

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
ĶĪMIJAS FAKULTĀTE

**TRITIJA UZKRĀŠANĀS APVIENOTĀ EIROPAS
TORA VAKUUMA KAMERAS SIENAS BERILIJA
MATERIĀLOS**

BAKALaura DARBS

Autore: **Ieva Igaune**

Studenta apliecības Nr.: ii12027

Darba vadītāja: Dr.ķīm. Elīna Pajuste

RĪGA

2015

ANOTĀCIJA

Tritija uzkrāšanās Apvienotā Eiropas Tora vakuuma kameras sienas berilija materiālos. Igaune I., zinātniskā vadītāja: Dr.ķīm. Pajuste E., Bakalaura darbs, 47 lappuses, 21 attēls, 8 tabulas, 51 literatūras avots. Latviešu valodā.

KODOLSINTĒZES REAKTORS, APVIENOTĀS EIROPAS TORSS, BERILIJS, VIRSMAS STRUKTŪRA, PLAZMAS IEDARBĪBA, TRITIJA SADALĪJUMS

Darbā optimizēta un pielietota metodika tritija sadalījuma noteikšanai JET vakuuma kameras berilija materiāliem, kā arī novērtētas virsmas un ķīmiskā sastāva izmaiņas tiešas plazmas un neitronu starojuma iedarbībā. Darbā izmantotas Skenējošo elektronu mikroskopijas, Dispersās enerģijas rentgenstaru spektroskopijas, šķīdināšanas metodes un radiometriskās metodes tritija mērījumiem – gāzu jonizācijas un scintilācijas metodes.

ABSTRACT

Tritium accumulation in Joint European Torus beryllium wall materials. Igaune I., scientific supervisor: Dr.chem. Pajuste E., Bachelor's Theses, 47 pages, 21 figures, 8 tabs, 51 literature references. In Latvian.

FUSION REACTOR, JOINT EUROPEAN TORUS, BERYLLIUM SURFACE STRUCTURE, PLASMA EFFECTS, TRITIUM APPORTIONMENT

Experimental work included optimized and used methods for tritium distribution of JET vacuum chamber beryllium materials as well as the estimated surface and the chemical changes in the direct plasma and neutron radiation. Different methods have been used in this work – scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy, dissolution and radiometric methods of tritium measurements – gas ionization and scintillation methods.

SATURS

ANOTĀCIJA.....	2
ABSTRACT	3
APZĪMĒJUMU SARAKSTS.....	5
IEVADS	6
1. LITERATŪRAS APSKATS	8
1.1. Kodolsintēze kā enerģijas avots.....	8
1.2. Tokamaka veida kodolsintēzes reaktori.....	9
1.2.1. <i>ITER</i>	10
1.2.2. <i>DEMO</i>	12
1.2.3. <i>Tora Supra</i>	12
1.2.4. <i>JT-60SA</i>	12
1.3. JET – Apvienotais Eiropas Torss.....	12
1.4. Berilijs kā vakuuma kameras sienas materiāls	14
1.4.1. <i>Berilija funkcijas kodolsintēzes reaktorā</i>	14
1.4.2. <i>Berilija izmaiņas kodolsintēzes reaktora apstākļos</i>	15
1.5. Tritijs kodolsintēzes reaktorā.....	15
2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA	18
2.1. Paraugu raksturojums	18
2.2. Metodes.....	19
2.2.1. <i>SEM un EDX</i>	19
2.2.2. <i>Tritija sadalījuma noteikšana</i>	20
2.3. Rezultātu matemātiskā apstrāde.....	28
3. REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS	30
3.1. Paraugu virsmas struktūra.....	30
3.2. Tritija kopējais daudzums un sadalījums tilpumā.....	40
3.3. Tritija uzkrāšanos ietekmējošu faktoru novērtējums	41
SECINĀJUMI	43
LITERATŪRAS SARAKSTS	44

APZĪMĒJUMU SARAKSTS

- CFC** – (*Carbon Fiber Composite materials*) - oglekļa šķiedras kompozītmateriāli
- DEMO** – (*DEMO*nstration power plant) – Demonstrācijas kodolsintēzes spēkstacija
- EDX** – (*Energy dispersive X-ray spectroscopy*) – Enerģijas dispersijas spektrskopija
- EURATOM** – (*European Atomic Energy Agency*) – Eiropas Atomenerģijas Asociācija
- EUROfusion** – (*The European Consortium for the Development of Fusion Energy*) – Eiropas Konsorcijs Kodolsintēzes Enerģētikas Attīstībai
- ICF** – (*Inertially confined plazma*) – Inerciālā plazmas ierobežošana
- ITER** - (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) - Starptautiskais Eksperimentālais Kodolsintēzes Reaktors
- ITER Like Wall Project (ILW)** – (*International Thermonuclear Experimental Reactor Like Wall Project*) – Starptautiskā Eksperimentālā Kodolsintēzes reaktora veida sienas projekts
- JET** – (*Joint European Torus*) – Apvienotais Eiropas Torss
- MCF** – (*Magnetically confined fusion*) – Magnētiska plazmas ierobežošana
- SEM** – (*Scanning electron microscope*) – Skenējošais elektronu mikroskops
- ŠS** – šķidrie scintilātori
- Tokamak** – (no krievu val.: тороидальная камера с магнитными катушками) – toroidālā kamera ar magnētiskām spolēm

IEVADS

Enerģijas ieguvei šobrīd pasaulē plaši tiek izmantoti dažādi enerģijas avoti, piemēram, fosilais kurināmais, vējš, ūdens u.c. Tomēr arvien pieaugošais pieprasījums pēc enerģijas liek meklēt jaunus, videi un cilvēkam draudzīgus enerģijas avotus.

Perspektīvs enerģijas iegūšanas avots ir kodolsintēzes reakcija starp vieglo elementu kodoliem. Efektīva ir kodolreakcija starp ūdeņraža izotopu, deitērija (${}_1^2\text{H}$) un tritija (${}_1^3\text{H}$), kodoliem. Taču, lai iegūtu pozitīvu enerģijas bilanci, šādas reakcijas norisei ir nepieciešami īpaši apstākļi. Kodolsintēzes reakcija iespējama Tokamaka (no krievu val.: тороидальная камера с магнитными катушками) veida reaktorā, kur kodolsintēzes reakcija notiek plazmā, kuru noteiktā formā tur magnētiskais lauks, ko rada magnētiskās spoles.

Kodolsintēzes attīstības veicināšanai ir izveidots starptautisks konsorcijs, kura sastāvā ir Amerikas Savienotās Valstis, Eiropas Savienība, Indija, Japāna, Korejas Republika, Krievijas Federācija un Ķīnas Tautas Republika, ar mērķi izveidot tokamaka veida, eksperimentālo reaktoru - Starptautisko eksperimentālo kodolsintēzes reaktoru (International Thermonuclear Experimental Reactor – ITER) Kadarašā, Francijā.

Šobrīd lielākais Tokamaka veida reaktors Apvienotais Eiropas Torss (Joint European torus – JET) atrodas Kalemā, Lielbritānijā. Šajā reaktorā tiek pārbaudīti plazmas kameras materiāli, to izturība kodolsintēzes reaktora apstākļos un tas, cik lielā mērā tie absorbē kodoldegvielu - tritiju. Tritija uzkrāšanās reaktora materiālos ir nevēlama gan ekonomisku (degvielas zudumi), gan no drošības viedokļa tā radioaktivitātes dēļ.

Darba mērķis:

Novērtēt berilija materiālu izturību kodolsintēzes reaktora ekspluatācijas apstākļos un tritija uzkrāšanās apjomus tajos.

Darba uzdevumi:

1. Novērtēt JET vakuuma kameras berilija materiālu virsmas struktūras izmaiņas un nosēdumu sastāvu;
2. Veikt tritija sadalījuma noteikšanas metodes optimizāciju;
3. Noteikt tritija sadalījumu berilija ķieģeļu tilpumā;

Darbā izmantotas skenējošo elektronu mikroskopijas (Scanning electron microscope – SEM), enerģijas dispersijas spektroskopija (Energy dispersive X-ray spectroscopy – EDX), gāzu hromatogrāfijas, šķīdināšanas metodes un radiometriskās metodes tritija mērījumiem. Darbs izstrādāts Horizon 2020, EURATOM projekta „Plazmas kontaktkomponenti no JET plazmas iekārtas ITER-Veida-Sienas kampaņas (Plasma - Facing Components from JET-ILW)” ietvaros LU Ķīmiskās fizikas institūtā.

1. LITERATŪRAS APSKATS

Literatūras apskatā ir aplūkota kodolsintēze kā nākotnes enerģijas avots, dažādi tokamaka veida reaktori, kuros tiek testēti vakuuma kameras materiāli un vadīšanas iespējas kā arī pašreiz lielākais tokamaka veida reaktors – JET, tā vēsture, kampaņas un projekti. Tiek apskatīts arī reaktora sienas materiāls – berilijs, tā īpašības, funkcijas kodolsintēzes reaktorā un izmaiņas pēc ekspluatācijas vakuuma kamerā.

1.1. Kodolsintēze kā enerģijas avots

1920.gadā, britu ķīmiķis un fiziķis F.V.Astons konstatēja, ka četri ūdeņraža kodoli ir smagāki nekā viens hēlija kodols. Lai gan tas nebija Astona eksperimenta galvenais mērķis, šī atklājuma nozīmību nekavējoties pamanīja un atzina cits britu zinātnieks, astrofiziķis A.Edingtons.

1920.gadā Edingtons uzrunā Britu Asociāciju Zinātnes attīstībai (The British Association for the Advancement of Science) apgalvojot, ka Astona mērījums: masu starpība starp ūdeņraža un hēlija kodoliem nozīmē, ka Saule var spīdēt, pārveidojot ūdeņraža kodolus hēlija kodolos. Saskaņā ar Einšteina formulu $E=mc^2$, Saule pārveidojot ūdeņraža kodolus hēlijā, pārvērš enerģijā aptuveni 0,7% no savas masas [1].

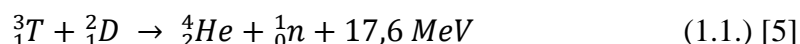
Šie atklājumi radīja ideju par kodolsintēzes enerģijas praktisku izmantošanu uz Zemes. Pēc Otrā Pasaules kara pētījumi kodolsintēze nozarē izplatījās visā pasaulē, bet lielākā daļa no tiem bija slepeni, jo bija paredzēti militāriem nolūkiem. Situācija būtiski mainījās 1955.gadā pēc ANO konferences Ženēvā - par atomenerģijas mierīgu izmantošanu (Atom for Peace). Eiropā tika izveidotas apvienības starp Eiropas Atomenerģijas Asociāciju (European Atomic Energy Community – EURATOM) un zinātniskajām institūcijām [2].

Kodolsintēze ir process, kurā vieglāki kodoli saplūst un izdalās enerģija. Vieglākiem ūdeņraža kodoliem saplūstot, veidojas smagāks hēlija kodols un papildus izdalās liels enerģijas daudzums. Šī parādība ir pamatā visām zvaigznēm, piemēram, Saulei, kuras izdalīto enerģiju mēs saņemam siltuma un gaismas veidā [3].

Zvaigznēs kodolsintēzes proces var norisināties, jo to iekšienē ir milzīgs gravitācijas spiediens un temperatūra, kas pārsniedz 10 miljonus grādu pēc Celsija skalas. Uz Zemes šāda veida kodolsintēzes process ir realizējams starp ūdeņraža kodoliem – deiteriju un tritiju.

Lai kodolsintēzes reakcija notiktu, jāpārvar elektrostatiske atgrūšanās spēki, kas iespējams novērojot t.s. Lavsona kritēriju – temperatūra, saspiešanas laiks, jonu blīvums [4].

Tritija un deiterija kodolsintēzes reakcijā iegūst hēlija kodolu, brīvu elektronu un 17,6 MeV lielu enerģiju (1.1.). Iegūto enerģiju izmanto tvaika uzkaršēšanai, kas savukārt tālāk var darbināt elektrības ģeneratora turbīnas.

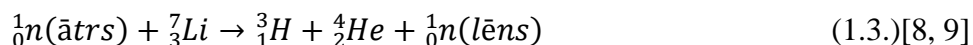


Kodolsintēzes reakcijas izejviela deiterijs ir stabils izotops, un sastāda 0,015% no kopējā ūdeņraža daudzuma. Deiterijs no ūdens tiek izdalīts, izmantojot virkni ķīmisko reakciju [6]. Pasaules okeānija un citas ūdens tilpnes satur apmēram 25 miljonus tonnu deiterija, tādā veidā ūdenstilpnes sniedz gandrīz neizsmaļamu daudzumu šī izotopa [7].

Tritijs dabā gandrīz nav sastopams, jo tā pussabrukšanas periods ir ļoti īss – 12,32 gadi. Visdaudzsolāšākais tritija iegūšanas veids ir litija izotopa (${}^6\text{Li}$) apstarošana ar lēnajiem neitroniem (1.2.).



Litija ${}^6\text{Li}$ izotops dabā ir 7,4%, līdz ar to, tas ir ierobežots tritija ieguves avots. Izmantojot ātros neitronus, tritiju var iegūt arī no otra litija izotopa (${}^7\text{Li}$), kas dabā ir sastopams vairāk (1.3.).



Lai kodolsintēzes reakcija notiktu, tās degviela (ūdeņraža izotopu kodoli – deitērijs un tritījs) ir jākaršē ļoti augstā temperatūrā – virs 100 miljoniem grādu pēc Celsija skalas, jeb jāiegūst augstas temperatūras plazma.

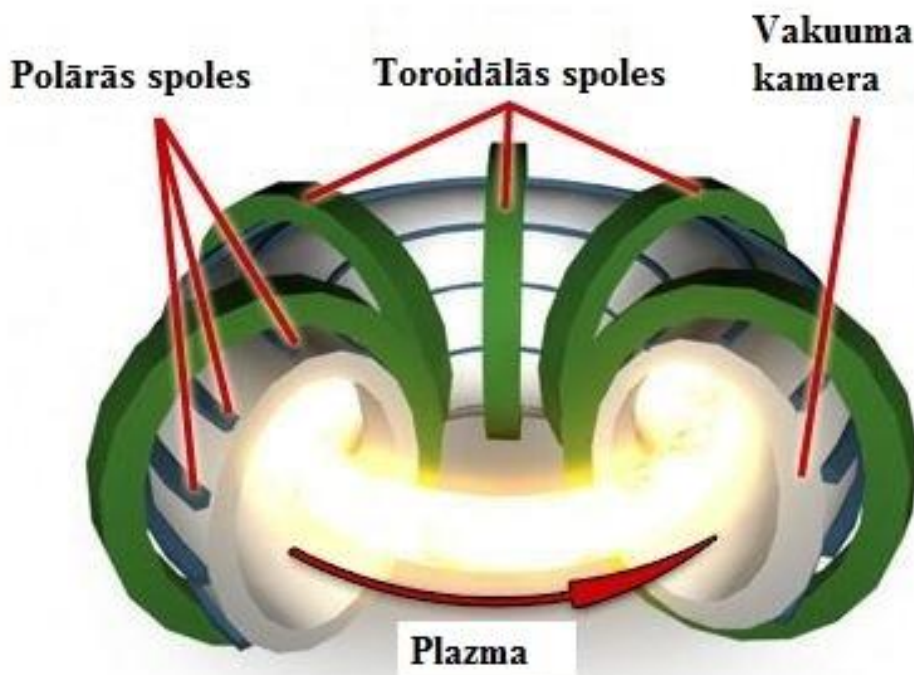
Karstā plazma ir miljons reizes blīvāka par gaisu. Lai plazma netiktu piesārņota un nenonāktu saskarē ar reaktora virsmu, to kontrolē ar spēcīgu magnētisko lauku [10].

Plazmas ierobežošanai izmanto 2 principus – magnētiska plazmas ierobežošana (MCF – magnetically confined fusion) un inerciāla plazmas ierobežošana (ICF – inertially confined plasma). Magnētiskā ierobežošana saistās ar magnētisko un elektrisko lauku izmantošanu, lai apsildītu un saspiestu ūdeņraža plazmu. Inerciālā ierobežošana saistās ar lāzeru vai neitrāla jonu kūļa izmantošanu, lai saspiestu un apsildītu plazmu [11, 12].

