

<https://helda.helsinki.fi>

Fuusioyritysten rahoitus lisääntyy ja tutkimus etenee

Linden, Tomas

2022

Linden , T 2022 , ' Fuusioyritysten rahoitus lisääntyy ja tutkimus etenee ' , ATS Ydintekniikka , Vuosikerta. 51 , Nro 2 , Sivut 34-39 . <
https://www.ats-fns.fi/images/files/ydintekniikka/atsyt_2022_2.pdf >

<http://hdl.handle.net/10138/355497>

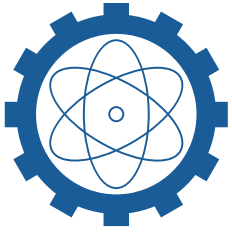
unspecified
publishedVersion

Downloaded from Helda, University of Helsinki institutional repository.

This is an electronic reprint of the original article.

This reprint may differ from the original in pagination and typographic detail.

Please cite the original version.



ATS

2|2022

Vol. 51

YDINTEKNIikka

SUOMEN ATOMITEKNILLINEN SEURA – ATOMTEKNISKA SÄLLSKAPET I FINLAND

Olkiluoto 3:n sähköntuotanto etenee suunnitelman mukaan

OL3-reaktorille tehdään käyttöönottosuunnitelman mukaisia testejä eri tehotasoilla kevään ja kesän aikana.

Jatkolupaa haettu Loviisan ydinvoima- laitokselle

Fortum hakee käyttö lupaa Loviisan molemmille yksiköille vuoden 2050 loppuun saakka, siis 20 vuoden jatkoa sähköntuotantoon.

Uusi tutkimus- infrastrukturi täydessä käytössä

VTT:n Ydinturvallisuustalossa on modernit kokeelliset valmiudet tutkia säteileviä materiaaleja ja niitä edelleen kehitetään.



Julkaisija / Publisher

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

Johtokunta / Board

Puheenjohtaja / President

TkT Markus Airila
puheenjohtaja@ats-fns.fi

Varapuheenjohtaja / Vice President

MSc Ana Jambrina
ana.jambrina@vtt.fi

Sihteeri / Secretary General

FM Jussi Peltonen
sihteeri@ats-fns.fi

Rahastonhoitaja / Treasurer

FM Maria Lindholm
rahastonhoitaja@ats-fns.fi

Jäsenet / Board Members

SK Tuomo Huttunen
tuomo.huttunen@fennovoima.fi

DI Olli Nevander
olli.nevander@rosatom.fi

TkT Antti Snicker
antti.snicker@aalto.fi

DI Elina Syrjälähti
elina.syrjalahti@tvo.fi

Toimihenkilöt / Functionaries

ATS Young Generation

DI Pekka Pihlanko
pekka.pihlanko@platom.fi

Kansainvälisten asioiden sihteeri / International Affairs

DI Santeri Myllynen
santeri.myllynen@fortum.com

Women in Nuclear Finland

FT Eveliina Muuri
eveliina.muuri@gmail.com

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

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

Tieteellinen päätoimittaja / Scientific Chief Editor

FT Antti Rätty
antti.ratty@vtt.fi

Ajankohtaispäätoimittaja / Topical Chief Editor

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

Ulkoasu ja taitto / Layout

Katariina Korhonen
Creatus
katariina@creatus.fi

Toimitus / Editorial Staff

FM Sophie Haapalehto
sophie.haapalehto@posiva.fi

DI Klaus Kilpi
klaus.kilpi@gmail.com

TkT Henri Loukusa
henri.loukusa@gmail.com

DI Alekski Savolainen
aleksi.savolainen@tvo.fi

FT Mervi Söderlund
mervi.soderlund@fennovoima.fi

Toimituksen yhteystiedot

ATS Ydintekniikka

c/o Jarmo Ala-Heikkilä
PL 15100
00076 Aalto
p. 050 433 1198

Painopaikka

Hämeen Kirjapaino 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.

Kahdenlaista ilmaa

TÄTÄ KIRJOITTAESSA SUOMI JA RUOTSI ovat jättäneet jäsenhakemuksensa NATO:n pääkonttoriin. Tässä asiassa sekä Suomen kansa että sen edustajat olivat aika lailla yksimielisiä, mutta demokratiassa on sallittua pitää oma mielipiteensä, vaikka se olisikin vähemmistössä. Tätä oikeutta hakemuksella halutaan turvata vastaisuudessakin, mutta kun miettii, mikä päätöksen hakemuksesta laukaisi, niin juhlinta on aiheellisesti hillittyä.

Ambivalentteja tunteita on viime kuukausina heräillyt myös ydinenergia-alalla. Hartaasti rakennettu Olkiluoto 3 on kevään aikana tuottanut ensimmäiset megawattituntinsa valtakunnan verkkoon, mistä voimme olla kollektiivisesti iloisia. OL3-käyttöön otosta on lehdessämme perusteellinen juttu. Toinen positiivinen uutinen on Loviisan yksiköiden 1 ja 2 käyttöluvan jatkokohakemus vuoteen 2050 saakka, mistä myös kerromme tarkemmin sisäisivuilla.

Toisaalta meillä on Fennovoiman toukokuisen ilmoitus, että se on päättänyt laitostoimi-

tussopimuksen Rosatomin kanssa. Harmittaa erityisesti projektin työntekijöiden puolesta. Tosin Rosatom on ilmaissut tyytymättömyytensä Fennovoiman päätökseen, joten tämä matka ei ole vielä välttämättä saavuttanut päätepysäkkiä.

Energiäteollisuuden teettämän kyselyn mukaan suomalaisten asenteet ydinvoimaa kohtaan ovat positiivisempia kuin koskaan aikaisemmin, mistä voimme iloita. Toisaalta kun hankkeiden toteutus kestää vuosissa mitattavan ajanjakson ja laitosten käyttöikä mitataan vuosikymmenissä, niin tässäkin kannattaa seurata pitkän ajan trendiä yksittäisen ennätystuloksen sijasta. Lähelle asutusta rakennettavien lämmitysreaktorien toteutuminen vaatii osallistavampaa kansalaiskeskustelua kuin gallupit ja perinteiset kuulemiset.

Kun pohdin ydinenergia-alan ilmapiiriä pitämällä aikavälillä, niin se on voittopuolisesti raikkaampaa kuin 1900-luvun parina viimeisenä vuosikymmenenä. Raikkaus myös sisältää enemmän realismia kuin 2000-lu-



vun alun niin kutsuttu ydinvoimarenessanssi, kun näkee miten konkreettisesti maailmalla nyt suunnitellaan uusia ydinvoimaprojekteja ja pienreaktoreita. Motivaatioilla on kuitenkin synkkiä taustasävyjä: energiantuotannon omavaraisuus ja ilmastomuutoksen hillitseminen. Ydinenergia on joka tapauksessa monilla mitareilla paras vaihtoehto.

Ilmoista riippumatta toivotan omasta ja toimituksen puolesta rentouttavaa kesää kaikille lukijoille!

Jarmo Ala-Heikkilä

Vastaava päätoimittaja

SISÄLTÖ

Vakiopalstat

Päätoimittajalta: Kahdenlaista ilmaa 3

Pääkirjoitus: Tätä on odotettu! 4

Editorial: This has been waited for! 5

Pakina: Energiapolitiikkaa, tuulimyllyjä ja hullu diktaattori 55

Tapahtumat

ATS:n vuosikokous 2022 6

Suomen loppusijoitus ja Posiva vahvasti esillä Paasitorin ICGR-konferenssissa 7

Nuclear Energy Ecosystems – Open Business Day 2022 8

Ajankohtaista

Olkiluoto 3:n käynnistys 13

Loviisan käyttöiän pidennys 18

Nordic Nuclear Trainee Program 20

Tiede ja tekniikka

Historianäkökulmaa Loviisan reaktori-paineastian säteilyhaurastumiseen: Loviisa 1:n ”painajainen” johti pitkäjänteiseen tutkimukseen 23
Risto Valkeapää

A novel advanced multi-physics simulation tool for the analysis of the Molten Salt Fast Reactor 26
Marco Tibergh

Radioaktiiviset nuklidit lääketieteessä 30
Jukka Liukkonen, Jari Heikkinen

Fuusioyrittysten rahoitus lisääntyy ja tutkimus etenee 34
Tomas Lindén

Kaukolämpöä pienydinvoimalla? Pääkaupunkiseudun asukkaiden näkemykset osallistumisesta ja päätöksenteosta 39
Matti Kojo, Niina Kiviluoma, Tapio Litmanen

The VTT Centre for Nuclear Safety – Underway! 44
Wade Karlsen

Diplomityö: Atomistinen sekoittuvuus volframissa käyttäen kahden lämpötilan molekyyliydynamiikan mallia 48
Iisa Saunamäki

Master’s thesis: The impacts of meteorological data on dose assessment in different operational conditions of a nuclear power plant 52
Jenna Järvenpää

Tätä on odotettu!

VIIME AIKOINA OLEMME SAANEET USEAMMAN KERRAN VASTATA kysymykseen, että miltä nyt tuntuu, kun OL3 on käynnistetty ja liitetty valtakunnan verkkoon? Vastaaja lienee toisinaan yhtä hämmentynyt kuin vasta maaliviivan ylittänyt urheilija. Taitaa olla niin, että tämän hetken tunteen pystyy parhaiten kuvaamaan vasta, kun aikaa on hieman kulunut. Varmaa on kuitenkin se, että fiilikset tässä hetkessä ovat vahvasti positiivisesti varautuneet.

OL3 vähentää tuontisähkön tarvetta peräti 60 prosenttia ja lisää kotimaista sähköntuotantoa tehden Suomesta lähes omavaraisen sähköntuottajamaan. Näinä aikoina omavaraisuuden merkitys on entistä tärkeämpi. Verrattuna hiililaitoksella tuotettuun sähköön hiilidioksidipäästöt ovat Olkiluoto 3:n tuotannolla vuosittain 11 miljoonaa tonnia pienemmät. Se on merkittävä askel parempaan, sillä energiantuotannosta tulevien hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on ilmastonmuutoksen hillitsemisen keskeisimpiä keinoja.

Merkittävää Olkiluoto 3:n valmistuminen on myös siksi, että toimivan yhteiskunnan sähkön tarve kasvaa koko ajan. On siis selvää, että kasvavaan kulutukseen on vastattava ympäristöystävällisesti ja -turvallisesti. Riittävä sähköntuotantokapasiteetti tuo myös sähkön hintaan vakautta. Olkiluoto 3:lla turvataan vakaata ja hiilidioksidivapaata sähkönsaantia vähintään seuraavaksi 60 vuodeksi.

Olkiluoto 3 on ollut niin suomalaisen kuin maailmanlaajuisen ydinvoima-alan tarkassa seurannassa. Me ATS:n jäsenet ja ydinalan ammattilaiset olemme pitkän projektin aikana alalle tyypilliseen tapaan useaan kertaan analysoineet projektin oppeja aina suunnitteluperusteista osaamiseen ja viranomaisvaateista projektinhallintaan. Oppeja ja tarinoita taitaa olla yhtä monta kuin hankkeeseen osallistuneitakin. Yksi on kuitenkin varmaa ja toistuu puheissa: nyt on tärkeää pitää huolta suomalaisesta ydinalan osaamisesta, joka voisi olla vaikka nykyistä enemmänkin kansallinen vientituote.

Toukokuussa Energiategollisuuden julkaisema Kantar Publicin toteuttama mielipide-



tutkimuksen tulos osoitti, että ydinvoiman kannatus Suomessa on korkeammalla kuin koskaan. Tutkimusaineisto osoitti, että keskeiset syyt kannatuksen lisääntymiseen löytyvät ilmastonmuutoksesta, entisestään kallistuneesta fossiilisen energian hinnasta sekä lisääntyneestä kiinnostuksesta omavaraisuuden lisäämiseen suomalaisessa energiantuotannossa. Ydinvoiman suosioon vaikuttaa selkeästi myös olemassa oleva Posivan ratkaisu käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksesta.

Juuri käynnistetyistä ydinvoimalasta virtaakin koko Suomen mitalta puhdasta uskoa tulevaan. Olkiluoto 3 on nykyaikaisen huipputeknologian ja osaamisen taidonnäyte: nyt jos koskaan meillä ydinalan ammattilaisilla riittää energiaa tuottaa ilmaston kannalta yhä

parempaa tulevaisuutta! Toimintamme todelliset tehot saavutetaan turvallisesti ja ennakoitavasti silloin, kun sydämen hyvinvointi on varmistettu ja energisuus on vastuullisissa ammattimaisissa käsissä. Näin teemme suuria ilmastotekoja koko ympäröivälle yhteiskunnalle joka päivä. Tässä on syytä ylpeydelle koko suomalaisella ydinalalla ja jokaisella ydinalan ammattilaisella!

Haluammekin kiittää tämän lehden lukijoita matkasta ja tuesta Suomen suurimman ilmastoteon toteuttamisessa!

Jaana Isotalo

Henkilöstö- ja viestintäjohtaja
Teollisuuden Voima Oyj
jaana.isotalo@tvo.fi

This has been waited for!

RECENTLY, WE HAVE BEEN ASKED SEVERAL TIMES how it feels now that OL3 is up and running and connected to the national grid. The respondent is sometimes as confused as an athlete who has just crossed the finish line. It seems that the best way to describe the feeling of the moment is to wait until some time has passed. What is certain, however, is that the feeling at this moment is strongly positively charged.

OL3 will reduce the need for electricity import by as much as 60% and increase domestic electricity production, making Finland an almost self-sufficient electricity-producing country. In these times, self-sufficiency is more important than ever. Compared to the electricity produced by a coal-fired power plant, Olkiluoto 3 will produce 11 million tonnes less carbon dioxide emissions per year. This is a significant step forward, as reducing carbon dioxide emissions from energy production is one of the key means of mitigating climate change.

The completion of Olkiluoto 3 is also significant, because the need for electricity in a functioning society is constantly growing. It is therefore clear that this growing consumption must be met in an environmentally friendly and safe way. Sufficient electricity generation capacity will also bring stability to the price of electricity. Olkiluoto 3 will therefore ensure a stable and CO₂-free electricity supply for at least the next 60 years.

Olkiluoto 3 has been under the close scrutiny of both the Finnish and global nuclear industry. As is typical of the industry, we ATS members and nuclear professionals have repeatedly analysed the lessons learned during the long project, from design fundamentals to competencies and from regulatory requirements to project management. There are as many lessons and stories as there are people involved in the project. However, one thing is certain and is repeated by many: it is now important to take care of Finnish nuclear know-how, which could actually be more of a national export product than it is today.

In May, a poll by Kantar Public published by the branch organization Finnish Energy showed that support for nuclear power in Finland is at an all-time high. The survey data showed that the main reasons for the increase in support are climate change, the recent price increase of fossil energy and the interest in increasing self-sufficiency in Finnish energy production. The existing solution of Posiva for the final disposal of spent nuclear fuel is also clearly contributing to the popularity of nuclear power.

The nuclear power plant, which has just started up, is a source of pure faith in the future for the whole of Finland. Olkiluoto 3 is a feat of modern cutting-edge technology and expertise: now, if ever, we nuclear professionals have the energy to produce an even better future for the climate! The real power of our operations is achieved safely and predictably when the heart and core are healthy and the energy is in responsible professional hands. This is how we make a big climate act for our society every day. This is a source of pride for the entire Finnish nuclear industry and every nuclear professional!

We would like to thank the readers of this magazine for their journey and support in making Finland's biggest climate project a reality!

Jaana Isotalo

Senior Vice President,
HR & Communication
Teollisuuden Voima Oyj
jaana.isotalo@tvo.fi

ATS:n vuosikokous 2022

Suomen Atomiteknillisen Seuran vuosikokous järjestettiin hybriditoteutuksella VTT:n Ydinturvallisuustalolla ja Zoom-yhteydellä maaliskuun 15. päivänä. Tapahtuma keräsi noin 50 osallistujaa, joista puolet osallistuivat paikan päällä ja puolet etäyhteydellä. Koronavirus rajoitti seuran toimintaa vuonna 2021, jonka seurauksena tapahtumia järjestettiin rajallisesti hybriditoteutuksella. Tästä huolimatta ATS:n sekä YG- ja Senioritoimintaryhmien tapahtumiin osallistui noin 390 jäsentä. Suurimpana näistä oli syksyllä 2021 järjestetty Syysseminaari, joka keräsi alan toimijat yhteen kertomaan vuoden tapahtumista.

Teksti: Jussi Peltonen

Tuomas Rantala toimi vuosikokouksen puheenjohtajana. Sääntömääräisinä asioina käsiteltiin seuran toimintakeromus ja tilinpäätös vuodelta 2021 sekä toimintasuunnitelma ja talousarvio vuodelle 2022. Seuran jäsenmaksut pysyvät vuoden 2021 malliin alennettuna, kunnes seuralle kertynyttä taloudellista ylijäämää saadaan kulutettua pois. Vuoden 2022 keskeisimpinä jäsentapahtumina tulevat olemaan SYP2022 marraskuussa sekä kesäksi suunnitteilla oleva jäsentapahtuma.

Johtokunnan kokoonpano vaihtui varapuheenjohtaja Lauri Rintalan (TVO) ja jäsen Simo Saarisen (Patria) sääntömääräisten toimikausien päättyessä. Uusina jäseninä johtokuntaan liittyvät Elina Syrjälähti (TVO) ja Antti Snicker (Aalto). Seuran puheenjohtaja Markus Airila (VTT) ja sihteeri Jussi Peltonen (VTT) jatkavat toiselle kaudelleen, kuten myös johtokunnan




FM Jussi Peltonen

Tutkija, ATS:n johtokunnan sihteeri
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
sihteeri@ats-fns.fi

jäsenet Olli Nevander (Rosatom) ja Tuomo Huttunen (Fennovoima). Kolmannen kautensa aloittavat rahastonhoitaja Maria Lindholm (Fortum) ja varapuheenjohtajan roolissa aloittava Ana Jambrina (VTT).

Vuosikokouksen keskeisimpänä puheenaiheena oli Venäjän Ukrainassa aloittama sota. Johtokunnalle oli toimitettu tästä lausuntoesitys, jonka seuran puheenjohtaja esitteli. Esityksen ja siihen yleisöltä saatujen kommenttien myötä ATS:n verkkosivuille julkaistiin seuran virallinen lausunto. ATS tuomitsee Venäjän toimet Ukrainassa ja lopettaa kaiken yhteydenpidon Venäjän ja Valko-Venäjän valtiollisten ydintekniikan yhteisöjen kanssa.

Erkki Laurila -palkinto ATS Ydintekniikka -lehden menneen vuoden parhaasta artikkelista annettiin Taina Kurki-Suonion kirjoitukselle 'Kilpajuoksu kohti fuusiotuottoa käynnistynyt – kilpailijoilla eri matkat ja tavoiteajat', ATS Ydintekniikka 1/2021. Artikkelin tarjoaa lukijalleen erinomaisen kuvan fuusioteknologian ajankohtaisiin hankkeisiin, toimijoihin ja haasteisiin. Taina Kurki-Suonio liittyi Zoomin välityksellä vuosikokoukseen ottamaan vastaan Erkki Laurila -palkinnon kiittäen johtokuntaa ja seuraa.

Sääntömääräisten asioiden läpikäynnin jälkeen Ilkka Mikkola piti esitelmän "Uranium Adventures: Kertomuksia kansainvälisen ydinpoltoainekaupan unohtumattomista henkilöistä ja tapahtumista". Esitelmässä Mikkola palasi vuosikymmenten varrella kerättyjen kuvien kautta lukuisiin kokouksiin ja henkilöihin ympäri maailmaa. Kuvat heijastivat hyvin ydinteollisuuden globaalia kehitystä 1980- ja 1990-luvuilla. 



Elina Syrjälähti

Aloitin teknillisen fysiikan opinnot Otaniemessä 1995. Ydinenergia-alalle päädyin pienen aurinkoenergiatutkimuksen parissa tehdyn mutkan jälkeen vuonna 1999 aloittaessani kesäharjoittelijana VTT:n reaktorianalysiryhmässä. Kesätyö jatkui ensin erikoistyön ja sitten diplomityön parissa. Diplominsinööriksi valmistuin vuonna 2001.

Reaktoridynamiikan, transienttialyyysien ja hieman polttoainemallinnuksenkin parissa VTT:llä vierähti melkein parikymmentä vuotta. Tänä aikana pääsin mallintamaan kaikkia Suomessa käytössä olevia ja myös suunnitteilla olleita reaktorityyppejä – ja siinä sivussa perehtymään vanhojen Fortran-koodien sielunelämään.

Vuonna 2019 aloitin työt TVO:n polttoaineyksikössä reaktoridynamiikka-asiantuntijana. TVO:lla olen päässyt työskentelemään kaikkien kolmen yksikön parissa, ja onkin ollut motivoivaa päästä työskentelemään askeleen lähempänä toimivia reaktoreita - ainakin kuvainnollisesti, sillä oma työpöytä on toki yhä pääkaupunkiseudulla.

Toimin VTT:n ATS YG-yhteyshenkilönä vuosituhannen alussa, mutta sen jälkeen on vierähtänyt pitkä aika seuran rivijäsenenä. Viime syksynä lupauduin ensin SYP2022-järjestelytoimikuntaan, ja annettuani sitä kautta taas pikkusormen seuran toiminnalle päädyin tänä keväänä johtokuntaan.



Antti Snicker

Lukiosta vapautuessani heitin kolikolla, tulisiko minusta fyysikko vai lääkäri. Päädyin valitsemaan Otaniemen tulevaisuudeksi kodikseni ja niinpä valmisuuten teknillisen fysiikan opinnoistani diplomi-insinööriksi 2010. Sen jälkeen oli luonnollista jatkaa opintoja suoraan kohti väitöskirjaa.

Jo diplomityön aikana olin tutkinut fuusiota ja erityisesti nopeiden hiukkasten roolia fuusiossa ja tähän myös väitöskirjatyöni tähtäsi. Lopulta vuonna 2014 sitten väittelin tekniikan tohtoriksi kyseisestä aiheesta. Tämän jälkeen työni jatkui käytännössä samojen asioiden parissa mutta eri maassa: tein reilun kahden vuoden post-doc-pestin Saksassa Max Planck -instituutissa.

Olen syntynyt Nurmeksessa ja sydämeltäni aina halunnut muuttaa kohti pohjoista. Tässä olen toistaiseksi surkeasti epäonnistunut (Nurmes-Kuopio-Espoo-München). Nyt lopulta pääsin ottamaan askeleen pohjoiseen muuttaessani takaisin Espooseen ja aloittaessani työt uudestaan Aalto-yliopistossa ensin post-doc-tutkijana ja nykyisin akatemiaturkijana. ATS:n jäsen olen ollut vasta verrattain lyhyen aikaa ja tutustunkin vielä toimintaan (vaikkakin johtokunnan kautta). Teen edelleen töitä fuusion parissa ja vapaa-aikani käytän pääasiassa urheilun ja perheen parissa.



Suomen loppusijoitus ja Posiva vahvasti esillä Paasitornin ICGR-konferenssissa

Teksti: Pasi Tuohimaa **Kuvat:** Tapani Karjanlahti

POSIVAN KIVENKOVA OSAAMINEN oli vahvasti esillä OECD:n ydinvoimaosaston NEA:n järjestämässä käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitukseen liittyvässä ICGR-konferenssissa 4.–8. huhtikuuta Helsingissä. Posivalaisista paikalla Paasitornissa järjestetyssä tapahtumassa olivat puhumassa toimitusjohtaja Janne Mokka ja kehitysjohtaja Tiina Jalonen.

Mokka päivitti osallistujille Posivan loppusijoitusprojektin nykytilanteen ja painotti, että yhtiöllä on osaamista ja valmiutta auttaa myös muita maita näiden omissa loppusijoitusohjelmassaan tytäryhtiönsä Posiva Solutionsin kautta. Jalonen piti esityksen siitä, miten Posivan tekninen valmius on edennyt askel askeleelta siten, että projektin pitkäaikaisturvallisuus on

voitu varmistaa siihen pisteeseen, että yhtiö saattoi jättää loppusijoituslaitoksen käyttöluopahakemuksen työ- ja elinkeinoministeriölle joulukuussa 2021.

Järjestyksessä kuudes ICGR-konferenssi (International Conference on Geological Repositories) sisälsi myös vierailun Olkiluotoon. Vieraat pääsivät Vierailukeskuksen lisäksi tutustumaan matala- ja keskiaktiivisen voimalaitosten loppusijoitusluolastoon sekä siellä olevaan maanalaiseen ONKALO-näyttelyyn.

ICGR-konferenssi oli kohdistettu kaikille geologiseen loppusijoitukseen liittyville kohderyhmille. Näitä ovat radioaktiivisen jätteen kanssa tekemisissä olevat insinöörit ja tutkijat, alan yhtiöt, tutkimusorganisaatiot, viranomaiset, päättäjät, asiasta vastaavat ministeriöt, ympäristöjärjestöt ja suuri yleisö. Paikalla Paasitornissa oli myös runsaasti yliopisto-opiskelijoita sekä nuoria ammattilaisia eli alalla alle viisi vuotta työskennelleitä tai alle 30-vuotiaita.

Konferenssin järjestivät NEA ja Suomen työ- ja elinkeinoministeriö yhdessä FinNuclear-yhdistyksen kanssa. Konferenssia olivat organisoimassa myös YK:n alainen Kansainvälinen atomienergiajärjestö IAEA, Euroopan unionin komissio sekä käytetyn ydinjätteen turvallista loppusijoitusta edistävä järjestö EDRAM (International Association for Environmentally Safe Disposal of Radioactive Materials). Ohjelmakomiteassa oli mukana alan viranomaisia ja yhtiöitä eri puolilta maailmaa, muun muassa Säteilyturvakeskus.



Pasi Tuohimaa
Viestintäpäällikkö
Posiva Oy
pasi.tuohimaa@tvo.fi

Nuclear Energy Ecosystems – Open Business Day 2022

Nuclear Energy Ecosystems -seminaari 3.–4.5.2022 kokosi laajasti ydinenergia-alan asiantuntijoita pienreaktorien, fuusion ja käytöstäpoiston teemojen alla. Tilaisuudessa kuultiin tunnettuja kotimaisia ja ulkomaisia puhujia ja käytiin mielenkiintoisia keskusteluja sekä suunniteltiin tulevaa yhteistyötä.

Teksti: Antti Hakola, Silja Häkkinen, Olli Soppela

NUCLEAR ENERGY ECOSYSTEMS – Open Business Day 2022 oli laaja ydinenergia-alan seminaari ja verkostoitumistilaisuus. Seminaari järjestettiin Helsingissä Paasitornissa toukokuun alussa 3.–4.5. Paria puhujaa lukuun ottamatta osallistuminen oli mahdollista vain tulella pai-

kan päälle. Tilaisuudessa haluttiin painottaa verkostoitumista ja tehokasta kanssakäymistä kahden vuoden tauon ja lukemattomien Teams-palaverien jälkeen.

Tilaisuuteen osallistui kahden päivän aikana 170 ydinenergia-alan toimijaa eri puolilta Suomea sekä Britanniaista, Espanjasta, Puo-

lasta, Ranskasta, Ruotsista, Saksasta, Sveitsistä, Tanskasta, Tšekin ja Yhdysvalloista. Yli puolet osallistujista oli yrityksistä.

Kaksipäiväisen tilaisuuden ensimmäisenä päivänä kuultiin esityksiä ydinenergia-alan ajankohtaisista asioista ja näkymistä eurooppalaisella tasolla sekä kaupallisista mahdollisuuksista. Toisena päivänä jakauduttiin rinnakkaisilaisuuksiin, aihepiireihin fuusio, käytöstäpoisto ja pienreaktorit. Iltapäivällä 4.5. pidettiin vielä viimeinen yhteinen tilaisuus.

Tilaisuuden järjestivät VTT:n ja FinNuclearin Business Finland -rahoitteiset projektit dEComm, EcoSMR, ECO-Fusion ja FINUELS. Lisäksi erityisesti fuusioaiheisen ohjelmaosuuden suunnittelussa oli vahvasti mukana FinnFusion-konsortio, johon VTT:n ja ECO-Fusionin lisäksi kuuluvat kaikki Suomessa fuusiotutkimusta tekevät yliopistot (Aalto-yliopisto, Helsingin yliopisto, Tampereen yliopisto, Åbo Akademi ja LUT-yliopisto), CSC sekä lukuisat yritykset.

Seminaarin ensimmäinen päivä

Ensimmäisen päivän aikana kaikki seminaarivieraat osallistuivat yhteiseen esitystilaisuuteen Paasitornin Sirkus-salissa, jossa teollisuuden, tutkimuksen ja julkishallinnon edustajat esittelivät alojensa tuoreimpia yhteenvetoja. VTT:n Erika Holtin avattua tilaisuuden Jussi Manninen ja Tommi Nyman esittelivät VTT:n ydinenergia-palveluita. Alivaltiosihteeri Petri Peltonen painotti esityksessään pitkäjänteisen ja monialaisen energia- ja teollisuuspolitiikan tärkeyttä.

Business Finlandin edustaja Anssi Paalanen esitteli julkisen rahoituksen mahdollisuuksia tutkimuksen ja teollisuuden yhteistyöhön. FinNuclearin Megumi Asano-Ulmonen esitteli Industrial Liaison Officer (ILO) toiminnan sisältöä Suomessa. Aloitussession päätti Netta Skön Rambollilta esittelemällä EU:n taksonomian kehitystä sekä vaikutuksia ydinvoima-alaan.



TkT Antti Hakola

ECO-Fusion hankkeen projektipäällikkö
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
antti.hakola@vtt.fi



TkT Silja Häkkinen

EcoSMR-hankkeen projektipäällikkö
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
silja.hakkinen@vtt.fi



DI Olli Soppela

dEComm-hankkeen varaprojektipäällikkö
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
olli.soppela@vtt.fi



Fortumin Petra Lundström kertoi Fortumin määrittelevän parhaillaan strategiaansa pienreaktorien ympärillä ja haastoi kuulijoita tuomaan esiin omia ehdotuksiaan Fortumin tulevasta fokuksista.

Vilkkaiden keskusteluiden siivittämän lounastauon jälkeen ohjelma jatkui Key Speakers-ohjelmanumerolla. EUROfusion -ohjelmajohdaja Tony Donné esitteli eurooppalaisen fuusiotutkimuksen rakenteita ja kapasiteettia. EDF:n NUWARD-ohjelman Sandro Baldi esitteli eurooppalaisen SMR-konseptin yhteistuotannon mahdollisuuksia. Fortumin Petra Lundström

esitteli Fortumin strategisia päätöksiä ydinvoiman suhtautumisen osalta.

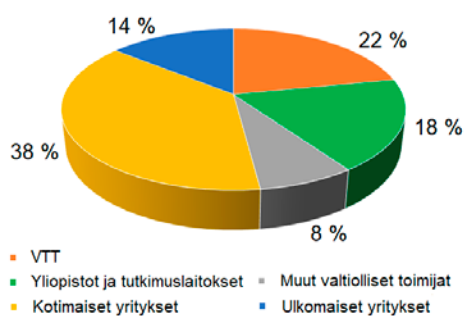
Ensimmäisen päivän kolmannessa osiossa käytiin läpi kehittyvien energiamarkkinoiden mahdollisuuksia ydintekniikan asiantuntijoille. Ana Belen Cerro Gordo CDTI:stä esitteli eurooppalaisen "Big Science"-kentän rakennetta ja yhteistyömahdollisuuksia. ITERin johtoryhmän Tim Luce päivitti yleisölle projektin rakennusvaiheen etenemistä sekä tulevia vaiheita.

Rolls Roycen Sophie Macfarlane-Smith sekä GE Hitachin Fredrik Vitabäck esittelivät pienreaktorikonseptiaan sekä energiamarkkinoiden kehitystä Euroopassa. Ensimmäisen päivän esitykset päätti Framatomien Hauke Grages, joka esitteli käytöstäpoiston kehittyviä markkinoita Euroopassa.

Paasitorin Sirkus-sali täyttyi ensimmäisenä päivänä ääriään myöten (kuva: Tiina Apilo, VTT).

Esitysten jälkeen seminaarivieraat siirtyivät posterinäyttelyyn, jossa 24 ydintekniikan alan teollista ja tutkimuksellista esittelyä herättivät mielenkiintoa ja keskustelua. Tapahtuman aikana Sirkus-salin aulasta löytyi myös esittelypöytiä FinnFusionin, Suomen Atomiteknillisen Seuran, Fortumin sekä EcoSMR-organisaatioiden toiminnasta. FinnFusion jakeli tapahtumassa tuoretta, juuri painosta tullutta vuosikirjaansa. ATS tiedotti syksyn Suomalaisen Ydintekniikan Päivät (SYP) tapahtuman esitys- ja tukimahdollisuuksista, Fortum esitteli radioaktiivisen jätteen huoltoratkaisuun ja EcoSMR ylläpiti Future Table -konseptia, jossa kerättiin seminaariosallistujien projekti-ideoita ja kiinnostuksen kohteita jatkossa tapahtuvaa yhteistyötä varten.

Ensimmäisen päivän ohjelman päätteeksi seminaarivieraat siirtyivät Paasitorin ravintolaan kolme tuntia kestäneelle illalliselle. Illallisen aikana jaettiin ensimmäisen päivän "Inspiroivin puhuja"-palkinto, joka tiukan yleisöäänestyksen jälkeen päättyi Fortumin Petra Lundströmille. Illallisen aikana seminaariosallistujat tutustuivat paremmin toisiinsa ja keskustelivat tulevista yhteistyömahdollisuuksista alalla. Valtaosa seminaariesityksiin osallistujista oli paikalla myös illallistapahtumassa.



Ekosysteemiseminaarin osallistujien jakautuminen organisaatiotyyppittäin (kuva: Silja Häkkinen, VTT).



EcoSMR-projektipäällikkö ojensi "Inspiroivin puhuja"-palkinnon illallistilaisuudessa. Fortumin Antti Rantakaulio vastaanotti palkinnon Petra Lundströmin puolesta (kuva: Seppo Hillberg, VTT).

Rinnakkaiset tilaisuudet

Toisena seminaaripäivänä jakaannuttiin rinnakkaisiin kokouksiin fuusion, käytöstäpoiston ja pienreaktorien aihepiireissä.

Fuusio

Fuusiosessio oli omistettu FinnFusion-konsortion vuosikokoukselle ja tämän seurauksena luvassa olikin monipuolinen katsaus suomalaisen fuusiotutkimuksen tärkeimmistä saavutuksista. Edellinen vuosikokous oli järjestetty ennen koronapandemian alkamista vuonna 2018 ja tuohon verrattuna toimintaympäristössä sekä tutkimusaiheiden kirjossa oli tapahtunut paljon muutoksia.

Aamu alkoi yhteiseurooppalaista fuusiotutkimusta koordinoivan EUROfusion-konsortion ohjelmajohtajan Tony Donnen pitämällä esityksellä fuusioalan tärkeimmistä saavutuksista ja tavoitteista Horizon Europe -puiteohjelmakauden aikana. JET-tokamakissa saavutettu fuusioenergiatuoton maailmanennätys 59 MJ eli suurin piirtein vesitynnyrin kiehauttamiseen vaadittava energia tuotiin vahvasti esille, minkä lisäksi esityksessä kerrottiin DEMO-reaktorin suunnittelun vaatimuksista sekä DEMOn tarjoamista mahdollisuuksista tutkijoille ja teollisuudelle.

Loppuosa aamupäivästä oli omistettu ECO-Fusion-projektin esittelylle. ECO-Fusion co-innovation-kumppaniyritykset kertoivat omista hankkeistaan ja VTT puolestaan omista aktiviteeteistaan, joissa ennen kaikkea edistetään fuusioekosysteemin muodostumista ja autetaan mukana olevia yrityksiä integroitumaan entistä paremmin eurooppalaiseen fuusioverkostoon ja saamaan siitä hyötyä omalle liiketoiminnalleen.

