



ANDRIUS TIDIKAS

**BRANDUOLIŲ SINTEZĖS
ĮRENGINIUOSE
VYKSTANČIŲ
NEUTRONŲ PERNEŠIMO
IR RADIACINIŲ
PROCESŲ TYRIMAS**

DAKTARO DISERTACIJOS
SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS
MOKSLAI, ENERGETIKA IR
TERMOINŽINERIJA (T 006)

Kaunas
2019

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
LIETUVOS ENERGETIKOS INSTITUTAS

ANDRIUS TIDIKAS

**BRANDUOLIŲ SINTEZĖS ĮRENGINIUOSE VYKSTANČIŲ
NEUTRONŲ PERNEŠIMO IR RADIACINIŲ PROCESŲ
TYRIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, Energetika ir termoinžinerija (T 006)

KAUNAS, 2019

Disertacija rengta 2014–2018 metais Lietuvos energetikos institute, Branduolinių įrenginių saugos laboratorijoje. Moksliniams tyrimams buvo skirta parama pagal projektą „EUROfusion“ (dotacijos sutartis Nr. 633053). Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

Mokslinis vadovas

Dr. Gediminas STANKŪNAS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006).

Redagavo: Irma Urbonavičienė (Lietuvos energetikos institutas)

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Prof. habil. dr. Eugenijus UŠPURAS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006) – pirmininkas;

Prof. habil. dr. Juozas AUGUTIS (Vytauto Didžiojo universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006);

Dr. Artūras PLUKIS (Fizinių ir technologijos mokslų centras, gamtos mokslai, fizika, N 002);

Dr. Ion E. STAMATELATOS (Nacionalinis mokslinių tyrimų centras „Demokritos“ (Graikija), gamtos mokslai, fizika, N 002);

Dr. Egidijus URBONAVIČIUS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006).

Disertacija bus ginama viešame energetikos ir termoinžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2019 m. rugsėjo 3 d. 13 val. Lietuvos energetikos instituto posėdžių salėje.

Adresas: Breslaujos g. 3-202, 44403 Kaunas, Lietuva. Tel. (+370) 37 300 042; faks. (+370) 37 324 144; el. paštas: doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2019 m. liepos 17 d.

Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje <http://ktu.edu>, Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas) ir Lietuvos energetikos institute (Breslaujos g. 3, 44403 Kaunas).

TURINYS

ĮVADAS	4
1. LITERATŪROS APŽVALGA	8
2. METODIKA.....	8
2.1 Neutronų pernašos skaičiavimai	9
2.2 Aktyvacijos skaičiavimai.....	13
2.2.1 Branduolinių duomenų bibliotekos.....	15
2.2.2 Energijos grupių struktūros.....	16
3. REZULTATAI	16
3.1 Medžiagų aktyvacija reaktoriaus JET ilgalaikės apšvitos stotyje..	16
3.2 IFMIF-DONES aktyvacijos skaičiavimai.....	20
3.3 DEMO reaktoriaus vandeniu aušinamo ličio švino klotinio modulių aktyvacijos skaičiavimai.....	22
3.3.1 DEMO2014 ir DEMO2015 modelių vandeniu aušinamol ličio švino klotinių modulių aktyvacijos skaičiavimai	22
3.3.2 DEMO 2017 modelio vandeniu aušinamo ličio švino klotinio modulio aktyvacijos skaičiavimai.....	24
3.3.3 Struktūrinių plienų aktyvacijos skaičiavimai.....	24
3.3.4 LiPb junginio aktyvacijos įvertinimas tekėjimo atveju	26
3.3.5 Branduolinių duomenų bibliotekų palyginimas.....	28
3.3.6 Neutronų spektro jautrumo analizė.....	29
IŠVADOS.....	30
LITERATŪRA.....	31
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	34
RESUME.....	36

IVADAS

Europos Sąjungos (ES) šalių energijos poreikiui 2015 metais patenkinti buvo suvartota 1627 milijonų tonų naftos ekvivalento (European Union 2017). Daugiau kaip 50% šios energijos buvo išgauta panaudojant naftos produktus ir kietąjį kurą, 22% – gamtines dujas, 14% – branduolinę energiją ir tik 13% – atsinaujinančiuosius. Kol kas ES yra stipriai prisirišusi prie energijos vartojimo, kuris yra grįstas taršiais ir keliančiais grėsmę aplinkai ištekliams. Nors ES yra iškelusi tikslus (European Commission 2014) sumažinti bendrą energijos vartojimą ir skatinti bei plėtoti švarios ir darnesnės energijos gamybą, tokie veiksmai gali būti nepakankami, atsižvelgiant į pasaulio energijos rinkos ateitį. Prognozuojama (U.S. Energy Information Administration 2017), kad 2040 m. metinis energijos poreikis pasaulyje padidės 28% lyginant su 2017 m., o didžiausias energijos poreikio augimas bus besivystančiose šalyse.

Tam, kad būtų patenkintas ateities energijos poreikis, yra būtini technologiniai proveržiai ir alternatyvių energijos šaltinių panaudojimo plėtra. Vienas iš daugiausiai žadančių ir santykinai švarios energijos šaltinių yra branduolių sintezė. Branduolių sintezės procesas yra pagrindinis energijos šaltinis Saulėje, tačiau išgauti branduolių sintezės energiją mūsų planetoje kol kas yra sudėtinga. 2012 m. Europos Sąjunga (Romanelli et al. 2012) užsibrėžė tikslą iki 2050 m. didžiąją dalį elektros energijos gaminti iš branduolių sintezės, tai yra vienas iš daugelio uždavinių platesnėje strategijoje siekiant sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas. Siekiant plėtoti ir koordinuoti programoje „Horizon 2020“ vykdomus Europos branduolių sintezės tyrimus, 2014 m. įsteigtas konsorciumas „EUROfusion“ (EURATOM 2014). Jau dabar konsorciumui ES yra skyrusi beveik 850 milijonų eurų tam, kad būtų tęsiama Europos branduolių sintezės tyrimų plėtros EFDA kelrodyje (Romanelli et al. 2012) nurodyta branduolių sintezės tyrimų strategija.

Šiuo metu branduolių sintezės technologijos vis dar yra ankstyvoje vystymo stadijoje, reikia išspręsti daug inžinerinių ir fizikinių problemų. Kad būtų įgyvendinta darni ir saugi energijos gamyba, turi būti sukurtos technologinė ir įstatymų bazės. Branduolių sintezės įrenginiai, besiremiantys magnetiniu plazmos išlaikymu, šiuo metu yra daugiausiai žadantys ir laikomi labiausiai tinkančiais šiai užduočiai įgyvendinti. Apsispręsta, kad deuteris ir tritis turėtų būti ateities branduolių sintezės reaktorių pagrindinis kuras (Federici et al. 2016).

Priešingai nei iškastinį kurą naudojančios elektrinės, branduolių sintezės jėgainės neišskirtų anglies dvideginio ir kitų šiltnamio efektą sukeliančių dujų, taip pat nesusidarytų transuraninių ar kitų ilgaamžių radioaktyviųjų atliekų, kas

vyksta branduolių skilimo principu veikiančių branduolinių jėgainių eksploatacijos metu. Visgi branduolių sintezės reaktorių veikimo metu specifinės radioaktyviosios atliekos susidarytų. Pirmiausiai, tai sietina su kuro mišinyje naudojamu tričiu, kurio nors ir nėra daug (Paul et al. 2017), tačiau dalis jo reaktoriui veikiant gali įsiskverbti į reaktoriaus struktūrines medžiagas ir taip teršti jas radionuklidais. Nėgana to, branduolių sintezės reakcijos metu būtų generuojamas didelis neutronų srautas. Nors neutronai yra pagrindinis šilumos pernašos šaltinis, jie dalyvauja inicijuojant aktyvacijos procesus ir paverčia aplinkoje esančias medžiagas radioaktyviomis. Taigi tokios radionuklidais užterštos medžiagos yra potencialiai žalingos aplinkai ir pačiam reaktoriui. Dabartiniuose branduolių sintezės įrenginiuose daug aktyvuotų medžiagų nesusidaro (neutronų srautai maži), tačiau dideliuose branduolių sintezės reaktoriuose (ITER ir *DEMONstration Power Station (DEMO)*) intensyvi medžiagų aktyvacija bus neišvengiamas veiksnys, galintis smarkiai nulemti reaktoriaus veiklą ar net veiklos nutraukimą (Federici et al. 2016).

Medžiagų parinkimas branduolių sintezei taikyti ypatingai svarbus ir reikšmingas dabarties uždavinys ir kol kas galutinių sprendimų nėra priimta. Branduolių sintezės reaktoriuose susidaro unikalios sąlygos, todėl, siekiant pagrįsti naudotinų medžiagų tinkamumą, būtini išsamūs medžiagų aktyvacijos tyrimai. Šiuo metu tik veikiančiame reaktoriuje *Joint European Torus (JET)* galima gauti neutronų emisijas iš deuterio-tričio plazmos šaltinio, kuriuo ir turėtų būti grįstos ateities branduolių sintezės jėgainės. Palyginus su planuojamomis statyti branduolių sintezės jėgainėmis, JET yra santykinai mažas įrenginys, kuriame sukuriama trumpalaikiai apšvitos srautai. Kita vertus, JET veikimo režimai ir išspinduliuotų elementariųjų dalelių energijos vertės yra charakteringos ir aktualios ir kur kas didesniems branduolių sintezės įrenginiams, todėl JET šiuo metu yra pagrindinis įrenginys, kuriame yra atliekami eksperimentiniai medžiagų apšvitos tyrimai. Planuojamos ateityje statyti branduolių sintezės jėgainės bus eksploatuojamos naudojant ženkliai didesnių energijos neutronų srautus ilgais laiko periodais, todėl JET tyrimų duomenys gali būti nepakankami pramoninių ar didelių eksperimentinių įrenginių eksploatacijai ir saugai pagrįsti. Ilgalaikiams medžiagų aktyvacijos uždaviniams spręsti bus pasitelkiamas įrenginys *Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)*, t. y., deuteronų ličio šaltinio pagrindu veikiančias greitintuvas. Tyrimams paspartinti medžiagų aktyvacijos tyrimai įrenginyje bus vykdomi esant didesnėms neutronų energijoms nei branduolių sintezės reaktoriuose. Įrenginyje IFMIF tiriamų medžiagų aktyvacija bus artima ateities branduolių sintezės jėgainėms. Galiausiai, duomenys gauti iš JET ir IFMIF medžiagų tyrimų bus taikomi įgyvendinant demonstracinės branduolių sintezės DEMO jėgainės projektą. Ši disertacinė studija ir buvo skirta aktualiai neutronų pernešimo ir medžiagų aktyvacijos procesų analizei planuojamiems JET

eksperimentams, numatomi IFMIF eksploatacijai ir preliminariai DEMO eksploatacijai.

Darbo tikslas

Ištirti neutronų pernešimo procesus arti branduolių sintezės reaktoriaus spinduliuotės šaltinio esančiose komponentuose ir įvertinti reaktoriaus medžiagų aktyvacijos charakteristikas.

Darbo uždaviniai

1. Ištirti deuterio-deuterio ir deuterio-tričio branduolių sintezės metu atsiradusios neutronų, esančių JET ilgalaikės apšvitos stotyje, spinduliuotės sukeltą medžiagų aktyvaciją ir nustatyti deuterio-deuterio ir deuterio-tričio branduolių sintezės neutronų apšvitos poveikį esant skirtingiems apšvitos scenarijams.

2. Ištirti neutronines reakcijas IFMIF-DONES testavimo kameros patalpų biologinio ekranavimo struktūroms ir DEMO klojinio modulio struktūrinėms medžiagoms ir nustatyti neutronų sukeltus aktyvumus.

3. Nustatyti DEMO vandeniu aušinamo ličio švino klojinio modulio aktyvacijos charakteristikas.

4. Nustatyti DEMO branduolių sintezės jėgainės branduolių sintezės galios ir matmenų pokyčių įtaką vandeniu aušinamo ličio švino klojinio moduliams.

5. Ištirti PbLi junginio tekėjimo ciklą vandeniu aušinamo ličio švino klojinio modulyje atsižvelgiant į aktyvacijos charakteristikas.

6. Ištirti DEMO reaktoriui būdinio neutronų spektro įtaką struktūriniam plienams.

Ginamieji teiginiai

1. Deuterio-tričio branduolių sintezės reakcijos įrenginyje JET lemia didesnę medžiagų aktyvaciją negu deuterio-deuterio branduolių sintezė. Deuterio-deuterio branduolių sintezės sukelta medžiagų aktyvacija yra labiau veikiamą apšvitos scenarijaus pokyčių negu deuterio-tričio branduolių sintezės sukelta aktyvacija.

2. IFMIF-DONES struktūriniame pliene santikynai aukštų energijų neutronų reakcijos (n, p) ir (n, 2n) yra atsakingos už didžiąją dalį medžiagų aktyvacijos, DEMO atveju (n, g) tipo reakcijos yra dažnesnės. Medžiagų, paveiktų neutronais IFMIF-DONES aplinkoje, aktyvacijos vertės išlieka santykinai aukštos ilgesnį laiko tarpą negu paveiktų DEMO aplinkoje.

3. Aktyvacijos vertės DEMO vandeniu aušinamo ličio švino klojinio modulyje nulemia EUROFER 97-3 plieno sudedamosios dalys, su išimtimi volframui, kurio aktyvumas metus po apšvitos nutraukimo yra didesnis. PbLi junginio radionuklidai didžiausią įtaką turi reaktoriaus veikimo metu.

4. Branduolių sintezės galios ir matmenų padidėjimas turi didžiausią įtaką galiniams DEMO vandeniu aušinamo ličio švino klotinio modulio segmentams (galinei plokštei ir pagalbinėms struktūroms).

5. PbLi junginio cirkuliacijos ciklo nevertinimas aktyvacijos skaičiavimų metu nepadidina realių aktyvumo verčių klotinio modulyje.

6. Reikšmingiausios energijų grupės DEMO klotinio modulio pliene EUROFER-97 atitinka 4-to periodo metalų sąveikos skerspjūvių rezonansinius pikus ir 4-to periodo metalų (n, p) ir $(n, 2n)$ neutronų sąveikos skerspjūvių pikus.