1.2. Tokamaka veida kodolsintēzes reaktori

Tokamaks ir torss vai nepārtraukta riņķveida caurule, kuru ieskauj magnētiskās spoles, kas rada spēcīgu magnētisko lauku plazmas noturēšanai [13]. Tokamaks ir visvairāk attīstītā magnētiskās ierobežošanas sistēma pasaulē un ir pamats, lai izstrādātu nākotnes kodolsintēzes reaktoru. Tokamaka pieeja tika izgudrota Padomju Savienībā 1960.gadā un to drīz vien pārņēma pētnieki visā pasaulē. Tokamaka darbības nodrošināšanai nepieciešami vairāk komponenti.

Tokamaka veida kodolsintēzes reaktora kamerā plazma atrodas praktiski vakuumā. Vakuumu nodrošina sūkņu sistēma. Kodolsintēzes degvielu kamerā ievada gāzes vai cietu tablešu formā un tur uzkarsē līdz tā pāriet plazmas stāvoklī un spēj vadīt strāvu. Karstā plazma tiek noturēta izmantojot spēcīgu magnētisko lauku. Divu veidu magnētisko spoļu kombinācija – toroidālās un polārās lauka spoles (skat. 1.1.att.) – rada magnētisko lauku gan horizontālā, gan vertikālā virzienā, radot t.s. būri, kas notur plazmu.

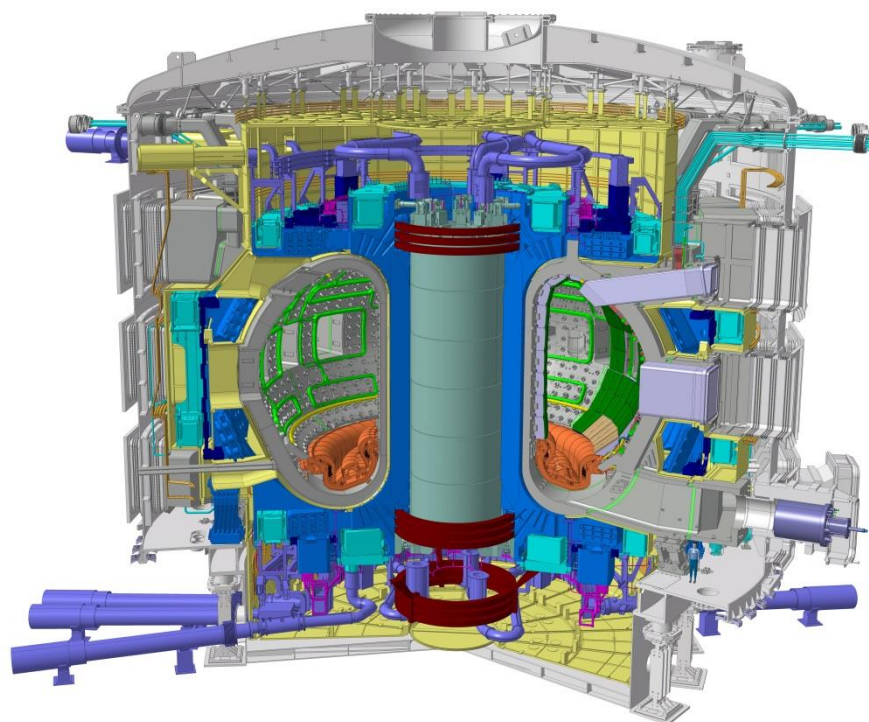


1.1.att. Magnētisko spoļu izvietojums tokamaka veida reaktorā [14]

Papildus plazmas sildīšana tiek nodrošināta ar neitrālo jonu kūli. Šajā procesā neitrāli ūdeņraža atomi lielā ātrumā tiek injicēti plazmā, kur tie tiek jonizēti un noturēti pateicoties magnētiskajam laukam. Tiem palēlinoties, tie atdod savu enerģiju plazmai un uzkarsē to [10].

1.2.1. ITER

ITER (skat. 1.2.att.) ir pasaules lielākais un modernākais eksperimentālais kodolsintēzes reaktors, kas šobrīd tiek būvēts Kadarašā, Francijā. ITER projekta galvenais mērķis ir iegūt desmit reizes vairāk enerģijas nekā tiek pievadīts. Ir paredzēts, ka ITER ražos 500MW enerģijas – pirmais kodolsintēzes eksperiments, kas radīs elektroenerģiju.



1.2.att. ITER tokamaka veida reaktors [14]

ITER tiks pārbaudītas galvenās tehnoloģijas, lai spertu nākošo soli kodolsintēzes reaktoru attīstībā: Demonstrācijas kodolsintēzes spēkstacijas izveidē (DEMONstration power plant – DEMO), kas parādīs, ka kodolsintēzes procesā iegūto enerģiju ir iespējams izmantot komerciāliem mērķiem [14].

Pašreizējā ITER dizainā galvenā kameras siena sastāv no 700 m² aktīvi atdzesēta berilija un 50 m² volframa. Ķieģeļi, kas izgatavoti no oglekļa šķiedras kompozītmateriāliem (Carbon Fiber Composite materials – CFC) un volframa ir paredzēti to vakuuma kameras vietu izklāšanai, kur būs visaugstākās temperatūras. Šī izvēle ir kompromiss, balstoties galvenokārt uz pieredzi, kas iegūta testējot materiālus dažādos tokamaka veida reaktoros [15].

ITER celtniecības darbi sākās 2010.gadā un ir paredzams, ka tie beigsies 2019.gadā. Pēc tam sekos reaktora nodošana ekspluatācijā un tiks pārbaudīts, vai visas sistēmas darbojas kopā un iekārta tiks sagatavota pirmās plazmas iegūšanai. ITER pirmo plazmu ir plānots iegūt 2020.gada novembrī. ITER ekspluatācijas posms varētu ilgt 20 gadus.

Pirmkārt, tiek plānots vairāku gadu izmēģinājuma periods, kura laikā iekārta darbosies uz tīra ūdeņraža un būs pieejams uzlabojumiem un dažāda veida pārbaudēm. Otrkārt, tiks pārbaudīts kā sienas materiāli tiek pasargāti no deitērija un neliela daudzuma tritija plazmas. Un visbeidzot, zinātnieki sāks trešo posmu, kurā ITER sāks darboties izmantojot vienādas attiecības deitērija/tritija maisījumu pie pilnas kodolsintēzes enerģijas [14].

1.2.2. DEMO

Nākošais solis pēc ITER ir DEMO reaktora būvniecība. DEMO paredzēts iegūt ievērojamu daudzumu elektroenerģijas un tas spēs atražot tritiju. Tas tiks veidots, lai ražotu 500MW elektroenerģijas, kas prasīs siltuma jaudu apmēram 1500 MW apmērā. Ja DEMO tiks būvēts tik pat liels kā ITER, tas prasīs lielāku siltuma plūsmu caur reaktora sienām un uzlabos plazmas sniegumu. Pētījumi apliecina, ka to var panākt palielinot ITER lineāros izmērus par 15% un plazmas blīvumu par 30% [16].

Konceptuālais dizains varētu būt gatavs līdz 2017.gadam. Ja viss noritēs pēc plāna, DEMO ievēdīs kodolsintēzi industriālajā ērā, sākot savu darbību 2030.gadā un pārveidojot kodolsintēzes enerģiju elektroenerģijā jau 2040.gadā. Kamēr ITER tiek būvēts un DEMO ir konceptuālajā posmā, vairākas kodolsintēzes iekārtas, ar dažādām īpašībām un mērķi, darbojas visā pasaulē, lai veiktu papildus pētījumus ITER atbalstam [14].

1.2.3. Tora Supra

Tore Supra spēlē lielu lomu ITER izstrādē. Tas savu darbību aizsāka 1988.gadā.[14.]

Tore Supra ir pirmais tokamaks pasaulē, kas ir aprīkots ar supravadītājmagnētu un cita veida aprīkojumu, kas ļauj zinātniekiem iegūt ilgtermiņa plazmu (6min un 30 sekundes – 2003.gadā) [17].

1.2.4. JT-60SA

Tas ir starptaurisks pētniecības un attīstības projekts, kurā ir iesaistīta Japāna un Eiropa. Tas ir uzcelts Nakas pilsētā, Japānā, izmantojot JT-60 Upgrade eksperimentu. SA nozīmē „super uzlabotais”, jo eksperimentā tiks izmantotas supravadošās spoles un pētīta plazmas darbība.

JT-60SA ir kodolsintēzes eksperiments, kas veidots, lai atbalstīti ITER darbību un izpēti, kā arī optimizētu nākotnes kodolsintēzes reaktoru darbību [18].

1.3.JET – Apvienotais Eiropas Torss

JET ir šobrīd pasaulē lielākais un jaudīgākais kodolsintēzes reaktors, kurš atrodas Kalemā, Lielbritānijā. Šobrīd tā ir vienīgā iekārta pasaulē, kas izmanto deiterija un tritija degvielu, taču tā darbību nodrošina ārējie enerģijas avoti. JET reaktorā notiekošie

eksperimenti un projekti ir paredzēti, lai nodrošinātu drošu un efektīvu nākotnes kodolsintēzes reaktoru darbību, kā piemēram Starptautiskā Eksperimentālā kodolsintēzes reaktora ITER [3].

JET notiek pētījumi par kodolsintēzes enerģiju kā potenciālu, drošu, tīru un faktiski neierobežotu enerģijas avotu nākošajām paaudzēm. Eiropas Konsorcijs Kodolsintēzes Enerģētikas Attīstībai (The European Consortium for the Development of Fusion Energy – EUROfusion) nodrošina, lai JET tiktu izmantots efektīvi un mērķtiecīgi, izpētot materiālus un nepieciešamās tehnoloģijas ITER būvniecībai [3].

JET ir viens no vecākajiem tokamaka veida reaktoriem. 1977.gadā tika izvēlēta JET atrašanās vieta un sākās celtniecības darbi. Reaktors tika uzbūvēts kā plānots, piecu gadu laikā, un 1983. gada 25.jūnijā tika iegūta pirmā plazma. Gadu vēlāk, 1984.gadā, JET tika oficiāli atklāts [19, 3].

1991. gadā JET ieguva pirmo kontrolēto kodolsintēzes enerģiju, bet 1997.gadā ieguva 16 MW lielu siltuma jaudu [20]. JET tehniekie parametri 1984.gadā un 2015.gadā ir doti 1.1. tabulā [19].

1.1.tabula

JET tehniskie parametri 1984.gadā un 2015.gadā

Parametrs	1984.gads	2015. gads
Plazmas minimālais rādiuss (horizontāli), m	1,25	1,25
Plazmas minimālais rādiuss (vertikāli), m	2,10	2,10
Plazmas maksimālais rādiuss, m	2,96	2,96
Plazmas viena cikla degšanas ilgums, s	10	20-60
Toroidālais magnētiskais lauks, T	3,45	3,45
Plazmas strāva (cirkulārā plazma), MA	3,20	3,20
Plazmas strāva (D-formas plazma), MA	4,80	4,80

ITER reaktoram izvēlētie materiāli tiek pārbaudīti tokamakos, plazmas simulatoros, jonu kūļa un augstas siltuma plūsmas ietekmē. Savukārt lieljaudas tokamakos vēl nebija pārbaudīta materiālu spēja atrāžot tritiju, to erozija, degradācija, kā arī materiālu sajaukšanās [21].

2010.gadā JET aizsākās jauna kampaņa – ITER veida sienas projekts (ITER Like Wall Project - ILW). Līdz 2010. gadam JET reaktora sienas bija veidotas no oglekļa šķiedras kompozītmateriāliem (Carbon fiber composites – CFC), bet tie veidoja lielu daudzumu ogles

putekļu. 2010.gadā JET tika pārveidots par metāla iekārtu, visas reaktora virsmas, kas mijiedarbojas ar plazmu, tagad ir veidotas no berilija un volframa. Visi CFC tika izņemti un galvenajā kameras daļā tika aizstāti ar beriliju, beriliju pārklātiem CFC un divertorā ar volframu pārklātas CFC un viena rinda volframa ķieģeļu. Šī jaunā konfigurācija ir pazīstama kā Starptautiskā Eksperimentālā Kodolsintēzes reaktora veida siena (International Thermonuclear Experimental Reactor Like Wall Project – ILW), jo tā tika izveidota, lai demonstrētu doto materiālu atšķirības to daļiņu transportā un udeņraža izotopu saglabāšanā, un palīdzētu prognozēt ITER uzvedību ņemot vērā visus aspektus – materiālu eroziju, degradāciju u.t.t.[22, 23].

Šāda veida materiālu kombinācija – berilijs un volframs – līdz šim nav pārbaudīta plazmas iekārtās. Volframs tiks izmantots reaktora apgabalos ar augstu siltuma plūsmu. Volframam ir augsta kušanas temperatūra (3422°C), siltumvadītspēja ($173 \text{ W}/(\text{mK})$ istabas temperatūrā), izturība pret eroziju un zema tritija uzkrāšanās [24].

2011.gada 24.augustā JET atsāka savu darbību, ar vakuuma kameru, kuras sienas bija veidotas no metāla materiāliem un tika iegūts pirmais plazmas impulss, kas ilga mazāk par sekundi, ar to aizsākot berilija-volframa materiālu testēšanu kodolsintēzes iekārtā [10].

1.4.Berilijs kā vakuuma kameras sienas materiāls

Berilijs ir ķīmisko elementu periodiskās sistēmas IIA grupas elements ar atomskaitli 4. Berilijs vienkāršas vielas formā ir gaišpelēkā krāsā un eksistē heksagonālas, kristāliskas struktūras veidā. Berilijam piemīt augsta siltumvadītspēja - $190\text{W}/\text{mK}$ – istabas temperatūrā. Kā vieglajam metālam, berilijam ir ļoti augsta kušanas temperatūra. Kušanas temperatūra ir 1278°C , viršanas – 2971°C , atommasa – 9,01218, blīvums $1,85 \text{ g}/\text{cm}^2$. Berilijs plaši tiek izmantots kodoltehnoloģijās, kosmiskajās tehnoloģijās, metalurģijā kā rūdīšanas līdzeklis un sakausējumos, jo tas ir ļoti viegli savienojams ar citiem metāliem. [25.,26.]

Jāņem vērā, ka berilijs ir arī toksisks metāls, kas organismā visbiežāk nonāk ar putekļiem, kas rodas ražošanas procesā, tos ieelpojot. Berilijs zarnu traktā gandrīz nemaz neuzsūcas kā arī nepakļaujas biotransformācijai. Berilija savienojumu esamība organismā izraisa dažādas slimības, piem., dermatītu, berilozu, tūskas, eritematozi u.c. [27.]

1.4.1. Berilija funkcijas kodolsintēzes reaktorā

Berilijs ir viens no nākotnes kodolsintēzes reaktora pamatmateriāliem. Tā galvenā funkcija ir nodrošināt piemērotus apstākļus plazmai (samazināt plazmas piesārņojumu),

aizsargāt reaktora sienas no augstām siltuma plūsmām un tiešas plazmas iedarbības, kalpo kā neitronu pavairotājs banketa zonā un lai samazinātu erozijas ātrumu.

Reaktorā uz sienu iedarbojas dažādi faktori, piemēram, augsta temperatūra, spēcīgs magnētiskais lauks un neitronu starojums. Berilija sienas materiāli var tikt pakļauti arī tiešai plazmas iedarbībai, kuras rezultātā izmainās materiāliu virsmas struktūra [28, 29, 30].

