

ATYS

4|2017

Vol. 46

YDINTEKNIikka

SUOMEN ATOMITEKNILLINEN SEURA – ATOMTEKNISKA SÄLLSKAPET I FINLAND

Fuusiosähköä töpselistä 50 vuoden päästä

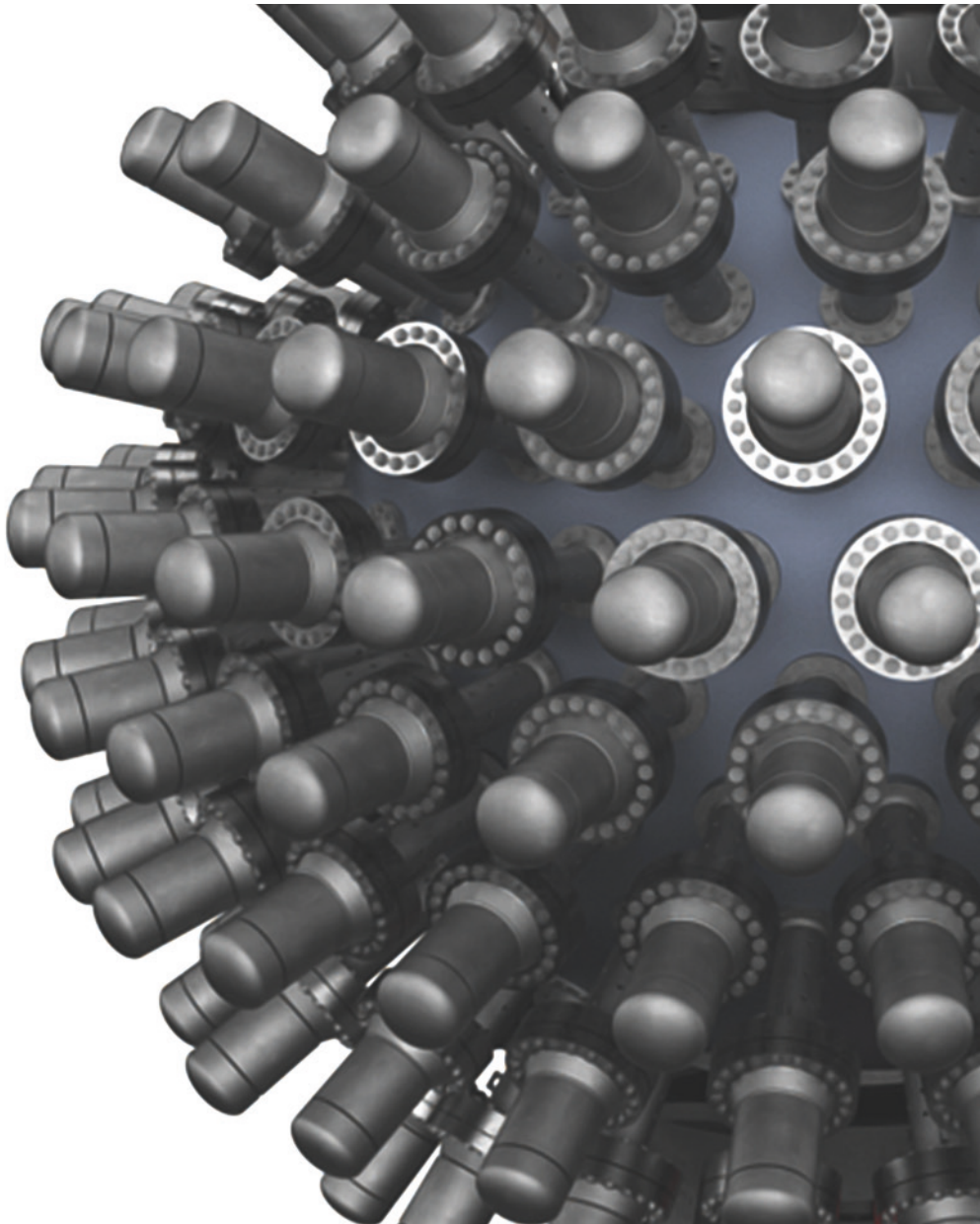
Tutkimuksen painopiste on siirtynyt plasmafysiikan perustutkimuksesta tukemaan fuusioreaktoreiden suunnittelua ja rakentamista.

DEMO tarvitsee yritysten osaamista

Suomessa ydinvoimateollisuutta on jo aktivoitu mukaan.

Silta kohti ITERiä

JT-60SA-tokamak Japanissa mahdollistaa fuusiotasoisten plasmojen tutkimisen, testaamisen ja optimoinnin.



Julkaisija / Publisher

Suomen Atomiteknillinen Seura – Atomtekniska Sällskapet i Finland r.y.
www.ats-fns.fi

Johtokunta / Board

Puheenjohtaja / President

DI Kai Salminen
puheenjohtaja@ats-fns.fi

Varapuheenjohtaja / Vice President

DI Tuomas Rantala
tuomas.rantala@tvo.fi

Sihteeri / Secretary General

FM Antti Rätty
sihteeri@ats-fns.fi

Rahastonhoitaja / Treasurer

DI Lauri Pyy
rahastonhoitaja@ats-fns.fi

Jäsenet / Board Members

FL Lasse Koskinen
lasse.koskinen@posiva.fi

DI Toivo Kivirinta
toivo.kivirinta@fortum.com

DI Antti Paajanen
antti.paajanen@fennovoima.fi

Toimihenkilöt / Functionaries

ATS Young Generation

DI Tuomo Huttunen
tuomo.huttunen@energia.fi

Kansainvälisten asioiden sihteeri / International Affairs

DI Henri Ormus
henri.ormus@fennovoima.fi

Energiakanava / Energy Channel, WiN Finland

www-vastaava / Webmaster

DI Juha-Pekka Hyvärinen
webmaster@ats-fns.fi

ATS-Seniorit / ATS-Seniors

TkL Eero Patrakka
eero.patrakka@kolumbus.fi

Toimitus / Editors

Vastaava päätoimittaja / Editor-in-Chief

DI Anna Nieminen
anna.nieminen@vtt.fi

Tieteellinen päätoimittaja / Scientific Chief Editor

TkT Jarmo Ala-Heikkilä
jarmo.ala-heikkila@aalto.fi

Ajankohtaispäätoimittaja / Topical Chief Editor

DI Tapani Raunio
tapani.e.raunio@fortum.com

Toimitussihteeri / Lay-out Editor

Katariina Korhonen
Suunnittelutoimisto Creatus
katariina@creatus.fi

Toimitus / Editorial Staff

DI Klaus Kilpi
klaus.kilpi@welho.com

DI Lauri Rintala
lauri.rintala@fennovoima.fi

TkT Vesa-Matti Tikkala
vesa-matti.tikkala@fortum.com

TkT Risto Vanhanen
risto.vanhanen@tvo.fi

Kannen kuva: General Fusion

Toimituksen yhteystiedot

ATS Ydintekniikka

c/o Anna Nieminen
PL 1000
02044 VTT
p. 040 159 1156

Painopaikka

Wellprint Oy, Espoo

ISSN-0356-0473

Vuonna 1966 perustetun Suomen Atomiteknillisen Seuran (ATS) tarkoituksena on edistää ydintekniikan alan tuntemusta ja kehitystä Suomessa, toimia yhdyssiteenä jäsentensä kesken kokemusten vaihtamiseksi ja ammattitaidon syventämiseksi sekä vaihtaa tietoja ja kokemuksia kansainvälisellä tasolla. ATS on Tieteellisten seurain valtuuskunnan jäsenseura.

ATS Ydintekniikka on ATS:n julkaisema, neljästi vuodessa ilmestyvä aikakautinen julkaisu. ATS:n tavoitteena on, että ATS Ydintekniikka on johtava teknistieteellinen ammattijulkaisu Suomessa.

ATS ei vastaa julkaistuissa artikkeleissa ja kirjoituksissa olevista tiedoista ja näkökannoista. Toimitus pitää itsellään oikeuden lyhentää, tiivistää ja muokata julkaistavaksi tarkoitettuja artikkeleja ja kirjoituksia.

Priorisoinnin vaikeus

KUN MONI ASIA pitäisi saada yhtäaikaista valmiiksi, on pakko priorisoida. Tässä ei välttämättä edes ole kysymys siitä, etteikö osaisi aloittaa ajoissa, vaan siitä että entisten päälle tulee koko ajan lisää ja kaikella on kamala kiire. On melko turhauttavaa, kun kaikki vaaditaan tehtäväksi saman tien. Mitä tapahtuu sille kiireiselle asialle, jota teet uuden pyynnön saadessasi?

Itse pyrin tekemään ensin ne asiat, jotka edesauttavat muiden etenemistä. Seuraavaksi yritän tarttua kiireisimpään tehtävään, jonka tunnistaminen onkin yllättävän vaikeaa. Kun vaatimuksia kasaantuu, alkaa olla vaikea päättää tarttuako siihen, joka tuli ensimmäisenä (ja jonka tyypillisesti olisi jo pitänyt olla valmiina) vai siihen johon juuri pyydettiin reagoimaan ASAP. Viimeiseksi jäävät sitten ne niin sanotut omat työt, joiden hätäisestä tekemisestä aikataulusta jäljessä kokee jatkuvaa huonoa omaatuntoa.

Priorisoinnista on kysymys myös päätetäessä, mikä tutkimusaihe saa rahoitusta ja mikä ei. Valinnan tueksi on kehitettävä kri-

teerit, jotta päätöksentekoon saadaan läpinäkyvyyttä ja reiluuden tuntua. Tyypillisesti arvioidaan muun muassa tieteellistä tasoa ja tutkimustulosten hyödynnettävyyttä. Tieteelliseen tasoon fokuusoituminen jättää yleensä heikoille pisteille projektit, jotka kasvattavat alalle uusia osaajia. Tutkimustulosten hyödynnettävyys puolestaan on varsin subjektiivinen mittari.

Subjektiviisuuden minimoiminen tulisi olla päämääränä kaikessa päätöksenteossa. Valitettavasti siitä ei tunnuta pääsevän eroon millään päätöksenteon tasolla. Henkilö tai siten ryhmä puolustaa aina omaa kantaansa. Ratkaisu on osallistaa mahdollisimman monia ihmisiä erilaisista ryhmistä.

Miten tämä toimii sitten henkilökohtaisella tasolla? Yritä ajatella myös muita; siksi minäkin pyrin tekemään ensin ne asiat, jotka hyödyttävät toisten töitä.

Anna Nieminen

Vastaava päätoimittaja



SISÄLTÖ

Vakiopalstat

Päätoimittajalta: Priorisoinnin vaikeus.....	3
Pääkirjoitus: Elämme fuusion teollistumisen aikaa – onko Suomi mukana?.....	4
Editorial: Fusion is industrialising – is Finland part of it?.....	5
Pakina: Metro muutti maalle.....	26

Tapahtumat

Perinteinen Syysseminaari.....	6
--------------------------------	---

Ajankohtaista

Fuusiosähköä joka kotiin 50 vuoden päästä – miten Euroopassa edistetään tätä tavoitetta?.....	8
Uudet fuusiolaitteet rakentavat siltaa kohti ITERiä.....	11
EMSNE-sertifikaatit jaettiin syyskuussa Wienissä.....	14

Tiede ja tekniikka

DEMO tarvitsee yritysten osaamista.....	16
<i>Markus Airila, Sami Herranen, Sami Kiviluoto, Tuomas Tala</i>	
Yksityisrahoitteinen fuusiotutkimus.....	20
<i>Otto Asunta, Tomas Lindén</i>	
Diplomityö: Loviisan ydinvoimalaitoksen vakavan reaktori-onnettomuuden ohjeen kehitys.....	25
<i>Essi Karstinen</i>	

Elämme fuusion teollistumisen aikaa – onko Suomi mukana?

SUOMESSA veljekset fissio ja fuusio ovat eläneet sopuisasti yhdessä 1970-luvun puolivälistä lähtien, jolloin VTT:n pieni ryhmä aloitti laserfuusion teoreettisen tutkimuksen Hietalahden torin laidalla Helsingissä. Pikkuveli fuusio on VTT:n ja yliopistojen organisaatioissa pääsääntöisesti sijoitettu ydinvoimaperheeseen isovelji fission suojiin. Opiskelijamme ja tutkijamme ovatkin kasvaneet molempien alojen kehityksen ja haasteiden keskellä ja vieneet laajakatseisuuttaan mukanaan siirtyessään teollisuuden palvelukseen ja muihin asiantuntijatehtäviin.

EU-jäsenyyden myötä Suomi liittyi 1990-luvun puolivälissä myös osaksi eurooppalaista fuusiotutkimusohjelmaa, löysi nopeasti vahvuutensa ja keskitti kansalliset voimavaroinsa tehokkaasti niihin. Näistä vahvuuksista juuri fission ja fuusion välinen poikkiteollinen ymmärrys on nyt osoittautunut erityisen arvokkaaksi, kun meneillään olevan ITER-koereaktorin rakentamisen ja seuraavan sukupolven DEMO-voimalan suunnittelun myötä fuusiossa edetään plasmafysiikan kokeista ratkaisemaan myös voimalaitosluokan teollisia ja ydinteknisiä kysymyksiä. Aikanaan nopeasti aikuistuneella fissiotekniikalla onkin paljon annettavaa perässä tulevalle fuusiolle.

Vuodesta 2014 lähtien Suomen fuusiotutkimus on organisoitu FinnFusion-konsortiksi, jota VTT koordinoi. Tämä laaja yritysten, tutkimuslaitosten ja yliopistojen verkosto kattaa noin 150 vahvasti verkostoitunutta eri sektorien asiantuntijaa. Kansallinen panostus on saatu Tekesin pitkäjänteisen ohjelmavuotuisen rahoituksen muodossa, jonka turvin onnistuttiin 20 vuoden aikana rakentamaan terve ja tuottelias fuusiotutkimusohjelma. Yliopistojen, yritysten ja VTT:n saumattoman yhteistyön hedelmänä teollisuudelle on te-

hokkaasti luotu kansallista etua. Vaikuttavien tieteellisten saavutusten ansiosta Suomen ohjelmaa arvostetaan myös EU:ssa esimerkkinä hyvin hoidetusta kansallisesta koordinoinnista. Ohjelman vuotuisesta 6 miljoonan euron budjetista yli 40 % saadaan EU:sta.

Erityisesti viime vuosina FinnFusion on aktiivisesti yhdistänyt fuusio-osaamista ydinvoima-alan teolliseen kokemukseen ja toteuttanut tähän mennessä lukuisia suomalaisen ydintekniikkaosaamisen vientiä edistäviä avauksia, joissa suomalainen teollisuus ja tutkimus yhdessä ovat päässeet mukaan teknologiatoituksiin maailmanluokan konsortioissa. Aihepiireinä ovat toistaiseksi olleet mm. prosessimallinnus, neutroniikka, lisensointi ja etäkäsitteily. Esimerkki lukuisista ydinvoima-alan ulkopuolisista toimituksista ovat ITERin suprajohdeet.

Juuri nyt Suomen fuusioyhteisöä ja laajemmaltikin uuden sukupolven ydintekniikan tutkijoita kuitenkin painaa syvä huoli pitkäjänteisellä työllä rakennetun menestystarinan tulevaisuudesta. Tekesin lopetettua ohjelmavuotuisen rahoituksen meiltä on poistunut se keskeinen koossapitävä ja strategisen ohjaimisen mahdollistanut voima, joka kokosi kansallisen fuusiotutkimuksen osat yhteiseksi tutkimusohjelmaksi. Vaikka osa tutkimusprojekteista onkin vielä toimintakykyisiä, vahva ja yhteen hiileen puhaltava ohjelma käytännössä päättyi. Meidän on nyt yhdessä löydettävä tapa palauttaa tai korvata noin miljoonan euron vuotuinen panostus, joka turvaisi Suomen fuusiotutkimuksen menestyksen myös tulevana vuosikymmeninä.

On syytä muistaa, että Eurooppa on poliittisesti hyvin vahvasti sitoutunut 40 vuoden ajaksi edistämään fuusioenergian taloudellista hyödyntämistä. Ranskaan rakennettava ITER



on ennen kaikkea osoitus laajasta kansainvälisestä yhteistyöstä, onhan yli puolet ihmiskunnasta osallistumassa hankkeeseen. Samalla se on käytännössä ainoa iso Euroopan johtama tiedehanke, ja noin 20 miljardin euron budjetillaan myös merkittävä uuden osaamisen ensimmäinen.

EU:n jäsenenä Suomi on myös poliittisesti sitoutunut ITERin rakentamiseen ja käyttöön sekä sitä tukevaan tutkimukseen. Jäsenmaksullaan Suomi osallistuu vuosittain noin 10 miljoonalla eurolla ITERiin ja muuhun fuusiotutkimukseen. Ratkaiseva kysymys onkin, miten Suomi aikoo hyödyntää tätä panostusta tulevaisuudessa, jotta saamme parhaat mahdolliset edut tästä jäsenmaksusta kotiutettua.