Rezultatų praktinė reikšmė

Neutronai, sąveikaudami su struktūrinėmis medžiagomis, gali sukelti *gama* ar antrinių dalelių spinduliuočių emisijas, stabilius branduolius paversti radioaktyviais, taip pat gali paveikti fizines ir mechanines medžiagų savybes. Vienas iš būdų šio proceso įtakai įvertinti yra aktyvacijos skaičiavimai. Šių skaičiavimų rezultatai gali nulemti projektuojamų branduolių sintezės įrenginių taikymo ribas. Negana to, branduolių sintezės įrenginių eksperimentų rezultatų ir aktyvacijos skaičiavimų sąryšio nustatymas yra reikšmingas neutronikos programų ir branduolinių duomenų bibliotekų tinkamumui pripažinti.

Mokslinis naujumas

Darbe buvo praplėsta neutronų aktyvacijos skaičiavimų metodika, skirta kompleksiniams apšvitos scenarijams, ir pasiūlytas naujas metodas neutronų spektro įtakai vertinti.

Rezultatų aprobavimas

Disertacinio darbo tema paskelbta 10 mokslinių publikacijų: 7 leidiniuose su citavimo indeksu, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę, ir 3 tarptautinių konferencijų leidiniuose. Darbo rezultatai buvo pristatyti 10 tarptautinių mokslinių konferencijų.

Disertacijos apimtis

Disertaciją sudaro įvadas, literatūros apžvalga, metodika, tyrimų rezultatai bei jų aptarimas, išvados, 114 literatūros šaltinių sąrašas, mokslinių publikacijų sąrašas. Pagrindinė medžiaga išdėstyta 90 puslapiuose, įskaitant 7 lenteles ir 65 paveikslus. Papildomai 10 lapų priede yra pateiktos 6 lentelės ir 12 paveikslėlių.

Autoriaus ir bendraautorių indėlis

Trys skirtingi aktyvacijos skaičiavimų pavyzdžiai yra pateikti rezultatų skyriuje.

Reaktorius JET išorinės ilgalaikės apšvitos stoties aktyvacijos skaičiavimai (3.1 skyrius). Pasitelkdamas programų paketą FISPACT, disertacijos autorius atliko aktyvacijos skaičiavimus ir gautų rezultatų analizę.

Įrenginio IFMIF-DONES skaičiavimai (3.2 skyrius). Disertacijos autorius, pasitelkdamas programų paketą MCNP atliko neutronų pernešimo skaičiavimus, pasitelkdamas programų paketą FISPACT – aktyvacijos skaičiavimus, taip pat buvo atlikta gautų rezultatų analizė.

DEMO klojinių modulių skaičiavimai (3.3 skyrius). Disertacijos autorius, pasitelkdamas programų paketą MCNP atliko neutronų pernešimo skaičiavimus, pasitelkdamas programų paketą FISPACT – aktyvacijos skaičiavimus, taip pat buvo atlikta gautų rezultatų analizė.

Dr. Tadas Kaliatka prisidėjo atlikdamas jautrumo skaičiavimus su programų paketu SUSA (3.3.6 skyrius).

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Literatūros apžvalgos skiltį sudaro 6 skyriai. Pirmame skyriuje yra aprašomi esminiai branduolių sintezės reiškinio aspektai. Antrame skyriuje yra nagrinėjami branduolių sintezės reakcijos, tinkamos energijai gaminti, ir neutronų spektro susidarymas reakcijų metu. Trečiame skyriuje yra išdėstytos sąlygos, būtinos valdomos branduolių sintezės įrenginiams. Ketvirtas skyrius aprašo magnetinio išlaikymo branduolių sintezės įrenginių koncepciją. Yra nagrinėjami Europos įrenginių JET, ITER, DEMO, W7-X, taip pat medžiagų testavimui skirtas IFMIF-DONES projektas ir technologiniai klojinių modulių aspektai. Penktas skyrius yra skirtas neutronikos tyrimų apžvalgai, skyriuje pristatomi branduolių sintezės neutronų srautinimo eksperimentai ir 14 MeV neutronų greitintuvų taikymas medžiagų tyrimams, apžvelgiami skaitiniai branduolių sintezės neutronikos tyrimai. Šeštame skyriuje yra pateikiami neutronų pernašos ir aktyvacijos charakteristikų aprašymai.

2. METODIKA

Metodikos dalyje yra apžvelgiami įrankiai, metodai ir kiti reikšminiai dalykai, skirti skaitiniams eksperimentams vykdyti ir rezultatams gauti.

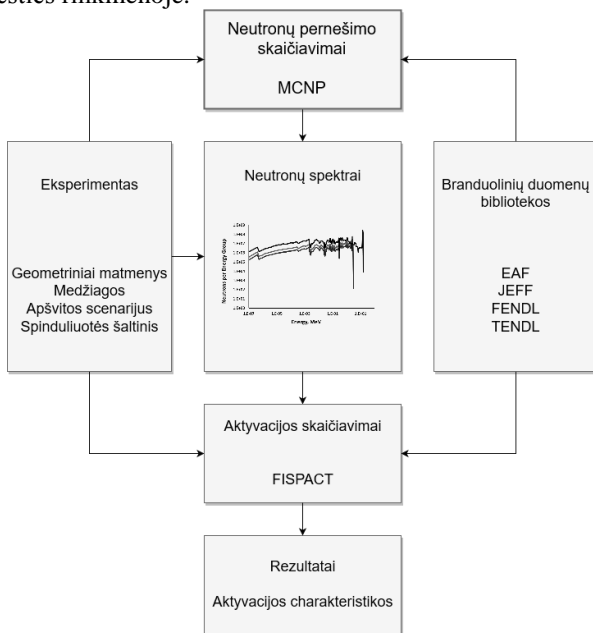
Aktyvacijos skaičiavimų procedūra yra pradama nuo neutronų pernešimo. Neutronų pernašos skaičiavimai yra skirti neutronų srautų tankiams nustatyti tuose segmentuose, kurių aktyvacijos charakteristikas reikia išsiaiškinti. Neutronų pernašos skaičiavimai, minimi šioje disertacijoje, buvo atlikti su programų paketu MCNP (2.1 skyrius). Neutronų pernašos skaičiavimams atlikti reikia nurodyti eksperimento geometrinius matmenis ir spinduliuotės šaltinį, taip pat pateikti informaciją apie medžiagos sandūras ir tankius. Galiausiai reikia nurodyti norimus išvesties duomenis. Ši informacija gali būti aprašoma viena ar keliomis įvesties rinkmenomis. Papildomai dispersijos mažinimo metodai yra

aprašomi įvesties rinkmenose tam, kad būtų sumažintas skaičiavimo laikas ir skaičiavimo neapibrėžtis.

Standartinė programų paketo MCNP versija naudoja branduolinių duomenų biblioteką ENDF/B-VI, kurios duomenys yra saugomi ACE formatu. Panaudojant kitas duomenų bibliotekas yra pasitelkiamas duomenų apdorojimo kodas NJOY.

Nustačius srautų tankius diskrečiose energijų grupėse, galima formuoti neutronų spektrą. Neutronų spektras, lyginant su srautų tankio duomenimis, taip pat aprašo neutronų kiekį.

Neutronų spektras yra reikalingas aktyvacijos skaičiavimams atlikti. Aktyvacijos skaičiavimai šioje disertacijoje buvo atlikti su programų paketu FISPACT (2.2 skyrius). Programų paketui FISPACT yra reikalinga viena įvesties rinkmena, kurioje yra informacija apie medžiagas ir apšvitos scenarijų. Apšvitos scenarijuje gali būti pateikiamos nuorodos į kitas spektrų ar neutronų srautų tankių rinkmenas. Galiausiai įvesties rinkmenoje yra nurodomi aušimo intervalai. Programų paketas FISPACT generuoja išvesties rinkmeną, kurioje yra nurodomi visi skaičiavimų duomenys. Papildomai FISPACT gali atlikti duomenų apdorojimo, išvesties ir kitas funkcijas, nurodant kitus išvesties parametrus įvesties rinkmenoje.



2.1. pav. Aktyvacijos skaičiavimų struktūrinė schema.

2.1 Neutronų pernašos skaičiavimai

Kitaip negu deterministiniais metodais grįstose programose Monte Karlo metodas yra paremtas ne pilnos neutronų populiacijos, o individualaus neutrono skaičiavimais. Kiekviena dalelė turi savą, atsitiktinai sugeneruotą istoriją, kur tikimybiškai yra aprašoma dalelės sąveika priklausomai nuo jos energijos ir pozicijos. Sąveikos yra aprašomos tikimybiniais skirstiniais. Šie skirstiniai atitinka realius fizikinius reiškinius, tačiau reiškinio baigtis yra parenkama atsitiktinai. Dažniausiai 10^8 ar 10^9 dalelių istorijų pakanka gauti patikimą rezultatą simuliuojant eksperimentą. Toliau, didinant istorijų skaičių, yra gaunami dar tikslesni rezultatai bei mažesnės neapibrėžtys, tačiau procesas gali tapti mažai veiksmingas dėl didesnio skaičiavimo laiko.

Monte Karlo metodas nepateikia pernešimo lygties sprendimo, bet aprašo statistinius įverčius integralinei formai.

$$\int_V \int_\Omega \int_E f(r, \Omega, E) \psi(r, \Omega, E) dV d\Omega dE \quad (2.1),$$

kur f yra atsako funkcija, priklausanti nuo neutronų koordinačių šešių dimensijų fazinėje erdvėje.

Palyginti su deterministiniais metodais, taikant Monte Karlo metodą dalialių srautas ir energija nėra integruojami.

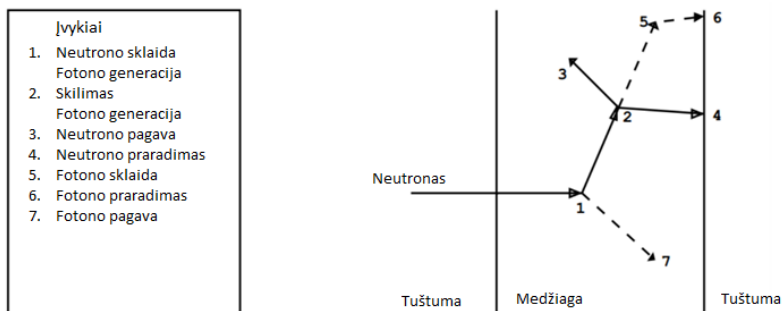
Monte Karlo metodas yra dažnai taikomas sudėtingoms tiesinėms problemoms spręsti, kur pačią problemą galima išskaidyti į keletą smulkesnių uždavinių. Standartiniai Monte Karlo metodo programų paketai, skirti neutronų ar kitų dalelių pernešimui skaičiuoti, yra sudaryti iš trijų paprogramių: sekimo, fizikos ir apdorojimo. Sekimo paprogramės aprašo dalelės judėjimą ir geometrinius matmenis pasitelkiant tiesinę algebrą ir vektorinį skaičiavimą. Fizikos paprogramę sudaro fizikinių reiškinių aprašymai ir juos atitinkančios duomenų bazės. Apdorojimo paprogramė taiko statistinius metodus tam, kad būtų gauti norimi rezultatai.

Neutronų pernešimo skaičiavimai yra plačiai taikomi branduolių sintezės tyrimų srityje. Dėl branduolių sintezės įrenginių sudėtingumo, dažniausiai yra naudojamos Monte Karlo metodu grįstos programos.

MCNP

Programų paketas MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code) yra FORTRAN ir C kalbomis parašytas Monte Karlo metodu grįstas dalelių pernešimo kodas. Šiuo metu vėliausia programos versija yra MCNP6, tačiau tiek versija MCNP5, tiek versija MCNPX irgi yra plačiai taikomos. Programų paketas MCNP gali atlikti dalelių pernešimo skaičiavimus neutronams, fotonams ir įvairiems jonams. Galima simuliuoti neutronus su energijomis nuo 10^{-5} eV iki

150 MeV ir fotonus su energijomis nuo 1 keV iki 100 GeV. Programų paketas MCNP buvo pritaikytas neutronikos skaičiavimams įrenginiuose JET/ITER/DEMO/IFMIF (Pelowitz 2013).



2.2. pav. MCNP neutronų istorija (Pelowitz 2013).

Programų pakete MCNP yra keturi būdai spinduliuotės šaltiniui aprašyti. Dažniausiai naudojamas būdas yra šaltinio aprašymas panaudojant kortelę SDEF, kur yra aprašomi šaltinio geometriniai matmenys, anizotropija/izotropija, dalelių energijos, svoriai ir tipas. Kiti trys būdai yra SSR metodas, kur šaltinį galima importuoti iš prieš tai sekusio MCNP skaičiavimo, kortelė KCODE, skirtas šaltinio kritiškumo skaičiavimams ir individualaus šaltinio aprašymams. Branduolių sintezės skaičiavimuose plačiausiai taikomi SDEF ir individualūs šaltiniai.

Sekimas programų pakete MCNP aprašo dalelės judėjimą geometrinėje sistemoje, atitinkančioje eksperimentą. Sekimo metu yra parenkamas kelio ilgis iki kitos dalelės sąveikos (susidūrimo). Sekimas yra stipriai veikiamas geometrinių matmenų, kadangi dalelės kelias yra skaičiuojamas kiekvieną kartą jai kirtus geometrinių elemento paviršių.

Programų pakete MCNP sąveikos yra aprašomos fizikos paprogramės ir naudotų branduolinių duomenų bibliotekų skaičiavimuose.

Rezultatų išvesčių kortelės yra naudojamos tam, kad atlikus skaičiavimą būtų išvesta tam tikra norima charakteristika. MCNP turi 8 pagrindines rezultatų išvestis, kurios nurodo paviršiaus dalelių srovės, srauto, energijos charakteristikų nustatymą struktūriniuose elementuose ir paviršiuje. Kiekvienai rezultatų išvesčiai reikia nurodyti dalelių tipą.

Dispersijos sumažinimas yra itin svarbus Monte Karlo skaičiavimų metodas, leidžiantis pagreitinti skaičiavimo laikus ir sumažinti statistines paklaidas. Dažniausiai programų pakete MCNP naudojami dispersijos mažinimo metodai gali būti klasifikuojami į metodus, grįstus sąveika, istorija, kryptimi ir

geometriniais matmenimis, bei euristinius šaltinio dispersijos sumažinimo metodus.