1.4.2. Berilija izmaiņas kodolsintēzes reaktora apstākļos

Tieša plazmas iedarbība. Berilijs tiks izmantots kā ITER reaktora sienu galvenais materiāls. ITER (the edge-localized modes – ELMs) plazmas malas lokalizētie režīmi un traucējumi radīs lielu termisko pārejošo slodzi berilija sienas materiāliem. Šī pārejošā slodze var izraisīt berilija sienas uzkaršanu un var izraisīt dažādas virsmas izmaiņas, piemēram, materiāla zudumu, kušanu, plaisāšanu, iztvaikošanu un berilija putekļu veidošanos, kā arī ūdeņraža izotopu uzkrāšanos gan sienas materiālos, gan putekļos. Berilija erozija var samazināt sienas materiālu ekspluatācijas laiku. Kušanas procesā metāla daļiņas var tikt atrautas no virsmas un uzslāņoties citā vietā [30, 31].

Neitronu starojuma ietekme uz berilija materiāliem. Neitronu plūsmas ietekmē berilijā noris kodolreakcijas, kuru laikā rodas tritija un hēlija gāzu atomi (1.4., 1.5., 1.6., 1.7.). Gāzes burbuļiem rodoties, berilija materiāli uzbriest un samazinās to izturība.



Tritija veidošanās no berilija atomiem ir atkarīga no neitronu enerģijas spektra. Tritija ģenerēšanai berilijā nepieciešami ātrie elektroni ar enerģiju, kas lielāka par 0,5MeV. [32., 33.] Tritijs, kas uzkrājas hēlija gāzu burbuļos un porās galvenokārt ir gāze, bet tritijs, kas saistījies oksīdu ieslēgumos, var veidot tritija ūdeni, HTO [29].

Neitronu starojuma ietekmē berilija ķieģeļos rodas arī termālais stress. Termiskais stress kopā ar citiem iekšējiem stresiem var izraisīt plaisu rašanos un arī sekojošu sabrukšanu blokos. Termiskais stress ir ļoti atkarīgs no berilija siltumvadītspējas [34].

1.5. Tritijs kodolsintēzes reaktorā

Tritijs (${}^3\text{H}$) ir radioaktīvs ūdeņraža izotops. Tā pussabrukšanas periods ir 12,32 gadi, līdz ar to tā koncentrācija dabā ir ļoti zema un tas ir jāiegūst mākslīgi. Tritijs tiek uzskatīts par

maz radiotoksisku, jo tas izstaro vāju enerģiju – beta daļiņa ar vidēji 6 keV lielu enerģiju. Zemās enerģijas dēļ, tas ir nekaitīgs ārpus organisma, bet bīstams, ja nokļūst organismā to norijot vai ieelpojot.

Tritija kodols (^3H) ir nestabils, jo tam ir divi papildus neitroni. Šie neitroni dod tritijam papildus enerģijas daudzumu. Atoms emitē diva veida starojumus: beta daļiņu (β^-), kas ir elektrons, un anti-neitrīno (1.8.):



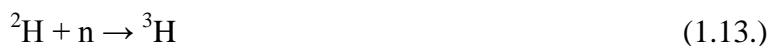
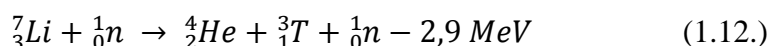
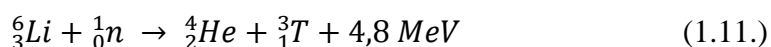
Tas samazina enerģiju kodolā, un atoms, kas rodas sabrukšanas rezultātā, - hēlija atoms (^3He), ir stabils.

Tritijs ir atrodams gan gaisā, gan ūdenī. Dēļ īsā pastāvēšanas laika, tritijs dabā ir ļoti zemā koncentrācijā. Dabā tas rodas kosmiskā starojuma ietekmē no slāpekļa un deiterija (1.9., 1.10.). Tā galvenokārt ir mijiedarbība, kas noris atmosfēras aukšējos slāņos un uz zemes tritijs nonāk ar lietus palīdzību [35, 36].



Tritijs ir radioaktīvs ūdeņraža izotops, ko izmanto pētniecībā, kodolreaktoros un neitronu ģeneratoros. Tritija radioaktivitāte ir arī praktiski noderīga. Sajaucot tritiju ar ķīmisko vielu, kas izstaro gaismu radiācijas klātbūtnē, iegūst gaismas avotu, kam nav nepieciešamas baterijas vai strāva. Šādi izveidots gaismas avots izmantojams situācijās, kad ir nepieciešama gaisma, bet izmantot bateriju nav iespējams vai nav parocīgi. Tritiju izmantos kodolsintēzes reaktoros kā kodoldegvielu [37, 38].

Rūpnieciskām un tehniskām vajadzībām tritiju iegūst no litija izotopiem (1.11., 1.12.) vai apstarojot deiteriju ar neitroniem. Deiterijs var satvert neitronu un pārvērsties par tritiju (1.13.).



Reakcijās tiek izmantoti neitroni, kas rodas kodolreakcijas laikā [14, 39]. Kodolsintēzes reaktoros tritiju ir plānots ģenerēt tā saucamajos blanketa moduļos.

Blanketa zonai ir trīs galvenās funkcijas – siltuma pārnese uz dzesēšanas sistēmu, tritija atražošana un magnētisko spoļu aizsardzība no neitronu plūsmas.

Eiropas Savienībā (ES) ir attīstītas divu veidu tritiju ģenerējošo blanketa moduļu koncepcijas, kas tiks pārbaudītas ITER:

- 1) ar hēliju dzesēto litija svina jeb HCLL (HCLL- Helium Cooled Liquid Lead) modulis;

2) ar hēliju dzesēto lodīšu slāņu jeb HCPB (HCPB - Helium Cooled Pebble Bed) skat.

1.2. tabulu:

1.2.tabula

Blanketa zonas moduļi

	HCLL	HCPB
Dzesēšanas šķidrums	Hēlijs, 8 MPa, 300/500 °C	
Tritiju ģenerējošais materiāls, neitronu pavairotājs	Pb-15.7Li	(Li ₄ SiO ₄) un (Li ₂ TiO ₃), Be

HCLL blanketa modulī kā tritija ģenerējošo materiālu un kā neitronu pavairotāju izmantots Pb-15.7Li. Savukārt HCPB blanketa modulī, kā tritiju ģenerējošo keramiku plāno izmantot litiju saturošu keramiku, piemēram, litija ortosilikātu (Li₄SiO₄) vai litija metatitanātu (Li₂TiO₃), bet kā neitronu pavairotāju – berilija mikrolodītes [14, 40].

Tritija uzkrāšanās un difūzija berilija materiālos. Tritija difūzija metālos notiek tritija atomiem pārvietojoties jeb „lecot” caur metāla kristālisko režģi. Tritijam ir tendence difundēt relatīvi ātri caur lielākajai daļai materiālu un to var izmērīt pie zemām temperatūrām. Materiālus pēc tritija šķīdības var iedalīt eksotermiskos, kuros šķīdība noris ļoti strauji un endotermiskos materiālos, kuros šķīdība noris lēni un minimāli [41].

Berilijs pieder pie endotermiskiem materiāliem. Pētījumos ir konstatēts, ka tritija šķīdība berilija materiālos ir konstanta un nav atkarīga no temperatūras. Tritija šķīdību ietekmē dažāda veida piemaisījumi, īpaši berilija oksīds [42].

Oksīdi ietekmē difūziju tādā veidā, ka ir grūti modelēt vai paredzēt kāda būs difūzija katrā konkrētajā gadījumā. Izšķīdinot berilija paraugus, pēc tam, kad tie ir bijuši tiešas plazmas iedarbībā, var pārliecināties, ka ūdeņraža izotopi ir gan metālā, gan oksīda slānī. Tritijs, kas atrodas berilija materiālos, šķīdinot metālu skābē no šķīduma izdalās gāzes veidā – HT [43].

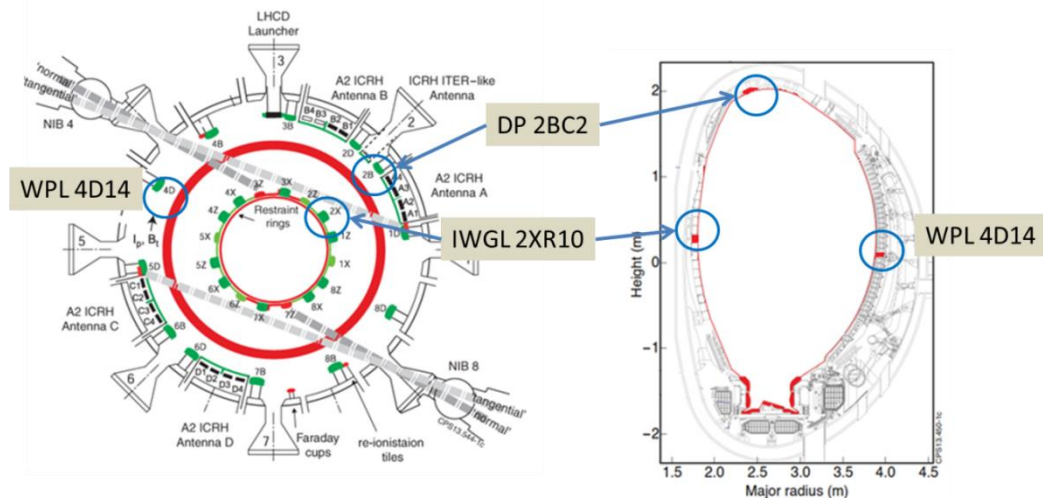
2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

Darbā pētīts tritija sadalījums berilija ķieģeļa tilpumā, virsmas struktūras un ķīmiskā sastāva izmaiņas plazmas iedarbības rezultātā. Kā pētīšanas metodes tika izmatotas skenējošais elektronu mikroskopija ar enerģijas dispersijas spektrskopiju, gāzu hromatogrāfija, šķīdināšanas metodes, radiometriskās metodes tritija mērījumiem un scintilācijas metodes.

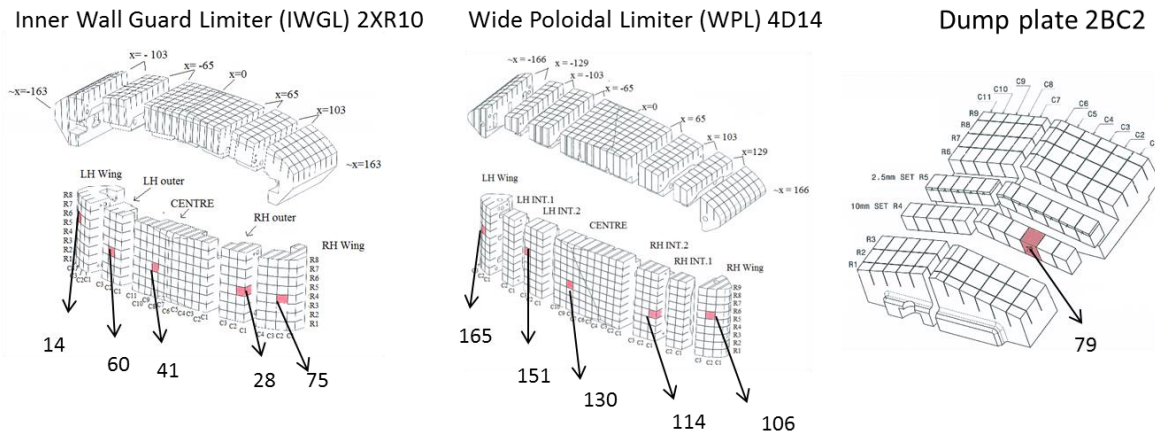
2.1. Paraugu raksturojums

Darbā analizētie berilija paraugi ir no JET eksperimentālās kodolsintēzes iekārtas pirmās sienas. Tie ražoti ASV (Brush-Welmann) ar vakuuma karstās presēšanas metodi. Paraugi tiek analizēti Horizon 2020, EURATOM projekta „Plazmas kontaktkomponenti no JET plazmas iekārtas ITER-Veida-Sienas kampaņas ietvaros.” Paraugi vakuuma kamerā ir atradušies no 2012.gada līdz 2014.gadam.

Paraugu novietojums vakuuma kamerā redzams 2.1. un 2.2. attēlos.



2.1.att. Analizējamo paraugu novietojums JET vakuuma kamerā



2.2.att. Analizējamo paraugu novietojums flīzēs

Darbā izmantotie berilija paraugi ir tikuši pakļauti reaktora apstākļiem – deiterija un tritija plazmai, paaugstinātai temperatūrai un neitronu starojumam. Ar paraugiem notikušās izmaiņas ir redzamas arī vizuāli – virsējais slānis sakusis un kļuvis tumši pelēks un pat melns. Paraugu struktūra tika analizēta SEM un izmantojot EDX tika noteikts arī virsmas ķīmiskais sastāvs, kas reaktora darbības apstākļos var mainīties.

2.2.Metodes

Darbā izmantotas SEM, EDX, gāzu hromatogrāfijas, šķīdināšanas metodes, radiometriskās metodes tritija mērījumiem un scintilācijas metodes.

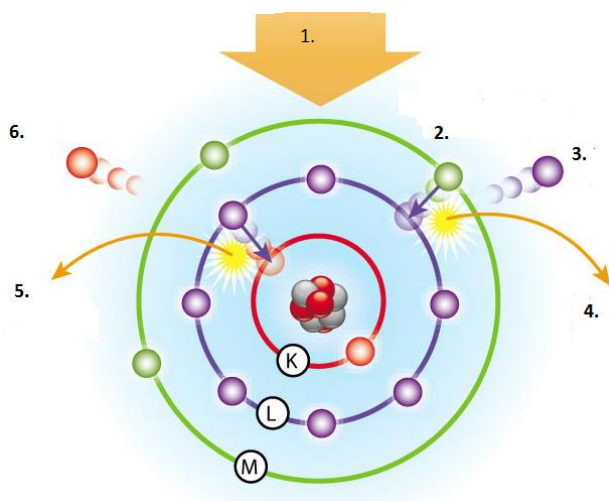
2.2.1. SEM un EDX

Darbā izmantots *Hitachi S-4800* skenējošo elektronu mikroskops (izmantotais darbības spriegums un strāva attiecīgi 15 kV_{acc}, un 15 μA) savienojumā ar EDX detektoru *Quantax Esprit 1.9*.

Skenējošajā elektronu mikroskopijā izmanto staru ar koncentrētiem, augstas enerģijas elektroniem. Elektroni, kas mijiedarbībā ar paraugu iegūst papildus enerģiju un nokļūst detektorā ir sekundārie elektroni. Signāls, kas tiek iegūts no stara un parauga mijiedarbības vietas, sniedz informāciju par parauga morfoloģiju. Atstarotie elektroni – elektroni, kas atstarojas no parauga, sniedz informāciju par to kādus elementus satur paraugs – smagos vai vieglos.

Enerģijas dispersijas spektroskopija ir kvantitatīva un kvalitatīva rentgenstaru mikroanalīzes metode, kas var sniegt informāciju par parauga ķīmisko sastāvu elementiem ar

atoma numuru $Z > 3$. Primārie elektroni mijiedarbojas ar parauga virsmu veidojošajiem atomiem, šīs mijiedarbības rezultātā rodas divu veidu rentgenstari – fona un elementiem raksturīgie. Elektronu mikroskopā krītošie elektroni mijiedarbojas ar paraugu, izraisot elektronu stāvokļa maiņu parauga atomos. Tā rezultātā no iekšējiem enerģētiskajiem līmeņiem tiek izsisti elektroni, kuru vietu aizņem citi augstāka enerģētiskā līmeņa elektroni. Enerģijas starpība, kas rodas elektronu pārejas rezultātā, izdalās rentgenstarojuma veidā. Starojuma enerģija ir atkarīga no elektronu pārejas veida.

