius užtikrina pagautos energijos sąveikos metu perdavimą ir pavertimą matomos šviesos kvantu. Scintiliatorius visame mišinyje sudaro nuo 0,3 iki 1% bendro tūrio. Pirminio tipo scintiliatorius gali užtikrinti tiesioginį energijos pernešimą tarp scintiliatoriaus ir sužadintų tirpiklio molekulių, kurias skiria tik 10 tirpiklio molekulių. Taip pat, jis turi sugebėti būti sužadintas ir emituoti šviesos kvantą dėl sužadintų tirpiklio molekulių.

Antriniai scintiliatoriai yra bangos ilgio keitikliai. Jie įpilami į bendrą mišinį, kad kompensuotų fotodaugintojų netikslumus dėl jų fiksuojamo artimo spektro. Dauguma pirminių scintiliatorių emituoja 408nm ilgio bangas. Antrinis scintiliatorius pagauna sužadinto pirminio scintiliatoriaus energiją ir emituoja ją, bet jau kaip ilgesnio ilgio bangą. Taip pat, pirminio scintiliatoriaus emisijos ir antrinio absorbcijos spektrai persidengia. Nors pastaruoju metu fotoelektroniniai daugintuvai yra labai patobulėję ir gali užfiksuoti impulsus efektyviau, tačiau antriniai scintiliatoriai vis dar padeda padidinti energijos užfiksavimo efektyvumą ir yra įtraukiami į mišinius [21].

## **2.2. Darbo įranga, eiga ir metodika**

Mūsų darbe naudojamas beta dalelių emisijos RackBeta 1217 LKB Wallac skysčių scintiliacijos skaičiuoklis. Jis fiksuoja beta dalelių emisiją nuo 1 keV iki 2800 keV energijų intervale. RackBeta įranga leidžia automatiškai pasirinkti matavimų langus kiekvienam atskiram bandiniui, pritaikyti tą pačią matavimų programą visiems norimiems bandiniams, nutraukti matavimus bet kurioje jų ciklo vietoje. Pasirenkamasis 1217-101 DPM paketas leidžia visiškai automatizuoti signalo sugėrimo nustatymą ir DPM išskaičiavimą remiantis pasiskirstymo

funkcija arba tiesine interpoliacija. Signalo sugerties kreives galima reikalui esant koreguoti. Maksimalus bandinių, kuriuos galima tirti scintiliaciniu beta detektoriumi 1217 vienu metu, skaičius yra 300 (30 padėklų), o 1218 galima iširti 660 bandinių (44 padėklus). RacBeta yra valdomas komandomis, kurias galima įvesti klaviatūros pagalba.



14 pav. Spektrometro RackBeta 1217 vaizdas

Padarius parametų nustatymus languose galima pradėti matavimus. Naudojamės kompiuterio klaviatūra ir spaudžiame „P“, kai lange pasirodo užrašas „Ready“ suvedame parametų grupę „8“. Jei norime, kad matavimai būtų atlikti automatiškai po du kartus, tuomet vedame „A8“. Spaudžiame „Enter“ ir programa lange parodo esamus matavimų parametrus. Jeigu reikia, juos galima pakeisti.

### 2.2.1. Radioaktyvumo matavimas „Tri Carb“ skystųjų scintiliatorių spektrometru

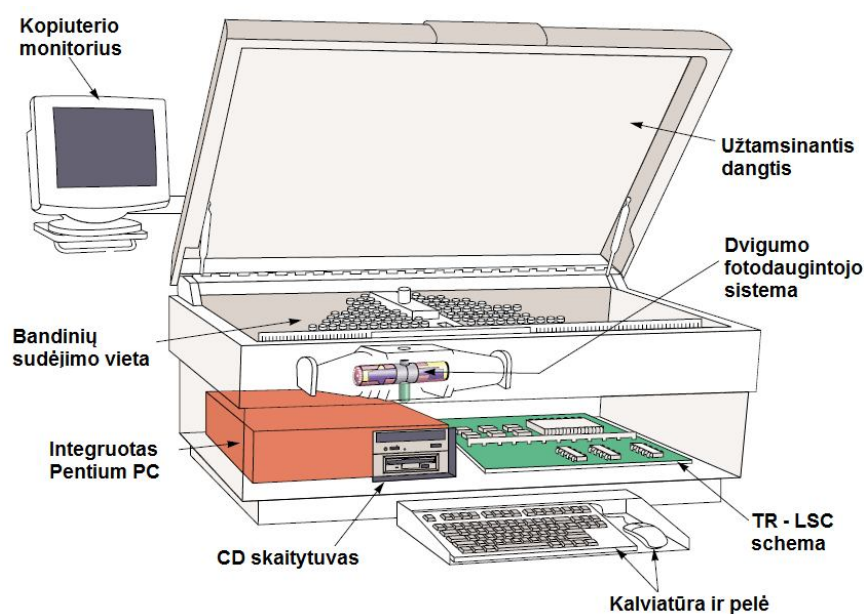
Ignalinos AE skystųjų bandinių beta aktyvumui išmatuoti yra naudojamas skystųjų scintiliatorių beta detektorius ir skaičiuoklis „Tri Carb“. Naudojamo prietaiso gamintojas PerkinElmer.



15 pav. skystųjų scintiliatorių beta detektorius „Tri Carb“ [23]

„Tri carb“ skystųjų scintiliatorių beta detektoriai pasižymi plačiu matavimų spektru ir gali būti naudojami tiek įprastiems matavimams, tiek sudėtingiems eksperimentams. Šie prietaisai pritaikyti Windows operacinei sistemai bei turi integruotas programas fono skaičiavimui „TR LSC“, kalibracijos ir normalizacijos funkcijas, pilną programinę įrangą skirtą kontaktuoti su kompiuteriu, visiškai automatinį bandinių paėmimą bei matavimų pakartojimą.

16 paveiksle yra pateikta skystųjų scintiliatorių beta dalelių detektoriaus „Tri Carb“ principinė schema. Iš jos matome, kad prietaise yra integruotas kompiuteris, kuris kaupia duomenis. Išorėje yra tik monitorius. Dėl tokios sistemos konstrukcijos nereikia jungti atskiro kompiuterio. Matavimai tampa visiškai automatiniais ir valdomais kompiuterio. Žmogui reikia atlikti mažiau veiksmų norint atlikti vieną matavimo ciklą. Taip pat yra sumontuota nauja fotoelektroninių daugintuvų (FED) sistema, kuri leidžia pagerinti matavimų tikslumą. Užtamsinantis dangtis garantuoja, kad bus mažesnis poveikis iš aplinkos ir rezultatus įvertinti bus lengviau bei gausime mažesnes paklaidas [23].



16 pav. „Tri Carb“ struktūrinė schema

Skystųjų beta scintiliatorių detektorius „Tri Carb“ taip pat gali matuoti mėginių aktyvumą iš didelio ir mažo dydžio mėgintuvėlių. Didžiausias mažų mėgintuvėlių skaičius, kuriuos galima ištirti vieno matavimų ciklo metu yra 720.

### 2.2.2. Radioaktyvumo matavimas gama skaitikliu Compugamma

Gama skaitiklis Compugamma skirtas matuoti gamą spinduliuotę, kurią skleidžia radionuklidai. Mėginiai talpinami į sandarius buteliukus ar mėgintuvėlius. Vienu metu jie juda ekranuotame detektoriuje, kuris nustatytas matuoti radionuklidus su tam tikromis energijomis, atsižvelgiant į mėginių pusamžį ir koncentraciją [24].



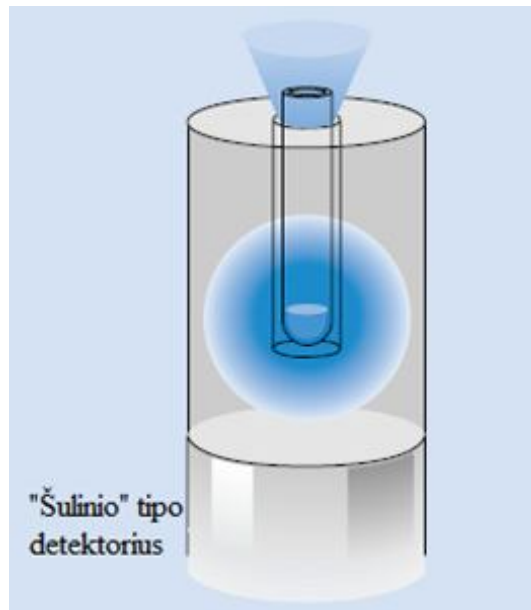
**17 pav.** Compugamma skaitiklis

Talpa: 360 bandinių telpantys 36 laikikliuose (18 pav.), konvejeris varomas elektriniu varikliu, bandinių keitiklis keičia bandinius vienoje plokštumoje, bandiniai keičiami kas 10 s. Automatinis mikro-kompiuteris, valdantis universalų gama skaitiklį, kuris skaičiuoja nuklidų emituotus gama fotonus, kurių energija nuo 10 iki 2000 keV.