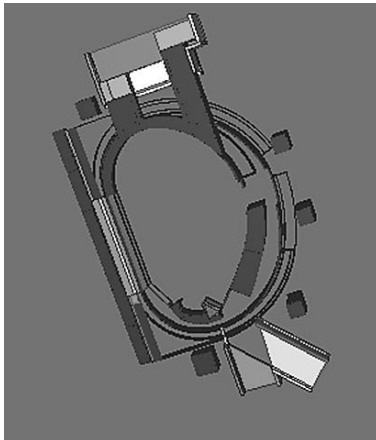
Programų paketo MCNP modelis, skirtas *Joint European Torus*, ir spektro skaičiavimai

Generinis programų paketo MCNP modelis skirtas JET (Gatu Johnson ir et al. 2010) CCFE. Modelį sudaro visiškai detalizuotas 360° vakuuminis indas su pagalbinėmis struktūromis ir patalpomis.

Mokslininkai Sean Conroy (*Uppsala University*) ir Igor Lengar (*Jožef Stefan Institute*), pasitelkdami programų paketą MCNP atliko skaičiavimus ir parūpino duomenis apie neutronų srautų tankius JET DTE aktyvacijos analizei.

Generinis DEMO modelis programų paketui MCNP

Generinis Europos DEMO modelis yra kuriamas Makso Planko tyrimų institute (*Max Planck Institute for Plasma Physics*) Garchinge, Vokietijoje (Wenninger et al. 2016). Palyginus su JET ir ITER (Leichtle et al. 2018) modeliais generinis DEMO modelis yra ženkliai paprastesnis. Jį sudaro tik vakuuminis indas su homogenizuotais struktūriniais elementais. Skaičiavimams pasitelkiamas ne visas įrenginys, bet tik $11,25^{\circ}$ pjūvis, parodytas 2.3. paveiksle. Šiame darbe buvo panaudoti trys skirtingi DEMO modeliai: DEMO2014, DEMO2015 ir DEMO2017. Kiekvienam modeliui buvo pritaikytos vandeniu aušinamo ličio švino WCLL klojinių modulių konfigūracijos (Del Nevo et al. 2017) (Moro et al. 2018).



2.3 pav. Generinis DEMO2015 modelis.

Programų paketo MCNP skaičiavimai šiame darbe buvo skirti tam, kad būtų gauti neutronų srautų tankiai klojinio modulio segmentams. Skaičiavimai atlikti Lietuvos energetikos institute. Pilna analizė buvo atlikta pasitelkiant programų paketą MCNP su branduolinių duomenų biblioteka JEFF 3.1.2 ir programų paketu FISPACT. Statistinė Monte Karlo skaičiavimų paklaida neutronų spektrui neviršijo ir 10% su 10^8 dalelių istorijomis.

IFMIF-DONES modelis

IFMIF testavimo patalpos (TP) modelis buvo sukurtas Karlsrūjės technologijos institute (Karlsruhe Institute of Technology). Modelį sudaro sienoje talpinamas aušinimo vamzdžių rinkinys. Kiekvienos TP medžiagos bei vamzdžių su vandeniu neutronų srautų tankiai buvo apskaičiuoti Lietuvos energetikos institute. Visiška analizė buvo atlikta panaudojant programų paketus MCNP5 + McDelicious ir FISPACT II su branduolinių duomenų bibliotekomis JEFF-3.1.2 ir TENDL 2015. Monte Karlo skaičiavimų statistinė paklaida, remiantis 10^8 dalelių istorijomis, buvo artima 0,1 %.

2.2 Aktyvacijos skaičiavimai

FISPACT

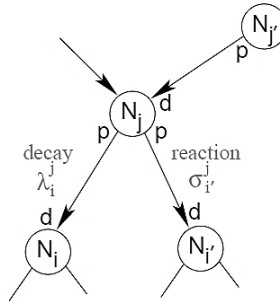
Programų paketas FISPACT – tai įrankis, skirtas transmutacijos ir aktyvacijos skaičiavimams, naudojant neutronus, protonus, deuteronus ir fotonus. Naujausia programos versija FISPACT-II yra kuriama JK atominės energijos agentūrai UKAEA. Programų paketas FISPACT-II taip pat palaiko aktyvacijos, skilimo šilumos, dozės galios bei biologinių pavojingų veiksmų skaičiavimus. Taip pat turi papildomas funkcijas atlikti skilimo, jautrumo ir neapibrėžties analizę (Forest 2007) (Sublet et al. 2016).

Programinė įranga European Activation System: Easy-2007 buvo panaudota programų paketo FISPACT išvesties duomenims gauti ir dominuojantiems radionuklidams nustatyti. FISPACT yra naudojamas apšvitos proceso simuliacijai. Apšvitos simuliacija yra supaprastinta: begalinis ir be galo silpninantis homogeniškos medžiagos laiptelis yra apšvitinimas nuo laiko priklausiančių neutronų srautų sekomis, atitinkančiomis branduolių sintezės įrenginių veikimą. Nuklidų kitimą aprašo šie lygčių rinkiniai (Sublet et al. 2017) (2.2 lygtis):

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j (\lambda_i^j + \sigma_i^j \phi^{int}(t)) N_j \quad (2.2),$$

kur N_i = nuklidų i skaičius laiko t momentu, ϕ^{int} ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) yra srautas. Skilimo konstantai λ_i^j (s^{-1}) nuklidas j , gaminantis i , σ_i^j (cm^2) reakcijos sąveikos

skerspjūvis nuklidui j , gaminančiam i . Jei $j = i$, tada $\lambda_i^j = -\lambda_j^j$, ir atitinka visą skilimo konstantą λ_j . $\sigma_i^j = -\sigma_j^j$ atitinka pilną j sąveikos skerspjūvį. Procesus, aprašomus 2.2 lygtyje, galima vizualizuoti (žr. 2.4 pav.):



2.4 pav. Sąveikų ir skilimo schema (Sublet et al. 2016).

Reakcijos sąveikos skerspjūvis ir jo priklausomybė nuo energijos branduolinių duomenų bibliotekos. Kelios branduolinių duomenų bibliotekos taip pat leidžia parinkti taikinio branduolio energiją. Apšvitos dalelių energijos yra ribojamos energijos grupių. Efektyvus sąveikos skerspjūvis programų paketu FISPACT yra skaičiuojamas kaip vidutinė vertė kiekvienai energijos grupei (2.3 lygtis):

$$\sigma_i^j = \sum_k \sigma_i^j(E_k) \phi_n(E_k) / \sum_k \phi_n(E_k) \quad (2.3),$$

kur $\sigma_i^j(E_k)$ yra energijos grupės vidutinis sąveikos skerspjūvis k , $\phi_n(E_k)$ yra integruotas srautas energijos grupėje k .

Programų pakete FISPACT srautas nėra modifikuojamas reakcijų ir skilimo procesų taikinio medžiagoje, o skilimas ir sąveikos skerspjūviai nepriklauso nuo nuklidų skaičiaus. Tad 2.2 lygtį galima perrašyti į taip (2.4 lygtis):

$$\frac{dN}{dt} = NA \quad (2.4),$$

kur A yra aktyvacijos inventorius, N yra nepriklausoma matrica. Kadangi neutronų srautas yra pastovus apšvitos sekos dalyse, matrica A yra hibridinės funkcijos konstanta laike.

Programų paketo FISPACT įvesties parametrus sudaro švitinamos medžiagos tankiai ir masės, kuriuos taip pat galima išreikšti procentine elementine sudėtimi arba tiesiog izotopų kiekiais. Apšvitos scenarijai gali būti aprašomi atskirais neutronų spektro rinkiniais arba nurodant neutronų skaičių ir parenkant spektro profilį.

Šiame darbe buvo naudotos šios medžiagos:

JET DTE2 eksperimentui:

- funkcinės medžiagos: *Sapphire* (Al₂O₃), YAG, ZnS, Spinel, KUI1, KS-4V, ALON (Al₂O₃N₂) , ALON-23 (Al₂O₃28N₅) , ALON-67 (Al₆O₈N₉) , ALON-68 (Al₆O₆N₁₂) , *Al-Bronze*, *Alloy 660*, Be(S-65C), CuCrZr, JJ1, Nb₃Sn, NbTi, OF-CU, SS-304 (*Borated*), SS316L(N), SS316L(N)-IG, SS316L, XM-19, ZrO₂ (Stork et al. 2017) (Packer et al. 2017);

- grynos medžiagos: Al, Co, Fe, In, Mn, Ni, Sc, Ta, Ti, Y (Packer et al. 2017);

- struktūrinės medžiagos: 316L(N)-IG, 316LN, 316L, *Alloy 660*, *Alloy 660 div*, *Al-Bronze*, CuCrZr, EUROFER 97-3, INCONEL 718, SS304, W, XM-19 (Packer et al., 2018).

DEMO veikimo simuliacijai:

- medžiagų mišiniai WCLL klojinio moduliui: EUROFER 97-3, volframo, PbLi junginio, vandens (Stork et al. 2014) (Fusion for Energy 2008).

- mažesnio aktyvumo plienams: EUROFER 97, F82H, F82-IAE, JLF-1, *Manet*, *Manet II*, *Optifer 1a*, *Optifer II*, la12lc, la12talc, T91 (Danon et al. 2003) (Stork et al. 2014) (CHEN et al. 2012) (Gaganidze & Aktaa 2013) (Kimura 2005) (Youssef et al. 1998).

- 316 tipo nerūdijantiems plienams: 316, 316H, 316L, 316LN, 316LVM, 316N, 3162Ti (Lee et al. 2014).

IMFIF-DONES veikimo simuliacijai:

- biologinio ekrano ir aušinimo sistemos medžiagoms: plienui SS316L(N)-IG, natriu nuskurdintu magnetite cementui, PbLi junginiui, vandeniui.

2.2.1 Branduolinių duomenų bibliotekos

Jungiamoji visų neutronų pernašos kodų ir aktyvacijos programų dalis yra branduolinių duomenų bibliotekos. Branduolinių duomenų bibliotekos yra branduolinės fizikos mokslų pagrindas. Branduolinių duomenų bibliotekos susieją fizikinius procesus su empiriniais reiškiniais stebėjimais. Šiose bibliotekose dažniausiai yra suvestos reakcijų sąveikos skerspjūvių, energijų ir kampinių skirstinių, atomų savybių ir radioaktyvaus skilimo grandinių skaitinės vertės.

Atitinkamai pagal duomenų bibliotekos pritaikymą ir duomenų šaltinius, bibliotekas galima suskirstyti į tris rūšis: eksperimentines, įvertintąsias ir taikomasias. Šiame darbe daugiausiai buvo naudojamos dvi taikomosios (EAF - 2010 (J. C. Sublet 2010), FENDL (Lopez & Capote 2011)) ir dvi įvertintosios

(TENDL 2015. (Koning et al. 2015),JEFF-3.2. (Koning et al. 2006) branduolinių duomenų bibliotekos.

2.2.2 Energijos grupių struktūros

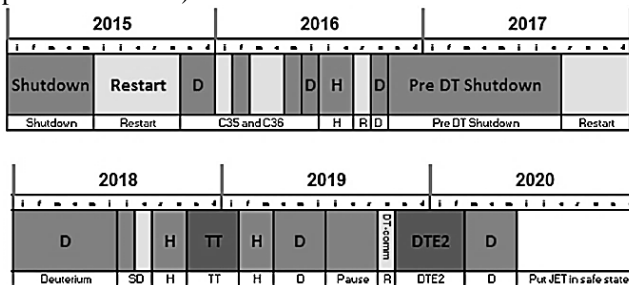
Energijos grupių struktūros atsirado iš poreikio diskretizuoti energiją skaičiavimo našumui padidinti. Skirtingos energijų grupės gali būti parinktos skirtingiems skaičiavimams (Wu 2017). Šiame darbe buvo naudojamos trys energijų grupių struktūros: Vitamin J 175 (Sartori 1985), Vitamin J+ 211, CCFE – 709.

3. REZULTATAI

3.1 Medžiagų aktyvacija reaktoriaus JET ilgalaikės apšvitos stotyje

Šiame skyriuje yra aprašomi aktyvacijos charakteristikų skaičiavimai reaktoriaus JET ilgalaikės apšvitos stotyje. Išorinėje ilgalaikės apšvitos stotyje TT ir DTE2 kampanijų metu buvo atlikti medžiagų aktyvumo ir dozių galių skaičiavimai. Įvairios branduolių sintezės technologijoms svarbios medžiagos bus veikiamos neutronais deuterio ir tričio kampanijų metu. Bandinius sudarys funkcinės medžiagos, skirtos diagnostikai, plazmos kaitinimui, ir struktūriniai plienai bei grynųjų medžiagų folijos.

Su reaktoriumi JET susiję tyrimai ir skaičiavimai yra labai aktualūs ruošiantis pagal tarptautinį branduolių sintezės tyrimų ir inžinerijos projektą ITER statomo didžiausio pasaulyje eksperimentinio tokamako tipo branduolių sintezės reaktoriaus veiklai. Naujoji deuterio-tričio kampanija turėtų įvykti 2019–2020 metais (3.1 pav. TT ir DTE2).



3.1 pav. JET veiklos planas ir DTE kampanija.

Neutronų apšvitos sukelti aktyvumai ir kontaktinės dozės galios apšvitai pasibaigus yra apskaičiuotos programine įranga FISPACT-2010 panaudojant branduolinių duomenų biblioteką EAF-2010.

DTE2 aktyvacijos skaičiavimai

Pirma, kiekvienos kampanijos skaičiavimai buvo atlikti atskirai. Apšvitos scenarijus laikomas ištisiniu su 1 MW/m² neutronų apkrova sienelei. Medžiagų bandiniai buvo atrinkti atsižvelgus į jų pritaikymą pagalbinėse reaktoriaus sistemose. Realiai šios sistemos nebus tiesiogiai veikiamos didelio intensyvumo neutronų spinduliuotės, tačiau jos gali būti paveiktos reaktoriaus veikimo metu. Bandiniai yra sudaryti iš medžiagų, skirtų diagnostikos, aušinimo, magnetų ir kitoms sistemoms.

3.1 lent. DTE2 aktyvacijos skaičiavimų rezultatai.