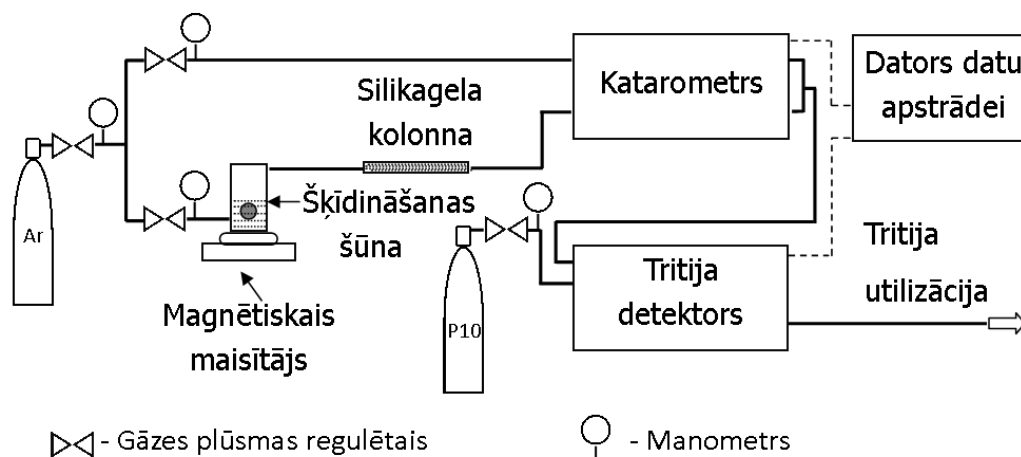


2.1.att. EDX darbības princips [44]

1. Starojums no pirmējā rentgenstaru avota; **2.** M līmeņa elektronam aizpildās ārējais enerģijas līmenis; **3.** No L līmeņa elektrons tiek izsists; **4.** Rentgenstarojums, elektronam pārejot no M uz L līmeni; **5.** Rentgenstarojums, elektronam pārejot no L uz K līmeni; **6.** No K līmeņa tiek izsists elektrons.

2.2.2. Tritija sadalījuma noteikšana

Tritija sadalījums berilija paraugos tika noteikts izmantojot šķīdināšanas metodes. Šķīdināšanas iekārtas shēma ir apskatāma 2.2. attēlā.

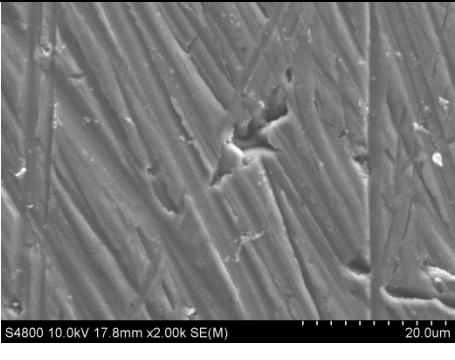
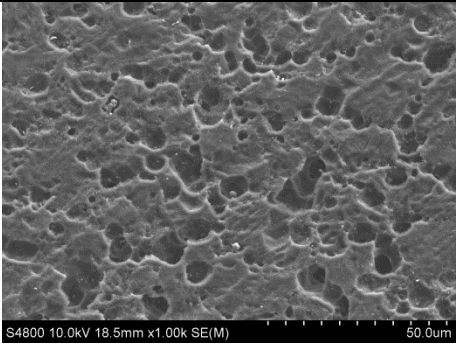
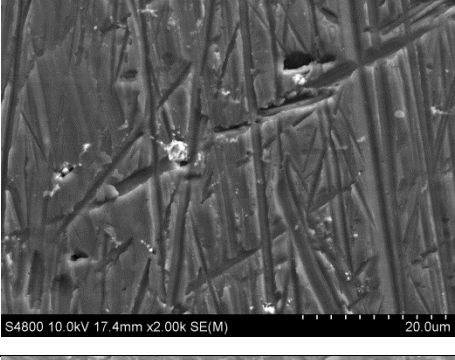
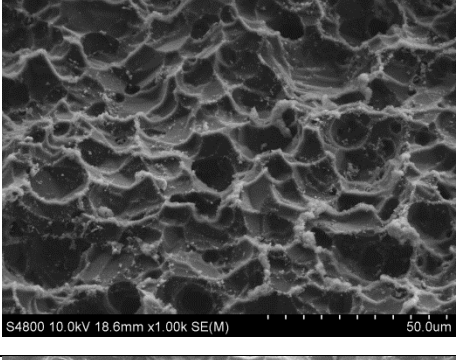
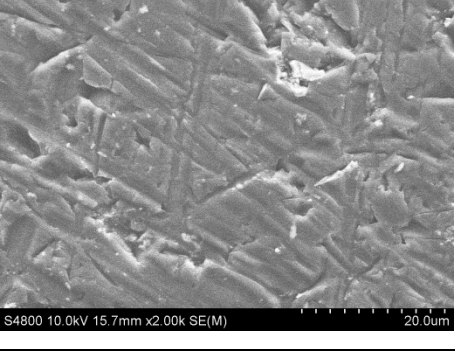
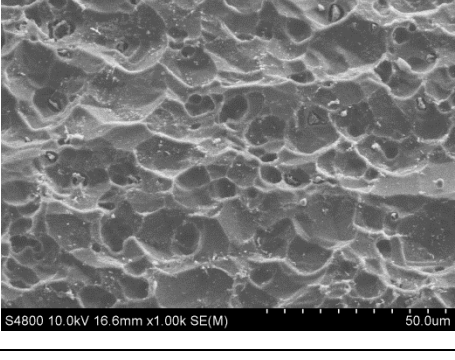


2.2.att. Šķīdināšanas iekārtas shēma (P-10 - argometāns – 10% CH₄ un 90% Ar)

Pirms šķīdināšanas paraugs tika nosvērts izmantojot analītiskos svarus Precisa XR205SM-DR ($\pm 0,01\text{mg}$) un visas šķautnes tika nomērītas ar ciparu bīdmēru Horex ($\pm 0,01\text{mm}$). Berilija paraugs tika šķīdināts 15mL 2M sērskābes ūdens šķīdumā. Šķīdināšana tika veikta speciālā šūnā, kurā tika kontrolēta maisīšana, lai nodrošinātu vienmērīgu šķīšanas procesu. Paraugs kontaktā ar skābi nonāk tikai tad, kad sistēma ir gatava un visu iekārtu rādītāji ir stabilizējušies. Pirms parauga šķīdināšanas, visa sistēma tika dearēta izmantojot argonu (Ar > 99,9998%).

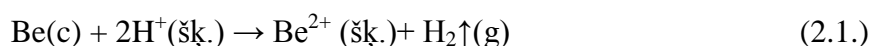
Lai parauga šķīšana būtu pietiekami ātra un vienmērīga ir nepieciešams piemērot atbilstošu sērskābes-ūdens šķīduma koncentrāciju. Tika veikti eksperimenti ar citiem berilija paraugiem, kuri tika nopulēti, aplūkoti SEM un tad šķīdināti trīs dažādās sērskābes koncentrācijās – 0,5M, 1M un 2M. Pēc šķīdināšanas, paraugi tika aplūkoti izmantojot SEM un tika novērtēta virsmas stuktūra un šķīšanas vienmērīgums katrā koncentrācijā. (2.1. tabula)

Berilija šķīšanas ātruma un vienmērīguma izvērtējums

	Virsmas struktūra pirms šķīdināšanas	Virsmas struktūra pēc šķīdināšanas
0,5 M sērskābes šķīdums		
1 M sērskābes šķīdums		
2 M sērskābes šķīdums		

Pēc iegūtajiem SEM attēliem var izvērtēt, kura skābes koncentrācija ir piemērota. 2M skābes šķīdumā šķīšana ir vienmērīga, neveidojas poras. 0,5M skābes šķīdumā šķīšana ir nevienmērīga un veidojas vairākus mikrometrus dziļas poras, kas norāda, ka šķīšana vairāk noris poru dziļumā, nevis uz virsmas. 1M skābes šķīdumā šķīšanas noris vienmērīgi un neveidojas poras. No tā var secināt, ka visvairāk piemērota šķīdināšanai ir sērskābe 1M un 2M koncentrācijās, bet ir jāņem vērā arī šķīšanas ātrums, lai tritija koncentrācija nesējgāzē būtu pietiekami liela reģistrācijai. Darba gaitā tika izmantota 2M sērskābe.

Berilija šķīšanas rezultātā izdalītais ūdeņradis (2.1.) no sistēmas tika aizvadīts ar argona plūsmu ($6 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$) un reģistrēts izmantojot gāzu hromatogrāfu ar katarometra detektoru. Paralēli ūdeņraža reģistrācijai, noris arī tritija reģistrācija.



Tā tiek kontrolēts nošķīdušā slāņa biezums un var noteikt tritija sadalījumu berilija ķieģeļa tilpumā. Hromatogrāfa iegūtie dati tika reģistrēti izmantojot programmu Agilent 34970A BenchLink Data Logger, bet tritija dati tika reģistrēti ar programmu Eltima Serial Port Data Logger RS232.

Daļa tritija paliek skābes šķīdumā. Lai noteiktu kopējo tritija daudzumu, ir būtiski noteikt tā saturu šķīdumā. Šim mērķim visefektīvākā metode ir šķidro scintilatoru metode (beta aktivitātes mērījumi šķīdumos), kas balstās uz vielas ierosināšanos starojuma ietekmē un pāreju laikā emitējot gaismas kvantus.

Darbā izmanto iekārtu TRi-Carb 2910TR un scintilācijas šķīdumu *Ultima Gold*, kurā kā aktivators darbojas 2,5-difeniloksazols. Mērījumu veikšanai paraugi sastāv no 12 mL ŠS un 8 mL analīzes šķīduma. Paraugu no šķīdināšanas šūnas destilē, lai nemainītos scintilācijas apstākļi (nebūtu skāba vide), no kā ir atkarīga reģistrēšanas efektivitāti.

2.2.2.1. Ūdeņraža mērīšana – katarometru detektori

- Gāzu hromatogrāfa darbības princips

Darbā izmantots modificēts gāzu hromatogrāfs. No reakcijas šūnas ieplūstošās gāzes netiek savā starpā atdalītas (nav pildītu kolonnu) un ūdeņradi detektē kopējā maisījumā, kas pamatā sastāv no nesējgāzes un reakcijā izdalītā ūdeņraža (ūdens tvaiks tiek uzkrāts silikagēla kolonnā pirms ieejas hromatogrāfā).

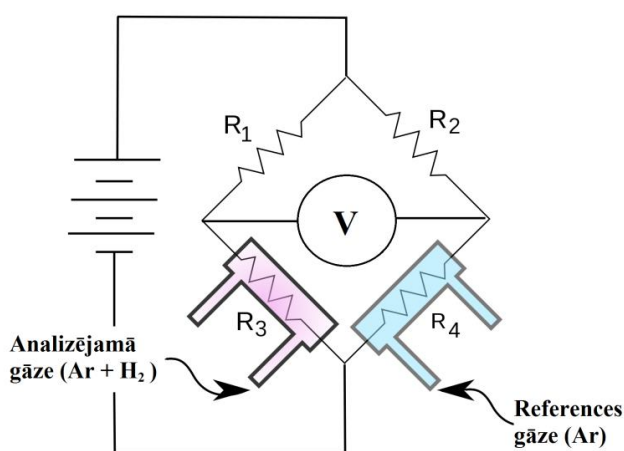
- Detektors

Ūdeņraža detektēšanai izmanto katarometru (*katharometer*) jeb siltumvadītspējas detektoru (*thermal conductivity detector TCD*). Katarometra darbības princips balstās uz gāzu dažādajām siltumvadītspējām. Detektors sastāv no divām savstarpēji atdalītām kamerām, kurās tiek elektriski karsēti vienādi kvēldiegi. Cauri vienu kameru plūst references gāze (argons) un otru – gāzu maisījums no reakcijas šūnas. Tā kā gāzēm ir atšķirīgas siltumvadītspējas (2.2. tabula) tad to spēja atdzēsēt kvēldieģus arī ir atšķirīgas.

Gāzu siltumvadītspēja 25⁰C temperatūrā

Gāze	Siltumvadītspēja 25 ⁰ C temperatūrā, W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Argons	0,016
Ūdeņradis	0,168
Skābeklis	0,024
Slāpeklis	0,024
Gaiss	0,024

Ja cauri kamerām plūst dažādas gāzes, kvēldiegu temperatūras atšķiras. Kā vairumam elektrovadītāju kvēldiegu īpatnējā pretestība mainās atkarībā no temperatūras. Dotie kvēldiegi savā starpā ir saslēgti tilta slēgumā (2.3.attēls) līdz ar to pretestības izmaiņas var tikt izmērītas (voltos) un šīs izmaiņas ir tieši proporcionālas nosakāmās gāzes daudzumam. Signāls no hromatogrāfa tiek nosūtīts uz voltmetru, kurā tas tiek konvertēts digitālā un nosūtīts uz datoru (programmu *Data Logger*).



2.3.att. Katarometra shēma – Watsona tilta slēgums

Pirms hromatogrāfa ieslēgšanas noteikti ir jāatver nesējgāzes (argona) gāzes balons, pretējā gadījumā kvēldiegi netiks dzesēti un pārdegs.

- Gāzu plūsma

Tā kā detektēšana balstās uz kvēldiegu dzesēšanu gāzu plūsmā, ļoti būtisks ir spiediens kolonnās. Tam jābūt tādā pašam kā kalibrēšanas laikā. Spiedienu kontrolē ar manometriem -

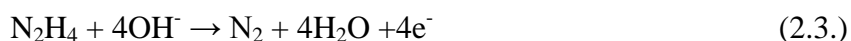
viens ir pievienots reakcijas šūnai, bet otrs salīdzināšanas kolonnai. Parasti spiedieni ir jau ieregulēti un neatbilstības saistās ar hermētiskuma zudumu sistēmā.

- Reakcijas šūnas sagatavošana mērījumiem

Tā kā gāzu analīze balstās uz vadītspējas atšķirībām nesējgāzē un analizējamā gāzē, tad nav pieļaujama citu gāzu klātbūtne analītā kā tikai references (argons) un mērāmās (ūdeņradis). Tāpēc pirms eksperimenta sākuma reakcijas šūna ir jāatbrīvo no gaisa jeb jāveic deaerēšana (*deaeration*). Iekārtā tam ir paredzēts atsevišķs argona gāzes pievads ar izvadu ārpus iekārtas (gaisā). Tikai tad, kad reakcijas šūna ir atbrīvota no gaisa, to var pievienot kopējai sistēmai (argona kā nesējgāzes pievads un izvads jau uz hromatogrāfa mērīšanas kolonnu, kas tālāk nonāk detektorā).

- Elektrolīze, kalibrēšana

Hromatogrāfa kalibrēšanu veic ar 0,1M hidrazīna sulfāta ($N_2H_4 \cdot H_2SO_4$) ūdens šķīduma elektrolīzē (2.2., 2.3., 2.4.) izdalīto ūdeņradi.



Aprēķini balstās uz Faradeja likumu (2.1.), kas nosaka, ka elektrolīzes procesā iegūtā produkta daudzums ir tieši proporcionāls caur elektrolītu izplūdušajam elektriskā lādiņa lielumam.

$$n = \frac{Q}{F \cdot z} \quad (2.1.)$$

Kur

n – vielas daudzums, mol;

Q – caur elektrolītu izplūdušais elektriskā lādiņa lielums, C

F – Faradeja konstante, $96\,485\text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$

Z - elektronu skaits, kas tiek pārnesti

Tā kā F un z ir konstanti, tad izdalītās vielas daudzumu nosaka Q. To savukārt var aprēķināt sekojoši:

$$Q = \int_0^t I dt, \text{ mainīgas strāvas gadījumā}$$

$$Q = I \cdot t, \text{ konstantas strāvas gadījumā.}$$

I - strāva, A

t – laiks, s

Ūdeņraža izdalīšanas ātruma aprēķinu formula (2.2.), ievietojot, atbilstošās konstantes ir sekojoša:

$$\frac{dN}{dt} \left(\frac{\text{molek.}}{\text{sek.}} \right) = 3,123 \cdot 10^{12} \cdot I (\mu A) \quad (2.2.)$$

Hromatogrāfa kalibrēšanai elektrolīzi veic ar dažādām strāvām, tādējādi iegūstot dažādus ūdeņraža izdalīšanās ātrumus. Izmantotais strāvas diapazons ir 3-40 mA.

Elektrolīzes veikšanai šūnu ieslēdz elektriskajā ķēdē, kurā ir strāvas avots, pretestību magazīna, voltmetrs sprieguma nolasīšanai un ampērmets strāvas nolasīšanai. Kalibrēšanas procesā pietiek ar vai nu tikai voltmetru vai ampērmtru, jo nolasāmie lielumi ir savstarpēji saistīti ar Oma likumu (2.3.).

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.3.)$$

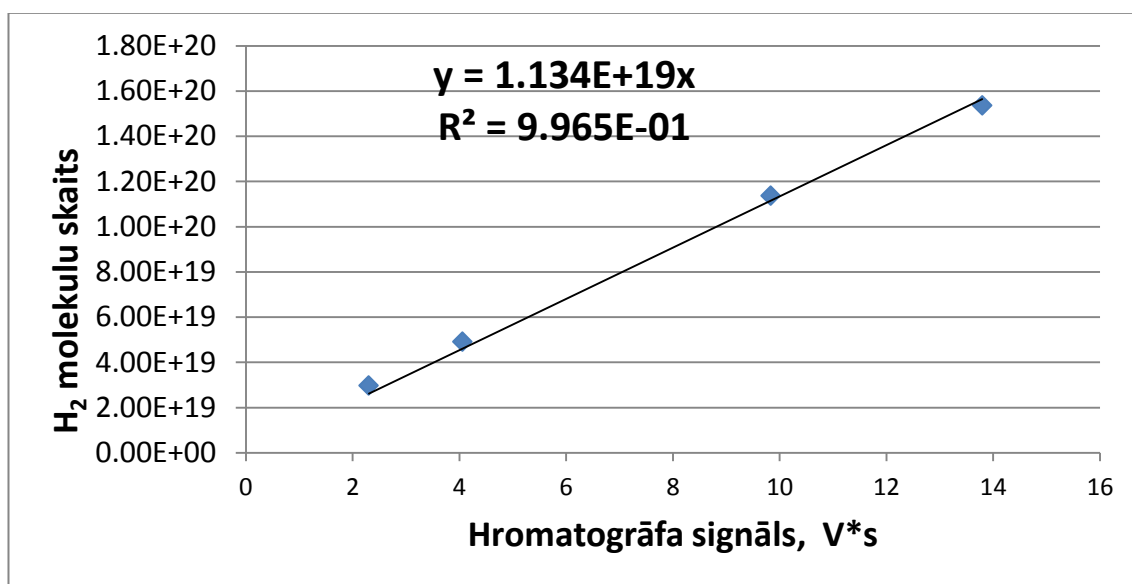
Kur,

I – strāva, A

U – spriegums, V

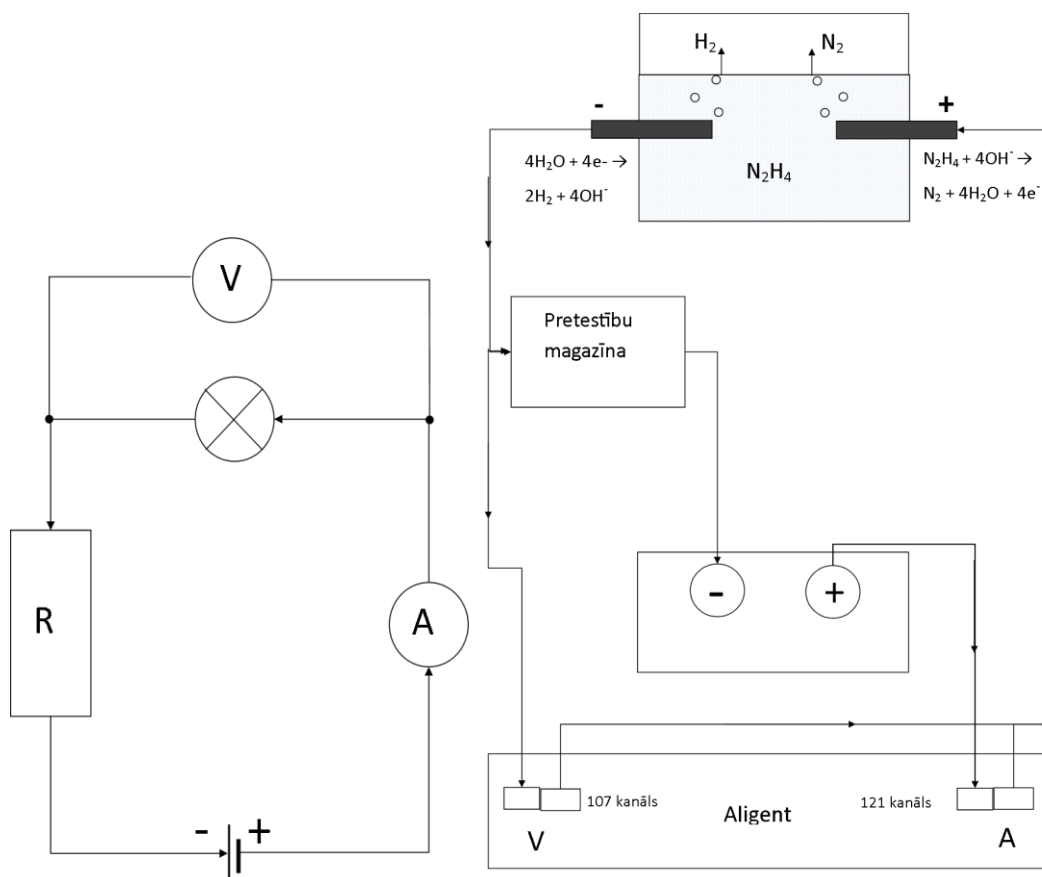
R – pretestība, Ω

Tā kā kalibrēšanas procesā nepieciešamas ļoti mazas, bet precīzas strāvas, ķēdē ir ieslēgta pretestību magazīna (kopējā sistēmas pretestība ir salīdzinoši neliela un nav regulējama, līdz ar to bez pretestības magazīnas strāvas zemāko robežu noteiktu strāvas avota mazākais iespējamais spriegums).



2.4.att. Hromatogrāfa kalibrēšana ar ūdeņradi, kas izdalās hidrazīna sulfāta šķīduma elektrolīzē, gāzu plūsmas ātrums 6 L h^{-1} ($K_D = 1,134 \cdot 10^{19} \text{ Bq} \cdot \text{cps}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$)

Elektrolīzes principiālā shēma un paplašinātā shēma dota 2.5.attēlā, kur R- pretestība, V – voltmetrs, A -ampērmets. Paplašinātajā shēmā norādīti voltmetram un ampērmtram atbilstošie Agilent multipleksera kanāli.



2.5.att. Elektrolīzes principiālā shēma (pa kreisi) un paplašinātā shēma (pa labi)

Strāvas lielumu iespējams regulēt divos veidos: mainot spriegumu strāvas avotam vai mainot pretestību uz pretestības magazīnas.

- Datu pieraksts un apstrāde

Hromatogrāfa un tritija gāzes skaitītāja iegūtie dati tiek vienlaicīgi pierakstīti datorā. Dati tiek pierakstīti izmantojot programmas: Agilent 34970A BenchLink Data Logger – hromatogrāfa katarometru sprieguma noteikšanai (datus pieraksta ik pēc 10 sekundēm), bet tritija pierakstīšana notiek Eltima Serial Port Data Logger (datus pieraksta ik pēc 60 sekundēm).

2.2.2.2. Tritija mērīšana – proporcionālais gāzu detektors

Tritija mērīšanai izmanto gāzes jonizācijas detektoru – proporcionālo gāzu detektoru. Gāzveida jonizācijas detektori ir radiācijas detektēšanas instrumenti, kurus izmanto jonizējošu daļiņu klātbūtnes noteikšanā. Ja daļiņai ir pietiekami daudz enerģijas, lai jonizētu gāzes atomu, vai molekulu, kā rezultātā elektroni un joni rada strāvas plūsmu, ko var izmērīt.

Jonu/elektronu enerģija ir pietiekami liela, lai notiktu sekundārā jonizācija, kas savukārt nodrošina lādiņu pavairošanos. Pavairošanas faktors nozīmē to, ka attiecība starp summāro

jonizāciju nav atkarīga no primārās jonizācijas, tādējādi iegūtais rezultāts ir proporcionāls primārajai jonizācijai.

Parasti gāzu jonizācijas detektori ir slēgta tipa – jonizējošais starojums nokļūst detektorā caur plāna materiāla logu, bet ja detektējamā savienojuma enerģija ir pārāk maza, lai caurspiestos loga materiālam (piemēram – tritījs), tad izmanto gāzes caurplūdes detektoru. Mērāmā gāze plūst cauri detektoram, taču tajā pašā laikā detektorā plūst arī t.s. skaitīšanas gāze, piemēram P-10 (argons+10% CH₄). [45.]



2.6.att. Gāzes caurplūdes detektors

2.3.Rezultātu matemātiskā apstrāde

Eksperimentāli iegūtie dati tika apstrādāti ar datora programmu MS Exel izmantojot sekojošās formulas:

Tritija detektora datu apstrāde.

Izmantojot radiometru TEM 2100 tiek pierakstīts tritija impulsu skaitīšanas ātrums R_T (cps) skaitīšanas periodā t (s). Zinot nesējgāzes plūsmas ātrumu v ($L \cdot h^{-1}$) un kalibrēšanas konstanti K_D ($Bq \cdot cps^{-1} \cdot m^{-3}$), var aprēķināt tritija aktivitāti (2.4.):

$$A_T = \frac{v K_D \Delta t}{3600 \cdot 1000} \cdot R_T \quad (2.4.)$$

kur, A_T – tritija aktivitāte, Bq;

v – nesējgāzes plūsma, $L \cdot h^{-1}$;

K_D – kalibrēšanas konstante, $Bq \cdot cps^{-1} \cdot m^{-3}$;

Δt – eksperimenta laiks, s;

R_T – antisakrišanas vērtība, cps.

Tritija īpatnējo aktivitāti A_{ip} (Bq/g) **(2.5.)** aprēķina dalot kopējo tritija aktivitāti paraugā ar parauga masu m_{kop} (g).

$$A_{ip} = \frac{\sum_{i=1}^t A_T}{m_{kop}} \quad (2.5.)$$

Kur,

A_T – tritija aktivitāte, Bq;

A_{ip} – tritija īpatnējā aktivitāte, Bq/g;

m_{kop} – parauga masa, g.

Atbrīvotā tritija atomu skaitu **(2.6.)** var aprēķināt izmantojot tritija sabrukšanas konstanti $\lambda = 1,75 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$

$$N_T = \frac{A_T}{\lambda} \quad (2.6.)$$

kur,

N_T – detektētais tritija daudzums;

A_T – parauga aktivitāte;

λ – tritija sabrukšanas konstante, s^{-1} .

un kopējais izdalīto tritija atomu skaits **(2.7.)** laka momentā t :

$$N_{kop} = \int_{t_0}^t (N_T) dt \quad (2.7.)$$

Parauga īpatnējā aktivitāte **(2.8.)** reģistrējot ar šķidro scintilācijas metodi:

$$a = [(N_{\text{parauga}}/t - N_{\text{fona}}/t) \cdot V_{\text{analizes}} / [\varepsilon \cdot V_{\text{šķīdināšanas}} \cdot m]] \quad (2.8.)$$

Kur,

a – parauga īpatnējā aktivitāte, $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$;

ε – iekārtas skaitīšanas aktivitāte; **(2.9.)**

N_{parauga} un N_{fona} – saskaitīto impulsu skaits paraugam un fonam, imp;

t – laiks, s;

$V_{\text{šķīdināšanas}}$ un V_{analizes} – parauga šķīdināšanai un analīzei ņemtais lietotais šķīdumu tilpums, mL;

m – iesvara masa, g

$$\varepsilon = I_{\text{standarta}} / A_{\text{standarta}} \quad (2.9.)$$

$I_{\text{standarta}}$ – standartavota skaitīšanas ātrums, $\text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$;

$A_{\text{standarts}}$ – standartavota aktivitāte, Bq.

3. REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS

Darbā ir pētīti JET vakuuma kameras pirmās sienas berilija materiāli, kas atrodas kameras trīs dažādās vietās. Ir noteikts tritija sadalījums berilija tilpumā un tritija kopējais daudzums un aktivitāte. Apskatītas paraugu virsmas struktūras un to ķīmiskais sastāvs un veikts ķieģeļu parametru salīdzinājums atkarībā no to novietojuma plazmas kamerā.

3.1. Paraugu virsmas struktūra

Darbā analizētie paraugi nāk no JET vakuuma kameras iekšējās sienas (IWGL – Inner Guard Wall Limiter), no ārējās sienas (WPL – Wide Poloidal Limiter) un no kameras augšējās daļas (the Dumb Plate).

Analizējamo paraugu saraksts ir apskatāms 3.1.tabulā un 3.2.tabulā ir paraugu attēli, kas uzņemti ar optisko kameru.


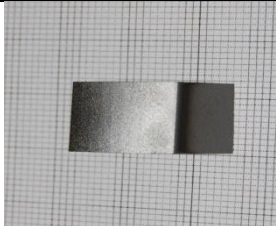
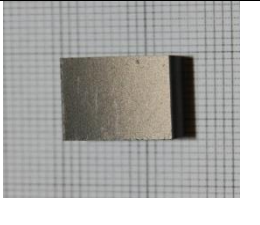
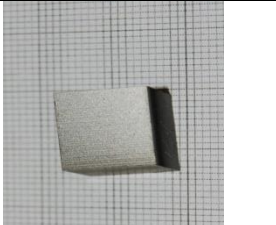
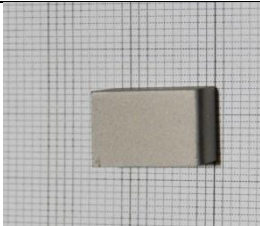
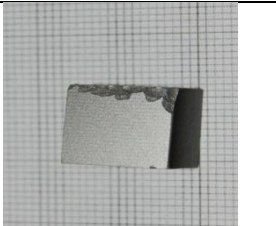
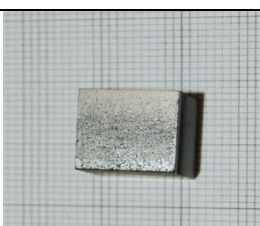
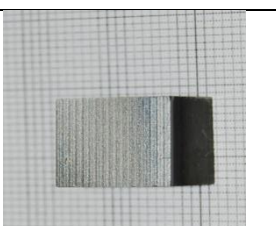
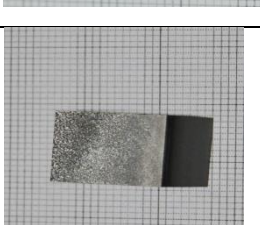
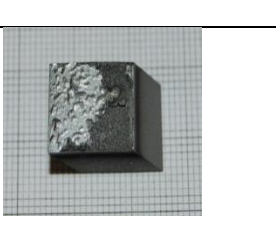
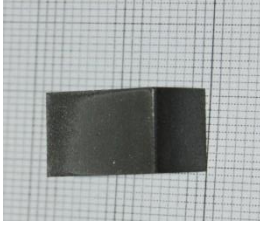
Paraugu virsmas struktūra tika novērtēta gan vizuāli, gan izmantojot SEM. Pieciem analizētajiem paraugiem tika apskatīts arī ķīmiskais sastāvs izmantojot EDX.

3.1 tabula

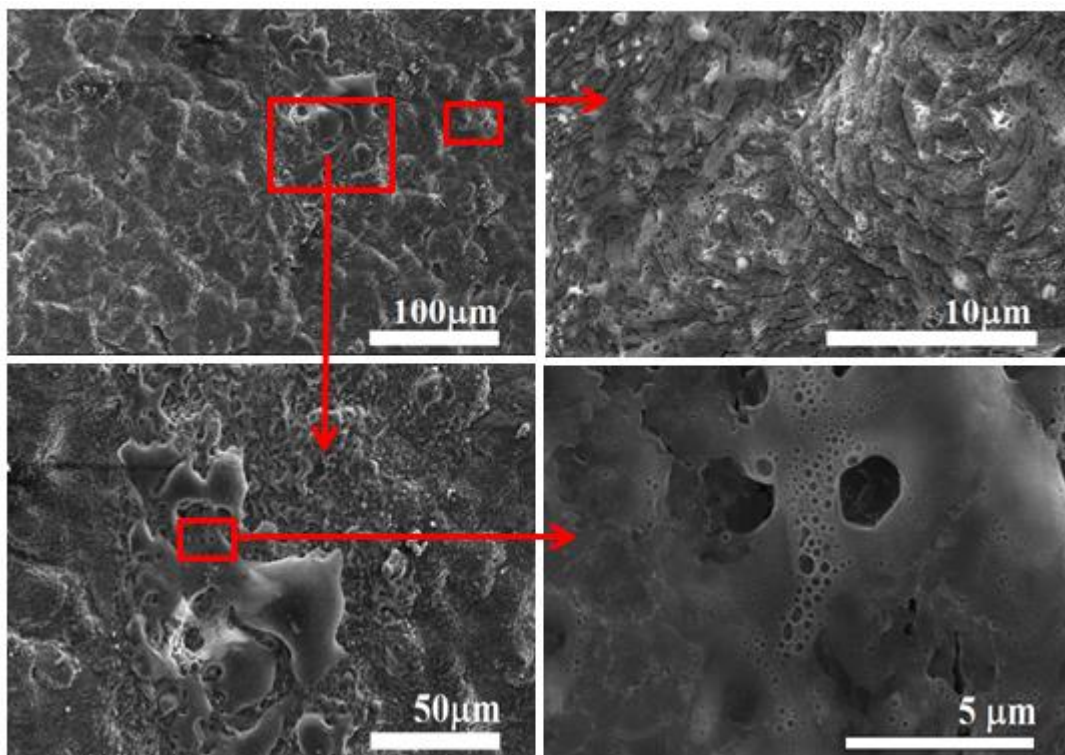
Berilija paraugu saraksts

Flīzes numurs	Atrašanās vieta JET vakuuma kamerā	Parauga numurs	Parauga novietojums flīzē
IWGL 2XR10	Iekšējās sienas, vidējā plakne (Inner Wall guard limiter, mid plane)	14	R6-C3, LH (kreisā puse)
		28	R4-C, RH (labā puse)
		41	R4-C8, centrs
		60	R4-C2, LH (kreisā puse)
		75	R4-C2, RH (labā puse)
WPL 4D14	Ārējās sienas vidējā plakne (Wide Poloidal limiter (outer wall), mid plane)	106	R6-C2 RH (labā puse)
		114	R4-C1 RH INT. 2 (labā puse)
		130	R4-C8 centrs
		151	R6-C3 LH INT.2 (kreisā puse)
		165	R6-C2 LH (kreisā puse)
DP 2BC2	Kameras aukšējā daļa (Dump plate (top of the vessel))	79	R4-C3

Paraugu attēli, kas uzņemti ar optisko kameru

IWGL 2XR10		WPL 4D14	
14 <i>R6-C3, LH</i>		165 <i>R6-C2 RH</i>	
60 <i>R4-C2, LH</i>		151 <i>R6-C3 LH</i> <i>INT.2</i>	
41 <i>R4-C8, centrs</i>		130 <i>R4-C8 centrs</i>	
28 <i>R4-C, RH</i>		114 <i>R4-C1 RH INT.</i> 2	
75 <i>R4-C2, RH</i>		106 <i>R6-C2 RH</i>	
Dump plate 2BC2			
79			

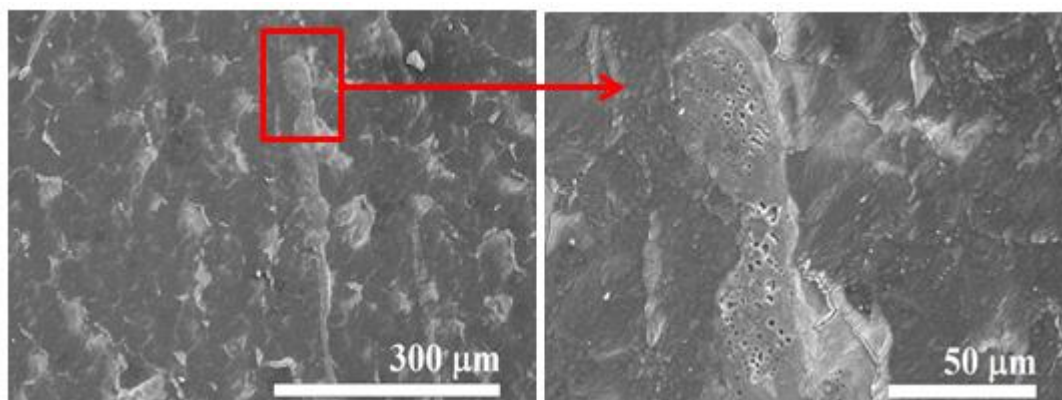
- **Paraugs Nr.14**



3.1.att. 14 parauga virsmas struktūra

Novērtējot paraugu virsmas vizuālo izskatu var redzēt, ka virsma ir izteikti nomelnējusi, bet nekas neliecina par to, ka tā būtu sakususi. Apskatot paraugu SEM, var novērot, ka virsma ir pārklāta ar nogulsnēšanās slāni. Paaugstinātas temperatūras iedarbībā ir izveidojušies pilienvēda sakusumi, kas ir mikro/nano metru lielumā. Nosēdumu slānim ir specifiska struktūra, kas pēc sava izskata atgādina kāposta formu. 9000 reižu lielā palielinājumā var novērot, ka kusušā metāla pilienus un poras, kas veidojušās atdzišanas rezultātā.

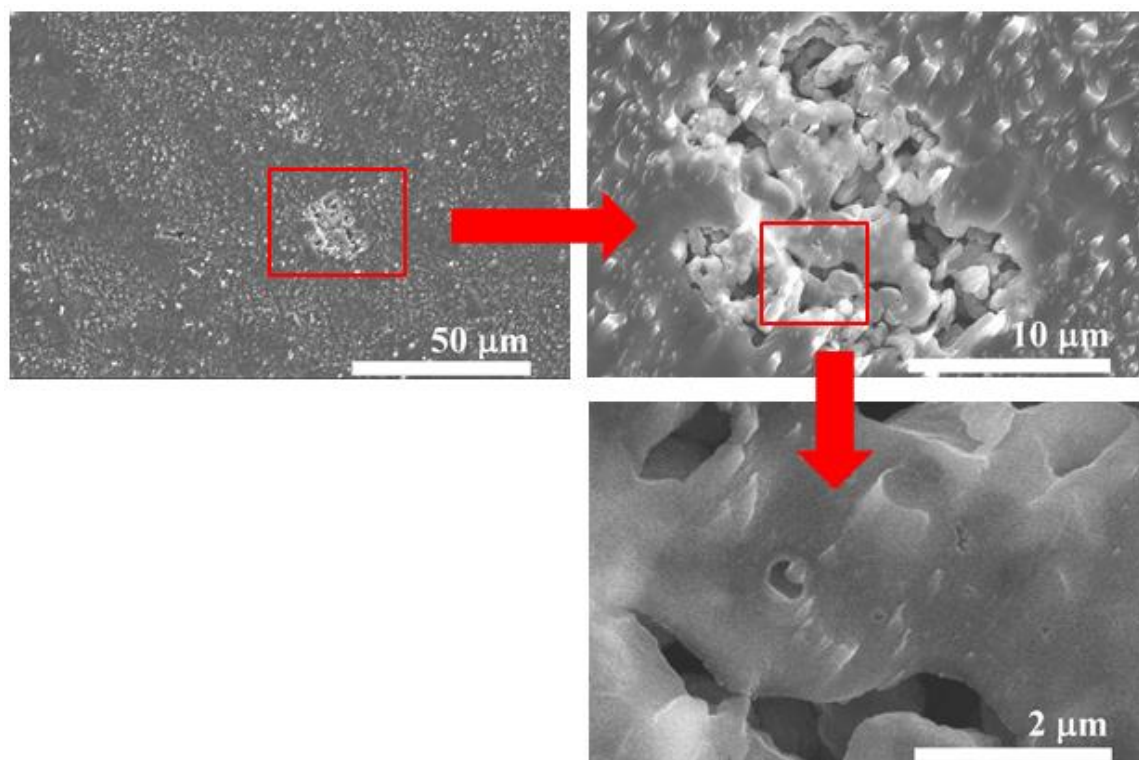
- **Paraugs Nr. 60**



3.2.att. 60 parauga virsmas struktūra

Novērtējot parauga virsmas vizuālo izskatu, var novērot, ka tas ir pelēkas, metāliskas krāsas, bet ķieģeļa malējo skaldņu augšējās malas ir nomelnējušas. Aplūkojot paraugu SEM var redzēt, ka uz virsmas ir izveidojušās plaisas, kas ir vairāku nanometru lielumā. Tiešas plazmas iedarbības rezultātā uz materiāla virsmas ir sakusumi līniju formā, kas varētu liecināt par kusuša metāla pilienu tecēšanu no citām ķieģeļa daļām.

- **Paraugs Nr. 41 (centrs)**



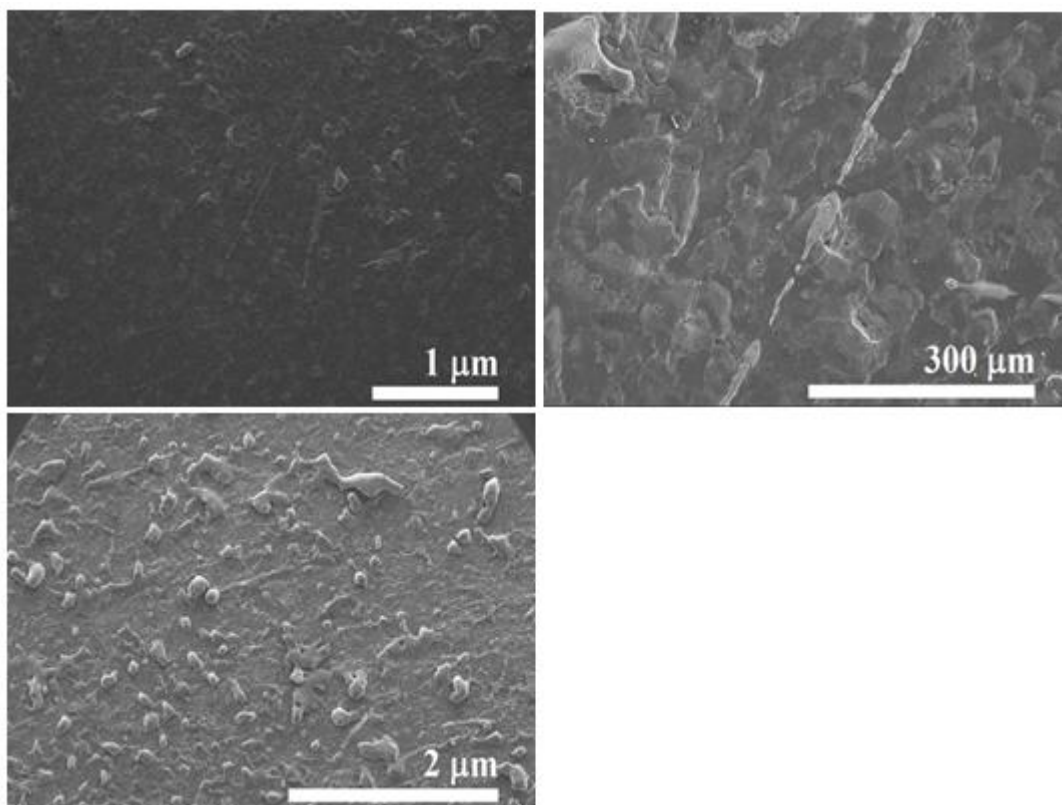
3.3.att. 41 parauga virsmas struktūra

Centrālā parauga daļa ir ar salīdzinoši tīru virsmu. Nav veidojušies sakusumi. Uz virsmas ir novērojami caurumi ar izmēru daži nanometru. Šie caurumi var norādīt uz

materiāla eroziju reaktora apstākļos. Uz virsmas ir novērojamas dažādas formas – apaļas, ovālas un trijstūrveida daļiņas.

Saskaņā ar EDX spektriem, berilija sakusumos ir sastopami šādi elementi – ogleklis, dzelzs, volframs, hlors, kalcījs, skābeklis un niķelis. Uz virsmas atrodamās daļiņas ir ar ļoti augstu niķeļa, oglekļa un skābekļa saturu.

- **Paraugs Nr. 28**

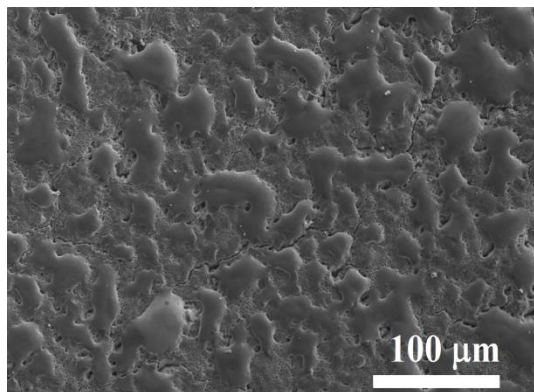


3.4.att. 28 parauga virsmas struktūra

Novērtējot parauga virsmas struktūru vizuāli, var novērot, ka virsma ir mazliet sakususi un ķieģeļa malas skaldnes augšējā mala ir nomelnējusi. Parauga virsmas struktūra ir ļoti līdzīga paraugam Nr. 60, bet šeit ir novērojami arī lases formas sakusumi ne tikai līnijveida izsmērējumi.

Uz virsmas izveidojušies berilija sakusumu piemaisījumi galvenokārt sastāv no niķeļa un skābekļa. EDX spektri uzrāda, ka uz virsmas atrodas arī citi elementi, piemēram, alumīnijs, hlors, mangāns, dzelzs un hroms. Sastopams arī ogleklis un volframs, kas ir divertora galvenie materiāli, un norāda par erodētā materiāla transportu salīdzinoši lielos attālumos.

- **Paraugs Nr. 75**

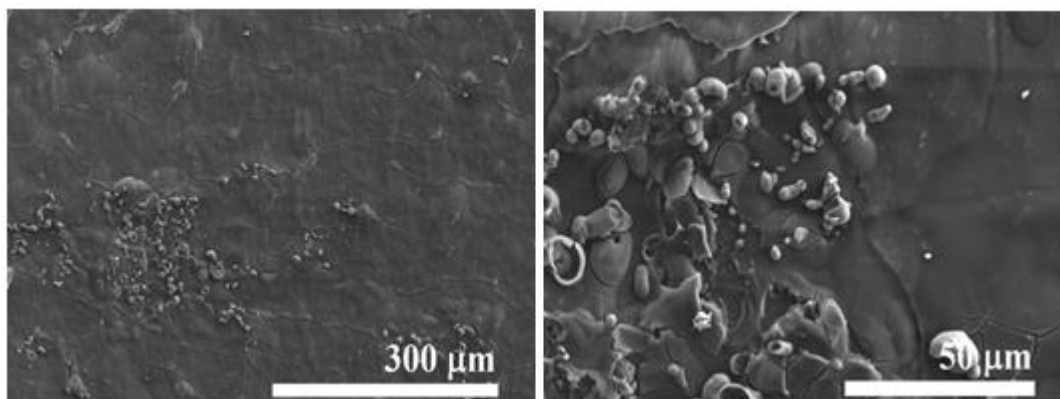


3.5.att. 75 parauga virsmas struktūra

Novērtējot parauga virsmas struktūru vizuāli, var novērot, ka virsmas struktūra ir mazliet sakususi un ķieģeļa malas skaldņu virsējā daļa ir nomelnējusi. SEM attēlā var redzēt, ka uz virsmas veidojas sīkas plaisas. Materiāls ir sakusis un kondensējies. Aplūkojot paraugu lielākā palielinājumā var novērot, ka ir veidojušās poras, kas varētu būt gāzu izdalīšanās rezultāts.

Wide Poloidal Limiter 4D14

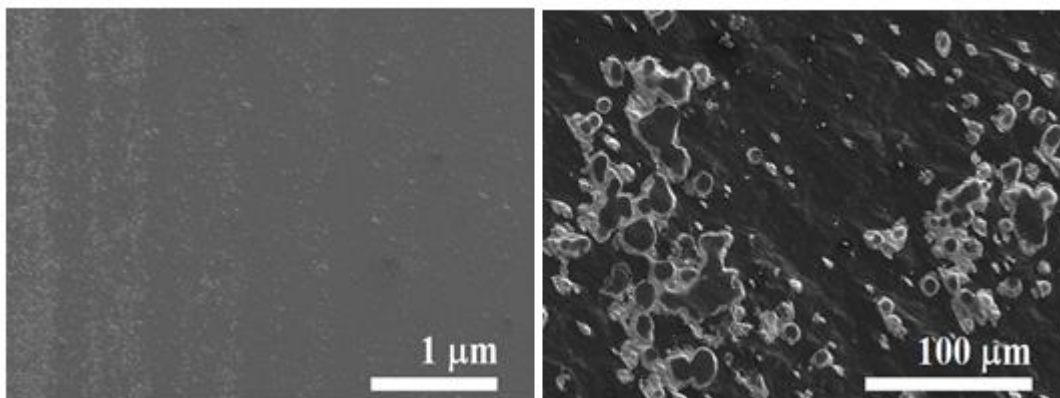
- **Paraugs Nr. 165**



3.6.att. 165 parauga virsmas struktūra

Novērtējot parauga virsmas struktūru vizuāli, var novērot, ka virsmas struktūra ir mazliet sakususi un ķieģeļa malējo skaldņu augšējā mala ir nomelnējusi. Aplūkojot paraugu SEM, var novērot, ka virsma ir pilnībā klāta ar slāni sakusuša un sacietējuša berilija. Uz virsmas ir novērojamas arī plaisas un burbuļi, no kuriem liela daļa izskatās plīsuši.

- **Paraugs Nr. 151**

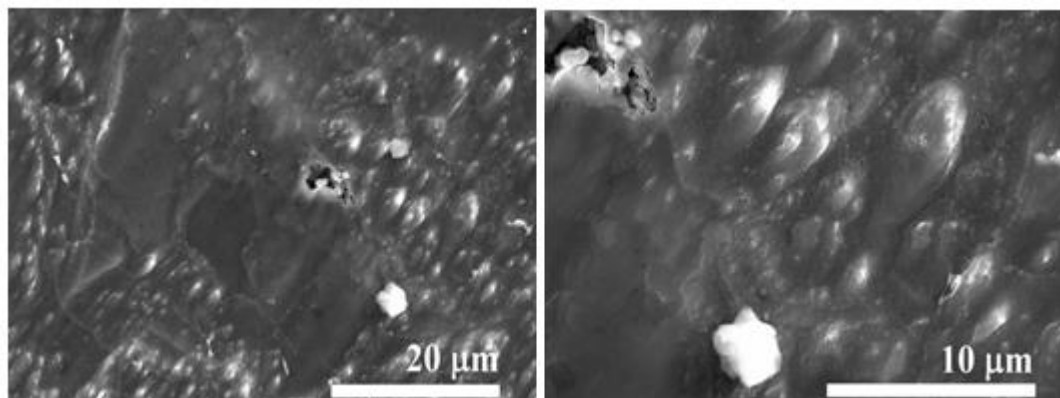


3.7.att. 151 parauga virsmas struktūra

Vizuāli virsmas struktūra ir gluda un nav novērojami sakusumi. Paraugs ir pelēkā krāsā, bet ķieģeļa malējo skaldņu augšējās malas ir nomelnējušas. Aplūkojot paraugu SEM, var novērot, ka uz virsmas ir izveidojušies dažādas formas melni nosēdumi un dažādu formu sakusumi.

Uz virsmas esošie berilija sakusumi ir ar ļoti augstu niķeļa un skābekļa saturu. Pēc EDX spektriem var domāt, ka virsma sastāv tikai no niķeļa. Sastopami arī citi elementi kā, piemēram, dzelzs, volframs, un varš. Ļoti mazās koncentrācijās sastopami arī mangāns, hlors un hroms.

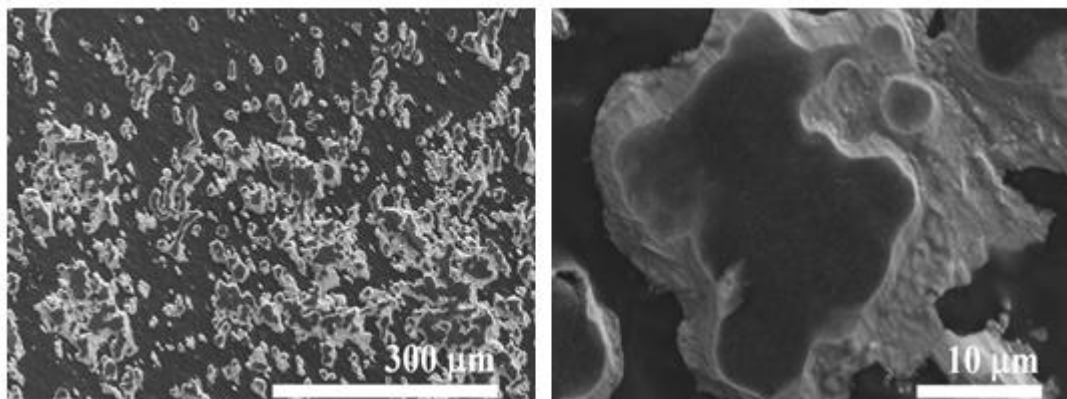
- **Paraugs Nr. 130**



3.8.att. 130 parauga virsmas struktūra

Vizuāli virsmas struktūra ir gluda, bez sakusumiem un pelēkas nokrāsas. Ķieģeļa malējām skaldnēm augšējā daļa arī ir nomelnējusi. Apskatot ķieģeļa virsmu ar SEM, var novērot, ka ir izveidojušies nanometru lieli un dziļi caurumi, kas var liecināt par eroziju. Uz virsmas ir novērojamas arī dažādas formas gaišas daļiņas.

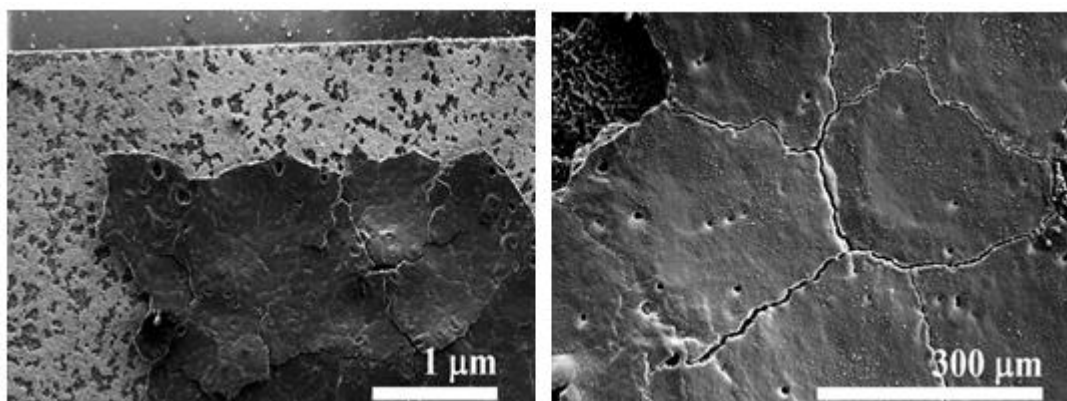
- **Paraugs Nr. 114**



3.9.att. 114 parauga virsmas struktūra

Parauga virsmas struktūra gan vizuāli, gan SEM ir gandrīz identiska 151 paraugam. Uz virsmas ir izveidojušies dažādas formas melni nosēdumi un dažādu formu sakusumi.

- **Paraugs Nr. 106**



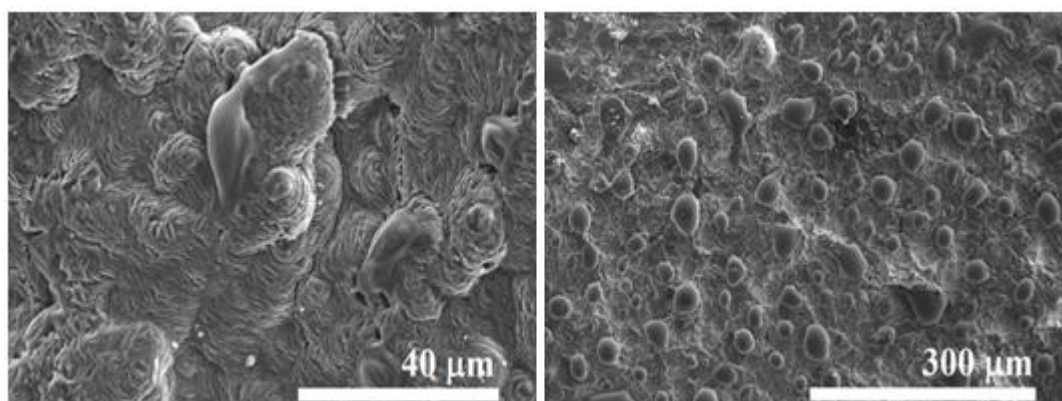
3.10.att. 106 parauga virsmas struktūra

Vizuāli novērtējot parauga virsmas struktūru, var novērot izteiktu sakusumu, kas var veidoties ļoti augstas temperatūras ietekmē – tiešas plazmas iedarbība. Ķieģeļa virsējā skaldne ir pa pusei melna, pa pusei pelēka, sānu skaldņu augšējās malas ir izteikti nomelnējušas. Parauga virsmas struktūra ir slāņaina. Uz virskārtas ir izveidojušās plaisas un burbuļi, no kuriem liela daļa ir plīsusi. Virsmas struktūra ļoti līdzīga 165 paraugam.

Berilija sakusumos un burbuļu vietās ir augsta skābekļa koncentrācija. Zem virsējā slāņa un plaisu vietās ir ļoti augsta niķeļa koncentrācija. Uz virsmas ir atrodami arī citi elementi kā, piemēram, dzelzs, volframs, hlors, mangāns, varš, alumīnijs, horms, ogleklis un alumīnijs.

DUMP PLATE 2BC2

- **Paraugs Nr. 79**



3.11.att. 79 parauga virsmas struktūra

Vizuāli parauga virsma ir gluda, bez vizuāliem defektiem. Ķieģeļa virsējā skaldne ir melna, malējo skaldņu virsējās malas ir nomelnējušas.

Parauga virsmas struktūra līdzīga 14 paraugam. Var novērot sakusumus lāsveida formā un plākšņainus nosērumus, kas izskatās kaposta formas.

Izvērtējot uzņemtos SEM attēlus, var novērot, ka paraugi viens otram, pēc virsmas struktūras, ir līdzīgi, kas liek domāt, ka paraugi tikuši pakļauti vienādiem vai līdzīgiem apstākļiem. Paraugu līdzība un pazīmes apkopotas 3.3.tabulā.

3.3.tabula

Paraugu virsmas līdzība

Paraugu Nr.	Pazīme pēc kuras līdzīgi
14 un 79	Plākšņveida nosēdumi, kas ir kāposta formas/veida
60 un 28	Lāses veida sakusumi un sakusumi, kas izsmērējušies un veido svītras
41 un 130	Uz virsmas novērojami erozijas radīti caurumi
151 un 114	Virsmas pamats ir melns, bet izveidojušies pelēki un melni nosēdumi.
106 un 165	Zonas ar burbuļu veida virsmu, kur liela daļa ir burbuļu ir plīsuši.

Izvērtējot EDX spektrus, var spriest, ka ķīmiskais sastāvs ir ļoti dažāds. Uz virsmas esošos berilija sakusumos ir atrodami šādi elementi: mangāns, hlors, ogleklis, hroms, skābeklis, dzelzs, niķelis volframs u.c. Plākšņuveida nosērumi lielākoties ir veidoti no niķeļa un skābekļa. Lāsveida sakusumi un apaļās formas daļiņas, kas atrodamas uz virsmas sastāv no kalcija, skābekļa un niķeļa un volframa, kas ir augstās koncentrācijās.

JET kamerā pašlaik tiek izmantots berilijs, volframs, ar volframu pārklāti CFC un ar beriliju pārklāti Inconel ķieģeļi [15]. No tā var secināt, ka tokamaka vakuuma kamerā būtu jābūt tikai diviem elementiem, bet EDX analīze uzrāda vēl citus.

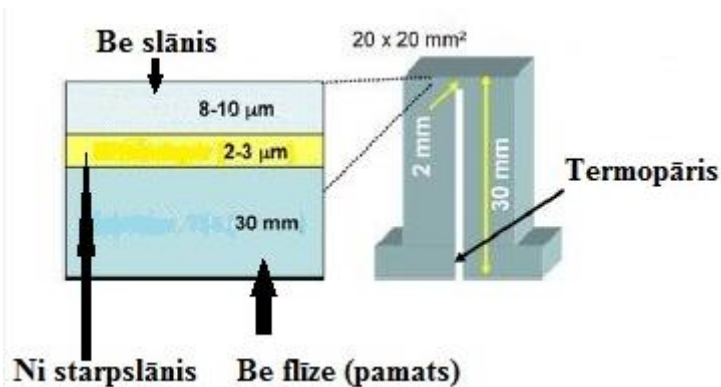
Lielā mērā šos papildus elementus ienes CFC un Inconel piemaisījumi. Inconel pamatā ir niķeļa un hroma sakausējums. Tam ir ļoti augsta kušanas temperatūra 1343 – 1377⁰C. Kodolsintēzes vakuuma kamerās izmanto Inconel 690, kura ķīmiskais sastāvs dots 3.3.tabulā [45].

CFC tipiski piemaisījumi ir alumīnijs (<0,1ppm), bors (0,05ppm), kalcijs (0,3ppm), kobalts (<0,1ppm), hroms (<0,1ppm), dzelzs (0,3ppm), magnijs (0,05ppm), kālijs (<1ppm), mangāns (<0,1ppm), nātrijs (<1ppm), niķelis (<0,01ppm), fosfors (<0,3ppm), sērs (2ppm), titāns (0,3ppm) un vanādijs (0,1ppm), kas rodas ražošanas procesā [46].

3.4.tabula

Inkonela 690 ķīmiskais sastāvs

N.p.k.	Elenents	Masas daļa, %
1.	Niķelis	59,5
2.	Hroms	27-31
3.	Dzelzs	7-11
4.	Mangāns	0,5 (max)
5.	Varš	0,5 (max)
6.	Alumīnijs	0,02
7.	Silīcijs	0,5 (max)
8.	Ogleklis	0,05 (max)
9.	Sērs	0,015 (max)



3.12.att. Berilija ķieģeļa uzbūve [15]

Piemaisījumu elementi sāk parādīties tad, kad berilija ķieģelis/flīze tiešas plazmas iedarbībā tiek bojāti. Plazmas kustības laikā tie tiek pārnesti pa vakuuma kameru un nonāk uz citām virsmām.

3.2. Tritija kopējais daudzums un sadalījums tilpumā

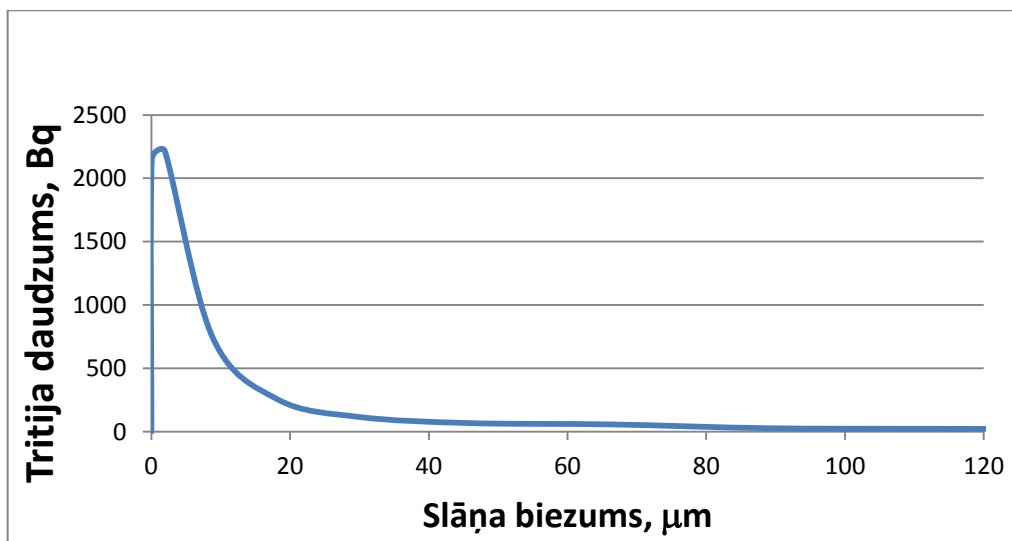
Tritija daudzums un sadalījums noteikts paraugā Nr. 114, kas balstoties uz SEM datiem ir salīdzinoši maz bijis pakļauts tiešai plazmas iedarbībai (mazs nosēdumu slānis, nav sakusumu).