**18 pav.** Compugamma skaitiklio bandinių vaizdas

Siekiant užtikrinti didžiausią efektyvumą, bandinys turi būti patalpintas scintiliacinio kristalo viduje (19 pav.). Tam naudojama „šulinio“ tipo konstrukcija [25]:



19 pav. Struktūrinė „šulinio“ tipo detektoriaus schema

„Šulinio“ tipo detektoriuose gama fotonai yra efektyviau sugeriami, negu įprastinio tipo detektoriuje.

Compugamma 1282 yra automatinis mikrokompiuteris, sujungtas su dviejų kanalų universaliu gama skaičiuokliu, kuris gali išmatuoti nuo 10 keV iki 2000 keV energijos gama fotonus. Modelis turi du standartinius režimus, režimas 0 nubrėžia CPM verčių spektro grafiką, režimas 1 leidžia viengubų ir dvigubų pavyzdžių matavimą dviejuose CPM verčių kanaluose. Galimi ir kiti papildomi režimai [26].

### 2.2.3. Gama spektrometras „CANBERRA

Gama spektrometre „CANBERRA“ naudojamas labai gryno germanio (HPGe) detektorius bei daugiakanalis skaitmeninis analizatorius su programos valdymu; programinė įranga Genie-2000. Gama energijos matavimo diapazonas apima nuo 40 keV iki 3000 keV; energijos skiriamoji geba  $^{60}\text{Co}$  ( $E = 1332.5 \text{ keV}$ )  $\approx 2,0 \text{ keV}$ ; santykinis detektoriaus efektyvumas 30 ÷ 50%;

20 paveiksle parodyta bandinių paruošimo įranga, o 21 paveiksle – matavimo įranga



20 pav. Bandinių paruošimo įranga

20 paveiksle parodyta bandinių paruošimo įranga, o 21 paveiksle – matavimo įranga



21 pav. „CANBERRA“ matavimo įranga



### 3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

Ignalinos atominės elektrinės aplinkoje atliekami planiniai rutininiai radiometriniai ir spektrometriniai radioaktyviojo užterštumo matavimai (radiologinis monitoringas) ir specialūs matavimai su tikslu ištirti konkrečius sklaidos ar pernašos reikšinius, patikrinti spėjimus ir hipotezes. Atlikti radiologinį monitoringą įpareigoja įpareigoja vyriausybės nutarimai.

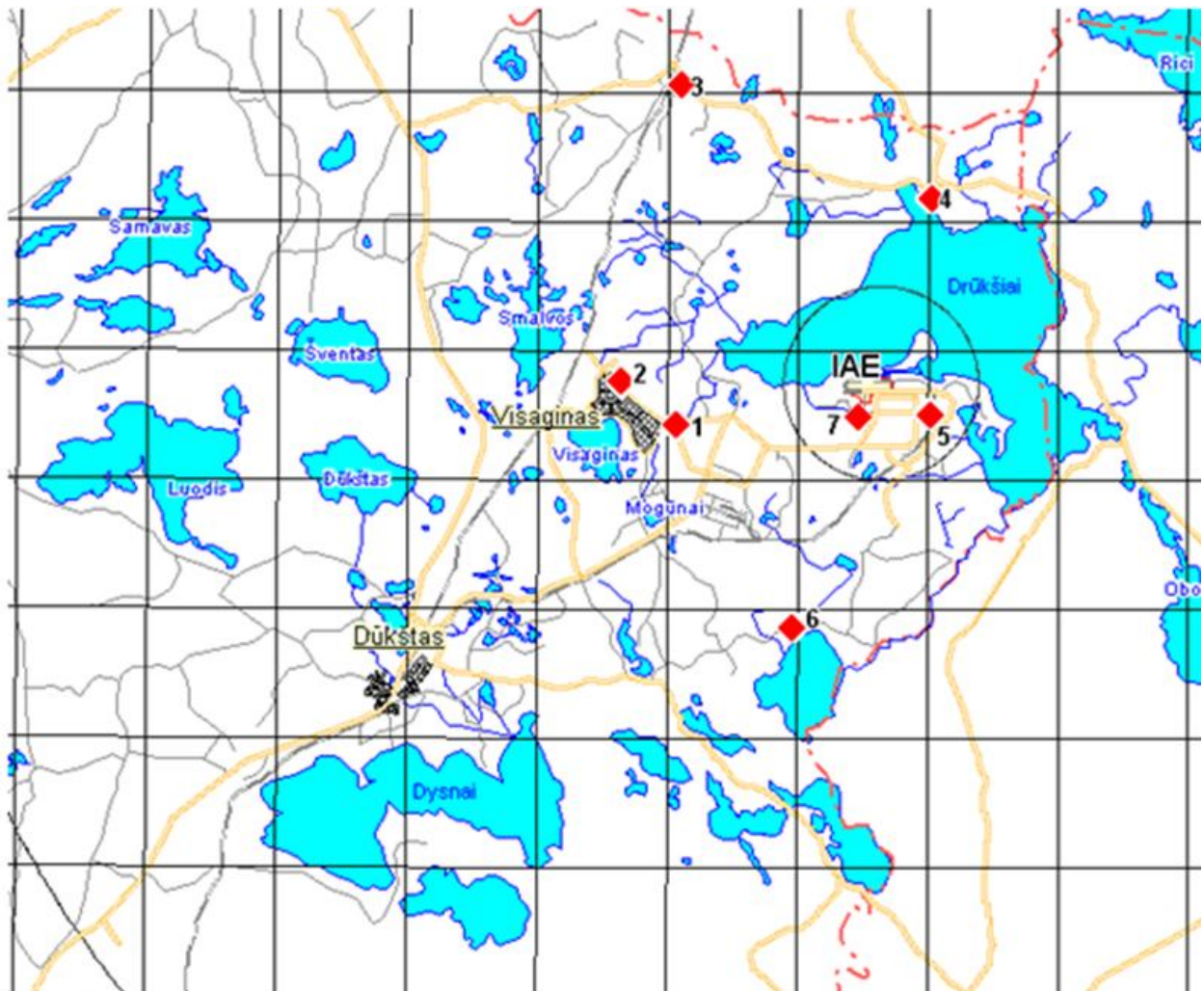
Lietuvos Respublikos aplinkos ministro bei Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministro 2002 m. spalio 7 d. įsakymu Nr. 528/490 patvirtinta „Valstybinio radiologinio monitoringo organizavimo, vykdymo ir informacijos teikimo valstybės valdymo ir savivaldos institucijoms, Europos Bendrijų Komisijai bei visuomenei tvarka“ (Žin., 2002, Nr. 100-4460) įpareigoja Radiacinės saugos centrą (toliau – RSC) atlikti maisto, geriamojo vandens, kritulių radiologinius tyrimus ir gyventojų iš aplinkos gaunamos apšvitos dozės matavimus. Visi šie tyrimai skirti šalies gyventojų apsaugai nuo žalingo jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio. Tokie tyrimai ypač aktualūs parodant visuomenei, kad Ignalinos atominės elektrinės (toliau – Ignalinos AE) uždarymo metu aplinkos taršos radionuklidais lygiai yra matuojami ir radionuklidų sklaida į aplinką bei galimi taršos šaltiniai identifikuojami, įvertinant, kokią apšvitą nuo jų gaus gyventojai ir tikrinant, ar ši apšvita neviršija reglamentuojamų lygių.

Ignalinos AE stebėjimo zonos ir sanitarinės apsaugos zonos aplinkos objektų teršalų, šalinamų į vandenį, radiologinį monitoringą ir gautų duomenų analizę atlieka Aplinkos stebėsenos laboratorija pagal Aplinkos mėginių paėmimo ir paruošimo matavimams instrukciją, RST-0412-8; Radioaktyvaus stroncio-90 kiekio nustatymo radiocheminiu metodu aplinkos elementų mėginiuose instrukciją, RST-0412-6; Radionuklidų koncentracijos nustatymo skystųjų scinciliatorių spektrometru instrukciją, RST-0912-8; Radioaktyvaus plutonio kiekio nustatymo aplinkos elementų mėginiuose instrukciją, RST-0412-9; normatyvinį dokumentą LAND 36-2013 „Aplinkos objektų taršos radionuklidais matavimas – gama spektriniai mėginių tyrimai spektrometru, turinčiu germanio detektorių“, DVSnd-0052-10.