Vahvana ydinvoimaosaajajamaana ja luotettavana kumppanina tunnetun Suomen maine, osaaminen ja kyky houkuttaa parhaita opiskelijoita saivat pahan kolhun, jos luopuisimme fuusioenergiatutkimuksesta EU-tasolla.

TkT Markus Airila

Erikoistutkija
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
markus.airila@vtt.fi

Fusion is industrialising – is Finland part of it?

IN FINLAND, brothers fission and fusion have been living peacefully side by side since the mid-1970s, when a small group at VTT initiated theoretical research in laser fusion next to the Hietalahti market in Helsinki. The little brother fusion has found its place in the nuclear family at the organisations of VTT and Universities, under the auspices of big brother fission. Our students and researchers are familiar with the development and challenges of both fields and carried along their broadmindedness when moving into industry or other expert positions.

Along with the EU membership, Finland joined the European fusion research programme in the mid-1990s, found quickly its strengths and focused the national resources effectively into them. One of the strengths, interdisciplinary understanding between fission and fusion, has now proved extremely valuable when the ITER reactor is under construction and the next generation fusion power plant DEMO is being designed. Fusion research is progressing from plasma physics experiments into solving power plant scale industrial and nuclear technology challenges. Fission technology, that once matured quickly, has a lot to provide for fusion, following the footsteps.

Since 2014, Finnish fusion research is organised under the FinnFusion consortium coordinated by VTT and consisting of companies, research centres and universities including approximately 150 well-networked experts from different sectors. Domestic investment in the form of persistent programme-type funding from Tekes during 20 years formed the umbrella for a healthy and productive fusion research programme. This seamless cooperation of universities, companies and VTT has effectively provided national advantage for our industry. Due to its impressive scientific achievements, the Finnish programme is respected also in the EU as an example of well-managed national coordination. More than 40% of the annual budget of 6 M€ is received from the EU.

Especially during the last years, FinnFusion has actively combined fusion know-how with the industrial experience of nuclear technology and realised various opportunities to promote the export of Finnish nuclear technology expertise. Together, Finnish industry and research have been able to participate in world-class consortia to deliver technology e.g. for process modelling, neutronics, licencing and remote maintenance. An example of these deliveries even outside the actual nuclear field are the superconductors for ITER.

However, the Finnish fusion community and the researchers of next generation nuclear technologies are now concerned about the future of the persistently developed success story. After Tekes ended the programme-type funding, the cohesive force, which enabled strategic steering by collecting all parts of national fusion research into a common research programme, has disappeared. Even though some of the research projects are still functional, the strong programme that worked together for a common goal practically ceased. Now we must together find a way to restore or compensate the domestic annual investment of about a million euro that would secure the success of Finnish fusion research also in the coming decades.

It has to be remembered that Europe is politically strongly committed for the next 40 years to promote economically viable fusion energy. ITER that is being built in France is most of all a demonstration of broad international collaboration since more than half of the humankind is participating in the project. At the same, it is practically the only big scientific initiative in Europe and with its 20 billion euro budget, it can be considered also as a notable primary market for new expertise.

As a member of EU Finland is also politically engaged into construction and use of ITER as well as the supporting research. Finland is participating yearly with 10 M€ membership fee to ITER and fusion research. The key question is, how Finland is going to utilise this

investment in the future so that we are getting the best possible benefit.

Finland, known as a strong expert of nuclear technology and a trusted partner, would get a bad dent in its reputation, competence and ability to tempt talented students if we gave up fusion research at the EU level.

Dr Markus Airila

Senior Scientist

VTT Technical Research Centre of Finland Ltd

Perinteinen Syysseminaari

ATS:n Syysseminaari järjestettiin Säätytalossa 2.11. Seminaarin esitykset tarjosivat voimayhtiöiden ajankohtaisten asioiden lisäksi myös katsauksen ENS:n toimintaan ja tuoretta asiaa kotimaisesta tutkimuksesta.

Teksti: Lauri Rintala **Kuva:** Antti Paajanen

SEURAN PUHEENJOHTAJA Kai Salminen avasi seminaarin lyhyellä avauspuheen-vuorolla, mikä taisi toimia hyvänä esimerkkinä muille esiintyjille, sillä koko päivä saatiin vietyä läpi lähes aikataulussa.

Puheenjohtajan avauksen jälkeen tilaisuuden seremoniamestari Antti Paajanen kuulutti sisään Jorma Aurelan, joka kertoi Työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) puheenvuorolla ydinenergialaista ja sen uudistustarpeista. Ydinenergialakia on päivitetty sen melkein kolmekymmenvuotisen historian aikana 27 kertaa, mutta edelleen se kestää myös kansainvälistä vertailua varsin hyvin. Vuonna 2016 TEM käynnisti hankkeen ydinenergialain muutostarpeiden kartoittamiseksi, minkä loppupäätelmänä oli, että kokonaisuudistukseen ei ole tarvetta ryhtyä. Pienempiä muutostarpeita tulee uusista direktiiveistä ja muutoksista muualla lainsäädännössä sekä tunnistetuista aiheista kotimaan kentältä, esimerkkinä käytöstäpoistoluvan kirjaaminen lakiin.



DI Lauri Rintala

Säteilyturvallisuusinsinööri
Fennovoima Oy
lauri.rintala@fennovoima.fi

Voimayhtiöiden kuulumisia

Fortumin katsauksen ajankohtaisiin asioihin antoi Petra Lundström, joka kertoi Fortumin pyrkimyksistä viedä osaamistaan myös Suomen ulkopuolelle. Esimerkkeinä osaamisesta oli laitoksen 3D-kuvaamisen tai virtuaalilasi-

en hyödyntäminen huoltojen suunnittelussa ja koulutuksessa. Lundström esitteli myös Fortumin syksyn suurinta uutista saksalaista energiyhtiö Uniperia, josta Fortum teki Saksan lainsäädännön mukaisen ostotarjouksen hie-man Syysseminaarin jälkeen. Ostoaikheet olivat kuitenkin olleet jo pidempään median pyöriteltävänä. Uniper on kooltaan monilla mittareilla Fortumia itseään isompi ja sillä on voimaitoksia paitsi Saksassa myös muun muassa Ruotsissa ja Venäjällä.

Uniper on yritys johon E.ON siirsi kaikki vähemmän toivotut toimintonsa vuoden 2016 alusta. Nämä vähemmän toivotut toiminnot sisältävät paitsi valtavan määrän fossiilisia lauhdevoimaloita, myös E.ON:in omistukset ruotsalaisista ydinvoimalaitoksista. Siten kaupan myötä Fortum omistaa jatkossa Uniperin kautta myös Ringhals Ab:n ja OKG:n voimaloita.

Kahvitauon jälkeen TVO:n toimitusjohtaja Jarmo Tanhua kertoi länsirannikon kuulumiset, joissa merkittävässä roolissa oli jälleen kolmannen yksikön rakentamisen loppuunsaattaminen ja käyttöönotto. Väliliesmenettelyä laitostoimitukseen liittyvistä korvausvaateista ei käsitelty esityksessä sen enempää, mutta toimitusjohtaja mainitsi tähänastisten välipäätösten olleen TVO:lle suotuisia. Tiettyä helpotusta ei kuitenkaan voinut olla huomaamatta rivien välistä.



Seuran Syysseminaari keräsi jälleen osallistujia melkein salin täyteen.

Kansainvälinen yhteistyö ja kotimainen tutkimus


Syysseminaariin poikkeavaa kansainvälisyyttä toi Kirsten Epskampin esitys European Nuclear Societystä (ENS). ENS toimii kattavasti ydinvoima-alalla alkaen jäsenseurojen yhteistyön koordinoinnista opetuksen ja koulutuksen kehittämiseen ja tiedonvaihdon parantamiseen. ENS:n aktiviteetteihin kuuluu myös tiedon jakaminen paitsi ydinvoima-alan toimijoiden kesken niin myös päättäjille ja suurelle yleisölle.

Syysseminaarin päätti kaksi teknisempää esitystä, joista ensimmäisenä Markus Airila esitteli fuusiotutkimuksen tilanteen Suomessa ja maailmalla. Fuusiotutkimuksesta on tässä numerossa tietoa usean artikkelin voimin alkaen pääkirjoituksesta, joiden puoleen lämpimästi suosittelen kääntymään sen sijaan, että yrittäisin tässä toistaa samoja asioita fisisuodattimen läpi.

Lappeenrannan Teknillisen yliopiston (LUT) apulaisprofessori Heikki Suikkanen esitteli ydinvoimatutkimuksen nykytilaa ja vähän menneitäkin, sisältäen muun muassa suuret koelaitteistot PWR-PACTEL ja PPOOLEX. Uutena koelaitteena LUTissa otetaan käyttöön suojarakennuksen passiivista lämmönpoistojärjestelmää edustava

lämmönpoistokiertoapiiri, jonka referenssinä on käytetty AES-2006 laitoksen vastaavaa järjestelmää. Lisäksi LUTissa suunnitellaan vaihdettavista moduuleista koostuvaa uuden sukupolven termohydraulista koelaitteistoa, jolla voidaan mallintaa useita kevytvesireaktorityyppejä, mukaan lukien pienet modulaariset reaktorit. Kokeista kerätään laadukasta mittausdataa, jolla kyetään kelpoistamaan CFD-laskentaa.

Kokeellisen tutkimuksen lisäksi Lappeenrannassa tehdään paljon myös laskennallista tutkimusta. Termohydrauliikan koetoiminnan tukena käytetään sekä 1D-koodeja, kuten APROS ja TRACE, että kolmiulotteista CFD-laskentaa. Laskennallisen termohydrauliikan ohella tehdään myös reaktorifysiikan laskentaa sekä kehitetään kytkettyjä monifysikaalisia laskentamenetelmiä käytettäväksi niin perinteisten kevytvesireaktorien kuin kehitteillä olevien reaktorien, erityisesti kuulapetireaktorin, analyyseihin. Näissä tarkasteluissa on huomioitu polttoainekuulien pakkautuminen, neutronien kulkeutuminen, jäähydevirtaus sekä lämmönsiirto reaktorisydämessä. Pelkästään näiden aiheiden kirjoittaminen samaan lauseeseen saa läppärin prosessorin kyykkäämään ja LUTissa onkin systemaattisesti kehitetty laskennallisen tutkimuksen valmiuksia hankkimalla ajanmukaisia laskentapalvelimia.

Seminaarin esitelmien jälkeen oli perinteitä noudattaen voimayhtiöiden tarjoama iltatilaisuus, jossa osallistujat saivat nauttia erinomaisesta ruuasta ja juomasta sekä uusien ja vanhojen kollegojen seurasta. 

Fuusiosähköä joka kotiin 50 vuoden päästä – miten Euroopassa edistetään tätä tavoitetta?

Fuusiosähköä töpselistä? Vallankumouksellinen ajatus voi muuttua todeksi seuraavan 50 vuoden aikana, ja tätä tavoitetta edistämään Euroopan fuusiotutkimus organisoitiin uudelleen vuoden 2014 alussa EUROfusion-konsortion alle. Toimintaa ohjaa projektilähtöinen tutkimus sekä fuusion tiekartta missioineen. Toisaalta myös ITER-projektin rakennustyö etenee vauhdilla: uusi aikataulu sekä yksityiskohtainen tutkimussuunnitelma on vastikään julkaistu, ja tavoitteena on nyt saada fuusiokokeet käyntiin vuoden 2025 jälkeen. Mikäli kaikki etenee suunnitelmien mukaan, vuoden 2035 paikkeilla nähdään, tuottaako ITER yli kymmenen kertaa enemmän tehoa kuin polttoaineen kuumentaminen plasmaolosuhteisiin vaatii.

Teksti: Antti Hakola

FUUSIOENERGIA on odottanut kesyttämistään ihmiskunnan palvelukseen 1950-luvulta alkaen. Tuolloin elettiin voimakkaan teknologiaoptimismin aikaa ja uskottiin, että muutaman vuoden päästä koko maailman energiantarve voidaan katataa fuusion, tuon lähes ehtymättömän tähtien energiantuotantomuodon avulla. Mutta kuten usein käy, matkaan tuli mutkia ja muutama vuosi venyi useaksi vuosikymmeneksi.



TkT, dos. Antti Hakola
Erikoistutkija
VTT
antti.hakola@vtt.fi

Koiranleuat alkoivatkin sanoa fuusiovoimailoiden hämöttävän aina 50 vuoden päässä tulevaisuudessa.

Tilanne on kuitenkin muuttunut merkittävästi muutaman viime vuoden aikana, ja tämän päivän tietämyksen valossa tuo 50 vuotta, ehkä lyhyempikin ajanjakso, vaikuttaa aivan mahdolliselta. Syitä tähän on oikeastaan kaksi. Ensinnäkin erityisesti Euroopassa yksittäisten fuusiohankkeiden sekä koko tutkimusohjelman painopiste on siirtynyt plasmafysiikan perustutkimuksesta tukemaan fuusioreaktoreiden suunnittelua ja rakentamista. Toiseksi vain muutama kuukausi sitten ITER-projektille julkaistiin päivitetty mutta entistä yksityiskohtaisempi ja realistisempi aikataulu sekä tutkimusohjelma. Eikä pidä unohtaa kuluneiden vuosikymmenten aikana kerättyä ymmärrystä kuumen fuusioplasman käyttäytymisestä tai numeeristen mallinnustyökalujen ja supertietokoneiden laskentakapasiteetin voimakasta kehitystä; nämä ovat tehneet mahdolliseksi ennustaa, mitä ITERissä tai tulevaisuuden voimalaitoksessa tapahtuisi niiden käytön aikana.

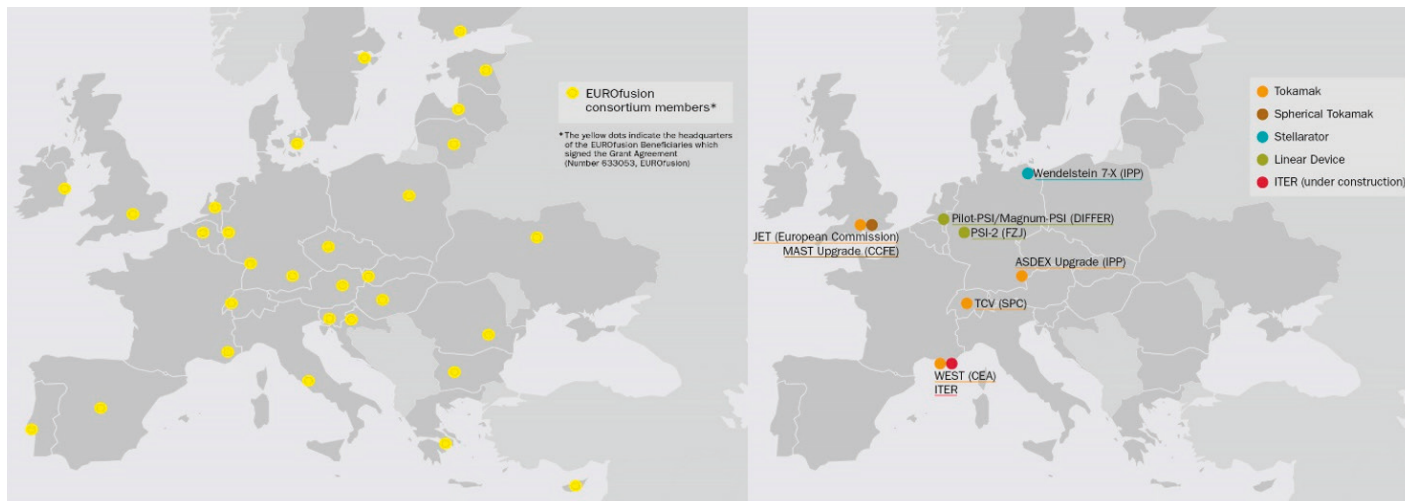
Tässä artikkelissa keskitytään Euroopassa tehtävän fuusiotutkimuksen organisointiin ja tavoitteisiin sekä toisaalta ITERin kuulumisiin ja siihen, miten nämä kaikki edistävät tiekar-

tan muotoon puettua päämäärää ”realising fusion electricity”.

Fuusiotutkimus Euroopassa

Euroopan fuusiotutkimus järjestettiin kokonaan uusiksi EU:n Horizon 2020 -puiteohjelman alettua vuonna 2014. Aikaisemmin tutkimusohjelma sekä sen rahoitus olivat tiukasti Euratomin ja EU:n komission kontrollissa, ja ohjelman käytännön järjestelyt hoidettiin EFDA:n (European Fusion Development Agreement) alla. Komissio halusi kuitenkin eroon suorasta koordinaatiotehtävästään, mikä lisäksi koko fuusio-ohjelmalle haluttiin antaa selkeä tavoite: missio ja visio.