Medžiaga	DD				DI				Pagr. radionucl.
	Aktyvumas		Dozės galia		Aktyvumas		Dozės galia		
	1 mėn.	1 metai	1 mėn.	1 metai	1 mėn.	1 metai	1 mėn.	1 metai	
Sapphire (Al2O3)	< 0.001 Bq/g	< 0.001 Bq/g	-	-	< 0.01Bq/g	< 0.01Bq/g	-	-	14C
YAG	~3 Bq/g	< 0.001 Bq/g	-	-	~2 Bq/g	< 0.001 Bq/g	-	-	90Y/14C
ZnS	1.3 kBq/g	0.5 kBq/g	0.2 mSv/Hr	80 µSv/Hr	~75 kBq/g	30 kBq/g	12 mSv/Hr	4.6 mSv/Hr	65Zn
Spinel	< 0.001 Bq/g	< 0.001 Bq/g	-	-	< 0.01Bq/g	< 0.01Bq/g	-	-	14C
KU11	25 Bq/g	25 Bq/g	< 0.1 µSv/Hr	< 0.1 µSv/Hr	~1.3 kBq/g	~1.2 kBq/g	< 0.1 µSv/Hr	< 0.1 µSv/Hr	3H
KS-4V	40 Bq/g	37 Bq/g	< 0.1 µSv/Hr	< 0.1 µSv/Hr	2 kBq/g	2 kBq/g	< 0.1 µSv/Hr	< 0.1 µSv/Hr	3H
ALON (Al22O30N2)	0.2 Bq/g	0.2 Bq/g	-	-	9 Bq/g	9 Bq/g	-	-	14C
ALON-23 (Al23O28N5)	0.4 Bq/g	0.4 Bq/g	-	-	22 Bq/g	22 Bq/g	-	-	14C
ALON-67 (Al67O87N9)	0.25 Bq/g	0.25 Bq/g	-	-	14 Bq/g	14 Bq/g	-	-	14C
ALON-68 (Al68O64N12)	0.3.5 Bq/g	0.3.5 Bq/g	-	-	18 Bq/g	18 Bq/g	-	-	14C
Al-Bronze	30 Bq/g	24 Bq/g	13 µSv/Hr	11 µSv/Hr	1.5 kBq/g	1.25 kBq/g	0.7 mSv/Hr	0.6 mSv/Hr	60Co
Alloy 660	1.3 kBq/g	0.1 kBq/g	10 µSv/Hr	< 0.1 µSv/Hr	70 kBq/g	6 kBq/g	0.7 mSv/Hr	3 µSv/Hr	55Fe
Be(S-65C)	1 Bq/g	1 Bq/g	< 0.1 µSv/Hr	< 0.1 µSv/Hr	8 Bq/g	6 Bq/g	< 0.1 µSv/Hr	< 0.1 µSv/Hr	55Fe
CuCrZr	60 Bq/g	< 0.1 Bq/g	< 0.1 µSv/Hr	< 0.1 µSv/Hr	3 kBq/g	1 Bq/g	20 µSv/Hr	< 0.1 µSv/Hr	51Cr
Ill	1 kBq/g	0.1 kBq/g	25 mSv/Hr	10 mSv/Hr	60 kBq/g	7 kBq/g	1.4 mSv/Hr	0.6 mSv/Hr	51Cr/55Fe
Nb3Sn	40 kBq/g	0.55 kBq/g	1.4 mSv/Hr	0.2 mSv/Hr	0.3 MBq/g	0.04 MBq/g	0.1 Sv/Hr	0.014 Sv/Hr	182Ta
NbTi	1.5 Bq/g	0.3 Bq/g	< 0.1 µSv/Hr	< 0.1 µSv/Hr	0.4 kBq/g	0.3 kBq/g	40 µSv/Hr	7.5 µSv/Hr	182Ta/93mNb
OF-CU	0.01 Bq/g	0.01 Bq/g	-	-	0.1 Bq/g	0.1 Bq/g	< 0.1 µSv/Hr	< 0.1 µSv/Hr	63Ni
SS-304 (Boreated)	1.7 kBq/g	0.14 kBq/g	30 µSv/Hr	10 µSv/Hr	90 kBq/g	7.6 kBq/g	1.7 mSv/Hr	0.6 mSv/Hr	51Cr/55Fe
SS316L(N)	1.5 kBq/g	0.14 kBq/g	30 µSv/Hr	10 µSv/Hr	80 kBq/g	7.6 kBq/g	1.5 mSv/Hr	0.6 mSv/Hr	51Cr/55Fe
SS316L(N)-IG	1.6 kBq/g	0.15 kBq/g	30 µSv/Hr	10 µSv/Hr	82 kBq/g	7.7 kBq/g	1.6 mSv/Hr	0.6 mSv/Hr	51Cr/55Fe
SS316L	1.7 kBq/g	0.2 kBq/g	100 µSv/Hr	50 µSv/Hr	92 kBq/g	11 kBq/g	6.2 mSv/Hr	2.7 mSv/Hr	51Cr/55Fe
XM-19	1.9 kBq/g	0.13 kBq/g	32 µSv/Hr	14 µSv/Hr	100 kBq/g	6.9 kBq/g	1.75 mSv/Hr	0.6 mSv/Hr	51Cr/55Fe
ZrO2	100 Bq/g	4 Bq/g	17 µSv/Hr	0.7 µSv/Hr	8.4 kBq/g	0.34 kBq/g	1.5 mSv/Hr	0.6 mSv/Hr	95Zr/95Nb

TT ir DD aktyvacijos skaičiavimai

Aktyvumai ir dozės galios taip pat buvo apskaičiuotos veikiant kompleksiniam apšvitos scenarijui (3.3 lent.). DD1 ir DD2 yra deuterio kampanijos, H1 ir H2 yra vandenilio kampanijos, kuriose neutronų skaičius yra minimalus ir neskaičiuojamas. TT yra tričio kampanija, kurią sudaro 99% tričio ir 1 % deuterio. TT kampanijos metu neutronų išeiga iš deuterio tričio sintezės

yra ženkliai didesnė negu iš tričio tričio sintezės (3.2 pav.). Čia buvo iširtos grynų medžiagų folijų aktyvacijos charakteristikos (3.3 lent.). Kartu buvo apskaičiuota ir kontaktinė dozės galia, ir dozės galia 30 cm atstumu nuo bandinio.

3.2 lent. Deuterio (DD1-2), vandenilio (H1-2) ir tričio (TT) kampanijų trukmės (dienos).

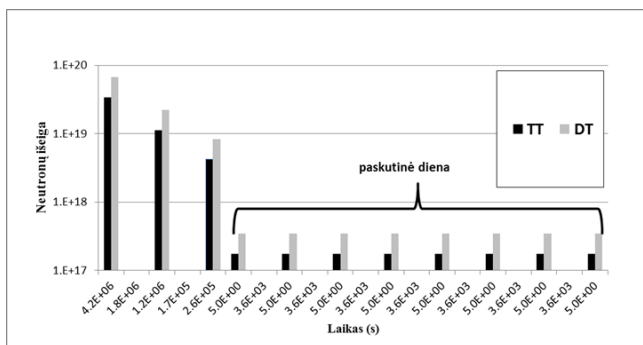
DD1	H1	TT	H2	DD2
180	60	90	60	90

3.3 lent. Grynų medžiagų aktyvacija po deuterio ir tričio kampanijų.

Medžiaga	Aktyvumas			Kontaktinė dozės galia			Dozės galia 30 cm atstumu			Pagr. radionuklidai		
	1 sekundė	1 mėnuo	1 metai	1 sekundė	1 mėnuo	1 metai	1 sekundė	1 mėnuo	1 metai	1 sekundė	1 mėnuo	1 metai
Al	~11 MBq/g	-	-	~0.64 Sv/Hr	-	-	2.5 uSv/Hr	-	-	Al 28	-	-
Co	~65 MBq/g	~13 MBq/g	~11 MBq/g	~9.4 Sv/Hr	~9.8 Sv/Hr	~8.8 Sv/Hr	100 uSv/Hr	43 uSv/Hr	38 uSv/Hr	Co 60m	Co 60	Co 60
Fe	~85 kBq/g	~80 kBq/g	~60 kBq/g	~3.7 mSv/Hr	~1.8 mSv/Hr	~0.22 mSv/Hr	77 nSv/Hr	67 nSv/Hr	47 nSv/Hr	Fe 55	Fe 55	Fe 55
In	~3 GBq/g	~2.1 MBq/g	~21 kBq/g	~1200 Sv/Hr	~12 mSv/Hr	~0.11 mSv/Hr	6 mSv/Hr	307 nSv/Hr	3 nSv/Hr	In 116m	In 114 In 114m	In 114 In 114m
Mn	~30 MBq/g	-	-	~17 Sv/Hr	-	-	75 uSv/Hr	-	-	Mn 56	-	-
Ni	~110 kBq/g	~43 kBq/g	~11 kBq/g	~15 mSv/Hr	~7.8 mSv/Hr	~0.37 mSv/Hr	140 nSv/Hr	73 nSv/Hr	4 nSv/Hr	Co 58	Co 58	Ni 63
Sc	~93 MBq/g	~46 MBq/g	~2.9 MBq/g	~32 Sv/Hr	~25 Sv/Hr	~1.5 Sv/Hr	175 uSv/Hr	130 uSv/Hr	8uSv/Hr	Sc 46	Sc 46	Sc 46
Ta	~47 MBq/g	~40.5 MBq/g	~5.3 MBq/g	~15 Sv/Hr	~12.5 Sv/Hr	~1.7 Sv/Hr	130 uSv/Hr	110 uSv/Hr	14.5 uSv/Hr	Ta 182	Ta 182	Ta 182
Ti	~29 kBq/g	~1 kBq/g	~77 Bq/g	~2.8 mSv/Hr	~515 uSv/Hr	~32 uSv/Hr	19 nSv/Hr	3 nSv/Hr	-	Ti 51	Sc 46	Sc 46
Y	~35 MBq/g	~1 kBq/g	~1.5 Bq/g	~23 mSv/Hr	~15 mSv/Hr	-	125 nSv/Hr	-	-	Y 90	Y 90	Sc 89

Detalizuoti TT ir DD kampanijų scenarijai

Šioje dalyje buvo tiriami struktūriniai plienai ir kiti lydiniai. Anksčiau atliktuose skaičiavimuose buvo naudojama nuolatinė kampanijoms buvo priskirta nuolatinės apšvitos, tačiau jos neatitinka realaus įrenginio veikimo. Toliau TT kampanijos apšvitos scenarijus buvo suskirstytas į skirtingos trukmės apšvitos trukmės intervalus (3.2 pav.). Gauti rezultatai yra pateikti 3.4 lentelėje.



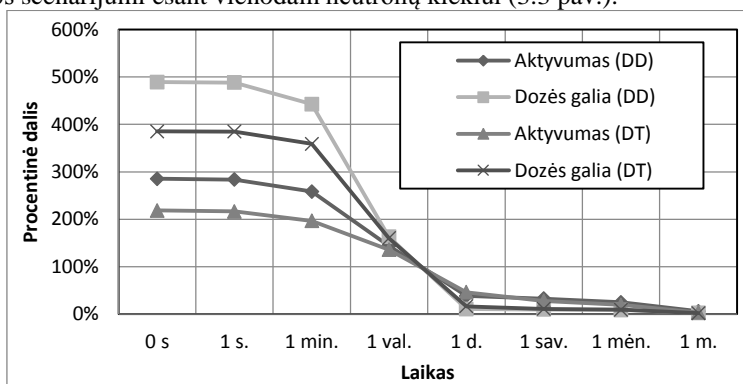
3.2 pav. TT kampanijos apšvitos scenarijus.

3.4 lent. Medžiagų aktyvacija po deuterio ir tričio kampanijų detalizavus TT kampaniją.

Medžiaga	Aktyvumas			Kontaktinė dozės galia			Dozės galia 30 cm atstumu			Pagr. radionuklidai		
	1 sekundė	1 mėnuo	1 metai	1 sekundė	1 mėnuo	1 metai	1 sekundė	1 mėnuo	1 metai	1 sekundė	1 mėnuo	1 metai
316L(N)-IG	49 MBq/kg	18 MBq/kg	4 MBq/kg	11.7 mSv/h	4.0 mSv/h	0.8 mSv/h	83 nSv/h	36 nSv/h	7 nSv/h	Co 58	Co 58	Mn 54
316LN	48 MBq/kg	18 MBq/kg	4 MBq/kg	11.4 mSv/h	3.8 mSv/h	0.8 mSv/h	80 nSv/h	34 nSv/h	7 nSv/h	Co 58	Co 58	Mn 54
316L	48 MBq/kg	18 MBq/kg	4 MBq/kg	11.6 mSv/h	4.0 mSv/h	1.0 mSv/h	81 nSv/h	35 nSv/h	7 nSv/h	Co 58	Co 58	Mn 54
Alloy 660	61 MBq/kg	27 MBq/kg	3 MBq/kg	13.4 mSv/h	5.9 mSv/h	0.5 mSv/h	107 nSv/h	55 nSv/h	5 nSv/h	Co 58	Co 58	Mn 54
Alloy 660 div	64 MBq/kg	27 MBq/kg	3 MBq/kg	15.1 mSv/h	5.9 mSv/h	0.5 mSv/h	115 nSv/h	55 nSv/h	5 nSv/h	Co 58	Co 58	Mn 54
Al-Bronze	289 MBq/kg	5 MBq/kg	1 MBq/kg	13.3 mSv/h	1.1 mSv/h	0.1 mSv/h	223 nSv/h	10 nSv/h	1 nSv/h	Cu 64	Co 58	Ni 63
CuCrZr	337 MBq/kg	0.43 MBq/kg	0.35 MBq/kg	12.3 mSv/h	0.004 mSv/h	~100 nSv/h	244 nSv/h	-0	-0	Cu 64	Ni 63	Ni 63
EUROFER 97-3	57 MBq/kg	22 MBq/kg	6 MBq/kg	10.6 mSv/h	5.5 mSv/h	1.1 mSv/h	96 nSv/h	47 nSv/h	10 nSv/h	W 187	Ta 182	Mn 54
INCONEL 718	152 MBq/kg	60 MBq/kg	13 MBq/kg	23.6 mSv/h	18.1 mSv/h	6.7 mSv/h	232 nSv/h	137 nSv/h	35 nSv/h	Co 58	Co 58	Co 60
SS304	35 MBq/kg	18 MBq/kg	4 MBq/kg	7.4 mSv/h	3.8 mSv/h	0.8 mSv/h	61 nSv/h	34 nSv/h	7 nSv/h	Co 58	Co 58	Mn 54
W	2370 MBq/kg	165 MBq/kg	8 MBq/kg	141.0 mSv/h	0.002 mSv/h	~100 nSv/h	2840 nSv/h	6 nSv/h	1 nSv/h	W 187	W 185	W 185
XM-19	72 MBq/kg	19 MBq/kg	4 MBq/kg	22.9 mSv/h	4.1 mSv/h	0.8 mSv/h	134 nSv/h	36 nSv/h	7 nSv/h	Mn 56	Co 58	Mn 54

Detalizavimo įtaka DD ir DT kampanijų scenarijams

Detalizuoti atskiri DD ir DT kampanijų scenarijai buvo palyginti su ištisiniu apšvitos scenarijumi esant vienodam neutronų kiekiui (3.3 pav.).