Teršalų, šalinamų į orą, radiologinį monitoringą IAE atlieka Radiologinių tyrimų laboratorija pagal Radioaktyviųjų išmetimų į atmosferą kontrolės instrukciją, RST-0512-7.

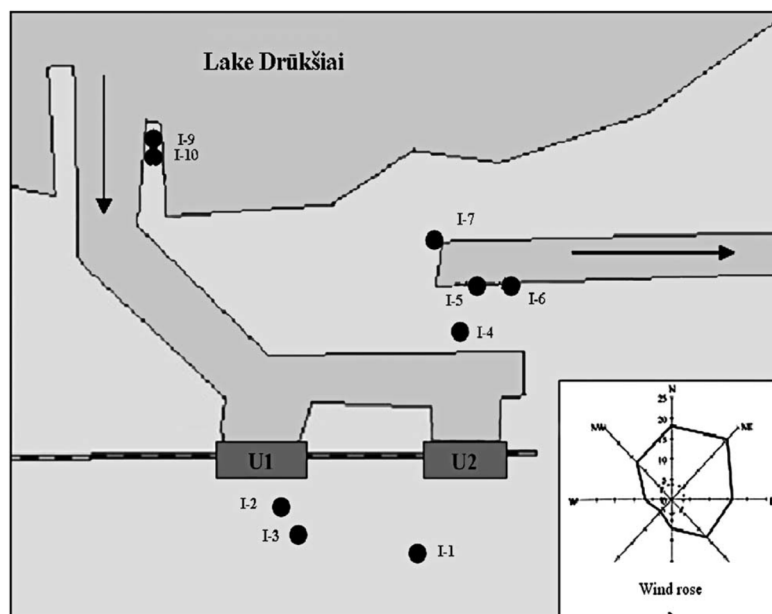
Darbu, atliekamų pagal įvairias programas, tikslas – radioaktyviųjų medžiagų patekimo į aplinkos objektus apribojimas, tokiu būdu apsaugant atskirus asmenis, visuomenę ir aplinką nuo kenksmingo radioaktyviųjų medžiagų poveikio.

Mėginiai imami tuose pačiuose nuolatinio stebėjimo postuose. Jų išdėstymo schema pateikta 22 paveiksle. Jame atstumai tarp gretimų linijų yra 4 km.



22 pav. Nuolatinio stebėjimo postų išdėstymo schema Ignalinos atominės elektrinės aplinkoje

Specialūs matavimai atliekami priklausomai nuo matavimų tikslo ir tam tikslui atitinkančiose vietose: prie reaktoriaus aušinimo vandens išmetimo kanalo (23 pav.), ar artimos zonos taškuose, kur auga nagrinėjami augalai (24 pav.) [27].



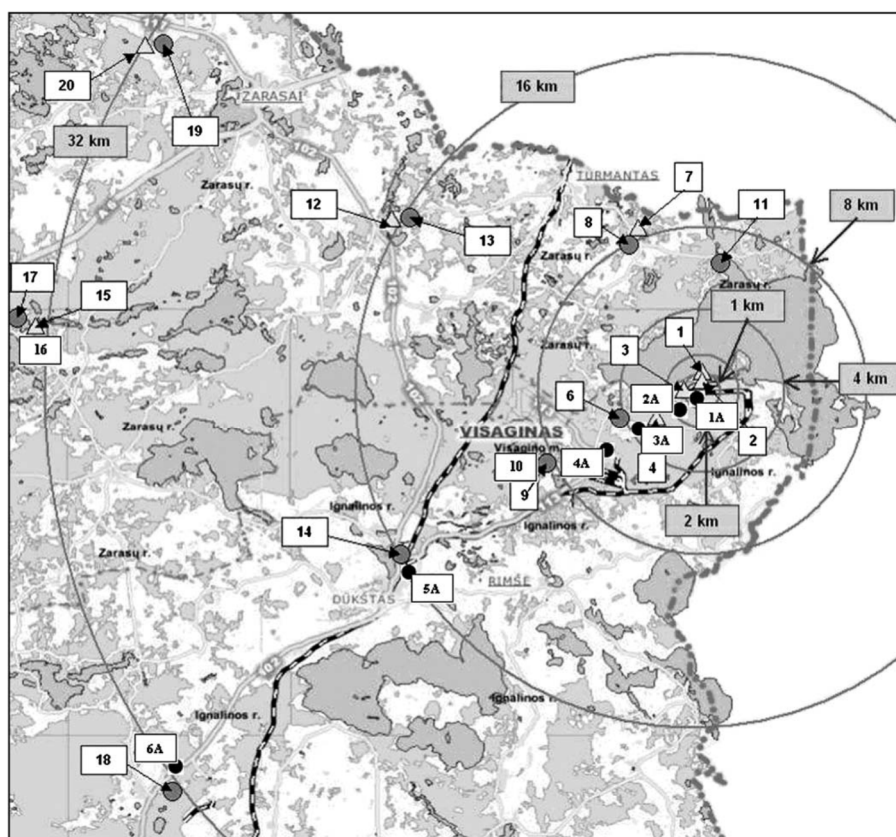
23 pav. Matavimo taškai prie Ignalinos atominės elektrinės reaktoriaus aušinimo vandens išmetimo kanalo

Tokių specializuotų matavimų pavyzdžiu galima laikyti radioaktyviosios anglies  $^{14}\text{C}$  savitojo aktyvumo matavimus vandens augaluose reaktoriaus aušinimo vandens tiekimo sistemos aplinkoje.

Išmatuotas savitasis aktyvumas vandens bandiniuose buvo mažesnis nei išmatuotas sausumos bandiniuose. Tai aktualūs matavimai reaktorių su grafitiniu lėtikliu aplinkai. Būtent toks yra Ignalinos atominės elektrinės RBMK reaktorius.

Buvo tirtas radioaktyvaus cezio  $^{137}\text{Cs}$  savitojo aktyvumo dydis augaluose. Atlikus tyrimus jokie ženklaus skirtumo tarp  $^{137}\text{Cs}$  įsisavinimo vienmečiuose vandens augaluose ir dumbliuose nepastebėta, tačiau  $^{137}\text{Cs}$  savitasis aktyvumas vienmečiuose augaluose buvo triskart didesnis nei toje pačioje teritorijoje esančiuose daugiamečiuose augaluose.

Didesniu, 32 km spinduliu apie elektrinę buvo matuojamas radioaktyviojo cezio  $^{137}\text{Cs}$  pasikirstymas samanose (24 pav.). Rezultatai pagrindžia spėjimus (Adlienė, 2004), kad dirvožemio tarša  $^{137}\text{Cs}$  bešaknėms samanoms didelės įtakos neturi.



24 pav. Matavimo taškų schema Ignalinos atominės elektrinės aplinkoje

### 3.1. Rutininiai radiometriniai ir spektrometriniai matavimai

Rutininių matavimų mėginių paruošimo tvarką ir matavimo tikslą iliustruoja 8 lentelės turinys.

**8 lentelė.** Mėginių paruošimas ir matavimas

Mėginio rūšis	Masė, kg	Mėginių paruošimas ir matavimas	Matavimo ribos
Stirniena, kiauliena, jautiena, žuvis, kopūstai, bulvės	1	Tiesioginis matavimas gama spektrometru pagal LAND 36-2013 „Aplinkos objektų taršos radionuklidais matavimas –gama spektriniai mėginių tyrimai spektrometru, turinčiu germanio detektorių“, DVSnd-0052-10	<sup>137</sup> Cs : 0,001 ÷ 0,7 Bq/kg
Grūdiniai (rugiai arba avižos)	1	Džiovinimas iki pastovaus svorio ir matavimas gama spektrometru pagal LAND 36-2013 „Aplinkos objektų taršos radionuklidais matavimas –gama spektriniai mėginių tyrimai spektrometru, turinčiu germanio detektorių“, DVSnd-0052-10	<sup>137</sup> Cs: 0,001 ÷ 1 Bq/kg
Grybai	0,01-4	Matavimas gama spektrometru pagal LAND 36-2013 „Aplinkos objektų taršos radionuklidais matavimas –gama spektriniai mėginių tyrimai spektrometru, turinčiu germanio detektorių“, DVSnd-0052-10, be paruošimo arba po išdžiovinimo iki pastovaus svorio.	<sup>137</sup> Cs: 0,001 ÷30 Bq/kg

Rutininių matavimų objektą, periodiškumą ir sąlygas iliustruoja 9 lentelės medžiaga. Reguliarūs rutininiai matavimai atliekami tuose pačiuose postuose, nustatyta vienoda tvarka, imant tų pačių medžiagų mėginius. Tai iliustruoja 9 lentelės medžiaga. Grybai renkami kuo arčiau nurodytų vietų.