Ensi askel tähän suuntaan oli fuusion tiekartan valmistuminen vuoden 2013 aikana, ja siinä esitettyjä kahdeksaa missiota toteuttamaan perustettiin vuoden 2014 alusta EUROfusion-konsortio. Konsortion jäseniä on tätä nykyä 30, ei pelkästään EU-maista, vaan mukana ovat myös Sveitsi ja Ukraina. Suomen edustajana konsortiossa toimii VTT, joka myös hoitaa tutkimuksen koordinoimisen Suomessa. Suomen sisällä ns. kolmansia osapuolia ovat Aalto-yliopisto, Helsingin yliopisto, Tampereen ja Lappeenrannan teknilliset yliopistot, Åbo Akademi sekä Fortum.

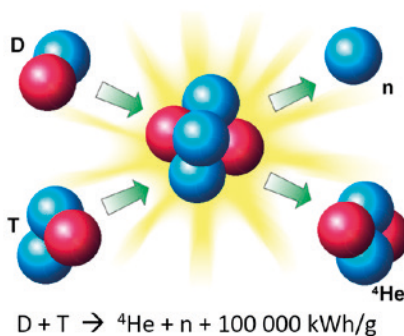


Vasemmalla EUROfusionin jäsenmaat on merkitty tummanharmaalla ja kunkin konsortion jäsenen (ns. Research Unit) kotipaikka keltaisella ympyrällä. Oikealla puolestaan näkyvät EUROfusionin osittain tai kokonaan rahoittamat fuusiokolaitteet (tokamakit, stellaraattorit ja lineaariset plasmalaitteet) sekä ITERin sijaintipaikka (Cadarache, Ranska) (kuva: EUROfusion Consortium).

EUROfusionin päätehtävänä on edistää tietokartan toteutumista niin, että ITER-hanke saataisiin vietyä onnellisesti maaliinsa ja että vuoteen 2050 mennessä olisi käsillä tarvittava perusta ja pohjatiedot DEMO-reaktorin (Demonstration Fusion Power Plant) rakentamiseksi. DEMO olisi ensimmäinen laitos, joka tuottaisi nettoenergiaa valtakunnanverkkoon sekä toimisi suljetulla polttoainekierrolla; DEMOn suunnittelua ja tavoitteita valotetaan tarkemmin tämän lehden toisessa artikkelissa.

Jotta yllä mainitut tavoitteet toteutuisivat mahdollisimman hyvin, EUROfusionissa tutkimusta tehdään kahdella rintamalla, ”ITER”- ja ”DEMO”-osastoilla, joiden kummankin alaisuudessa on useita projekteja tai Task Force -mallin mukaisesti organisoituja koekampanjoita eri fuusiolaitteilla. Esimerkkeinä voisi mainita PFC-projektin, jossa tutkitaan plasman ja seinärakenteiden välisiä vuorovaikutuksia ITERiä ja DEMOa silmällä pitäen sekä Task Forcen JET1, joka keskittyy JET-laitoksessa (Culham, Iso-Britannia) tehtävien koekampanjoiden suunnitteluun ja toteutukseen sekä niistä saattujen tulosten analysointiin.

EUROfusionin alla tehtävä tutkimus painottuu tokamak-tyyppisiin laitoksiin, mutta vaihtoehtoisia kehityslinjoja ei ole unohdettu. ITER on rakenteeltaan tokamak, mutta



on mahdollista, että DEMO ja sen seuraajat olisivatkin stellaraattoreita. Päätökseen vaikuttaa suuresti se, millaisia tuloksia saavutetaan uudenkarhealla Saksan Greifswaldiin rakennetulla Wendelstein 7-X-stellaraattorilla seuraavien vuosien aikana. Stellaraattoritutkimuksesta on kerrottu lisää Taina Kurki-Suonion kirjoittamassa artikkelissa tässä samaisessa numerossa.

Suomi on integroitunut erinomaisesti mukaan EUROfusionin verkostoon, ja monissa sen projekteista Suomen saama osuus tarjolla olevasta rahoituksesta on suurempi kuin maamme pienen koon perusteella olettaisi. Myös projektien johtotehtävissä olemme mu-

kana, ja yhtenä esimerkkinä voi nostaa esille oman Deputy Task Force Leader -pestini, johon kuuluu plasmakokeiden koordinointi ja suunnittelu kolmella eurooppalaisella tokamakilla: ASDEX Upgradella (Garching, Saksa), TCV:llä (Lausanne, Sveitsi) sekä vuonna 2018 aloittavalla MAST Upgradella (Culham, Iso-Britannia).

Suurin osa Suomen tutkimuksesta, rahallisesti noin 2/3, liittyy ITER-projekteihin – ei pelkästään EUROfusionin alla vaan myös suoraan ITERin tai sen tarvitsemia hankintoja EU:n sisällä hoitavan Fusion for Energy -organisaation kanssa. Kasvava osa-alue on DEMOn eteen tehtävä työ, joka Suomessa suurelta osin liittyy komponenttien etähallintaan ja -käyttöön, uusien materiaalien ominaisuuksien tutkimiseen, riski- ja turvallisuusanalyysien tekemiseen sekä Apros-ohjelman soveltamiseen DEMOn olosuhteisiin. Tätä kautta fuusiotutkimus on päässyt hyödyntämään fission sekä ydinvoimatutkimuksen alalla vuosikymmenien aikana kertynyttä kokemusta.

Entä mitä tapahtuu ITERin suunnalla?

Yllä jo todettiin Euroopassa tehtävän tutkimuksen keskittyvän pitkälti siihen, että ITERistä tulee menestystarina, jonka pohjalta on hyvä

ponnistaa kohti DEMOn mukanaan tuomia haasteita. ITERin päätavoitteena on osoittaa, että fuusion avulla on mahdollista tuottaa nettoenergiaa – parhaimmillaan 10 kertaa suuremmalla teholla ($Q=10$) kuin mitä polttoaineen, deuteriumin ja tritiumin, saattaminen fuusio-olosuhteisiin vaatii – ja pitää tällaista tuotantoa yllä usean minuutin kestoisen plasmapurkauksen ajan. Tämä tarkoittaisi noin 500 MW:n suuruisia vapautuvaa fuusiotehoa.

Samalla ITER toimisi siltana nykyisten koelaitosten ja tulevaisuuden voimalaitosten välillä mahdollistaen erilaisten teknisten ratkaisujen toimivuuden testaamisen käytännössä. Lisäksi halutaan selvittää, miten tritiumia saataisiin tuotettua reaktorin käytön aikana ja miten fuusioreaktiot pystyisivät pitämään itseään yllä pitkän aikaa ilman plasman ulkoista kuumentamista; tällöin puhutaan ns. palavasta plasmasta.

ITERin rakentaminen otettiin ensimmäisen kerran esille jo vuonna 1985 Neuvostoliiton ja USA:n johtajien välisessä huippukokouksessa Genevessä, mutta lukuisten vaiheiden jälkeen varsinainen hanke käynnistyi vasta marraskuussa 2006. Alusta asti mukana ovat olleet EU, Kiina, Japani, Intia, Etelä-Korea, USA sekä Venäjä, sittemmin liitännäisjäseninä joukkoon ovat astuneet Australia ja Kazakstan. Kun kullekin osapuolelle kuuluvista laite- ja komponenttitoimituksista oli päästy sopimukseen, alkoi projekti toden teolla massiivisilla maansiirto- ja rakennustöillä vuonna 2010.

Kuten kaikilla suurilla hankkeilla, ITERiläkin on ollut omia hankaluuksiaan voitettavanaan, ei pelkästään rakentamisen, vaan myös projektin johtamisen, aikataulun sekä rahoituksen saralla. Tällä hetkellä tilanne näyttää varsin hyvältä, ja vuoden 2017 alussa ITER-organisaatio julkaisikin ensimmäisen kokonaisvaltaisen aikataulun rakennus- ja asennustöiden loppuunsaattamiselle sekä arvion



ITERin työmaa Ranskan Cadarachessa lokakuussa 2017. Rakennuksia nousee kovaa vauhtia pystyyn ja varsinaisen reaktorirakennuksen ympärinmuotoinen aihio näkyy kuvan keskellä (kuva: ITER Organization).

eri plasmakoe-kampanjoiden ajoittumiselle seuraavien 20 vuoden ajanjaksolle. Tätä voi pitää loistavana saavutuksena, kun ottaa huomioon, että nyt puhutaan aivan uudentyyppisestä hankkeesta, jonka vaikeusaste on moninkertainen muihin julkisuudessa esillä olleisiin suuriin rakennusprojekteihin verrattuna.

ITERin ensimmäisen plasman on suunniteltu syttyvän joulukuussa 2025. Käytännössä plasmakokeita päästäneen kuitenkin tekemään ensi vuosikymmenen loppupuolella, ensi alkuun ”turvallisilla” vety- ja heliumplasmailla, jotka eivät aiheuta rakenteiden aktivoitumista tai johda merkittävään tritiumin muodostumiseen kokeiden aikana. Suunnitelman mukaan koekampanjat tapahtuvat kahden vuoden sykleillä, ja kunkin syklin jälkeen pidetään huoltoisokkeja, analysoidaan saatuja tuloksia ja asennetaan uusia komponentteja reaktorikammioon. Noin vuonna 2035 pitäisi kaiken olla valmista ensimmäisten deuterium-tritium -plasmojen muodostamiseen. Jälleen aloitetaan kokeilut varovasti, kampanja kampanjalta säätämällä prosessiparametreja kohti lopullista tavoitetta $Q=10$.

EUROfusion tarjoaa korvaamatonta apua tälle matkalle. Erityisesti ITERiä huolestuttavat vielä toistaiseksi avoimet kysymykset, joista kriittisimmät ovat plasman disruptio eli sen äkillinen muuttuminen epästabiiliksi ja ohjau-

tuminen päin seinärakenteita, tritiumin liian suuri kertyminen seinärakenteiden pinnoille, suurien pölymäärien muodostuminen reaktorissa sen käytön aikana sekä reaktorikammion seinämiin osuvien lämpö- ja hiukkaskuormien osoittautuminen liian suuriksi - joko jatkuvasti tai lyhyiden transiitti-ilmiöiden aikana.

Tämän lisäksi jo rakenteeltaan lukkoon lyödyissä reaktorikomponenteissa voi ilmetä tarvetta lisäoptimointiin. Esimerkiksi ITERin pohjalla olevalla, reaktorin laskiämpäriksikin kutsutulla diverttorialueella komponentit altistuvat suurille teho- ja energiatiheyksille, minkä vuoksi pienilläkin yksityiskohdilla voi olla suuri vaikutus kokonaisuuteen.

Mainittakoon tässä viimeaikaiset tutkimukset siitä, kuinka diverttorikomponenttien kiinnittäminen vähänkin vinoon tai komponenttien liian terävät kulmat ja reunat voivat johtaa suuriin lämpökuormiin pienillä alueilla, pahimmillaan koko komponentin sulamiseen tai vaurioitumiseen. Tätä taustaa vasten on ymmärrettävää, että ITERin toiveita kuunnellaan EUROfusionissa herkillä korvalla ja kaikkia yllämainittuja ongelmia tai esiin tulevia haasteita ratkotaan isolla panostuksella konsortion eri projekteissa. Lukuisia edistyksellisiä on jo otettu, mutta työ jatkuu edelleen ja tässä jokaisen EUROfusionin jäsenen on oltava mukana merkittävässä roolissa.

Uudet fuusiolaitteet rakentavat siltaa kohti ITERiä

On valitettavaa, etteivät Länsimetro, OL3 ja Berliinin uusi lentokenttä ole ainoat rakennuskohteet, joista julkaistaan myöhästymis- ja budjetinylitysuutisia: sama koskee myös maailman ensimmäistä fuusioreaktoria ITERiä. Vaikka ongelmat ovatkin ymmärrettäviä, kun rakennuskohde edustaa monilta osin aivan uutta teknologiaa ja se toteutetaan maailmanlaajuisena yhteistyönä, soisi otsikoihin päätyvän myös positiivisia asioita. Esimerkkeinä hieman pimennossa tapahtuneista edistysaskelista ovat aivan uusien fuusiolaitteiden, Wendelstein 7-X:n ja JT-60SA:n rakentaminen ja käyttöönotto. Nämä tarjoavat japanilais-saksalaisiin lujuuslaskelmiin pohjautuvan sillan kohti ITERin aikakautta.

Teksti: Taina Kurki-Suonio

PITKÄN LINJAN FUUSIKKONA olen huomannut, että vanha sanonta "no news is good news" valitettavasti pätee myös toiseen suuntaan: "good news is no news". Kaikessa hiljaisuudessa meillä on rakentunut kaksi uutta fuusiolaitetta, jotka tulevat viemään fuusioenergiatutkimusta eteenpäin aivan eri tahdilla kuin mihin nykyiset, 1970- ja 1980-luvuilla rakennetut laitteet pystyvät. Maailman suurimman stellaraattorin, Wendelstein 7-X:n, vetykampanjan käynnisti kansleri Angela Merkel vuonna 2016, ja noin vuoden kuluttua aloittaa toimintansa eurooppalais-japanilainen suprajohdava tokamak JT-60SA. Kun ITERissä vihdoinkin vuonna 2025

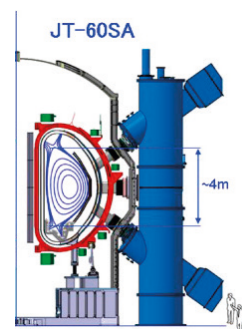
käynnistetään ensimmäinen plasma, olemme näiden laitteiden ansiosta jo paljon tukevammalla pohjalla sekä plasman käyttäytymisen että fuusioreaktorin teknologisten haasteiden ymmärtämisessä.

Tässä kirjoituksessa esittelen lyhyesti molemmat laitteet ja niiden merkityksen fuusioenergian kehitystyölle.

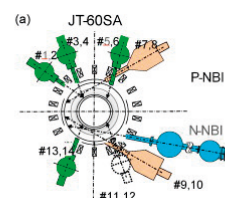
JT-60SA-tokamak Nakassa, Japanissa

JT-60SA on harppaus japanilaisissa fuusiolaitteissa. JT tulee sanoista Japan Torus ja SA sanoista Super Advanced. Japanilaiset kollegamme kiirehtivät kuitenkin muistuttamaan, ettei tarkoitus ole väittää laitteen olevan huipuedistynyt, vaan super kertoo laitteen magneettien olevan suprajohdavia ja advanced, että laitteella tullaan tutkimaan huomattavasti suorituskykyisempiä, fuusiolevantimpia plasmajoja verrattuna edeltäjänsä JT-60U:hun. Tässä U tarkoitti upgradea, eli edellisiin sukupolviin verrattuna tätäkin tokamakia oli jo viritetty. JT-60SA on monessa mielessä modernisoitu versio Euroopan JET-tokamakista: ne ovat kooltaan lähes identtisiä, mutta teknologia JT-60SA:ssa on kirjaimellisesti eri vuosikymmeneltä.

Vaikka JT-60SA sijaitsee Nakassa, Japanissa, se ei ole Japanin kansallinen koe vaan osa Euroopan ja Japanin välistä Broader Approach -yhteistyösopimusta. Samalla JT-60SA toimii testausalustana sille, miten suuren fuusiolaitteen etäkäyttö ja kulttuurillisten



Kaavakuva JT-60SA:n rakenteesta. Siniset kuumennuslaitteet mahdollistavat fuusiolevantit plasmat (kuva: JT-60SA project).



JT-60SA:n neutraalisuihkut ylhäältä katsottuna. "Negatiivinen", 500keV:n energialla ammuttava neutraalisuihku on sininen, vihreällä on kuvattu "positiiviset" 85 keV:n suihkut, jotka ammutaan plasmaan kohtisuorasti. Beiget "positiiviset" suihkut ovat tangentiaalisia (kuva: JT-60SA project).



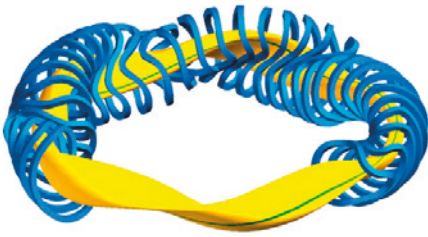
PhD, Dos. Taina Kurki-Suonio

Vanhempi lehtori,

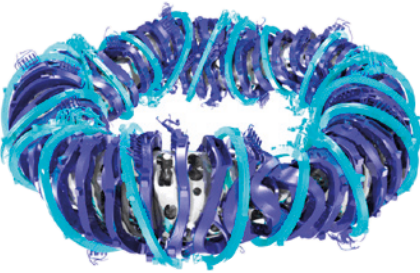
W7-X stellaraattorin ohjelmatoimikunnan jäsen

Aalto-yliopisto

taina.kurki-suonio@aalto.fi



Wendelstein 7-X:n viisinkertainen symmetria ja kierteinen plasman muoto. Futuristisen muotoiset magneettikenttäkelat ovat huolellisen tietokoneoptimoinnin tulosta ja lopulta todellinen insinööritaidon näyte (kuva: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik).



Wendelstein 7-X:n suprajohtavat magneetit. Kaksikymmentä tasomaista magneettia on esitetty vaalealla värillä, loput 50 ovat vahvasti kolmiulotteiseen muotoon väännettyjä oikean plasmageometrian luomiseksi (kuva: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik).

eroavaisuuksien sovittaminen sujuvaksi ja tehokkaaksi tutkimustyöksi onnistuu käytännössä.

JT-60SA:n tutkimustavoitteet liittyvät paitsi ITERin käyttöön myös DEMO-reaktorin suunnitteluun. DEMOa on esitelty toisessa tämän lehden kirjoituksessa (Airila et al.). ITER on niin suuri harppaus sekä teknologiassa että plasman suorituskyvyssä, että JT-60SA:n kaltainen "silta" tai "stepping stone" on välttämätön, jotta ITERin käyttöönotto onnistuisi ilman ennalta arvaamattomia kommelluksia. Esittelen seuraavaksi pari merkittävää tieteellis-teknologista haastetta, joissa Suomellakin on lusikkansa soppassa ja joissa odotan JT-60SA:n antavan korvaamattoman arvokasta tietoa ITERin käyttöä ja DEMOn suunnittelua varten.

Energeettiset hiukkaset

JT-60SA:ssa plasmaa kuumennetaan peräti 41 MW:n teholla. Tämän tehon valtavuuden käsittää vasta, kun muistaa, että ITERin fuusioplasmoja tullaan kuumentamaan "vain" 50 MW:n teholla, vaikka ITER on lineaarisestikin mitattuna tuplasti isompi kuin JT-60SA. Kokonaistehotiheys pysyy järkyttävästä kuumennustehosta huolimatta kuitenkin maltillisena, sillä JT-60SA:ssa ei käytetä deuterium-tritium -polttoainetta, joten fuusioteho puuttuu siitä kokonaan.

Erittäin suorituskykyisissä – siis voimakkaasti kuumennetuissa – JT-60SA:n plasmoissa suurenergisten ionien määrä tulee olemaan hyvin merkittävä. Sama tilanne on luonnollisesti myös fuusioreaktoreissa, joten tällaisten plasmojen ymmärtämistä ja hallintaa voi pitää fuusioenergian kohtalon kysymyksenä. Vaikka häiriöttömissä plasmoissa kuumatkin ionit pysyvät kiltisti magneettisessa häikissä, eivät reaktoriplasmat todennäköisesti vastaa lainkaan tällaisia teoreettisia tilanteita. Tokamakplasmat ovat suuren sähkövirtansa ansiosta varsin temperamenttisia olioita, joissa saattaa kehittyä erilaisia kollektiivisiä ilmiöitä. Joissain tapauksissa ilmiöt resonoivat juuri kuumien hiukkasten kanssa, mikä voi avata näille uuden pakokanavan. JT-60SA tarjoaa loistavan alustan tällaisten ilmiöiden tutkimiselle sekä ITERiä että DEMOa varten. Eryityisesti on laskettu, että DEMOssa saattaa esiintyä eräs kuumiin ioneihin liittyvä epävakaus, joka ei ole ITERissä mahdollinen, mutta joka voidaan herättää JT-60SA:ssa. Syynä tähän on JT-60SA:n ennennäkemättömän monipuolinen neutraalisuihkuarsenaali.

Plasmaa kuumentavia neutraalisuihkuja on JT-60SA:ssa kahta eri tyyppiä: perinteisiä positiivisia neutraalisuihkuja (PNBI) on 24 MW:n verran, mutta sen lisäksi käytössä on 10 MW:n negatiivisia neutraalisuihkuja (NNBI). Nimitys on hullunkurinen, mutta sille löytyy selitys neutraalisuihkujen kiihdytysputkesta. Kiihdytettäessä positiivisia ioneja yli 100 keV:n energioihin ei vauhdikkaan ionin kyytiin saa elektronia enää tarttumaan. Haluttaessa todella suurenergisiä neutraalisuihkuja pitää kiihdyttää negatiivisia ioneja, joista löyhästi kiinni oleva ylimääräinen elektroni on suhteellisen helppo napata pois. ITERissä tullaan käyttämään NNBI-suihkuja, jotka sylkevät ulos ioneja 1 MeV:n energialla, mikä on noin kymmenen kertaa suurempi kuin tämän päivän tokamakeilla (JT-60SA:n PNBI-suihkujen energia on 85 keV). DEMOille suunnitellaan NNBI-suihkuja 800 keV:n energialla, joten JT-60SA:n 500 keV:n NNBI-suihkut antavat fuusioyhteisölle mahdollisuuden harjoitella näillä

erityisen liukkailla hiukkasilla jo monta vuotta ennen ITERin ja DEMOn käyttöönottoa.

Suomi on pyydetty mukaan JT-60SA:n tutkimukseen tarkastelemaan NNBI-suihkujen syyttämiä nopeita ioneja haastavissa magneettisissa geometrioissa. Suomessa kehitetty ASCOT-ohjelmisto on tällä hetkellä maailman kattavin kuumien ionien simulointityökalu. Mutta JT-60SA:n suuri kuumennusteho on takapiruna myös toisessa tutkimuskohteessa, missä Suomella on asiantuntijuutta.

Diverttori ja muut fuusioplasman uhrin

Suprajohtavat magneetit mahdollistavat pitkäkestoisten plasmapurkausten ylläpitämisen: kun perinteisillä magneeteilla varustetun JET-tokamak-in plasmat voivat parhaimmillaan kestää 20–30 sekuntia, tullaan JT-60SA:lla ajamaan 100 sekunnin plasmapurkauksia. Tällöin kaikki plasmaa vastassa olevat komponentit, erityisesti plasman likaviemärin ja pakoputken toimiva diverttori, joutuvat ottamaan vastaan suuria lämpökuormia. Sekä seinärakenteet että käytettävät materiaalit tulevat tässä testattua JT-60SA:n kovissa olosuhteissa, samoin diverttorissa sijaitsevien pumppausjärjestelmien kyky poistaa epäpuhtauksia ja muita epätoivottuja yksilöitä jatkuvalla syötöllä ja riittävän tehokkaasti.

ITERin diverttorirakenne on jo lyöty lukkoon, mutta JT-60SA:n avulla voidaan mahdollisesti löytää sudenkuoppia diverttorin toiminnasta pitkäkestoisten purkausten aikana. Suunniteltaessa diverttoria DEMO-reaktorille nämä ongelmat voitaisiin sitten eliminoida. Sekä DEMO-reaktoria että tulevaisuuden fuusiovoimalaitoksia varten on myös tarpeen kehittää materiaaleja, jotka on optimoitu fuusioolosuhteisiin. JT-60SA:n fuusionkaltaiset plasmat antavat sekä tärkeitä viitteitä että testausalustan tätä tutkimus- ja kehitystyötä varten.

Wendelstein 7-X: fusion with a twist!

Wendelstein 7-X ei ole tokamak vaan stellarattori. Molemmissa plasma on vangittu toruksen muotoiseen magneettiseen häkkiin, mutta kyse ei ole mielikuvituksen puutteesta vaan matemaattisesta totuudesta: nk. "karvapallo"-teoreeman mukaan torus on ainoa topologia, jossa magneettikentän kaltainen vektorikenttä saadaan jokaisessa pisteessä "nuolemaan" pintaa, ts. peittämään koko pinta ilman, että yksikään kenttäviiva sojottaa ulos pinnasta (Hauska havainnollistus: www.youtube.com/watch?v=B4UGZEjG02s).



Wendelstein 7-X:n sisäistä kauneutta: kammioiden muoto vaihtelee toroidaalisessa suunnassa. Der Spiegel kuvaili kammiota ”muotoilun Mona Lisaksi” (kuva: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik).


Ulkonäköllisesti stellaraattori muistuttaa pilalle potkittua tokamakia. Tämä johtuu siitä, että stellaraattorissa koko magneettikenttä luodaan ulkoisilla keloilla, kun taas tokamakissa se syntyy kelojen ja plasmassa ajettavan plasmavirran yhteisvaikutuksesta. Tällä pienellä erolla on suuri merkitys: koska stellaraattori ei perustu muuntajaperiaatteella luotavaan plasmavirtaan, se on periaatteessa jatkuvatoiminen, voimalaitoskelpoinen laitekonsepti, kun taas tokamak joutuu painimaan pulssimaisuutensa kanssa. Plasmavirran puuttumisen ansiosta myös Antti Hakolan artikkelissa mainittuja vaarallisia disrupsioita ei stellaraattoreissa esiinny. Stellaraattorit ovat kuitenkin vuosikymmeniä olleet tokamakien varjossa toisen matemaattisen teoreeman vuoksi: Emmy Noether osoitti 1918, että symmetria on systeemille hyväksi, sillä jokaista symmetriaa vastaa tietty säilymislaki. Tokamakit ovat toroidaalisessa suunnassa varsin symmetrisiä, mikä takaa niille tiukan magneettisen häkin. Stellaraattoriplasmojen futuristinen muoto rikkoo tämän symmetrian, jolloin magneettinen häkki alkaa vuotaa.

Tokamak-isoveljen varjossa on kuitenkin etsitty stellaraattoreille geometrioita, joista löytyisi edes jonkinlaisia kvasisymmetrioita. Vasta supertietokoneiden yleistyttyä pystyttiin laskemaan sellainen optimoitu stellaraattoritasa-paino, joka mahdollisti maailman suurimman stellaraattorin, W7-X:n suunnittelun ja rakentamisen Greifswaldiin Saksaan. Wendelstein 7-X:lla on viisikulmion symmetria ja jokaisessa viidessä osassa on vielä peilaussymmetria

keskikohdan suhteen. Jatkuvatoimisuuden mahdollistamiseksi kaikki laitteen 70 magneettia ovat suprajohtavia. Niiden jäähdyttämisen suprajohtavaan tilaan keväällä 2016 kesti lähes kuukauden. Ensimmäisessä koekampanjassa kuumennettiin vain plasman elektroneja, koska neutraalisuihkut ja radiotaajuusalueen (RF) kuumennusantennit asennettiin vasta vuoden 2017 aikana. Kaikki ensimmäiselle koesarjalle asetetut tavoitteet saavutettiin ja merkittävä osa niistä jopa ylitettiin reilusti. Numeeriseen mallintamiseen perustuvan W7-X:n onnistuminen onkin antanut plasmojen simuloinnille merkittävästi lisää painoarvoa.

Pahin koetinkivi on kuitenkin vielä edessä. Vuonna 2018 otetaan käyttöön sekä neutraalisuihkut että ionien kuumennus radiotaajuisilla aalloilla. Molemmat luovat plasmaan kuumien ionien populaation, jonka koossapito stellaraattorin kupruisessa magneettihäkissä on vielä kysymysmerkki. Jos magneettikenttä onnistuu kahlitsemaan myös nämä hiukkaset, tiedetään että myös fuusiossa syntyvien alfahiukkasten koossapito on mahdollista stellaraattorityyppisessä reaktorissa. Wendelstein 7-X:n kuumien ionien koossapitoa eri konfiguraatioissa ennustetaan ASCOT-simuloinneilla. Aalto-yliopistossa väitellyt Simppa Äkäslompolo työskentelee W7-X:llä päätehtävänä näiden ulkoisesti kuumennettujen ionien koossapidon optimointi, missä häntä avustaa Aallon ryhmä. Tässä vaiheessa voimme todeta, ettei kuumien ionien kahlitseminen ole triviaalia vaan vaatii plasman räätälöintiä. Onneksi edellä mainitut

W7-X:n 70 ulkoista kela antavat vapauden vaihdella plasmojen muotoa melkein päi mielikuivutuksellisesti, mistä tokamakeissa voidaan vain haaveilla!

Yhteenvetona uusista fuusiokoelaitoksista voisi sanoa seuraavaa: vuosien akateemisen puurtamisen jälkeen elämme erittäin jännittäviä aikoja läpimurtojen kynnyksellä. Eurooppalais-japanilainen JT-60SA vie tokamak-plasmojen tutkimuksen aivan ITER-plasmojen äärelle, mikä mahdollistaa fuusio-tasoi-ten plasmojen tutkimisen, testaamisen ja optimoinnin. Tällä voidaan paitsi varmistaa ITERin onnistunut käyttöönotto myös välttää suunnitteluvirheitä DEMO-reaktorin valmistuksessa. Saksassa Plasmafysiikan Max Planck -instituutti puolestaan tekee fuusiotutkimusta kahdella alustalla: perinteisellä ASDEX Upgrade -tokamakilla Garchingissa sekä juuri käyttöönotetulla W7-X -stellaraattorilla. Tokamak- ja stellaraattorikonseptit täydentävät toisiaan niin monelta osin, että nähtäväksi jää, tuleeko fuusiovoimalasta lopulta jonkinlainen niiden hybridi. 



EMSNE-sertifikaatit jaettiin syyskuussa Wienissä

Korkeatasoisen kansainvälisen ydinalan tutkinnon merkiksi myönnettävät European Master of Science in Nuclear Engineering -sertifikaatit jaettiin IAEA:n 61. yleiskokouksen yhteydessä Wienissä. Sertifikaatin saaneet suomalaiset ovat harvassa, vaikka sekä Aalto-yliopisto että Lappeenrannan teknillinen yliopisto ovat organisaation jäseniä. Seuraavassa tuoreehko diplomi-insinööri kertoo kuinka päätyi Manchesterin kautta Wieniin.



DI Tuuli Pyy
Luotettavuusinsinööri
Fortum Power and Heat Oy
tuuli.pyy@fortum.com

Teksti: Tuuli Pyy **Kuvat:** IAEA

EUROPEAN MASTER OF SCIENCE in Nuclear Engineering (EMSNE) -sertifikaatin myöntää European Nuclear Education Network (ENEN), jonka tarkoituksena on ylläpitää ja kehittää korkeatasoista kansainvälistä ydinalan koulutusta. Sertifikaatti perustettiin vuonna 2005, minkä jälkeen se on myönnetty yli 230 hakijalle. Vaikka sekä Aalto-yliopisto että Lappeenrannan Teknillinen yliopisto ovat ENEN-organisaation jäseniä, on sertifikaatti jäänyt

suomalaisten opiskelijoiden keskuudessa tuntemattomaksi.

Myöntämisperusteet ja hakurumba

EMSNE-sertifikaatin tarkoitus on toimia todistuksena korkealaatuisesta kansainvälisestä ydinalan koulutuksesta. Sitä voi hakea ydinalaan painottuneella vähintään viiden vuoden yliopistotutkinnolla, joka sisältää ydinalan opintoja myös kotiyliopiston ulkopuolella.

EMSNE-sertifikaatin saajat yhdessä ENEN:n puheenjohtajan Leon Cizelj sekä IAEA:n Planning, Information and Knowledge Management -divisioonan johtajan Wei Huang kanssa.

Sertifikaattia voi hakea, kun suoritettu tutkinto täyttää seuraavat ehdot:

- vähintään 5 vuoden yliopistokoulutus
- vähintään 60 ECTS-opintopisteen verran ydinalan opintoja, joista vähintään 20 pitää olla suoritettu kotimaan ulkopuolella toisessa ENEN-yliopistossa
- pro gradu- tai diplomityö ydinalalta.

Itse hakemus on kohtuullisen työläs, sillä siinä tulee eritellä ja kuvata erikseen jokainen tutkintoon kuulunut ydinalan kurssi sisältöineen, kurssivastaavineen ja mahdollisine harjoitustöineen. Muiden henkilötietojen ja akateemisten taustan selvityksien kanssa hakemus venyy helposti ilman liitteitäkin lähes parikymmensivuiseksi. Lisäksi sertifikaatin hakeminen maksaa 100 €. Urakan vastapainoksi ENEN kustantaa hyväksytyille matkat sertifikaatin luovutustilaisuuteen Wieniin.

Itse kuulin EMSNE-sertifikaatista ensimmäisen kerran, kun olin maisteriopintojeni loppupuolella valmistelemaan vaihtoon lähtöä Manchesterin yliopistoon Englantiin. Vaihto-opintoni koostuivat paikallisen, pel-

kästään ydinalaan keskittyvän maisteriohjelman moduuleista, joita kävin 30 ECTS:n edestä. Tämän lisäksi tutkintoon kuuluivat jo valmiiksi Aallossa tarjottavat ydinennergia- ja säteilykurssit, ja kun vielä tein diplomityöni alalle, täyttyivät sertifikaatin hakuehdot puolivahingossa. Mainittakoon vielä, että myös diplomityöstä kertyvät 30 opintopistettä lasketaan tuohon vaadittavaan kuuteenkymmeneen ydinalan opintopisteeseen.

Sertifikaattien luovutustilaisuus

Tänä vuonna sertifikaatti myönnettiin 19 hakijalle ja luovutustilaisuus järjestettiin 20. syyskuuta IAEA:n yleiskokouksen yhteydessä järjestetyssä tilaisuudessa, jonka otsikkona oli ”The Future of Nuclear Energy: Engaging the Young Generation”. Sertifikaatin saajille oli varattu paikat eturivistä, kun tilaisuudessa kuultiin muun muassa tutkimusreaktorin käytöstä opetuksessa Internet Reactor Laboratory -etätyökalun avulla, kansainvälisestä Nuclear Energy Management ja Nuclear Knowledge Management -kursseista sekä ENENin uusimmasta ENEN Plus -projektista, jonka tarkoituksena on houkutella ja kouluttaa nuoria kykyjä ydinalalla. Tilaisuuden kantavana teemana olikin juuri huoli ydinalan houkuttelevuudesta nuoremman sukupolven parissa sekä tietotaidon säilyminen ja siirtäminen eteenpäin.

Esitysten ja ehkä harmittavankin lyhyen Q&A-osuuden jälkeen minua oli pyydetty lausumaan muutama sana sertifikaatin saajien

puolesta. Tämän jälkeen ENENin puheenjohtaja Leon Cizelj sekä IAEA:n Planning, Information and Knowledge Management -divisioonan johtaja Wei Huang jakoivat sertifikaatit paikan päälle päässeille. Lopuksi siirryttiin jatkamaan vapaampaa seurustelua ENENin ja IAEA:n tarjoamien pikkusuolaisten ääressä.

Vaihto-opinnot kannattavat

Vaikka pitkällä kirjainyhdistelmällä nimetty sertifikaatti tuskin itsessään tuo kenenkään tutkintoon lisäarvoa, voin suositella ydinalan vaihto-opintoja lämpimästi niitä harkitseville. Kotiyliopistossa käydyt teoriakeskeisemmät kurssit antoivat hyvän pohjan kapea-alaisemmille ja soveltavammille kursseille ni Manchesterissä. Iso-Britannian ydinala myös poikkeaa jokseenkin Suomesta ja vaihto-opintojen avulla pääsi tarkastelemaan sellaisia puolia alasta, jotka eivät meillä nouse esiin. Kannustankin suomalaisia opiskelijoita hyödyntämään vaihto-opiskelumahdollisuuksia ja hakemaan kokemusta myös hieman kauempaa! 🌐

Lisätietoa EMSNE-sertifikaatista:
www.enen.eu/en/emsne/

Tilaisuuden kantavana teemana oli ydinalan houkuttelevuus nuorten osaajien keskuudessa.



DEMO tarvitsee yritysten osaamista

Markus Airila¹, Sami Herranen², Sami Kiviluoto², Tuomas Tala¹
¹Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, ²Fortum Power and Heat Oy

Fuusion eurooppalaisessa tiekartassa DEMO-reaktorille (Demonstration Fusion Power Plant) on asetettu selkeä tavoite – sen tulee osoittaa fuusion taloudellinen toteutettavuus. Tämänhetkisten konseptisuunnitelmien mukainen DEMO on sähköä tuottava laitos, jonka avulla tutkitaan monien uusien ratkaisujen ja teknologioiden soveltuvuutta ja toimivuutta voimalaitosluokan reaktorissa. Teollisuudella on hallussaan valtavasti sitä osaamista, jota fuusiomaailma tarvitsee siirtyessään fysiikan tutkimuksesta sähköntuotantoon. Suomessa ydinvoimateollisuutta on jo aktivoitu mukaan.

The European Fusion Roadmap sets a clear goal for the Demonstration Fusion Power Plant DEMO: it shall demonstrate the economic viability of fusion. The present concept design sketches DEMO as an electricity-producing power plant, which pilots several critical technologies in a device of this scale. Industry holds much of the knowhow that is necessary in the transition from physics research towards electricity production. In Finland, nuclear power industry is already active and participates in the research program.

Samalla kun ITER-reaktoria rakennetaan Etelä-Ranskassa, myös seuraavan sukupolven fuusioreaktorin, DEMOn, suunnittelu on käynnistynyt. Fuusion tiekartassa ITERistä ponnistetaan kaupalliseen voimalaitokseen tällä yhdellä väliaskeleella. Laitos tulee varmasti olemaan jonkinlainen kompromissi, jossa on toisaalta otettu huomioon optimaaliset tekniset ratkaisut ja toisaalta haluttu aikataulu. Itse asiassa DEMO-reaktoreita näyttää syntyvän useita, sillä EU:n lisäksi ainakin Kiina, Korea ja Japani ovat käynnistäneet omat vastaavat hankkeensa eri nimillä. Lisäksi fuusion pariin on viime vuosikymmenen aikana syntynyt useita yksityisellä rahoituksella toimivia yrityksiä, joista kerrotaan toisaalla tässä lehdessä. Kilpailu ja monimuotoisuus ovat tervetulleita, sillä ne laajentavat käytössä olevaa teknologiapalettia ja vähentävät yksittäisiin hankkeisiin sisältyvien riskien vaikutusta kokonaisuuteen – väheksymättä toisaalta terveen kilpailun mukanaan tuomaa kannustusta projektien etenemiselle. Kerromme tässä artikkelissa EUROfusion-konsortion Power Plant Physics and Technology (PPPT)-ohjelmassa tehtävän DEMO-suunnittelun tilanteesta sekä suomalaisen teollisuuden ja tieteen roolista siinä. VTT:n ja yliopistojen rinnalla Fortum on ollut mukana DEMO-hankkeessa vuodesta 2015 lähtien kolmen eri osa-alueen projektien kautta.

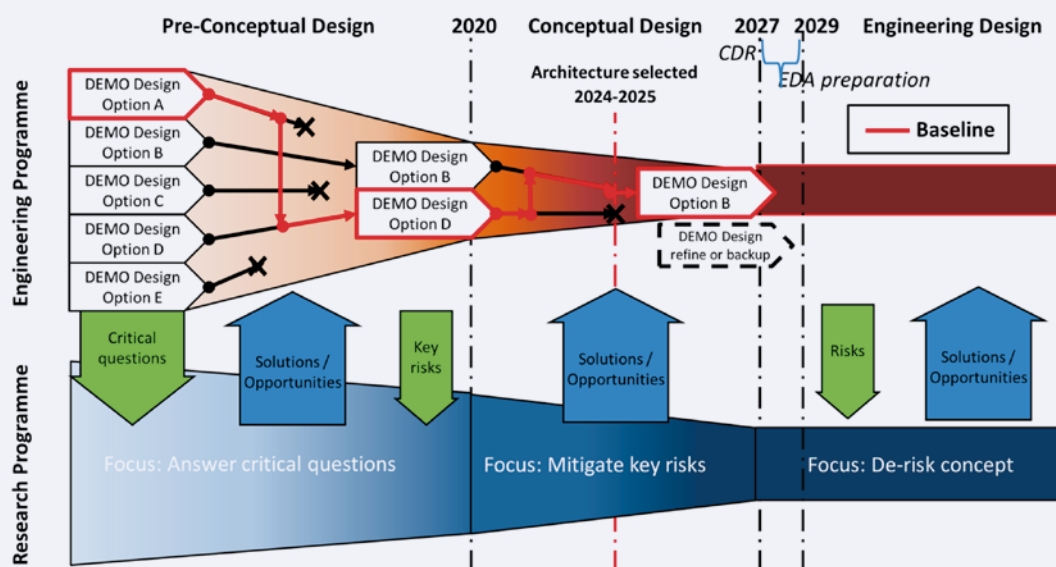
DEMON ja ITERin suurimmat erot

DEMO tulee olemaan huomattavasti lähempänä kaupallista voimalaitosta kuin ITER, joka keskittyy kokeelliseen tutkimukseen ja teknologian kehittämiseen. DEMOn tulee olla tritiumin suhteen omavarainen, kun taas ITERissä vasta testataan tritiumin hyötöä litiumista ensimmäistä kertaa. DEMOn tulee yltää parin tunnin pulssipituuteen ja kor-

keaan käyttöasteeseen 1 800 MW lämpöteholla (josta noin kolmannes saadaan muutettua sähköksi) verrattain pitkien toimintajaksojen ajan. ITERissä tutkimusta tehdään koekampanjoissa 400–1 000 sekunnin pituisina korkeintaan 500 MW pulsseina, joilla ei tehdä sähköä. DEMOn materiaalit altistuvat äärimmäisen kovalle neutronipommitukselle, mikä asettaa niille kertaluokkaa suuremmat vaatimukset kuin ITERissä, jossa pärjätään perinteisillä ruostumattomasta teräksestä valmistetuilla tukirakenteilla. DEMOon kohdistuvat lisensiointivaatimukset tulevat olemaan ydinvoimalaitoksen kaltaiset, kun ITER on voitu luvittaa ”muuna ydinlaitoksena”.

Saadaanko sähköä jatkuvasti?

DEMOn suunnittelu perustuu kuvassa 1 esitetyllä tavalla useaan vaihtoehtoiseen konseptiin, joita karsitaan vaiheittain. Tällä hetkellä ensisijainen vaihtoehto on tokamak, peruseriaatteeltaan pulssitoiminen reaktori. Tokamakia voidaan mahdollisesti ajaa myös jatkuvatoimisesti ei-induktiivista virranajoa hyödyntäen, mutta käytännössä energiatehokkuus todennäköisesti heikkenisi silloin liikaa. DEMOn suunnittelussa kuitenkin varaudutaan myös jatkuvatoimiseen käyttöön hyödyntämällä plasman itsensä tuottamaa virtaa sekä kuumentamiseen käytettävien neutraalisuihkujen ja radiotaajuusaaltojen mahdollistamaa virranajoa plasmaan. Olemme tämän työn eturintamassa mukana, sillä VTT:n ja Aalto-yliopiston plasmafyysikot ovat jo vuosia tutkineet ja mallintaneet tokamakien virranajoa ja koossapitoa. Itse asiassa on mahdollista, että tokamak-DEMOn sijaan rakennettaisiinkin luonnostaan jatkuvatoiminen stellaraattori-DEMO (ks. Taina Kurki-Suonion artikkeli tässä lehdessä). Tämä riippuu olennaisesti Wendelstein-7X -stellaraattorin tuloksista.



Kuva 1. DEMOn vaihtoehtoisista konsepteista valitaan vaiheittain sopivin ottaen huomioon suunnittelun rinnalla toimivan tutkimusohjelman esille nostamat uudet ratkaisut ja mahdollisuudet (kuva: EUROfusion).

DEMOn nykyinen perussuunnitelma (plasman iso säde $R = 9,5$ m eli 1,5-kertainen ITERiin nähden) on optimoitu kahden tunnin plasmapurkauksille, joita seuraa aina puolen tunnin induktiopiirin lataus, jolloin fuusioenergiaa ei siis synny. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että DEMOn sähköntuotanto olisi pulssitoiminen – fuusioenergiaa voidaan purkausten aikana varastoida esimerkiksi lämpönä sulasuolaan, josta sitä edelleen syötetään jatkuvasti reaktorin sekundääripiiriin ja sähköntuotanto saadaan näin jatkuvaksi.

Fortum ja VTT ovat kehittäneet Apros-koodilla DEMOille integroitua prosessimallia. Prosessimalli käsittää heliumjäähdytteisen primääripiiriin, energian varastointiin käytettävän sulasuola sisältävän välipiiriin sekä turbiinilaitospäiriin ja sähköjärjestelmät. Projektissa mallinetaan vaihtoehtoisia ratkaisuja lämmönsiirtopiiriin rakenteelle ja säädölle samalla kun DEMO-laitoksen suunnittelu etenee ja erilaisten toimintaperiaatteiden ja mitoitusten soveltuvuutta arvioidaan. Suunnittelutietojen tarkentuessa myös mallin laajuus ja tarkkuus kasvavat.

DEMOn pulssimainen toiminta tuo haasteita suunnitteluun, mutta dynaamisten mallien avulla on mahdollista tarkastella miten siirtymät pulssien ja lepovaiheiden välillä vaikuttavat laitoksen kokonaisuudessaan. Tavoitteena on luonnollisesti pulssista toiseen mahdollisimman luotettava ja tehokas konsepti. Varsin yksinkertaisistakin lähtödiedoista tehdyillä malleilla voidaan löytää potentiaalisia ongelmakohtia esimerkiksi lämpötilojen ja virtausten käyttäytymisissä siirtymävaiheissa.

Entä riittääkö polttoaine – tritium?

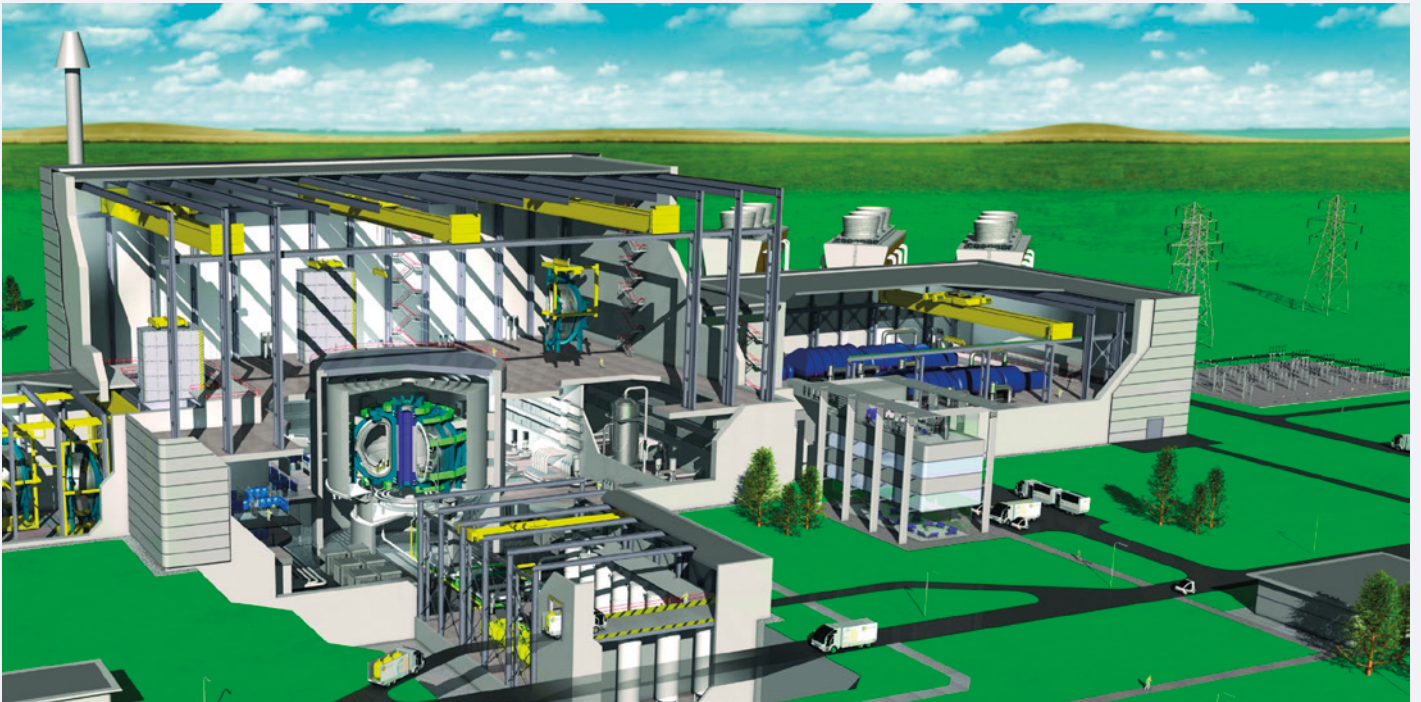
Deuterium on stabiili vedyn isotooppi, jonka pitoisuus on n. 1/6500 luonnossa esiintyvistä vedystä, joten deuteriumia on saatavilla käytännössä rajattomasti.

Fuusioreaktorin toinen polttoaine, tritium, sen sijaan hajoaa 12 vuoden puoliintumisajalla. Maapallon tritiumin tuotanto raskasvesireaktoreissa on noin 2,5 kg vuodessa, kun taas DEMOn tehoinen voimala (1800 MW_{th}) tarvitsee noin 75 kg tritiumia vuodessa – täten tritium-omavaraisuus on fuusiovoimalaitoksen välttämätön ehto. DEMOn tärkeä tehtävä onkin osoittaa tritiumin hyödyn toimivuus käytännössä.