3.3 pav. Aktyvumų ir dozės galių skirtumai tarp DD ir DT kampanijų detalizuotų scenarijų lyginant su nuolatine apšvita.

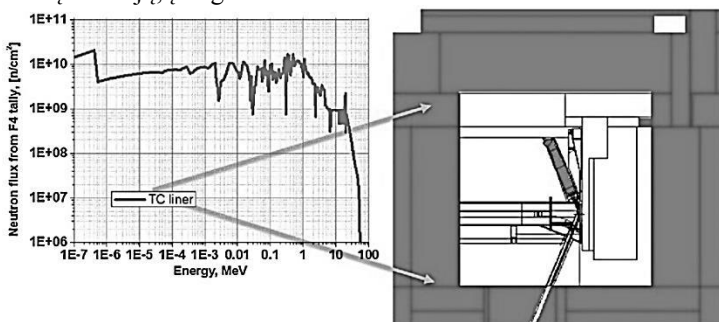
Nuolatinės apšvitos scenarijaus metu, skirtingai nei detalizuoto, atitinkamai DT kampanijos ir DD kampanijos metu, praėjus minutei po apšvitos pabaigos dozių galios gali skirtis iki 4–5 kartų, o aktyvumai 2–3 kartus. Lyginant su ištisiniais scenarijais, aktyvumai ir dozės galios skirtis ir daugiau kaip 10 kartų. Lyginant detalizavimo įtaką DD kampanijai ir DT kampanijai, nustatyta, kad per minutę nuo apšvitos dozės galios ir aktyvumai DD kampanijos atveju yra paveikiami ~30 procentų daugiau negu DT kampanijos atveju.

Atlikus JET išorinės ilgalaikės apšvitos stoties aktyvacijos skaičiavimus buvo nustatyti bandinių aktyvumai ir dozės galios nustatymas vienerių metų laikotarpiui po neutronų apšvitos DT ir TT kampanijų metu. Pirma buvo analizuojamos potencialios medžiagos (28 bandiniai). Iš jų praėjus mėnesiui po apšvitos didesne negu $10 \mu\text{Sv}$ kontaktine dozės galia pasižymėjo 11 (DD) ir 13 (DT) bandiniu. Dviejų bandinių kontaktinė dozė buvo didesnė negu 2 mSv. Didžiausiais aktyvumais pasižymėjo Nb3Sn, SS316L, XM-19. Toliau buvo nagrinėjamos į ilgalaikės apšvitos stotį atrinktos medžiagos (36 bandiniai, iš jų 10 grynos medžiagos folijos). Buvo taikomas kompleksinis apšvitos scenarijus. Išnagrinėjus folijų rezultatus, praėjus 1 mėnesiui po apšvitos 7 iš 10 folijų pasižymėjo didesne negu $10 \mu\text{Sv}$ kontaktine dozės galia, o 6 didesne negu 2 mSv dozės galia. Didžiausia dozės galia pasižymėjo skandis, o didžiausiu aktyvumu indis. Iš 11 metalų lydinų folijų 8 pasižymėjo didesne negu 2 mSv kontaktine dozės galia praėjus 1 mėnesiui.

3.2 IFMIF-DONES aktyvacijos skaičiavimai

Šiame skyriuje yra nagrinėjami IFMIF-DONES neutronų apšvitos efektai testavimo kameros (TC) patalpų biologiniam ekranui ir aušinimo struktūroms, esančioms arti neutronų šaltinio.

Biologinis ekranas, supantis TC, yra sudarytas iš cemento ir vidinio apvaskalo. Apvaskalas yra sudarytas iš 8 mm storio nerūdijančio plieno. Ekране yra įrengta aušinimo vamzdžių sistema, skirta pašalinti šilumai, atsirandančiai iš skilimo ir kitų reakcijų, įrenginio veikimo metu.

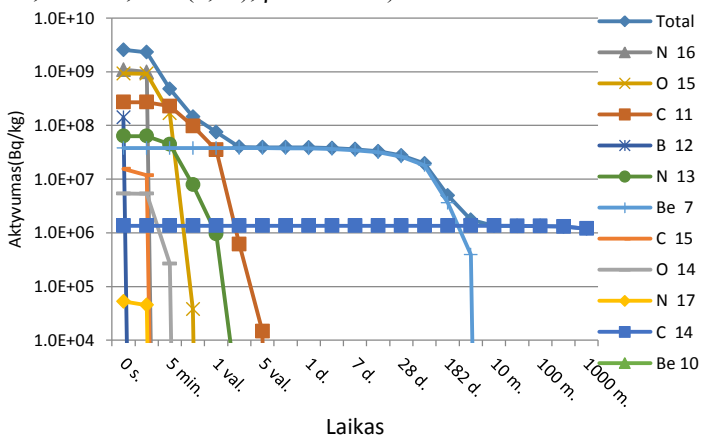


3.4 pav. Neutronų 211g spektras testavimo kameros apvaskalui.

Aktyvacijos charakteristikų skaičiavimai buvo atlikti panaudojant programų paketus FISPACT. Panaudojus MCNP buvo gauti VITAMIN J+ 211 energijos grupių tipo srautų tankiai. Vandens aktyvacijos skaičiavimai buvo atlikti panaudojant programų paketą FISPACT-II ir branduolinių duomenų biblioteką TENDL 2015.

IFMIF-DONES apšvitos scenarijų sudaro 10 kalendorinių metų. Metuose 345 dienas vyksta apšvita, o likusios 20 dienų yra skirtos įrenginio priežiūrai (apšvita nevyksta). Aktyvacijos charakteristikos yra gautos sekantiems laikams po apšvitos: 0 s, 1 s, 5 min, 30 min, 1 val., 3 val., 5 val., 10 val., 1 d., 3 d., 1 sav., 2 sav., 4 sav., 8 sav., 6 mėn., 1 m., 10 m., 50 m., 100 m., 300 m. ir 1000 metų.

Pagrindiniai šilumnešio (vandens) radionuklidai pasižymi mažu pusamžiu (iki 20 min) ir atsiranda iš deguonies izotopų reakcijų. Itin svarbus yra izotopas N-16 ($T_{1/2} = 7,13$ s, $^{16}\text{O}(n,p)$). β^- skilimo reakcija yra palydima energingais fotonais (6,13 MeV). Kitas reikšmingas vandenyje atsirandantis izotopas yra O-15 ($T_{1/2} = 2,037$ min, $^{16}\text{O}(n,2n)$, β^+ skilimas).



3.5 pav. Testavimo kameros patalpos šilumnešio (vandens) radionuklidų kaita po apšvitos (be tričio).

Nutraukus apšvitą bendra skilimo šilumos vertė šilumnešyje gali siekti $5e^5$ kW/kg. Veikiant įrenginiui ir kelias minutes po veikimo pabaigos aušinimo sistema gali būti pavojingu gama spinduliuotės šaltiniu dėl izotopų N-16 ir O-15.

TC apvalkalo aktyvumą lemia izotopai, susidarantys vykstant aukštų energijų (n, p) ir (n, 2n) neutroninėms reakcijoms. Pagrindiniai radionuklidai susidarantys po apšvitos pliene Mn-56, Cr-51 ir Fe-55. Didžioji jų dalis susidaro iš sekančių neutronų reakcijų: Mn-56 iš Fe-56 (n, p) (~54%), Cr-51 iš Cr-52 (n, 2n) (~67%) ir Fe-55 iš Fe-56 (n, 2n) (~92%). Didžiausią skilimo šilumą išsiskiria skylant radionuklidams Co-60 ir Mn-56.

3.3 DEMO reaktoriaus vandeniu aušinamo ličio švino klotinio modulių aktyvacijos skaičiavimai

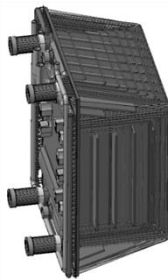
3.3.1 DEMO2014 ir DEMO2015 modelių vandeniu aušinamam ličio švino klotinių modulių aktyvacijos skaičiavimai

WCLL klotinio modulių aktyvacijos charakteristikos buvo nustatytos atsižvelgiant į branduolių sintezės galios ir matmenų pokyčius reaktoriaus 2014-ųjų ir 2015-ųjų metų modeliuose. Palyginimui buvo parinkti centriniai klotinių moduliai IB ir OB. Buvo suskaičiuotos aktyvumo, dozės galios ir skilimo šilumos charakteristikos. Skaitiniai tyrimai buvo atlikti su dalelių pernešimo programų paketu MCNP ir aktyvacijos skaičiavimų programų paketu FISPACT/FISPACT-II naudojant branduolinių duomenų bibliotekas EAF-2010/TENDL-2015.

3.5 lentelė DEMO jėginių parametrai.

Modelis	Šiluminė galia [MW]	Didysis spindulys [m]	Mažasis spindulys [m]
DEMO2014	1570	9,0	2,25
DEMO2015	2037	9,072	2,927
DEMO2017	1998	8,938	2,883

WCLL modulių keitimai buvo atlikti tam, kad būtų sumažinta neutronų parazitinė absorbcija, kuri gali kliudyti tričio dauginimo funkcijai ir mažinti modulio našumą. Klotinio moduliai buvo pritaikyti prie naujos reaktoriaus geometrinių matmenų.



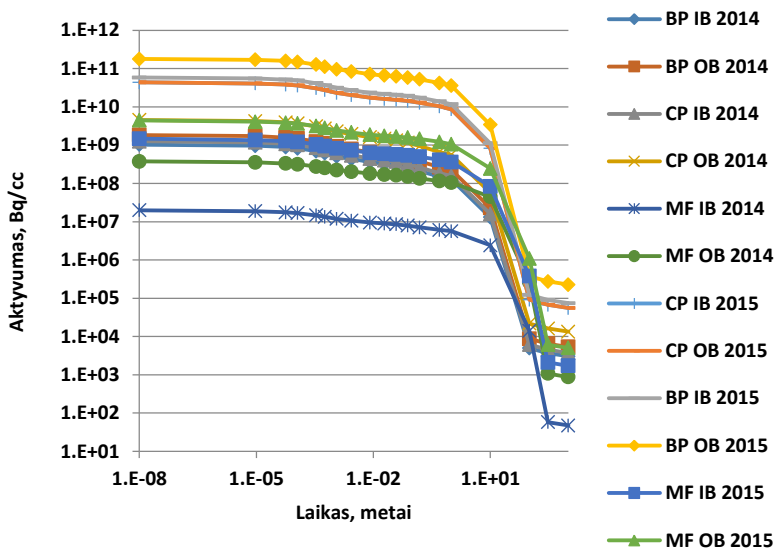
Pav. 3.6 DEMO2015 modelio WCLL klotinio modulis. CAD modelis.

Buvo išskirti šeši skirtingi WCLL modulių segmentai pagal funkcijas ir medžiagas: šarvas (AR), pirmoji sienelė (FW), dauginimo zona (BZ), šoninės sienelės (CP), galinė sienelė (BP) ir pagalbinės struktūros (MF). Šarvą, kuris dengia vakuuminio indo vidų, sudaro grynas volframas. Sienelės daugiausiai sudarytos iš EUROFER plieno ir atskiria dauginimo zoną bei atlieka šilumokaicio funkciją. Dauginimo zona yra sudaryta iš PbLi junginio.

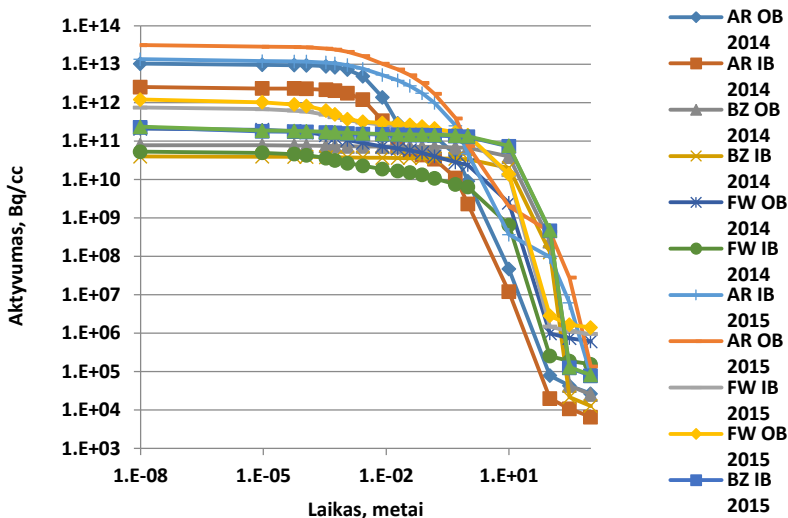
Neutronų spektrai yra sudaryti pagal VITAMIN-J 175 energijos grupių struktūrą ir paskaičiuoti kiekvienam klojinio modulio segmentui. Modulis OB yra labiau nutolęs nuo centrinės įrenginio ašies, IB yra priešingas OB.

Pirmoji apšvitos seka truko 1888 dienas, segmentai buvo veikiami $0,3 \text{ MW m}^{-2}$ neutronų apkrovos. Antrąją seką sudarė 48 pulsai: 4 valandas trunkanti 1 MW m^{-2} apkrova ir po to sekanti 1 valandos pertrauka. Buvo laikomasi prielaidos, kad visas modulyje susidaręs tritis yra pašalinamas. Kita vertus, nebuvo atsižvelgta į ličio skurdėjimą veikimo metu. Aktyvacijos charakteristikos buvo analizuojamos 1000 metų laikotarpiui po galutinio apšvitos nutraukimo.

Daugeliu atveju moduliai OB pasižymi didesniu aktyvumu ir skilimo šiluma negu modulis IB. Ankstyvais laiko tarpais po apšvitos minėtos charakteristikos varijuoja $\sim <2-5$ kartus (DEMO2015) ir $\sim <3-10$ kartų (DEMO2014). Didžiausi skirtumai yra stebimi šarvo ir pirmosios sienelės segmentuose.



3.7 pav. Aktyvumų priklausomybės nuo laiko po apšvitos nutraukimo. Šarvui (AR), pirmajai sienelei (FW), dauginimo zonai (BZ).