**9 lentelė.** Rutininių radionuklidinių matavimų tvarka

Bandinys	Kas matuojama	Ėmimo ir matavimo periodiškumas	Matavimo ypatumai
Visagino vietovių grybai.	Gama nuklidinė sudėtis, <sup>90</sup> Sr	Kartą per metus	Grybai surenkami prasidėjus grybavimo sezonui. Mėginiai imami kuo arčiausiai nurodytų vietų
Stirniena	Gama nuklidinė sudėtis	Kartą per metus	Jei galima įsigyti, 30 km nuo IAE zonos ribose. Mėsa perkama prasidėjus medžioklės sezonui, arčiau rudens
Pienas	Gama nuklidinė sudėtis	Kartą per mėnesį	Jei galima įsigyti, pienas turi būti imamas atsižvelgiant į tai, kad ganyklos yra 30 km nuo IAE zonoje, kuo arčiausiai vyraujančios vėjo krypties nuo IAE (šiaurė).
	<sup>90</sup> Sr	Kartą per metus	Matuojamas per metus integruotas ir homogenizuotas mėginys
Bulvės	Gama nuklidinė sudėtis, <sup>90</sup> Sr	Kartą per metus	Turi būti imamos naujo derliaus bulvės, surinktos 30 km nuo IAE zonoje, kuo arčiau IAE ir vyraujančios vėjo krypties nuo IAE (šiaurė)
Kopūstai	Gama nuklidinė sudėtis, <sup>90</sup> Sr	Kartą per metus	Turi būti imamos naujo derliaus bulvės, surinktos 30 km nuo IAE zonoje, kuo arčiau IAE ir vyraujančios vėjo krypties nuo IAE (šiaurė)
Grūdai	Gama nuklidinė sudėtis, <sup>90</sup> Sr	Kartą per metus	Turi būti imami visų regione augančių rūšių naujo derliaus grūdiniai, nuimti 30 km nuo IAE zonoje, kuo arčiau IAE ir vyraujančios vėjo krypties nuo IAE (šiaurė)
Mėsos gaminiai (kiauliena ir jautiena)	Gama nuklidinė sudėtis	Kartą per metus	Jei galima įsigyti, mėsa turi būti imama atsižvelgiant į tai, kad galvijai buvo auginami 30 km nuo IAE zonoje, kuo arčiau IAE ir vyraujančios vėjo krypties nuo IAE (šiaurė)

Vidutiniai metiniai  $^{90}\text{Sr}$  ir  $^{137}\text{Cs}$  savitieji aktyvumai (Bq/kg) išmatuoti 2006 ir 2013 metais neapdorotuose vietinės kilmės maisto produktų mėginiuose Ignalinos atominės elektrinės zonoje pateikti 10 lentelėje [28], [29]. Pienui pateiktas tūrinis aktyvumas bekereliais litrai (Bq/l).

**10 lentelė.** Vidutiniai metiniai  $^{90}\text{Sr}$  ir  $^{137}\text{Cs}$  savitieji aktyvumai neapdorotuose produktuose Ignalinos AE zonoje 2006 ir 2013 m.

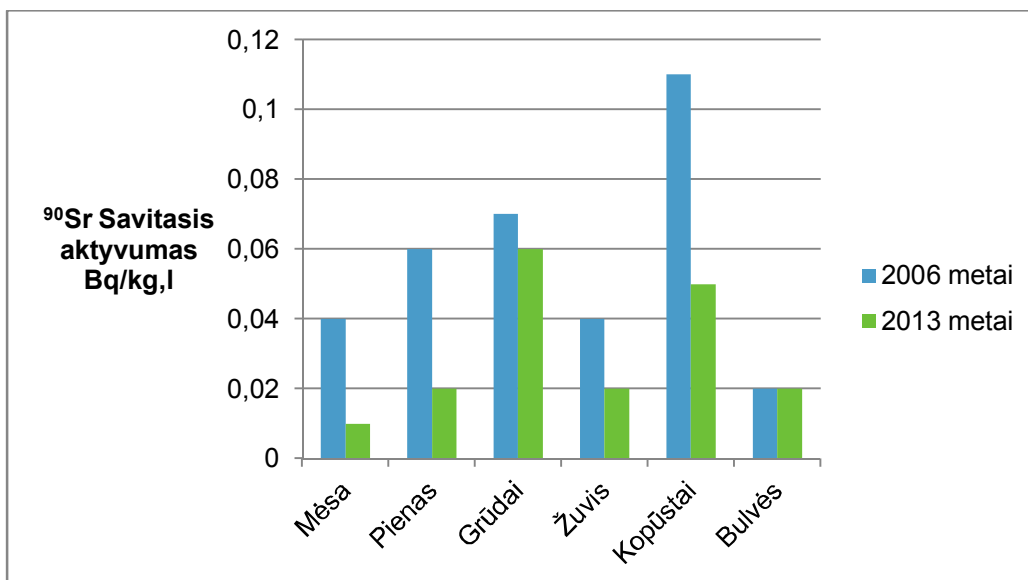
Mėginiai	Radionuklidas	Savitasis aktyvumas 2006, Bq/kg (pienui Bq/l)	Savitasis aktyvumas 2013, Bq/kg (pienui Bq/l)
Pienas	$^{90}\text{Sr}$	$0,04 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,01$
	$^{137}\text{Cs}$	$0,02 \pm 0,02$	$0,01 \pm 0,004$
Mėsa	$^{90}\text{Sr}$	$0,03 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,003$
	$^{137}\text{Cs}$	$0,21 \pm 0,21$	$0,12 \pm 0,009$
Kopūstai	$^{90}\text{Sr}$	$0,09 \pm 0,02$	$0,07 \pm 0,01$
	$^{137}\text{Cs}$	$0,03 \pm 0,02$	$0,02 \pm 0,01$
Bulvės	$^{90}\text{Sr}$	$0,02 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$
	$^{137}\text{Cs}$	$0,03 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,01$
Žuvis	$^{90}\text{Sr}$	$0,02 \pm 0,01$	$0,027 \pm 0,011$
	$^{137}\text{Cs}$	$0,85 \pm 0,83$	$0,06 \pm 0,03$
Grūdai	$^{90}\text{Sr}$	$0,10 \pm 0,03$	$0,09 \pm 0,06$
	$^{137}\text{Cs}$	$0,04 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,01$

Išmatuotų 2006 ir 2013 m. trijų radionuklidų:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  ir  $^{40}\text{K}$  vidutinių metinių savitųjų aktyvumų reikšmės neapdorotuose produktuose pateiktos 11 lentelėje.

**11 lentelė.** Vidutiniai metiniai radionuklidų savitieji aktyvumai neapdorotuose maisto produktuose 2006 ir 2013 m.

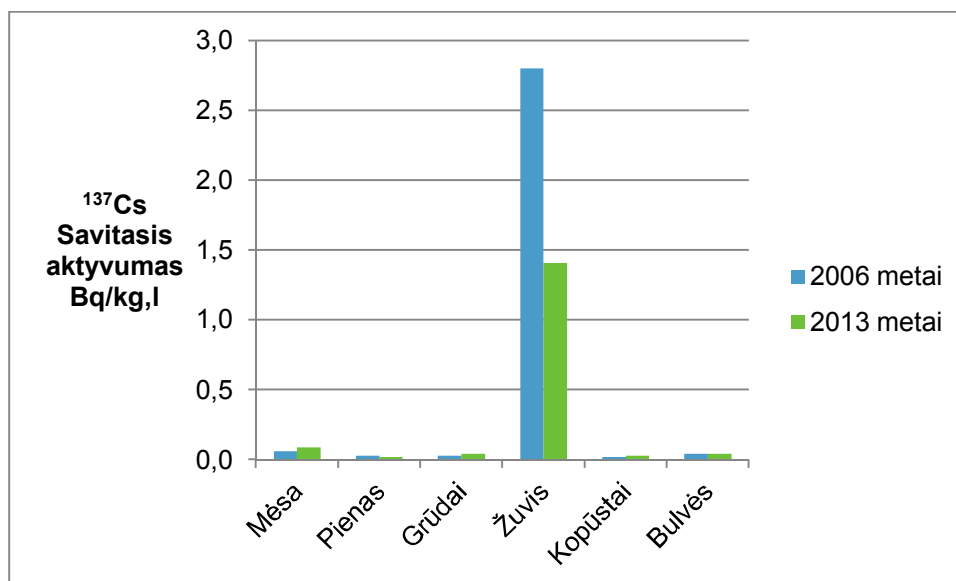
Produktas	2006 metai			2013 metai		
	Savitasis aktyvumas, Bq/kg, l			Savitasis aktyvumas, Bq/kg, l		
	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$
Mėsa	0,04	0,06	112	0,01	0,09	123
Pienas	0,06	0,03	49	0,02	0,02	49
Grūdai	0,07	0,03	134	0,06	0,04	140
Žuvis	0,04	2,8	108	0,02	1,41	110
Kopūstai	0,11	0,02	69	0,05	0,03	76
Bulvės	0,02	0,04	128	0,02	0,04	141

25 paveiksle pavaizduotos  $^{90}\text{Sr}$  savitojo aktyvumo reikšmės, išmatuotos 2006 ir 2013 metais. Iš paveikslo matyti, kad radioaktyviojo stroncio aktyvumas laikui bėgant mažėjo visuose produktuose.



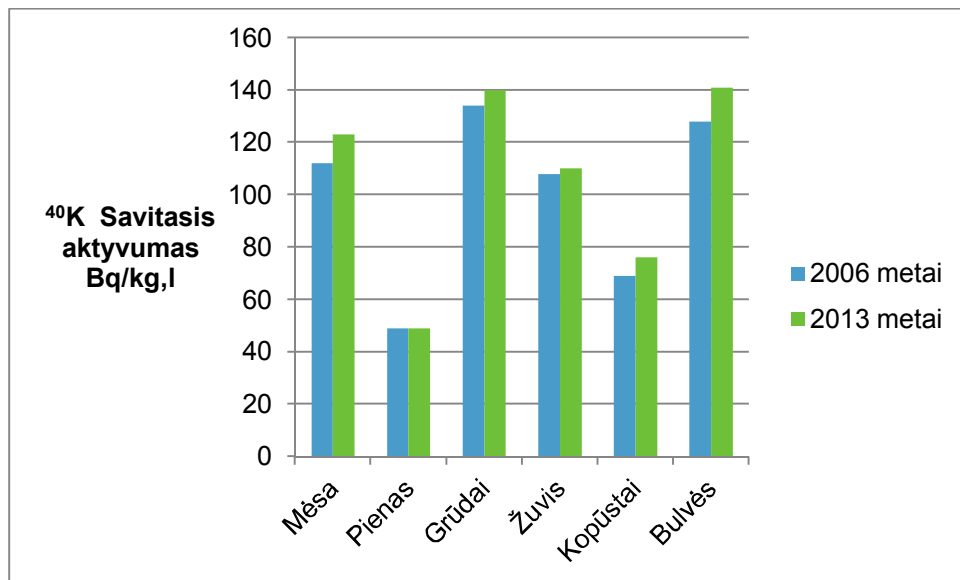
25 pav.  $^{90}\text{Sr}$  savitojo aktyvumo reikšmės

26 paveiksle pavaizduotos  $^{137}\text{Cs}$  savitojo aktyvumo reikšmės, išmatuotos 2006 ir 2013 metais. Iš paveikslo matyti, kad daugiausia radioaktyviojo cezio sukaupta žuvyje.



26 pav.  $^{137}\text{Cs}$  savitojo aktyvumo reikšmės

27 paveiksle pavaizduotos gamtinio radioaktyviojo kalio  $^{40}\text{K}$  savitojo aktyvumo reikšmės, išmatuotos 2006 ir 2013 metais. Iš paveikslo matyti, kad šio kalio izotopo savitieji aktyvumai praktiškai nesikeitė dėl labai didelio skilimo pusamžio.



27 pav. <sup>40</sup>K savitojo aktyvumo reikšmės

2016 m. buvo atlikti bandinių, paimtų Ignalinos atominės elektrinės aplinkoje, savitojo aktyvumo matavimai. Rezultatai pateikti 12 lentelėje. Jie išreikšti Bq/kg. Žuvis (ešerys) buvo pagauta Drūkšių ežere.

12 lentelė. Radionuklidų savitojo aktyvumo reikšmės bandiniuose

Bandinys	Matavimo trukmė, s	<sup>40</sup> K Bq/kg	<sup>137</sup> Cs Bq/kg	<sup>214</sup> Bi Bq/kg	<sup>215</sup> Bi Bq/kg	<sup>226</sup> Ra Bq/kg	<sup>7</sup> Be Bq/kg	<sup>214</sup> Pb Bq/kg
Žuvis	85738,6	1,1347	6,1026	1,0891	1,1134			
Grybai (baravykas)	21380	7,5253	2,7926			7,0		
Grybai (baltasis grybas)	20400	9,2899	2,0578					
Bulvės	73411	2,8748				4,8075		
Miežiai	62503,0	1,828					2,7281	
Pienas	69927,0	5,0054		7,6317				5,4156

Tirtuose produktuose daugiausia nustatyta gamtinių radionuklidų. Cezis <sup>137</sup>Cs yra dirbtinis radionuklidas, vienas iš branduolinio kuro dalijimosi produktų.

Šių radionuklidų savitojo aktyvumo poveikį organizmui vaizdžiau parodo šių radionuklidų radiotoksiškumas.

13 lentelėje surašyti nagrinėjamų radionuklidų efektyviųjų dozinių koeficientų reikšmės pagal ICRP-72 duomenų biblioteką. Jos yra didžiausios sunkiesiems radionuklidams dėl jų alfa skilimo. Alfa dalelių svorinis spinduliuotės daugiklis yra lygus 20, o visų energijų elektronams ir fotonams jis lygus vienetui.

**13 lentelė.** Nagrinėjamų radionuklidų efektyviųjų dozinių koeficientų reikšmės

Radionuklidas	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs	<sup>214</sup> Bi	<sup>226</sup> Ra	<sup>7</sup> Be	<sup>214</sup> Pb
Efektyvusis dozinis koeficientas, įkvėpus, Sv/Bq	2,10·10 <sup>-9</sup>	3,90·10 <sup>-08</sup>	1,40 <sup>E-08</sup>	9,50·10 <sup>-06</sup>	5,50·10 <sup>-11</sup>	1,50·10 <sup>-08</sup>
Efektyvusis dozinis koeficientas, nurijus, Sv/Bq	6,20·10 <sup>-9</sup>	1,30·10 <sup>-08</sup>	1,10·10 <sup>-10</sup>	2,80·10 <sup>-07</sup>	2,80·10 <sup>-11</sup>	1,40·10 <sup>-10</sup>

14 lentelėje pateikti nuklidų radiotoksiškumai nagrinėjamuose produktuose, jų masės vienetai kilogramui, nurijus.

**14 lentelė.** Radionuklidų savitojo radiotoksiškumo reikšmės bandiniuose įkvėpus

Bandinys	<sup>40</sup> K nSv/kg	<sup>137</sup> Cs nSv/kg	<sup>214</sup> Bi nSv/kg	<sup>215</sup> Bi nSv/kg	<sup>226</sup> Ra nSv/kg	<sup>7</sup> Be nSv/kg	<sup>214</sup> Pb nSv/kg
Žuvis	2,38	23,8	1,52	1,55			
Grybai (baravykas)	15,8	10,8			66,5		
Grybai (baltasis grybas)	19,5	8,02					
Bulvės	6,04				45,67		
Miežiai	3,84					15	
Pienas	10,5		10,68				8,11

15 lentelėje pateikti nuklidų radiotoksiškumai nagrinėjamuose produktuose, jų masės vienetai (kilogramui) nurijus.

**15 lentelė.** Radionuklidų savitojo radiotoksiškumo reikšmės bandiniuose nurijus

Bandinys	<sup>40</sup> K nSv/kg	<sup>137</sup> Cs nSv/kg	<sup>214</sup> Bi nSv/kg	<sup>215</sup> Bi nSv/kg	<sup>226</sup> Ra nSv/kg	<sup>7</sup> Be nSv/kg	<sup>214</sup> Pb nSv/kg
Žuvis	7,03	7,93	1,19	1,22			
Grybai (baravykas)	46,6	3,63			19,6		
Grybai (baltasis grybas)	57,59	2,67					
Bulvės	17,82				13,46		
Miežiai	11,33					7,63	
Pienas	31		8,4				7,58

Radioaktyvieji nuklidai maisto produktuose, jų žaliavose, geriamame vandenyje yra šaltiniai, nulemiantys gyventojų vidinę apšvitą. Šių radionuklidų savitasis aktyvumas yra aplinkos radioaktyviojo užterštumo indikatorius. Tai nuolat atnaujinami šaltiniai, nes daugumos produktų formavimasis yra periodinis, dažniausiai vieno ar daugiau metų trukmės.

Skysčiams, tame tarpe ir pienui, nustatomas tūrinis aktyvumas. Jo vienetai yra bekereliai litrai.