Fuusioesityksissä tuli hyvin esille, että bisnesmahdollisuudet ovat olemassa tässä ja nyt – jos tutkijat ja yritykset jäävät odottamaan ITER- ja DEMO-reaktorien valmistumista, ollaan auttamattomasti myöhässä.

Kahvituksen jälkeen painopiste siirtyi FinnFusionin alla pyöriviin laajoihin hankekokonaisuuksiin, joissa EUROfusionin rooli on merkittävä. Näistä ylivoimaisesti suurin on suurteholaskentaan ja tekoälyn sekä koneop-



Ryhmätöitä pienreaktoriaiheisessa työpajassa (kuva: Seppo Hillberg, VTT).

pimisen menetelmien hyödyntämiseen keskitetty Advanced Computing Hub, jossa vetovuossa on Helsingin Yliopisto. Hubi on lähtenyt hyvin käyntiin ja sen puitteissa kehitettävistä uusista menetelmistä on odotettavissa hyötyä myös muilla aloilla, joissa tuskailaan suurten datamäärien kanssa. Hubin lisäksi esityksiä pidettiin uudentyypisten anturien kehittämisprojektista staattisten magneettikenttien mittaamiseksi sekä FinnFusionin osallistumisesta DEMO-reaktorin etähallintajärjestelmien suunnitteluun sekä koko etähallinta ja -opeointistrategian muotoilemiseen.

Iltapäivän esitykset linkittyivät FinnFusionin uusiin avauksiin viimeksi kuluneen vuoden aikana sekä toisaalta eri yliopistojen opiskelijoiden tutkimusprojekteihin. Näistä voidaan nostaa esille erityisesti paloturvallisuussimulaatiot DEMO-laitosta varten sekä VTT:n hot cell -tilojen (kuumakammioiden) hyödyntäminen fuusionäytteiden tutkimuksessa.

Vuosikokous osoitti, että aktiviteetteja on paljon käynnissä kuten myös yhteistyötä eri FinnFusionin osapuolten välillä. Uusia ideoita tuli myös esille runsaasti ja näitä aiotaan käyttää jatkossa hyödyksi uusien tutkimushankkeiden käynnistämiseksi.

Käytöstäpoisto

Käytöstäpoistoa käsittelevässä kokoontumisessa käytiin läpi Business Finlandin rahoittaman dECOMm-projektin tuloksia Otaniemen FiR 1 -tutkimusreaktorin purkuun liittyen. Käytöstäpoiston erikoissovelluksia tarjoavat yritykset esittelivät ydinvoimaloiden purkuun erikoistuneita tuotteita ja palveluitaan.

dECOMm-projektipäällikkö Markus Airila sekä Tatu Harviainen VTT:ltä esittelivät FiR 1

-tutkimusreaktorin purkamisen aikana kehitettyjä työmenetelmiä tilojen robottiavusteiseen digitaaliseen kartoitukseen ja säteilymallinnukseen liittyen. Timo Palomäki TVONS:sta esitteli organisaationsa matala- ja keskiaktiivisen jätteen varastointiratkaisuja. Fortumin Martin Lerche esitteli NURES®-suodatusmenetelmää radioaktiivisten nestejätteiden käsittelyä varten.

SWECOn Katja Sipilä esitteli myös FiR 1 -purun yhteydessä käytettyä Building Information Modeling (BIM) -työmenetelmää. Framatomen Hauke Grages valotti jätesäiliöiden QUANTOM®-skannaus- ja analysointimenetelmän kehitystä, jolla pyritään kartoittamaan jäteastioiden sisältö tarkasti ilman mekaanisia työvaiheita. Altum Technologiesin Markus Eklund piti lyhyen puheenvuoron yhtiön ultraääniratkaisuihin putkien huoltoa ja ylläpitoa koskien. Olli Soppela VTT:ltä esitteli lyhyesti käytöstäpoiston markkinoiden kehitysnäkymiä. Kokouksen lopuksi jäsenet koostivat lyhyen yhteenvedon päivän päätteeksi käytävään yhteisistuntoon.

Pienreaktorit

Pienreaktoriaiheisen kokouksen teemanäkökulmana oli työpaja pienreaktoreiden käyttöönottoon liittyen. Ensimmäiset puhujat – Fredrik Vitabäck, GE Hitachi Nuclear Energy ja Jaakko Leppänen, VTT – esittelivät esimerkkitaapaukset sähköntuotantoon suunnitellusta pienreaktorista BWRX-300 (Vitabäck) ja puhtaasti lämmöntuotantoon tarkoitettua reaktorista LDR-50 (Leppänen). Pääviesteinä ensimmäisistä esityksistä nousi esiin vaatimus pienreaktoreiden kilpailukykyä vapaille energiamarkkinoilla, mihin BWRX-300 pyrkii vastaamaan, sekä tarve puhtaille lämmöntuotannon menetelmille Suomen ja Euroopan kaukolämpöverkkojen mittakaavassa, minkä LDR-50 pyrkii ratkaisemaan.

Juha Poikola TVO:sta kertoi, että OL3-projektin valmistuessa TVO on valmis katsomaan tulevaisuuteen ja määrittämään strategiansa pienreaktoreiden suhteen.

Esimerkkitaapauksen jälkeen jatkettiin nostamalla esiin pienreaktoreiden käyttöönottoon liittyviä haasteita. Juhani Hyvärinen Lappeenrannan-Lahden teknillisestä yliopistosta esitteli pienreaktoreihin liittyviä haasteita yleisesti, TVO:n Juha Poikola kertoi haasteista voimayhtiön näkökulmasta ja Debbie Francis, NUWARDTM-EDF esitteli kansainvälisen näkökulman aiheeseen. Hyvärinen esitti listan haasteita, joista tarve, yhteiskunnallinen hy-



Keskustelu seminaarivieraiden välillä kävi vilkkaana taukojen aikana (kuva: Seppo Hillberg, VTT).

väksyttävyys ja teknologian saatavuus todettiin jo pitkälti toteutuvan. Tutkimusten mukaan myös pienreaktoreiden taloudellinen kilpailukyky on hyvällä mallilla.

Juha Poikola kertoi, että OL3-projektin nyt päästessä maaliin TVO on valmis määrittämään strategiansa pienreaktoreiden suhteen. Puhtaan energian tarve on suuri, Olkiluodossa on paljon tilaa uusille reaktoreille ja pienreaktorit ovat TVO:n sisällä esillä. Kaikki puhujat nostivat suurimmiksi haasteiksi lisensoitavuuden ja toimitusvarmuuden erityisesti ensimmäisen reaktorin (first of a kind, FOAK) kohdalla.

Erityisesti lisensoinnin kohdalla Hyvärinen haastoi alan toimijoita osallistumaan aktiivisesti meneillään olevaan lainsäädännön uudistusprosessiin. Debbie Francis korosti myös kansainvälisen yhteistyön merkitystä lisensointiasioissa. NUWARD-konsortiossa onkin polkaistu käyntiin kansainvälistä yhteistyötä aihepiirissä. Tällä hetkellä yhteistyössä mukana ovat ydinturvallisuusviranomaiset STUK (Suomi), ASN (Ranska) ja SÚJB (Tšekki).

Iltapäivällä Sophie Macfarlane-Smith, Rolls Royce, kertoi alihankintaketjujen rakentamisesta pienreaktoreiden ympärille. Aaron



Posterinäyttelyn 24 esittelyä tarjosivat kävijöille tilannekatsauksen tuoreimman tutkimuksen ja palvelutarjonnan tilasta (kuva: Seppo Hillberg, VTT).



Käytöstäpoiston kokoontumisessa oli edustettuna yhteensä 14 alalla toimivaa organisaatiota (kuva: Olli Soppela, VTT).

Held Yhdysvaltain suurlähetystöstä kertoi Yhdysvaltojen julkisen ja yksityisen sektorin kumppanuusohjelmasta (public private partnership, PPP) ja Antti Rantakaulio Fortumista kertoi EU:n pienreaktori-yhteistyöstä.

Rolls Roycen UK SMR on suunniteltu siten, että koko laitos, ei vain reaktorikomponentit, modularisoidaan ja toteutetaan mahdollisimman pitkälti tehdasvalmisteisesti. Alihankkijoita varten kirjoitetaan erilliset komponenttikohtaiset selkeät ohjeet valmistukseen liittyvistä vaatimuksista. Aaron Held ja Antti Rantakaulio korostivat yhteistyön merkitystä erilaisten yhteistyöverkostojen kautta.

Päivän aikana tehtiin myös ryhmätyötä SWOT-teemalla. Ryhmätyön tarkoitus oli tunnistaa pienreaktorien käyttöönottoon liittyvät tärkeimmät vahvuudet, heikkoudet, mahdol-

lisuudet ja uhat. Tärkeimmät johtopäätökset ryhmätyöstä on koottu oheiseen laatikkoon.

Yhteenveto ja jatkotoimet

Seminaarin lopussa kokoonnuttiin vielä viimeiseen yhteiseen tilaisuuteen. Tilaisuuden aluksi kuultiin lyhyt yhteenveto ensimmäisenä päivänä puhutuista asioista sekä hieman kattavammat yhteenvetot toisen päivän rinnakkais-tilaisuuksista. Tässä tilaisuudessa kaikille osallistuneille organisaatioille annettiin myös mahdollisuus pitää lyhyet yhden minuutin myyntipuheet oman organisaationsa työstä käsitellyissä aihepiireissä fuusio, käytöstäpoisto ja pienreaktorit. VTT piti puheen jokaisesta aihepiiristä erikseen, minkä lisäksi useat yritykset kuten Comatec,

FinNuclear, Fortum, Framatome, Nipromec Oy, Plansor Oy, Platom Oy ja Quanscient Oy sekä uusi Business Finland -projekti ja yksi työnhakija pitivät omat puheensa.

Seminaarissa toteutettiin erilaisia mielipidekyselyjä mobiilisovelluksen avulla. Kyselyistä kävi ilmi muun muassa se, että osallistujat pitävät ydinenergiaa erittäin tärkeänä osana Euroopan energiaomavaraisuuden takaamisessa ja suhtautuvat myös optimistisesti uuden ydinvoiman rakentamiseen lähitulevaisuudessa.

Tilaisuuden aihepiireissä jatketaan kesäkuussa seurantakokousten merkeissä. Seurantakokousten aiheet ja aikataulu on esitetty oheisessa laatikossa. Kokouksiin pääsee ilmoittautumaan Ekosysteemi-seminaarin sivuilla www.openbusinessday.fi. Sivujen alta löytyvät myös kalvot tilaisuudessa esitetyistä esityksistä sekä osa postereista. Yleisesti ottaen seminaari onnistui erittäin hyvin ja sai osallistujilta hyvin positiivista palautetta. 🌟

Vahvuudet ja mahdollisuudet

- Vähähiilisyys, resurssien tehokas käyttö
- Kustannustehokkuus
- Olemassa olevan infrastruktuurin käyttö
- Teknologinen kehitys

Uhat ja heikkoudet

- Lisensointi ja regulaatio
- Liian myöhäinen ja kallis käyttöönotto
- Jätteiden käsittely
- Tuotantolinjan epäkypsyys

Aika

6.6. klo 14–16

10.6. klo 14–16

13.6. klo 13–15

14.6. ko 14–16

Aihe

Muutokset energiamarkkinoilla

SMR hubi

Robotiikkatyöpaja

LDR-50

OL3-turbiini käyttövalmiina.



Olkiluoto 3:n käynnistys

Vuosi oli 2000, kun tehtiin päätös uuden ydinvoimalaitosyksikön tarpeesta Suomessa. Tuohon aikaan hanketta perusteltiin ilmaston, Suomen sähköntuotannon omavaraisuuden ja vakaan hinnan perusteella. Nyt reilu 20 vuotta myöhemmin Olkiluoto 3 on siinä vaiheessa, että se tuottaa sähköä. Kahdenkymmenen vuoden takaisen päätöksen perusteet ovat edelleen voimassa, ja jopa vahvistuneet.

Teksti: Mika Hassinen, Tuomas Rantala **Kuvat:** Tapani Karjanlahti



DI Mika Hassinen
Kehitysinsinööri
Teollisuuden Voima Oyj
mika.hassinen@tvo.fi



DI Tuomas Rantala
Yksikköpäällikkö
Teollisuuden Voima Oyj
tuomas.rantala@tvo.fi

OLKILUOTO 3 -PROJEKTISSA on päästy vaiheeseen, jossa reaktori on käynnistetty ja laitos on tahdistettu valtakunnan verkkoon. Reaktorin kriittiseksi tekemisen jälkeen on siirrytty niin sanottuun ydintekniiseen käyttöönottovaiheeseen, jossa sekä reaktoria että laitosta testataan monipuolisesti kokonaisuutena ennen kaupallisen käytön aloittamista. Tässä artikkelissa kerrataan lyhyesti, miten tähän pisteeseen on päästy, ja keskitytään meneillä olevaan ydinkoekäyttövaiheeseen.

Projektin alkuvaiheet

Suomen viidennen ydinvoimalaitosyksikön hankintaa valmisteltiin jo 1990-luvun lopulla, mutta hanke todella lähti liikkeelle vuonna 2000, jolloin jätettiin periaatepäätöshakemus valtioneuvostolle viidennen ydinvoimalaitosyksikön rakentamisesta. Tuolloin puhuttiin vielä FIN5-hankkeesta, jolloin sekä yksikön sijoituspaikka että ydinvoimalaitostyyppi olivat vielä avoimia. Eduskunta hyväksyi periaatepäätöshakemuksen vuonna 2002, minkä jälkeen pyydettiin ja saatiin tarjoukset usealta eri laitostoimittajalta.

Tarjousvaihtoehtojen vertailujen tuloksesta päädyttiin solmimaan laitostoimitussopimus Framatomen ja Siemensin muodostaman yhteenliittymän kanssa EPR-tyyppisestä

painevesireaktorista loppuvuonna 2003. Sen jälkeen välittömästi käynnistyi rakentamislupahakemusaineiston laatiminen ja sen luvittaminen Säteilyturvakeskuksella. Valtioneuvosto myönsi hankkeelle rakentamisluvan Säteilyturvakeskuksen myönteisen turvallisuusarvion perusteella vuonna 2005, minkä myötä päästiin aloittamaan varsinaiset rakennustyöt.

Rakentamisvaiheen loppupuolella vuonna 2016 päästiin hakemaan käyttö lupaa, jonka valtioneuvosto myönsi Säteilyturvakeskuksen myönteisen lausunnon perusteella vuonna 2019. Tämän jälkeen tehtiin vielä viimeisiä testauksia ja töiden loppuun saattamisia, kunnes reaktorin latauslupa saatiin Säteilyturvakeskukselta vuonna 2021.

Olkiluoto 3:n käyttöönotto

Olkiluoto 3:n käyttöönotto on jaettu eri vaiheisiin, joista OL3-kielessä puhumme vaiheina A, B, C, D ja E. Laitoksen käyttöönoton ajatuksena on aloittaa laitoksen testaaminen yksittäisistä laitteista ja edetä kohti suurempien kokonaisuuksien testaamista.

Yksittäisten laitteiden testaus suoritetaan vaiheessa A, jonka jälkeen siirrytään järjestelmien testaamiseen ja siitä edelleen järjestelmäkokonaisuuksien testaamiseen vaiheessa B. Vaihe C, joka on ajallisesti kaikkein lyhin, käsittää polttoaineen latauksen ja ne järjestelmäkokeet, jotka edellyttävät polttoaineen paikalla oloa reaktorissa. Tässä vaiheessa reaktori ei kuitenkaan ole vielä kriittinen.

Reaktori tehdään kriittiseksi vaiheessa D, jossa suoritetaan myös laaja joukko reaktorisydämeen liittyviä testejä. Vaiheessa D laitosta päästään myös testaamaan ensimmäistä kertaa kunnolla kokonaisuutena, kun turbiinilaitokselle saadaan toimitettua riittävästi höyryä ja laitos tahdistettua valtakunnan verkkoon. Tästä vaiheesta käytetään myös nimitystä ydintekninen käyttöönotto ja tässä kohtaa voidaan sanoa myös laitos käynnistetyksi. Ydinteknisessä käyttöönotossa, eli vaiheessa D, laitoksen tehoa nostetaan askelittain ja se on jaettu eri tehotasojen mukaan alivaiheisiin D1 – D4.

Viimeisessä vaiheessa E laitos jo käytännössä tuottaa sähköä lähes tasaisella teholla ja sen aikana suoritetaan tietty joukko testejä, joilla osoitetaan sähköntuotantoon liittyvien vaatimusten täytyminen.

Vaihe D1 – ensimmäinen kriittisyys ja pientehokokeet

Vaiheessa D1 reaktori tehtiin ensimmäistä kertaa kriittiseksi. Reaktorin kriittiseksi tekeminen edellytti käynnistyslupa saamista Säteilyturvakeskukselta ja se saatiinkin mukavasti hieman ennen joulua 18.12.2021. Reaktorin kriittiseksi tekemisen lisäksi tässä vaiheessa oli lupa nostaa reaktorin tehoa 5%:iin asti.

Vaikka jokainen askel kohti tuotantoa ja jokainen suunniteltu testaus on merkittävä osa käyttöönottoa, uuden reaktorin ensimmäisen globaalin kriittisyyden saavuttamista

pidetään yleisesti suurena merkkipaaluna. Reaktori alkaa suorittaa perustehtävänsä eli ylläpitää ketjureaktiota koko sydämen alueella. Joulunalusviikolla koko ydinvoima-ala ympäri maailman pidatti hengitystään innostuneessa odotuksessa.

Kriittisyyttä kohti alettiin kulkea maanantaina 20.12. kello 10.04, kun primääripiirissä aloitettiin booripitoisuuden laimennus. Tässä vaiheessa säätösauvat olivat ulkona sydämetä lukuun ottamatta yhtä säätösauvaryhmää, joka jätettiin noin puoleen väliin sydäntä. Sydän haluttiin saada kriittiseksi säätösauvoja vetämällä, eikä laimentamalla, joten laimennus lopetettiin hyvissä ajoin ennen kriittisyyden saavuttamista. Tässä kohden tehtiin ensimmäinen sisäänjätetyn ryhmän ulosveto. Kun kriittisyyttä ei kuitenkaan saavutettu, ryhmä palautettiin sydämeen samaan asemaan ja laimennusta jatkettiin pienissä erissä.

Tätä sykliä toistettiin useita kertoja. Viidennen ulosvedon lopussa reaktori alkoi osoittaa lähestyvän kriittisyyden merkkejä, mikä sai valvomohenkilökunnan valpastumaan entisestään. Vielä oli kuitenkin odotettava yksi sykli. Säätösauvaryhmä palautettiin sydämeen vielä kerran ja laimennusta jatkettiin. Kuudennen ulosvedon aikana jo melko varhaisessa vaiheessa voitiin todeta reaktori globaaliksi kriittiseksi. Oli tiistai 21.12. kello 3.22.

Kriittisyys oli pieni askel koeohjelmassa, mutta suuri askel koko ydinvoima-alan tulevaisuuden näkymissä. Me pystyimme siihen ja tekin pystytte!

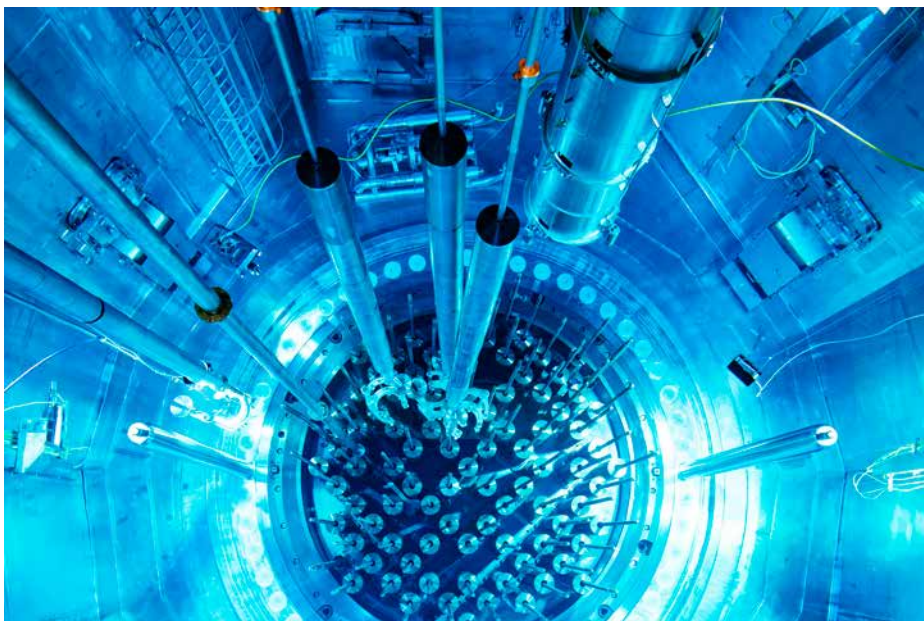
Kriittisyyden saavuttamisen jälkeen D1-vaihe jatkui tehon nostolla ydinlämmitysrajalle. Tällä haluttiin paitsi tarkastella dektektoireiden mitta-alueiden limitystä myös määrittellä koealue tulevia pientehokokeita varten. Pientehokokeita tehtiin useissa eri säätösauvakonfiguraatioissa.

Kokeet oli jaoteltavissa kolmeen päätyyppiin: kriittisen booripitoisuuden mittauksiin, isotermisen lämpötilakertoimen mittauksiin sekä säätösauvojen reaktiivisuusvaikutusten mittauksiin. Näiden mittausten tarkoituksena oli saada varmuus sydämen mallinnuksen toimivuudesta nollateholla sekä varmistaa, että sydän täyttää turvallisuusanalyysien oletukset.

Pientehokokeet jatkuivat tehon nostolla 5% tasolle. Tällä tehotasolla tehtiin ydininstrumentoinnin kalibrointi sekä ensimmäiset aeroball-mittaukset. D1-vaihe saatiin päätökseen vuoden alussa 3.1.2022.

TVO:n Klaus Frisk keskittyneenä työssään – OL3-reaktorin ensimmäinen lataaminen.





Vaihe D1 sujui kokonaisuudessaan ilman ongelmia ja laitoksen voitiin katsoa käyttäytyneen suunnitellusti. Reaktorifysikaalinen koe-ohjelma tuotti paljon hyviä käyttökokemuksia: reaktorisydämen fysikaalinen käytös vastasi laskettua asetettujen kriteereiden rajoissa. Säteilyturvakeskukselta saatiin lupa tehonnostolle 30 %:iin 4.1.2022.

Vaihe D2 – Reaktoritehon nosto 30 %:iin

Vaiheessa D2 reaktoritehoa nostettiin portaittain kohti 30 %:ia. Tehonnostoa tehtiin 5 %:n askelissa aina 25 %:n teholle asti, ja niiden välissä suoritettiin lukuisia määriä reaktorisydämeen liittyviä mittauksia. Vaiheen D2 merkittävimpana merkkipaaluna oli tietysti laitoksen tahdistus valtakunnan verkkoon, mitä ennen suoritettiin joukko primääripiirin pääparametreihin liittyvien säätöjen testauksia ja niiden virityksiä sekä turbiinin ja sen apujärjestelmien testauksia.

Ensimmäisen kerran tahdistusta yritettiin 29.1.2022, mutta siinä ei onnistuttu generaattorissa olleen virheellisen kytkennän seurauksena. Korjaavien toimenpiteiden ja tarvittavien testausten jälkeen laitos tahdistettiin valtakunnanverkkoon lauantaina 12.3.2022 klo 12:01. Tästä hetkestä alkaen laitos on tuottanut sähköä valtakunnan verkkoon käyttöönottoesteistä johtuen vaihtelevalla tehotasolla.

Vaiheen D2 ohjelmassa oli iso määrä 30 %:n reaktoriteholla suoritettavia transienttikokeita, joissa laitosta eräällä tavalla kiusattiin ja valmisteltiin korkeammilla reaktoritehoilla suoritettavia vastaavia kokeita varten. Näissä

transienttikokeissa oli tarkoituksena testata laitoksen kykyä selviytyä tietyistä laitoshäiriöistä ilman suojaustoimintojen puuttumista peliin, kuten muun muassa syöttöveden korkeapaine-esilämmittimien ohitus, lauhde- ja syöttövesipumppujen vaihto, turbiinin pikasulku ja generaattorin tehonpudotuskokeet. Kyseiset laitoshäiriöt ovat siinä mielessä merkittäviä ja mielenkiintoisia, että vaikka kyseessä on turbiinilaitoksen häiriö, niin niillä on vaikutus myös reaktorilaitoksen käyttäytymiseen.

Kokeita oli suoritettu ennalta useampaan kertaan laitossimulaattorilla, jossa pystyttiin näkemään ennalta laitoksen odotettu käyttäytyminen ja arvioimaan laitokseen kohdistuvat mahdolliset riskit. Lisäksi käyttövuorot pääsivät harjoittelemaan näitä laitostason transienttikokeita etukäteen. Kaikista näistä häiriöistä laitos kokonaisuutena suoriutui moitteetta.

Ydinturvallisuuden kannalta merkittäviä transienttikokeita olivat syötönvaihtokoe ja ulkoisen verkon menetyskoe. Syötönvaihtokokeessa avattiin katkaisijat 400 kV verkkoon, jolloin odotetusti saatiin reaktori- ja turbiinipikasulku. Syötönvaihtoautomatiikka käänsi laitoksen ulkoisen sähkönsyötön automaattisesti 110 kV verkon perään, jota kautta saatiin sähkö palautettua laitoksen sähkökuluttajille. Tätä koetta oli jo tehty useampaan kertaan käyttöönoton aikaisemmissa vaiheissa, mutta silti kokeen alkaessa oli aistittavissa jännitystä valvomossa. Kaikki meni kuitenkin niin kuin odotettiin ja päästiin heti seuraavaan kokeeseen.

Syötönvaihtokokeen jälkeen oli vuorossa ulkoisen sähkönsyötön menetyskoe. Koe käy-

Reaktorin lopullinen kokoaminen polttoaineen latauksen jälkeen.

tännössä tehtiin niin, että yhteys 400 kV valtakunnan verkkoon katkaistiin ja syötönvaihto 110 kV verkkoon estettiin, jolloin suojausautomaatio käynnisti laitoksen hätädieselit ja laitos jäi niiden varaan. Kun ulkoinen verkko menettettiin, käyttövuoro alkoi ajaa laitosta hallittuun tilaan hätätilanohjeella, jota todellisessakin tilanteessa tulnaisiin käyttämään. Koe eteni suunnitellusti ja tulokset siitä olivat hyväksyttäviä. Ulkoisen sähkönsyötön menetyskoe oli tämän vaiheen viimeinen koe ja se suoritettiin 25.3.2022.

Normaalikäytöllä syötönvaihto ja ulkoisen verkon menetys johtaisivat laitoksella valmiusorganisaation varautumistilanteen julistamiseen. Koska nyt oli kyseessä käyttöönottoon kuuluva suunniteltu koe, niin etukäteen oli päätetty olla julistamatta varautumistilannetta niin kauan, kuin kokeet etenisivät suunniteltua polkua pitkin. Kokeiden ajaksi TVO kuitenkin kohotti valmiutta mahdollista varautumistilannetta varten miehittämällä tarpeelliseksi katsotut valmiusorganisaation roolit etukäteen laaditun henkilöstöluettelon mukaisesti valmiusorganisaation tiloihin.

Vaikka vaihe D2 kokonaisuudessaan meni hyvin, ei ongelmiltakaan välttytty. Vaiheen aikana saatiin yhteensä kolme suunnittelematonta reaktoripikasulkuja. Ensimmäinen pikasulku saatiin höyrystimen korkeasta pinnasta, kun oltiin testaamassa höyrystimen matalaan pintaan liittyvää rajoitustoimintoa. Matalan pinnan rajoitustoiminnon lauetessa höyrystimen pinta lähti nousuun, eikä pinnan normaali säätö ja korkean pinnan rajoitustoiminnot ehtineet pysäyttämään sitä ennen reaktorin pikasulkurajaa.

Toinen pikasulku tapahtui, kun laitosta oltiin tahdistamassa valtakunnan verkkoon ensimmäistä kertaa. Generaattorin tehomittauksessa olleen virheellisen kytkennän johdosta turbiinisäätäjä ei saanut oikeaa tehotietoa generaattorilta. Tästä aiheutunut tapahtumaketju johti reaktoritehon kasvuun ja siitä aiheutuneeseen reaktoripikasulkuun korkeasta reaktoritehosta, joka oli tässä käyttöönottovaiheessa asetettu huomattavasti normaalia matalammalle.

Kolmas reaktoripikasulku saatiin korkeasta höyrynpaineesta, joka aiheutui lauhdejärjestelmän menetyksestä aiheutuneesta tapahtumaketjusta. Yhteenvetona edellä mainituista reaktoripikasuluista voidaan todeta, että kaikkien alkutapahtuma oli sekundääripuolella ja johtui jonkin säätimen virheellisestä tai puutteellisesta toiminnasta. Kaikissa pikasuluissa reaktorisaareke toimi suunnitellusti ja

heti pikasulkujen jälkeen laitos oli hallitussa tilassa, eli laitos selviytyi näistä tapahtumista erinomaisesti.

Vaihe D3 – Reaktoritehon nosto 80 %:iin

Vaihe D3 käsittää reaktoritehon noston vaiheittain 30 %:sta 80 %:iin ja sinä aikana tehtävät käyttöönototestit. Viranomaiskäsittelyn kannalta tämä vaihe poikkeaa siten, että tehonnostolupa Säteilyturvakeskukselta tarvitaan 60 %:n reaktoritehon kohdalla. Säteilyturvakeskukselta saatiin lupa nostaa reaktoritehoa 30 %:sta ylöspäin 30.3.2022, kun kaikki edellisen vaiheen koetulokset oli heidän kanssaan käsitelty ja todettu hyväksyttäviksi.

Reaktoritehoa nostettiin 10 %:n askelissa 60 %:iin ja jokaisessa välissä suoritettiin joukko mittauksia ja eri järjestelmien säätimien virittelyjä. Koeohjelmaan kuului myös joukko transienttikokeita, joista ensimmäinen tehtiin 40 %:n reaktoriteholla. Siinä testattiin laitoksen suoritustilanteessa, jossa yksi pääkiertopumppu pysähtyy. Tällaisessa tilanteessa höyrystimen pinnan asetusarvo tippuu automaattisesti askeleella tietyn verran alaspäin, minkä jälkeen asetusarvo laskee gradientilla tasolle, jossa pääkiertopumpun uudelleen käynnistys voidaan tehdä.

Koe oli juuri höyrystimien pintojen käyttäytymisen kannalta kiinnostava, koska pinnansäätimien kanssa oli aikaisemmissa vaiheissa haasteita. Höyrystimen todelliset pinnat seurasivat muuttuvaa asetusarvoa suunnitellusti, kuten myös muut laitoksen pääparametrit.

60 %:n reaktoriteholla suoritettiin turbiinin pikasulkukoe, jossa laitoksen käyttäytyminen 30 %:n reaktoriteholla suoritettuun vastaavaan kokeeseen poikkesi reaktoripuolen käyttäytymisen osalta. Turbiinipikasuorituksessa turbiiniventtiilin nopea sulkeutuminen johti päänhöyrin paineen nopeaan nousuun ja edelleen primääripiirin lämpötilan nousuun lämmönsiirron pienentyessä höyrystimissä. Primääripiirin lämpötilan korkeasta säätöpoikkeamasta rajoitusautomaatio laukaisi osittaisen pikasulun ja primääripiirin lämpötilasäädin säätö primääripiirin lämpötilan uuteen alemmaa reaktoritehoa vastaavaan asetusarvoon säätösauvojen avulla.

Turbiinipikasuorituksessa turbiiniventtiileiden sulkeutuminen aiheuttaa höyrystimien pintojen nopean laskun heti transientin alussa. Laitossimulaattorilla tehtyjen ajojen perusteella tiedettiin, että höyrystimen pinnansäätö reagoi voimakkaasti pinnan palauttamiseksi turbiinipikasuorituksessa. Koska höyrystimien pinnansäädöissä oli jo aiemmin ollut haasteita,

analysoitiin tämä koe vielä erikseen APROS-mallilla, jonka tulosten perusteella tiedettiin jo etukäteen pintojen saavuttavan korkean pinnan rajoitustoimintojen kynnyksirajan. Tämä toteutuikin testissä, mutta rajoitustoiminto ja normaali pinnan säätö palauttivat pinnat takaisin asetusarvoihinsa.

Turbiinin pikasulkukokeen jälkeen vuorossa oli reaktorin pikasulkukoe 60 %:n reaktoriteholla. Reaktoripikasulku laukaistiin käsin ja se onnistui suunnitellusti, eli kaikki säätösauvat menivät sisään sydämeen. Koeohjeen mukaisesti käyttövuoro alkoi suorittaa koeohjeen varten olevaa hätätilanneohjetta tilanteen normalisoimiseksi.

Hätäboorausjärjestelmä kuitenkin käynnistyi odottamattomasti kokeen aikana, mikä johti poistumiseen suunnitellulta koeohjeen polulta, ja käyttövuoro alkoi toimia ennalta sovittujen menettelyjen mukaisesti hätätilanneohjeiden mukaisesti. Hätäboorausjärjestelmän käynnistymisen syy saatiin selville erittäin nopeasti ja korjaavat toimenpiteet sekä raportointi ovat työn alla.

Reaktoripikasulkukokeen jälkeen havaittiin generaattorin jäähdytysjärjestelmässä korjaus- ja tarkastustarpeita. Tätä artikkelia kirjoitettaessa ollaan tilanteessa, jossa laitos on ajettu kylmään sammutustilaan kyseisiä töitä varten. Töiden valmistuttua päästään jatkamaan kesken jääneitä vaiheen D3 käyttöönototestejä, joista 60 %:n tehotasolla keskeisin on laitoksen siirtyminen omakäytölle. Kyseisessä kokeessa avataan laitoskatkaisijat 400 kV:n verkkoon, jolloin laitos jää omakäytölle ja saa sähkönsyöttönsä generaattorilta. Laitoksen pääprosessiparametrien käyttäytymisen transientissa on melko pitkälle samanlainen kuin turbiinipikasuorituksessa.

60 %:n reaktoriteholla suoritettujen kokeiden jälkeen tarvitaan jälleen Säteilyturvakeskuksen hyväksyntä tehonnostolle. Kun tämä on saatu, jatketaan reaktoritehon nostoa 80 %:iin. 65 %:n reaktoriteholla tehdään 65 % → 25 % → 65 % suuruinen tehonmuutosramppi, jonka yhteydessä katsotaan, että reaktorin ja primääripiirin säädöt toimivat suunnitellusti. Käynnissä olevien syöttö- ja lauhdepumppujen määrä riippuu laitoksen tehotasosta, joten tällä transientilla on iso vaikutus myös sekundääripiirin säätöjen toimintaan lauhde- ja syöttövesivirtausten muuttuessa.

80 %:n reaktoriteholla tehdään taas joukko laitostason transienttikokeita, jotka ovat samoja mitä tehtiin 30 %:n reaktoriteholla: syöttöveden korkeapaine-esilämmittimien ohitus, lauhde- ja syöttövesipumppujen vaihto, ja generaattorin tehonpuodotuskokeet.

Vaihe D4 – Reaktoritehon nosto 100 %:iin

Vaiheessa D4 reaktoriteho nostetaan 100 %:iin. 100 %:n teholla tehdään osittain samoja laitostason transienttikokeita, kuin aiemmin alhaisemmillä tehotasoilla. Sähköverkon kannalta kiinnostavana uutena kokeena tulee Fingridin johtama 400 kV:n verkon lähivikakoe, jossa 400 kV:n verkkoon tehdään lyhykestoinen 3-vaiheoikosulku, jota varten reaktoriteho lasketaan 60 %:iin. Tilanteessa generaattorin tulee pysyä tahdistuneena verkkoon ja palata sen jälkeen testiä edeltäneelle tehotasolle.