3.8 pav. Aktyvumų priklausomybė nuo laiko po apšvitos nutraukimo. Šoninės sienelės (CP), galinė sienelė (BP), pagalbinės struktūros (MF).

Radionuklidų analizė parodė, jog visuose segmentuose, išskyrus šarvą, aktyvumą labiausiai lemia plieno EUROFER 97-3 produktai, kurių hierarchija šiek tiek kinta. Volframo šarvo aktyvacijos charakteristikos sparčiai mažėja jau pirmąją savaitę, lyginant su EUROFER 97-3 plieno, kurio aktyvumas išlieka santykinai aukštas metus ir ilgiau.

3.2.2 DEMO 2017 modelio vandeniu aušinamo ličio švino klotinio modulio aktyvacijos skaičiavimai

Naudojant DEMO2017 modelį buvo nustatyti WCLL klotinio modulio OB ir IB aktyvumas ir skilimo šiluma. Kitaip negu DEMO2014 ir DEMO2015 klotinių modeliai, DEMO2017 yra suskirstytas ne į funkcinius, bet į sluoksninius segmentus. DEMO struktūrinio plieno aktyvumą nulemia (n, g) tipo neutroninės reakcijos.

3.2.3 Struktūrinių plienų aktyvacijos skaičiavimai

Šioje dalyje yra tiriami mažesnio aktyvumo plienai ir kelios nerūdijančio plieno 316 konfigūracijos, kurios gali būti taikomos ateities branduolių sintezės reaktoriuose (divertoriuje, pirmojoje sienelėje ir klotinių moduluose). Skaičiavimuose yra panaudotas neutronų spektras ekvivalentus spektrui DEMO2014 centriniam klotinio moduliu. Medžiagų aktyvacijos skaičiavimai

yra atlikti su programų paketu FISPACT naudojant branduolinių duomenų biblioteką EAF-2010.

Tiriamos medžiagos: EUROFER 97, F82H, F82-IAE, JLF-1, Manet, Manet II, Optifer 1a, Optifer II, la12lc, la12talc, T91 (3.2.1.3.1 pav.) ir nerūdijantys plienai 316 (3.2.1.3.2 pav.). Kartu buvo nagrinėtos ir dvi ribinės lydinio EUROFER 97 sudėtys, kurios nuo standartinės skyrėsi priemaišų kiekiu.

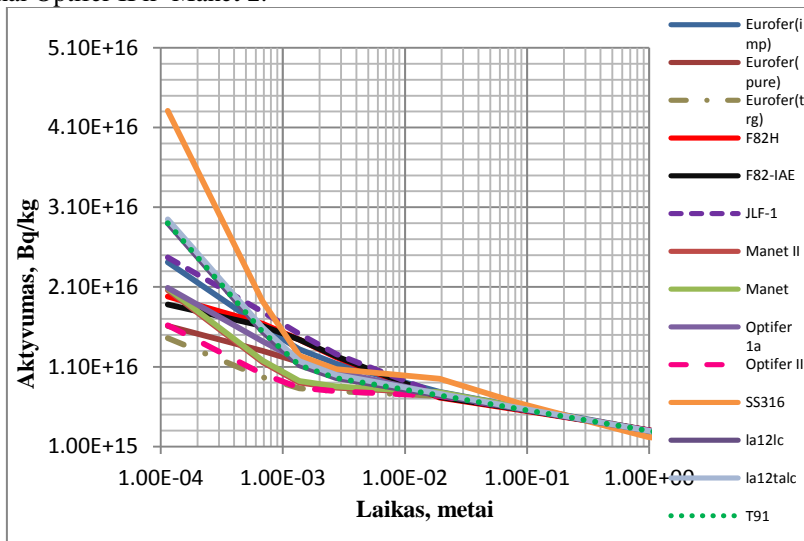
Apšvitos scenarijus susideda iš dvejų sekų: ištisinės 1841 dienų trukmės, kai medžiagos veikiamos $0,3 \text{ MW m}^{-2}$ neutronų apkrovos, ir pulsinės, kurios vieną intervalą sudaro 4 valandos, kai medžiagos veikiamos 1 MW m^{-2} neutronų apkrovos, ir viena valanda su nuline apkrova. Seką sudarė 17 pulsų.

Buvo suskaičiuotas visų medžiagų aktyvumas, dozės galia ir skilimo šiluma. Rezultatai suskirstyti į du laikotarpius:

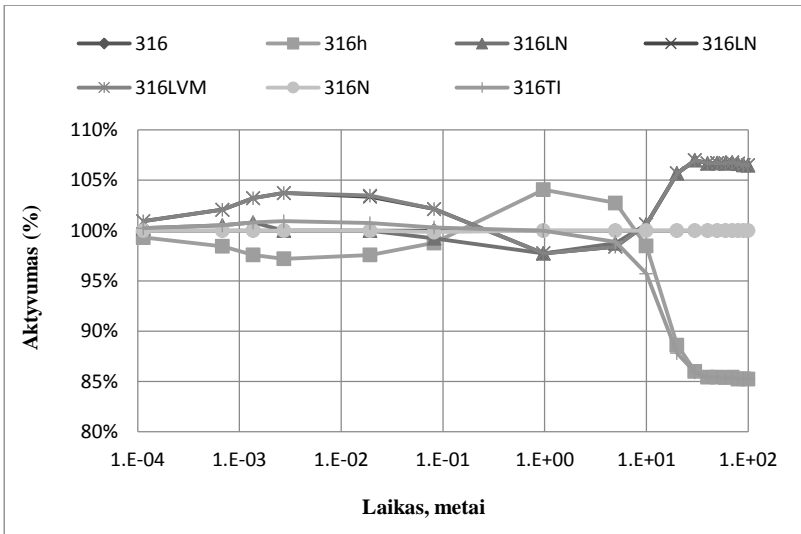
1. trumpąjį laikotarpį, apimantį pirmus metus po apšvitos nutraukimo. Aktyvumo analizės duomenys šiuo atveju gali būti aktualūs reaktoriaus veikimui, priežiūrai ir uždarymui;

2. ilgąjį laikotarpį, apimantį 50–100 metų laikotarpį po apšvitos. Aktyvumo analizės duomenys šiuo atveju gali būti aktualūs įrenginio medžiagų saugojimui ir perdirimui.

Ilguoju laikotarpiu F82H plienas pasižymi mažiausiu specifiniu aktyvumu. Toliau seka plienai Optifer II, Optifer 1a ir EUROFER 97. Trumpuoju laikotarpiu plienas EUROFER 97 pasižymi mažiausiu aktyvumu, po jo seka plienai Optifer II ir Manet 2.



3.9 pav. Tirtų plienų aktyvumo priklausomybė nuo laiko.



3.10 pav. Aktyvumo priklausomybė nuo laiko. Aktyvumai yra išreikšti procentais nuo atskaitinių verčių plienui SS316.

Nerūdijantis plienas 316h turi didesnę anglies koncentraciją – apie 0,1%, plienas 316L mažesnę anglies koncentraciją – apie 0,03%, plienas 316LN mažesnę anglies koncentraciją – apie 0,035% ir didesnę azoto – apie 0,1%, plienas 316LVM turi mažesnę anglies – apie 0,035% ir kitų priemaišų, 316N yra praturtintas azotu (apie 0,135%), plienas 316Ti turi titano priemaišų (apie 0,7%). Atlikus aktyvumo analizę, gautos charakteristikos nebuvo itin reikšmingos. Palyginti su kitais, plienas 316Ti ir plienas 316h pasižymėjo mažesniu aktyvumu ir skilimo šiluma.

3.3.4 LiPb junginio aktyvacijos įvertinimas tekėjimo atveju

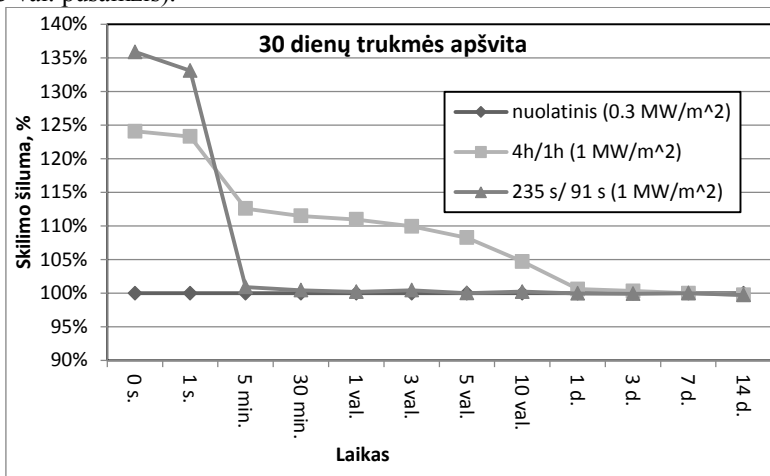
Šioje dalyje yra nagrinėjama LiPb junginio aktyvacija. Planuojama, jog DEMO reaktorius veiks cikliniu režimu. Vieną ciklą sudarys 4 valandos, kai vyks branduolių sintezė ir bus generuojami neutronai, ir 1 valandos trukmės pertrauka. LiPb junginio cirkuliacija iš klojinio modulio į tričio atskyrimo sistemą vyks skirtingu ciklu. LiPb junginys skaičiavimams buvo panaudotas apšvitos supaprastintas scenarijus: LiPb cirkuliacijos ciklas trunka 326 sekundes, iš kurių 235 sekundes LiPb junginys yra lokalizuotas klojinio modulyje, kur yra galima neutronų apšvita, ir 91 sekundę tričio atskyrimo sistemoje, kurioje apšvita nevyksta.

Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta, jog LiPb junginio aktyvumas ir skilimo šiluma daugelyje laiko intervalų yra maždaug 28% (1–2 proc. variacija) mažesni

palyginus su LiPb junginio cirkuliacijos ciklu, tai atitinka trumpesnį apšvitos laiką (trumpesnį maždaug 28%). Kita vertus, skirtumas praėjus sekundei po apšvitos pabaigos siekia tik apie 5%. Izotopai Pb-207m ir Pb-205m sudaro daugiau negu 90% viso aktyvumo.

Norint geriau suprasti apšvitos scenarijų įtaką, buvo parinkti trys apšvitos režimai, trunkantys 30 dienų. Nuolatinis ir anksčiau minėti DEMO jėgainės ir LiPb junginio cirkuliacijos ciklai. Skilimo šilumos skaičiavimų rezultatai, įvertinus neutronų apkrovą ir apšvitos laikus, yra pateikti 3.11 paveiksle.

Aktyvumo ir skilimo šilumos rezultatai pasižymi panašiomis tendencijomis. Apšvitos pabaigoje LiPb junginio cirkuliacijos ciklo atveju aktyvumo vertės yra apie 35% didesnės lyginant su nenutrūkstamu scenarijumi ir apie 10% didesnės negu DEMO jėgainės ciklo atveju. Aktyvacijos charakteristikų vertės aušimo periodu nuo 5 minučių iki 1 dienos yra didesnės jėgainės DEMO ciklo atveju. Šis skirtumas greičiausiai atsiranda dėl skirtingo izotopo Pb-209 vertinimo (3,253 val. pusamžis).



3.11 pav. Skilimo šilumos procentinės vertės esant skirtingiems apšvitos scenarijams. Nuolatinės apšvitos scenarijus atitinka 100% atskaitos vertes.

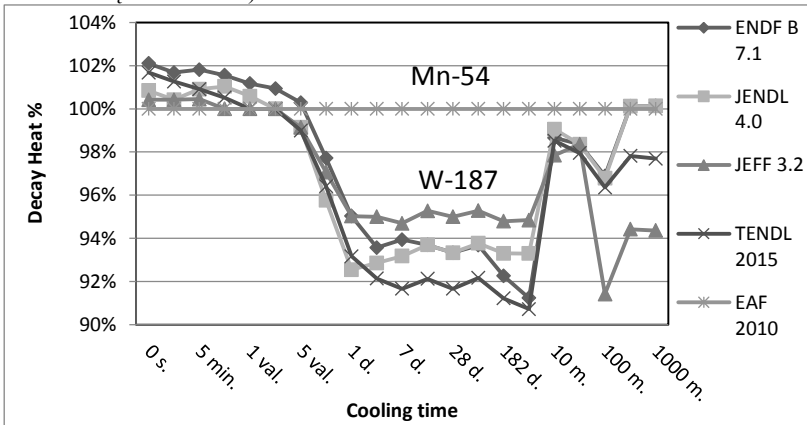
Apibendrinant, rezultatai buvo gauti naudojant DEMO2017 modelio WCLL klojinio modulio heterogenišką daugiasegmentį modelį. Skirtumus tarp rezultatų labiausiai lemia greitai skylantys radionuklidai. Jeigu LiPb junginio cirkuliacijos ciklas nėra svarstomas DEMO apšvitos scenarijuje, tikėtinos aktyvumų bei skilimo šilumų vertės turėtų būti žemesnės negu gautos skaičiavimų metu.

3.3.5 Branduolinių duomenų bibliotekų palyginimas

Šioje dalyje buvo nagrinėjama DEMO2015 modelio klojinio modulio aktyvacija panaudojant skirtingas branduolinių duomenų bibliotekas. Buvo tiriami sumažinto aktyvumo plienas EUROFER 97-3, lydinys CuCrZr ir vanduo. Apšvitos scenarijus atitinka minimą 3.2 skyriuje.

Atlikus branduolinių duomenų bibliotekų palyginimą, nebuvo nustatyta jokių bendrinių tendencijų ir skirtumų, tačiau buvo rasta daug kitų neatitikimų įvairiais laiko periodais po apšvitos.

Branduolinių duomenų biblioteka EAF-2010 buvo pasirinkta atskaitine (skilimo šiluma yra 100 % visais laiko intervalais). Lyginant plieno EUROFER 97-3 (3.14 pav.) aktyvumus, žymūs skirtumai yra matomi praėjus maždaug 10 metų po apšvitos. Naudojant skirtingas bibliotekas (EAF-2010 ir JEFF 3.2), apskaičiuoti aktyvumai po 50 metų skirtųsi apie 30 %, daugiausia dėl izotopo Nb-93m kiekio skirtumo. Tas pats izotopas lemia neatitikimus kitose duomenų bibliotekose. Skirtumai tarp dozės galios ir skilimo šilumos yra ne tokie akivaizdūs ir siekia vos 5% ir mažiau. Skirtumai nagrinėtu atveju išryškėja tarp pirmosios ir pirmųjų metų po apšvitos. Daugiausiai juos lemia radionuklidai Mn-54 (branduolinių duomenų bibliotekų EAF-2010) ir radionuklidai W-187 (kitos duomenų bibliotekos).