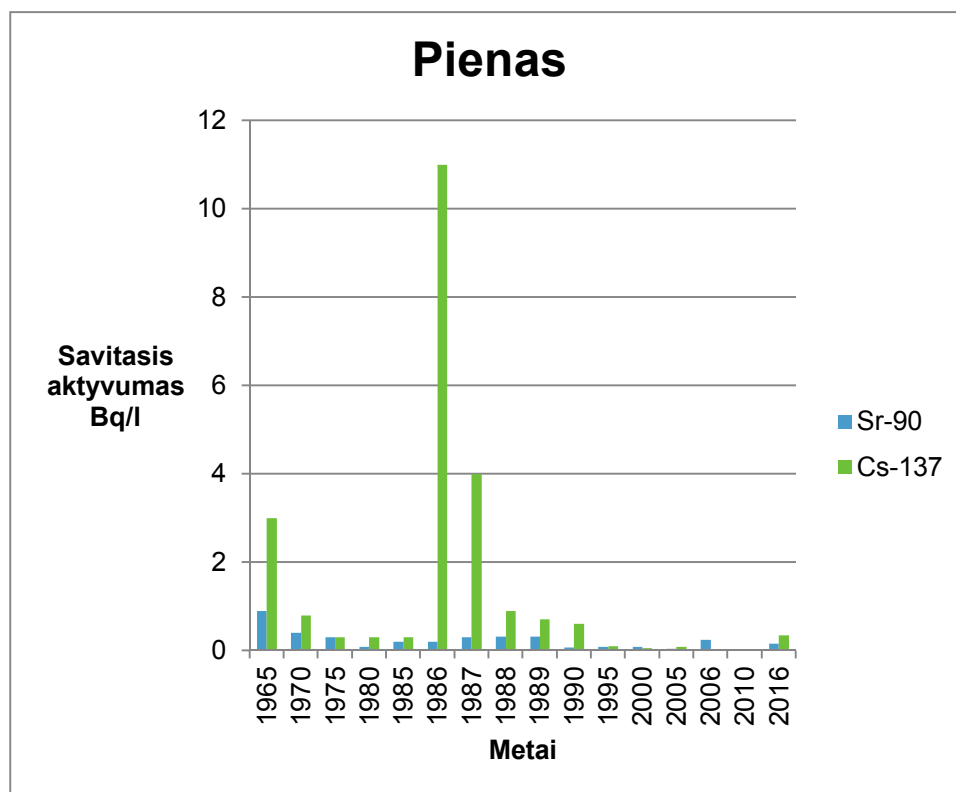
16 lentelėje pateikti <sup>90</sup>Sr ir <sup>137</sup>Cs tūrinio aktyvumo piene matavimų rezultatai pradedant 1965 metais ir baigiant 2015 metais. 28 paveiksle pateiktas šios priklausomybės grafinis vaizdas.



**16 lentelė.** Pieno radionuklidų tūrinio aktyvumo kitimas 1965–2016 m. laikotarpiu

Pienas Tūrinis aktyvumas, Bq/l		
Metai	Sr-90	Cs-137
1965	0,9	3
1970	0,4	0,8
1975	0,3	0,3
1980	0,09	0,3
1985	0,2	0,3
1986	0,2	11
1987	0,3	4
1988	0,32	0,9
1989	0,32	0,7
1990	0,07	0,6
1995	0,08	0,1
2000	0,08	0,06
2005	0,04	0,08
2006	0,03	0,02
2010	0,02	0,02
2016	0,15	0,35

Maisto produktuose buvo nustatomi  $^{137}\text{Cs}$  ir  $^{90}\text{Sr}$  savitieji aktyvumai. Didžiausias minėtų radionuklidų aktyvumas maisto produktuose tirtame laikotarpyje buvo tyrimų pradžioje, 1965 m., dėl aplinkos užterštumo po branduolinių užtaisų sprogdinimo atviroje atmosferoje.



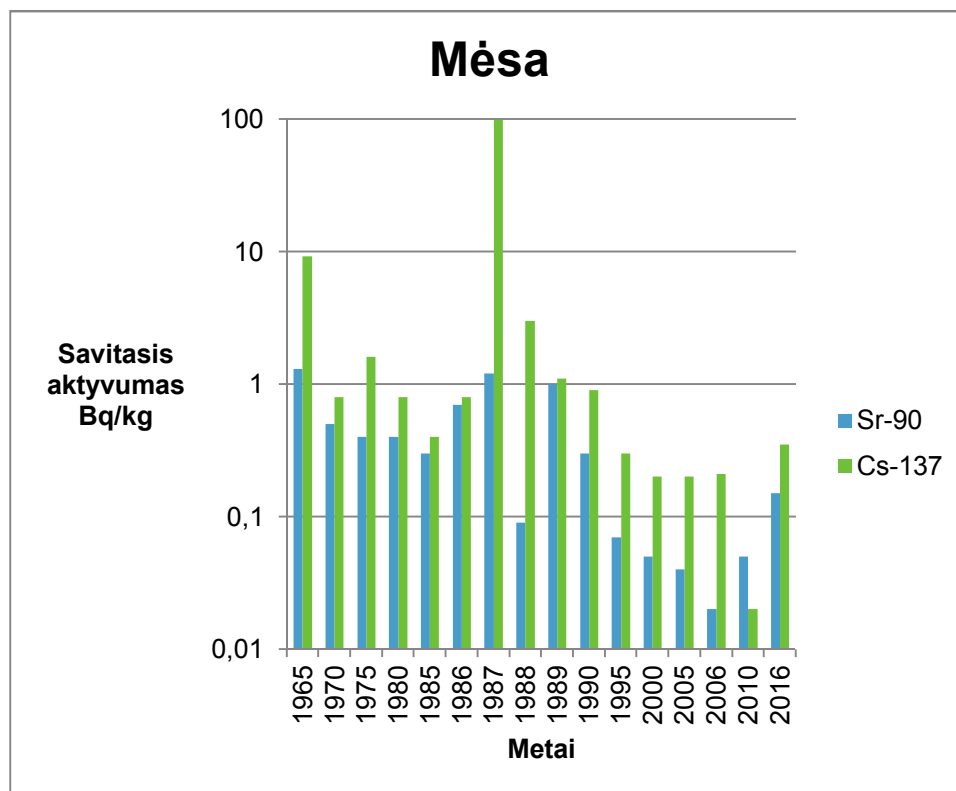
**28 pav.**  $^{90}\text{Sr}$  ir  $^{137}\text{Cs}$  tūrinis aktyvumas piene 1965–2016 m. laikotarpiu

17 lentelėje pateikti  $^{90}\text{Sr}$  ir  $^{137}\text{Cs}$  savitojo aktyvumo mėsoje matavimų rezultatai pradedant 1965 metais ir baigiant 2016 metais. 29 paveiksle pateiktas šios priklausomybės grafinis vaizdas.

**17 lentelė.** Sr-90 ir Cs-137 savitojo aktyvumo kitimas mėsoje 1965–2016 m. laikotarpiu

Mėsa / Savitasis aktyvumas, Bq/kg		
Metai	Sr-90	Cs-137
1965	1,3	9,2
1970	0,5	0,8
1975	0,4	1,6
1980	0,4	0,8
1985	0,3	0,4
1986	0,7	0,8
1987	1,2	98,5
1988	0,09	3
1989	1	1,1
1990	0,3	0,9
1995	0,07	0,3
2000	0,05	0,2
2005	0,04	0,2
2006	0,02	0,21
2010	0,05	0,02
2016	0,15	0,35

Nuo 1965 metų kasmet stebima  $^{137}\text{Cs}$  ir  $^{90}\text{Sr}$  aktyvumo mažėjimo tendencija visuose maisto produktuose, nes radionuklidai skyla ir migruoja į gilesnius, augalų šaknims nepasiekiamus dirvožemio sluoksnius.



**29 pav.**  $^{90}\text{Sr}$  ir  $^{137}\text{Cs}$  savitasis aktyvumas mėsoje 1965–2016 m. laikotarpiu

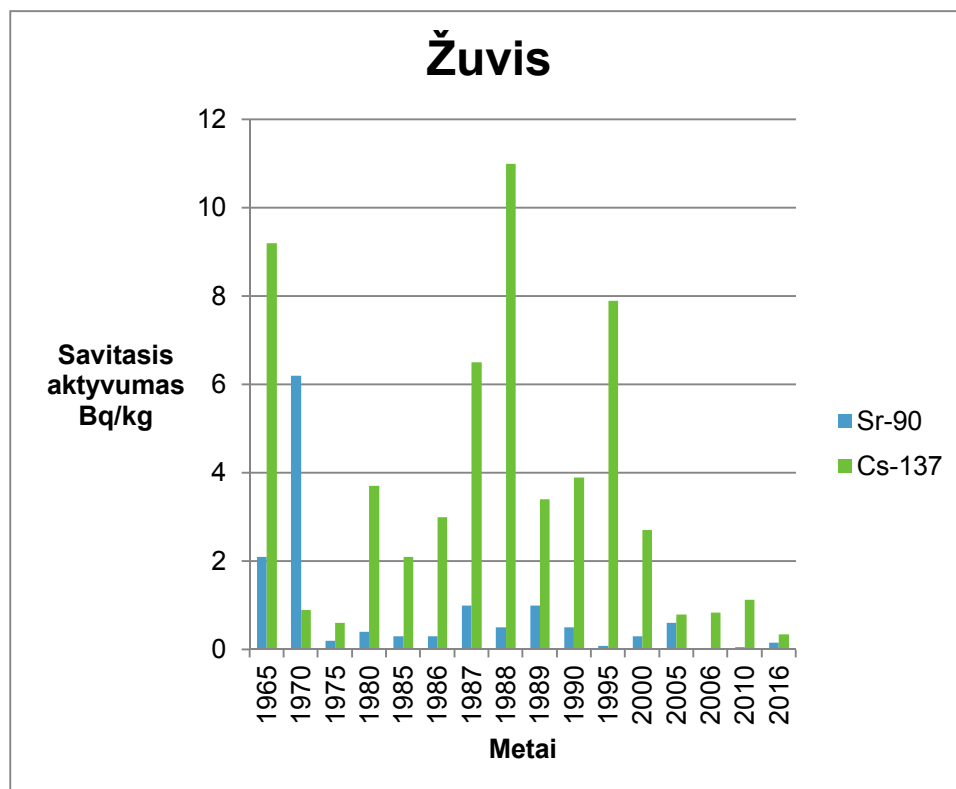
18 lentelėje pateikti  $^{90}\text{Sr}$  ir  $^{137}\text{Cs}$  savitojo aktyvumo žuvyje matavimų rezultatai 1965–2015 metų laikotarpiu, o 30 paveiksle pateiktas šios priklausomybės grafinis vaizdas.

**18 lentelė.** Sr-90 ir Cs-137 savitojo aktyvumo kitimas žuvyje 1965–2016 m. laikotarpiu

Žuvis / Savitasis aktyvumas, Bq/kg		
Metai	Sr-90	Cs-137
1965	2,1	9,2
1970	6,2	0,9
1975	0,2	0,6
1980	0,4	3,7
1985	0,3	2,1
1986	0,3	3
1987	1	6,5
1988	0,5	11
1989	1	3,4
1990	0,5	3,9
1995	0,09	7,9
2000	0,3	2,7
2005	0,6	0,8
2006	0,02	0,84
2010	0,05	1,13
2016	0,15	0,35

Po avarijos Černobylio atominėje elektrinėje 1986 metais, trumpam laikotarpiui atskiruose maisto produktuose aktyvumai padidėjo.

Pradėjus veikti ir veikiant Ignalinos atominėi elektrinei, padidėjusio maisto produktų ir geriamojo vandens užterštumo radionuklidais nenustatyta.



**30 pav.**  $^{90}\text{Sr}$  ir  $^{137}\text{Cs}$  savitasis aktyvumas žuvyje 1965–2016 m. laikotarpiu

Tyrimų rezultatai rodo, kad maisto tarša ilgaamžiais radionuklidais  $^{137}\text{Cs}$  ir  $^{90}\text{Sr}$  tebėra nepakitusi ir tokia pat, kokia stebima pastaruosius dešimt metų.

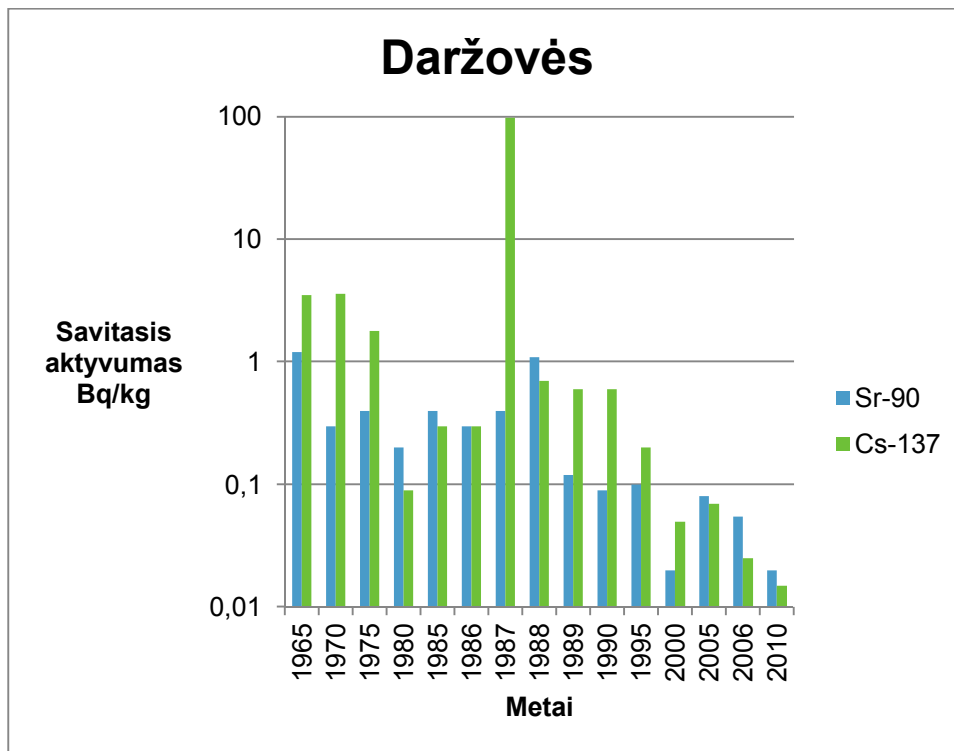
19 lentelėje pateikti  $^{90}\text{Sr}$  ir  $^{137}\text{Cs}$  savitojo aktyvumo daržovėse matavimų rezultatai 1965–2006 metų laikotarpiu, o 30 paveiksle pateiktas šios priklausomybės grafinis vaizdas.

**19 lentelė.** Sr-90 ir Cs-137 savitojo aktyvumo kitimas daržovėse 1965–2010 m. laikotarpiu

Savitasis aktyvumas, Bq/kg		
Metai	Sr-90	Cs-137
1965	1,2	3,5
1970	0,3	3,6
1975	0,4	1,8
1980	0,2	0,09
1985	0,4	0,3
1986	0,3	0,3
1987	0,4	98,6
1988	1,1	0,7
1989	0,12	0,6
1990	0,09	0,6
1995	0,1	0,2
2000	0,02	0,05
2005	0,08	0,07
2006	0,05	0,025
2010	0,02	0,015

Vertinant apšvitos dozes naudotasi stebėsenos metu nustatytais didžiausiais radionuklidų savitųjų ir tūrinių aktyvumų vertėmis;

Gauti rezultatai rodo, kad apšvitos dozės dėl nustatytų radionuklidų yra, palyginti, mažos ir neviršija nekontroliuojamo lygmens – 10  $\mu\text{Sv}$  metinės efektinės dozės.



31 pav.  $^{90}\text{Sr}$  ir  $^{137}\text{Cs}$  savitasis aktyvumas daržovėse 1965–2010 m. laikotarpiu

Rezultatų analizė rodo, kad mėsa, žuvis, daržovės, radioaktyvųjį ceziją  $^{137}\text{Cs}$  kaupia labiau negu radioaktyvųjį stronciją  $^{90}\text{Sr}$ . Radiologinių tyrimų rezultatai rodo, kad didžiausią apšvitą gyventojams lemia mėsoje esantys radionuklidai, kiek mažesnė apšvita gaunama dėl pieno produktuose esančių  $^{90}\text{Sr}$  ir  $^{137}\text{Cs}$ .

Didžiausias branduolinės energetikos objektas, išmetantis radionuklidus į aplinką Lietuvoje, yra Ignalinos AE. Šiuo metu abu Ignalinos AE reaktoriai sustabdyti, tačiau panaudotas branduolinis kuras tebesaugomas baseinuose ir panaudoto branduolinio kuro aikštelėse. Vykdamas eksploataavimo nutraukimo darbus, nedidelis radionuklidų kiekis ir toliau patenka į aplinką.

## IŠVADOS

1. Remiantis modeliavimo rezultatais ir radionuklidų charakteristikomis, aplinkos užterštumui aplinkoje identifikuoti buvo pasirinkti ilgaamžiai radionuklidai  $^{137}\text{Cs}$  (pusėjimo trukmė – 30,08 metai),  $^{90}\text{Sr}$  (pusėjimo trukmė – 28,9 metai). Tokį pasirinkimą lėmė abiejų radionuklidų pusėjimo trukmė  $\sim 30$  m., t.y. laikotarpiui, kuris yra pakankamai ilgas, atliekant monitoringą.
2. Pradėjus veikti ir veikiant Ignalinos atominei elektrinei, padidėjusio maisto produktų ir užterštumo radionuklidais nebuvo nustatyta, tačiau po avarijos Černobylio atominėje elektrinėje 1986 m., buvo stebimas aktyvumo padidėjimas atskiruose maisto produktuose, kuris siejamas su „Černobilio“ dedamąja. Tolimesniais metais radionuklidų aktyvumas mažėjo beveik eksponentiškai.
3. Atlikto tyrimo rezultatai parodė, kad pradėjus Ignalinos AE I-ojo bloko demontavimo darbus, aplinkos užterštumas nežymiai padidėjo. Lyginant 2010 m. ir 2016 m. (kai buvo atliekami tyrimai) žuvyje  $^{137}\text{Cs}$  savitasis aktyvumas kito nuo 2,50 iki 0,35,  $^{90}\text{Sr}$  savitasis aktyvumas kito nuo 0,4 Bq/kg iki 0,15 Bq/kg, mėsoje  $^{137}\text{Cs}$  savitasis aktyvumas kito nuo 0,16 iki 0,35,  $^{90}\text{Sr}$  savitasis aktyvumas kito nuo 0,55 Bq/kg iki 0,15 Bq/kg, piene  $^{137}\text{Cs}$  savitasis aktyvumas kito nuo 0,02 iki 0,35,  $^{90}\text{Sr}$  savitasis aktyvumas kito nuo 0,02 Bq/kg iki 0,15 Bq/kg, grybuose  $^{137}\text{Cs}$  savitasis aktyvumas kito nuo 0,05 iki 0,04,  $^{90}\text{Sr}$  savitasis aktyvumas kito nuo 0,16 Bq/kg iki 0,06 Bq/kg. Nežymus radioaktyvumo padidėjimas kai kuriuose maistinės kilmės produktuose siejamas su galima radionuklidų sklaida ir aplinkos užtarša atliekant reaktoriaus konstrukcinių elementų demontavimą.  $^{40}\text{K}$  yra gamtinis radionuklidas, neturintis skilimo grandinės. Jo kiekis priklauso nuo gamtinės aplinkos, todėl savitasis aktyvumas toje pačioje bandinių ėmimo vietoje metams bėgant praktiškai nekinta.
4. Modeliavimo ir eksperimentiniai rezultatai buvo panaudoti toksiškumo skaičiavimams. Didžiausiu toksiškumu pasižymi žuvis dėl jose esančių  $^{137}\text{Cs}$  nuklidų. Nustatyta, kad savitojo toksiškumo vertė šiam radionuklidui yra 23,8 nSv/kg.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Nuclear Power Plants: 2015 atw Compact Statistics. International Journal for Nuclear Power [interaktyvus]. April 2016.  
[http://www.kernenergie.de/kernenergie-wAssets/docs/fachzeitschrift-atw/2016/atw2016\\_04\\_schnellstatistik.pdf](http://www.kernenergie.de/kernenergie-wAssets/docs/fachzeitschrift-atw/2016/atw2016_04_schnellstatistik.pdf)
2. The IAEA-NEA publication Uranium 2011. OECD 2012. 489 p
3. VANDENHOVE, H., L. SWEECK, G. OLYSLAEGERS, C. MILICHE, J. VIVES, B. LANCE. Predicting the environmental risks of radioactive discharges from Belgian nuclear power plants  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X13001537>
4. VOLKMER, Martin. Basiswissen Kernenergie. 2007. [www.kernenergie.de](http://www.kernenergie.de). 95 p
5. NICHOLS, A.L. Nuclear data requirements for decay heat calculations. International Atomic Energy Agency. Vienna. 2002. 195 p. LNS0520003
6. MAGILL, Joseph. Nuclides.net. An integrated Environment for Computations on Radionuclides and their adiation. Springer, 2012. 271 p. ISBN: 978-3-642-62817-7
7. ADLYS, Gediminas Antanas. Actinides content change in nuclear fuel // Radiation Interaction with Material and Its Use in Technologies 2010 : 3rd international conference, Kaunas : Technologija, p. 426-429
8. ADLYS, G., D. ADLIENĖ. (2002): Qualitative and quantitative characteristics in spent nuclear fuel from RBMK-type reactor. Lithuanian Journal of Physics 42(5), 371-377
9. ADLYS, Gediminas Antanas, Gediminas ADLYS. Modelling of mass cummulation processes of Cs-137 and Sr-90 in nuclear fuel // Medical Physics in the Baltic States : proceedings of the 5th international conference on Medical Physics, Kaunas, Lithuania, 5-6 October, 2007 / Kaunas University of Technology. Kaunas : Technologija. 2007, p. 64-68
10. JASIULIONIS, Rimvydas, Gediminas Antanas ADLYS, Diana ADLIENĖ, Linas VYČINAS. Noble gas radionuclides in RBMK-1500-type reactor // Applied Radiation and Isotopes. Oxford : Pergamon-Elsevier Science Ltd. ISSN 0969-8043. 2007, Vol. 65, no. 7, p. 836-842. [ISI Web of Science]
11. TULLI, J. K. Nuclear Wallet Cards. 2011. National Nuclear Data Center. Brookhaven National Laboratory. USA. 121 p
12. ADLYS, G., D. ADLIENĖ. Branduolinė ir alternatyvi energetika. Mokomoji knyga. Technologija. Kaunas. 2007. 169 p.
13. <http://www.iae.lt/apie-mus/istorija/>
14. Visagino AE technologija – pažangusis verdančiojo vandens reaktorius ABWR. [www.vae.lt](http://www.vae.lt)
15. MAGILL, J., V. BERTHOU, D. HAAS, J. GALY et all. Impact limits of partition and transmutation scenarios on the radiotoxicity of actinides in radioactive waste. Nuclear energy, 2003, 42, No 5, Oct., 263-277
16. ADLYS, Gediminas Antanas. Radiotoxicity of nuclear fuel // Medical Physics in the Baltic States : proceedings of the 6th International Conference on Medical Physics, Kaunas: Technologija. 2008, p. 45-48
17. ADLYS, Gediminas Antanas. Sources of radiotoxicity in spent nuclear fuel // International Symposium on Biomedical Engineering and Medical Physics, 10-12 October, 2012, Riga, Latvia. Heidelberg : Springer, 2012. P 213-216
18. GUILLÉN, J., A. BAEZA. Radioactivity in mushrooms: A health hazard? [interaktyvus]. 2014. Prieiga per: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814613019638>
19. MELI, Maria Assunta, Donatella DESIDERI, Carla ROSELLI, Laura FEDUZI, Claudio BENEDETTI. Radioactivity in honey of the central Italy [interaktyvus]. 2016. Prieiga per: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030881461630156X>
20. [Table of radioactive isotopes, K-40, The Lund/LBNL Nuclear Data Search](#)
21. Principles and Applications of Liquid Scintillation Counting, A PRIMER FOR ORIENTATION– National Diagnostics Laboratory Staff
22. Liquid Scintillation Counting- University Of Wisconsin – Milwaukee Environmental Health, Safety And Risk Management Radiation Safety Program
23. The Tri-Carb, Liquid Scintillation Counters, Life Sciences, Featuring QuantaSmart™ Tri-Carb LSC Software for the Windows NT® Operating System, Percin Elmer
24. [http://www.akribis.co.uk/adverts/Wallac\\_1282\\_GammaCounter\\_w.html](http://www.akribis.co.uk/adverts/Wallac_1282_GammaCounter_w.html)
25. <http://www.groco.is/groco/upload/files/nemi/>

26. Preliminary operating instruction I 1282-E03, (1981)
27. Adliene, Diana; Räaf, Christopher LU; Magnusson, Åsa LU; Behring, Jon LU; Zakaria, Mohamad LU; Adlys, Gediminas; Skog, Göran LU; Stenström, Kristina LU and Mattsson, Sören Assessment of the environmental contamination with long-lived radionuclides around an operating RBMK reactor station LU (2006) In Journal of Environmental Radioactivity 90(1). p.68-77. <http://lup.lub.lu.se/record/393047>
28. Gyventojų apšvitos stebėsenos ataskaita 2006 metais. RSC. Vilnius. <http://www.rsc.lt/index.php/pageid/331>
29. Gyventojų apšvitos stebėsenos ataskaita 2013 metais. RSC. Vilnius. <http://www.rsc.lt/index.php/pageid/331>