Analizētā parauga masa ir $m=1,41527\text{g}$ un šķautnes laukums, kas pakļauta plazmas iedarbībai $S=0,8634\text{ cm}^2$. Tritija kopējais daudzums attiecībā pret virsmu ir $6,77\text{ kBq/cm}^2$.

Izmantojot šķīdināšanas metodes un radiometriskās metodes tritija mērījumiem tika iegūts, ka tritija aktivitāte 114 paraugā ir $A_T=5,8415\text{ kBq}$, īpatnējā aktivitāte $A_{ip}=4,1275\text{ kBq/g}$ un tritija atomu skaits $N_T=3,34 \cdot 10^{12}$ atomi.

ŠS iekārtas ^3H skaitīšanas efektivitāte $64,8\%$, bet noteikšanas precizitāte $\pm 0,8\%$. Ar šķidro scintilācijas metodi tika noteikts, ka tritija aktivitāte šķīdumā ir $0,5541\text{ kBq}$, kas atbilst $9,50\%$ šķīdināšanas procesā noteiktās aktivitātes. Tritija kopējais daudzums šķīdumā attiecībā pret virsmu ir $0,6517\text{ kBq/cm}^2$.

Tritija sadalījums berilija paraugā noteikts reģistrējot tā gāzveida formu – T_2 un HT – izdalīšanos šķīšanas procesa laikā. Tritija sadalījums noteikts aktīvajā, pret plazmu vērstajā virsmā.



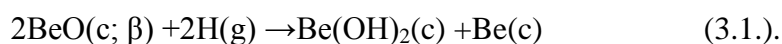
3.13.att. Tritija sadalījums berilija ķieģeļa virsmas slānī – 114 paraugs

Tritija sadalījums ķieģelī ir nevienmērīgs. Lielākoties viss tritījs ir lokalizējies pret plazmu vērstajā ķieģeļa virsmā, kura ir pieejama tiešai plazmas iedarbībai – tritija difūzija materiālā. Neutronu starojumam mijiedarbojoties ar beriliju arī veidojas tritījs kā kodolreakciju produkts, taču tad tā koncentrācija būtu daudz maz vienmērīga visā ķieģeļa tilpumā. Līdz ar to var secināt, ka galvenais tritija uzkrāšanās ceļš dotajā materiālā ir difūzija un līdznosēšanās ar erozijas produktiem. Tritija molekulārā forma ir lokalizēta pirmajos ~80 μm virsmas slāņā, bet maksimālā koncentrācija ir 2-10 μm virsmas slāņā.

3.3. Tritija uzkrāšanos ietekmējošu faktoru novērtējums

Plazmas kameras materiālos tritījs lielākoties nonāk nosēžoties uz virsmas kopā ar putekļiem, kas veidojas sienas materiālu erozijas rezultātā. Visi sienu veidojošie materiāli ir noklāti ar šiem putekļiem. Daļa tritija var difundēt tālāk materiālos. Atkarībā no materiāla struktūras, tritījs var difundēt tuvākā pievirsmas slānī vai gandrīz visā materiāla tilpumā [2].

Tritija uzkrāšanos materiālos ietekmē dažādi faktori – materiāla veids un tā virsmas struktūra, piemaisījumi, gāzu ieslēgumi u.c. Plazmas iekārtās izmanto beriliju un CFC, bet šiem materiāliem atšķiras uzņemtā tritija daudzums. Tritījs spēj ķīmiski saistīties ar berilija oksīdu un virsmas slāni veidojot stabilo berilija oksīdu, kurā tritījs ir saistīts ar O-T saiti. Hidroksīda forma ir atbildīga par tritija ķīmisko saistīšanos. Atomārais tritījs (ūdeņradis) ar berilija oksīdu reagē pēc reakcijas (3.1.)[48]:



CFC ir veidoti no šķiedrām un līdz ar to, tritījs spēj difundēt ļoti dziļi, pat visā materiāla tilpumā Pastāv trīs galvenie procesi, kas noved pie tritija uzkrāšanās CFC: pirmkārt - ar tritiju

piesātināta virsmas slāņa veidošanās (ogles un tritija sastīšanās), otrkārt - tritija implantēšanās bojājumu vietās, treškārt - tritija atomu difūzija dziļākos slāņos no bojājumu vietām. Balstoties uz iepriekšējos pētījumos gūtiem rezultātiem, noskaidrots, ka CFC spēj akumulēt līdz 40% no tritija daudzuma, kas ir nesalīdzināmi vairāk nekā metāliska berilija gadījumā [49, 50].

Attiecībā uz novietojumu un plazmas tiešo iedarbību, jāatzīmē, ka materiālu ekspluatācijas laikā notiek ne tikai tritija uzkrāšanās, bet arī uzkrātā tritija izdalīšanās temperatūras ietekmē. Iepriekšējos pētījumos par tritija uzkrāšanos berilija JET kampaņās 90-jos gados konstatēts, ka paraugos ar būtiski sakusušu virsmu (tātad augstas temperatūras ietekmi), tritija saturs ir ievērojami zemāks nekā paraugos, kuru virsma bija šķietami maz skarta vai arī klāta ar nosēdumu slāni [51].

SECINĀJUMI

1. Vakuuma kameras apstākļi un parauga novietojums tajā būtiski ietekmē materiālu virsmas struktūru un tās ķīmisko sastāvu.
2. Izmaiņas, kas skar virsmu, pamatā ir materiāla ķīmiskā un fizikālā erozija, kušana un erozijas produktu nosēduma slāņa veidošanās.
3. Nosēdumu slāņa ķīmiskais sastāvs atbilst vakuuma kamerā sastopamajiem materiāliem – to skaitā arī tiem, kam šķietami nevajadzētu būt tiešai saskarei ar plazmu.
4. Vakuuma kamerā izmantotajos ķieģeļos ir novērojama savstarpēja līdzība, kas norāda uz līdzīgiem, ja ne pat vienādiem ekspluatācijas apstākļiem.
5. JET plazmas kamerā izmantotajos berilija materiālos tritija sadalījums nav vienmērīgs, tas pamatā uzkrājas virsmas slānī, skaldnē, kura pakļauta plazmas iedarbībai. Maksimālā tritija koncentrācija ir virsmas slānī 2-10 μm , bet sastopams līdz aptuveni 80 μm .

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. The Physics Hypertextbook. <http://physics.info/fusion/> (skatīts: 26.04.2015.).
2. Pajuste, E. Tritium Behaviour In The Fusion Reactor Materials. Doctoral Thesis. University Of Latvia Faculty of Chemistry, Riga, **2012**.
3. European Consortium for the Development of Fusion Energy. <https://www.euro-fusion.org/> (skatīts: 26.04.2015.)
4. Lawson, J.D. Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor. *Proceeding of the Physical Society. Section B*, **1957.**, 70(1), 6.
5. Latvijas Zinātņu akadēmija. http://www.lza.lv/index.php?option=com_content&task=view&id=525&Itemid=220 (skatīts: 26.04.2015.)
6. Physics Central. <http://www.physicscentral.com/explore/action/fusion.cfm> (skatīts: 26.04.2015.)
7. Koli, P., Gongotri, K.M., Sharma, U., Bhimwal, M., Mahawar, A., Bhimwal, M. Fusion A Limitless Source of Energy. *Science Reporter*. **2010.**, 13-15 (<http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/10580/1/SR%2047%2811%29%2013-15.pdf>)
8. Hyperphysics. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/fusion.html> (skatīts: 26.04.2015.)
9. Dobran, F. Fusion energy conversion in magnetically confined plasma reactors. *Progress in Nuclear Energy*. **2012.**, 60, 89-116
10. Culham Centre for Fusion Energy. <http://www.ccfе.ac.uk/> (skatīts: 26.04.2015.)
11. Boozer, A.H. Physics of magnetically confined plasmas. *Reviews of Modern Physics*, **2005.**, 76(4), 1071.
12. Lawrence Livermore National Laboratory. <https://lasers.llnl.gov/> (skatīts: 9.05.2015.)
13. Fusion for Energy. <http://fusionforenergy.europa.eu/understandingfusion/iterdevice.aspx> (skatīts: 9.05.2015.)
14. ITER – the way to new energy. <https://www.iter.org/proj/itermission> (skatīts: 27.04.2015.)
15. Hirai, T., Linke, J., Rubel, M., et.al. Thermal load testing of erosion-monitoring beryllium marker tile for the ITER-Like Wall Project at JET. *Fusion Engineering and Design*. **2008.**, 83, 1072-1076.

16. European commission.
http://ec.europa.eu/research/energy/euratom/index_en.cfm?pg=fusion§ion=iter-future (skatīts: 9.05.2015.)
17. Tore Supra. http://www-cadarache.cea.fr/gb/PDF/Fiche-Tore_Supra_UKfinal.pdf
(skatīts: 9.05.2015.)
18. JT-60SA. <http://www.jt60sa.org/b/index.htm> (skatīts: 9.05.2015.)
19. Rebut, P.H. First JET Results and it's Prospects. **1984.**, 11
20. World nuclear news. http://www.world-nuclear-news.org/-NN_JET_to_relaunch_060911a.html (skatīts: 6.05.2015.)
21. Matthews, G.F., Beurskens, M., Brezinsek, S. et al. JET ITER-like wall - overview and experimental programme. *Physica scripta*. **2011.**, 1-6.
22. Widdowson, A., Ayres, C.F., Booth, S., Coad, J.P., Hakola, A., Heinola, K., Ivanova, D., Koivuranta, S., Likonen, J., Mayer, M., Stamp, M. Comparison of Jet main chamber erosion with dust collected in the divertor. *Journal of Nuclear Materials*. **2013.**, 27-32.
23. Thompson, V., Krivchenkov, Y., Riccardo, V., Vizvary, Z. Analysis and design of the beryllium tiles for JET ITER-like wall project. *Fusion Engineering and Design*. **2007.**, 82, 1706-1712.
24. Thomser, C., Bailescu, V., Brezinsek, S. et.al. Plasma Facing Materials for the JET ITER-like Wall. **2011.**, 1-8.
25. Gelles, D.S., Sernyaev, G.A., Dalle Donne, M., Kawamura, H. Radiation effects in beryllium used for plasma protection. *Journal of Nuclear Materials*. **1994.**, 29-38.
26. Pujaste, E., Silkāns, V. Berilijs un tā savienojumi. Referāts arodtoksikoloģijā. Latvijas Universitātes Ķīmijas fakultāte, Rīga, **2013.**
27. Jakubowski, M., Palczyński, C. Handbook on the Toxicology of Metals. Academic Press, **2015.**, pp 635-653.
28. Barabash, V., Federici, G., Rødig, M., Snead, L.L., Wu, C.H. Neutron irradiation effects on plasma facing materials. *Journal of Nuclear Materials*. **2000.**, 138-146.
29. Beeston, J.M., Longhurst, G.R., Wallace, R.S., Abeln, S.P. Mechanical properties of irradiated beryllium. *Journal of nuclear materials*. **1992.**, 102-108.]
30. Doerner, R.P., Baldwin, M.J., Nishijima, D. Plasma – induced morphology of beryllium targets exposed in PISCES-B. *Journal of Nuclear Materials*. **2014.**, 1-4.
31. Kupriyanov, I.B., Nikolaev, G.N., Kurbatova, L.A., et al. Erosion of beryllium under ITER – Relevant transient plasma loads. *Journal of Nuclear Materials*. **2015.**, 1-6.

32. Causey, R.A. Hydrogen isotope retention and recycling in fusion reactor plasma – facing components. *Journal of Nuclear Materials*, **2002.**, 300, 91-117.
33. Khomutov, A., Barabash, V., Chakin, V. et.al. Beryllium for fusion application – recent results. *Journal of Nuclear Materials*, **2002.**, 630-637.
34. Chakin, V., Reimann, J., Moeslang, A. et.al. Thermal conductivity of highly neutron-irradiated beryllium in nuclear fusion reactors. *Progress in Nuclear Energy*. **2012.**, 57, 2-7.
35. Canadian nuclear FAQ http://www.nuclearfaq.ca/cnf_sectionD.htm#x5 (skatīts: 9.05.2015.)
36. Institute for Energy and Environmental Research. <http://ieer.org/resource/reports/tritium-environmental-health-budgetary-strategic-effects/#%2811%29> (skatīts: 9.05.2015.)
37. Idaho State University www.physics.isu.edu/radinf/tritium.htm (skatīts: 9.05.2015.)
38. International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/newscenter/news/fusion-energy-future> (skatīts: 9.05.2015.)
39. Peeters, A.G. Physics of Fusion. Lecture 1. 1-25.
40. Poitevin, Y.; Boccaccini, L.V.; Zmitko, M.; Ricapito, I.; Salavy, J.-F.; Diegele, E.; Gabriel, F.; Magnani, E.; Neuberger, H.; Lässer, R.; Guerrini, L. Tritium breeder blankets design and technologies in Europe: Development status of ITER test blanket modules, test & qualification strategy and roadmap towards DEMO. *Fusion Engineering and Design*. **2010.**, 85, 2340-2347.
41. Causey, R.A. Karnesky, R.A. San Marchi, C. Tritium Barriers and Tritium Diffusion in Fusion Reactors. **2009.**
42. Causey, R.A. Hydrogen isotope retention and recycling in fusion reactor plasma – facing components. *Journal of Nuclear Materials*, **2002.**, 300, 91-117
43. Causey, R.A., Hsu, W.L., Mills, B.E. Tritium retention and migration in beryllium. *Journal of Nuclear Materials*. **1990.**, 654-660.
44. Igaune, I. Patronu iniciējošā sastāva noteikšana izmantojot skenējošo elektronu mikroskopu. *Kursa darbs fizikālajā ķīmijā*. Rīga, **2014.**, 40.
45. Tsoufanidis, N. *Measurement and Detection of Radiation*. Hemisphere publishing corporation, Washington, 1983; pp 571.
46. Azo materials. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7747> (skatīts: 25.05.2015.)

47. Penzhorn, R.D., Bekris, N., Hellriegel, W. et.al. Tritium profiles in tiles from the first wall of fusion machines and techniques for their detritiation. *Journal of Nuclear Materials*. **2000.**, 279, 139-152.
48. Scaffidi-Argentina, F., Dalle, M., Ronchi, C., Ferrero, C. ANFIBE:a compressive model of swelling and tritium release from neutron irradiated beryllium-I: theory and model capabilities. *Fusion technology*, **1997.**, 32, 179-195.
49. Scaffidi-Argentina, F., Sand, C., Wu, C.H. Tritium retention in neutron – irradiated low-Z materials for use as plasma facing materials. *Journal of Nuclear Materials*. **2001.**, 211-215.
50. Compan J., Hirai T., Pintsuk G., Linka J., Microstructural and thermo-mechanical characterization of carbon/carbon composites, *Jurnal of Nuclear Materials*, **2009.**, 386-388, 797-800.
51. Tīliks, J., Ķizāne, G., Vītiņš, A., Kolodinska, E., Tīlika, V., and Leščinskis, B., Tritium sorption and desorption from JET beryllium tiles under temperature, electron radiation and magnetic field. *Fusion Engineering and Design*, **2008.**, 83(10-12): 1388-1391.