3.14 pav. EUROFER 97-3 skilimo šiluma. Duomenų bibliotekų palyginimas.

Nagrinėjant lydinio CuCrZr aktyvumų duomenis branduolinių duomenų bibliotekose EAF-2010 ir JEFF-3.2, skirtumas tam tikrais laikotarpiais siekia 20 %, tai lemia skirtingų izotopų Co-60 ir Ni-63 kiekiai. Izotopas Co-60 taip pat smarkiai lemia neatitiktis tarp gautų skilimo šilumos ir dozių galios verčių.

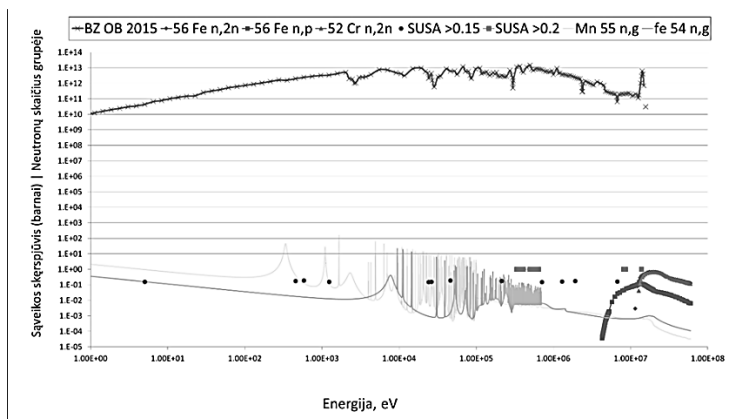
Vandens aktyvacijos charakteristikų skirtumai labiausiai išryškėja praėjus kelioms minutėms po apšvitos, kai dėl radionuklidų H-3 ir C-14 rezultatai, lyginant daugumos duomenų bibliotekų, pradeda skirtis eilėmis. Aktyvumai,

apskaičiuoti naudojantis biblioteka EAF-2010, yra net 1000 kartų didesni negu aktyvumai, gauti naudojantis biblioteka JEFF 3.2, ir 10 kartų didesni negu aktyvumai, gauti naudojantis biblioteka ENDF 8.7.1. Dozės galių vertės yra reikšmingos tik praėjus kelioms minutėms po apšvitos pabaigos.

3.3.6 Neutronų spektro jautrumo analizė

Šioje dalyje buvo analizuojamas neutronų spektras pasitelkus jautrumo analizę. Jautrumo analizė buvo atlikta su programų paketu SUSANA (Software for Uncertainty and Sensitivity Analyses). Aktyvacijos analizė buvo atlikta atsižvelgiant į 3.2 skyriuje minimus skaičiavimus naudojant DEMO2015 modelį. Jautrumo parametrai buvo susieti su 175 neutronų grupėmis. Buvo sugeneruota 100 naujų spektrų, kurie kiekvienai neutronų grupių kito nuo 10 % iki -10 %. Jautrumo analizė buvo atlikta naudojant Spearmano rango koreliacijos metodą. Šis metodas reitinguoja kiekvieną parametą pagal skaičiavimo rezultatus. Koreliacijos koeficientai kinta nuo 1 iki -1.

Du aiškūs pikai yra matomi atlikus plieno EUROFER jautrumo analizę ir jie atitinka ~600 eV ir 15 MeV energijų grupes. Mažesnės energijos pikas, tikėtina, atitinka didelio atominio skaičiaus medžiagų priemaišas, tokias kaip volframas ir talis. 13,8–14,2 MeV intervalo pikas, kuris apima DT branduolių sintezės neutronų energiją (14.1 MeV), tikėtina, atitinka 4-to periodo elementų aukštų energijų reakcijas (geležis, vanadis, manganas, chromas).



3.15 pav. Plieno EUROFER 97-3 jautrumo analizė, neutronų spektras ir bibliotekos TENDL 2015 sąveikos skerspjūviai.

Daugelis analizuotų didesnių koreliacijos koeficientų atitinka tam tikras neutronų reakcijas, tačiau ne visus galima paaiškinti. To priežastis gali būti neįtrauktos reakcijos, nenumatyti skilimo produktai dėl parinkto laiko, ar kelių

veiksnių bendra įtaka. Nagrinėtu atveju daugelį koreliacijos koeficientų galima susieti su 6-to ir 4-to periodo elementų reakcijomis.

Šis metodas galėtų būti panaudojamas, kaip pagalbinė priemonė atliekant neutronikos analizę, tam kad būtų geriau suprantamos sudėtingų apšvitos sistemų aktyvacijos tendencijos. Kita vertus, tiksliam vertinimui šis metodas nėra tinkamas dėl didelio kiekio galimų reakcijų ir nenumatytų skilimo reiškinių.

IŠVADOS

Šiame darbe buvo nagrinėjami neutronų pernešimo ir medžiagų aktyvacijos procesai branduolių sintezės tyrimams skirtuose įrenginiuose tam, kad būtų įvertintas neutronų apšvitos poveikis branduolių sintezės jėgainės DEMO klojinio moduliams. Šie tyrimai yra paremti keliais eksperimentais, skirtais jėgainės DEMO eksploatacijai ir plėtros kryptį nustatyti. JET eksperimentai pasižymi DEMO artimais neutronų srautų tankiais, o IFMIF-DONES yra skirtas ilgalaikiai apšvitai ir medžiagų aktyvacijai įvertinti. Apjungus rezultatus, gautus iš neutronų pernešimo ir aktyvacijos skaičiavimų, buvo gautos šios išvados:

1. Nagrinėjant specifinius aktyvumus ir dozių galias, medžiagų aktyvacija, sukelta neutronų apšvitos iš deuterio-tričio sintezės, įrenginyje JET yra 10–50 kartų didesnė palyginti su deuterio-deuterio sinteze. Pakeitus apšvitos seką (iš nuoseklios į pulsinę) ir lyginant su deuterio-tričio sinteze, specifiniai aktyvumai ir dozės galios, sukeltos deuterio-deuterio sintezės, yra paveikiamos labiau (iki ~30 %).
2. Svarbiausių radionuklidų generacija įrenginyje IFMIF-DONES (testavimo kameros struktūrose) yra sąlygojama aukštų neutronų energijos reakcijų (n, p) ir ($n, 2n$), tuo tarpu DEMO struktūrose vyrauja (n, g) tipo neutronų reakcijos. Įrenginio IFMIF-DONES atveju pliene SS316L(N)-IG radionuklidas Mn-56 atsiranda iš radionuklido Fe-56 (n, p) (~54%) reakcijos, o DEMO atveju – iš radionuklido Mn-55 (n, g) (~89%). Radionuklidas Fe-55 įrenginyje IFMIF-DONES atsiranda iš radionuklido Fe-56 ($n, 2n$) (~92%), kai tuo tarpu ta pati reakcija yra atsakinga tik už 58% radionuklido generavimo įrenginyje DEMO, likusią dalį čia sudaro radionuklidas Fe-54 (n, g) (~39%) ir kt. reakcijos. Radionuklidas Cr-51 įrenginyje IFMIF-DONES atsiranda iš radionuklido Cr-52 ($n, 2n$) (~67%) reakcijos, tuo tarpu jėgainėje DEMO radionuklidas Cr-50 (n, g) yra atsakingas už (~70%) radionuklido Cr-51 generacijas. Aktyvumas įrenginyje IFMIF-DONES išlaiko santykinai didesnę vertę negu DEMO atveju. Praėjus 1 dienai po apšvitos IFMIF-DONES aktyvumas pliene krenta iki maždaug 80% aukščiausios pasiektos vertės, palyginti su ~65% DEMO atveju. Po 1 mėnesio aušimo atitinkamai minėtos vertės siekia ~63% IFMIF-DONES ir

- ~51% DEMO. Toliau panaši tendencija išlieka su savybe proporcingai augti didėjant aušimo trukmei.
3. Plienas EUROFER 97-3 jėgainės DEMO vandenių aušinamo ličio švino klojinio moduluose yra svarbiausias aktyvumo šaltinis, kurio pagrindiniai radionuklidai yra Mn-56, Cr-51 ir Fe-55. Jie pasižymi didžiausiu aktyvumu ir skilimo šiluma praėjus vieniems metams po apšvitos nutraukimo iki pat nagrinėto aušimo laiko pabaigos. Volframas pasižymi didžiausiu aktyvumu ir skilimo šiluma metus. Radionuklidai W-187 ir W-187 yra pagrindiniai aktyvuoto volframo radionuklidai. Didžiausias PbLi lydinio aktyvumas yra apšvitos metu ir išlieka aukštas trumpą laiką dėl greitai skylančių radionuklidų Pb-205m, Pb-203m ir Li-8.
 4. Padidinus ~1/3 karto branduolių sintezės šiluminę galią ir ~2/3 karto vakuuminio reaktoriaus indo tūrį, gautos klojinio modulių specifinio aktyvumo vertės išaugo nuo 2 iki 15 kartų šarvo, pirmosios sienelės, dauginimo zonos segmentuose, ir nuo 10 iki 100 kartų galinėje sienelėje, šoninėse sienelėse ir pagalbinėse struktūrose.
 5. PbLi lydinio aktyvacija pasibaigus apšvitai trumpą laiką (iki kelių sekundžių) yra ~35 % ir ~10 %, atitinkamai didesnės palyginti su nuolatiniu ir DEMO veikimo scenarijais, kai apšvita vyksta pagal PbLi lydinio tekėjimo ciklą.
 6. Jautrumo analizės duomenis, neutronų energijos nuo 24,2 iki 707 keV ir nuo 8,6 iki 14,2 MeV turėjo didžiausią poveikį plieno EUROFER-97-3 struktūroms jėgainės DEMO vandenių aušinamo ličio švino klojinio moduluose.

LITERATŪRA

1. CHEN, X., et al. 2012. "An overview of the welding technologies of CLAM steels for fusion application." *Fusion Engineering and Design* 87: 1639–1646.
2. DANON, A, et al. 2003. "Heterogeneous austenite grain growth in 9Cr martensitic steels: influence of the heating rate and the austenitization temperature." *Materials Science and Engineering* 122-132.
3. DEL NEVO, A, et al. 2017. "WCLL breeding blanket design and integration for DEMO 2015: status and perspectives." *Fusion Engineering and Design* 124: 682-686.
4. EURATOM. 2014. "Grant agreement number 633053 — EUROfusion." European Commission
5. EUROPEAN COMMISSION. 2014. Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions - A policy

framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030. 5644/1/14.

6. EUROPEAN UNION. 2017. "Energy balance sheets 2015 DATA." ISSN 1830-7558.
7. FEDERICI G. et al. 2016. "Overview of the design approach and prioritization of R&D activities towards an EU DEMO." *Fusion Engineering and Design* 109–111: 1464-1474.
8. FOREST, R. A. 2007. FISPACT-2007: User manual. Abingdon: EURATOM/UKAEA Fusion Association, Culham Science Centre.
9. Forrest, R. A. 2011. "Nuclear Science and Data Needs for Advanced Nuclear Systems." *Energy Procedia* 7: 540-552.
10. FUSION FOR ENERGY 2008. Technical Specifications EUROFER Material Database F4E-2008-GRT-010 (PNS-MD). Fusion for Energy.
11. GAGANIDZE, E, and J AKTAA. 2013. "Assessment of neutron irradiation effects on RAFM steels." *Fusion Engineering and Design* 88: 118– 128.
12. GATU JOHNSON, M, et al. 2010. "Modelling and TOFOR measurements of scattered neutrons at JET." *Plasma Physics and Controlled Fusion* 52.
13. KIMURA, A. 2005. "Current Status of Reduced-Activation Ferritic/Martensitic Steels R&D for Fusion Energy." *Materials Transactions* 46: 394-404.
14. KLOOS, M, and E HOFER. 1999. SUSAN Version 3.2. User's Guide and Tutorial. Garching: GRS.
15. KONDO, K, ET AL. 2014. "Neutronic analysis for the IFMIF EVEDA reference test cell and test facility." *Fusion Engineering and Design* 89: 1758-1763.
16. KONING, A. J., et al. 2015. TENDL-2015: TALYS-based evaluated nuclear data library. https://tendl.web.psi.ch/tendl_2015/tendl2015.html.
17. KONING, A., et al. 2006. The JEFF-3.1 Nuclear Data Library, JEFF Report 21. Paris: OECD/NEA.
18. LEE, S, et al. 2014. "Deuterium transport and isotope effects in type 316L stainless steel at high temperatures for nuclear fusion and nuclear hydrogentechnology applications." *Current Applied Physics* 14: 1385-1388.
19. LEICHTLE, D, et al. 2018. "The ITER tokamak neutronics reference model C-Model." *Fusion Engineering and Design* 136: 742-746.
20. LOPEZ ALDAMA, D, and R CAPOTE NOY. 2011. FENDL-3.0: Processing the Evaluated Nuclear Data Library for Fusion Applications. Vienna, Austria : IAEA.
21. MACFARLANE, R.E., and A.C. R.E. KAHLER. 2010. "Methods for Processing ENDF/B-VII with NJOY." *Nuclear Data Sheets* 111: 2739-2890.