Tritiumin tuotto tapahtuu ns. hyötövaipassa. ITERissä tullaan testaamaan erilaisia hyötövaippoja, mutta onnistuneenkin testausohjelman jälkeen DEMOn rooliksi jää tritiumin hyödyn ja erottamisen (ks. kuva 2) toimivuuden osoittaminen täydessä mittakaavassa. Tällä hetkellä vaihtoehtoina on neljä erilaista hyötövaippakonseptia.

Etäkäsittelyä säteileviin olosuhteisiin

Vaikkei fuusiossa synny pitkäikäisiä radioaktiivisia isotooppeja, neutronipommituksessa fuusiovoimalaitoksen materiaalit muuttuvat niin radioaktiivisiksi, ettei ihmisen ole meneminen käytössä olleen reaktorin sisälle. Kaikki huoltotoimenpiteet pitää siksi pystyä tekemään etäohjatusti. VTT sekä Lappeenrannan ja Tampereen teknilliset yliopistot kuuluvat Euroopan johtaviin osajiin fuusiolaitosten etähuollon kehittämisessä. Tampereen ROViR-keskuksessa on jo yli kymmenen vuoden ajan tehty ITERin diverttorin (ks. Antti Hakolan ITER-artikkeli toisaalla tässä lehdessä) käsittelykokeita täysimittaisella koelaitteistolla sekä virtuaalimalleilla. Saatujen oppien perusteella DEMOn suunnittelussa on pystytty ottamaan jo varhaisessa vaiheessa huomioon etäkäsittelyn erityisvaatimukset, minkä ansiosta monet ratkaisut on mahdollista toteuttaa sekä edullisemmin että toimivammin.



Kuva 2. Taiteilijan näkemys fuusiovoimalaitoksesta. ITERiin verrattuna diagnostiikkaa on vähän ja sen sijaan hyötövaipalla peitetään mahdollisimman suuri osa reaktorista tritium-omavaraisuuden saavuttamiseksi (kuva: EUROfusion).

Myös Fortumin Loviisan voimalaitos on viime vuonna tuonut koke-
mustaan DEMOn suunnitteluun. Koska etäkunnossapidon vaatimuk-
sia oli koottu DEMO-projektissa lähinnä tutkimusyhteisön omin voimin,
haluttiin ydinenergiateollisuuden kunnossapidon asiantuntijoilta näke-
myksiä ja mahdollisia kehitysideoita asiaan. Fortum valittiin ydinvoima-
laitoksen luvanhaltijana tähän tehtävään antamaan käytännössä hyväk-
si havaittuja näkökulmia keskittyen valikoitujen aihealueiden ylätason
vaatimuksiin. Vuosikymmenien aikana kertyneen Loviisan ydinvoima-
laitoksen käyttö- ja kunnossapitokokemusten perusteella Fortum esitti
parannusehdotuksia ja näkemyksiä asioista, jotka olisi syytä huomioida
fuusiovoimalaitoksen kunnossapidossa. Aihealueita olivat muun muas-
sa kunnossapidon optimointi, ikääntymisen ja laadun hallinta, säteily-
suojelu, radioaktiivisten jätteiden käsittely, prosessikemia ja tarvikeva-
raston hallinta sekä organisaation ohjeistus ja pätevänti. Ehdotuksia
annettaessa korostettiin, että ylätason kunnossapitovaatimuksia tulee
päivittää ja tarkentaa DEMOn suunnitelmien edetessä yksityiskohtai-
sempiin suunnitteluvaiheisiin.

Arviointityön lopuksi Fortum totesi, että fuusio- ja fissiovoimalai-
toksissa on paljon samankaltaisuuksia, sillä molemmissa tapauksissa
hyvin suunniteltu ja valmisteltu kunnossapito on erityisen tärkeää voi-
malaitoksen mahdollisimman turvallisen, tehokkaan ja taloudellisen
käytön takaamiseksi.

Materiaalien kehitys avainhaasteena

Yksi merkittävä käytännön ero fuusion ja fission välillä on reaktiossa
syntyvien neutronien energia. Suurienergiset fuusioneutronit (14 MeV

verrattuna fissioneutronin keskimääräiseen parin MeV:n energiaan)
työtäisevät materiaaleihin osuessaan atomeja liikkeelle ja aiheuttavat
pitkiä törmäysketjuja ennen kuin neutronin liike-energia on laimentu-
nut riittävän laajalle aineessa. Siksi seinämä- ja rakennemateriaaleihin
syntyy merkittäviä säteilyvaurioita. Metallit haurastuvat ja turpoavat,
niihin syntyy kaasukuplia, johteet lakkaavat johtamasta sähköä ja
eristeet muuttuvat johtaviksi. Vielä ITER toimii nykyisten fuusiokeilai-
teiden tapaan selvästi pulssitoimisena (muutamia plasmapurkauksia
päivässä), jolloin materiaalivauriotkin pysyvät nykytietämyksen turvin
hallittavalla tasolla. DEMOn käyttöaste kuitenkin harppaa lähelle sa-
taa prosenttia ja lisäksi sen tuottama fuusioteho on moninkertainen
ITERiin verrattuna. Tällöin jokainen atomi siirtyy hiukkaspommituk-
sen seurauksena paikaltaan keskimäärin useita kymmeniä, jopa sa-
toja kertoja. Vähitellen materiaalin ominaisuudet heikkenevät liikaa
ja komponentti pitää vaihtaa.

Helsingin yliopiston Kiihdytinlaboratorion tutkimusryhmä on kehit-
tänyt säteilykestäviä materiaaleja käyttäen atomitason tietokonesimu-
laatioita. Tuoreena tuloksena voidaan mainita, että ns. suuren entropian
lejeeringit kestävät erityisen hyvin säteilyä, sillä niissä atomit ovat
valmiiksi epäjärjestyksessä [1,2]. Ne ovat siksi yksi hyvä kandidaatti
tulevaisuuden fissio- ja fuusiovoimalaitosten rakennemateriaaleiksi.

Kokeellisella puolella materiaalien säteilykestävyyden paranta-
miseksi rakennetaan vaiheittain hiukaskiihdytinteknologiaan perus-
tuvia säteilytyslaitteistoja, joissa pienikokoisia materiaalinäytteitä voi-
daan altistaa pitkäaikaisesti fuusioneutronien kaltaiselle pommitukselle.
Esimerkiksi DONES (DEMO Oriented Neutron Source) tulee toimimaan
ITERin kanssa samaan aikaan ja täydentämään ITERissä tehtävää re-

aktorirelevanttien plasmojen tutkimusta niin, että DEMOn suunnittelun pohjaksi on käytettävissä riittävät tiedot sekä plasmafysiikasta että materiaaleista. Vasta alkamassa olevassa projektissa Fortum ja VTT selvittävät, miten DONESille voidaan kehittää turvallisuusvaatimuksia niin, että lisensointi onnistuu mahdollisimman vaivattomasti. Laitoksen sijoituspaikkaa ei ole päätetty, joten vielä ei tiedetä minkä maan viranomaisvaatimuksia laitoksen tulee noudattaa.

Suomen vahvuudet ja niiden vajavainen hyödyntäminen

Suomi on vuosien mittaan hyötynyt valtavasti osallistumisestaan EU:n fuusiotutkimusohjelmaan ja ITERin rakentamiseen kehittämällä ja luomalla uutta osaamista sekä teollisuudelle että tutkimuslaitoksille sekä näyttämällä osaamistaan kansainvälisillä foorumeilla ja luomalla monikansallisia verkostoja. Fuusiotutkimuksessa suuret EU-maat ovat päävastuussa rahoituksesta ja kantavat pääriskit, kun taas pienemmät maat Suomi mukaan lukien pääsevät hyötymään ohjelmista paljon valitsemalla omat kansalliset kiinnostuksen kohteensa ja keskittymällä kehittämään niitä. Suomessa on ollut VTT:n ja viiden yliopiston lisäksi lähes 30 yritystä mukana joko suoraan ITERin rakentamisessa tai EU:n fuusiotutkimushankkeissa. Viime vuosien aikana on panostettu erityisesti suomalaisen ydinvoimatekniikan osaamisen vientiin ja näky-

vytteen; mitä pidemmälle ITERin rakentaminen edistyy ja mitä lähemmäksi DEMOn konseptisuunnittelu etenee, sitä enemmän voidaan ydinvoimatekniikan osaamista hyödyntää fuusiosähkön toteuttamiseksi. Tähän vaiheeseen tarvitaan teollisuuden vankkaa osallistumista.

Fuusiotutkimusohjelmaan osallistuvien yritysten, Suomessa etunäissä Fortumin, näkökulmasta on arvokasta päästä seuraamaan fuusiolaitoksen suunnittelua alusta lähtien ja soveltamaan ja laajentamaan eri alueiden osaamista uudenlaiseen laitokskonseptiin. Suuret konsortiot F4E:n (joka vastaa kaikista ITERin eurooppalaisista tilauksista) ja ITERin ekosysteemien ympärillä ovat todellinen huippumahdollisuus suomalaisille yrityksille päästä mukaan kansainvälisiin verkostoihin markkinoimaan ja näyttämään osaamistaan. ITERin valmistumisen lähestyessä EU lisääkin fuusiotutkimuksen panostusta yli 30 % lähivuosina. EU:n jäsenenä Suomi on myös poliittisesti sitoutunut osallistumaan ja maksamaan ITERistä ja EU:n fuusiotutkimuksesta n. 10M€ vuodessa – miten Suomi hyödyntää tulevaisuudessa tätä kasvavaa mahdollisuutta maailman kalleimmassa, koko maailman kattavassa, tutkimushankkeessa ITERissä ja DEMOn suunnittelussa? Löytyykö suomalaisilta päätöksentekijöiltä tahtotilaa lähteä kuorimaan maksimaalinen hyöty maailman vaativammassa projektissa ja löytyykö suomalaisilta yrityksiltä rohkeutta lähteä valloittamaan maailman teknologisesti haastavin projekti omalla osaamisellaan?

Viitteet

- [1] L.Koch, F. Granberg, T. Brink, D. Utt, K. Albe, F. Djurabekova & K. Nordlundless. Local segregation versus irradiation effects in high-entropy alloys: Steady-state conditions in a driven system. *Journal of Applied Physics*. Volume 122, Issue 10 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4990950>
- [2] F. Granberg, K. Nordlund, Mohammad W. Ullah, K. Jin, C. Lu, H. Bei, L. M. Wang, F. Djurabekova, W. J. Weber & Y. Zhang. *Physical Review Letters*. Volume 116, Issue 13 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.135504>

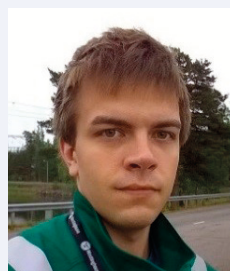
Kirjoittajat



Tkt Markus Airila
Erikoistutkija
Teknologian tutkimuskeskus
VTT Oy
markus.airila@vtt.fi



Tkt Tuomas Tala
Johtava tutkija
Teknologian tutkimuskeskus
VTT Oy
tuomas.tala@vtt.fi



Ins. Sami Herranen
Suunnitteluinsinööri
Fortum Power and Heat Oy
sami.herranen@fortum.com



DI Sami Kiviluoto
Suunnitteluinsinööri
Fortum Power and Heat Oy
sami.kiviluoto@fortum.com

Yksityisrahoitteinen fuusiotutkimus

Otto Asunta¹, Tomas Lindén²

¹Tokamak Energy Ltd., ²Fysiikan tutkimuslaitos

Viimeisen kymmenen vuoden aikana kansallisten ja kansainvälisten fuusio-ohjelmien rinnalle on syntynyt kirjava joukko yksityisiä yrityksiä, jotka pyrkivät tahoillaan valjastamaan fuusion energiantuotantoon. Kun kansallisten ja kansainvälisten ohjelmien suuntaus on ollut rakentaa yhä suurempia ja suurempia koelaitteita, yksityisen rahoituksen realiteetit suuntaavat yritysten tutkimusta yleensä kohti kompaktimpia ja näin ollen edullisempia fuusiolaitekonsepteja. Tämä on johtanut siihen, että lähes kaikki fuusioyritykset kehittävät omia, toinen toistaan mielenkiintoisempia konsepteja, joilla ei ole juurikaan yhtymäkohtia kansallisten ja kansainvälisten ohjelmien tokamakeihin, stellaraattoreihin ja inertiaalikoossapitolaitteisiin.

The past ten years have seen the birth of a varied set of private companies that pursue the quest of fusion for energy production. While the trend of the national and international programs has been to build larger and larger experimental devices, the realities of private funding has directed the research of these companies towards more compact and, therefore, less expensive fusion concepts. This has led to a situation where almost all fusion companies develop their own concepts, one more interesting than the other, that have little in common with the tokamaks, stellarators and inertial confinement fusion (ICF) devices built by the national and international programs.



Tokamak Energy Ltd.

Tokamak Energy Ltd. (TE), jonka laboratorio sijaitsee Abingdonissa, Englannissa, alle kymmenen kilometrin päässä kansainvälisestä Joint European Torus (JET) -tokamakista, on poikkeus tähän sääntöön; TE:n pyrkimys on tuottaa energiaa pienillä pallomaisilla tokamakeilla. Toimintaperiaatteeltaan pallomaiset tokamakit ovat hyvin samankaltaisia kuin "tavalliset" tokamakit. Molemmissa kuuma polttoaineplasma pyritään pitämään koossa ulkoisten kelojen ja voimakkaan plasmavirran luomien magneettikenttien avulla. Huomattavin ero pallomaisen ja tavanomaisten tokamakien välillä on laitteen muoto: tokamak näyttää munkkirinkilältä, kun taas pallomainen tokamak on enemmän kuin omena, jonka siemenkota on poistettu.

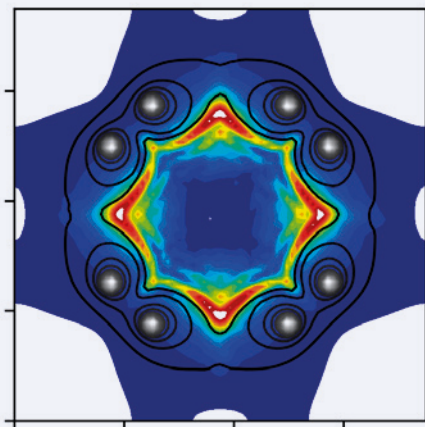
Pallomaisia tokamakeja on rakennettu ja tutkittu 1980-luvulta lähtien ja tälläkin hetkellä koelaitteita on mm. Princetonin yliopistolla (NSTX-U), Iso-Britannian kansallisella fuusiotutkimuskeskuksella, CCFE:llä (MAST-U), sekä loffe Instituutilla Pietarissa (GLOBUS-M). Niiden etuna tavallisiin tokamakeihin verrattuna on korkeampi plasman paineen ja magneettisen paineen suhde, beta.

Koska magneettinen paine on tuotettava ulkoisilla keloilla ja korkeampi plasman paine johtaa suurempaan määrään fuusioreaktioita, beta kuvaa karkeasti laitteen hyötysuhdetta. Näin ollen korkeampi beta

Kuva 1. ST40-tokamakin tyhjökammio ja toroidaaliset kelat (kuva: Tokamak Energy Ltd).



Kuva 2. EMC2:n rakentama Polywell korkean betan tutkimuksia varten. Laitteen sivun pituus on 21.6 cm (kuva: EMC2).



Kuva 3. Polywell-simulaatio suurella betan arvolla. Punaiset alueet muodostavat magneettisen seinämän (kuva: EMC2).

tekee pallomaisista tokamakeista houkuttelevia kaupallisen energiantuotannon näkökulmasta. Konseptin hankaluuksina ovat esimerkiksi ensiseinämän materiaalien kestävyys sekä tilan puute laitteen keskellä ja siitä aiheutuvat ongelmat mm. magneettien suunnittelussa.

TE kuitenkin uskoo, että nämä tekniset ongelmat pystytään ratkaisemaan. Pallomaisen geometrian ohella korkean lämpötilan suprajohteet (HTS) ovat ratkaisevassa roolissa TE:n tulevaisuuden reaktorikonsepteissa. Niiden avulla voidaan tuottaa kompaktien reaktoreiden vaatima voimakas magneettikenttä, puristaa magneetit käytössä olevaan pieneen tilaan, sekä säästää magneettien jäähdytykseen tarvittavassa tehossa ja näin parantaa voimalan hyötysuhdetta.

Tokamak Energy on jo rakentanut kaksi pientä pallomaista tokamakea ST25 and ST25HTS, joista jälkimmäisen magneetit oli valmistettu korkean lämpötilan suprajohteesta. Sen kolmas koelaite, ST40, on parhaillaan rakenteilla (kuva 1). Valmistuessaan ST40 tulee olemaan magneettikentältään (3 teslaa) sekä plasmavirralltaan (2 mega-ampereä) maailman tehokkain pallomainen tokamak. ST40:n tavoitteena on saavuttaa 100 miljoonan asteen plasmalämpötila ja tutkia korkean magneettikentän positiivista vaikutusta plasman energiankoossapitoaikaan pallomaisessa tokamakissa.

TE:n kunnianhimoisena päämääränä on tuottaa sähköä demonstraatioreaktorilla vuonna 2025. Matkalla kohti reaktoria se pyrkii rakentamaan nopealla aikataululla askel askeleelta edistyneempiä pallomaisia tokamakeja ja korkean lämpötilan suprajohtavia magneetteja sekä kehittämään näihin molempiin vaadittavia teknisiä ratkaisuja.

EMC2 ja Polywell

Tokamakien tieteellinen toimivuus energiantuotantoa varten on periaatteessa osoitettu jo 1990-luvulla TFTR- ja JET-tokamakeilla. Yksityisrahoitteisten yritysten eksoottisimpien laitteiden periaatteellinen toimivuus on useissa tapauksissa vielä osoittamatta, mistä johtuen niihin liittyy enemmän fysiikan tutkimusta ja suurempi riski epäonnistua.

Tokamakien ja stellaraattoreiden käyttämän magneettisen koossapidon lisäksi plasmaa voidaan pitää koossa usealla eri tavalla. Esimerkiksi sähkökentän avulla plasmaa voidaan ionisoida, lämmittää ja pitää koossa. Näistä elektrostaattista inertiakoossapitoa (IEC) käyttävistä laitteista on mielenkiintoisin San Diegossa USA:ssa toimivan Energy Matter Conversion Corporation (EMC2) yhtiön kehittämä Polywell.

Polywellissä luodaan magneeteilla loukku elektroneille. Tyypillisesti Polywellissä on kuution sivuille asetettu kuusi magneettia siten, että niiden sama magneettinen napa osoittaa kuution keskipistettä kohti. Kuution keskellä magneettikenttä häviää ja se kasvaa ulospäin mentäessä. Tässä ns. cusp-geometriassa magneettikentän kaareutuvuus on hyvä, eli plasman koossapito on stabiili pienille plasman paineen vaihteluille.

Tästä syystä Polywellissä voi käyttää suurta betan arvoa, mikä mahdollistaa suhteellisen kompaktin laitteen. Elektronien aikaansaama sähkökenttä sekä kiihdyttää plasman ionit korkeaan energiaan että pitää ne koossa. EMC2 osoitti vuonna 1995 että Polywellissä elektronit aiheuttavat syvän potentiaalikuopan, jolla voi kiihdyttää deuteriumioneja ja aikaansaada fuusioreaktioita.

Fuusioreaktioiden aikaansaaminen Polywellissä on kohtuullisen helppoa, mutta vaikeudet tulevat eteen plasman ja sen energian koossapidon kanssa. Polywellin magneettikenttä toimii eräänlaisena magneettisena peilinä elektroneille, mutta kenttäviivat sallivat elektronien karkaamiseen laitteen kulumista ja magneettien keskeltä. Harold Grad tutki cusp-geometrioita ja esitti, että jos betan arvo kasvaa cusp-geometriassa, häviöalueet pienenevät.

Vuonna 2013 EMC2 osoitti kuvassa 2 esitetyllä laitteella ensimmäisenä, että elektronien koossapitoaika kasvaa merkittävästi, kun betan arvo kasvatetaan lisäämällä plasman painetta. Vuonna 2017 EMC2 toisti simulaatioilla plasman koossapidon kasvun suurilla betan arvoilla [1]. Plasman hyvän johtavuuden takia sillä on suuri diamagneettisuus, joten betan arvon kasvaessa plasmaan ilmestyy diamagneettisia virtoja, jotka pitkälti kumoavat ulkoisen kentän ja muodostavat jyrkän magneettisen seinämän laitteen sisään (punainen alue kuvassa 3).

EMC2:n seuraava tavoite on osoittaa, että syvä potentiaalikuoppa ja korkean betan hyvä plasman koossapito voidaan aikaansaada samaan aikaan. Mikäli tämä onnistuu, Polywellin tieteellinen perusta on osoitettu ja seuraava askel on energiaa tuottavan demonstraatiovoimalan rakentaminen. EMC2:n tavoitteena on rakentaa deuterium-tritium-reaktiota käyttävä 1 GW Polywell, jossa plasman paine viiden teslan magneeteilla, betan arvolla yksi, olisi noin 100 baaria ja magneettien halkaisija noin 2 metriä.

Lockheed Martin CFR

Lockheed Martin aloitti vuonna 2011 Compact Fusion Reactor (CFR) projektinsa kuuluisassa Skunk Works -organisaatiossaan Palmdalessa,

USA:ssa. Projekti julkistettiin vuonna 2013. Kyseessä on magneettiseen koossapitoon perustuva laite, jossa tavoitellaan magneettikentän hyvää kaareutuvuutta valtaosassa laitetta ja siten korkeaa betan arvoa. Laite on sylinterisymmetrinen ja siihen on lainattu ideoita monesta muusta fuusiokonseptista. Sen päädyissä on magneettiset peilit ja tarkoituksena on käyttää deuterium-tritium-fuusioreaktiota.

Lockheed Martin kaavailee laitteelleen sekä siviili- että sotilassovelluksia. Sen tavoitteena on sähköteholtaan 200 MW reaktori, jonka ulkomitat ovat noin 15,5 m * 6,5 m [1]. Matalammasta paineesta (arviolta alle 10 baaria) johtuen CFR on selvästi Polywelliä suurempi laite.

Kuvassa 4 on esitetty Lockheed Martinin nykyinen koelaitteisto T4B. Sen tavoitteena on tutkia plasman kuumennusta ja korkean betan tilan saavuttamista. Seuraava laite T5 on suunnitteilla ja sillä tullaan tutkimaan mm. plasman kuumennusta ja laitteen häviöitä. Kokeessa T6 puolestaan on tarkoitus käyttää suprajohdavia magneetteja sekä plasmassa olevia magneettisesti suojattuja tukivarsia ja saavuttaa entistä korkeampia lämpötiloja. Täyden koon ja tehon laitteessa T7 on tarkoitus tutkia deuterium-plasmalla reaktoriolosuhteita.

Magneettien sijainti plasman sisällä aiheuttaa useita teknisiä haasteita sekä Polywellissä että CFR:ssä. Laitteiden rakenne on kuitenkin sellainen, että magneettien vaihto voidaan järjestää kohtuullisella työllä neutronisäteilyn aiheuttamien säteilyvaurioiden niin vaatiessa.

Dense plasma focus

Normaalisti fuusiolaitteissa pyritään välttämään plasman epästabiiliuksia, mutta Dense Plasma Focus (DPF) -laitteessa plasman annetaan kehittyä epästabiiliuksien ketjun kautta tiheäksi plasmoidiksi, joka puristuu kasaan pinne-efektin avulla. Reaktio aikaansaadaan voimakkaalla sähköpurkauksella kahden samakeskeisen elektrodin väliillä. Laitteen keksi N.V. Filippov vuonna 1954 ja hänestä riippumattomasti J.W. Mather 1960-luvulla.

LPP Fusion -yhtiö toimii New Jerseyssä, USA:ssa ja pyrkii kehittämään neutronivapaalla p-¹¹B reaktiolla toimivan DPF-laitteen energiantuotantoon. Nykyisen Focus Fusion-1 (FF-1) laitteen huippusähkövirta on 1,2 MA ja kapasitanssipankista purkaukseen käytettävissä oleva energia on 60 kJ. FF-1 on varsin pieni suhteessa käytettävään virtaan, sillä käytössä olevan volframielektrodin pituus on vain 14 cm (kuva 5).

Viime vuosina LPPF on tehnyt töitä plasman epäpuhtauksien vähentämiseksi. Ensimmäiset volframielektrodilla julkaistut mittaustulokset osoit-

tavat, että parannusta entiseen kuparielektrodiin on saatu, mutta edelleen plasmaan kertyy volframioksidista epäpuhtauksia alun perin arvioitua enemmän. Volframielektrodilla tähän asti parhaan pulssin deuteriumplasman lämpötila on 240 keV +/- 20 keV (1 keV vastaa noin 10 miljoonaa Kelvin-astetta) [2]. Tämä on selvästi enemmän kuin aikaisemmin kuparielektrodilla saavutettu 170 keV ja riittäisi p-¹¹B reaktion aikaansaamiseksi.

Vuonna 2018 LPPF aikoo aloittaa uudet kokeet täysin berylliumista tehdyillä elektrodeilla, minkä he arvioivat vähentävän plasman epäpuhtauksia merkittävästi. Tavoitteena olevan laitteen sähköteho olisi 5 MW ja se toimisi pulssimuodossa 200 Hz taajuudella.

General Fusion

Inertiakoossapito (ICF) on menetelmä, jossa plasma puristetaan kasaan kertaluokkia tiivimmäksi kuin kiinteä aine nanosekuntien aikaskaalassa lasereilla tai hiukkassuihkuilla. Fuusioreaktiota tapahtuu vain lyhyen hetken, kunnes plasma laajenee ja jäähtyy niin paljon että reaktiot lakkaavat. ICF ei käytä ulkoista magneettikenttää. Perinteiset magneettisen koossapidon laitteet ovat tiheyden kannalta toisessa äärilaidassa, sillä niissä harvaa mutta kuumaa plasmaa pidetään koossa voimakkaiden magneettien avulla jatkuvasti. ICF- ja magneettisen koossapidon laitteiden väliin jää suuri plasman tiheysalue, jota ei ole juuri tutkittu.

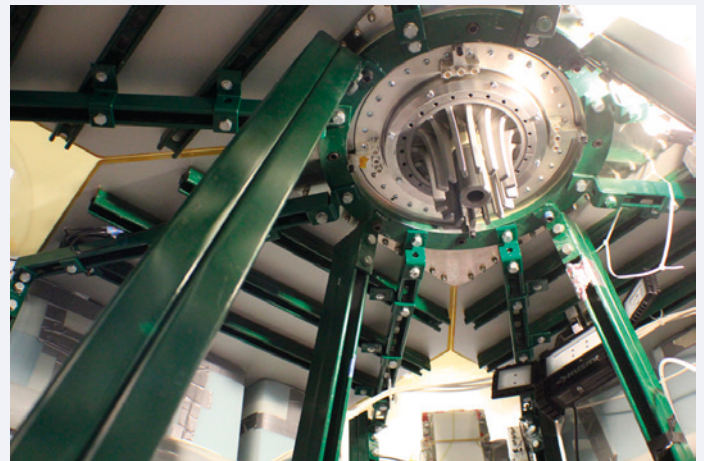
Itse itsensä koossapitäviä plasmajoja, joissa magneettikentät syntyvät pääosin plasmassa kiertävistä sähkövirroista, kutsutaan nimellä plasmoidi tai kompakti toroidi. Näin vältetään suurten ja kalliiden ulkoisten magneettien käytöltä. MTF-konseptin (Magnetized Target Fusion) idea on luoda yksi tai useampi plasmoidi, joita kuumennetaan ja puristetaan erilaisilla menetelmillä. Puristamalla plasma kasaan suureen betan arvoon voidaan aikaansaada laitteita, joissa plasman tilavuus on suhteellisen pieni.

General Fusionin tavoitteena on puristaa pallomainen deuterium-tritium-tokamak-plasmoidi kasaan pyörivässä sulassa lyijy-litium-metalliseoksessa sadoilla tietokoneohjatuilla männillä. Sulalla lyijy-litium-metalliseoksella on useita tehtäviä: se absorboi reaktiossa syntyneet neutronit ja suojaa muuta laitteistoa säteilyvaurioilta sekä kuljettaa reaktiossa syntyneen energian lämmönvaihtimeen. General Fusionin fuusioreaktoreita voitaisiin haluttaessa kytkeä olemassa oleviin hiilivoimaloiden turbiinijärjestelmiin.

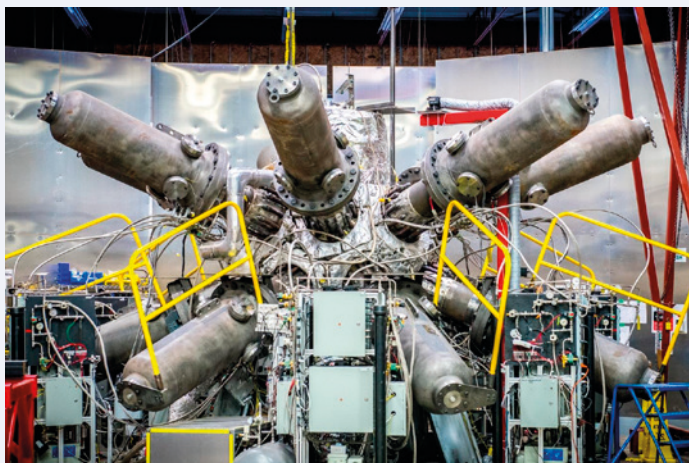
Fuusioreaktion tarvitsema tritium hyödetään litiumista fuusioneutroneiden avulla. Lyijy-litiumseos toimii myös neutronien monistime-



Kuva 4. Lockheed Martinin plasman lämmityskoe T4B, jonka pituus on noin 2 m ja halkaisija 1 m.



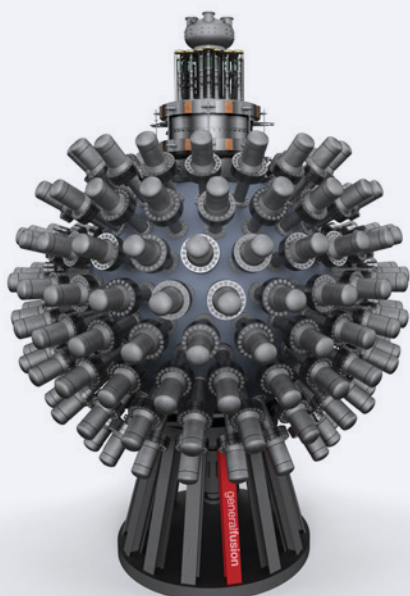
Kuva 5. LPPF FF-1-kokeen volframielektrodi, jonka pituus on 14 cm.



Kuva 6. General Fusionin 14 männän koelaitteisto "Mini-Sphere", jonka halkaisija on metri, käytetään kompressiosimulaatioiden tarkistamiseen (kuva: General Fusion).

na, joka antaa tritium-tuotantokertoimeksi 1,6. General Fusion on tähän asti kerännyt yli 100 MUSD ja sillä on 65 työntekijää Burnabyssa, Vancouverissa, Kanadassa. Se on toiseksi suurin yksityisrahoitteisista fuusioyhteisistä ja on mm. tehnyt data-analyysiin liittyvää yhteistyötä Microsoftin kanssa. Reaktorin on tarkoitus tuottaa 100 MW sähkötehoa kerran sekunnissa tapahtuvilla pulseilla.

General Fusion:in konseptia tutkittiin 1970-luvulla LINUS-hankkeessa, mutta sen aikaisella teknologialla laitetta ei pystytty rakentamaan. General Fusion on rakentanut useita täyden mittakaavan mäntiä ja saanut ne toimimaan 50 m/s nopeudella ja 2 mikrosekunnin aikatakkudella. Sulan lyijy-litiumseoksen kompressoimisen tutkimiseksi General Fusion on rakentanut metrin halkaisijan pallon, jossa on neljätoista mäntää (kuva 6). Männillä kompressoitava plasma on pallomainen



Kuva 7. General Fusionin reaktorin malli. Laitteen päällä on plasmajektor, joka luo pallomaisen tokamakin kompressoitavaksi halkaisijaltaan kolmemetrin pallon sisällä (kuva: General Fusion).

tokamak-plasmoidi, joka generoidaan plasmajektorissa. Rakenteilla oleva PI3-injektori on kolmas täyden mittakaavan plasmajektor.

Laitteen haasteena on tuottaa ja kompressoida riittävän pitkäikäisiä, kuumia ja tiheitä plasmoidia. Fuusion aikaansaaminen vaatii riittävän plasman kompressiosuhteen, joten männillä on aikaansaattava muodoltaan oikea ja tarkka kokoonpuristus. Jos sulaa lyijy-litiumia sekoituu plasmoidiin, se voi jäähtyä eikä fuusiota saada aikaan.

General Fusion on rakentamassa laitteestaan reaktoriskaalan prototyyppiä, jolla alustavasti pyritään kompressoimaan plasma noin 10 keV lämpötilaan, $2 \cdot 10^{22}/m^3$ hiukkastiheyteen ja 0,5 ms ajaksi [3]. Prototyypin rakentamista varten he ovat keräämässä vuoden 2017 aikana noin 100 MUSD lisärahoitusta. Prototyypin rakentamiseen kuluu arvioiden mukaan kolmesta viiteen vuotta. Varsinainen reaktori tulee koostumaan kuvassa 7 esitetyistä, halkaisijaltaan kolmen metrin suoruisesta pallosta, joka sisältää pyörivän lyijy-litium-seoksen ja jonka pinnalla on satoja mäntiä ja huipulla plasmageneraattori.

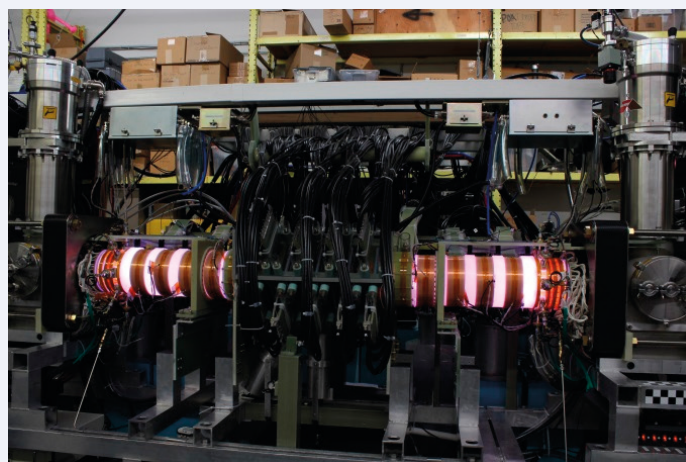
Helion Energy

Helion Energy MTF-laitteessa kaksi onton sikarin muotoista plasmoidia, joilla on vain poloidaalinen kenttä (Field Reversed Configuration, FRC), törmäytetään yli 300 km/s nopeudella. Törmäyksestä syntyy kuumempi paikallaan oleva FRC-plasmoidi, jota puristetaan ulkoisella magneetikentällä. FRC-plasmoidilla voidaan saavuttaa betan arvo yksi.

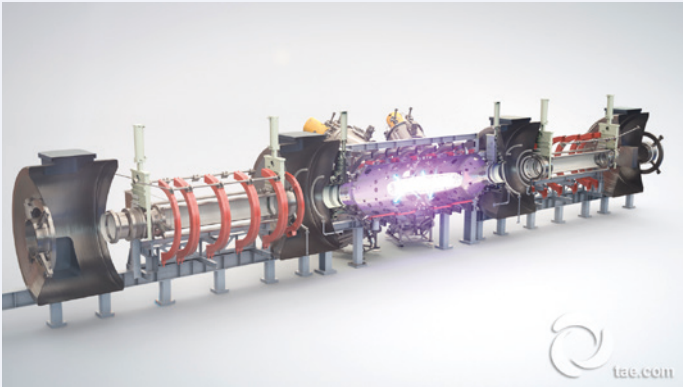
Grande-kokeella (kuva 8) Helion Energy on saavuttanut 5 keV deuteriumionien lämpötilan [1]. Venti-kokeen tavoitteena on kompressoida FRC 20 teslan maksimikentällä ja saavuttaa 8 keV ionilämpötila ja $10^{23}/m^3$ tiheys kompression jälkeen. Tavoitteena on rakentaa 50 MW reaktori, joka toimii 2 Hz taajuudella. Sama ryhmä kehittää toisessa yhtiössä NASA:n NIAC rahoituksella pulssitettua fuusiokäyttöistä rakettimoottoria (FDR). Helion Energy toimii USA:ssa Redmondissa lähellä Seattlea. He suunnittelevat käyttävänsä aluksi deuteriumia ja keräävänsä talteen D-D-fuusioista syntyvät tritiumin ja ^3He -isotoopin, jotta he myöhemmin voisivat käyttää neutronivapaata D- ^3He reaktiota.

TAE Technologies

TAE Technologies (aikaisemmin Tri Alpha Energy) on resurseinlaan suurin yksityisrahoitteisista fuusioyhteisistä. TAE on tähän asti kerännyt



Kuva 8. Helion Energy Grande-koelaitteisto (kuva: Helion Energy).



Kuva 9. TAE Technologies -yhtiön noin 20 m pitkä C-2W koelaitteisto (kuva: TAE Technologies).

yli 500 MUSD ja sillä on töissä 160 henkeä USA:ssa Foothill Ranchissa, lähellä San Diegoa. TAE on tehnyt yhteistyötä Googlen kanssa plasmalajien optimoimiseksi.

Myös TAE törmäyttää kaksi FRC-plasmoidia toisiinsa. Plasmoidien injektio-opeus on 250 km/s. Törmäyksessä syntynyt noin kolme metriä pitkä ja säteeltään 40 cm FRC-plasmoidi vakautetaan ampumalla siihen tangentialisesti neutraaleja hiukkassuihkuja sekä käyttämällä

ulkoisia sähkö- ja magneettikenttiä. TAE pystyi C2-U laitteella ylläpitämään plasmoidia noin 10 ms, mikä oli laitteiston virtalähteen asettama raja. Tähän asti saavutettu ionien lämpötila on noin 1 keV [1]. Kesällä 2017 valmistuneella laitteella C2-W (Norman), kuva 9, neutraalisuihkujen teho on aluksi 13 MW ja myöhemmin 19 MW. FRC:n elinaikaa on tarkoitus nostaa 30 ms. TAE:n laitteen tavoitteena on neutronivapaa $p\text{-}^{11}\text{B}$ reaktio ja 200–500 MW teho.

Yhteenveto

Plasmafysiikan ymmärryksen, instrumentoinnin, ohjelmistojen ja tietokoneiden kehitys on mahdollistanut useiden yksityisrahoitettujen yritysten fuusiotutkimuksen ja kehitystyön. Nettoenergian tuotto fuusion avulla on erittäin vaikea ongelma ja rahoituksen niukkuus on hidastanut fuusiotutkimuksen kehitystä. Yksityinen rahoitus antaa mahdollisuuden tutkia ja kehittää ideoita, jotka eivät ole yhtä pitkälle kehittyneitä kuin perinteiset tokamakit.

Pienillä fuusioreaktoreilla on monia potentiaalisia etuja koskien kehitysaikaa, kustannuksia, sijoittamista ja soveltamista (mobiili, avaruus, lääketieteellinen ja materiaalfysiikka). Tässä artikkelissa esitettyjen lisäksi fuusiolaitteita kehitetään useissa muissakin yhtiöissä. Nykyisten tulosten valossa on mahdotonta sanoa onnistuvatko nämä yhtiöt saavuttamaan kunnianhimoiset tavoitteensa, mutta on selvää, että jos yksikin yhtiö onnistuu, kyseessä on valtava läpimurto fuusiotutkimukselle.

Viitteet

- [1] ARPA-E ALPHA Annual Review 29.-31.8.2017, <https://arpa-e.energy.gov/?q=site-page/alpha-2017-annual-review-meeting>
- [2] E. J. Lerner et al., Confined ion energy >200 keV and increased fusion yield in a DPF with monolithic tungsten electrodes and pre-ionization, Phys. Plasmas 24, 102708 (2017), <https://doi.org/10.1063/1.4989859>
- [3] P. O'Shea, Unlocking fusion energy with new technologies, TRIUMF, Canada 18.11.2017, <http://generalfusion.com/wp-content/uploads/2017/11/20171118-General-Fusion-TRIUMF-Talk.pdf>

Lisää samasta aiheesta

- [1] D. Clery, Private fusion machines aim to beat massive global effort, Science v356, 28.4.2017, p. 360-361,
- [2] T. Lindén, Compact fusion reactors, SYP2016, Helsinki, 3.11.2016, https://www.ats-fns.fi/images/files/2016/syp2016/presentations/TSF4_Tlinden_CompactFusionReactors.pdf.

Kirjoittajat



TKT Otto Asunta
Tokamak-fyysikko
Tokamak Energy Ltd.
Otto.Asunta@tokamakenergy.co.uk



FT Tomas Lindén
Projektipäällikkö
Fysiikan tutkimuslaitos
tlinden@cc.helsinki.fi

Diplomityö: Loviisan ydinvoimalaitoksen vakavan reaktorionnettomuuden ohjeen kehitys

Essi Karstinen
Fortum Power and Heat Oy

Diplomityössä luotiin aikaisemman tekstimuotoisen ohjeen pohjalta luonnos vuokaaviomuotoisesta vakavan reaktorionnettomuuden ohjeesta ja ohjeen tausta-aineistosta. Työssä tarkasteltiin myös valmiusorganisaation ohjeiden kehitystarpeita ja tehtiin katsaus muun maailman vakavan reaktorionnettomuuden ohjeistuksiin.

The aim of this master's thesis was to update the Loviisa power plant's text based severe accident management guidelines to the flow chart form. The drafts of flow chart guidelines and background material for the guidelines were developed. This work also included examining possibilities to develop the emergency response center guidelines and comparison of different designs of severe accident guidelines.

Loviisan vakavan reaktorionnettomuuden ohjeet kehitettiin 2000-luvun alussa osittain rinnakkain vakavan reaktorionnettomuuden järjestelmä-uudistuksien kanssa. Ohje laadittiin tekstimuotoisena, kuten muutkin laitoksella käytössä olleet ohjeet. Voimalaitoksen häiriöntunnistus- ja hätätilanneohjeita on sittemmin päivitetty vuokaaviomuotoon. Koska vakavan reaktorionnettomuuden ohje on osa tätä ohjejakumoa, on luontevaa, että ohjeiden esitystapa on yhtenäinen.

Ohjeen muutos vuokaaviomuotoon

Vuokaaviomuotoinen ohje on visuaalisesti helpompi seurata kuin tekstimuotoinen ohje. Se myös pakottaa keskittymään oleelliseen; siinä missä tekstimuotoisessa ohjeessa voidaan esittää myös lisäinformaatiota, keskitytään vuokaaviomuotoisessa ohjeessa ainoastaan toimenpiteiden ja seurannan kannalta oleellisen tiedon esittämiseen. Yksi vuokaaviomuotoisen ohjeen laadinnan mielenkiintoisimpia osioita olikin miettiä, mitkä osat ja missä laajuudessa tekstimuotoisesta ohjeesta siirrettiin päivitettyyn ohjeeseen. Yksi esimerkki nousi esiin mietittäessä seisokkitiloja ja sitä, miten reaktoripaineastian kannen paikallaanolo vaikuttaa toimintaan onnettomuustilanteissa. Lopputulemana todettiin, että koska kannen paikallaanollolla ei ole varsinaista merkitystä tehtäviin toimenpiteisiin ei asian mainitseminen ohjeessa ole oleellista. Joissakin tilanteissa ohjeen toimenpiteitä myös tarkennettiin huomattavasti verrattuna tekstimuotoiseen ohjeeseen.

Ohjeen rinnalle kehitettiin ohjeen tausta-aineisto, jossa selitetään ohjeen strategia, laitosvaste, riskit ja perustellaan ohjeessa tehtävät toimenpiteet. Tausta-aineistossa käsitellään myös reaktoripaineastian kannen paikallaanolon vaikutus tilanteen kehittymiseen, vaikkei sitä suoraan ohjeessa mainitakaan.

Suurin osa ohjeen sisällöstä tuli tekstimuotoisesta ohjeesta, mutta joi-takin uusia kokonaisuuksia ja strategiamuutoksia tehtiin ohjeeseen päivityksen yhteydessä. Suurin yksittäinen lisättävä kokonaisuus oli sydänsula-altaan päällesyötön strategian avaaminen toimintotasolle asti. Lisäksi ohjeeseen tarkennettiin esimerkiksi höyrystimien ja ilmastointijärjestelmien käyttöä, sekä polttoainealaiden ja vesitaseiden seurantaa.

Yksi suurimpia kehityskohteita, jonka vuokaaviomuoto tekee mahdolliseksi, oli tiedonvälityksen parantaminen valvomon ja valmiuskeskuksen välillä. Tiedonkulku varmistettiin lisäämällä vuokaaviomuotoiseen ohjeeseen tiedonvälityspisteitä, joissa valvomo ilmoittaa valmiuskeskukselle lai-

tostilan muutoksista ja pyytää valmiuskeskukselta varmistuksen tehtäville toimenpiteille.

Eröt muihin ohjeformaatteihin ja valmiusorganisaation ohjeiden kehitys

Loviisan voimalaitoksen vuokaaviomuotoiset häiriönselektivis- ja hätätilanneohjeet on tehty silloisen Framatomen ohjeformaattilla. Päästrategia on hyvin samanlainen kaikissa tutkituissa vakavan reaktorionnettomuuden ohjetyypeissä. Loviisan ohjeistorakenne on kuitenkin kokonaisuudessaan hyvin erilainen kuin muissa ohjeformaateissa, koska se erottelee muita selkeämmin valmiusorganisaation ohjeistuksen valvomon ohjeistuksesta. Lisäksi ohjeistuksen taso on Loviisan voimalaitoksen osalta joiltain osin huomattavasti tarkempaa kuin joillain muilla laitoksilla, koska Loviisassa on enemmän juuri vakavan reaktorionnettomuuden hallintaan suunniteltuja järjestelmiä.

Valmiusorganisaation ohjeistuksesta ei tämän työn yhteydessä löydetty erityisiä kehityskohteita. Suurin ongelmaksi koettu asia oli tiedonvälityksen parantaminen valvomon ja valmiuskeskuksen välillä, mihin pystyttiin vastaamaan valvomo-ohjeen kehityksen yhteydessä.

Yhteenveto

Loviisan voimalaitoksen vakavan reaktorionnettomuuden ohjeesta tehtiin vuokaavio-ohjelunnon, joka on otettu jatkokehitykseen viimeistelyä ja käyttöönottoa varten. Loviisan vakavan reaktorionnettomuuden ohjeisto poikkeaa muun maailman ohjeistuksesta voimalaitoksen erikoisen laitostokokoonpanon ja ohjestrategian vuoksi. Valmiusorganisaation ohjeet ovat ajan tasalla, eivätkä vaatineet päivitystä.

Opinnäytetyö on hyväksytty Oulun yliopistossa ympäristötekniikan koulutusohjelman kemianprosessitekniikan suuntautumisalalta 21.9.2017.

Kirjoittaja

DI Essi Karstinen
Suunnitteluinsinööri
Fortum Power and Heat Oy
essi.karstinen@fortum.com

Metro muutti maalle

”**M**ETRO MUUTTI MAALLE”, ”Niemi muuttaa kaiken”, ”Maailma pienenee – Finnair” ja ”Älä välitä, anna Nurmisen välittää!”. TV 1:n suosituksessa Uutisvuoto-viihdeohjelmassa tavataan kysyä, mikä kulloinkin valitusta neljästä väittämästä ei ole tapahtunutta totta. Mikäpä tässä esitetyistä neljästä logistiikka-aihepiirin lausumasta ei kuulu muiden kolmen joukkoon ja miksi ei? Toista lausumaa voi nähdä pääkaupunkiseudun katukuvassa, kolmas ja neljäs lausuma ovat tämän päivän TV-mainontaa, mutta ensimmäinen lausuma on tuulesta temmattu heitto.

Kolme viimeksi mainittua lausumaa ovat siis logistiikka-aiheisten mainosten ja mielikuvien toteutunutta maailmaa, metrolausumakin uskottavalta ja todelta tuntuva mutta kuitenkin paikkansa pitämätön harhautus. Tuo maallemuuttoletkautus tuli mieleeni luukiessani aamun Hesaria lauantaina, Maxin päivänä 18.11.2017. Metro oli juuri aloittanut länsimetron aikataulun mukaisen liikennöintinsä, jolloin se tosiasiallisesti jo toisen kerran muutti maalle. Ensimmäisen kerranhan metro muutti maalle ihmiskupolvi sitten, Kimmon päivänä, maanantaina 2.8.1982.

Mutta, mutta... Metrohan on isojen kaupunkien julkinen liikennöintiväline, ei metroja maalle rakenneta, ei niitä siellä ole. Tämä on kuitenkin vain määrittelykysymys kuten esimerkiksi sekin, tähän asiaan mitenkään liittymättä, missä lämpötilassa kylmä muuttuu kuumaksi tai miksi tuotemerkki HeTeKa on puhekielessä muuttunut vieterisängyn yleisnimeksi heteka. Milloin ja miksi Metro joskus ehkä muuttuu metrokseksi tai ehkäpä joksikin muuksi yleisesti käytetyksi ilmaisuksi? Siinäpä se: siitäkkin tässä on kysymys.

Suurissa kaupungeissa ja usein myös keskisuurissa, vähintään muutaman sadan-



Palautusosoite:

Suomen Atomiteknillinen Seura
PL 78
02151 ESPOO



KANNATUSJÄSENET

Fennovoima Oy

Pohjolan Voima Oyj

Teollisuuden Voima Oyj

FinNuclear ry

Posiva Oy

TVO Nuclear Services Oy

**Fortum Power
and Heat Oy**

Saanio & Riekkola Oy

Voimaosakeyhtiö SF Oy

Platom Oy

Siemens Osakeyhtiö

Wärtsilä Projects Oy

**Pohjoismainen
Ydinvakuutuspooli**

**Teknologian
tutkimuskeskus VTT Oy**