Vaiheessa D4 laitos myös ajetaan suunnitellusti alas kylmään sammutustilaan alarajo-ohjeiden mukaan, tarkoituksena osoittaa, että kylmään sammutustilaan päästään siihen vaaditussa ajassa. Vaiheen D4 päättää 24 tunnin suorituskykykoe.

Vaihe E – 30 vuorokauden osoitusajo

Ennen säännöllisen sähköntuotannon aloittamista suoritetaan vielä 30 vuorokauden osoitusajo. Tässä osoitetaan, että laitos saavuttaa sille asetetut tavoitteet niin käytön kuin tuotannon osalta ajamalla laitosta eri tehotasolla. Vaiheen E jälkeen siirrytään säännölliseen sähköntuotantoon.

Yhteenveto

Olkiluoto 3:n ydintekninen käyttöönotto on reilun puolen vuoden mittainen rupeama, jossa laitoksen järjestelmiä ja laitosta kokonaisuudessaan testataan ja haastetaan monipuolisesti. Tämän tavoitteena on varmentaa, että laitos suoriutuu sille asetetuista turvallisuustavoitteista ja tuotannollisista tavoitteista.

Ydintekninen käyttöönottovaihe on jaettu pienempiin alivaiheisiin eri tehotasojen mukaan, joissa aina seuraavaan vaiheeseen siirtyminen edellyttää edellisen vaiheen testitulosten hyväksyttävyyden arviointia. Jotta siirtyminen eri vaiheiden välillä tapahtuisi mahdollisimman jouhevasti, tarvitaan saatonta yhteistyötä laitostoimittajan, TVO:n ja Säteilyturvakeskuksen välillä.

Siirtyminen vaiheesta toiseen on edellyttänyt valtavaa määrää tulosaineistojen laatimista ja tarkastamista eri osapuolten kesken. Sujuvan käsittelyn varmentamiseksi TVO:n käyttöönotto on työskennellyt vuorossa siten, että aina yksi käyttöönottoinsinööri on istunut valvomossa samalla rytmillä kuin varsinainen käyttövuorokin. Näin valvomossa olevat käyttöönottoinsinöörit ovat pystyneet reaaliaikaisesti toteamaan tulosten hyväksyttävyyden.



Vuoropäällikkö Kimmo Kiuru antaa luvan polttoaineen lataukselle vuoropäällikkö Sami Reunasen varmistaessa.

Tämän lisäksi testien valvontaan ja tulosten käsittelyyn ovat osallistuneet myös muut TVO:n käyttöönotto-organisaation käyttöönottoinsinöörit kukin oman vastuualueensa mukaan. Tulokset on tullut myös hyväksyttävä Säteilyturvakeskuksella ennen seuraaviin vaiheisiin siirtymistä.


Säteilyturvakeskuksen toiminta ydinkoe-käyttövaiheen aikana on ollut luvanhaltijan näkökulmasta erinomaista, eli he ovat käsitelleet tulosaineistoja erittäin ripeällä tahdilla. Heidän käsittelyänsä on edesauttanut se, että Säteilyturvakeskuksen tarkastajat ovat osallistuneet aktiivisesti käyttöönottokeiden valvontaan laitoksella, minkä lisäksi testituloksia on käyty luvanhaltijan johdolla säännöllisesti läpi aina kokeiden tulosten valmistuttua.

On selvää, ettei piirustuslaudalla kyetä pois-sulkemaan kaikkia virheitä tai ennakoimaan kaikkia eri kombinaatioita laitoksen käyttäytymisessä. Tämän takia käyttöönottoa tehdään ja laitosta testataan sekä haastetaan näiden löytämiseksi. Käyttöönottokeita ajettiin ennakkoon laitos- ja suunnittelusimulaattoreilla koeohjeiden toimivuuden varmentamiseksi, riskien tunnistamiseksi, sekä laitoksen käyttäytymisen tutuksi tekemiseksi käyttö- ja käyttöönottohenkilöstölle.

HU-työkalujen käyttö on tärkeässä osassa käyttöönotto toimintaa. Kokeisiin osallistuvia eri kansallisuuden henkilöitä saattoi olla eri puolilla laitosta puhelinyhteyksien päässä, jolloin korostui selkeä kommunikointi eri osapuolten välillä kuten esimerkiksi varmennettu kommunikointi ja foneettisten aakkosten käyttö. Myös aloituskokouksiin kiinnitettiin erityistä huomiota: niissä käytiin kaikkien osallistujien kanssa läpi kokeen kannalta keskeiset asiat.

Käyttöönoton aikaisista tapahtumista eri organisaatiot ovat saaneet arvokasta lisäoppia laitoksesta ja sen toiminnasta. Lisäksi tapahtumista on saatu koeponnistettua organisaatioiden kyvykkyys tapahtumien selvittämiseksi viikonpäivästä tai kellonajasta riippumatta.

Kahdenkymmenen vuoden aikana laitos on synnytetty ja kasvatettu teini-ikäisen haasteiseen nuoreksi aikuiseksi, joka on pian valmiina itenäistymään ja lähtemään maailmalle, eli aloittamaan kaupallisen sähköntuotannon. Selvä on, että itenäistymisen alkuvaiheessa laitos tarvitsee vielä erityistä huomiota ja tukea, mutta niin se oli myös Olkiluodon 3:n vieressä olevien kahden nyt keski-ikäisen kohdalla heidän alkutaipaleellaan.

Projekti on vaatinut paljon työtunteja – yhteensä yli 70 miljoonaa henkilötyötuntia – isolta joukkoa ihmisiä, sekä ymmärrystä ja tukea heidän läheisiltään – suuret kiitokset heille kaikille tästä. Lisäksi on sanottava, että Olkiluoto 3:n valmistuminen ollut meille molemmille kirjoittajille myös henkilökohtaisesti pitkän työn ja odotuksen riemastuttava palkinto. Käyttöönotto kaikkine haasteineen ja onnistumisineen on tuottanut jopa pakahduttavaa iloa siitä, että tämä kaikki nyt toteutuu. Saamme olla mukana kantamassa hedelmää yhteisestä työstä puhtaamman energiantuotannon varmistamiseksi. Nyt meillä on uusi ydinvoimalaitoslaitos, jolla saamme itse tuotettua ilmastoystävällistä sähköä ennustettavaan hintaan. 

Loviisan käyttöiän pidentäminen

Loviisan voimalaitoksen nykyinen käyttöluva on voimassa vuosien 2027 ja 2030 loppuun asti. Voimalaitosjätteen loppusijoituslaitoksen käyttöluva on voimassa vuoden 2055 loppuun asti. Vuonna 2017 käynnistettiin teknis-taloudelliset selvitykset mahdollisesta käyttöiän pidentämisestä ja vuonna 2018 uuden käyttöluvahakemuksen jättämiseen tähtäävä projekti, joka huipentui 18.3.2022 voimalaitoksen ja loppusijoituslaitoksen lupahakemusten toimittamiseen työ- ja elinkeinoministeriöön.

Teksti: Mika Harti, Ari-Pekka Kirkinen, Mika Lehtonen **Kuvat:** Fortum

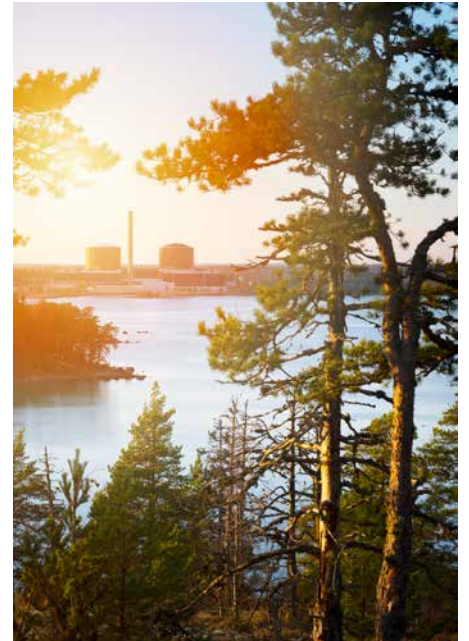
L OVIISAN YDINVOIMALAITOS on tuottanut sähköä turvallisesti, luotettavasti ja taloudellisesti yli 40 vuotta. Vuosina 2014–2018 Loviisan voimalaitoksella toteutettiin laitoshistorian laajin modernisointiohjelma, johon Fortum investoi noin 500 miljoonaa euroa. Suurimpia näistä modernisoinneista olivat automaatiouudistus, hyötysuhteen parantamiseen tähtäävät hankkeet ja Fukushima onnettomuuden seurauksena tehdyt muutokset. Onnistuneen ikääntymisen hallinnan ja tehtyjen muutosten ansiosta voimalaitos on teknisesti hyvässä kunnossa.

Toimintaedellytyksiä arvioitiin myös määräaikaisessa turvallisuusarviossa, joka tehtiin STUKiin vuonna 2015. STUKin arvion mukaan luvanhaltijalla on olemassa tarvittavat edellytykset, menettelyt, osaaminen ja

resurssit laitoksen turvallisen käytön jatkamiseksi.

Edellytykset toiminnan jatkamiselle nykyisen käyttöluvajakson jälkeen olivat erinomaiset ja selvitykset käyttöiän jatkosta aloitettiin 2017. Selvitykset sisälsivät arviot laitoksen tekniikasta ja sen ikääntymisestä sekä tarvittavista investoinneista ja niiden ajankohdasta. Selvitykset käsittivät viisi osa-aluetta: käyttöiän hallinta, tehonkorotus, ydinturvallisuus, polttoaine ja jäte sekä turvajärjestelyt.

Selvitysten perusteella arvioitiin käyttöiän jatkon kannattavuus eri skenaarioilla. Selvityksissä tarkasteltiin nykyilupien mukaisista käyttöä sekä 10 ja 20 vuoden jatkokäyttöä. Käyttöiän jatkaminen edellyttää luonnollisesti ydinenergialain mukaista käyttöilupaa, johon perustettiin erillinen projekti, vaikka päätös lu-



Loviisan voimalaitos.

pahakemusten lähettämisestä tehtiinkin vasta paljon myöhemmin.

Käyttöluvaprosjekti

Käyttöluvaprosjektin suunnittelu aloitettiin vuoden 2018 alkupuoliskolla. Lupahakemuksen yhteydessä on laadittava ohjeen YVL A.1 mukainen määräaikainen turvallisuusarvio, joka sisältää myös YVL-ohjeiden ja STUKin määräysten täyttymisarvioinnit ja käyttöikäanalyseja, muun muassa kriittisten komponenttien ikääntymisestä. Määräaikaisen turvallisuusarvion lisäksi projektiin sisällytettiin myös tiettyjä edellisestä määräaikaisesta turvallisuusarviosta periytyviä kehitystoimenpiteitä kuten onnettomuusanalyseja ja lopullisen turvallisuusselosteen asiakirjojen teknisen asiasisäl-



DI Mika Harti

Johtava vanhempi erityisasiantuntija,
ydinturvallisuus
Fortum
mika.harti@fortum.com



DI Ari-Pekka Kirkinen

Ydinturvallisuuspäällikkö
Fortum, Loviisan voimalaitos
ari-pekka.kirkinen@fortum.com



DI Mika Lehtonen

Head of Generation investment
portfolio management
Fortum
mika.lehtonen@fortum.com

lön arviointia ja päivittämistä tämän analyysitiedon perusteella.

Projektin laajuuteen sisällytettiin vuonna 2019 ympäristövaikutusten arviointi (YVA). YVAN sisällössä huomioitiin laitospaikan koko elinkaari sekä FiR 1 -tutkimusreaktorin ja Otakaari 3 -tutkimuslaboratorion radioaktiivisten jätteiden mahdollinen loppusijoittaminen Loviisaan, mistä Fortumin ja VTT:n välillä oli laadittu ehdollinen sopimus. YVA-prosessia ja sen tarkempaa sisältöä on käsitelty ATS Ydintekniikan numerossa 3/2020 ja materiaali on saatavilla Fortumin internet-sivuilta [1].

Projektin alkuvaiheessa määriteltiin millainen lupa voimalaitokselle olisi syytä hakea. Määräaikainen turvallisuusarvio, YVA ja käyttölupahakemukset tehtiin näiden määrittelyjen mukaisesti. Esimerkiksi jo esiselvitysten aikana oli päätetty termisen tehon pitämistä ennallaan. Tällä asialla on merkittävät vaikutukset muun muassa reaktoripainesäiliölle tehtävien kuormitus- ja väsymisanalysien sekä onnettomuusanalysien kannalta. Tämä vaikuttaa myös käytetyn polttoaineen varastointiin, sen määrään ja loppusijoitukseen.



Kuvassa vasemmalta TEMistä: erityisasiantuntija Linda Kumpula, yli-insinööri Jorma Aurela, teollisuusneuvos Liisa Heikinheimo sekä Fortumista Generation-divisioonan johtaja Simon-Erik Ollus, voimalaitosjohtaja Sasu Valkamo, apulaisjohtaja Thomas Buddas ja projektipäällikkö Jarkko Ahokas.

Voimalaitoksen lupahakemuksessa määriteltiin lisäksi Loviisassa ja muualla Suomessa syntyneen radioaktiivisen jätteen varastoinnin maksimimäärä. Tavoitteeksi asetettiin huomioida käytöstäpoistojätteet ja luopua jätteiden aktiivisuusmäärittelyistä. Myös laitoksen siirtymistä sähköntuotannosta käytöstäpoistovaiheeseen haluttiin selkeyttää.

Käyttölupaprojektin onnistumisen edellytyksenä on osaava oma ja noin 15 alihankkijan

henkilöstö sekä laitoksen että toiminnan tuntemus viranomaisen puolella. Asiantuntijuudelle ja osaamiselle on myös jatkossa tarvetta. Se on luonut edellytykset yli 40 vuoden mittaiselle turvalliselle ja luotettavalle sähköntuotannolle Loviisan voimalaitoksella.

Lupahakemus ja toiminnan jatkuvuus laitospaikalla

YVA-menettely päättyi työ- ja elinkeinoministeriön perusteltuun päätelmään 14.1.2022, mikä oli edellytys käyttölupahakemusten toimittamiselle. Prosessin aikana tarkastelluilla vaihtoehtoilla ei todettu olevan sellaisia merkittäviä haitallisia ympäristövaikutuksia, joita ei voitaisi hyväksyä, estää tai lieventää hyväksyttävälle tasolle. Voimalaitoksen ja loppusijoituslaitoksen käyttölupahakemukset toimitettiin työ- ja elinkeinoministeriöön 18.3.2022. Hakemukset ovat saatavilla työ- ja elinkeinoministeriön internet-sivuilla [2]. Hakemuksiin liittyvä kuuleminen loppuu 12.8.2022 ja kokonaisuudessaan prosessin arvioidaan kestävän noin vuoden.

Voimalaitoksen lupahakemuksen mukaisesti kummankin laitossyksikön sähköntuotannollinen käyttö jatkuisi enintään vuoden 2050 loppuun. Tämän jälkeen reaktorirakennuksissa varastoidaan käytettyä ydinpolttoainetta ja tehdään käytöstäpoiston valmistelevia töitä. Tässä yhteydessä laitossyksiköistä itsenäistetään esimerkiksi käytetyn ydinpolttoaineen varastot ja jätteiden käsittelyyn tarvittavat laitokset. Tässä vaiheessa laitos muistuttaa paljon käytössä olevaa laitosta ja lupahakemuksessa haettiin lupaa käyttää laitosta käytöstäpoiston valmistelun edellyttämässä laajuudessa vuoden 2055 loppuun asti.

Ydinenergian mukaisen käytöstäpoistoluvan alainen toiminta alkaisi viimeistään vuonna 2055 ja kestäisi enintään vuoden 2060 loppuun asti. Tässä yhteydessä puretaan laitoksen radioaktiiviset osat ja ne loppusijoitetaan laitospaikalla sijaitsevaan loppusijoituslaitokseen. Laitossyksiköiden käytöstäpoiston jälkeen laitospaikan toiminta on nykyiseen ver-

rattuna hyvin pienimuotoista keskittyen käytetyn ydinpolttoaineen varastointiin.

Suunnitelmien mukaan käytetty ydinpolttoaine on kuljetettu Posiva Oy:n loppusijoituslaitokseen viimeistään vuoden 2090 lopussa, itsenäistetyt laitososat on poistettu käytöstä, Loviisan loppusijoituslaitos on suljettu ja ydintekninen toiminta laitospaikalla päättyy. Alueen jatkokäytöstä ei ole vielä tehty päätöksiä. Brownfield-vaihtoehdossa osa rakennuksista voi jäädä paikalleen ja niitä voidaan käyttää normaaleina teollisuusrakennuksina. Greenfield-vaihtoehdossa kaikki rakennukset ja rakenteet puretaan ja alue maisemoidaan.

Päätös lupahakemuksesta

Suomalaisten tuki ydinvoiman käytölle on ollut mielipidemittausten perusteella perinteisesti hyvin vahva. Lisäksi nykyinen hallitusohjelma tukee nykyisten ydinvoimalaitosten käyttöä pidemmän aikavälin turvallisuuksien näkökulmasta, mikäli turvallisuusviranomaisen sitä puoltaa. Miksi sisäinen päätöksenteko Loviisan ydinvoimalaitoksen jatkosta sitten kesti Fortumissa kauan?

Näin pitkän aikavälin investoinnista päättäminen on haastavaa etenkin juuri nyt, kun energiamarkkinat ovat suuressa murroksessa ja markkinahintojen ennustaminen pitkällä aikajänteellä hyvin haastavaa. Markkinaennusteiden lisäksi Fortumissa haluttiin käyttää aikaa perusteelliseen arviointiin ydinvoiman hyväksyttävyydestä myös pidemmälle tulevaisuudessa. Samalla käytiin yhteiskunnallista keskustelua monella eri foorumilla ja puntaroiittiin yhteiskunnan tukea ydinvoimalle.

Vaikka ydinvoiman merkitys Suomen huoltovarmuudelle on yleisesti tiedossa ja kannatus on kansallisella tasolla korkea, poliittisen ilmapiirin kannalta on hyvin merkittävää, miten Euroopassa suhtaudutaan ydinvoimaan nyt ja tulevaisuudessa. Yksi tärkeimmistä yksittäisistä arvioitavista tekijöistä oli päätöksenteon kanssa samaan aikaan valmisteilla ollut EU:n taksonomia-asetus, joka luokittelee, mitkä tuotantomuodot ovat ympäristön kannalta kestäviä.

Myös taksonomia-asetuksen kehitystä haluttiin seurata ennen päätöksentekoa. Taksonomia-asetuksessa on edelleen ydinvoiman osalta kysymysmerkkejä, mutta ainakin ydinvoiman tärkeydelle osana energijärjestelmää saatiin esityksen myötä vahvistusta, mikä osaltaan auttoi tekemään päätöstä Loviisan voimalaitoksen käyttöä jatkosta.

Viitteet

- [1] www.fortum.fi/loviisayva
- [2] <https://tem.fi/loviisan-voimalaitos>



Työkierto toisessa yrityksessä mahdollisti uuteen laitokseen tutustumista pelkkää vierailua laajemmalti. Sini ja Santeri nauttivat Olkiluodon auringosta OL3-laitosyksikön katolta. (kuva: Tapani Karjanlahti, TVO).

Nordic Nuclear Trainee Program

Pohjoismaiset ydinvoimayhtiöt Fortum, TVO, Uniper ja Vattenfall ovat saaneet päätökseen ensimmäistä kertaa järjestämänsä nuorille ydinvoima-alan asiantuntijoille suunnitellun Trainee-ohjelman, Nordic Nuclear Trainee Programin (NNTP). Pandemiatilanne laittoi järjestelyt uusiksi useaan otteeseen, mutta ensimmäinen ohjelma saatiin menestyksellisesti päätökseen hyödyntämällä etäyhteyksiä osana opetusta.

Teksti: Hanna Tynys, Olli Suurnäkki, Sini Piiparinen, Miro Pussinen ja Santeri Myllynen



DI Hanna Tynys
Project Engineer
Fortum Power and Heat Oy
hanna.tynys@fortum.com



DI Olli Suurnäkki
Vanhempi suunnitteluinsinööri,
ydinturvallisuus
Fortum Power and Heat Oy
Olli.Suurnakki@fortum.com



DI Sini Piiparinen
Project Manager
Fortum Power and Heat Oy
sini.piiparinen@fortum.com

POHJOISMAISET YDINVOIMAYHTIÖT Fortum, TVO, Uniper ja Vattenfall toteuttivat vuosien 2021–2022 aikana yhdessä pohjoismaisen ydinvoima-aiheisen Trainee-ohjelman, Nordic Nuclear Trainee Programin (NNTP), tarkoituksenaan houkuttella nuoria osajia ydinvoima-alalle erityisesti Ruotsissa ja kasvattaa nuorien asiantuntijoiden osaamista ja verkostoja.

Ohjelma käynnistettiin alun alkaen vuonna 2019, jolloin tapahtui osallistujien valinta. Ruotsissa valinta toteutettiin ulkoisena hakuna, Suomessa yritysten sisäisinä hakukampanjoina. Varsinaisen ohjelman alku kuitenkin lykkääntyi koronapandemian vuoksi alkuperäisestä maaliskuusta 2020 vuodelle eteenpäin kevääksi 2021, ja kasvokkain osallistujat pääsivät toisensa tapaamaan vasta joulukuussa 2021.

Ohjelmaan osallistui 13 nuorta asiantuntijaa, joista 6 Suomesta ja 7 Ruotsista. Osalla erityisesti suomalaisista oli ennestään joitakin vuosia kokemusta ydinvoima-alalta, mutta ruotsalaiset aloittivat ydinvoiman parissa vasta ohjelman myötä. Monet olivat taustaltaan diplomi-insinöörejä tai vastaavia, mutta joukossa oli myös insinöörejä, geologeja sekä yksi fysiikan tohtori.

Ohjelman tavoitteena oli tutustuttaa osallistujia ydinvoima-alaan sekä ydinvoiman asetukseen osaksi energia-alan kokonaisuutta. Aiheita käsiteltiin erityisesti pohjoismaalaisessa kontekstissa. Teknisten kysymysten lisäksi

Fortumin osallistajat viettivät marras-joulukuussa kuusi viikkoa työkierrossa Loviisan voimalaitoksen ja pääkonttorin eri tiimeissä. Työkierrossa tutustui paitsi laitokseen, myös organisaatioon ja uusiin ihmisiin (kuva: Iiris Isoaho, Fortum).

käytiin läpi ydinvoimaa muun muassa yhteiskunnallisesta ja taloudellisesta näkökulmasta. Ohjelma sisälsi myös paljon itsensä kehittämiseen liittyvää sisältöä, kuten tiimityötaitoja, esiintymistaitoja ja omien vahvuksiensa tunnistamista.

Ohjelman opetussisällöt koostuivat monipuolisesti virtuaalisista ja paikan päällä järjestetyistä koulutusmoduuleista. Lisäksi ohjelmassa järjestettiin kaksi työkiertojaksoa, joista toinen suoritettiin oman yrityksen sisällä ja toinen ulkopuolella, sekä kaksi projektityötä eri yrityksissä työskentelevistä henkilöistä koostuvissa ryhmissä. Ohjelman osallistajat saivat ohjelman aikana myös kokeneen mentorin tukemaan kehittymistä ydinvoima-alan ammattilaisena.

Koulutusmoduulit toteutettiin osin Teamsin välityksellä

Ohjelma koostui kahdeksasta koulutusmoduulista, joista kuusi jouduttiin tällä kertaa toteuttamaan etänä. Moduulien teemat rakentuivat niin ydinvoimalaitoksen operoinnin, kunnossapidon, ydinjätteen ja ydinpolttoaineen, kuin talouden, vesivoiman, ilmaston ja yhteiskunnan ympärille. Luennoitsijoita ja workshoppien vetäjiä oli niin osallistujayrityksistä, viranomaistoilta kuin ulkopuolisistakin yrityksistä.

Esitykset ja puheenvuorot olivat osallistujien mielestä laadukkaita, ja virtuaalimoduuleissa hyödynnettiin onnistuneesti interaktiivisia sisältöjä, Teamsin ryhmätyöominaisuuksia



DI Miro Pussinen

Specialist, Project Planning
Fortum Power and Heat Oy
Miro.Pussinen@fortum.com



DI Santeri Myllynen

Specialist, Project Planning
Fortum Power and Heat Oy
santeri.myllynen@fortum.com



ja onnistuttiin aktivoimaan osallistujia muun muassa BWR-simulaattorin testailuun.

Lähimoduuleja päästiin ensimmäisen kerran järjestämään joulukuussa 2021, jolloin vierailtiin Ringhalsin ydinvoimalassa Ruotsissa. Vierailu kattoi paitsi kierroksen käytöstäpoistovaiheessa olevan yksikön 2 turbiinihallissa, myös koulutussimulaattorivierailun, ydinvoimalaitoksen operointia simuloivan Fermi NPP -pelin pelaamista, sekä tietysti kauan odotetun ensimmäisen yhteisen illanvieton.

Viimeinen virallinen moduuli järjestettiin Espoossa Fortumin pääkonttorilla ja sen yhteydessä jaettiin todistukset osallistujille. Moduulissa perehdyttiin Suomen ja Ruotsin turvallisuuskulttuurien erityispiirteisiin ja esiteltiin myös Trainee-ohjelman toiset projektityöt, joiden aiheina olivat muun muassa WANOn raporttien parempi hyödyntäminen ja SMR-laitoksista kommunikoiminen. Projektitöissä oli paitsi mahdollis-

ta tutustua itselle uuteen aiheeseen myös kehittää projektitaitoja ja havainnoida suomalaisen ja ruotsalaisen työskentelykulttuurin eroja.

Kuhunkin virtuaalisesti järjestettyyn moduuliin olisi alun perin kuulunut vierailuja ydinvoimalaitoksille Suomessa ja Ruotsissa, sekä muihin kohteisiin, kuten Westinghousen polttoainetehtaalle, käytetyn polttoaineen keskitettyyn välivarastoon Clabiin sekä vesivoimalaitoksille Pohjois-Ruotsissa. Vierailuista valtaosa jouduttiin lykkäämään ohjelman virallisen päättymisen jälkeiseen aikaan kesälle 2022 matkustusrajoitusten vuoksi.

Työkierron tutustuttiin uusiin tehtäviin

Yksi Trainee-ohjelman opettavaisimmista asioista olivat työkierrat omalla ja vieraalla voimalaitoksella tai muissa ydinvoimatoiminnoissa.

Sisäisen rotaatiojakson tarkoituksena oli tutustua oman yrityksen sisällä erilaisiin tehtäviin ja organisaatioihin ja syventää omaa osaamistaan. Fortumlaiset tutustuivat kukin oman kiinnostuksen kohteidensa mukaan kuusi viikkoa eri toimintoihin Loviisan voimalaitoksella ja Keilalahden pääkonttorilla. Työkiertolaiset pääsivät osallistumaan työtehtäviin esimerkiksi mekaanisen kunnossapidon mukana, ydinjätepuolella ja päävalvomoissa seuraamalla operaattoreita työssään. Jakson aikana pääsi täysimittaisesti osaksi käytössä olevan ydinvoimalaitoksen arkea ja näki kuinka organisaation eri osat vaikuttavat omalla panoksellaan laitoksen toimintaan.

Toisessa työkierrossa tutustuttiin neljän viikon ajan muun yrityksen toimintaan.



Ohjelman päätösmoduulissa maaliskuussa 2022 myös yritysten ydinvoimatoimintojen johtoa ja osallistujien esihenkilöitä oli mukana kuuntelemassa ja kommentoimassa ohjelman projektityöesityksiä Fortumin pääkonttorilla Espoossa (kuva: Pia Fast, Fortum).

Esimerkiksi osa Fortumin osallistujista oli TVO:lla eri tehtävissä Olkiluoto 3:lla. TVO:lla vietettyjen viikkojen aikana he pääsivät kattavasti tutustumaan OL3-laitokseen teknisesti sekä osallistumaan laitoksen eri kokouksiin. Kaikki olivat eri ryhmissä rotaation ajan päästen toimimaan osana TVO:n ryhmien arkea ja heidän työtehtäviään. Toisessa ydinvoimayhtiössä suoritetun työkierron jälkeen voi todeta sen olleen erittäin opettavaista, kun harjoittelussa pääsi näkemään toimintatapoja ja työskentelykulttuuria oman yrityksen ulkopuolella.

Fortumin sisällä vastaavia lyhytkestoisia työkiertoja ei ole varsinkaan vuosihoitojen ulkopuolella juurikaan järjestetty, mutta lyhyehkön alkuhämmennyksen jälkeen työkiertolaiset pääsivät hienosti mukaan päivittäiseen toimintaan.

Ohjelma antoi perspektiiviä ja uusia kontakteja

Useamman yrityksen ohjelmassa moniin entuudestaan tuttuihin asioihin sai perspektiiviä ja

uutta tietoa, kun esiintyjät ja osallistajat jakoivat tietoa ja kommentoivat aiheita eri näkökulmista. Koulutusmoduuleissa käytiin paljon hyviä keskusteluja ja jaettiin avoimesti näkemyksiä aiheista, toki muistaen yritysten liiketoimintaan liittyvät luottamuksellisuuskysymykset. Erityisesti ohjelman kautta lisääntyi tietoisuus pohjoismaisen ydinvoima-alan toimijoista ja ydinvoimaan liittyvien asioiden universaaliudesta.

Pelkkien luentojen kuuntelemisen sijaan ohjelmassa kokonaisuudessaan pääsi tekemään asioita konkreettisesti, ja pieni ryhmä koko mahdollisti monipuolisen toteutuksen. Teknisten sisältöjen lisäksi osaamista kertyi ydinvoimalaitosten taloudesta, lobbauksesta, esiintymistaidoista ja projektityöskentelystä. Suomen ja Ruotsin eroavaisuudet ydinvoiman hyväksyttävyyden, historian ja myös toimintakulttuurin suhteen tulivat myös tutuiksi. Uusina ydinvoima-alalle tulleet osallistajat saivat kysymyksillään kokeneemmatkin pohdittamaan, minkä tyypisiä asioita alalla pidetään niin sanottuina virallisina totuuksina.

Osittaisesta etätoteutuksesta huolimatta porukka muodostui tiiviiksi ja ohjelmassa oli todella hyvä yhteishenki. Ydinvoima-alan yhteisöllisyys näkyi ohjelmassa avoimena tiedonjakona ja iloitemisena toisten saavutuksista.

Kokemukset ohjelmasta olivat osittaisesta etätoteutuksesta huolimatta yleisesti ottaen positiivisia niin osallistujien kuin yritysten näkökulmasta, ja siksi vastaava ohjelma on tarkoitus järjestää uudestaan. Tätä juttua kirjoitettaessa seuraavien osallistujien valintaprosessi on meneillään Suomessa ja Ruotsissa. Uuden ohjelman on tarkoitus käynnistyä syksyllä 2022 ja kestää reilu vuosi. Tällä kertaa kaikki päästään toivottavasti toteuttamaan paikan päällä ilman matkustusrajoituksia. 🌐

Historianäkökulmaa Loviisan reaktoripaineastian säteilyhaurastumiseen: Loviisa 1:n ”painajainen” johti pitkäjänteiseen tutkimukseen

Risto Valkeapää

Säteilyhaurastumisella tarkoitetaan nopeiden neutronien aiheuttamaa paineastiateräksen haurastumista. Yhtenä tunnettuna tekijänä haurastumisessa on kuparin erkautuminen. Säteilyn rooli on diffuusion kiihdyttäminen. Teräksen fosforipitoisuus on myös tärkeä ilmiöön vaikuttava parametri. Loviisan ydinvoimalan ykkösreaktorin sydäntä lähellä olevassa hitsausaumassa havaittiin epäpuhtautena sekä kuparia että fosforia. Nämä tekijät osaltaan johtivat 1970-luvulta alkaen tähän päivään asti jatkuneeseen tutkimustyöhön, jolla on ollut keskeinen merkitys myös Loviisan ydinvoimalan käyttöään ratkaisemiseen.

Radiation embrittlement refers to the embrittlement of a pressure vessel steel caused by fast neutrons. One known factor in this embrittlement is copper precipitation. The role of radiation is to accelerate diffusion. The phosphorus content of the steel is also an important parameter in this phenomenon. Both copper and phosphorus were detected as impurities in the welding seam near the reactor core at Loviisa nuclear power plant. These factors contributed to the research work carried out from the 1970s to the present day, which has also played a key role in determining the lifetime of the Loviisa nuclear power plant.

Haurastusilmiön alkuperä on reaktorisydämessä, jossa uraaniytimen haljetessa vapautuu 2–3 neutronia. Neutronien törmätessä reaktoripaineastian seinämiin voi suuri määrä metalliatomeja siirtyä paikaltaan. Seinämässä tapahtuva atomien liike mahdollistaa materiaalia lujittaan hilavikojen, erkautumien sekä raerajoja haurastavien suotautumien muodostumisen. Tämän seurauksena teräs haurastuu. Kuparin erkautumat ovat osa tätä ilmiötä.

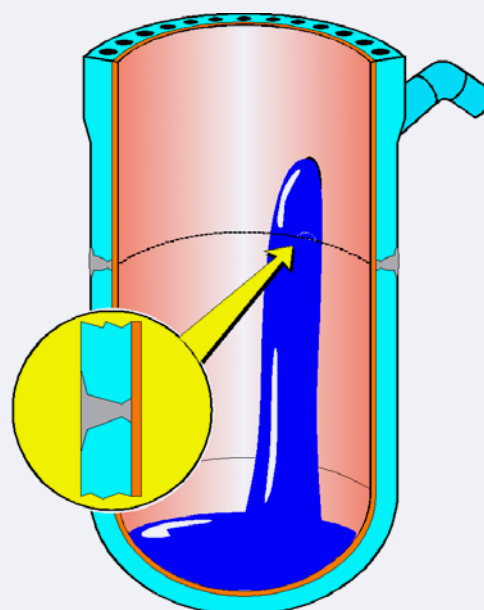
Reaktoripaineestiatutkimus on ollut mukana muun muassa Euroopan komission TACIS- ja PHARE-tutkimusohjelmissa. Suomalaisilla asiantuntijoilla on ollut keskeinen rooli tutkimustyössä.

Paineestiamateriaalin säteilyhaurastumisesta johtuva murtumisen todennäköisyyden kasvaminen on vakavan huolen aihe. Ilmiö on reaktorifysikaalinen ja paineastiamateriaalin kohtaaman neutronivuon suuruudesta riippuva. Riskiä ei voi hallita paineastiaa vaihtamalla, koska se on teknistaloudellisesti lähes mahdotonta. Ilmiötä voidaan kuitenkin rajoittaa ja hallita muilla keinoin.

Loviisan ydinvoimalan varastossa on tosin VVER-440-reaktorin käyttämätön paineastia ja yksi höyrystin varaosiksi ja tutkimustarkoitukseen. Paineastia ja höyrystin oli tarkoitettu puolalaiseen Zarnowiecin ydinvoimalaan. Sen työt keskeytettiin voimalaitoksen perustukseen ja rahoitukseen liittyneistä syistä.

Reaktoripaineastia voidaan elvyttää lämpökäsittelyllä

Ydinvoimaloiden reaktoripaineastian säteilyhaurastuminen on työllistänyt asiantuntijoita kaikkialla maailmassa, missä reaktoripaineastioita on käytössä. Lämpökäsittelyllä on voitu korjata vaurioita ja jatkaa paineastian käyttöikä.



Kuva 1. Loviisan paineastian alaosan halkileikkaus [1].

Loviisan paineastian painajaiset

RISTO VALKEAPÄÄ

Ydinvoimalan kohuttu paineastia on maailman tutkituin. Tutkimukset ovat paljastaneet puutteen toisensa perään. Asiantuntijat pelkäävät nopean haurastumisen seurauksia.

Maailman tutkituin ydinvoimalan paineastia aiheuttaa harmaita hiuksia insinööreille ja tutkijoille Loviisan ydinvoimalassa.

Puude puutteen päälle paljastuu:

Loviisa 1:n paineastia haurastuu nopeammin, sen polttoainetta on vähennettävä kymmenen prosenttia.

Loviisa 2:n paineestista oli "maanantaisin" se särjällä. Häikäsmä korjattiin ja Loviisa 2:n ladattaan parhailleen, reitit kaksi vuotta aikataulustaan myöhässä.

Jokainen myöhästyminen merkitti 200 000 markan tappiota, joka lasketaan Insinöri Voiman ilmoituksen mukaan: puoli miljoonaa, jos tappio lasketaan pitkinä aikoina.

Päälinnaisiksi huokeiksi on nyt tulut polko siitä, mitä tapahtuu, jos haurastuneissa paineestissa sattuu vuoto ja viilä hitaajajäähdytysesiäytetään tulkuksaan astiaan.

Voiko reaktorisydän ympäröivä paineastia hajjeta ja painin mahdollinen ydinvoimalanotto muus tapahu?

Paineastia ympäröivä sydän, jossa ovat polttoaineelementit. Elementtien ja 345 polttoaineen välillä on 125 polttoainetta. Polttoainesta lähtee n. nopea neutronidifusio, joka ajaa neutroni kovan ja sormia haurastaa paineastian metallisärmä.

Paineastian sisällä on haurastunut nopeammin kuin on laskettu. Siksi lähinnä paineastian seinämä on oltava 30 polttoaineelementtiä varten Loviisa 1:n vuorihullon metallisärmä. Reaktorisydän sisältämä energiamäärä laskee muutoksen tähden noin 7 prosenttia.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

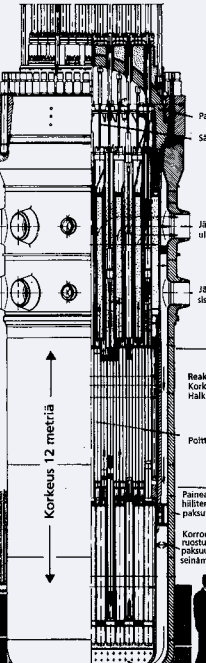
Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

REAKTORIN PAINEASTIA



Salattu julki vasta viime kesinä

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Pahin mahdollinen onnettomuus

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Kerrostus määrittäys vierailijallassa

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Pelottavan vuoden mahdollisuus

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Länsi-Saksa on kilaantunut Loviisaan

Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen. Insinööri on se, joka suunnittelee paineastian ja toteuttaa sen.

Kuva 2. Loviisan paineastia kokonaisuudessaan [2].

testattiin kuitenkin vasta vuonna 1980, kun VTT:n kuumalaboratorio valmistui.

Tulokset olivat yllättäviä. Niiden mukaan teräksen, erityisesti hitsausseaman haurastuminen oli nopeampaa kuin suunnittelutietojen perusteella oli odotettu. Tämän kirjoittaja sai myös tietää vakavasta tilanteesta kevättalvella 1980.

IVOssa ongelmaa ruvettiin ratkomaan käytännössä heti, kun siitä saatiin tarkka tieto. Reaktorisydäntä pienennettiin ja ulkokehälle sijoitettiin suoja- eli dummy-elementit.

Hätäjäähdytysakkujen lämpötilaa nostettiin kiehumispisteeseen eli 100°C ja hätäjäähdytysveden lämpötila nostettiin hieman yli puoleen tästä. Korkeapaineisten hätäjäähdytyspumppujen nostokorkeutta alennettiin, korkeapaineisen hätäjäähdytysveden syöttöä pienennettiin ja paineistimen ulospuhallusventtiilin kapasiteettia suurennettiin.

Molempien laitossyksiköiden paineestiat tarkistettiin useita kertoja ultraääni- ja pyörrevirtamenetelmillä sekä TV-kameralla. Muutostöiden jälkeen Loviisan ydinvoimalan molempia reaktoreita voitiin ajaa täydellä teholla.

Loviisa 1:lle onnistunut lämpökäsittely

Loviisa 1:n reaktoripaineestialle tehtiin elvytyskäsittely vuonna 1996. Se kohdennettiin sydänaueen alareunassa olevalle hitsille. Käsittely tehdään vedestä ja sisäosista tyhjennetylle paineestialle laskemalla sähkövastuksilla varustettu laitteisto reaktorin sydänaueelle. Alueen kokonaisleveys on vain noin 1,5 metriä. Lämpöjännitysten minimoimiseksi nosto- ja laskunopeus on vain 20–30°C minuutissa. Pintalämpötila on 475°C. Tätä lämpötilaa pidetään yllä 100 tuntia. Varsinainen läm-

pökäsittely, lämpötilan nosto ja lasku mukaan lukien kestää yhteensä noin viikon.

IVO toimi Škoda-teollisuuden kanssa yhteistyössä lämpökäsittelyssä.

Loviisa 2:lla tehtiin samat muutokset kuin Loviisa 1:llä paineastian neutronisäteilyn pienentämiseksi. Hitsausseaman epäpuhtauksien määrä vaadittiin pitämään pienenä jo valmistusvaiheessa, joten kakso-laitoksella paineastian lämpötilakäsittelyä ei ole tarvinnut tehdä.

Paineastioiden lämpökäsittely on nykyisin rutiininomainen toimenpide VVER-laitoksissa. Sitä pidetään onnistuneena korjaustoimenpide. Haurastumisongelma on voitu poistaa periaatteessa kokonaan. Paineastian käyttöikä on ainakin voitu jatkaa merkittävästi.

”Paineastian painajaisesta” alkoi ydinvoimajournalistin ura

Tein Helsingin Sanomiin vuonna 1980 sivun laajuisen artikkelin Loviisan paineastian haurastumisesta otsikolla ”Loviisan paineastian painajaiset” [2]. Tutustuin journalistina ydinvoimateknologiaan ja työ johti kansainvälistymiseen. Toimin myös Nucleonics Weekin kirjeenvaihtajana.

Kävin ydinvoima-aiheesta 1980-luvulla pitkiä keskusteluja akateemikko Erkki Laurilan kanssa. Asuimme molemmat Porvoossa. Keskustelimme yleensä Laurilan kirjastohuoneessa. Laurilan piippuun murskatuista sikarinjämistä lähti pahanhajuinen käry. Kotikirjastoluennot ulottuivat politiikasta reaktorifysiikkaan. Mieleeni jäivät erityisesti toteamukset: ”Muista, että fysiikka on banaali tiede” ja ”Yksi asia on absoluuttinen, me kaikki vanhenemme.”

Niin vanhenevat myös ydinvoimalaitokset.

Lähteitä

Ralf Ahlstrand, Pekka Jauho, Petteri Tiippana, Matti Valo, Kim Wallin, ATS Ydintekniikka, Wikipedia

Lähdeluettelo

- [1] Dirk Lucas et al., ”Identification of relevant PTS-scenarios, state of the art of modelling and needs for model improvements”, European project NURESIM, 2008, dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3970.9603
- [2] Risto Valkeapää, ”Loviisan paineastian painajaiset”, Helsingin Sanomat 24.5.1980.

Kirjoittaja



Risto Valkeapää

Toimittaja ja tietokirjailija, ATS:n seniorijäsen
risto.valkeapaa@gmail.com

A novel advanced multi-physics simulation tool for the analysis of the Molten Salt Fast Reactor

Marco Tiberger

Delft University of Technology, The Netherlands

Numerical simulations are essential to improve the design of the Molten Salt Fast Reactor (MSFR), but they are challenging due to the unique physics phenomena induced by the duality liquid fuel-coolant. In this work, we summarize the main outcomes of a research activity aimed at developing a novel multi-physics code capable of accurately modelling the 3D neutron transport, fluid flow, and heat transfer physics phenomena characterizing the MSFR. The coupling was realized between an incompressible RANS solver and a SN neutron transport solver, both based on a discontinuous Galerkin FEM space discretization. After extensive V&V and benchmarking, we employed the code-package to analyse the MSFR behaviour at steady-state and during several transient scenarios, deriving useful information to guide future research.

Numeeriset simulaatiot ovat välttämättömiä nopean sulasuolareaktorin (MSFR) suunnittelun parantamiseksi, mutta ne ovat haastavia nestemäisen polttoaine-jäähdyte-sekoituksen aiheuttamien ainutlaatuisten fysiikan ilmiöiden vuoksi. Tässä artikkelissa esitetään yhteenveto tärkeimmistä tutkimustuloksista, kun tavoitteena oli kehittää uusi multifysiikkakoodi, jolla voidaan 3D-mallintaa MSFR:lle tyypillistä neutronien kulkeutumista, nestevirtausta ja lämmönsiirtofysiikan ilmiöitä. Kytkeä toteutettiin kokoonpuristumattoman nesteen RANS-ratkaisijan ja SN-tyyppisen neutronien kuljetusratkaisijan välillä, jotka molemmat perustuvat epäjatkuvaan Galerkinin FEM-avaruusdiskretisointiin. Kattavien verifiointien, validointien ja vertailuanalyysien jälkeen käytimme koodipakettia analysoidaksemme MSFR:n käyttäytymistä vakioteholla ja useissa transienttiskenaarioissa, mistä saimme hyödyllistä tietoa tulevan tutkimuksen suuntaamiseen.

Nowadays, numerous research projects are carried out worldwide to increase the maturity of the Molten Salt Reactor technology, which presents very promising characteristics in terms of safety, sustainability, reliability, and proliferation resistance. In Europe, efforts are focused on developing a fast-spectrum design, named Molten Salt Fast Reactor (MSFR) [1]. The MSFR is a 3000 MW fast reactor operating with a liquid fluorides mixture (mainly of Li-Th-U). The salt freely flows upwards within a toroidal core cavity and then exits towards sixteen identical sectors where a pump and a heat exchanger are placed, as shown in

Figure 1. The core is surrounded by a fertile blanket and by reflectors to improve neutron economy.

Numerical simulations are essential to improve the MSFR design, given the scarce operational experience gained with this technology and the current unavailability of experimental reactors of this kind. However, modelling a fast MSR is very challenging, because the use of a liquid fuel that is also the coolant induces unique physics phenomena that strongly (and non-linearly) couple neutronics and thermal-hydraulics: transport of delayed neutron precursors, strong negative temperature feedback coefficients, and distributed heat generation directly in the coolant. Moreover, the geometry of the MSFR core induces complex 3D turbulent flow effects. For these reasons, the codes traditionally used in the nuclear field often prove unsuitable to perform accurate simulations of the MSFR and must be replaced by dedicated tools.

The primal goal of the PhD research presented here was the development and benchmarking of one of these multi-physics codes, aiming at accurately modelling the complex physics phenomena characterizing a fast-spectrum liquid-fuel nuclear reactor. The research was

Marco Tiberger voitti ENS High Scientific Councilin väitöstyöpalkinnon vuonna 2021. Lisätietoja ENS:n verkkosivuilta: www.euronuclear.org/scientific-resources/phd-award.

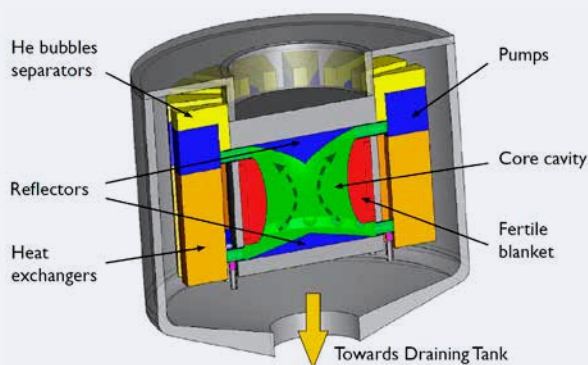


Figure 1. Schematic cross section of the MSFR fuel circuit. Dashed arrows indicate the salt flow direction [2].

carried out in the context of the Euratom H2020 SAMOFAR project. For this reason, the MSFR was considered as case study, analysing its behaviour at steady-state and during several transient scenarios to assess the safety of the current design.

Description of the multi-physics tool

The multi-physics tool consists of two newly developed in-house codes:

DGFlows: the CFD solver for the set of incompressible Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations (RANS). Closure is realized by adopting the standard k - ϵ model, whose equations are cast into a logarithmic form to guarantee the positivity of the turbulence quantities;

PHANTOM-S_N: the discrete ordinates solver for the multi-group Boltzmann neutron transport equation coupled to the delayed neutron precursors equations, where extra convective and diffusive terms were added to take into account their drift by the fuel flow. A transport model for the evolution and distribution of the fission products responsible for decay heat is present, too.

The greatest novelties of the code package lie in the adoption of a full-transport neutronics model in combination with the space discretization based on a discontinuous Galerkin finite element approach (DG-FEM). The latter combines the local conservation property of finite volume schemes with the high-order discretization, robustness, and geometric flexibility typical of FEM (necessary to handle the complex geometry of the MSFR core), and it guarantees high accuracy of the solution even in presence of large discontinuities in material properties. Time discretization of all governing equations is handled with an implicit second-order backward differentiation formula, in combination with a second-order pressure-correction scheme to solve the coupled momentum-continuity equations.

Another great feature of the code package is that it optimises the simulation time by differentiating the neutronics and CFD meshes, with the latter typically more refined in regions of low neutron importance but large flow gradients (e.g., close to the wall boundaries of the reactor). The refinement is hierarchical, which makes the exchange of data between the two meshes easy through Galerkin projection.

The coupling between the codes is realized by exchanging data (fission power density, velocity, turbulent viscosity, and temperature distributions). For steady-state calculations, the two solvers are iterated until convergence, while in transient calculations a loose-coupling strategy is adopted. Proper time-extrapolation of the exchanged fields ensures the nonlinear-consistency of the coupling scheme, thus preserving global second-order time convergence.

V&V and benchmark of the code

In addition to several activities carried out to validate and verify (V&V) the single-physics solvers [3,4,5], we collaborated with other partners of the SAMOFAR project to set up a benchmarking campaign of our multi-physics tools employing a test case specifically designed to properly assess the correctness and accuracy of coupled codes dedicated to fast-spectrum MSRs. Figure 2 depicts the system investigated: a squared lid-driven cavity, insulated (cooling is mimicked via a volumetric heat sink), filled with molten fluorides whose properties are homogenous and temperature independent. The flow is laminar, neutronics data are condensed into six groups, and cross sections are temperature-corrected only with the density feedback. Its characteristics (spectrum, temperature feedback coefficient, precursors movement) make it a simple representation of the MSFR.

The benchmark is structured into several steps, in which steady-state or transient simulations of increasing complexity are prescribed. In fact, the coupling between the various physics phenomena is gradually introduced. This, together with the simplicity of the problem, allows assessing the coupling capabilities of the code package tools in a systematic way. At each step, we compared our results with those obtained by the other partners both qualitatively (e.g., the 2D velocity distributions depicted in Figure 3) and quantitatively (reactivity values,

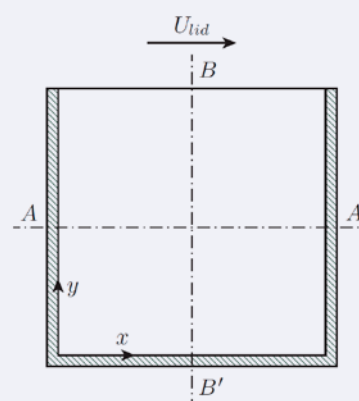


Figure 2. Domain of the multi-physics benchmark [2].

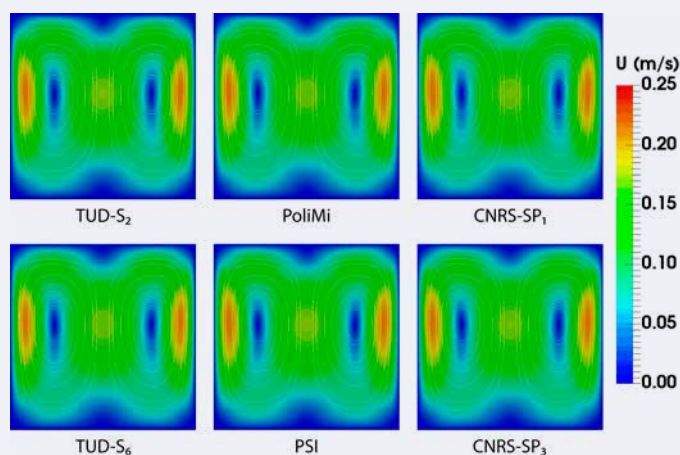


Figure 3. Velocity fields (with flow streamlines) obtained by each code for the step 1.3. Example of qualitative comparison of the results during the benchmark. Adapted from [2].

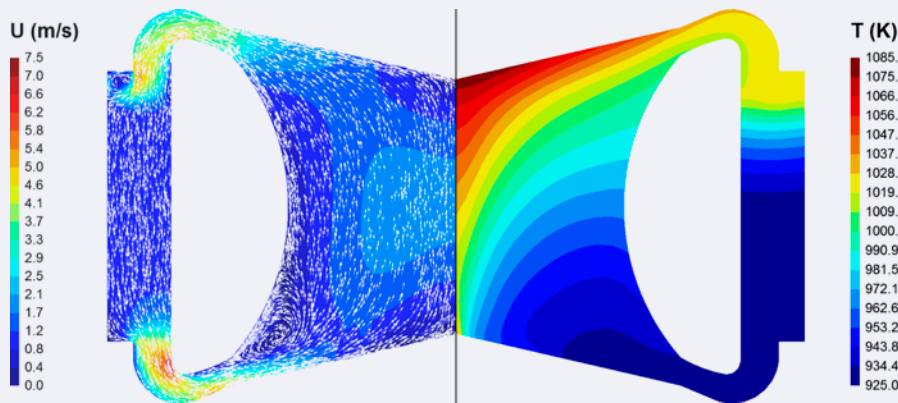


Figure 4. MSFR: Steady-state temperature and velocity (arrows indicate the flow direction). Adapted from [2].

values of the quantities of interest in specific, etc.). The very good agreement proved our code correctly models the physics phenomena characterizing a liquid-fuelled fast reactor. We refer to [6] for a complete analysis of the benchmark and the results obtained.

MSFR simulations

We then carried out an extensive investigation of the MSFR behaviour at nominal operating steady-state conditions and during several transient scenarios, three of which we briefly analyse in the following: loss of heat sink (ULOHS), salt overcooling (OVC), and loss of fuel flow (ULOFF). Exploiting the symmetry of the problem, we simulated only one recirculation loop (i.e., 1/16th of the total core). Lacking design specifications, the fuel pump was modelled as a momentum source, a friction factor was imposed in the heat exchanger to reproduce the resistance to flow, while salt cooling was modelled by a volumetric heat sink term. We refer to [2] for the complete description of the design parameters and simulation data considered.

Figure 4 shows the temperature and velocity distributions at steady-state. The salt heats up while rising through the core cavity but not uniformly, so radial temperature gradients are present too. The upper reflector is exposed to the hottest salt at 1083 K, due to flow stagnation

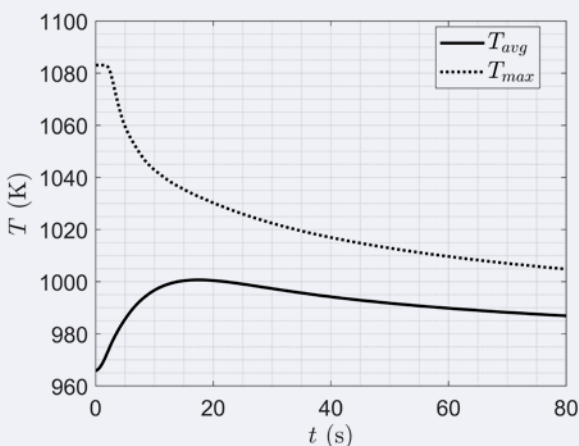


Figure 5. ULOHS: evolution of salt maximum and average temperatures [2].

combined to high power density in that area. A large recirculation region is detected at the entrance of the core, but it does not induce local hot spots, confirming the effectiveness of previous core-shape optimization studies [7]. However, it causes large localized pressure losses. Criticality eigenvalue calculations returned a $k_{eff}=1.00998$, indicating that the reactor is quite far from criticality at the intended average operating temperature ($T_{avg} \approx 700^\circ\text{C}$).

The ULOHS scenario considered is triggered by the failure of the intermediate pumps (exponential reduction of the mass flow rates to 20% of the nominal value). Figure 5 shows the MSFR response within the first 80 s in terms of temperature trends. T_{avg} increases by almost 35 K in the first 18 s, inducing a quick reduction of the power due to the strong negative salt temperature feedback coefficient.

Afterwards, it decreases due to the balance between the extracted and the produced power. After 80 s, the system has almost reached a new steady-state at around 500 MW and 986 K of T_{avg} . The maximum temperature (T_{max}) follows the power trend, quickly decreasing due to the reduced power-to-flow ratio. In general, temperature gradients quickly smear out in the core. Therefore, no threats for the reactor integrity can be detected during this kind of transients.

The strong negative temperature feedback coefficient can lead to risky scenarios in case of fast increase of the power extracted from the heat exchanger, with resulting reduction of T_{avg} . We simulated the first 30 s of an OVC initiated by a 50 K exponential reduction of the intermediate salt temperature. As soon as the intermediate salt cools down, the minimum salt temperature (T_{min}) decreases. After 1 s, the colder salt enters the core, so the reactor becomes supercritical and the power increases by 50% in only 3 s, as shown in Figure 6. Consequently, T_{max} rises (but only by 70 K at most), which causes the effective T_{avg} in the core to go back to the nominal value, thus quickly restoring a criticality condition. After 30 s, the power almost reaches a constant value of around 5 GW. Due to the increased power-to-flow ratio, the temperature difference across the heat exchanger increases, but T_{min} maintains a safe 30 K margin above freezing. Therefore, also this event does not raise concerns regarding the reactor safety.

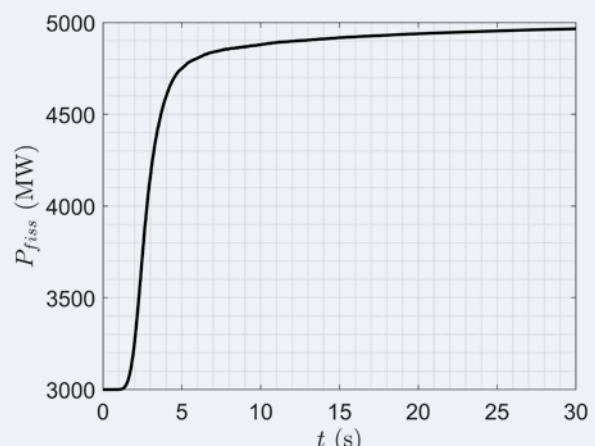


Figure 6. OVC: time evolution of reactor power [2].

Finally, we analysed the system response to a failure of the primary circuit pump, mainly in order to investigate how relevant is the natural circulation flow in such scenarios. We modelled the pump coast-down with an exponential law that realistically takes into account the pump's flywheel inertia. Soon after the initiating event, the reactor power starts to decrease, after a few instants in which it stays constant due to the precursors hold-back. This limits the maximum rise of the salt temperature in the system. The salt flow rate closely follows an exponential decay, reaching a plateau around $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ at 30 s, which is a meagre 6.5% of the nominal value.

Conclusions

During the PhD activity briefly presented here, an advanced multi-physics code targeting the MSFR was developed. The greatest novelties lie in the adoption of a full-transport neutronics model in combination with the DG-FEM spatial discretization. We proved our code package is able to accurately simulate the physics phenomena characterizing the steady-state and dynamic behaviour of the MSFR, by employing a test case specifically designed to assess this.

Finally, we extensively analysed the MSFR at nominal operating steady-state conditions and during several transient scenarios. Steady-state calculations have shown that previous interventions on the MSFR core shape were effective in removing dangerous hot spots at the core cavity inlet. However, a large flow recirculation area is still present and should be eliminated to reduce the pressure losses in the system. The upper-reflector wall should be carefully designed, as it is exposed to the hottest salt and to large temperature gradients which might lead to excessive thermo-mechanical stresses and corrosion. Criticality calcu-

lations have shown that the reactor is supercritical at the intended salt operating average temperature, so the concentration of fissile material in the fuel salt should be reduced.

The investigated transient scenarios have shown that the MSFR has excellent load-following capabilities and presents an outstanding safe behaviour. The fuel salt temperature always keeps a considerable margin both from the freezing point and the critical temperature causing damages to structural materials, thanks to the large heat capacity of salt. At the same time, the strong negative reactivity feedback coefficient quickly dampens any large perturbation in the power. The most concerning aspect of the current design is the very limited natural circulation, both at nominal conditions and during the analysed transients. Further optimizations of the design of the outer-core region and of the heat exchanger are therefore recommended.

In conclusion, the PhD research contributed significantly to the numerical investigation of the MSFR, obtaining useful indications for future design optimization activities. The new code package developed constitutes a very valuable addition to the set of multi-physics codes dedicated to this reactor technology available in literature and provides a solid basis for follow-up studies.

Acknowledgments

Doctoral dissertation article: "Development of a high-fidelity multi-physics simulation tool for liquid-fuel fast nuclear reactors", successfully defended on August 24th 2020 at the Delft University of Technology. This research received funding from the Euratom research and training programme 2014–2018 under grant agreement no 661891.

References

- [1] M. Allibert et al., "Molten salt fast reactors", in I. L. Pioro (ed.), *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*, 157–188. Woodhead Publishing, 2016
- [2] M. Tiberga, "Development of a high-fidelity multi-physics simulation tool for liquid-fuel fast nuclear reactors", Ph.D. thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 2020
- [3] J. Kópházi and D. Lathouwers, "Three-dimensional transport calculation of multiple alpha modes in subcritical systems", *Annals of Nuclear Energy*, 50, 167, 2012
- [4] M. Tiberga et al., "A high-order discontinuous Galerkin solver for the incompressible RANS equations coupled to the k - ϵ turbulence model", *Computers & Fluids*, 212, 104710, 2020
- [5] S. Lorenzi et al., "Dynamics of natural circulation in presence of distributed heating: Results of the SAMOFAR CFD simulation campaign", *Proceedings of the 19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-19)*, Brussels, Belgium, March 2022
- [6] M. Tiberga et al., "Results from a multi-physics numerical benchmark for codes dedicated to molten salt fast reactors", *Annals of Nuclear Energy*, 142, 107428, 2020
- [7] H. Rouch et al., "Preliminary thermal-hydraulic core design of the Molten Salt Fast Reactor (MSFR)", *Annals of Nuclear Energy*, 64, 449, 2014

Writer



PhD Marco Tiberga
Postdoctoral researcher
CEA Paris-Saclay
marcotibe91@gmail.com

Radioaktiiviset nuklidit lääketieteessä

Jukka Liukkonen¹, Jari Heikkinen²

¹Säteilyturvakeskus STUK, ²Etelä-Savon sosiaali- ja terveystieteiden kuntayhtymä

Isotooppilääketieteessä käytetään radioaktiivisia aineita elinten ja kudosten toiminnan tutkimisessa diagnostisessa tarkoituksessa ja kudosten tuhoamiseksi hoitotarkoituksessa. Teranostiikassa syövän diagnostiikka ja hoito toteutetaan peräjälkeen. Isotooppilääketieteen kehitys on ollut yllätyksellistä ja innovatiivista. Se on kyennyt mukautumaan nopeasti tieteelliseen kehitykseen ja klinisiin tarpeisiin. Nykyisellään Suomessa tehdään vuosittain yli 40 000 isotooppitutkimusta. Isotooppihoitoja annetaan vuosittain yli 2 500.

In nuclear medicine, radioactive substances are used to study the function of organs and tissues for diagnostic purposes and to destroy tissues for therapeutic purposes. In theranostics, cancer diagnostics and customized treatment are performed successively. The development of nuclear medicine has been surprising and innovative. It has been able to adapt quickly to scientific developments and clinical needs. At present, more than 40 000 nuclear medical examinations are conducted annually in Finland. More than 2 500 therapeutic treatments are given annually.

Isotooppilääketiede on lääketieteen erikoisala, jossa käytetään radioaktiivisia lääkkeitä sairauksien tutkimiseen ja hoitoon. Käytettävät aineet ovat avolähteitä. Isotooppitutkimuksilla voidaan selvittää elinten toiminnallisia ja aineenvaihdunnallisia muutoksia siinä, missä röntgen- ja magneettikuvaus antavat puolestaan tietoa rakenteista. Rakenteelliset muutokset ilmenevät yleensä vasta, kun sairaus on edennyt melko pitkälle. Muutokset elimen toiminnassa voidaan sen sijaan havaita jo huomattavasti aikaisemmin. Fuusiokuvantamisessa eri menetelmin saatuja kuvia yhdistetään.

Muutokset elimen toiminnassa vaikuttavat usein myös radioaktiivisen lääkeaineen jakautumiseen elimessä. Tämä voidaan havaita gammakuvaus, mikä mahdollistaa sairauden varhaisen toteamisen. Positroniemissiotomografia (PET) on mahdollistanut aineenvaihdunnan muutosten tutkimisen. Isotooppidiagnostiikkaa käytetään hyväksi onkologiassa, kardiologiassa, neurologiassa, psykiatriassa ja endokrinologiassa sekä tulehduspesäkkeiden ja biologisten systeemien (lihasten ja luuston, hengityselinten ja ruoansulatuselimistön sekä munuaisten ja virtsateiden) tutkimisessa.

Hematologiassa voidaan käyttää hyväksi myös niin sanottuja laimennusmenetelmiä muun muassa veritilavuuden ja punasolumassan määrittämisessä. Isotooppihoidolla on vakiintunut asema syövän, kilpirauhassairauksien ja niveltulehdusten hoidossa. Teranostiikalla tarkoitetaan isotooppilääketieteen alaa, jossa diagnostiikka ja hoito toteutetaan peräjälkeen. Se perustuu saman molekyylin leimaamiseen sekä diagnostisella (gamma- tai positronisäteilijä) että hoitavalla (alfa- tai beetasäteilijä) isotoopilla.

Isotooppilääketieteen historia

Isotooppilääketieteen kehityksen voidaan katsoa alkaneen 1920-luvulla, jolloin käytettiin radioaktiivisia merkkiaineita lääketieteellis-

sä tutkimuksessa. Merkkiaineena oli suolaliuokseen liuotettu radonkaasu. Kokeilla selvitettiin veren virtausnopeutta. Samoihin aikoihin käytettiin myös radiumia hoitotarkoitukseen suonensisäisesti annettuna. Hiukkaskiihdyttimet mahdollistivat radioaktiivisten merkkiaineiden monipuolisemman tuotannon 1930-luvun lopulla. Toinen nopea kehitysvaihe alkoi toisen maailmansodan jälkeen, kun rakennettiin ensimmäiset rauhansäilytyslaitteet käyttöönsä ydinreaktorit. Isotooppilääketieteen historiaa on esitetty taulukossa 1.

Tällä hetkellä sekä radioaktiivisten lääkeaineiden että kuvantamislaitteiden kehitys on nopeaa: muun muassa detektoritekniikka kehittyi huimaa vauhtia. Samalla tutkimusmäärät kasvavat. Esimerkiksi PET-tutkimusten määrä kasvoi vuosien 2015 ja 2018 välillä yli 45 prosenttia. STUK on tehnyt isotooppitutkimuksia ja -hoitoja koskevia selvityksiä vuodesta 1975, aluksi harvemmin ja vuodesta 1994 lähtien kolmen vuoden välein. Seuraava, valmisteilla oleva selvitys koskee vuotta 2021.

Tutkimuksissa ja hoidoissa käytettävät radionuklidit

Isotooppitutkimuksissa käytettävälle radionuklidille on lukuisia vaatimuksia. Pitkäikäisen radionuklidin käytöstä potilaalle voi aiheutua suuri säteilyannos. Toisaalta, jos puoliintumisaika on lyhyt, radionuklidien kuljetus ja jakelu on taloudellisesti vaikea järjestää. Potilaan säteilyannoksen minimoimisen vuoksi radionuklidin lähettämässä säteilyssä läpäisemättömän säteilyn osuuden täytyy olla pieni ja läpäisevän säteilyn energialtaan sellaista, että se voidaan kollimoida helposti ja havaita tehokkaasti. Lisäksi radionuklidia olisi kyettävä valmistamaan kantajattomana, tai sillä pitäisi ainakin olla hyvin suuri ominaisaktiivisuus. Tunnetuista radionuklideista vain pieni osa täyttää kaikilta ominaisuuksiltaan asetetut vaatimukset.

Käytännön isotooppidiagnostiikassa käytetään useita radionuklideja,

Taulukko 1. Isotooppilääketieteen kehitysvaiheita.

| | |
|-----------|---|
| 1800-luku | Henri Becquerel löysi uraanista salaperäisiä ”säteitä”. Marie Curie nimesi salaperäiset säteet ”radioaktiivisuudeksi”. |
| 1900–1920 | Varhaiset radium- ja radon-sovellukset. |
| 1920–1930 | Radium laskimonsisäiset injektiot ja eritetutkimukset. Ajatus radium-lähteiden sijoittamista kasvaimiin tai niiden läheisyyteen. Ensimmäiset eläinkokeet ²¹⁰ Pb- ja ²¹⁰ Bi-nuklideilla sekä käsivarren verenkierron tutkimukset potilailla. |
| 1930–1940 | Ensimmäiset artikkelit käyttökelpoisten radionuklidimäärien tuotannosta. Eläinkokeissa osoitettiin fosforilla luun kivennäisten uusiutuminen. ³² P- ja ²⁴ Na-nuklideja käytettiin leukemian hoitoon. Kilpirauhasen fysiologian tutkimus käyttäen ¹²⁸ I-nuklidia. Ensimmäinen tutkimus ¹³¹ I:n diagnostisista käyttötavoista potilailla. Havainto ⁸⁵ Sr:n imeytymisestä luun etäpesäkkeissä. ¹⁴ C-merkkiaineen keksiminen. |
| 1940–1950 | Ensimmäinen syklotroni. Ensimmäinen terapeutinen ¹³¹ I-hoito. ¹²⁵ I löytyminen. Kilpirauhassyövän ¹³¹ I-hoito. ³² P-nuklidia käytettiin aivokasvainten havaitsemisessa ilmaisimilla. Verenkiertoelimestön tutkimuksia. |
| 1950–1960 | ¹³¹ I-merkitty seerumialbumiini kaupalliseksi tuotteeksi. Skintillaattorin automatisointi annostelua ja analyysia varten. Positroni-ilmaisimien kehittäminen. B-12-vitamiinin hematologien merkitys keksittiin. Ensimmäinen kuvatalennusjärjestelmä esiteltiin. ¹³² I löydettiin. Teknetiumgeneraattori keksittiin. ¹³³ Xe:a käytettiin keuhkotutkimuksissa. Skintillaatiokameran keksiminen. |
| 1960–1970 | Teknetiumgeneraattorit markkinoille. Munuaisten kuvantaminen radioelohopealla kloorimerodriinilla. Rekonstruktiotomografia, josta myöhemmin kehittyivät SPECT ja PET. Keuhkoperfuusiotutkimukset albumiiniagregateilla. Kolloidien käyttö synovektomissa. Aivojen, kilpirauhasen ja maksan teknetium-tutkimukset. Ensimmäinen ¹²⁵ I-kitti. Ksenonin käyttö keuhkoembolian määrittämisessä. Havainto ⁶⁷ Ga soveltuvuudesta syöpätutkimuksiin. |
| 1970–1980 | Ensimmäinen ^{99m} Tc”instant kit”. Isotooppilääketiede virallistui lääketieteelliseksi erikolisalaksi. Fosfaatit luuston kuvantamiseen. Aivoverenkierron mittaukset elävillä potilailla. Sydänlihaksen skannaus. Ensimmäinen yleiskäyttöinen SPECT. Strontiumin käyttö luustokivun hoitoon. Tallium sydänlihaksen perfuusiotutkimuksiin ja sydäninfarktin diagnosointiin. Vasta-aineet kasvainten kuvantamisessa ja hoidossa. |
| 1980–1990 | Melanooman hoito ¹³¹ I:lla. Ensimmäinen ihmisen neuroreseptorien SPECT-kuvaus. PET-kuvaus. ^{99m} Tc aivojen perfuusiotutkimuksiin. ⁸² Rb (positroniemitteri) sydänlihaksen perfuusiotutkimuksiin. |
| 1990–2000 | ¹¹¹ In infektioitutumukseen. Lukuisia myyntilupia ja hyväksyntöjä isotooppilääketieteen alalla. Lukuisia teknisiä parannuksia SPECT- ja PET-tekniikoihin. Parkinsonin taudin diagnosointi. FDG-PET-tutkimukset laajenivat. |
| 2000– | PET-kuvantamisen kasvu. PET-MK-järjestelmät. Teranostiikka. |

jotka täyttävät tehokkaan kuvantamisen niille asettamat vaatimukset. Kaikki isotooppidiagnostiikassa käytettävät radionuklidit ovat keinotekoisia. Syklotronilla tuotettuja radionuklideja ovat ¹¹C, ¹³N, ¹⁵O, ¹⁸F, ⁵⁷Co, ⁶⁷Ga, ¹¹¹In, ¹²³I ja ²⁰¹Tl. Reaktorilla säteilyttämällä tuotettuja radionuklideja ovat muun muassa ⁵¹Cr, ⁷⁵Se, ⁵⁸Co, ⁵⁹Fe, ¹²⁵I, ¹³¹I. Fission tuotteita ovat esimerkiksi ⁹⁰Y, ¹³¹I ja ¹³³Xe. Lisäksi joitakin radionuklideja tuotetaan generaattorilla pitkäikäisemmästä emonuklidista. Generaattoreista tunnetuin on ^{99m}Mo/^{99m}Tc-generaattori, jolla tuotetaan ^{99m}Tc:ää.

Suomessa käytettiin isotooppitutkimuksissa vuonna 2018 nuklideja: ¹¹C, ¹⁵O, ¹⁸F, ⁵¹Cr, ⁷⁵Se, ^{99m}Tc, ¹¹¹In, ¹²³I, ¹³¹I ja ²⁰¹Tl. Radionuklidilla ^{99m}Tc tehtiin 62 prosenttia tutkimuksista. Positroniemittäreistä käytetyin on ¹⁸F, jolla tehtiin 25 prosenttia tutkimuksista vuonna 2018. PET-merkkiaineet valmistetaan kuvauspäivän tutkimuksia varten ja puoliintumisaika vaikuttaa siihen, voidaanko valmistettua radionuklidia kuljettaa valmistuspaikoista pois ja kuinka pitkän matkan päähän käytettäväksi. Isotooppitutkimuksissa ja -hoidoissa käytettävistä nuklideista, puoliintumisaajoista, tuotannosta ja käyttötarkoituksista on tehty selkoa taulukossa 2.

Isotooppihoidoissa käytettiin vuonna 2018 nuklideja ³²P, ⁹⁰Y, ¹³¹I, ¹⁷⁷Lu ja ²²³Ra.

Teknetium-99m on isotooppitutkimuksissa yleisimmin käytetty radionuklidi. Se on osoittautunut ominaisuuksiltaan lähes ihanteelliseksi. Kemiallisesti teknetium on hyvin reaktiivinen. Sillä voidaan leimata monia elin- ja kudosspesifisiä yhdisteitä, jolloin suuri osa tutkimuksista voidaan tehdä samalla radionuklidilla. ^{99m}Tc:n lähettämä 140 kiloelektronivoltin (keV) gammasäteily sopii hyvin gammakameralla tehtäviin mittauksiin.

Lyhyen puoliintumisaajan takia käyttövalmistusta teknetiumia ei yleensä ole saatavissa, vaan se valmistetaan käyttöpaikalla generaattorin avulla. ^{99m}Tc, joka on metastabiili tila, on emonuklidin ⁹⁹Mo tytärnuklidi. ⁹⁹Mo:n puoliintumisaika on 66 tuntia ja se hajoaa ^{99m}Tc:ksi, jonka puoliintumisaika on kuusi tuntia ja joka hajoaa isomeerisellä siirtymäl-

lä ⁹⁹Tc:ksi lähettäen 140 keV gammasäteilyä, jota käytetään hyväksi isotooppilääketieteessä. Hyvin pitkäikäinen ⁹⁹Tc ($T_{1/2} = 2,1 \cdot 10^5$ vuotta) hajoaa lopulta ⁹⁹Ru:ksi.

Jodi-123:lla leimataan proteiineja ja muita yhdisteitä, jotka voidaan leimata jodilla. ¹²³I aiheuttaa potilaalle pienemmän säteilyannoksen kuin ¹³¹I. Sen valmistaminen on kuitenkin melko kallista siten, että radionuklidinen puhtaus on riittävä. Lisäksi ¹²³I:a on rajoitetusti saatavilla. ¹²³I hajoaa elektronisieppauksella ja lähettää samalla 159 keV gammasäteilyä, joten se sopii energiansa puolesta hyvin käytettäväksi isotooppitutkimuksissa. Sen puoliintumisaika on 13 tuntia ja se hajoaa ¹²³Te:ksi, jolla on erittäin pitkä puoliintumisaika ($T_{1/2} = 1,2 \cdot 10^{13}$ vuotta) ja jonka voidaan siksi katsoa olevan stabiili isotooppi.

Tallium-201:tä, joka käyttäytyy elimistössä samalla tavalla kuin kalium, käytetään sydäntutkimuksissa. Se ei kuitenkaan ole säteilyominaisuuksiltaan kovin hyvä ja ^{99m}Tc:llä leimatut yhdisteet ovat sen nykyisin liki korvanneet. ²⁰¹Tl hajoaa elektronisieppauksella, jolloin emittoituu erilaisia röntgen- ja gammakvantteja, maksimienergian ollessa 167 keV. Sen puoliintumisaika on 73 h ja se hajoaa stabiiliksi ²⁰¹Hg:ksi.

Esimerkkejä muista isotooppilääketieteessä käytettävistä radionuklideista ovat muun muassa ¹¹¹In, ¹³¹I, ⁶⁷Ga, ⁵¹Cr. ¹¹¹In soveltuu verisolujen leimaamiseen. Lisäksi sillä voidaan leimata monimutkaisia orgaanisia molekyyliä, joita puolestaan käytetään tuumoreiden paikantamiseen. ¹³¹I:tä käytetään jonkin verran kilpirauhasen kuvantamiseen ja erityisesti kilpirauhassairauksien radiojodihoitoon. ⁶⁷Ga:ää käytetään pehmytösa-tuumoreiden ja tulehduspesäkkeiden kuvantamiseen. ⁵¹Cr:tä voidaan käyttää muun muassa punasolujen eliniän määrittämiseen ja ⁵⁹Fe:ää selvitettäessä raudan absorboitumista.

PET-kuvantamisessa tyypillisesti käytettäviä positronisäteileviä isotooppeja ovat ¹¹C, ¹⁵O ja ¹⁸F, jotka tuotetaan hiukkaskiihdyttimellä, sekä ⁶⁸Ga, joka tuotetaan generaattorilla.

Taulukko 2. Lääketieteessä käytettyjä ja käytettäviä nuklideja, niiden puoliintumisaikoja, tuotantotapoja ja käyttötarkoituksia [1, 2]. Mukana on myös sädehoito.

| Nuklidi | Tuotantotapa | Puoliintumisaika | Käyttötarkoitus |
|--------------------|----------------------|------------------|--|
| ²²⁵ Ac | syklotroni | 10 vrk | alfahoito |
| ²¹¹ At | syklotroni | 7,2 t | alfahoito |
| ²¹³ Bi | ydinreaktori | 46 min | alfahoito |
| ²¹³ Bi | syklotroni | 46 min | alfahoito |
| ¹³¹ Cs | ydinreaktori | 9,7 vrk | sisäinen sädehoito |
| ¹³⁷ Cs | ydinreaktori | 30 v | verensäteilytys ja sisäinen sädehoito |
| ¹¹ C | syklotroni | 20,38 min | diagnostiikka, PET |
| ⁵¹ Cr | ydinreaktori | 28 vrk | verisolujen leimaus |
| ⁵⁷ Co | syklotroni | 272 vrk | diagnostiikka |
| ⁶⁰ Co | ydinreaktori | 5,27 v | sädehoito, sterilointi |
| ⁶⁴ Cu | syklotroni | 13 t | diagnostiikka, PET, syöpähoito |
| ⁶⁷ Cu | syklotroni | 2,6 vrk | sisäinen sädehoito |
| ¹⁶⁵ Dy | ydinreaktori | 2 t | nivelsairauksien hoito |
| ¹⁶⁹ Er | ydinreaktori | 9,4 vrk | nivelsairauksien kivunhoito |
| ¹⁸ F | syklotroni | 1,83 t | diagnostiikka, PET |
| ⁶⁷ Ga | syklotroni | 78 t | diagnostiikka |
| ⁶⁸ Ga | syklotroni | 68 min | diagnostiikka, PET |
| ⁶⁸ Ge | syklotroni | 271 vrk | generaattorissa ⁶⁸ Ga tuotantoon |
| ¹⁶⁶ Ho | ydinreaktori | 26 t | maksasyövän mikropallohoito |
| ¹¹¹ In | syklotroni | 2,8 vrk | diagnostiikka |
| ¹²³ I | syklotroni | 13 t | diagnostiikka (kilpirauhanen) |
| ¹²⁴ I | syklotroni | 4,2 vrk | diagnostiikka, PET |
| ¹²⁵ I | ydinreaktori | 60 vrk | sisäinen sädehoito, diagnostiikka |
| ¹³¹ I | ydinreaktori, fissio | 8 vrk | kilpirauhassyövän hoito ja kuvantaminen, diagnostiikka |
| ¹⁹² Ir | ydinreaktori | 74 vrk | sisäinen sädehoito |
| ⁵⁹ Fe | ydinreaktori | 46 vrk | raudan aineenvaihdunnan tutkimus |
| ^{81m} Kr | syklotroni | 13 s | diagnostiikka |
| ²¹² Pb | ydinreaktori | 10,6 t | alfahoito |
| ¹⁷⁷ Lu | ydinreaktori | 6,7 vrk | sisäinen sädehoito, kuvantaminen |
| ⁹⁹ Mo | ydinreaktori, fissio | 66 t | teknetiumin tuotanto generaattorissa |
| ¹³ N | syklotroni | 9,97 min | diagnostiikka, PET |
| ¹⁵ O | syklotroni | 2,03 min | diagnostiikka, PET |
| ¹⁰³ Pd | ydinreaktori | 17 vrk | sisäinen sädehoito |
| ³² P | ydinreaktori | 14 vrk | verisairauden (polysytemia vera) hoito |
| ⁴² K | ydinreaktori | 12 t | diagnostiikka |
| ²²³ Ra | ydinreaktori | 11,4 t | alfahoito |
| ¹⁸⁶ Re | ydinreaktori | 3,8 vrk | luusyövän kivunhoito |
| ¹⁸⁸ Re | ydinreaktori | 17 t | sepalvaimien beetasäteilytys |
| ⁸² Rb | syklotroni | 1,26 min | diagnostiikka, PET |
| ^{106m} Rh | syklotroni | 2,18 t | hoito (säteilysynovektomia) |
| ¹⁵³ Sm | ydinreaktori | 47 t | luusyövän kivunhoito, eturauhas- ja ritasyöpähoito |
| ⁴⁷ Sc | ydinreaktori | 4,5 t | hoito ja diagnostiikka |
| ⁷⁵ Se | ydinreaktori | 120 vrk | diagnostiikka |
| ²⁴ Na | ydinreaktori | 15 t | diagnostiikka |
| ⁸² Sr | syklotroni | 25 vrk | generaattorissa ⁸² Rb tuotantoon |
| ⁸⁹ Sr | ydinreaktori | 50 vrk | kivunhoito |
| ^{99m} Tc | ydinreaktori | 6 t | diagnostiikka (eluoidaan ⁹⁹ Mo generaattorista) |
| ²⁰¹ Tl | syklotroni | 73 t | diagnostiikka |
| ²²⁷ Th | ydinreaktori | 18,7 vrk | alfahoito |
| ¹³³ Xe | ydinreaktori, fissio | 5 vrk | diagnostiikka |
| ¹⁶⁹ Yb | ydinreaktori | 32 vrk | diagnostiikka |
| ⁹⁰ Y | ydinreaktori, fissio | 64 t | sisäinen sädehoito, nivelkipujen hoito |

Isotooppitutkimukset ja -hoidot

SPECT-tutkimuksessa eli yksifotoniemissiotomografiassa käytetään yleensä kahta gammailmaisinta, jotka pyörivät kohteen ympärillä mitaten jatkuvasti kohteesta tulevaa gammasäteilyä. Näin halutusta elimistön osasta saadaan useita eri kulumista otettuja tasokuvia, joista lasketaan leikekuvia. SPECT-kuvausta käytetään muun muassa sydänsairauksien, syövän ja aivovammojen diagnosointiin.

PET-kuvantamisessa käytetään positronisäteileviä isotooppeja. Positroni on elektronin vastahiukkanen. Sen kantama kudoksessa on noin 1–2 mm. Positronisäteilijän hajotessa vapautunut positroni kohtaa nopeasti väliaineessa elektronin ja hajoaa kahdeksi vastakkaiseen suuntaan (180°) kulkevaksi gammakvantiksi. PET-kameran renkaassa olevat detektorit rekisteröivät näitä tapahtumia, ja niistä saadaan rekonstruoitua leikekuvia merkkiaineen jakautumisesta kehossa. Moderneissa PET-kameroissa detektoriteknikka on digitaalista.

Vuonna 2018 isotooppitutkimusten määrä oli 42 411. Isotooppitutkimuksista 1 196 oli lasten tutkimuksia ja 699 tieteellisiä tutkimuksia. Tutkimusmääriä on seurattu vuodesta 1975 lähtien. 2000-luvulla tutkimusten kokonaismäärä on pysynyt lähes muuttumattomana. Isotooppitutkimusten lukumäärä tuhatta asukasta kohti oli 7,7 vuonna 2018.

Isotooppitutkimusten määrä on kasvanut vuodesta 2015 vuoteen 2018 noin 1,6%. Suurin osa tutkimuksista oli vuonna 2018 kasvainten kuvantamista. Näiden tutkimuksien osuus oli 37,3%. Seuraavaksi eniten tehtiin luuston ja pehmytosien tutkimuksia 20,5% ja verenkiertoelimestön tutkimuksia 16,6%.

PET-tutkimusten lukumäärä vuonna 2018 oli 13 160, sisältäen myös lapsille tehdyt ja tieteelliset tutkimukset. PET-tutkimuksien määrä on lisääntynyt huomattavasti, sillä vuonna 2015 tutkimuksia tehtiin 8973.

Tietokonetomografian (TT) käyttö isotooppitutkimusten yhteydessä on myös lisääntynyt. Vuonna 2018 isotooppitutkimusten yhteydessä tehtiin 21 465 TT-kuvausta, kun vuonna 2015 vastaava määrä oli 15 431 kuvausta. Eri radionuklideilla tehtyjen isotooppitutkimusten määrät ja niiden osuudet kaikista tutkimuksista vuonna 2018 on esitetty taulukossa 3.

Isotooppihoitoja annettiin 2 571 vuonna 2018. Isotooppihoitojen lukumäärä tuhatta asukasta kohti oli 0,47. Vuodesta 2015 vuoteen 2018 isotooppihoitojen määrä on kasvanut noin 21%. Isotooppihoitojen lukumäärät, käytetyt nuklidit ja aktiivisuudet on esitetty taulukossa 4.

Potilaan säteilyannos

Vuonna 2018 isotooppitutkimuksista potilaille aiheutunut kollektiivinen efektiivinen annos oli 216,7 manSv, josta 144,3 manSv aiheutui

Taulukko 3. Eri radionuklideilla tehtyjen isotooppitutkimusten määrät ja niiden osuudet kaikista tutkimuksista vuonna 2018.

| Radionuklidi | Tutkimusten lukumäärä | Osuus tutkimusten määrästä (%) |
|--------------|-----------------------|--------------------------------|
| Tc-99m | 27 105 | 61,8 |
| F-18 | 10 892 | 24,8 |
| I-123 | 2 270 | 5,2 |
| Tl-201 | 458 | 1 |
| Ga-68 | 1 234 | 2,8 |
| I-131 | 272 | 0,6 |
| C-11 | 575 | 1,3 |
| O-15 | 487 | 1,1 |
| Se-75 | 254 | 0,6 |
| In-111 | 48 | 0,1 |
| Cr-51 | 291 | 0,7 |

Taulukko 4. Isotooppihoitojen lukumäärät, käytetyt nuklidit ja aktiivisuudet vuonna 2018.

| Radionuklidi | Isotooppihoito | Keskimäärin käytetty aktiivisuus (MBq) | Hoitojen lukumäärä |
|-------------------|--|--|--------------------|
| ²²³ Ra | Radiolääkehoito, Radium-223 | 4,3 | 255 |
| ³² P | Radiofosforihoito | 150 | 207 |
| ¹³¹ I | Radiojodihoito, kilpirauhaskudos (Liikatoiminta) | 436 | 1152 |
| ¹³¹ I | Radiojodihoito, kilpirauhaskudos (Syöpä) | 2978 | 432 |
| ⁹⁰ Y | Radioyttriumhoito leimatulla vasta-aineella | - | 1 |
| ⁹⁰ Y | Radioyttrium SIRT-hoito | 1488 | 21 |
| ¹³¹ I | Radiojodihoito kromaffiinikudosligandilla | - | 3 |
| ⁹⁰ Y | Nivelen isotooppihoito | 200 | 1 |
| ¹⁷⁷ Lu | Radiolääkehoito, Lutetium-177-DOTA | 7003 | 160 |
| ¹⁷⁷ Lu | Radiolääkehoito, Lutetium-177-PSMA | 7104 | 339 |

radioaktiivisten lääkkeiden käytöstä ja 72,4 manSv TT-tutkimuksista. Efektiiäinen annos kansalaista kohti oli 0,039 mSv, josta radioaktiivisten lääkkeiden osuus oli 0,026 mSv ja TT:n osuus 0,013 mSv. Efektiiäinen annos on kasvanut vuoteen 2015 verrattuna, jolloin se oli 0,037 mSv.

Radioaktiivisten lääkkeiden käytöstä aiheutunut keskimääräinen efektiiäinen annos isotooppitutkimusta kohden oli 3,5 mSv. SPECT-TT- ja PET-TT-tutkimuksissa TT-kuvauksesta aiheutui lisäannosta keskimäärin 1,8 mSv tutkimusta kohti. Radioaktiivisten lääkkeiden aiheuttama keskimääräinen annos on laskenut vuoden 2015 arvosta, joka oli 3,9 mSv. TT-kuvauksen efektiiäinen keskimääräinen annos on puolestaan kasvanut aiemmasta vuoden 2015 arvosta, joka oli 1,1 mSv. Kokonaisuudessaan isotooppitutkimusten aiheuttama kollektiivinen efektiiäinen annos on kasvanut noin kahdeksan prosenttia vuodesta 2015 vuoteen 2018.

Radioaktiivisista lääkkeistä aiheutuneen kollektiivisen annoksen kannalta merkittävimmät yksittäiset tutkimukset Suomessa vuonna 2018 olivat yläkehon ja koko kehon aineenvaihdunnan laaja PET-TT (¹⁸F:lla leimattu FDG) ja luuston gammakuvaus (^{99m}Tc:lla leimatut fosfaatit ja fosfonaatit). Yksityiskohtaiset tiedot isotooppitutkimuksista ja -hoidoista on esitetty STUKin raportissa [3].

Isotooppilääketiedettä koskeva säteilylainsäädäntö

Isotooppilääketiede on lääketieteellistä säteilynkäyttöä, jota koskevat säteilylaki ja siihen liittyvät alemmat säädökset. Säteilyturvakeskuksen säteilylainsäädännön säädös- ja ohjeistopalvelu Sammio sisältää myös isotooppilääketiedettä koskevia vaatimuksia [4].

Kiitokset

Tekijät tahtovat kiittää STUKin pitkäaikaista ylitarkastajaa Helinä Korpelaa asiantuntevista kommentteista artikkelia valmisteltaessa.

Viitteet

- [1] <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/radioisotopes-in-medicine> (toukokuu 2022)
- [2] <https://www.iaea.org/nuclear-science/isotopes/radiopharmaceutical-production> (toukokuu 2022)
- [3] Isotooppitutkimukset ja -hoidot Suomessa vuonna 2018, STUK-B 252.
- [4] <https://sammio.stuk.fi> (toukokuu 2022)

Kirjoittajat



Filosofian tohtori (lääketieteellinen fysiikka)

Jukka Liukkonen

Tarkastaja

Säteilyturvakeskus

jukka.liukkonen@stuk.fi



Filosofian tohtori (lääketieteellinen fysiikka)

Jari Heikkinen

Sairaalafysiikko

Etelä-Savon sosiaali- ja terveyspalvelujen kuntayhtymä

Mikkelin keskussairaala

jari.heikkinen@essote.fi

Fuusioyritysten rahoitus lisääntyy ja tutkimus etenee

Tomas Lindén
Fysiikan tutkimuslaitos

Yksityisten fuusioyritysten lukumäärä on kasvanut muutamiin kymmeneen ja alan kokonaisrahoitus on kasvanut merkittävästi viime vuosien aikana. Muutamilla yrityksillä on perinteisiä energiayhtiöitä rahoittajina, mikä on uutta kehitystä alalla. Commonwealth Fusion Systems, General Fusion, Helion Energy, TAE Technologies, Tokamak Energy ja Zap Energy ovat yrityksiä, joilla on mielenkiintoiset koelaitteistot ja pitkälle tehdyt reaktori-suunnitelmat kunnianhimoisilla aikatauluilla kaupallisten fuusioreaktoreiden kehittämiseksi. Näiden yhtiöiden tilannetta, saavutuksia, tavoitteita ja suunnitelmia kuvataan seuraavassa.

The number of privately funded fusion companies has grown to a few tens and the total funding to the field has increased significantly during the last few years. Some companies have traditional energy companies as investors, which is a new development in the field. Commonwealth Fusion Systems, General Fusion, Helion Energy, TAE Technologies, Tokamak Energy and Zap Energy are companies with interesting experiments and advanced reactor plans with ambitious schedules for developing commercial fusion reactors. The status, achievements, goals and plans of these companies are described in the following.

Rahoitus kasvussa

Suuri osa yksityisrahoitteisista fuusioyrityksistä kuuluu Fusion Industry Association (FIA) -organisaatioon. Tällä hetkellä 26 yritystä on FIA:n varsinaisia jäseniä. FIA teki vuonna 2021 jäsenistönsä keskuudessa kyselytutkimuksen. Selvityksen mukaan kumulatiivinen rahoitus yhtiöille, jotka vastasivat kyselyyn, oli 1,9 GUSD [1]. Vuoden 2021 lopussa alalle myönnetty kokonaisrahoitus yli kaksinkertaistui, kun Helion Energy CFS sai marraskuussa 500 MUSD lisärahoituksen ja Commonwealth Fusion Systems (CFS) sai joulukuussa 1,8 GUSD lisärahoituksen. General Fusionille myönnettiin marraskuussa 130 MUSD lisärahoitus, joten loppuvuodesta myönnettiin yhteensä 2,4 GUSD näille kolmelle yhtiölle. Tämän lisäksi Helion Energy sai lupauksen 1.7 GUSD lisärahoituksesta, jos he saavuttavat seuraavalle koelaitteistolle asetetut tavoitteet. Suurimmat summat tulevat investointiyhtiöiltä, valtiollisilta säätiöiltä sekä erittäin rikkailta yksityishenkilöiltä. General Fusion ja Tokamak Energy ovat ilmoittaneet, että uusia merkittäviä rahoituspäätöksiä on tulossa vuoden 2022 aikana, joten oletettavaa on, että rahoituksen kasvu jatkuu.

Aikaisemmin perinteiset energiayhtiöt eivät ole juurikaan olleet kiinnostuneita fuusiosta, mutta tämä on muuttunut viime vuosina. Cenovus on rahoittanut kanadalaisista General Fusionia. Chevron on rahoittanut yhdysvaltalaisista Zap Energyä. Yhdysvaltalainen CFS on saanut rahoitusta Eni- ja Equinor-yhtiöiltä. Kiinassa ENN-yhtiön Energy Research Institute rahoittaa pallomaisten tokamakien ja Field Reversed Configuration (FRC) -laitteiden tutkimista. Siemens Energy rahoittaa saksalaista Marvel Fusion yhtiötä.

Valtiollista rahoitusta jaetaan muutamissa maissa hankkeille, joilla pyritään nopeuttamaan fuusioenergian saavuttamisen aikataulua. Yhdysvalloissa on ARPA-E-projektin alla myönnetty Alpha-, Bethe-, Gamow- ja Infuse-hankkeiden kautta rahoitusta yksityisille fuusioyrityksille, mutta Yhdysvalloilta puuttuu oma valtiollinen fuusioreaktorin demonstraatioprojekti. Englannissa on Spherical Tokamak for Energy Production (STEP) -hanke, jonka tavoitteena on kaupallisen fuusioreaktorin kehittäminen vuoteen 2040 mennessä. Kiinassa rahoitetaan kansallista fuusiotutkimus ja -kehityshanketta China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR), jonka on tarkoitus valmistua 2035.

Zap Energy

Virtajohtimen oma magneettikenttä vuorovaikuttaa hiukkasten liikkeen kanssa siten, että Lorentzin voiman suunta on radiaalisesti sisäänpäin, ja tätä kutsutaan pinneilmioiksi. Fuusiotutkimuksen alkuaikoina pinneilmioon perustuvat laitteet olivat suosittuja, mutta osoittautui että mutkaepästabiilisuus (Kink instability) ja makkaraepästabiilisuus (Sausage instability) rajoittivat kokeiden suorituskykyä niin paljon, että tutkimus siirtyi tokamak-laitteisiin.

Washingtonin yliopistossa yhteistyössä Lawrence Livermore National Laboratoryn kanssa on toistakymmentä vuotta toiminut Uri Shumlakin johtama tutkimusryhmä, joka on yrittänyt kehittää menetelmää, jolla Z-pinne voitaisiin stabilisoida. He ovat kehittäneet menetelmän, joka perustuu leikkausstabiloimiseen (Shear flow stabilization), jolla he ovat saavuttaneet merkittävästi aikaisempaa pitkäikäisempiä Z-pinne-

plasmapurkauksia. Uuden menetelmän kehittämiseksi ja kaupallistamiseksi on perustettu vuonna 2017 Zap Energy -niminen yhtiö. Zap Energylla on noin 40 henkilöä töissä kolmessa paikassa Seattlessa, Yhdysvalloissa ja se on saanut kerättyä 43 MUSD rahoitusta.

Zap Energyn Z-pinnekoelaitteen Fusion Z-pinch Experiment (FuZE) on toista metriä pitkä lineaarinen laite, joka toimii pulsseissa. Siinä pinneilmio sekä lämmittää että kasvattaa plasman tiheyttä ja pitää sen koossa ilman ulkopuolisia magneetteja, joten se on halpa ja suhteellisen yksinkertainen laite. Laitteen neutronituotto on ideaalioletuksilla verrannollinen plasmavirtaan potenssiin yksitoista [2]! Zap Energy on osoittanut, että neutronit heidän laitteessaan tulevat ydinfuusiosta [3]. FuZE on saavuttanut pinnevirran 500 kA ja ionien lämpötilan $> 2,5$ keV ja elektronien lämpötilan $> 1,5$ keV, kun 1 keV on noin 12 MK. Zap Energy on arvioinut, että $Q=1$ voidaan saavuttaa noin 600 – 700 kA:n pinnevirralla [4].

Fuusioreaktorin suorituskyvyn mittana käytetään kolmituloa, joka on plasman lukumäärätiheyden, lämpötilan ja energian koossapitoajan tulo. Kolmitulolle on raja, kun fuusioenergian tuotto on yhtä suuri kuin plasman häviöt. Deuterium-tritium- eli DT-reaktiolle tämä kolmitulon raja on $3 \cdot 10^{21}$ keVs/m³. FuZE:n tuloksista laskettu kolmitulon arvo ylittää T-3-tokamakkin ennätyksen 1970-luvulta [5]. T-3-tokamakkin tulokset saivat aikanaan plasmafysiikan keskittymään pitkälti tokama-

keihin. Kesällä 2022 käyttöön tulevan FuZE-Q-kokeen tavoite on $Q=1$, eli tuottaa yhtä paljon fuusioenergiaa reaktiosta kuin reaktion aikaansaamiseksi kului.

Zap Energyn tavoitteena on tutkia, miten stabiloitu Z-pinne skaalautuu suurille virroille. Tekninen haaste on saada elektrodien eroosiokestävyys riittävälle tasolle. Zap Energy suunnittelee käyttävänsä DT-reaktiota noin 200 MW termisen tehon reaktorissa, jonka pulssitaajuus olisi 10 Hz. Reaktorissa pinnevirran tulisi olla välillä 1,2 – 1,5 MA. Zap Energyn reaktorissa fuusiosta vapautuva lämpö kerätään talteen sulalla lyijy-litium-metalliseoksella, jolla sitten tehdään höyryä lämmönvaihtimen avulla ja höyryllä tehdään sähköä generaattorilla.

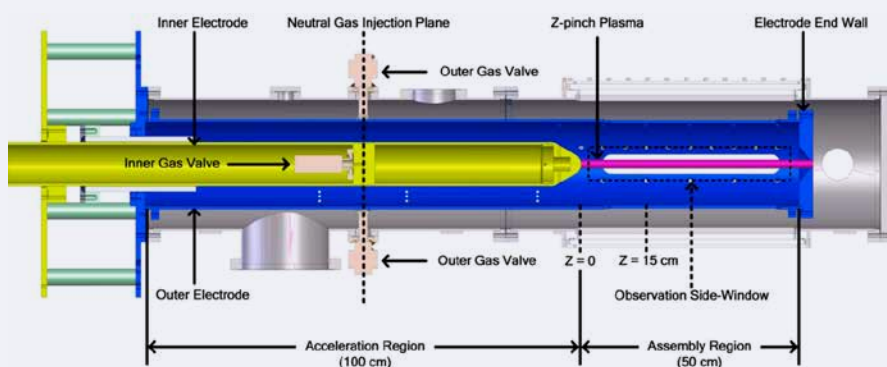
Helion Energy

Myös Helion Energy toimii Seattlessa. Yhtiö on perustettu vuonna 2013 ja sillä on 80 henkilöä töissä. Vuoden sisällä henkilöstön odotetaan kaksinkertaistuvan. David Kirtley on yksi perustajista ja hän johtaa yritystä, joka on kerännyt 578 MUSD rahoitusta. Helion Energyn lineaarisen laitteen molemmista päistä kiihdytetään FRC-plasmoidit, eli sikarin muotoiset ontot omien virtojen avulla itseään koossapitävät plasmät, jotka törmäävät laitteen keskellä. Törmäyksessä syntyy kuumempi ja tiheämpi FRC-plasmoidi, joka kompressoitaa ulkoisilla tavanomaisilla magneeteilla fuusion aikaansaamiseksi. Fuusion tapahtuessa plasma laajenee ja indusoi ulkoisiin magneetteihin suoraan sähköä.

Helion Energy tavoittelee neutronivapaata deuterium-³He-reaktiota. Tarvittava ³He-polttoaine on tarkoitus generoida deuterium-deuterium-reaktion avulla antamalla siinä syntyvän tritiumin hajota ³He:ksi. Neutronivapaan reaktion käyttö helpottaa laitteiston materiaalifysiikan vaatimuksia, ja suora sähkön generointi ilman höyrösykliä ja generaattoria vähentää kustannuksia. Sähköteholtaan Helion Energyn suunnittelema reaktori olisi 50 MW. Kirtleyn mukaan Helion Energy kaavailee pystyvänsä rakentamaan tehtaassaan 20 kpl näitä reaktoreita päivässä, mikä vaatii yli tuhannen ihmisen palkkaamista. Tämä tarkoittaisi 1 GW päivässä! Aika näyttää miten näiden suunnitelmien käy.

Tällä hetkellä he tekevät tutkimusta kuumemman sukupolven Trenta-koelaitteistollaan. Törmäviin plasmoidien nopeudeksi on saatu 300 km/s. Plasman lämpötila on ollut toistettavasti yli 5 keV ja plasman tiheys kompression jälkeen on ollut välillä 10^{21} – 10^{24} /m³. Suurin saavutettu magneettikentän arvo on 7 T. Nämä tulokset julkaistiin SOFE 2021 -konferenssissa [6]. Kesäkuussa 2021 Helion Energy ilmoitti saavuttaneensa Trentalaitteella 100 miljoonan asteen (9 keV) kokonaislämpötilan siten, että ionien lämpötila oli 8 keV ja elektronien lämpötila 1 keV.

Seuraavan sukupolven laite Polaris on rakenteilla ja sen testaaminen on tarkoitus aloittaa tänä vuonna. Pulssien väliaika on Trentalaitteessa 10 min ja se on tarkoitus laskea arvoon 1 s Polariksella. Sitä seuraava koelaitteisto Antares on myös suunnitteilla. Helion

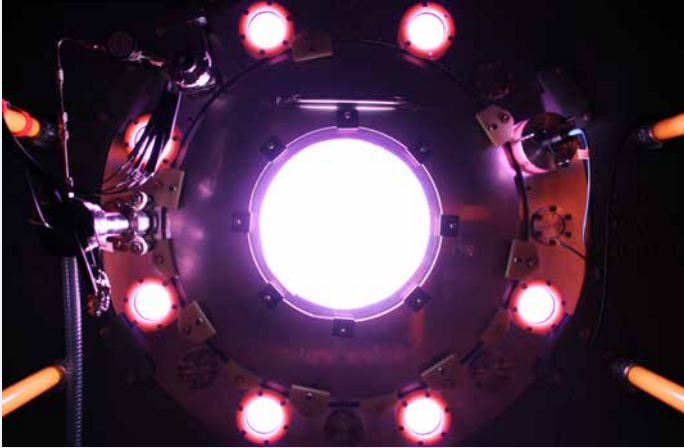


Kuva 1. Kaaviokuva FuZE koelaitteesta (kuva: Zap Energy).



Kuva 2. Zap Energyn 3 m korkean reaktorin malli (kuva: Zap Energy).

Energy väittää voivansa demonstroida pienessä mittakaavassa netto-sähköntuottoa Polaris-laitteella vuonna 2024!

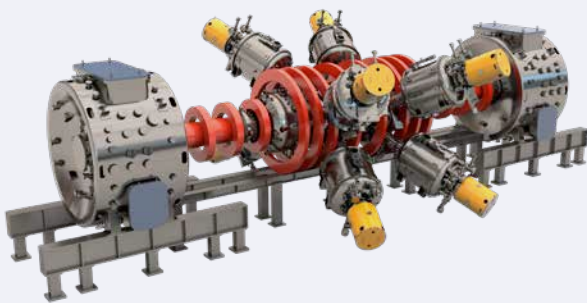


Kuva 3. Tenta-kokeen pääty (kuva: Helion Energy).

TAE Technologies

TAE Technologies -yhtiöllä on nykyään 250 henkilöä töissä ja se on perustettu 1998. Tähän asti TAE Technologies on saanut yli 880 MUSD rahoitusta ja sitä johtaa Michl Binderbauer. TAE Technologies tekee tutkimusta heinäkuussa 2017 valmistuneella Norman (C2-W) FRC-laitteellaan. Norman on pituudeltaan 30 m ja sen magneettikenttä on maksimissaan 0,3 T. Sen rakentaminen maksoi noin 150 MUSD. Helion Energyn ja TAE Technologiesin laitteistot muistuttavat osittain toisiaan, sillä myös Norman-kokeessa generoidaan laitteen kummassakin päädyssä plasmoidit, joiden törmäyksessä syntyy kuumempi ja tiheämpi FRC-plasma.

TAE Technologies pyrkii aikaansaamaan jatkuvatoimisen reaktorin, jossa FRC-plasmaa ylläpidetään neutraalisuihkuilla ja ulkoisilla sähkömagneettisilla kentillä, mutta plasmaa ei kompressoida, kun taas Helion Energyn konsepti on pulssimainen, jossa plasmaa kompressoidaan. Norman-kokeessa plasmoidien törmäysnopeus on kasvanut arvoon 500 km/s. FRC-plasman eliniässä on päästy yli 30 ms arvoon, mikä on maksimi mitä virtalähteet mahdollistavat. Plasman lämpötilassa on päästy arvoon 5 keV, josta elektronien lämpötila on 1 keV. Plasman tiheys on välillä $1-5 \cdot 10^{19}/m^3$ [7]. Normanilla tutkitaan muun muas-



Kuva 4. Seuraava TAE Technologiesin koe Copernicus (kuva: TAE Technologies).

sa plasman koossapitoa ja siinä käytetään aktiivista takaisinkytkentää plasman hallitsemiseksi. Myös Normanin tuloksista laskettu kolmitulon arvo ylittää T-3-tokamakin ennätyksen 1970-luvulta [5].

Googlen kanssa he ovat kehittäneet optometrisen algoritmin, joka yhdistää koneoppimisen menetelmät ja inhimillisen tietämyksen [8]. Algoritmi laskee jokaisen plasmapulssin jälkeen kaksi vaihtoehtoa seuraavan pulssin koeasetuksille, joita asiantuntija vertailee ja valitsee niistä paremman. Tämä muistuttaa tapaa, jolla optikko antaa asiakkaalle kaksi linssivaihtoehtoa, joista valitaan parempi ja sitten prosessia saatetaan jatkaa jonkun toisen linssikorjauksen suhteen. Google saa Normanin tiedot suoraan laskentajärjestelmänsä ja uusien parempien asetusten tulokset ovat plasmafysiikoiden käytettävissä ohjaushuoneessa. Algoritmi yhdistää plasmafysiikoiden ymmärryksen ja tietokoneen tarjoamaan optimointilaskennan, mikä toimii ilmeisesti hyvin.

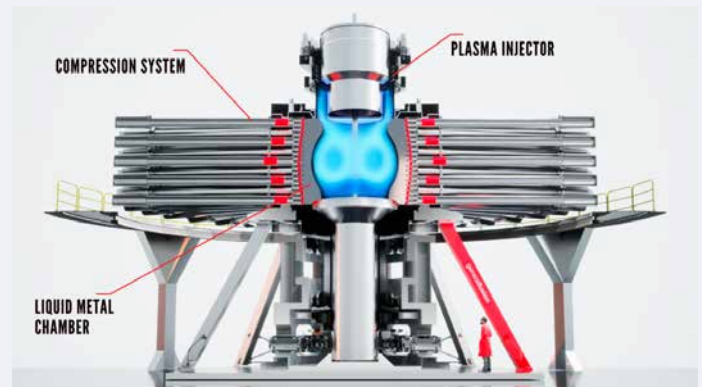
Seuraavan Copernicus-laitteen ensimmäisten komponenttien valmistus aloitettiin vuonna 2021 ja sen rakentamistyöt ovat alkamassa. Suunnitelmana on, että se voidaan ottaa testikäyttöön vuoden 2023 lopussa. Siitä tulee yli 30 m pitkä ja tämänhetkinen kustannusarvio sille on 250 MUSD. Tavoitteena on saavuttaa yli 10 keV:n ionilämpötila ja tehdä suorituskykytutkimusta sillä. Copernicus-laitteen valmistuttua on edelleen tarkoitus jatkaa Norman-laitteen käyttöä.

TAE Technologies -yhtiö suunnittelee rakentavansa Copernicus-laitteen jälkeen 2020-luvun lopulla Da Vinci -laitteen. Da Vinci tulee olemaan ensimmäinen prototyyppireaktori ja yli 45 m pituisessa laitteessa on tarkoitus käyttää neutronivapaata $p^{11}B$ -reaktiota. Sitä seuraavassa Plasma Electric Generator (PEG) -laitteessa on tarkoitus käyttää suprajohtavia magneetteja sekä $p^{11}B$ -reaktiota, mutta siinä voidaan myös käyttää muita reaktioita. Sen sähkötehoksi on kaavailtu 400-500 MW.

General Fusion

General Fusion on toiminut jo kaksikymmentä vuotta, sillä yritys on perustettu vuonna 2002 Kanadan Vancouverissa. Michel Laberge on 160 henkilön yrityksen perustaja ja sen tieteellinen johtaja. Yhtiö toimii jo kolmessa eri maassa eli Kanadassa, Isonsa-Britanniassa ja Yhdysvalloissa, ja se on kerännyt yli 330 MUSD rahoitusta.

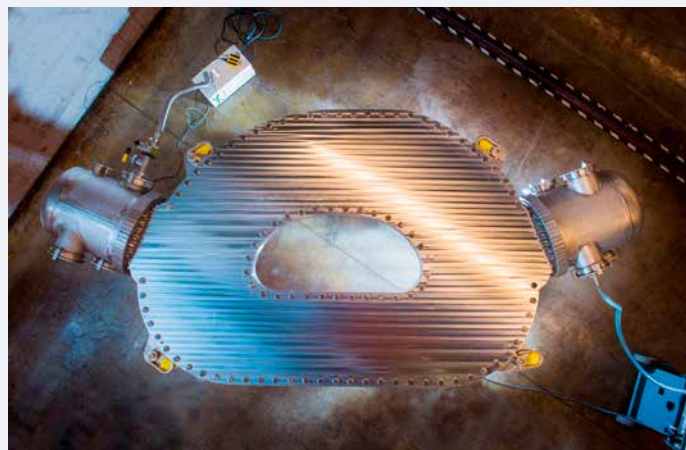
Heidän Magnetized Target Fusion (MTF) -konseptinsa on muuttunut jonkin verran vuosien varrella. Se koostuu pääpiirteittäin plasmainjektorista, mekaanisesta kompressiojärjestelmästä ja sulan lyijy-litium-seoksen kammiosta, jossa plasma puristetaan kasaan. Sulan metallin kammiosta on muuttunut pallomaisesta sylinterimäiseksi. Kompressiojärjestelmä koostuu sadoista höyrykäyttöisistä männistä, joita ohjataan yksittäin elektronisesti, jotta vaadittu aikatarkeus saavutetaan. Plasmainjektori syöttää pallomaisen tokamak-plasmoi-



Kuva 5. General Fusionin reaktorin sydän (kuva: General Fusion).



Kuva 6. General Fusionin Fusion Demonstration Plant (kuva: General Fusion).



Kuva 7. CFS:n 20 T:n HTS-prototyypimagneetti (kuva: Gretchen Ertl, CFS/MIT-PSFC, 2021).

din pyörivän metalliseoksen avaamaan pyörreaukkoon, minkä jälkeen männät kompressoivat sulan metallin avulla plasman kasaan deuterium-tritium-fuusion aikaansaamiseksi. Fuusioreaktiot kuumentavat sulaa lyijy-litiumseosta, jossa reaktion neutronit generoivat myös reaktion tarvitseman tritiumin. Sulan metalliseoksen lämpö viedään lämmönvaihtimen kautta höyrynä turbiinille sähkön generoimiseksi. Osa höyrystä käytetään mäntien liikettä varten seuraavassa pulssissa.

Konseptin etuina on, että mitään erillistä diverttoria ei tarvita, sulaan metalliseokseen ei tule säteilyvaurioita ja sula metalliseos suojaa muita reaktorirakenteita säteilyvaurioilta. Haasteina on kompressoida plasma tasaisesti ja plasman elinikä sekä sulan metalliseoksen ja plasman vuorovaikutukset, koska lyijyepäpuhtaudet plasmassa voivat jäähdyttää sen. Mäntien tiivys voi olla myös vaikea ongelma ratkaista.

Kompressointia sylinterimäisessä kammiossa on tutkittu muun muassa vettä käytävällä laitteistolla. Tämän laitteen ja muiden kokeiden tulokset sekä plasman puristaminen kokoon räjähdapanoksilla ja simuloinnit plasman kompressoinnista ovat antaneet General Fusionille näyttöä heidän menetelmänsä toimivuudesta [9].

General Fusion on kehittänyt alusta lähtien rinnakkain reaktorin eri osia, mutta nyt he aikovat rakentaa Oxfordin lähetyvillä olevan Culham Centre for Fusion Energy (CCFE) viereen ensimmäisen integroidun prototyypin, Fusion Demonstration Plant (FDP), jossa on kaikki tähän asti kehitetyt teknologiat käytössä. FDP:n tavoite on pienentää riskiä ennen varsinaisen prototyypireaktorin rakentamista. FDP:n on tarkoitus valmistua 2025 ja tavoitteena on saavuttaa 10 % kolmitulon rajasta DT-reaktiolle.

General Fusion suunnittelee sähköteholtaan 115 MW:n reaktoria, joka toimii pulssimuodossa taajuudella 1 Hz. General Fusion tekee jo yhteistyötä Bruce Power & Nuclear Innovation Institute yhtiön kanssa löytääksensä sijoituspaikan reaktorille Ontariossa, Kanadassa!

Commonwealth Fusion Systems

MIT:ssä on rakennettu 1970-luvulla alkaen Bruno Coppin aloitteesta vahvan kentän tokamakeja Alcator, Alcator C ja Alcator C-Mod. Nimi Alcator tulee italian sanoista Alto Campo Toro, mikä tarkoittaa vahvan kentän torusta. Dennis Whyte piti MIT:llä kurssia, jossa opiskelijoille annettiin tehtäväksi suunnitella tokamak, jossa olisi vahvoja korkean lämpötilan suprajohtavia (HTS) magneetteja. Tästä työstä syntyi Affordable, Robust, Compact (ARC) tokamak-konsepti, jota kaupallistamaan pe-

rustettiin CFS-yhtiö vuonna 2018. CFS:n tavoitteena on kaupallistaa kompakti vahvan kentän tokamak-reaktori 2030-luvun alussa, jolloin he voivat hyödyntää tokamakien tunnettuja ominaisuuksia ja edetä fysiikan suhteen mahdollisimman pienin riskein. ARC:in tavoitteena on $Q > 10$ ja sähköteho noin 200 MW. ARC:in erikoisuus on, että se suunnitellaan helposti avattavaksi huoltotöiden nopeuttamiseksi ja helpottamiseksi.

Tämän suunnitelman puuttuva palanen oli vaadittava vahvan kentän suprajohtava magneettiteknologia. CFS aloittikin nopean HTS-magneettien kehittämisohjelman. Korkeamman käyttölämpötilan lisäksi HTS-magneeteilla on suurempi kriittinen virtatiheys kuin perinteisillä suprajohteilla, joten niillä voidaan saavuttaa merkittävästi korkeampi kenttä. Vahva kenttä mahdollistaa merkittävästi pienemmän laitteen, mikä pienentää kustannuksia ja nopeuttaa rakentamista.

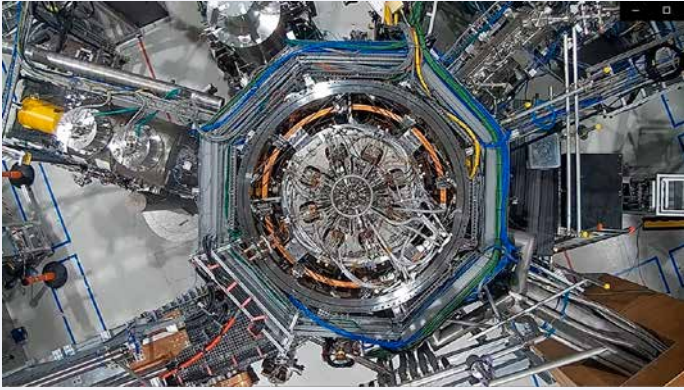
CFS:n magneettikehittämisohjelman tuloksena syntyi syyskuussa 2021 maailman suurin HTS-magneetti, joka on prototyyppi SPARC:ia varten. HTS-magneetti on saavuttanut kentän arvon 20 T. Sen korkeus on 2 m, paino 9265 kg ja se sisältää 265 km HTS-johdinta. Tämä aikaansaannos on merkittävä läpimurto magneettiteknologiassa. HTS-magneettien säteilykestävyys vaikuttaa tokamakien huoltoväliin ja huoltokustannuksiin, joten se on oleellinen kysymys, mitä tutkitaan parhaillaan.

CFS toimii viidessä eri paikassa ja rakentaa omaa kampusta ja tehdasaluetta Devensissä, Massachusettsissa. Vuoden 2021 lopussa henkilöstöä oli 180 henkilöä ja se tulee kaksinkertaistumaan vuoden 2022 aikana, mutta suunnitelmissa on kasvattaa henkilöstö yli tuhanteen henkilöön. Kokonaisrahoituksen määrä on yli 2,05 GUSD.

Kompakti SPARC-tokamak on CFS:n demonstraatiolaitte, jonka on määrä valmistua 2025. SPARC:in terminen teho tulee olemaan 100 MW, ja sen tavoite on aluksi $Q > 2$ ja myöhemmin mahdollisesti $Q > 10$ [10].

Tokamak Energy

Vuonna 2009 perustettu Tokamak Energy on CCFE:n spin-off-yritys, joka toimii Oxfordin lähetyvillä. Tähän mennessä rahoitusta on kertynyt 200 MUSD. Tokamak Energy tavoitteena on myös käyttää HTS-magneetteja, mutta pallomaisessa tokamakissa. Pallomaisten tokamakien etu on parempi koossapito suhteessa tavanomaisiin tokamakeihin, mutta haasteina on, että pallomaisten tokamakien fysiikkaa on tutkittu vähemmän ja tilaa on vähemmän keskussolenoidille, joten riittävälle



Kuva 8. ST40 pallomainen tokamak ylhäältä (kuva: Tokamak Energy).

mekaaniselle lujuudelle ja säteilynkestävyydelle on löydetty ratkaisut [11].

Tokamak Energy on rakentanut muutaman tokamakin: ST25 (2013), ST25-HTS (2015) ja ST40 (2017). ST25-HTS oli ensimmäinen HTS-magneeteista rakennettu tokamak. ST40 on nykyinen tutkimuslaite ja se on suorituskykyisin pallomainen tokamak maailmassa. Siinä on 3 T:n tyyppijäähdytetyt kuparikäämit. Vuoden 2022 maaliskuussa Tokamak Energy ilmoitti saavuttaneensa 100 miljoonan asteen tavoitteensa ensimmäisenä maailmassa pallomaisella tokamakilla. ST40-tokamkia parannellaan, minkä jälkeen tutkimustyö sillä jatkuu. ST40:lla tutkitaan muun muassa vahvan kentän koossapitoa, diverttorivaihtoehtoja, solenoidivapaata käynnistystä ja reaktorikäytön vaatimaa operointia. ST40:ssä käytetään tavallista vetyä, mutta deuteriumia on tarkoitus käyttää mittauksissa tulevaisuudessa.

Tokamak Energylla on oma HTS-magneettien tutkimus- ja kehittämisohjelma. Pieni Demo 3 -magneetti on saavuttanut 24,4 T:n kentän 21 K:n lämpötilassa ja 26,2 T:n kentän 4,2 K:n lämpötilassa. Seuraavana on vuorossa HTS Demo 4, jolla on tarkoitus demonstroida HTS-magneettien käyttöä pallomaisessa tokamak-konfiguraatiossa, mutta ilman varsinaista tokamkia. Konfiguraatio tulee olemaan sama kuin ST25-tokamakissa, mutta 10 T:n kentällä (20 T solenoidin pinnalla).

Tokamak Energy suunnittelee rakentavansa pallomaisen ST-HTS-tokamakin 2020-luvun keskivaiheilla, minkä jälkeen 2030-luvun alussa on tarkoitus rakentaa ensimmäinen pallomainen tokamak-pilottireaktori.

Yhteenveto

Yksityisrahoitteisten fuusioyhtiöiden lukumäärää kasvaa ja uutisia uusista rahoituskerroksista tulee usein. On hyvä asia, että fuusiotutkimuksen kenttä on monipuolistunut viime vuosien aikana, koska se voi mahdollistaa läpimurrot alalla. Muutaman lähivuoden aikana nähdään miten yritykset onnistuvat kunnianhimoisissa suunnitelmissaan ja minikälaisia tuloksia ne pystyvät saamaan. On muistettava, että fuusioyriytysten aikataulut ovat aikaisemmin venyneet, joko fysiikan, teknisten tai rahoitusongelmien takia.

Yritysten kasvaessa pätevän henkilöstön löytäminen tulee jossain vaiheessa haasteeksi, joten plasmafysiikan koulutus on erittäin tärkeä asia. Siinä vaiheessa, kun jokin fuusioyriytys onnistuu demonstroimaan $Q > 1$, niin sen jälkeen rahaa tulee virtaamaan valtavasti alalle ja kehitys tulee nopeutumaan. Onnistuakseen kaupallinen fuusioenergiantuotto vaatii myös lisensointiin liittyvien ongelmien ratkaisua ja tätä asiaa on ruvettu pohtimaan Isossa-Britanniassa ja Yhdysvalloissa.

Lisää samasta aiheesta

- T. Kurki-Suonio, Kilpajuoksu kohti fuusiotuottoa käynnistynyt - kilpailijoilla eri matkat ja tavoiteajat, ATS Ydintekniikka 1, 2021, s. 31-36.
- W. J. Nuttal et al., Commercialising Fusion Energy - How small businesses are transforming big science, IOP Publishing 2020, Bristol, UK.
- T. Lindén, Vierailulla fuusioyriytöksissä Kaliforniassa, ATS Ydintekniikka, 2, 2019, s. 25-28.

Viitteet

- [1] Fusion Industry Association & UK Atomic Energy Authority, The global fusion industry in 2021.
- [2] U. Shumlak, Z-pinch fusion, Jour. Appl. Phys., 127(20):200901, 2020.
- [3] J. M. Mitrani et al., Thermonuclear neutron emission from a sheared-flow stabilized Z-pinch, Phys. Plas. 28, 112509, 2021.
- [4] B. A. Nelson & B. Levitt, Sheared Flow Stabilized Z Pinch Performance Scaling, ARPA-E Fusion Review Meeting, April 26-27, 2022.
- [5] S. Wurzel & S. Hsu, Progress toward Fusion Energy Breakeven and Gain as Measured against the Lawson Criterion, arXiv:2105.10954, julkaistaan Phys. Plas. 2022.
- [6] D. Kirtley, Vacuum vessel and divertor design and results of 16 month operation of the Trenta Magneto-Inertial Fusion prototype, <https://www.youtube.com/watch?v=wHirIGXIJ38>, julkaistaan Trans. Plas. Sci. November 2022.
- [7] M. Binderbauer, Progress and Next Steps at TAE, 42nd FPA Annual Meeting, December 6, 2021.
- [8] E. A. Baltz, et al., Achievement of Sustained Net Plasma Heating in a Fusion Experiment with the Optometrist Algorithm, Sci Rep 7, 6425 (2017).
- [9] D. Brennan et al., A stable corridor for toroidal plasma compression, 2021 Nucl. Fusion 61 046047.
- [10] A. J. Creely et al., Overview of the SPARC tokamak, J. Plasma Phys. (2020), vol. 86, 865860502.
- [11] A. E. Costley & S. A. M. McNamara, Fusion performance of spherical and conventional tokamaks: implications for compact pilot plants and reactors, 2021 Plasma Phys. Control. Fusion 63 035005.

Kirjoittaja



FT Tomas Lindén
Projektipäällikkö
Fysiikan tutkimuslaitos
Tomas.Linden@Helsinki.FI
(kuva: Eva Godenhielm)

Kaukolämpöä pienydinvoimalla? Pääkaupunkiseudun asukkaiden näkemykset osallistumisesta ja päätöksenteosta

Matti Kojo^{1,2}, Niina Kiviluoma³, Tapio Litmanen³

¹ LUT-yliopisto, ²Tampereen yliopisto, ³Jyväskylän yliopisto

Pienydinvoimaa on esitetty yhdeksi vaihtoehdoksi pohdittaessa pääkaupunkiseudun kaukolämpöratkaisuja. Pienydinvoima edellyttää paikallista hyväksyttävyyttä. Asukaskyselyn mukaan 46 % vastaajista suhtautuu myönteisesti mahdollisen pienydinvoimalan käyttöönottoon omassa asuinkunnassaan, mutta pienydinvoima ei ole suosituimpien kaukolämmön tuotantomuotojen joukossa. Ydinenergialain mukaista kuulemismenettelyä tulee uudistaa, jotta se vastaisi asukkaiden odotuksiin yhteissuunnittelusta. Kaukolämpöhankkeissa tulee kiinnittää huomiota vaihtoehtojen vertailuun.

Small modular reactors (SMRs) have been presented as one option for district heating in the Helsinki Metropolitan area. According to a resident survey, 46% of respondents would be willing to accept an SMR unit in their own municipality, but SMRs are not among the most popular options for district heating. Public hearing procedures under the Nuclear Energy Act need to be reformed to meet residents' expectations for collaborative planning. In district heating projects, attention should be paid to the comparison of alternatives.

Energiayhtiöt, teknologian tutkijat ja muutamat poliitikot ovat nostaneet esiin mahdollisuuden tuottaa kaukolämpöä pienydinvoimalla. Pienydinvoimasta on tehty useampia valtuustoaloitteita pääkaupunkiseudulla vuosina 2017–2021.

Sosiaalisen hyväksyttävyyden puuttuminen voi kuitenkin estää pienydinvoimaloiden käyttöönoton [1]. Energiategollisuus ry ryhtyi seuraamaan kansalaisten suhtautumista pienydinvoiman käyttöönottoon vuonna 2018 osana vuosittaista energia-asennekyselyään [2]. Ensimmäinen kaupunkikohtainen asukaskysely toteutettiin Jyväskylän yliopiston rahoituksella marraskuussa 2021 [3].

Pääkaupunkiseudun kaukolämmöntuotanto on riippuvainen fossiilisista polttoaineista¹, joiden käytöstä syntyy paljon CO₂-päästöjä. Helsingin, Espoon ja Vantaan kaupunkien tavoitteena on olla ilmastoneutraaleita vuoteen 2030 mennessä. Kaukolämmön päästöillä on suuri merkitys tavoitteen saavuttamisessa.

Kaupunkien näkemykset pienydinvoimasta eroavat. Vantaa linjasi tammikuussa 2022, ettei hiilinegatiiviseen lämmöntuotantoon tarvita tällä hetkellä pienydinvoimaa. Espoo puolestaan aikoo selvittää edellytykset pienydinvoiman sijoittamiseksi kaupungin alueelle. Helsingin energiayhtiö Helen Oy seuraa sarjatutettujen pienoisreaktoreiden kehitystä. Ydinvoimalla tuotetun kaukolämmön haasteina yhtiö piti miljardiluokan lämmön siirtoputki-investointia ja sähköntuotantokapasiteetin vähene-

mistä. Myös nykyisten suojavyöhykkeitä koskevien säädösten nähtiin rajoittavan merkittävästi pienreaktoreiden käyttöä kaupunkialueella.

Tässä artikkelissa tarkastelemme miten pääkaupunkiseudun suomenkieliset asukkaat suhtautuvat kaukolämmön tuotantoon pienydinvoimalla ja miten pienydinvoiman kannattajat ja vastustajat haluaisivat osallistua hanketta koskevaan päätöksentekoon. Tiedot perustuvat marraskuussa 2021 toteutettuun asukaskyselyyn [3].

Asukaskysely

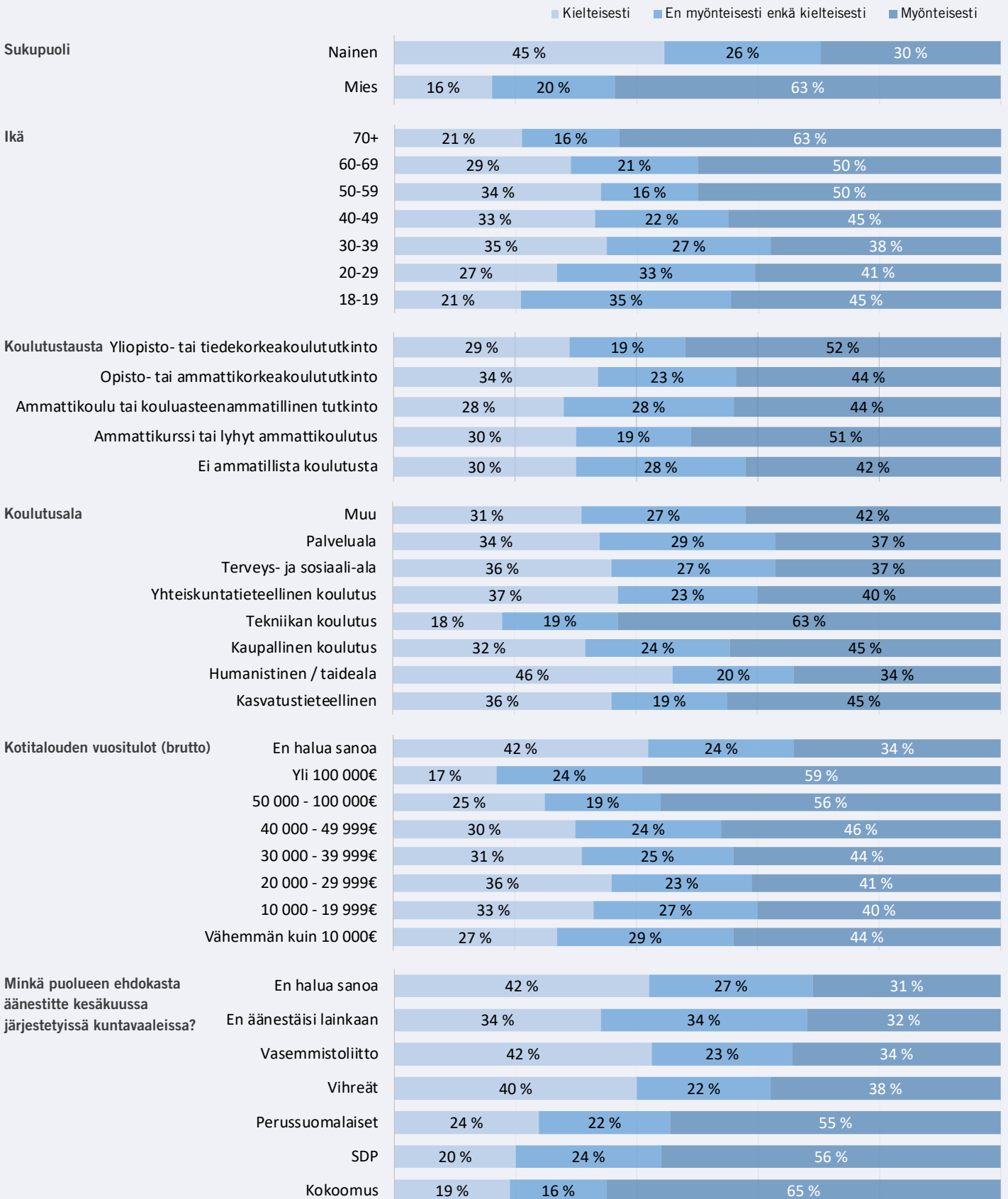
Suomenkielinen asukaskysely toteutettiin Innolinkin kuluttajaneelin verkkopohjaisena survey-kyselynä 10.–16.11.2021 Helsingin, Espoon ja Vantaan asukkaille (N = 1600). Vastausprosentit olivat 36 % Helsingissä, 44 % Espoossa ja 35 % Vantaalla. Virhemarginaali on 2,4 %.

Vastaajat olivat iältään 18–75-vuotiaita. Ikäryhmäjakaumat noudattelivat pääosin pääkaupunkiseudun ikäjakaumaa, vaikka 60–69-vuotiaiden ikäluokka oli aineistossa hieman yliedustettu (17 % tilastoidun 12 % sijaan) ja yli 70-vuotiaiden ikäluokka oli puolestaan hieman aliedustettu (11 % tilastoidun 15 % sijaan). Vastanneista oli miehiä 50 % ja naisia 50 %, mikä edusti alueen tilastoitua sukupuolijakaumaa. Ylimpien tuloluokkien ja korkeasti koulutettujen osuus kyselyyn vastanneista oli merkittävästi suurempi kuin näiden luokkien osuus pääkaupunkiseudun väestöstä.

¹ Helsingissä maakaasun, kivihiilen ja öljyn yhteenlaskettu osuus kaukolämmön tuotannosta oli 89% vuonna 2020. Espoossa maakaasun ja kivihiilen yhteenlaskettu osuus oli 61%. Vantaalla maakaasun, kivihiilen ja turpeen yhteenlaskettu osuus oli 16%. [4]

TIEDE JA TEKNIikka

Taulukko 1. Miten suhtautuisitte pienydinvoimalan käyttöönottoon omissa asuinkunnassanne? Suhtautuminen pienydinvoimaan vuoden 2021 asukas-kyselyssä (N=1600).



Suhtautuminen pienydinvoimalan käyttöönottoon omassa asuinkunnassa

Pääkaupunkiseudun suomenkielististä asukkaista lähes puolet (46 %) suhtautuu myönteisesti mahdollisen pienydinvoimalan käyttöönottoon omassa asuinkunnassaan. 31 % suhtautui kielteisesti ja 23 % ilmaisi, ettei suhtaudu asiaan myönteisesti eikä kielteisesti (Taulukko 1).

Suhtautuminen on vahvasti sukupuolittunutta. Naisista pienydinvoimaloiden käyttöönottoon suhtautuu kielteisesti 45 % ja miehistä 16 %. Myönteisesti pienydinvoimaloihin suhtautuu naisista vain 30 %, kun taas miehistä jopa 63 %.

Ikäryhmistä kaikkein myönteisimmin pienydinvoiman käyttöönottoon omassa asuinkunnassa suhtautuivat kolme vanhinta ikäluokkaa. Yli 70-vuotiaista vastaajista 63 % ja 60-69-vuotiaista sekä 50-59-vuotiaista puolet suhtautuu myönteisesti. Vähäisintä myönteisyys on 30-39-vuotiaiden keskuudessa. Tämän ikäryhmän keskuudessa on myös eniten kielteisyttä (35 %).

Koulutustausta vaikutti tuloksiin siten, että eniten kannatusta oli yliopisto- ja tiedekorkeakoulututkinnon (52 %) ja ammattikurssin tai lyhyen ammattikoulutuksen (51 %) suorittaneissa, kun taas kielteisimpiä (34 %) olivat opisto- ja ammattikorkeakoulututkinnon omaavat vastaajat.

Pienydinvoimaa kannattavat eniten vastaajat, joiden kotitalouden yhteenlasketut bruttovuositulot ovat korkeimmat. Ryhmässä 50 000 – 100 000 euroa myönteisyys on 56 % ja vielä myönteisempiä (59 %) ovat yli 100 000 euron ryhmään kuuluvat vastaajat. Kielteisimpiä olivat vastaajat, joiden kotitalouden vuositulot ovat välillä 20 000 – 29 999 euroa (36 %).

Puoluetaustoittain vahvin kannatus löytyy kokoomusta (65 %), SDP:tä (56 %) ja perussuomalaisia (55 %) viime kuntavaaleissa äänestäneiden vastaajien keskuudesta. Eniten kielteisyttä on vasemmistoliittoa (43 %) ja vihreitä (40 %) äänestäneiden keskuudessa. Pienydinvoimaan kielteisesti suhtautuvia on merkittävä osuus (42 %) myös heissä, jotka eivät halunneet ilmaista äänestyskäyttäytymistään viime kuntavaaleissa.

Pienydinvoima ei ole suosittu energiamuoto kaukolämmön tuotantoon

Asukaskyselyssä esitettiin myös kysymys ”Miten suhtaudutte kaukolämmön tuottamiseen eri energiamuodoilla?” (Taulukko 2). Arvioitavana oli 13 eri energiamuotoa.

Esitettyjen vaihtoehtojen joukossa pienydinvoima oli vasta kymmenenneksi suosituin energiamuoto. Vastaajista 46 % suhtautui kaukolämmön tuotantoon pienydinvoimalla myönteisesti, 28 % kielteisesti ja 26 % vastasi, ettei suhtaudu myönteisesti eikä kielteisesti.

Suosittumpana keinoon, erilaisten hukkalämpöjen hyödyntämiseen, vastaajista suhtautui myönteisesti 81 % ja vain 3 % kielteisesti. Selkeät ”inhokit” olivat kivihiili ja turve.

Pienydinvoiman kannattajilla ja vastustajilla erilaiset käsitykset päätöksenteosta ja osallistumisesta

Kyselyssä tiedusteltiin myös vastaajien suhtautumista kansalaisosallistumiseen, viestintään ja päätöksentekoon tilanteessa, jossa omaan asuinkuntaan suunniteltaisiin pienydinvoimalaa. Kaikista vastaajista 88 % oli samaa mieltä väittämästä ”Jos asuinkuntaani suunnitellaan pienydinvoimalaa, niin mielestäni asukkaita tulee informoida hankkeesta”. Vastaajat pitivät myös asukkaiden mahdollisuutta osallistua yhteissuunnitteluun tärkeänä: 71 % oli asiaa koskevasta väittämästä samaa mieltä (Taulukko 3).

Enemmistö vastaajista (57 %) kannatti kunnallisen neuvoo-antavan kansanäänestyksen järjestämistä, jos omaan asuinkuntaan suunnitellaan pienydinvoimalaa. Vain alle puolet (42 %) oli valmis jättämään päätök-

senteon kaupunginvaltuustolle. Joka neljäs vastaaja oli eri mieltä ja joka kolmas ei ollut muodostanut kantaansa.

Vaikka lopullista päätöksentekovaltaa epäroitiin antaa valtuustolle, niin vastaajien enemmistöllä oli kuitenkin selvä periaatteellinen näkemys siitä, että jos omaan asuinkuntaan suunnitellaan pienydinvoimalaa, niin kaupunginvaltuustolla pitää olla oikeus hyväksyä tai hylätä hanke. Vastaajista 65 % oli väittämästä samaa mieltä ja vain 10 % eri mieltä.

Pienydinvoiman kannattajien ja vastustajien osallistumista ja päätöksentekoa koskevissa mielipiteissä oli eroja. Puolet kannattajista on sitä mieltä, että kaupunginvaltuusto voi päättää pienydinvoimahankkeesta, kun vastustajista tätä mieltä on vain 29 %. Kannattajista vähän alle puolet haluaa neuvoo-antavan kunnallisen kansanäänestyksen, vastustajista lähes 70 %.

Kyselyssä tiedusteltiin myös vastaajien luottamusta tiettyihin toimijoihin ja toimijaryhmiin pienydinvoimaloita koskevassa valmistelussa ja päätöksenteossa (Taulukko 4). Enemmistö vastaajista piti Säteilyturvakeskusta (70 %), VTT:tä (66 %) ja yliopistoja (59 %) luotettavina. Luottamus STUKiin on ollut vahvaa aiemminkin vastaavan kaltaisissa kyselyissä [2, 5]. Vastaajat kokivat vähiten luottamusta kunnallishallintoa, Posivaa ja tiedotusvälineitä kohtaan. Yleisesti ottaen ympäristöjärjestöt koettiin luotettavampina toimijoina kuin energiayhtiöt. Tämä on havaittu kansallisellakin tasolla [2].

Taulukossa 5 luottamusta toimijoihin on tarkasteltu nettoluovun avulla, joka on saatu laskemalla yhteen erittäin paljon ja melko paljon luottavien prosentiosuudet yhteen ja vähentämällä siitä melko vähän ja erittäin vähän luottavien prosentiosuuksumma [2].

Sekä pienydinvoiman vastustajat että kannattajat luottavat eniten STUKiin ja VTT:hen. Vastustajien ja kannattajien välinen vertailu osoittaa selviä eroja vähiten luotettujen toimijoiden osalta. Vastustajat luottavat vähiten ydinvoima-alan ”vanhoihin” yhtiöihin (Fortum, TVO ja Posiva), kannattajat puolestaan tiedotusvälineisiin, ympäristöjärjestöihin ja kunnallishallintoon.

Lopuksi: pienydinvoimahankkeissa tarvitaan vuorovaikutteista ja osallistavaa päätöksentekoa

Asukkaiden näkemykset pienydinvoimaloista ja osallistumisesta niitä koskevaan suunnitteluun ja päätöksentekoon vaikuttavat hankkeiden paikalliseen hyväksyttävyyteen.

Vuosikymmenien ajan ydinvoimasektori on tukeutunut Decide, Announce, Defend (DAD) -lähestymistapaan [6, 7]. Lähestymistavassa ”ongelma” ja sen ”ratkaisu” on määritelty etukäteen, jolloin kansalaisosallistuminen hankkeisiin on koskenut pelkistetysti vain sitä, mihin esitetyistä kunnista ydinlaitos sijoitetaan. Kansalaiskeskustelussa on haluttu vertailla myös erilaisia energiantuotantotapoja.

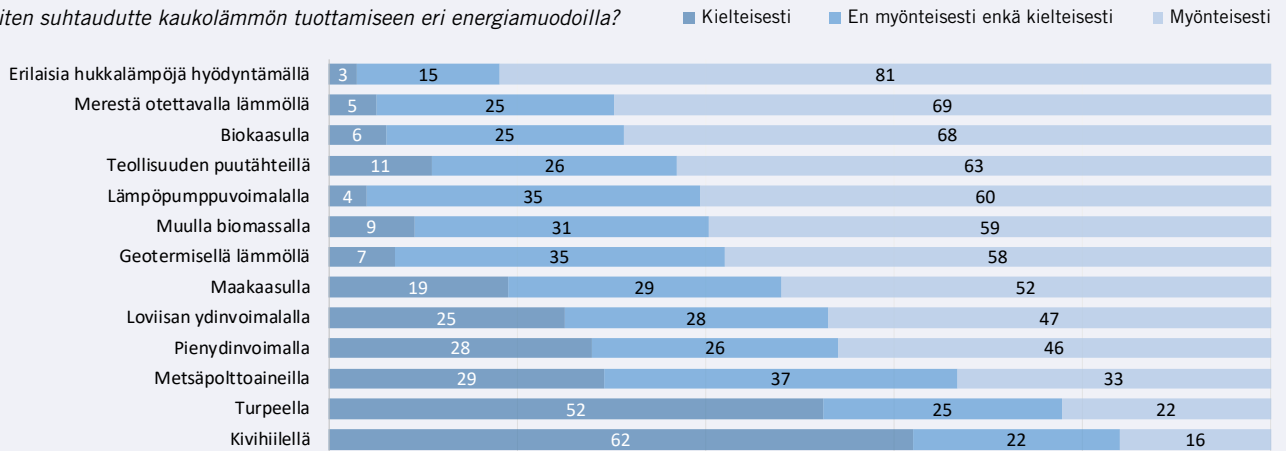
Suomessa ydinvoimalaitokset on sijoitettu pieniin kuntiin, kauas suurimmista asukaskeskuksista, kun taas pienreaktoreita oltaisiin sijoittamassa lähelle tiheää asutusta. Nykyisten ydinvoimaloiden merkitys pienen ”isäntäkunnan” taloudelle on ollut huomattava. Suuressa kaupungissa pienydinvoimala olisi laihempi kuntataloudellinen ”porkkana”, mikä tulee vaikuttamaan kunnan ja yhtiön välisiin suhteisiin.

Mitä aiemmista kiistoista voisi oppia? Yksi keskeinen valinta on ongelman määrittelyn laajuus. Otetaanko kansalaisosallistumisen ja yhteissuunnittelun lähtökohdaksi kaupungin kaukolämmöntuotantovaihtoehtojen ja niiden vaikutusten vertailu vai rajataanko ongelma ja sen ratkaisu jo etukäteen vain yhteen teknologiaan ja laitoksen sijoituspaikan valintaan?

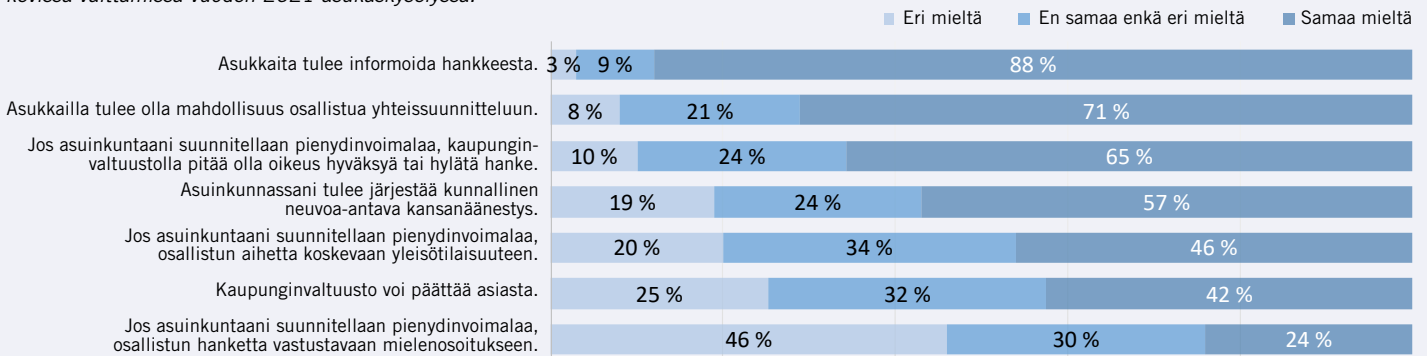
Asukaskysely osoitti, että pienydinvoima ei ole suosittujen kaukolämmön tuotantovaihtoehtojen joukossa. Mahdollisissa pienydinvoimahankkeissa onkin odotettavissa vilkasta keskustelua vaihtoehtoista.

TIEDE JA TEKNIikka

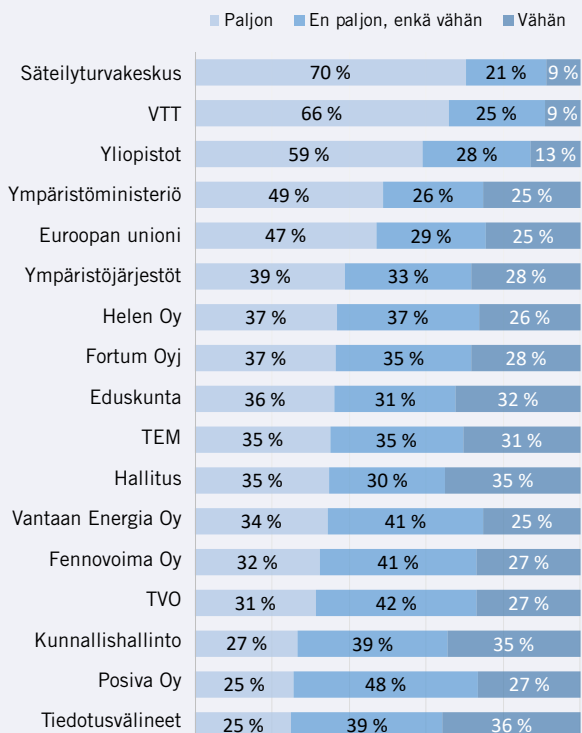
Taulukko 2. Miten suhtaudutte kaukolämmön tuottamiseen eri energiamuodoilla?



Taulukko 3. "Jos asuinkuntaani suunnitellaan pienydinvoimalaa, niin mielestäni...". Asukkaiden näkemykset kansalaisosallistumisesta ja -viestintää koskevissa väittämässä vuoden 2021 asukaskyselyssä.



Taulukko 4. Missä määrin luotatte seuraaviin tahoihin pieniä ydinreaktoreita koskevassa valmistelussa ja päätöksenteossa?



Taulukko 5. Missä määrin luotatte seuraaviin tahoihin pieniä ydinreaktoreita koskevassa valmistelussa ja päätöksenteossa? Erialaisten toimijoiden luottamuksen nettoluuvut suosituimmuusjärjestyksessä yleisellä tasolla, sekä pienydinvoimaa vastustavien ja pienydinvoimaa kannattavien vastaajajoukkojen keskuudessa vuoden 2021 asukaskyselyssä.

| Kaikki vastaajat | Netto | Pienydinvoiman vastustajat | Netto | Pienydinvoiman kannattajat | Netto |
|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|
| Säteilyturvakeskus | 61 | Säteilyturvakeskus | 40 | Säteilyturvakeskus | 76 |
| Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy | 56 | Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy | 30 | Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy | 74 |
| Yliopistot | 46 | Ympäristöjärjestöt | 25 | Yliopistot | 62 |
| Ympäristöministeriö | 24 | Yliopistot | 23 | Euroopan unioni | 42 |
| Euroopan unioni | 22 | Ympäristöministeriö | 19 | Fortum Oyj | 33 |
| Ympäristöjärjestöt | 11 | Euroopan unioni | -6 | Helen Oy | 32 |
| Helen Oy | 10 | Hallitus | -17 | Vantaan Energia Oy | 32 |
| Vantaan Energia Oy | 9 | Eduskunta | -21 | Teollisuuden Voima Oyj | 29 |
| Fortum Oyj | 8 | Helen Oy | -22 | Ympäristöministeriö | 27 |
| Fennovoima Oy | 5 | Työ- ja elinkeinoministeriö | -22 | Fennovoima Oy | 26 |
| Työ- ja elinkeinoministeriö | 5 | Vantaan Energia Oy | -24 | Työ- ja elinkeinoministeriö | 23 |
| Teollisuuden Voima Oyj | 4 | Tiedotusvälineet | -25 | Eduskunta | 21 |
| Eduskunta | 4 | Fennovoima Oy | -25 | Posiva Oy | 20 |
| Hallitus | 0 | Kunnallishallinto | -27 | Hallitus | 11 |
| Posiva Oy | -1 | Fortum Oyj | -28 | Kunnallishallinto | 5 |
| Kunnallishallinto | -8 | Teollisuuden Voima Oyj | -32 | Ympäristöjärjestöt | 1 |
| Tiedotusvälineet | -11 | Posiva Oy | -33 | Tiedotusvälineet | -1 |

Enemmistö (71 %) vastaajista katsoi, että asukkaiden tulee voida osallistua yhteissuunnitteluun pienydinvoimahankkeessa. Ympäristövaikutusten arviointimenettelyssä yhteissuunnittelu on mahdollista. Menettelyn tavoitteena on myös vertailla vaihtoehtoja kattavasti.

Ydinenergiain mukaisessa periaatepäätöksessä arvioidaan ydinlaitoksen rakentamista yhteiskunnan kokonaisedun näkökulmasta. Lähtökohtaisesti kokonaisedun käsite mahdollistaa laajan keskustelun, mutta nykyisen ydinenergiain mukaiset periaatepäätösvaiheen kuulemistilaisuudet ovat kankeita. Kuulemistilaisuudet eivät ole vuorovaikutteisia, koska ministeriö sallii vain yksittäisiä puheenvuoroja, ei osallistujien välistä keskustelua [8].

On oletettavaa, että pienydinvoimahankkeissa yhteissuunnittelua odottavat asukkaat tulevat pettymään, jos osallistuminen toteutetaan ydinenergiain vuosikymmeniä vanhojen osallistumiskäytäntöjen mukaisesti.

Joustamaton menettely on jo aiheuttanut muutoksia kuulemisen käytännön järjestelyissä. Periaatepäätösvaiheessa kuulemistilaisuuksia on jatkettu virallisen osion jälkeen epävirallisella keskusteluosiolla, jossa osallistujille on tarjottu mahdollisuus keskustella vapaamuotoisemmin, esittää kysymyksiä viranomaisten ja yhtiön edustajille ja saada myös vastauksia [9].

Epäviralliset osallistumisjärjestelyt eivät kuitenkaan poista tarvetta päivittää lakia ja uudistaa menettelytapoja esimerkiksi yhteistoiminnallisia menettelyjä käyttämällä [10].

Ydinenergiain kokonaisuudistus avaa mahdollisuuden päivittää kansalaisosallistumista ohjaavat ajattelumallit ja käytännöt ydinvoimasektorilla. Uudistus voisi vähentää menettelytapoja koskevaa epäoikeudenmukaisuutta, mikä on koettu ongelmaksi ydinvoimahankkeiden päätöksenteossa.

Viitteet

- [1] Mignacca, Benito, Locatelli, Giorgio, Sainati, Tristano: Deeds not words: Barriers and remedies for Small Modular nuclear Reactors. *Energy* 206, 118-137. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118137>, 2020.
- [2] Energiateollisuus ry: Suomalaisten energia-asenteet 2020.
- [3] Kojo, Matti, Kiviluoma, Niina, Litmanen, Tapio, Husu, Hanna-Mari, Mika, Kari, Lehtonen, Markku: Opponents and supporters of SMR. The case of district heating in the Helsinki Metropolitan area. Poster. Open Business Day 2022, 3-4 May 2022, Helsinki. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:jyu-202204272433>.
- [4] Juuti, Petteri: Näin energiayhtiöt aikovat korvata ilmastonmuutosta kiihdyttävät polttoaineet – tarkoittaako muutos kaupunkilaisille isompaa lämmityslaskua? Yle, 1.7. <https://yle.fi/uutiset/3-12001184>, 2021.
- [5] Vilhunen, Tuuli, Kojo, Matti, Litmanen, Tapio, Taebi, Behnam: Perceptions of justice influencing community acceptance of spent nuclear fuel disposal. A case study in two Finnish nuclear communities, *Journal of Risk Research*, DOI: 10.1080/13669877.2019.1569094, 2019.
- [6] Blowers, Andrew: *Legacy of Nuclear Power*. Routledge. 2016.
- [7] Bergmans, Anne, Sundqvist, Göran, Kos, Drago, Simmons, Peter: The participatory turn in radioactive waste management: deliberation and the social-technical divide, *Journal of Risk Research*, <https://doi.org/10.1080/13669877.2014.971335>, 2014.
- [8] Nurmi, Anna, Kojo, Matti ja Litmanen, Tapio: Yleisökysymyksiä vailla vastauksia. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen laajennushankkeen yleisötilaisuudet Eurajoella 2008–2009. Yhteiskuntatieteiden ja filosofian laitos. Sosiologian työraportteja. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-39-3753-9>, 2009.
- [9] Kojo, Matti, Litmanen, Tapio: Hallinnan keinot YVA-menettelyn yleisötilaisuudessa: Puheenjohtajan roolit vuorovaikutuksen edistämiseksi. Teoksessa Elina Kestilä-Kekkonen & Tapio Raunio (Toim.), *Valta ja politiikka: Juhlakirja Ilkka Ruostetsaarelle hänen 60-vuotispäivänään*. Helsinki: Valtiotieteellinen yhdistys ry (s. 101-130), 2018.
- [10] Peltonen, Lasse, Faehnle, Maija, Saarikoski, Heli, Hannonen, Piritta, Kotilainen, Juha, Litmanen, Tapio, Luoma, Emma, Peltola, Taru: Ohuesta osallistumisesta yhteiseen ongelmanratkaisuun. Tiekartta kohti yhteistoiminnallisempaa Suomea. Suomen Ympäristökeskus. <http://hdl.handle.net/10138/338545>, 2021.

Kirjoittajat



YTT Matti Kojo
Tutkijaopettaja
LUT-yliopisto
matti.kojo@lut.fi



YTK Niina Kiviluoma
Tutkimusavustaja
Jyväskylän yliopisto
niina.k.kiviluoma@jyu.fi



Professori Tapio Litmanen
Jyväskylän yliopisto
tapio.a.litmanen@jyu.fi

The VTT Centre for Nuclear Safety – Underway!

Wade Karlsen
VTT Technical Research Centre of Finland

In the ten years since the decision was made to renew the research infrastructure for radioactive materials at VTT, the new facility has been designed, built, equipped and successfully taken into use in support of nuclear safety research in Finland. While the facility can be considered fully underway, as a research laboratory, it will continue to evolve going forward as well.

Kymmenen vuotta sitten päätettiin investoida VTT:n säteilevän materiaalin tutkimusinfrastruktuurin uudistamiseen. Tässä ajassa suomalaisen ydinturvallisuustutkimuksen tarpeisiin on suunniteltu, rakennettu, varustettu ja otettu onnistuneesti käyttöön kokonaan uusi laboratorio, Ydinturvallisuustalo. Vaikka toiminta on jo täydessä käynnissä, tutkimuslaitoksena sen kehitys yhä jatkuu.

A mere decade ago, some visionaries sparred with some realists around the future of irradiated materials testing and analysis in Finland. A lot of important reactor pressure vessel surveillance testing had been done over the preceding several decades, along with other materials investigations, and the occasional more exotic handling of open radioactive sources. However, the aging, outdated facilities, and decision to decommission the adjoining test reactor brought pressure to consider the future more seriously.

There were arguably better facilities in other European countries, capable of doing similar tasks, and more. Nevertheless, at the same time, a clear advantage was enjoyed by the proximity of the facilities, and the readiness and capability of the staff to react quickly and flexibly when the need arose. And there was the coming of Olkiluoto 3, maybe a 4th, and then the Decision in Principle for the new player Fennovoima, so nuclear was not going away any time soon in Finland.

Big decisions, no looking back

In May 2012, the Finnish Ministry of Employment and the Economy (so-named at that time) published a report of the Committee for Nuclear Energy Competence in Finland, which not only addressed personnel resources, but also included research infrastructure competencies [1]. It specifically endorsed the construction of a whole new radiological facility, with the additional goal of gathering most of the VTT Nuclear Safety research personnel scattered around the Otaniemi campus, into a single, compact facility called the VTT Centre for Nuclear Safety (CNS).

Some rounds of vigorous discussions with the national stakeholders ultimately led to an agreement prompting VTT to go forward with such a new facility. The design of the new facility began in earnest in 2012. Later that year, I was brought on board to coordinate the technical realization of this total renewal of the radiological laboratory infrastructure. My main qualification for the task at the time seemed mainly to be an inability to turn down a new challenge!



Figure 1: VTT's new hot cells were installed in the newly completed Centre for Nuclear Safety in 2017. By the middle of the following year, they too had been approved by STUK for operation.

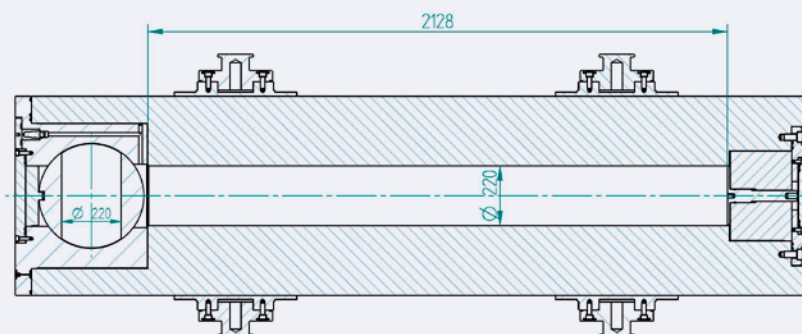


Figure 2: The A-type certified radioactive materials transportation cask VTT procured with investment aid was custom-designed with internal cavity dimensions to contain the variety of different surveillance test specimen package designs expected of the reactors existing or being constructed in Finland.



As described in an earlier ATS Ydintekniikka article [2], the design process of the VTT CNS went forward rapidly, endeavouring to accommodate the current reactor safety and nuclear waste management activities, while also looking to future R&D needs of a larger nuclear sector in Finland, with more contemporary workplace safety expectations. Site preparations began in January 2014, and by the summer of 2015, the red-brick facade of the new laboratory emerged to harmonize with the surrounding buildings of the Otaniemi campus.

Two years after the site work was initiated, the office wing of the new facility was ready for move-in, and in early May 2016, the laboratories were also turned over to VTT for equipping. Simultaneously, fully-shielded hot cell facilities foreseen to be at the core of the facility, were designed and fabricated with a subcontractor. They were installed in the new building in 2017 (Figure 1). By the middle of the following year, they too had been approved by STUK for operation. They were described in a presentation at SYP2019 [3]. With the facilities constructed, equipped, and approved for operation, the subsequent years have been spent in taking them fully into use, building up the capabilities and competences of the personnel in the new environment, as well as expanding the activities while adapting to the continuous evolution of R&D needs.

Radioactive materials transport cask

In addition to the hot cell facilities themselves, investment aid enabled a number of pieces of equipment to be procured as a part of the infrastructure renewal. Many of these were procured simultaneous to building and equipping the new laboratory, being either moved into the readied laboratories from a temporary location, or directly installed into the new laboratory, or into the completed hot cells.

The last remaining large investment made in this manner was the procurement of a custom-designed, Type-A certified, radioactive materials transport cask and its associated transportation and handling gear. This was ordered at the end of 2019, and following some unexpected delays, was ultimately delivered in the middle of 2021. Besides the cask and its lifting gear, the delivery included two IP-2 certified ISO-containers, primarily to house and transport the cask and its auxiliaries, but also suitable for IP-2 transportations more generally.

The cask is shown in Figure 2. The internal cavity of the cask was sized to accommodate all of the known surveillance specimen pack-

ages at the time, coming from all four types of plants foreseen to be employed in Finland, so it is over 2 meters long and 22 cm in diameter. With an internationally recognized certification, the cask will also be employable in shipments from other countries as well, opening a whole range of new opportunities.

Continued investments by VTT

Having fully utilized the investment aid allocation for equipment procurements, VTT is demonstrating its own commitment to ensuring that the radiological laboratory stays abreast of the latest technology, by making a variety of further investments since then. As shown in Table 1, the portfolio of device procurements beyond those made with investment aid has benefited all of the main activities in the laboratory, from the hot cells for irradiated structural materials testing, to the radiochemistry laboratories, and including the specialty laboratories for iodine filter testing, bentonite clay studies and aerosol experiments.

Ten years after first deciding to pursue the building of a totally new laboratory, activities in the new facilities are fully underway. From a technical aspect, the equipment and devices are fully operational. An important milestone illustrating this was when the first proper surveillance test series was taken into the new facility. The shipment was received from the plant, unloaded directly into the shielded facility, and the surveillance specimens, dosimetry coupons, and thermal monitors were recovered by machining open their container in a fully remote fashion. The in-cell CNC device custom manufactured by Finnish company Metecno, shown in Figure 3, was instrumental in that operation. Thanks to the modern hot cells, the total worker dose accrued for those activities was zero!

Currently there are over fifty different projects on-going that utilize some aspect of the infrastructure in the CNS, comprising contract services and publicly-funded research, involving both domestic and international clients and financiers. As such, the full utilization of the new facility is now limited more by the availability of personnel resources than by a lack of adequate tools.

While continuing to increase the overall number of active users of the facility, efforts still continue to make the facilities and their capabilities more widely known to the global nuclear community as a whole. The completed facility has been visited by thousands of people, from organizations around the globe, receiving positive feedback from the likes of IAEA Director General Rafael Grossi and U.S. NRC Commissioner



Figure 3: An important milestone was the successful fully-remote recovery of a test specimen series from the surveillance package of one of the domestic plant operators. The in-cell CNC machining station positioned inside the heavily-shielded reception hot cell, made by Finnish company Metecno Oy, was a key device in the precise operation.

Annie Caputo, as well as fellow research scientists, experts and clients in the topics of study in the CNS.

One last hurdle

Since growth is expected primarily from international activities, the rational handling of the waste associated with normal research and testing activities in the radiological facility is the final issue being tackled for the CNS operations. As described in the Final Report of the National Cooperation Group on Nuclear Waste Management [4], “the activities in the facilities can produce radioactive wastes for which no individual customer can be readily identified, to whom the wastes could be returned. Additionally, returning wastes abroad is relatively expensive and labour-intensive, and not possible or practical in all cases”. Other countries are also mainly reluctant to accept such returned wastes.

For that reason, VTT is preparing a tender for execution in 2022 with the aim to secure a domestic waste repository. When a service provider is selected and the appropriate agreements made, it is foreseen that the waste handling of the facility’s operational waste can be substantially streamlined and standardized to a single waste acceptance criterion.

Looking to the future

With more-or-less normal operations now underway in the CNS, the overall reach of activities is being broadened to further grow the order books. This is illustrated by several substantial new investments that are currently underway. Firstly, to meet the requirements of an important international client, while expanding the capacity for fracture toughness testing, an order has been placed for an Instron servo-hydraulic testing machine and associated environmental chamber. The device will be the first new device procured for installation in an in-cell position, which will actually expand the capacity of the hot cell further, for greater throughput. Simultaneously, additional tools for the device are being ordered to enable low-cycle fatigue testing of irradiated materials, to meet requirements brought by entering the fusion materials testing arena.

Fusion materials research and testing are also in mind with a proposal under preparation for procuring a Time-of-flight Secondary Ions Mass Spectrometer. If the device procurement carries through, it will be

installed in the CNS laboratory so that tritium-containing Be-materials could be tested for fusion reactor first wall tile applications. The device has broad applications in other nuclear materials research, and across many other sectors at VTT as well.

Another strategy to increase the utilization of the CNS facilities is by consolidation and collaboration with VTT’s other research and testing activities. Closely related to the irradiated nuclear materials research, the water chemistry and autoclave testing activities for non-irradiated nuclear and conventional materials are moving to a space made available in the CNS laboratory. More creatively, synergy is also being leveraged by joint procurement of a new inductively-coupled plasma mass spectrometer to replace the current one located in the CNS dedicated clean-room facility. The new device will also be used to support silicon-wafer quality assurance activities of VTT’s Micronova laboratory, which have formerly had to send test materials to the U.S. for analysis.

Topics also continue to evolve, and while reactor materials testing and characterization continues to be an important activity, applications involving SMR technology and additively manufactured materials are growing in interest. Likewise, while bentonite and other final repository-related research still continues, topics more related to fuel itself and to nuclear facility decommissioning are getting increased attention in the project portfolio.

Indeed, considering that just over a decade ago the CNS site was still a quiet, wooded corner of the Otaniemi campus, I am looking forward to see where things will be in another decade from now!

Table 1: Updates to CNS laboratory equipment portfolio made by VTT in recent years.

| Device | Capabilities and primary purpose |
|--|---|
| Focused Ion Beam addition to SEM | For precision in situ sectioning of specimens in the analytical scanning electron microscope, to explore surface crack propagation, oxide layers, etc. Also, for extraction of specimens for analytical transmission electron microscopy. |
| Instrumented pendulum impact tester calibrator | Used for calibration of impact testing device to maintain accredited testing capabilities for, e.g., surveillance specimens, since use of instrument with radioactive materials prevents use of external calibration services. |
| Gas analyzer | For quantifying from trace amounts up to high contents of hydrogen, oxygen and nitrogen in metals via quadrupole mass spec. (for isotopic differentiation) and thermal conductivity detection. |
| Gamma spectrometer | For determining the gamma-emitting nuclide constituents of a sample, essential for reactor dosimetry, and useful in a variety of radiochemistry experiments and in rad-waste characterization. |
| Aerosol generator | Generator and accompanying photomultiplier are used in the iodine laboratory set-up employed for testing the filters of the exhaust stacks of NPP containments. |
| Aerosol monitors | For continuous and simultaneous online measurement of aerosol mass concentration at inlet and outlet of processes, as a part of overall aerosol laboratory activities such as severe accident emissions modelling. |
| Radiochemistry specimen pyrolyzer | For evaporating and oxidizing difficult solid specimens in order to measure radionuclide concentrations such as tritium from substances such as the concrete of decommissioned radiological or nuclear facilities. |
| Mobile Raman spectroscope | For investigating molecular chemical composition in real-time, such as in uranium-oxide dissolution experiments for second phase identification. Fiber-optic cable detector also enables testing in oxygen free environments. |
| Gradient Ion Chromatography System | Used on its own for anion analysis, or connected to the HR-ICP-MS (in the CNS clean-room facility), for full ionic speciation analyses. Ion speciation analyses can separate and quantify different molecular versions of a compound. |
| Heating pack for triaxial loading cell | For the existing triaxial loading cell, this addition enables thermomechanical testing of clays, such as bentonite as backfill for spent nuclear fuel storage canisters in a deep underground repository. |
| Syringe pump and environmental chamber | For compaction of powders with controlled moisture contents, to produce clay specimens such as bentonite for subsequent thermomechanical testing. |

References

- [1] Report of the Committee for Nuclear Energy Competence in Finland, Chair Riku Huttunen, Secretaries Jorma Aurela, Eriika Melkas until 3/2011 and Jaana Avolahti from 3/2011. Published by Ministry of Employment and the Economy, May 2012, ISSN 1797-3562, ISBN 978-952-227-600-1, pp. 299.
- [2] W. Karlsen, "The VTT Centre for Nuclear Safety, up-grading Finnish nuclear safety research", ATS Ydintekniikka 3/2016 pp. 42-45.
- [3] W. Karlsen, "New VTT Hot Cells in Operation", Suomalaisen Ydintekniikan Päivät 2019 – SYP2019. <https://ats-fns.fi/images/files/2019/syp2019/presentations>.
- [4] Linda Kumpula, Outi Slant, "Final Report of the National Cooperation Group on Nuclear Waste Management", published by the Ministry of Economic Affairs and Employment TEM, reports 2019:45, <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-441-9>.

Writer



PhD Wade Karlsen

Principal Scientist and acting Technology Manager
 VTT Technical Research Centre, Ltd
 wade.karlsen@vtt.fi

Diplomityö: Atomistinen sekoittuvuus volframissa käyttäen kahden lämpötilan molekyyldynamiikan mallia

Iisa Saunamäki

Tulevien fuusioreaktoreiden materiaalit altistuvat reaktorissa korkeille säteilyannoksille aiheuttaen materiaaleihin säteilyvaurioita. Näiden karakterisointi on oleellinen osa fuusiorelevanttien materiaalien tutkimusta. Vuosisadan tutkimuksista riippumatta elektronien virittymisen vaikutus säteilyvaurioiden muodostumiseen on edelleen merkittävä ratkaisematon kysymys. Tässä työssä mallinnetaan säteilyn aiheuttamia törmäyskaskadeja atomististen simulaatioiden avulla. Simulaatioissa käytetään uutta mallia, joka erityisesti ottaa mukaan elektroniset energiahäviöt erittäin epätasapainoisissa kaskadiprosessissa. Atomien sekoittumisen on arveltu olevan herkkä elektronisen ja atomijärjestelmän väliselle kytkennälle. Täten atomistinen sekoittuvuus volframille on analysoitu simulaatioiden pohjalta ja verrattu vastaaviin kokeellisesti saatuihin arvoihin, jotta malli voidaan validoida. Mallia käyttäen saadut arvot atomistisesta sekoittuvuudesta ovat hyvin lähellä kokeellisia arvoja. Atomien sekoittuvuuksien analysointi eri elektroni-fononi-kytkennöillä osoittaa sen, että kytkennän vahvuus ei vaikuta merkittävästi tuloksiin.

Plasma-facing materials in fusion reactors are exposed to high doses of irradiation, causing radiation damage to the materials. The characterization of the damage is crucial for the research of fusion-relevant materials. However, a major outstanding open question remains about how electronic excitation affects the radiation damage process. The project involves performing atomistic simulations of radiation-induced collision cascades, using a newly developed model that explicitly accounts for electronic energy losses in the highly non-equilibrium cascade process. The level of atomic mixing is conjectured to be sensitive to the coupling between electronic and atomic systems. In this work, the atomic mixing was analyzed from the simulations and compared to experimentally derived values for tungsten, to estimate the model's accuracy. The values of atomic mixing obtained by using the model are in a good agreement with the experimental values. We employ two different functions for the coupling between the atomic and electronic systems, displaying different strengths of the electron-phonon coupling. Our results show that the strength of the electron-phonon coupling does not significantly affect the predicted level of atomic mixing.

Nykyisen kasvavan energian kysynnän [1] myötä vaihtoehtoisia tapoja tuottaa energiaa tutkitaan jatkuvasti. Lisäksi ympäristöhuolet lisäävät väestön kiinnostusta vähäpäästöisiin energiamuotoihin. Fuusioenergia on potentiaalinen ratkaisu tuottamaan vähäpäästöistä energiaa, sillä se ei vapauta hiilidioksidia tai muita haitallisia kasvihuonekaasuja ilmakehään. Jotta voidaan tuottaa turvallista, taloudellisesti kannattavaa sekä ympäristöstävällistä energiaa fuusioenergian avulla, tarvitaan kehittyneitä materiaaleja, jotka kestävät korkeita lämpötiloja, säteilyä sekä termomekaanista rasitusta [2]. Tällä hetkellä ei ole olemassa kokeelli-

sia laitoksia, jotka pystyvät täysin kopioimaan tulevaisuuden fuusioreaktoreiden äärimmäisiä olosuhteita [3]. Tämän vuoksi laskennallinen tutkimus kehittyneiden materiaalien etsinnässä on erityisen tärkeää.

On tärkeää tietää, miten materiaalit käyttäytyvät tulevaisuuden fuusioreaktoreissa, sillä ionisoiva säteily vaikuttaa materiaalien fysikaalisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin, usein haitallisesti aiheuttaen karkaisua, haurastumista tai venymistä. Tällaiset ominaisuudet ovat vahingollisia korkean säteilytason ympäristöissä kuten ydinlaitoksilla. Vaurioiden suoraan kokeellisesti tarkastelu on haasteellista [4], sillä ensisijainen

säteilyvaurio tapahtuu pikosekunneissa [5]. Tämän vuoksi laskennallinen mallinnus on erityisen tärkeää, jotta voidaan ymmärtää sekä enustaa miten säteily vaikuttaa materiaaleihin. Materiaaleissa tapahtuvia säteilyvaurioita voidaan laskennallisesti tutkia molekyyliidynamiikan simulaatioiden avulla, joissa yksittäisten atomien liikehdintää analysoidaan. Ne ovat ideaalisia tutkimaan säteilyvaurioita, jotka syntyvät heti ensimmäisen atomisiirtymätapahtuman jälkeen [6] korkeaenergisien partikkelin käynnistämänä.

Nykyajan korkean suorituskyvyn omaavat ja massiivisesti rinnakkaiset laskenta-alustat pystyvät miljoonien atomien molekyyliidynamiikan simulaatioihin. Nämä simulaatiot ovat kuitenkin riippuvaisia useista erilaisista teorioista, ja tämän vuoksi on erittäin tärkeää vahvistaa enustukset vertaamalla simuloituja tuloksia kokeellisiin. Esimerkiksi perinteisissä molekyyliidynamiikan simulaatioissa kaikki atomit kuvataan pistepartikkeleina ilman sisäistä rakennetta tai elektroneja [6]. Tämän vuoksi elektronien virittymisten aiheuttamat energiahäviöt eivät suoraan kuulu näihin simulaatioihin. Näiden lisäys on kuitenkin tärkeää, sillä niillä on merkittävä negatiivinen vaikutus partikkelien hidastusprosessissa.

Elektronien virittymisestä aiheutuneen energiahäviön vaikutus voidaan lisätä simulaatioihin erilaisten klassisten molekyyliidynamiikan mallien laajennuksella. Tässä työssä malli, joka erityisesti ottaa huomioon elektronisia energiahäviöitä törmäyskaskadiprosessissa sekä elektroni-fononi-kytkennän lähellä tasapainoa, on testattu laskemalla simulaatioiden pohjalta atomistinen sekoittuvuus ja verrattu sitä kokeellisesti saatuihin tuloksiin.

Atomistisen sekoittuvuuden käyttäminen elektronisten energiahäviöiden tarkkuuden mittaamiseen

Työssä on toistettu Kim et al. [7] kokeellinen atomistinen sekoittuvuus laskennallisesti, jotta saadaan validoitua käytetyn molekyyliidynamiikan mallin soveltuvuus törmäyskaskadisimulaatioihin volframissa. Atomistisella sekoittuvuudella viitataan atomien pysyvään siirtymään pois niiden alkuperäiseltä hilapaikalta atomien välisten törmäysten myötä. Metalleilla atomistinen sekoittuvuus tapahtuu pääosin törmäyskaskadin lämpöpiikkivaiheessa [8]. Volframissa esimerkiksi 150 keV törmäyskaskadissa lämpöpiikki asettuu 200 femtosekunnin [6] kohdalle ja sen kesto on pikosekuntien luokkaa.

Kun atomistinen sekoittuvuus tapahtuu pääosin lämpöpiikissä, sen kestolla on positiivinen vaikutus atomistiseen sekoittuvuuteen. Tämä tarkoittaa sitä, että atomistista sekoittuvuutta voidaan hyödyntää määrittelemään elektronisten energiahäviöiden tarkkuutta molekyyliidynamiikan simulaatioissa, sillä ne vaikuttavat suoraan lämpöpiikkiin. Täten tässä työssä atomistista sekoittuvuutta on käytetty työn molekyyliidynamiikan mallin validoimiseen.

Työssä on simuloitu mallia käyttäen molekyyliidynamiikan simulaatiota 75 pikosekunnin ajan energioilla 40 eV - 200 keV. Jokaiselle eri energian molekyyliidynamiikan simulaatiolle lasketaan keskiarvoinen atomien siirtymän toinen potenssi, jota tarvitaan atomistisen sekoittuvuuden laskussa. Atomien siirtymän toinen potenssi voidaan laskea seuraavaa kaavaa hyödyntäen:

$$R^2 = \sum_i (r_i(t) - r_i(t=0))^2$$

Keskiarvoinen atomien siirtymän toinen potenssi saadaan jakamalla saman energian eri simulaatioiden atomien siirtymien toinen potenssi simulaatioiden määrällä. Jotta pystytään interpoloimaan, jokaisen eri energian keskiarvoisten siirtymien toiset potenssit sovitaan seuraavaan funktioon:

$$R^2(E) = \frac{aE^{1+c}}{b^c E^c}$$

Tässä E on simulaation energia ja a, b sekä c ovat sovituksen parametrit. Lopulta atomistinen sekoittuvuus voidaan laskea hyödyntäen seuraavaa kaavaa:

$$Q_{sim} = \int_0^{E_0} \frac{R^2(E)n(E), dE}{6n_0E_{Dn}}$$

$R^2(E)$ on simulaatioista saatu keskiarvoinen atomien siirtymien toinen potenssi interpoloituina eri energioille, $n(E)dE$ on rekyylispektri, joka kuvaa keksimääräistä määrää ensisijaisia rekyylejä, jotka syntyvät tietyllä energiolla per implantoitu ioni, n_0 on volframin atomitiheys ja E_{Dn} on elastisissa törmäyksissä materiaaliin talletettu energia. Rekyylispektri sekä elastisissa törmäyksissä materiaaliin talletettu energia voidaan laskea avoimen lähdekoodin klassiseen molekyyliidynamiikkaan perustuvan MDRANGE-ohjelman avulla [9]. Ohjelmaa hyödyntäen energian jakautuminen sekä bulkkimateriaaliin implantoitujen ionien penetraation syvyys saadaan simuloitua volframille.

Kahden lämpötilan molekyyliidynamiikan malli

Työssä käytetty malli on perinteisen molekyyliidynamiikan laajennus, jota kutsutaan kahden lämpötilan molekyyliidynamiikan malliksi. Se pystyy kuvaamaan elektronisia energiahäviöitä törmäyskaskadiprosessissa kaskadin ensimmäistä ballistista vaiheesta lämpöpiikkiin asti ottaen huomioon elektroni-kytkennän paikallisen ympäristön riippuvuuden [10]. Työn malli on muokattu versio Langevin-dynamiikasta [11,12], jota on perinteisesti käytetty kuvaamaan elektroni-ioni-kytkentää metalleilla. Perinteinen Langevin-dynamiikan muoto voidaan kuvata kolmen termin funktiona:

$$m \frac{\partial v_i}{\partial t} = F_i(t) - \gamma_i v_i + \mu(t)$$

Tässä v_i on atomin i nopeus, F_i on voima, joka kohdistuu atomiin i ajalla t, γ_i on kitkatermi, joka kuvaa elektronien pysähtymisvoimaa, ja μ on stokastinen voima ajan hetkellä t, joka muodostuu elektroni-fononi-kytkennän perusteella [10]. Perinteisessä Langevin-dynamiikan mallissa elektroni-fononi-kytkentä on annettu skalaariarvona, joka ei ole tässä työssä käytetyn mallin tapaus. Kahden lämpötilan molekyyliidynamiikan mallissa skalaariarvo sekä kitkatermille että stokastiselle voimalle esitetään monen kappaleen voimilla, jotka vaikuttavat korreloivalla tavalla kaikkiin järjestelmän atomeihin [13]. Tässä mallissa voima, joka vaikuttaa atomiin i koostuu kolmesta osasta: empiirisen potentiaalilin gradientista, viskoosin kaltaisesta voimasta sekä satunnaisesta voimasta. Toinen ja kolmas termi esitetään mallissa tensorimuodossa atomien välisten korrelaatioiden sisällyttämiseksi [10]. Voima, joka vaikuttaa atomiin i on kuvattu mallissa seuraavasti:

$$F_i = -\nabla_i U - \sum_j B_{ij} v_j + \sum_j W_{ij} \zeta_j$$

$$B_{ij} = \sum_k W_{ik} W_{jk}^T$$

Ensimmäinen termi on adiabattinen voima, joka on riippumaton elektronien virittymisestä. Toinen sekä kolmas termi ovat puolestaan

ei-adiabaattisia voimia ja ne muodostuvat ioni-elektroni-vuorovaikutuksen pohjalta. Toinen termi on lineaarinen nopeuksien kanssa ja kolmas termi on stokastinen [13]. Matriisit W ja B ovat funktioita atomien positioista ja kuvaavat spatiaalista korrelaatiota atomien keskuudessa. Suure ξ_j kuvaa "valkoista kohinaa", joka luodaan vakioilämpötilassa pidettävällä lämpösäiliöllä. Funktion kolmas termi satunnainen voima, joka vaikuttaa atomiin i tietyssä suunnassa, on statistisesti riippuvainen muista satunnaisvoimista [13]. Täten funktion toinen termi ei ole vain yksittäiseen atomiin vaikuttava viskoosin kaltainen voima, vaan se vaikuttaa globaalisti. Statistisen riippuvuuden lisäksi funktion toinen termi riippuu muiden atomien nopeuksista [13].

Yksittäisiin atomeihin vaikuttava voima on korreloitu spatiaalisesti yhdistämällä valkoista kohinaa matriisiin W kanssa [10]:

$$W_{IJ} = \begin{cases} -\alpha_J(\rho_J) \frac{\rho_J(r_{IJ})}{\rho_J} e_{IJ}(\xi_J e_{IJ}), & I \neq J \\ \alpha_I(\rho_I) \sum_{K \neq I} \frac{\rho_K(r_{IK})}{\rho_I} e_{IK}(\xi_I e_{IK}), & I = J \end{cases}$$

Tässä e_{IJ} on yksikkövektori, joka linkittää eri indeksien atomit. Termi $\alpha(\rho)$ on elektroni-fononi-kytkennän funktio, jossa kytkennän vahvuus on kuvattu elektronitiheyden funktiona. Työssä on käytetty kahta erilaista $\alpha(\rho)$ -funktiota, jotka on esitetty kuvassa 1. Tarkoituksena oli tutkia, onko kytkennän vahvuudella suurta merkitystä törmäyskaskadiprosessissa.

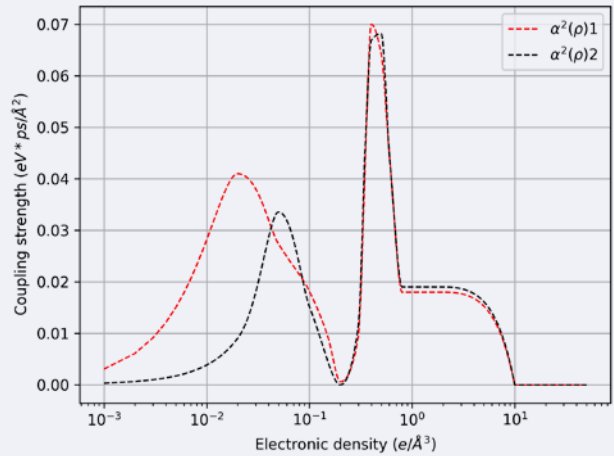
Tulokset ja johtopäätökset

Kuvassa 2 simuloituiden atomistisen sekoittuvuuden arvot asettuvat Kim et al:n [7] kolmen kokeellisen arvon keskelle. Kuvassa olevat kokeellisten tuloksien virhemarginaalit muodostuvat mittausrvirheistä, ei näytteiden kontaminaatiosta, jonka Kim et al. arvioi olevan päävirhe heidän atomistisen sekoittuvuuden tuloksissa. Tämä indikoi, että todellisuuksessa kokeellisissa atomistisen sekoittuvuuden arvoissa voi olla vielä enemmän vaihtelua. Lisäksi kuvasta 2 nähdään, että yksi kokeellinen arvo on hyvin lähellä simuloituja arvoja. Tässä kokeellisessa arvossa sekoittumisen entalpia on nolla. Negatiiviset arvot sekoittuvuuden entalpialle antavat positiivista voimaa atomistiselle sekoittuvuudelle ja täten voivat vaikuttaa lopulliseen sekoittumisen arvoon. Myöskään molekyyliidynamiikan simulaatioissa sekoittumisen entalpiaa ei ole, joten kokeellisen arvon, jossa sekoittumisen entalpia on nolla, tulisi olla lähimpänä simuloituja arvoja. Täten saadut tulokset viittaavat mallin toimivuuteen törmäyskaskadisimulaatioissa volframissa.

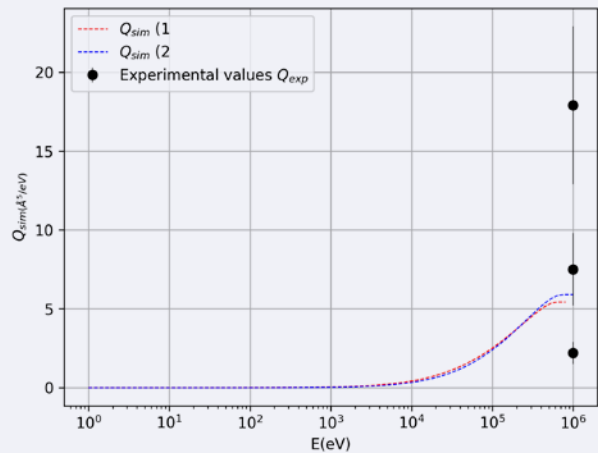
Lisäksi eri funktiot elektroni-fononi-kytkennän vahvuudelle eivät merkittävästi vaikuta atomistisen sekoittuvuuteen. Toinen kytkentä-funktio antoi hieman suurempia arvoja atomistiselle sekoittuvuudelle johtuen siitä, että sen kytkentä oli vahvempaa matalan elektronitiheyden alueella. Kuitenkin kuvasta 2 nähdään, että molemmilla funktioilla saavutetut sekoitukset ovat hyvin lähellä toisiaan.

Sen jälkeen, kun kahden lämpötilan molekyyliidynamiikan malli on validoitu törmäyskaskadisimulaatioihin volframissa, on myös tärkeää jatkaa mallin tutkimista. Seuraavaksi mallin tarkkuutta on tarkoitus analysoida. Defektit ja defektiklusterit analysoidaan simulaatioiden pohjalta ja verrataan niitä muilla tavoin saatuihin tuloksiin, sillä atomistisella sekoittuvuudella voi olla vaikutusta näihin.

Diplomityö hyväksytty 13.6.2022 Aalto-yliopiston Sähkötekniikan korkeakoulussa.



Kuva 1. Elektroni-fononi-kytkennän funktiot, joita on käytetty tämän työn molekyyliidynamiikan simulaatioissa.



Kuva 2. Simuloituiden atomistiset sekoittuvuudet kuvattuna yhdessä Kim et al:n vastaavien kokeellisten tuloksien kanssa [7].

Viitteet

- [1] Z. Zhongming, L. Linong, Z. Wangqiang, L. Wei et al., "EIA projects nearly 50% increase in world energy use by 2050, led by growth in renewables," 2021.
- [2] S. J. Zinkle, "Fusion materials science: Overview of challenges and recent progress," *Physics of Plasmas*, vol. 12, no. 5, p. 058101, 2005.
- [3] B. Wirth, K. Nordlund, D. Whyte, and D. Xu, "Fusion materials modeling: Challenges and opportunities," *MRS bulletin*, vol. 36, no. 3, pp. 216–222, 2011.
- [4] G. Was, "Fundamentals of materials science: Metals and alloys," *Nuclear Engineering and Radiological Sciences*, University of Michigan: Springer Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [5] K. Nordlund, S. J. Zinkle, A. E. Sand, F. Granberg, R. S. Averback, R. E. Stoller, T. Suzudo, L. Malerba, F. Banhart, W. J. Weber et al., "Primary radiation damage: A review of current understanding and models," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 512, pp. 450–479, 2018.
- [6] A. Sand et al., "Molecular dynamics simulations of primary radiation damage from collision cascades," 2015.
- [7] S.-J. Kim, M. Nicolet, R. Averback, and D. Peak, "Low-temperature ion-beam mixing in metals," *Physical Review B*, vol. 37, no. 1, p. 38, 1988.
- [8] K. Nordlund, A. Sand, F. Granberg, S. Zinkle, R. Stoller, R. Averback, T. Suzudo, L. Malerba, F. Banhart, W. Weber et al., "Primary radiation damage in materials," Report NEA/NSC/DOC, Tech. Rep., 2015.
- [9] K. Nordlund, "Molecular dynamics simulation of ion ranges in the 1–100 keV energy range," *Computational materials science*, vol. 3, no. 4, pp. 448–456, 1995.
- [10] A. Tamm, M. Caro, A. Caro, and A. Correa, "Role of electrons in collision cascades in solids. ii. molecular dynamics," *Physical Review B*, vol. 99, no. 17, p. 174302, 2019.
- [11] P. Langevin, "Sur la théorie du mouvement brownien," *Compt. Rendus*, vol. 146, pp. 530–533, 1908.
- [12] D. S. Lemons and A. Gythiel, "Paul Langevin's 1908 paper "on the theory of Brownian motion"["sur la théorie du mouvement brownien," *Cr acad. sci.(Paris)* 146, 530–533 (1908)]," *American Journal of Physics*, vol. 65, no. 11, pp. 1079–1081, 1997.
- [13] A. Tamm, M. Caro, A. Caro, G. Samolyuk, M. Klintonberg, and A. A. Correa, "Langevin dynamics with spatial correlations as a model for electron-phonon coupling," *Physical review letters*, vol. 120, no. 18, p. 185501, 2018.

Kirjoittaja

DI Iisa Saunamäki
Research Assistant
Aalto-yliopisto
iisa.saunamaki@aalto.fi

Master's thesis: The impacts of meteorological data on dose assessment in different operational conditions of a nuclear power plant

Jenna Järvenpää
Fennovoima Oy

My Master's Thesis evaluated the impacts of meteorological data on dose assessment in different operational conditions of a nuclear power plant. The work compared meteorological data from two sources and studied their impacts on radiation doses of a hypothetical representative person from different age groups. A Python program was designed and developed to analyse the data and to reveal differences between the data sets. The results showed that the selection of a data source has a significant effect on the effective doses of the representative person in all studied accident scenarios.

Diplomityössäni arvioitiin säädatan vaikutuksia annoslaskentaan erilaisissa ydinvoimalaitoksen toiminnallisissa tilanteissa. Työssä vertailtiin säädatoja kahdesta eri lähteestä ja tutkittiin näiden säädatojen vaikutuksia hypoteettisen edustavan henkilön eri ikäryhmien säteilyannoksiin. Python-ohjelma suunniteltiin ja kehitettiin analysoidaan näitä dataa ja havaitsemaan niiden eroja. Työn tulosten perusteella havaittiin, että datan lähteen valinnalla on merkittävä vaikutus edustavan henkilön efektiivisiin annoksiin kaikissa tutkituissa onnettomuustilanteissa.

Fennovoima Oy uses meteorological data from the Finnish Meteorological Institute (FMI) in its dose assessment. This dose assessment is needed for the preliminary safety analysis report (PSAR). For the following final safety analysis report (FSAR), Fennovoima Oy needs to use meteorological data from its own meteorological measurement system. This system is located at the Hanhikivi 1 site. It consists of a weather mast, an equipment shelter, and a surface weather station with a precipitation gauge.

There are three measurement levels on the weather mast: 41 m (HK1), 81 m (HK2) and 118 m (HK3). The system provides data on, e.g., wind speed, wind direction, temperature, Pasquill class, precipitation, and mixing height. The FMI meteorological data is a combination of data from different weather stations. These weather stations and the meteorological measurement system are shown on a map of Finland in Figure 1.

My Master's thesis is the first study to compare these two data sets and their impacts on dose assessment. The dose assessment is done with the BSAVVL software. It conducts dispersion and exposure calculations on the hypothetical representative person. The operational conditions studied in this work cover anticipated operational occurrences, postulated accidents, and design extension conditions.

The work assessed one limiting scenario from each event category. Such scenarios listed an uncontrolled withdrawal of a control rod group in the DBC 2 event category, a steam generator tube rupture in the DBC 3 event category, a failure of a steam generator primary collector cover in the DBC 4 event category, and a large break of the main steam line with steam generator tube rupture in the DEC B event category. Each limiting scenario contributed differently to estimated radioactive releases and effective doses.



Figure 1. The locations of the FH1 meteorological measurement system and the FMI weather stations in Finland (contains data from the National Land Survey of Finland General Map raster 1:2 M 12/2021).

Objectives and methods

My Master's thesis focused on finding differences between these two data sets and their impacts on dose assessment in different operational conditions. The work compared meteorological data from both data sets for the year 2020. The FMI provided meteorological data also for the years 2011–2016. Meteorological data from 2014 was used as a representative year for this five-year period. This work also assessed the usability of Fennovoima Oy's own meteorological data in the dispersion calculations in the FSAR.

The BSAVVL software used in this work is based on the Gaussian plume model. This model calculates atmospheric dispersion of radioactive release. The BSAVVL software also uses these results to model the effective radiation doses to the representative person. The hypothetical representative person represents the most exposed small population group. Different population groups are separated by age and living habits.

Three different age groups of the representative person were studied in this work. These groups were: infant (1–2 years), child (7–12 years), and adult (> 17 years). Each age group had an age-specific respiration rate and consumption rates of local foods and drinks. The consumption of breast milk of the infant was excluded from these calculations.

A Python program was developed to automatize data analysis of meteorological data. It was also used to automatically visualise the output data from the dispersion and exposure calculations. The Python program used fault tree analysis to reconstruct broken meteorological data. It also downsampled minute-wise data to hourly data and created log files for errors. It produced files with repaired meteorological data for the BSAVVL calculations. Moreover, the Python program plotted wind roses, dose roses, dose roses on a map, and stacked bar charts to visualise different results. This program saved considerable time and helped to avoid human errors compared to data analysis in Microsoft Excel.

Results and discussion

The Python program used fault tree analysis to find errors in the data set from the meteorological measurement system. The meteorological data from the FMI was provided as verified data. The Python program found over 200 000 errors in the temperature parameter in the data measured at the HK2 level. There were only around 600–800 errors found at the HK1 and HK3 measurement levels. These errors were present in the data from 2020. They did not affect the wind roses plotted in the Python program. Yet, they had effects on the results of the dispersion and exposure calculations.

The Python program plotted wind roses for all the three measurement levels of the weather mast. It also plotted wind roses for the years 2020, 2011–2016 and 2014 for the FMI data set. The wind roses for

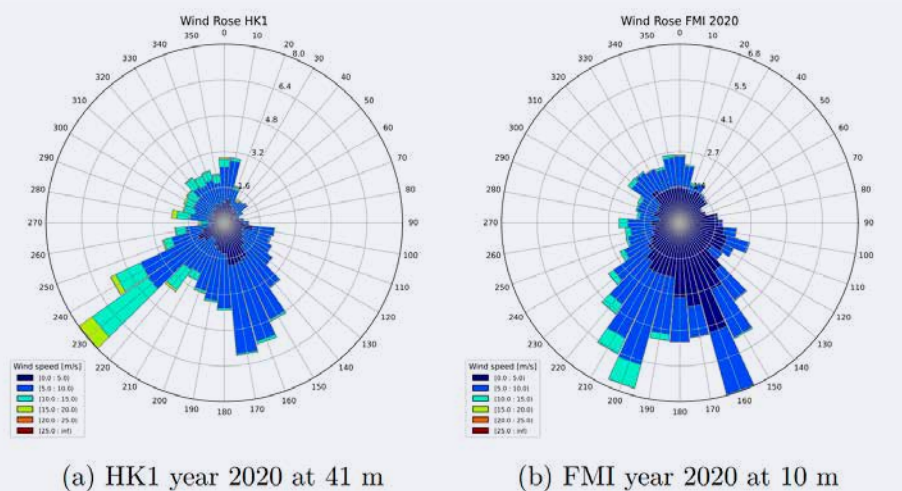


Figure 2: Wind roses for the HK1 measurement level (a) and for the FMI meteorological data (b) in year 2020 with frequencies from 0% up to 8%.

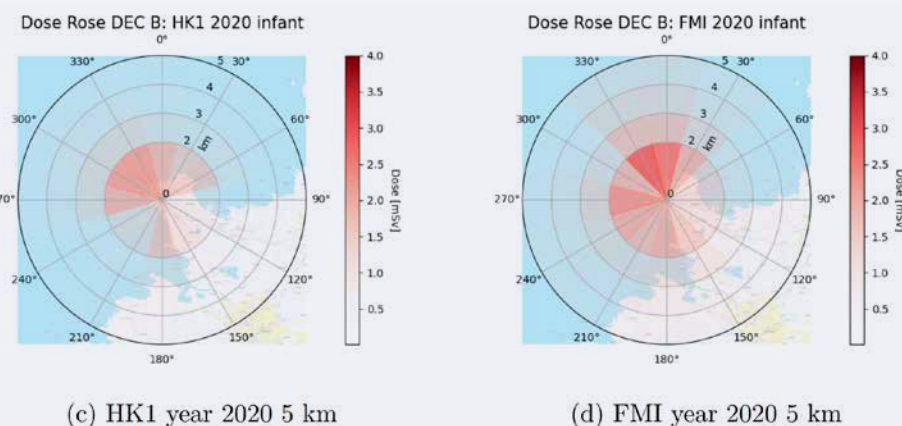


Figure 3: The DEC B infant dose roses for the HK1 measurement level and the FMI data from the year 2020 on a map of Pyhäjoki with 5 km range [1].

the HK1 measurement level (41 m) and for the FMI data set for the year 2020 are presented in Figure 2.

Different colors on the wind rose indicate different wind speeds from 0 m/s to 25 m/s. The circles determine frequencies of wind from 0% to 8%. The FMI wind data was collected from Lapaluoto, Raahe. The wind roses were clearly different between these two data sets, which could be caused by the different locations of the weather masts (Pyhäjoki and Raahe) and different measurement heights (41 and 10 m).

A novel visualization of doses of the representative person, a dose rose, was invented. The Python program plotted the effective doses on a polar map on 30° sectors and distances. These dose roses were plotted for each age group for each limiting scenario and each data set. The representative year 2014 was used for the five-year period, 2011–2016. The value on the dose rose represents the dose at a certain distance (2, 3, 4 or 5 km), not between the distances. The Python program plotted 60 dose roses, of which the most interesting combinations were chosen. This work focused on the dose roses plotted for the infant in the DEC B scenario. This combination produced the highest effective doses of all the age groups and limiting scenarios.

These dose roses were then plotted on a map of Pyhäjoki with 5 to 10 km ranges by using the fetch_map script application [1]. The dose

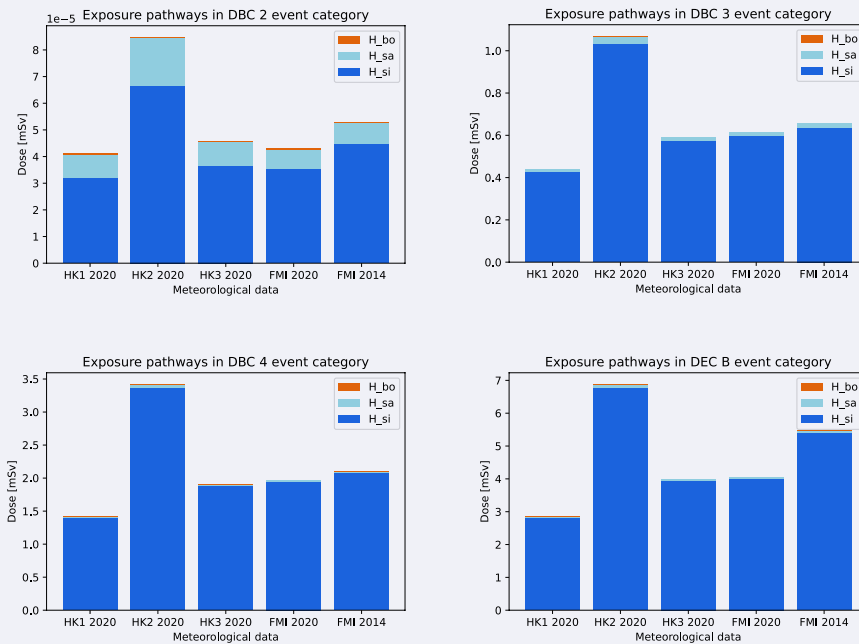


Figure 4: Four stacked bar charts presenting the exposure pathways for the infant at 2 km distance from the emission source in the limiting scenarios. H_{sa} represents the exposure from β - and γ -submersion and inhalation, H_{si} the exposure from ingestion, and H_{bo} the exposure from γ -groundshine. The total effective dose H_{sum} is a sum of H_{sa} , H_{si} and H_{bo} .

roses for the HK1 measurement level (41 m) and for the FMI data set for the year 2020 are presented in Figure 3. The center of the Pyhäjoki map and the dose rose are at the exact coordinates of the ventilation stack of the Hanhikivi 1 nuclear power plant. This location presented the best approximation of all the emission sources used in the BSAVVL calculations. The sectors with the highest estimated effective doses were pointing towards the sea within the 2 km range. The doses of the infant decreased tremendously after the 2 km distance and approached zero close to the 10 km distance.

The Python program plotted stacked bar charts to visualise the effects of different exposure pathways on the doses. These charts were done for the infant at 2 km distance from the emission source for all the limiting scenarios. These stacked bar charts are shown in Figure 4. The colours of the charts represent the relative significance of different exposure pathways. These pathways are ingestion (H_{si}), β - and γ -submersion and inhalation (H_{sa}), and γ -groundshine (H_{bo}). These form the total effective dose, H_{sum} , which is the sum of the doses of each sector in the dose rose.

The HK2 measurement level has the highest total effective doses in each of the stacked bar charts. The long malfunctioning time of the temperature sensor with over 200 000 errors might have caused these high dose values. On the other hand, there might have been deviations in other parameters or in their determinations. For example, these temperature errors might affect the values of the Pasquill class. The BSAVVL software takes Pasquill class values into account, but not temperature values.

The second highest total effective doses derived from the FMI data for the representative year 2014. The HK1 measurement level gave the lowest total effective doses to the infant. These stacked bar charts showed that ingestion is the most contributing exposure pathway of the infant in all the scenarios.

Conclusions

My Master's Thesis successfully evaluated the impacts of the meteorological data on dose assessment in different operational conditions of a nuclear power plant. My work found several differences between the two data sets, and their impacts on radiation doses of the representative person and its age groups. The Python program was designed and developed for this work to analyse and visualise data. The Python program plotted wind roses, dose roses, dose roses on a map and stacked bar charts.

The results revealed that the selection of meteorological data source has a significant effect on the dose assessment of the representative person in all the scenarios. The malfunctioning temperature sensor in the HK2 measurement level caused high radiation doses to the representative person in the BSAVVL calculations. The second highest radiation doses were produced by the FMI data for the representative year 2014. The lowest doses were calculated with the meteorological data from the HK1 measurement level for year 2020.

The data from the meteorological measurement system was found to represent the actual weather conditions at the Hanhikivi 1 site. The results presented in this work clearly support the use of the meteorological data from the meteorological measurement system to be used in the dispersion and exposure calculations in the FSAR.

The Master's thesis has been accepted in Aalto University School of Chemical Engineering on May 16th 2022.

References

- Olli Lammi. (2016). Fetchmap. Retrieved from https://olammi.iki.fi/sw/fetch_map

Writer



M. Sc. (Radiochemistry), M. Sc. (Tech.) Jenna Järvenpää
Nuclear Safety Engineer
Fennovoima Oy
jenna.jarvenpaa@fennovoima.fi

Energiapolitiikkaa, tuulimyllyjä ja hullu diktaattori

RILU KAKSIKYMMENTÄ VUOTTA SITTEEN kirjoitin ajankuvalle ominaisen ja tyyliksen kolumnin, jossa arvioin Fortumin synnyin jälkeisiä tapahtumia. Yritin jopa arvata uuden syntyvän yhtiön nimeä. Jotkut arvauksistani toteutuivat - syntyneen yhtiön runsasta kassaa käytettiin ostoihin naapurimaissa ja yhtiö jakoi runsaat optio-ohjelmat. Yhtiön nimeksi ei kuitenkaan hyväksytty ehdottamaani Neivoa ja toteutettua tutkimuksen ja kehityksen leikkauksista en ennustanut oikein.

Tuhlaajapojan (Neste) ja sukanvarteen säästäjän (IVO) yhdistämisen kimmokkeena oli poliittiset tarpeet. Asia selvisi kesäkuussa 2001 Energiakanavan kesäseminaarissa, kun myöhemmin lautapinoistaan ja morsiamestaan huomiota saanut poliitikko kertoi poliittisten päättäjien kyllästyneen IVO:n johdon jatkuvaan venkoiluun poliittisia voimailotshankkeita toteutettaessa. Nykyisin Suomen energia-ala näyttää täysin erilaiselta kuin tuolloin. Poliittiset päätökset ohjailevat vahvasti kaikkia energiaratkaisuja.

Toimintatavat ovat muuttuneet energia-hankkeiden ja projektien johdon siirryttyä poliitikkojen ja sopivien ja harvemmin pätevien johtajien vastuulle. Usein yhteiskunnan suuret projektit vastaavat ruotsalaisen Vasa-laivan rakentamista kuninkaan alaisuudessa. Komean

näköistä tulee avajaisiin, mutta hetken päästä koko komeus menee nurin ja osat irtoilevat.

Rahoittajille on myydy ajatus rajata projektin johdon osaaminen kykyyn ostaa halvimman tarjouksen mukaan. Yhä useammin näemme yritysjohdajan vaihtavan hommaa parin vuoden välein. Hän pätevytyy hetkessä uuden toimialan, esimerkiksi energian, autotekniikan, talonrakennuksen, paperiteollisuuden tai tietotekniikan johtotehtäviin. Ovatko haasteet aina samoja ja meneekö tulevaisuuden kehitysmallien ennustus todella samalla sapluunalla? Vai olisiko yhteistä vain hyvä johdon tulospalkkio aiemman johdon tekemällä pohjalla? Tai osakkeen arvoon sidotun palkkion pikaviritys myymällä omaisuus?

Uudistuksia perustellaan hienoilla konsultikalvoilla, mutta pintaa raaputtamalla selviää mallin olevan suora kopio jostain muualta. Suomen SOTE-uudistuksessa kopioitiin ruotsalain terveydenhuollon kolmiportainen byrokratia entisen suomalaisen kaksiportaisen hallinnon paikalle. Vahvistivatko päättävien aivojen puusta laskeutumisen ajoilta periytyneet peili- eli apinointisolut uuden mallin tuottavan tehokkuutta ja kustannussäästöjä?

Suomeen on rakennettu uutta ydinvoimaa Euroopan parhaalla yleisön hyväksynnällä mutta maailman pisimmillä projektipituuksilla

ja kustannuksilla. Noita kuluja moni kassanhoitaja on kauhistellut. Onneksi tuulimyllyjen hinnat sentään ovat laskeneet kaikkialla.

Tuulimyllyjen ongelmana on energian saatavuus, kun ei tuule. Korvaava tuotanto tuottaa valtavat hiilidioksidimäärät. Saksa tuotti vuonna 2018 noin 708 miljoonaa tonnia hiilidioksidia, kun Ranskan vastaava luku oli vain 309 miljoonaa. Saksan "Energiewende" on korvannut 65 TWh ydinvoimaa vuodesta 2010 vuoteen 2017, mutta nostanut samalla hiilidioksidin päästöt ylös. Käännös tarkoittaa pienempää riippuvuutta arvaamattomasta Ranskasta. Vaikeutena on ollut vahvempi riippuvuus tsaarinen muinaisia alueita sodalla ja joukkomurhilla palauttavasta Venäjältä.

Surulliset maailman tapahtumat ovat nostaneet kysymyksen diktaattoreista uudelle tasolle. Aiemmin halusimme ajatella pikku-Vladia vain koulukiusaajana, jonka uhrin voidaan lähettää toiseen kouluun. Valehtelu hyväksyttiin osana huonoa taustaa katupoikana. Emme halunneet uskoa naapurimaamme johtajan voivan lähettää kätyreitä murhaamaan ja myrkyttämään ihmisiä. Naamioiden pudottua saamme seurata sotaa, jatkuvia rikoksia ja murhia. Noin 80 vuotta sitten kukaan ei Euroopassa tehnyt mitään, kunnes oma maa oli tulella.

Asioita arvioitaessa ei enää päde arvio, jos uutisvirrasta keskiarvon muodostamalla saa objektiivisen käsityksen asioista. Vakiintuneen toimintatapansa mukaan toimittajat yrittävät tuoda kaikki näkökulmat esille ottamatta huomioon Venäjän toimintamallia: jos valehtelet loputtomasti, kaikkia valheita ei ehditä oikaista. Kun kaiken alkusyyntä oleva osapuoli valehtelee kaiken ja syyllistyy jatkuvasti sotarikoksiin ja rikoksiin ihmisyyttä vastaan, olisi mielestäni tiedotusvälineiden velvollisuus varoittaa asiasta. Lavrovin puhevideon alle voisi laittaa pysyvän varoituksen "hän useimmiten valehtelee!" ja myös kuvan sadun Pinokkiosta. Varoitus oikaisisi viestin arvon keskiarvoa muodostettaessa. Putinin puheiden venyttämä "Pinokkiopöytä" on jo muotoilun klassikko.

Jatkossa kaikissa Euroopan maissa museoiden esittelyt ja turistiesitteiden kieli tulisi pitää venäjän sijasta ukrainan kielellä. Venäjän kielellä tarjotaan ainoastaan lause: "Ukrainassa vuonna 2022 ihmisyyttä vastaan tehtyjen valtiollisten rikosten ja sotarikosten vuoksi venäjän kieltä ei käytetä." Näin miljoonat ukrainalaiset pakolaiset saisivat infon äidinkielellään. Kielet ovat sen verran lähellä toisiaan, että venäläisturisti oppisi pärjäämään ja saisi tarpeellisen muistutuksen asiasta.

Yrjö Ydin



Pinokkio vai ulko-ministeri Sergey Lavrov? (kuva: Disney)



Palautusosoite:

Suomen Atomiteknillinen Seura
PL 78
02151 ESPOO

Osoitteenmuutokset:

sihteeri@ats-fns.fi

**ATS**

SUOMEN ATOMITEKNILLINEN SEURA -
ATOMTEKNISKA SÄLLSKAPET I FINLAND r.y.
FINNISH NUCLEAR SOCIETY

KANNATUSJÄSENET

A-Insinöörit Civil Oy

**Pohjoismainen
Ydinvaruutuspooli**

TVO Nuclear Services Oy

Fennovoima Oy

Pohjolan Voima Oyj

Voimaosakeyhtiö SF Oy

FinNuclear ry

Posiva Oy

Westinghouse

**Fortum Power
and Heat Oy**

**Teknologian
tutkimuskeskus VTT Oy**

Platom Oy

Teollisuuden Voima Oyj