22. MORO, F, et al. 2018. "Neutronic analyses in support of the WCLL DEMO design development." Fusion Engineering and Design (<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.04.113>).
23. PACKER, L, et al. 2018. "Activation of ITER materials in JET: nuclear characterisation experiments for the long-term irradiation station." Nuclear Fusion 58.
24. PACKER, L, et al. 2017. "Status of ITER material activation experiments at JET." Fusion Engineering and Design 124: 1150-1155.
25. PAUL, W, et al. 2017. "Tritium aspects of the fusion nuclear science facility." Fusion Engineering and Design (<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.04.099>).
26. PELOWITZ, D. B. 2013. MCNP6 User's Manual Version 1.0. Los Alamos: LANL .
27. ROMANELLI, F, et al. 2012. Fusion Electricity – A roadmap to the realisation of fusion energy. EFDA.
28. SARTORI, E. 1985. VITAMIN-J, A 175 Group Neutron Cross Section Library Based on JEF-1 for Shielding Benchmark Calculations. OECD NEA DATA BANK.
29. STORK, D, et al. 2014. "Developing structural, high-heat flux and plasma facing materials." Journal of Nuclear Materials 455: 277–291.
30. STORK, D, et al. 2014. "Materials R&D for a timely DEMO: Key findings and recommendations of the EU Roadmap Materials Assessment Group." Fusion Engineering and Design 89: 1586-1594.
31. STORK, D, and S Zinkle. 2017. "Introduction to the special issue on the technical status of materials for a fusion reactor." Nuclear Fusion 57.
32. SUBLET, J. CH. 2010. The European Activation File:EAF-2010 neutron-induced cross section library. Euratom/CCFE fusion association.
33. SUBLET, J.-C., EASTWOOD J., and MORGAN J.. 2016. THE FISPACT-II USER MANUAL. Abingdon: Culham Science Centre.
34. SUBLET, J.-CH. , et al. 2017. "FISPACT-II: An Advanced Simulation System for Activation, Transmutation and Material Modelling." Nuclear Data Sheets 139: 77-137.
35. FUSION FOR ENERGY 2008. Technical Specifications EUROFER Material Database F4E-2008-GRT-010 (PNS-MD). Fusion for Energy.
36. U.S. Energy Information Administration. 2017. "International Energy Outlook - 2017." DOE/EIA-0484.
37. WENNINGER, R, et al. 2016. "The physics and technology basis entering European system code studies for DEMO." Nuclear Fusion 57.
38. YOUSSEF, M., et al. 1998. "Current Status of Reduced-Activation Ferritic/Martensitic Steels R&D for Fusion Energy Verification of ITER shielding capability and FENDL data benchmarking through analysis of

bulk shielding experiment on large SS316/water assembly bombarded with 14 MeV ." Fusion Engineering and Design 42: 235-245.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Publikacijos žurnaluose *Clarivate analytics Web of Science* duomenų bazėse

1. Tidikas A., Stankūnas G. WCLL blanket module structure variation influence on neutron activation inventories (<https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2883482>) // IEEE Transactions on Plasma Science. ISSN 0093-3813. eISSN 1939-9375. Vol. 47. Iss. 1. 2019. p. 874-877.
2. Stankūnas G., Tidikas A., Pereslavstev P., Catalán J., Garcíac R., Ogando F, Fischer U. Activity inventories and decay heat calculations for a DEMO with HCPB and HCLL blanket modules// (<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2015.03.034>) // Fusion Engineering and Design. ISSN: 0920-3796. 2016.
3. Stankūnas G., Tidikas A. Analysis of the WCLL European DEMO blanket concept in terms of activation and decay heat after exposure to neutron irradiation (<http://doi.org/10.2298/NTRP1703217S>) // Nuclear Technology & Radiation Protection. ISSN 1451-3944. Vol. 32. No. 3. p. 217-221 2018.
4. Stankūnas G., Tidikas A., Batistoni P., Lengar I. Jet Contributors Analysis of activation and damage of ITER material samples expected from DD/DT campaign at JET (<http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.07.013>) // Fusion Engineering and Design. ISSN 0920-3796. Vol. 125. 2017. p. 307–313 2017.
5. Stankūnas G., Čufar A., Tidikas A., Lengar I., Batistoni P. Activation inventories after exposure to DD/DT neutrons in safety analysis of nuclear fusion installations// Radiation Protection Dosimetry, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncx262> 2018.
6. Stankūnas G., Tidikas A., Fischer U. Activity inventories and decay heat generation of the Test Cell facility of IFMIF-DONES // Fusion Engineering and Design, ISSN 0920-3796, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.03.040>. 2018.
7. Stankūnas G, Moro F., Tidikas A., Activity and decay heat calculations for the European DEMO WCLL breeder blanket module including activated LiPb flow // Fusion Engineering and Design, ISSN 0920-3796, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.04.038>. 2019.

Straipsniai tarptautinių konferencijų leidiniuose

1. Tidikas A. Investigation of DEMO structural material characteristics induced by neutron irradiation // 12th international conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2015), Kaunas, Lithuania, May 26–27, 2015. Kaunas: LEI, 2015. ISSN 1822-7554, p. 428–435.
2. Tidikas A., Stankūnas G. Neutron activation in water cooling systems of nuclear fusion devices // 13th Annual international conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2016), Kaunas, Lithuania, May 26–27, 2016. Kaunas: LEI, 2016. ISSN 1822-7554, p. 332–340.
3. Tidikas A., Stankūnas G. Influence of breeder blanket module size variation on neutron activation inventories // 14th Annual international conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2017), Kaunas, Lithuania, May 25–26, 2016. Kaunas: LEI, 2016. ISSN 1822-7554.

Pranešimai tarptautinėse konferencijose

1. Tidikas A. Investigation of DEMO Structural Material Characteristics Induced by Neutron Irradiation // 12th international conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2015), Kaunas, Lithuania, May 26–27, 2015. Kaunas: LEI, 2015. ISSN 1822-7554, p. 428–435.
2. Tidikas A. Radioactivity Assessment in Nuclear Fusion Reactors // Medical Physics in the Baltic States: proceedings of the 12th international conference on medical physics, Kaunas, Lithuania, 5–7 November, 2015 / Kaunas University of Technology. Kaunas: Technologija. ISSN 1822-5721. 2015, p. 81–83.
3. Tidikas A., Stankūnas G. Neutron Activation in Water Cooling Systems of Nuclear Fusion Devices // 13th Annual international conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2016), Kaunas, Lithuania, May 26–27, 2016. Kaunas: LEI, 2016. ISSN 1822-7554, p. 332–340.
4. Tidikas A., Stankūnas G. Neutron Activation in Heat Transfer Systems of Nuclear Fusion Devices // 29th Symposium on Fusion Technology (SOFT 2016). 5-9 September 2016. Prague Congress Center
5. Stankūnas G., Tidikas A. Comparative Analysis of WCLL to Different European DEMO Blanket Concepts in Terms of Activation and Decay Heat after Exposure to Neutron Irradiation // 26th IAEA Fusion Energy Conference, 7–22 October, 2016, Kyoto, Japan.
6. Stankūnas G., Tidikas A. and JET Contributors, Activity Inventories and Decay Heat of ITER Material Samples after Long Term Irradiations with 14 MeV Fusion Neutrons at JET // 9th IAEA Technical Meeting on Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices, IAEA Headquarters, Vienna, Austria 20 - 23 March 2017

7. Stankūnas G., Cufar A., Tidikas A., Lengar I., Batistoni P. and JET Contributors, Activation Inventories and Material Damage After Exposure to DD/DT Neutrons in Safety Analysis of Nuclear Fusion Installations// Neutron and Ion Dosimetry Symposium (NEUDOS13), Kraków, Poland, 14–19 May 2017.
8. Tidikas A., Stankūnas G. WCLL Blanket Module Structure Variation Influence on Neutron Activation Inventories// 27th IEEE Symposium on Fusion Engineering, Shanghai, China, 4–8 June 2017.
9. Stankūnas G., Tidikas A., Fischer U. Activity Inventories and Decay Heat Generation of The Testcell Facility Of IFMIF-DONES The 13th International Symposium on Fusion Nuclear Technology ISFNT-13, 25–29 September 2017, Kyoto, Japan.
10. Tidikas A. Application of Sensitivity Analysis in Evaluation of Aggregate Cross-Sections for Irradiated EUROFER and CuCrZr alloys // 15th Annual international conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2018), Kaunas, Lithuania, May 23–28, 2018. Kaunas: LEI, 2018. ISSN 1822-7554. p. 332–340.

INFORMACIJA APIE AUTORIŲ

Vardas, pavardė: Andrius Tidikas

Tautybė: lietuvis

Gimimo data: 1989 m. sausio 28 d.

Gimimo vieta: Panevėžys

Išsilavinimas:

2008–2012 m. – studijos Kauno technologijos universiteto Matematikos ir gamtos mokslų fakultete, įgytas taikomosios fizikos bakalauro laipsnis;

2012–2014 m. – studijos Kauno technologijos universiteto Matematikos ir gamtos mokslų fakultete, įgytas medicinos fizikos magistro laipsnis;

2014–2018 m. – doktorantūros studijos Lietuvos energetikos instituto Branduolinių įrenginių saugos laboratorijoje.

Kontaktai: el. paštas: Andrius.Tidikas@lei.lt.

RESUME

This thesis is devoted for neutron transport and material activation analysis in fusion devices designed towards the goal of enabling clean and sustainable energy production out of nuclear fusion. Material selection is a significant issue in fusion applications and is yet to be resolved. Due to unique conditions present in nuclear fusion reactors, material testing is required in order to evaluate their feasibility. Currently, only *Joint European Torus* (JET) reactor can provide neutron emissions from deuterium-tritium plasma source with particle energies

and fluxes relevant for nuclear fusion production. Compared to planned nuclear fusion power plants, JET is a small scale device with short irradiation times. However, JET operation modes and particle energies are pertinent to larger scale fusion devices as well, hence the material for fusion application experiments are set in place. Future nuclear fusion power plants will have to withstand much higher neutron fluxes for significantly longer exposure times so the experience gained at JET might not be sufficient. This issue in material testing leads to the realization of *International Fusion Materials Irradiation Facility DEMO oriented neutron source* (IFMIF-DONES). IFMIF-DONES is deuterium lithium source based accelerator facility with purpose to test fusion relevant materials under long neutron exposure. In comparison to nuclear fusion reactors, neutron energies at IFMIF-DONES should be significantly higher in order to accelerate the material testing process. Material testing at IFMIF-DONES will result in much larger activation inventories compared to JET and similar to those produced in nuclear fusion power plants. Finally, experience gained from JET and IFMIF material testing should be used in realization of *demonstration power plant DEMO*. In this work material activation in planned JET experiments, anticipated IFMIF operation and in preliminary DEMO operation were analyzed.

The main goal of this work was to investigate neutron transport processes and activation characteristics in the nuclear fusion reactor components located near the radiation source. Accordingly, six objectives were formulated as follow:

1. Investigation of material activation in JET long term irradiation station after deuterium-deuterium and deuterium-tritium fusion caused neutron irradiation and determination of deuterium-deuterium and deuterium-tritium activation response to different irradiation scenarios.
2. Investigation of neutron reactions and induced activities in IFMIF-DONES Test Cell facility biological shielding structures and DEMO breeder blanket.
3. Determination of DEMO WCLL breeder blanket module activation characteristics.
4. Determination of DEMO fusion power and vacuum vessel volume change influence on WCLL breeder blanket module activation characteristics
5. Investigation of PbLi flow cycle in WCLL blanket module in terms of material activation.
6. Investigation of DEMO neutron spectra influence on structural steel activation.

Neutron interaction with structural and functional materials can cause *gamma* or secondary particle emissions as well as turn stable nuclei radioactive. Neutrons can also greatly affect mechanical integrity of materials. These processes can be estimated by performing activation analysis. Activation analysis can determine the design and operation limits of nuclear fusion devices. More so, collation of experimental data of nuclear fusion devices and activation

analysis are instrumental for validation of nuclear data libraries and neutron transport codes.

In this work neutron activation calculation methodology was extended in order to aggregate complex irradiation scenarios for nuclear fusion devices.

A novel approach utilizing sensitivity analysis was presented in order to investigate neutron spectra.

In this work neutron transport and material activation were analyzed in a close proximity of fusion relevant neutron sources in order to assess the neutron irradiation influence on the breeder blanket modules of DEMO nuclear fusion power plant concept. This study is based on multiple experiments designed to ensure successful operation and development of DEMO. JET experiments provide DEMO relevant neutron flux densities, while IFMIF-DONES is designed to match the lifetime activation of DEMO power plant. Consolidated results from neutron transport and material activation lead to the following conclusions:

1. Material activation caused by neutron irradiation from deuterium-tritium fusion is 10-50 times larger compared to deuterium-deuterium fusion in JET device in terms of Specific activity and dose rate. Specific activities and dose rates resulted from deuterium-deuterium fusion are affected more (up to ~30 %) by the change of irradiation sequence (from continuous to pulse mode) than from deuterium-tritium fusion.

2. Principal radionuclide production in IFMIF-DONES device (throughout the Test Cell) is governed by the high energy neutron reactions ((n, p), (n, 2n)) compared to DEMO (first wall). For SS316L(N)-IG Mn-56 is mainly produced from Fe-56 (n, p) (~54%) reaction in IFMIF-DONES and from Mn-55 (n, g) (~89%) in DEMO. Fe-55 is being produced in IFMIF-DONES from Fe-56 (n, 2n) (~92%) while the same reaction is only responsible for 58% of total radionuclide production in DEMO with Fe-54 (n, g) constituting (~39%). Cr-51 in IFMIF-DONES produced by Cr-52 (n, 2n) (~67%) reaction, while in DEMO Cr-50 (n, g) is responsible for (~70%) of Cr-51. Activities in IFMIF-DONES retain relatively higher values compared to DEMO. After 1 day of cooling IFMIF-DONES retain ~80% of maximum achieved activity in steel compared to ~65% of DEMO. After 1 month of cooling the respective values are equal to ~63% for IFMIF-DONES and ~51% for DEMO with tendency to proportionally increase as the cooling period increases.

3. EUROFER 97-3 is a major contributor to the activation inventories in DEMO WCLL breeder blanket module with Mn-56, Cr-51 and Fe-55 as key radionuclides. It has the highest activity and decay heat values after 1 year of cooling till the remaining of the investigated time. Tungsten has the highest activity and decay heat within 1 year cooling period. W-187 and W-187 as key radionuclides in activated tungsten. Activity of PbLi peaks at the irradiation and

retains high values for short period of time due to fast decaying Pb-205m, Pb-203m and Li-8. H-3 produced in the breeder material is removed from the blanket.

4. After $\sim 1/3$ increase in fusion power and $\sim 2/3$ increase in vacuum vessel volume obtained breeder blanket module specific activity differences ranged from 2 to 15 times for armor, the first wall and breeder zone segments and from 10 to 100 times for the backplate, caps and manifold.

5. PbLi activation at the end of irradiation and within 1 second of cooldown is $\sim 35\%$ and $\sim 10\%$ higher in comparison to continuous and DEMO operation scenarios respectively when PbLi flow cycle scenario is assumed instead.

6. On the basis of sensitivity analysis, neutron energies ranging from 24.2 to 707 keV and from 8.6 to 14.2 MeV were determined to be the most significant in terms of activation in DEMO blanket module EUROFER-97-3 steel structure.

UDK 621.039.6(043.3)

SL. 2019-07-02, 2,5 leidyb. apsk. I. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas