

ATYS

4|2020

Vol. 49

YDINTEKNIikka

SUOMEN ATOMITEKNILLINEN SEURA – ATOMTEKNISKA SÄLLSKAPET I FINLAND

Ydinsulkusopimus 50 vuotta

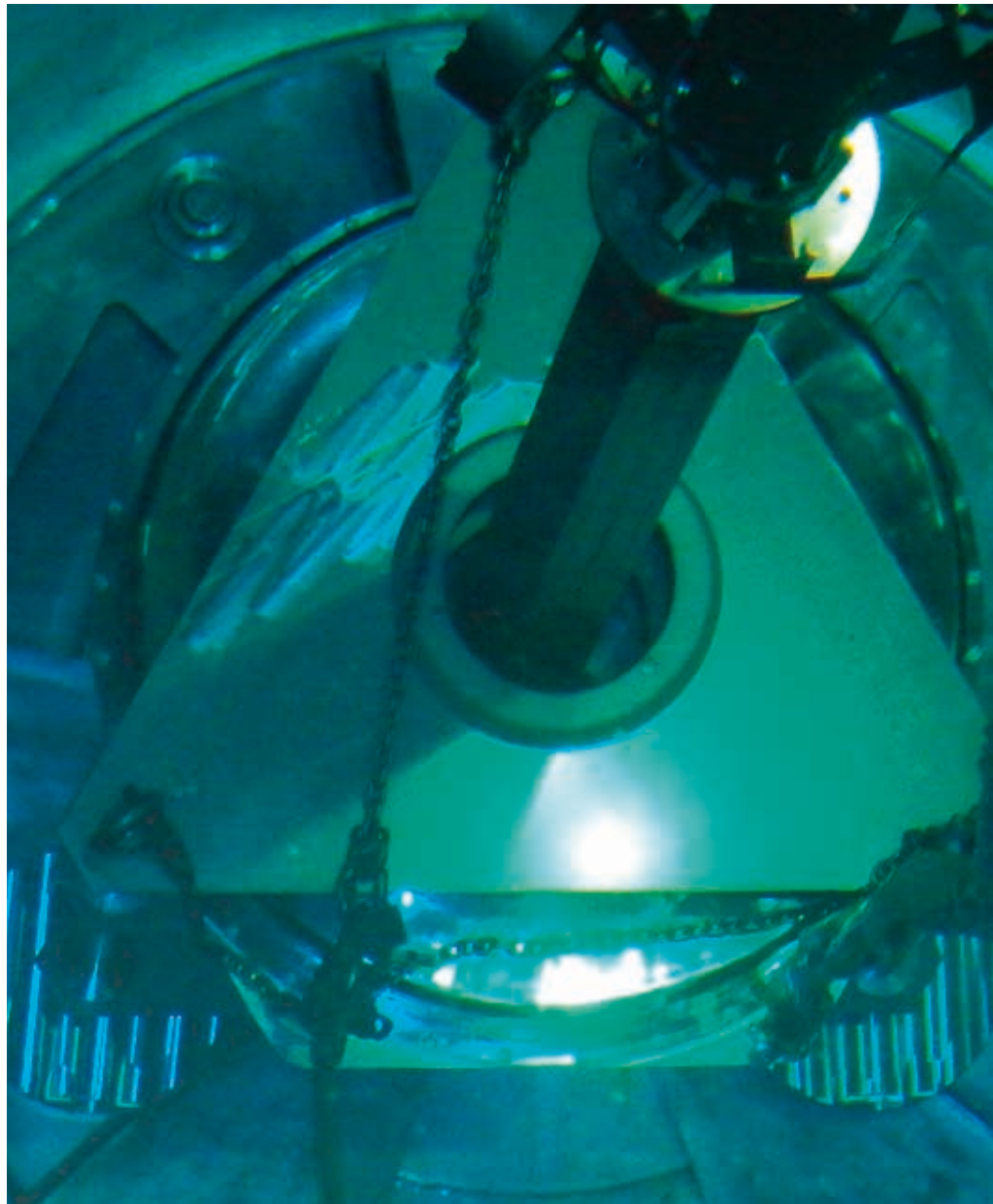
Ydinenergian käyttö ei olisi alkanut Suomessa ilman NPT-sopimusta, joten sitä kannattaa edelleen tukea ja edistää.

Reaktori- mallinnuksen uudet tuulet

Kraken-laskentajärjestelmä uudistaa reaktorimallinnuksen VTT:llä ja syväkouluttaa uusia osaajia.

3D-tulostamalla voimalaitososa

Energiforsk järjesti seminaarin materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämisestä ydinenergia-alalla.



Julkaisija / Publisher

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

Johtokunta / Board

Puheenjohtaja / President

DI Tuomas Rantala
puheenjohtaja@ats-fns.fi

Varapuheenjohtaja / Vice President

TkT Jaakko Leppänen
jaakko.leppanen@vtt.fi

Sihteeri / Secretary General

DI Lauri Rintala
sihteeri@ats-fns.fi

Rahastonhoitaja / Treasurer

DI Pekka Kupiainen
rahastonhoitaja@ats-fns.fi

Jäsenet / Board Members

MSc Ana Jambrina
ana.jambrina@lut.fi

FM Maria Lindholm
maria.lindholm@fortum.com

DI Simo Saarinen
simo.saarinen@iki.fi

TkT Vesa Tanskanen
vesa.tanskanen@stressfield.fi

Toimihenkilöt / Functionaries

ATS Young Generation

DI Hanna Tynys
hanna.tynys@fortum.com

Kansainvälisten asioiden sihteeri / International Affairs

DI Henri Ormus
henri.ormus@fennovoima.fi

Women in Nuclear Finland

FT Eveliina Muuri
eveliina.muuri@posiva.fi

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

TkT Henri Loukusa
henri.loukusa@gmail.com

Ajankohtaispäätoimittaja / Topical Chief Editor

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

Ulkoasu ja taitto / Layout

Katariina Korhonen
Suunnittelutoimisto Creatus
katariina@creatus.fi

Toimitus / Editorial Staff

FM Sophie Haapalehto
sophie.haapalehto@posiva.fi

DI Klaus Kilpi
klaus.kilpi@gmail.com

DI Anna Korpinen
anna.korpinen@vtt.fi

FT Antti Rätty
antti.ratty@vtt.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 pidättää itsellään oikeuden lyhentää, tiivistää ja muokata julkaistavaksi tarkoitettuja artikkeleja ja kirjoituksia.

Vaikeastikin ymmärrettävää tietoa täytyy tuoda julki



SÄTEILYYN TAI YDINENERGIAAN liittyvien riskien ja hyötyjen kommunikoinnissa pelikenttä on hämmästyttävän kapea: toisella sivurajalla vaanii vähättely ja toisella sivurajalla pelottelu. Pelikenttää ei voi edes kutsua kultaiseksi keskitieksi vaan ehkä lähinnä trapetsiksi. Tämän ovat varmasti huomanneet kaikki, jotka näistä asioista ovat yrittäneet kommunikoida lähimpiä kollegoita kauemmas.

ATS on perustanut Pekka Jauho -palkinnon vuonna 2016 ydintekniikan alan merkittävää tiedonjulkistustyöstä. Palkinnon säännöt löytyvät ATS:n verkkosivuilta. Tämä palkinto täydentää hyvin Erkki Laurila -palkintoa, joka on myönnetty ATS Ydintekniikan parhaasta artikkelista vuosittain jo 20 vuoden ajan. Vanha palkinto palkitsee tiedonjakajia seuran sisäisestä sivistystyöstä ja uudempi palkinto ulos-

päin suuntautuvasta tiedotuksesta. Molemmat kuuluvat ATS:n toimenkuvaan.

ATS julkisti syysseminaarissa vuoden 2020 Pekka Jauho -palkinnon saajan. Palkinto myönnettiin tietokirjailija Rauli Partaselle, joka on kunnostautunut julkisessa energiakeskustelussa jo kymmenkunta vuotta. Hän on pitänyt "Kaiken huippu"-blogia (kaikenhuippu.com) vuodesta 2010 ja kirjoittanut mm. kirjat "Uhkapeli ilmastolla" (2015, englanninkielinen käännös "Climate Gamble") ja "Musta hevonen – ydinvoima ja ilmastonmuutos" (2016) yhdessä Janne M. Korhosen kanssa. Partanen on myös ollut perustamassa Suomen Ekomodernistit -yhdistystä ja toimii nykyään Think Atom -ajatushautomon aivoina. Onnittelut Raulille – palkinto tuli oikeaan osoitteeseen!

Tiedonjulkistamisen tarve ydintekniikan alalla ei ole lainkaan uutta eikä urakka ole mis-

sään tapauksessa tullut valmiiksi. Vanhemmat ATS:n jäsenet kuten minä varmaan muistavat edesmenneen Loviisan säteilysuojelupäällikön Björn Wahlströmin tiedotuksen, jota hän teki helposti luettavien mutta asiapitoisten pakinoiden muodossa. Pakinakokoelmat "Villakoiran ydin" (1986) ja "Ydin ja omenankuori" (1996) sisältävät tekstejä, jotka ovat suorastaan ma-sentavan ajankohtaisia yhä edelleen 20–40 vuotta myöhemmin. Jos näitä kirjoja tai Rauli Partasen teoksia löytyy divarista tai nettikau-pasta, niin ehdottomasti suosittelen niiden hankkimista ja lukemista. Niistä saa mallia trapetsilla tasapainotteluun.

Jarmo Ala-Heikkilä
Vastaava päätoimittaja

SISÄLTÖ

Vakiopalstat

Päätoimittajalta: Vaikeastikin ymmärrettävää tietoa täytyy tuoda julki	3
Pääkirjoitus: Menetetyt vuosikymmenet	4
Editorial: Lost decades	5
Pakina: Ydinsähköä – ei enää kiitos	34

Tapahumat

Pientä ja isoa jätehuoltoa	6
Metallien lisäävä valmistus tuo hyötyjä myös ydinenergiateollisuuteen	8

Virtuaalimatka RRFM 2020 -konferenssiin	11
---	----

Ajankohtaista

Robottiikan hyödyntäminen ydinvoimalassa	14
Ydinvoima-ala tarvitsee Systems Engineeringiä	16
Suomi ydinsulun ja rauhanomaisen ydinenergian käytön edelläkävijänä	19

Tiede ja tekniikka

Gammaemissiotomografia paljastaa ydinpolttoaineen sisällön	22
<i>Samuli Siltanen, Riina Virta</i>	

Kraken – kotimaisen reaktorimallinnuksen tulevaisuus?	26
<i>Ville Valtavirta</i>	

Väitös: Ydinvoimalaitosten rakennemateriaalien korroosiotestaus ja mallintaminen ylikriittisessä vedessä	31
<i>Sami Penttilä</i>	

Menetetyt vuosikymmenet



ATS:N VUOSIKOKOUS HYVÄKSYI ATS-Seniorien perustamisen maaliskuussa 2010, ja Seniorien toiminta käynnistyi vilkkaana heti samana keväänä. Yhdeksänkymmentäjäseniseksi kasvaneen toimintaryhmän kymmenvuotisjuhlat olisi pitänyt viettää tänä vuonna asiaan kuuluvan tapahtuman merkeissä. Koronapandemia hyydytti kuitenkin toimintamme, joten juhliminen saa odottaa parempia aikoja.

Niitä odotellessa voi tarkastella kulunutta aikaa yleisemmästä perspektiivistä ja pitemmällä aikavälillä. Seniorina minun on todettava, että ydinvoiman kannalta kulunut vuosikymmen samoin kuin sitä edeltävätkin vuosikymmenet merkitsevät menetettyjä mahdollisuuksia. Näin rankkaa väitettä on syytä perustella.

1990-luvulle asti ydinvoimaa rakennettiin ympäri maailman, mutta sitten tilanne muuttui radikaalisti. Aloitetaan Suomesta. Eduskunta päätti syyskuussa 1993 hylätä Perusvoiman hakemuksen uuden ydinvoimalaitosyksikön rakentamiseksi Suomeen. Ennustin silloin ATS Ydintekniikkaan kirjoittamassani kommentissa: ”Tosiasioita ei kuunneltu. Maamme sähköstä tuotetaan ydinvoimalla lähes 30 %, ja ydinvoima on merkittävin yksittäinen sähkön hankintalähde. Uuteen ydinvoimalaitoshankkeeseen palataan taas muutaman vuoden kuluttua.”

Vuonna 1993 meille oli tarjolla turvallisia ja toiminnassa koeteltuja ydinvoimalakonsepteja. Jos poliitikot eivät olisi tyrmänneet Perusvoiman hanketta vastoin yleistä etua, Fin5-ydinvoimalaitos olisi ollut toiminnassa jo vuosikymmeniä. Ydinvoiman viranomaisvaatimukset olivat tiukat, ja käyttökemurukset osoittavat niiden olleen riittäviä. Hyväksymiskriteerit on sittemmin kansainvälisesti mitoitettu sellaisiksi, että uusien laitosten suunnittelu ja rakentaminen on länsimaissa tullut käytännössä lähes mahdottomaksi. Kaikesta huolimatta uusi laitoshanke käynnistettiin maassamme alle kymmenessä vuodessa. Valitettavasti uuden laitoksen käyttöön otossa on menetetty taas vuosikymmen.

Kansainvälisesti ilmastonmuutos on tunnustettu ja tunnustettu ihmiskunnan ykkösvaaraksi ja päästöttömän sähkön tuotanto elintärkeäksi. Mutta mitä tehdään maailmalla: suljetaan hyvin toimivia ja turvallisia ydinvoimaloita ja estetään uusien rakentaminen erilaisin syin. Toiminnassa olevien reaktorien lukumäärä saavutti reilun 400 yksikön määrän 1980-luvun lopussa eikä ole sen jälkeen noussut.

Ydinvoiman osuus maailman sähköntuotannosta oli enimmillään vajaa 20 % 1990-luvulla, minkä jälkeen se on ollut jatkuvassa laskussa eikä enää ole kuin 10 %. Hiilivoimalla sen sijaan menee hyvin: sen osuus sähköntuotannosta on pysynyt lähes 40 %:n tasolla. Kaikki tämä tapahtuu samaan aikaan, kun sähkön tarve kasvaa köyhien maiden elintason noustessa ja sähköistyksen lisääntyessä rikkaissa maissa.

Paljon puhutaan pienistä reaktoreista ja siitä, kuinka ne ratkaisevat lukkiintuneen tilanteen. Tältä osin joudun toteamaan, että kovin paljon uutta ei ole auringon alla. Lähes kaikkia esitettyjä konsepteja on harkittu jo vuosikymmeniä sitten. Ei niitä silloin toteutettu. Nyt tarve on totisempi, ja varmaan pienreaktoreita nousee joihinkin maihin. Sähkön suureen ja lisääntyvään tarpeeseen ne auttavat vain kovin vähän.

Lopuksi kuuluu mainita ydinjäte. Ydinjätteen loppusijoituksesta on väännetty kättä vuosikymmeniä ilman konkreettisia tuloksia muutamaa maata lukuun ottamatta. Asiaa kauan seuranneena on pakko tulla siihen näkemykseen, että päätöksiä ei yksinkertaisesti haluta tehdä. Ei haluta ottaa huomioon, että maailma ei ole täydellinen eikä täydellistä varmuutta koskaan tulla saamaan. Jos mikä niin kulunut vuosi tapahtumineen osoittaa tämän yksiselitteisesti.

TkL Eero Patrakka

ATS-Seniorien kokoonkutsuja
eero.patrakka@kolumbus.fi

Lost decades

THE ANNUAL MEETING of the Finnish Nuclear Society ATS approved the establishment of ATS Seniors in March 2010, and the Seniors started their activities lively right away that same spring. The tenth anniversary of our activity group, which has grown to ninety members, should have been celebrated this year by means of a relevant event. However, the corona pandemic froze our activities, so we have to wait for better times to celebrate.

While waiting for them, one can look at the elapsed time from a more general perspective and in the longer term. As a senior, I have to say that the past decade, as well as the decades that preceded it, represents a missed opportunity for nuclear power. Such a drastic argument has to be substantiated.

Until the 1990s, nuclear power was built around the world, but then the situation changed radically. Let's start in Finland. In September 1993, Parliament decided to reject Perusvoima's application for the construction of a new nuclear power plant unit in Finland. I predicted then in a comment I wrote to ATS Ydintekniikka: "The facts were not listened to. Almost 30% of our country's electricity is generated by nuclear power, and nuclear power is the single largest source of electricity procurement. We will return to a new nuclear power plant project again in a few years."

In 1993, we were offered nuclear power plant concepts that were safe and had good operating experiences. Had politicians not knocked out the Perusvoima project contrary to public interest, the Fin5 nuclear power plant would have been in operation for decades. The regulatory requirements for nuclear power were strict, and operational experiences demonstrate that they were adequate. The approval criteria have since been internationally prescribed in such a way that the design and construction of new plants has become virtually impossible in the western world. Despite all this, a new plant project was launched in our country in less than ten years.

Unfortunately, another decade has been lost in implementing the new plant.

Internationally, climate change has been identified and recognized as the number one threat to humankind and the production of zero-emission electricity vital. But what is being done in the world: well-functioning and safe nuclear power plants are being closed and the construction of new ones is being prevented for various reasons. The number of reactors in operation reached just over 400 units in the late 1980s and has not risen since then.

Nuclear power accounted almost 20% of world electricity production in the 1990s, after which it has been steadily declining to no more than 10%. Coal power, on the other hand, is doing well: its share of electricity production has remained at almost 40%. All of this is happening at a time when the need for electricity is increasing as living standards rise in poor countries and electrification increases in rich countries.

There is a lot of talk about small reactors and how they solve the deadlock situation. In this regard, I have to say that there is not much new under the sun. Almost all of the concepts presented have been considered for decades. They were not implemented at that time. Now the need is more serious, and probably small reactors will rise in some countries. As to the great and increasing need for electricity, their contribution is minimal.

Finally, nuclear waste must be mentioned. The final disposal of nuclear waste has been disputed for decades without any concrete results with the exception of a few countries. I have followed this for a long time and am forced to come to the conclusion that decisions are simply not wanted to be made. There is no will to take into account that the world is not perfect and complete certainty will never be attained. If any so past year with its events demonstrates this unequivocally.

Lic.Sc. (Tech.) Eero Patrakka

Convenor of ATS Seniors
eero.patrakka@kolumbus.fi



Kuva: VTT

Pientä ja isoa jätehuoltoa

Pandemian hetkeksi rauhoituttua Suomessa ATS ehti järjestää yhden jäsentilaisuuden, jossa tarjottiin mahdollisuutta osallistua myöskin paikalla. Tällä kertaa aiheina olivat työ- ja elinkeinoministeriön YETI-työryhmä ja Otaniemen kooreaktorin käytöstäpoisto.

Teksti: Lauri Rintala



DI Lauri Rintala

ATS:n johtokunnan sihteeri
Säteilyturvallisuusinsinööri
Fennovoima Oy
lauri.rintala@fennovoima.fi

VUOSI 2020 ei ole mahdollistanut kovin aktiivista yhdistystoimintaa Cov-sars-2-viruksen levitessä ympäri maailmaa. Vuosikokouksen jälkeen ensimmäinen jäsentilaisuus päästiin järjestämään 22.9.2020 TVO:n tiloissa ja virtuaalisesti Zoom-alustalla. Paikan päällä tilaisuuteen osallistui 10 ja virtuaalisesti 17 henkeä.

YETI-työryhmä

Työ- ja elinkeinoministeriön erityisasiantuntija Linda Kumpula piti esityksen kansalli-

sesta ydinjätehuollon yhteistyöryhmästä, eli YETI-ryhmästä. Työryhmä sai alkunsa, kun TEM:iin tuli kyselyitä liittyen pienten toimijoiden ongelmiin radioaktiivisen jätteen kanssa. Ydinvoimalaitoksilla jätehuolto on hyvin hoidossa, mutta sairaaloilla ja muilla toimijoilla, jotka tuottavat pieniä määriä radioaktiivista jätettä, on haasteita saada hoidettua jätehuoltoa loppuun asti.

YETI-työryhmään pyydettiin osanottajat neljästä ministeriöstä, STUKista, voimayhtiöistä, VTT:ltä, Posivalta ja yliopistoista. Puolentoista vuoden projektissa keskusteltiin tiiviisti ja koi-

tettiin hahmottaa miten eri lakien piirissä ja niiden välillä siirtymistä voitaisiin helpottaa jätehuollon sujuvoittamiseksi.

Erityisen haasteelliseksi havaittiin säteilylain alaisten pienempien toimijoiden radioaktiivisten jätteiden loppusijoittaminen, sillä pienillä toimijoilla ei ole mahdollisuutta ylläpitää omaa loppusijoitusratkaisua. Kaikki toimijat tunnistivat haasteelliseksi valvonnasta vapautetun jätteen, sillä perinteiset jätehuolto-yhtiöt eivät halua ottaa sitä vastaan, koska pelkäävät jätteen muodostuvan ongelmaksi radioaktiivisuuden takia.

Työryhmän lopputuloksena saatiin 15 suositusta viranomaisten toiminnan muuttamiseksi ja 7 ehdotusta luvanhaltijoille tai kansallisen toiminnan tukemiseksi. Esimerkiksi ehdotettiin muutoksia nykyisten loppusijoitusta hoitavien toimijoiden lupaehtoihin, niin että ne voisivat hoitaa myös muiden toimijoiden pienjätteiden käsittelyn ja loppusijoittamisen.

Valvonnasta vapautetun jätteen saamiseksi perinteisten jätehuolto-yhtiöiden tehtäväksi ministeriöt ja STUK laativat yhdessä oppaan, ja ympäristöministeriö yhdessä STUKin kanssa pyrkii kouluttamaan jätehuoltotoimijoita asiasta.

Suositukset ja ehdotukset eivät ole osallistujia sitovia päätöksiä, mutta näillä on osallistujien vahva tuki ja ne ovat yhteisen edun mukaisia. Määräajat näiden toteuttamiselle ovat pääasiassa vuosina 2020–2023 ja niiden toteutumista seuraamaan perustettiin seurantaryhmä, joka kokoontuu 1–3 kertaa vuodessa. YETI-ryhmän loppuraportti on luettavissa TEM:in nettisivuilla.

Katsaus TRIGAn lopun alkuun

Tilaisuuden toinen esitys oli Markus Airilan pitämä tilannekatsaus Otaniemen tutkimusreaktorin eli FiR 1:n (TRIGAn) käytöstäpoistoon. Airila on ollut jo viisi vuotta projektipäällikkönä eli käytännössä koko käytöstäpoistoprojektin ajan.


Tutkimusreaktori käynnistyi presidentti Kekkonen käsissä 1.9.1962 ja viimeinen toimintapäivä oli 30.6.2015, eli vuosia ehti kertyä vajaa 53. Alasajon jälkeen on tehty yksityiskohtaisempaa purkusuunnittelua, ja varsinaisen käytöstäpoistolupahakemus jätettiin TEM:iin vuonna 2017. Lausuntokierroksen ja hakemuksen täydentämisen jälkeen STUK antoi lausunnon ja turvallisuusarvion keväällä 2019. Tämän hetken tavoite on, että purkamisen tapahtuisi vuonna 2022 ja 2023 voitaisiin siirtyä jo valvonnasta vapauttamiseen.

Varsinaista käytöstäpoistolupaa ei kuitenkaan ole vielä myönnetty, mutta Airilan arvion mukaan luvan myöntämisen edellytykset on

melkein saavutettu tällä hetkellä. Isoin viimeaikainen saavutus on Fortumin kanssa tehty palvelusopimus, joka sisältää yksityiskohtaisemman purkusuunnittelun, itse purkutyön sekä purkujätteen ja polttoaineen välivarastoinnin, mikäli polttoainetta ei saada palautettua Yhdysvaltoihin ennen kuin se pitää saada pois reaktorista.

Kun tutkimuslaitos purkaa tutkimusreaktoria, purkusuunnitteluun on luonnollisesti kuulunut paljon tutkimusta. Esimerkkeinä Airilasta esiin reaktorisydäntä ympäröivien rakenteiden aktivoitumisen mallintamisen. Tässä työssä on saanut kaivaa historialliseksi dokumentteja, koska TRIGAn konfiguraatiota on muutettu vuosien saatossa: alkuvuosina sydäimestä johdettiin suihkuputkia pitkin neutroneja tutkimuskohteisiin, mutta nämä putket ovat olleet tulpattuina jo pitkään. 1990-luvulla reaktorin kylkeen rakennettiin BNCT-hoitotila. Reaktoria ympäröivästä betonista kairattujen näytteiden mittausten perusteella aktivoitumismallinnus on ollut tarkkaa.

TRIGAn käytetty polttoaine kuuluu Yhdysvaltojen energiaministeriön palautusohjelmaan, mutta tämä pitää sisällään isoja epävarmuuksia, vaikka ydinenergialakiin onkin kirjattu poikkeus, joka mahdollistaa tutkimusreaktorin polttoaineen maastaviennin. Käytöstäpoistolupaa varten VTT on tehnyt periaatesopimuksen Posivan kanssa loppusijoituksesta, mikäli palautus ei lopulta onnistu.

Esityksen loppuksi Airila lupasi kattavamman artikkelin ATS Ydintekniikkaan, kuitenkin vasta sitten kun käytöstäpoistolupa on myönnetty. Jäämme mielenkiinnolla seuraamaan tilannetta ja odottamaan luvattua artikkelia. 



Metallien lisäävä valmistus tuo hyötyjä myös ydinenergiateollisuuteen

Teknologisen kehityksen ja lisääntyneen tuottavuuden ansiosta materiaalia lisäävän valmistukseen (Additive Manufacturing, AM) eli 3D-tulostuksen kustannukset ovat laskeneet ja useat teollisuudenalat ovat tutkimassa ja ottamassa käyttöön lisäävää valmistusta tuotannossaan. Ydinenergia-alalla kiinnostuksen taustalla on kaksi selkeää kannustinta: kyky valmistaa hyvin monimutkaisia geometrioita ja toisaalta mahdollisuus valmistaa varaosia nopeasti ilman pitkiä toimitusaikoja. Ydinvoimalaitoksen käyttöikä on pitkä, ja vanhentuneiden varaosien saatavuudesta ja pitkistä valmistusajoista on tulossa yhä suurempi haaste. Äärimmäisissä tapauksissa tämä aiheuttaa pitkittyneitä ja kalliita seisokkeja ydinvoimaloille. Siksi lisäävä valmistus tarjoaa houkuttelevan vaihtoehdon varaosien valmistukselle.

Teksti: Pasi Puukko, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

ILMEISTEN ETUJEN OHELLA on myös useita avoimia kysymyksiä ja haasteita, jotka on ratkaistava, jotta lisäävän valmistuksen kaikki mahdollisuudet voidaan hyödyntää. Aiheeseen liittyvän tiedon ja tietoisuuden lisäämiseksi Energiforsk järjesti 23.9.2020 aiheesta webinaarin ”Metallien lisäävän valmistuksen ydinenergia-ovellukset”.

Seminaarin kohderyhmänä olivat ydinenergiasektorin kunnossapidon, materiaalitutkimuksen ja laitoskehityksen parissa työskentelevät henkilöt sekä lisäävän valmistuksen

asiantuntijat, jotka haluavat lisätä osaamistaan ydinenergiateollisuuden sovelluksista ja tarpeista. Webinaari järjestettiin yhteistyössä Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n kanssa.

Lisäävä valmistus tuotannossa

Keskeisiä teemoja webinaarissa olivat tuotannolliset sovellukset, laadun hallinta ja kelpuutus sekä muut toimenpiteet turvallisen käyttöönoton varmistamiseksi. Webinaarin ensimmäisen varsinaisen esityksen piti vanhempi asiantuntija Pajazit Avdovic Siemens Energystä Ruotsista. Siemensillä on pitkä historia sekä energia-alalla että lisäävän valmistuksen hyödyntämisessä. Metallien lisäävä valmistus on aloitettu vuonna 2009, ja tällä hetkellä käytössä on yli 40 konetta. Tärkeimmät kannustimet lisäävän valmistuksen hyödyntämiseen ovat olleet lyhyempi markkinoille tuloaika ja läpimenoaika, vähemmän resursseja kuluttava tuotantoprosessi, kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä johtuvat ympäristöedut ja osien suunnittelun joustavuus.

AM-valmistettu kaasuturbiinipoltin on eräs tunnetuimpia esimerkkejä laserpohjaisella jauhepetisulatuksella (Laser-based Powder Bed Fusion, L-PBF) valmistetusta komponentista, ja se on ollut kaupallisessa tuotannossa vuodesta 2018. Merkittäviä etuja ovat erillisten

osien yhdistäminen 13 osasta ja 18 hitsistä yhteen integroitua osaan sekä merkittävästi lyhennetty läpimenoaika.

Toinen ydinenergiateollisuuden esimerkki on 3D-tulostettu palovesipumpun juoksupyörä, joka on käytössä Krskon ydinvoimalassa Sloveniassa. Vanhentunut osa, jonka alkupeleistä toimittajaa ei ollut olemassa, rakennettiin käänteisesti ja AM-hyväksytettiin. Tärkein kannustin tässä tapauksessa oli merkittävä läpimenoajan lyheneminen. Näiden kahden esimerkin lisäksi Pajazit esitteli myös muita mielenkiintoisia esimerkkejä.

Siemensin visio on kehittää tuotantoa kohti itsenäistä AM:ia lisäämällä älykkyyttä ja koneoppimisen työkaluja. Pajazit korosti myös, että lisäävä valmistus on paljon muutakin kuin vain 3D-tulostusta: tulee hallita myös materiaalitieto, AM-suunnittelu, laadunvarmistus, jälkikäsitteily sekä työterveys- ja turvallisuusnäkökohdat.

Ydinvoimayhtiön näkökulmaa antoi Dino Nerwey Teollisuuden Voimasta. Kiinnostuksen kohteena olevat tekniikat ovat laserpohjainen jauhepetisulatus (L-PBF) ja suorakerrostus eli DED-tekniikat (Directed Energy Deposition). Jälkimmäinen on erityisen mielenkiintoinen teknologia vanhojen tai kuluneiden komponenttien korjaamiseen. TVO:lla on käynnissä useita hankkeita, mukaan lukien pro



Pasi Puukko

Tiimipäällikkö,

kehittyneet valmistusteknologiat
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
pasi.puukko@vtt.fi

gradu -tutkielma ja olemassa olevien kooditapausten eli ”code casejen”, kuten EPRI:n ja Westinghousen Code Case (nro 20-254), seuranta. TVO:n tavoitteena on myös valmistaa venttiilirunko ruostumattomasta teräksestä ja asentaa se voimalaitoksen ei-kriittiseen kohteeseen.

Heidän kohtaamansa yleiset haasteet liittyvät standardointiin, laatuodotuksiin sekä valvontaan ja jälkikäsitteilyyn. Ydinenergiaspesifiset haasteet liittyvät muun muassa säteilyn materiaali vaikutuksiin ja jännityskorroosiohalkeiluun. Ylipäänsä ymmärrys vaaditusta laadusta suhteessa suorituskykyvaatimuksen täyttämiseen on keskeinen kysymys.

Laadun hallinta ja kelpuus keskeisessä roolissa

Steve Nardone, laboratorion päällikkö ENGIE Laborelecistä kertoi prosessista, jonka lopputuloksena ENGIE-jauhelaboratorioilla on Lloyd’s Register -sertifikaatti. Pohjimmiltaan sertifikaattiin sisältyy ruostumattoman teräksen 316L-jauheiden sertifiointi, SLM500-laitteen validointi sekä tuotetun ruostumattoman teräksen sertifiointi mekaanisen suorituskyvyn osalta.

Jauheraaka-aineiden hyväksymiskriteerien ja laatuindikaattorien muotoilemiseksi on tarvittu paljon kehitystoimintaa. Tärkeintä on varmistaa prosessin vakaus, laatu ja toistettavuus pitkällä aikavälillä suurissa tuotantosarjoissa. Huomioon otettavia tekijöitä ovat muun muassa jauhe-erä, jauheen varastointi ja kierrätys sekä komponenttien sijoittelu rakennusosalalle eli nestaus. Näiden tekijöiden vaikutus selitettiin havainnollistavilla esimerkeillä.

Hyvin monimutkaisten geometrioiden ja yksilöllisten komponenttien valmistaminen tuo mukanaan erityisiä haasteita laadunvarmistukselle. VTT:n erikoistutkija Alejandro Revuelta kertoi, että tavanomaisia rikkomattoman testauksen (Non-Destructive Testing, NDT) menetelmiä ei sellaisenaan voida soveltaa hyvin monimutkaisiin geometrioihin, ja toisaalta rikkovan testauksen hyödyllisyys vähenee komponenttien pätevöinnissä ja yksittäisten osien laadun valvonnassa.

Käytönaikainen prosessimonitorointi on lupaava, mutta ei vielä yksin riittävän kypsä tekniikka laadunvalvontaan. Siksi tällä hetkellä paras lähestymistapa on näiden kolmen tekniikan yhdistelmä, eli rikkovan ja rikkomattoman testauksen sekä prosessin käytönaikaisen monitoroinnin käyttö rinnakkain.

Alejandro antoi myös yleiskuvan AM-standardointitoiminnoista. AM-standardoinnissa on monia aukkoja, jotka rajoittavat tekniikoiden

käyttöönottoa. Standardointiorganisaatiot kehittävät kuitenkin aktiivisesti uusia standardeja ja puutteiden korjaamiseksi. Sovelluskohtaisia standardeja kehitetään pääasiassa lääketieteen ja ilmailu- ja avaruusteollisuuden aloille, eikä ydinenergiateollisuudelle ole vielä olemassa erityisiä standardeja.

Turvallisuus edellä

Säteilyturvakeskuksen toimistopäällikkö Pekka Välikangas aloitti esityksensä selittämällä Suomen ydinenergia-alan ja turvallisuusvaatimusten yleiset puitteet, jotka voidaan jakaa pakollisiin vaatimuksiin ja ohjeisiin. YVL-ohjeet käsittelevät melko yksityiskohtaisia teknisiä vaatimuksia, hyväksyttäviä käytäntöjä ja ohjeita.


Lisäävän valmistuksen osalta viranomaisen tavoitteena on: 1) valvoa AM-tekniikoiden luotettavuutta ja osien laatua, 2) seurata AM-koodien ja standardien kehitystä, 3) seurata AM:n tutkimusta ja kansainvälistä kehitystä ja 4) mahdollistaa edellisten puitteissa AM:n hyödyntäminen ydinvoimalaitoksissa. Hän esitteli myös vertailun perinteisten standardien ja AM-standardien välillä ja toi esiin joitain asioita, jotka tulisi ottaa huomioon AM-standardeissa, kuten suunnittelumarginaalit, laadunvarmistus ja testausmenetelmät.

Yhdysvaltalaisen näkökulman samaan teemaan toi Margaret Audrain, materiaali-insinööri US Nuclear Regulatory Commissionista NRC:stä. Useat Yhdysvaltojen sidosryhmät

työskentelevät aktiivisesti kehittyneiden valmistustekniikoiden käytön lisäämiseksi ydinenergiasovelluksissa, mukaan lukien laitostuimittajat, Nuclear Energy Institute (NEI), Electric Power Research Institute (EPRI) ja Yhdysvaltain energiaministeriö.

Keskeisiä toimintoja ovat standardointiaukkojen korjaaminen ja kooditapausten kehittäminen. Esimerkiksi ASMEn erityisryhmä kehittää ohjeistusta AM:lle otsikolla ”Paineenkestävien metallikomponenttien kriteerit lisäävää valmistusta käyttäen”. 316L L-PBF -tietopaketti ja Code Case ovat myös kehittäillä.

NRC:n toiminnan tavoitteena on varmistaa edistyneiden valmistustekniikoiden käyttö Yhdysvaltojen ydinvoimalaitosten toiminnassa. Osana viestintä- ja osaamisenhallintaa järjestettiin julkinen työpaja 7.–10. joulukuuta 2020.

Edellä mainittujen esitysten lisäksi webinarissa käsiteltiin muun muassa suunnittelun roolia ja työkaluja lisäävän valmistuksen kentällä, uusia materiaaliratkaisuja sekä jälkikäsitteilyjen merkitystä. Osa esityksistä myös nauhoitettiin, ja nämä nauhoitteet, esitysten kalvot sekä raportti webinarista löytyvät Energiforskin kotisivuilta osoitteesta <https://energiforsk.se/konferenser/genomforda/metal-additive-manufacturing-in-nuclear-applications>. 

Katso kaavio seuraavalla sivulla. >



Siemensen jauhepetisulatustekniikalla (L-PBF) valmistama kaasuturbiinipoltin koostuu vain yhdestä osasta eikä hitsausliitoksia tarvita. Siirryttäessä lisäävän valmistuksen käyttöön komponentin läpimenoaika lyheni merkittävästi (kuva: Siemens Energy).

General	Design	Manufacturing	Post-processing	Test methods & Quality	Qualification	Safety / Other
ISO/ASTM 52905:2015 Additive manufacturing — General principles — Terminology — 40,99	ISO/ASTM D18 52909 Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary — 40,99					
ISO 17296-2:2015 Additive manufacturing — General principles — Part 2: Overview of process categories and feedback	ISO/ASTM D18 52959 Additive manufacturing — General principles — Overview of data processing — 40,99					
ISO 17296-3:2014 Additive manufacturing — General principles — Part 3: Main characteristics and corresponding test methods	ISO/ASTM US 52911 Additive manufacturing — General principles — Standard practice for part postprocessing, coordinates and orientation — 40,99					
ISO 17296-4:2014 Additive manufacturing — General principles — Part 4: Overview of data processing						
ISO/ASTM 52915:2016 Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2						
ISO/ASTM 52901:2017 Additive manufacturing — General principles — Requirements for purchased AM parts						
ISO/ASTM 52901:2017 Standard Nomenclature for Additive Manufacturing — Coordinate systems and file nomenclatures						
Y14.46 - 2017 Project Definition for Additive Manufacturing						
ISO/ASTM CD TR 52919 Additive manufacturing — Data formats — File format support, acronyms and evolutions — 30,00						
WK2172: Additive manufacturing — General principles — Overview of data profile						

- = Category
- = Published AM standard by ASTM / ISO
- = Published AM standard by ASTM / ISO, new version under preparation
- = Published AM standard by other SDO
- = Joint standard under preparation by ISO/ASTM
- = Standard under preparation by ASTM

Feedstock material	Design	Manufacturing	Post-processing	Test methods & Quality	Qualification	Safety / Other
F3164 - 18 Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31602) with Powder Bed Fusion	F3164 - 18 Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31602) with Powder Bed Fusion					
F4148 - 14 Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes	ISO/ASTM 52916:2016 Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations	ISO/ASTM 52904:2016 Additive manufacturing — Process characteristics and performance — Standard Specification for metal powder bed fusion process to meet critical applications	F3291 - 18a Standard for Additive Manufacturing — Post Processing Methods — Standard Specification for Thermal Post-Processing Metal Parts Made Via Powder Bed Fusion	ISO/ASTM 52902:2018 Additive manufacturing — Test artifacts — Geometric capability assessments of additive manufacturing systems — 10,39	ISO/ASTM WD 52924-1 Additive manufacturing — Qualification principles — Part 1: Qualification of machine operators for metallic parts production	ISO/ASTM CD 52931 Additive manufacturing — Environmental health and safety — Standard guidelines for use of metallic materials — 30,20
ISO/ASTM 52907:2018 Additive manufacturing — Feedstock materials — Methods to characterize metal powders	ISO/ASTM 52911:2016 Additive manufacturing — Design — Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals	AMF7003 Laser Powder Bed Fusion Process		ISO/ASTM WD 52908 Additive manufacturing — Post-processing methods — Standard specification for quality assurance and post processing of powder bed fusion metallic parts — 30,00	ISO/ASTM WD 52924-2 Additive manufacturing — Qualification principles — Part 2: Qualification of machine operators for metallic parts production	ISO/ASTM WD 52916 Additive manufacturing — Data formats — File format support for optimization of medical image data — 30,20
AMF7002 Process Requirements for Production of Powder Bedstock for Use in Laser Powder Bed Additive Manufacturing of Aerospace Parts	ISO/ASTM PBF TR 52912 Additive manufacturing - Design / Functionally graded additive manufacturing	WK7217 Additive Manufacturing — Powder Bed Fusion — Multiple Energy Sources	ISO/ASTM AW 52909 Additive manufacturing — Post-processing and Characterization Techniques for AM Part Surfaces	ISO/ASTM DTR 52905 Additive manufacturing — General principles — Non-destructive testing of additive manufactured products — 30,99	ISO/ASTM D3 52942 Additive manufacturing — Qualification principles — Qualifying machine operators of laser metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications — 40,99	
WK67464 Additive manufacturing — Feedstock materials — Methods to characterize metallic powders	WK64190 Additive Manufacturing Design - Decision Guide		WK65882 - Evaluating Post-processing and Characterization Techniques for AM Part Surfaces	F3122 - 14 Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Parts in Additive Manufacturing Processes	WK72488 Additive Manufacturing — Qualification principles — Qualification of coordinators for metallic parts production	
WK62190 Additive manufacturing Feedstock materials Technical specifications on metal powder				ISO/ASTM WD 52917 Additive manufacturing — Round Robin Testing — Guidance for conducting Round Robin studies — 30,00	WK65429 - Additive manufacturing Guideline for Installation, Operation and Performance Qualification (IOPQ) of Laser Powder Bed Fusion Equipment for Production Manufacturing	
WK52933 Additive Manufacturing — Feedstock Materials — Powder Reuse Scheme in Powder Bed Fusion Processes for Medical Applications				ISO/ASTM CD TR 52908 Additive manufacturing — Non-destructive testing and evaluation — Standard guidelines for intentionally scolding flaws in parts — 30,00	WK73164 Additive Manufacturing — Finished Part Properties — Standard Practice for Assigning Part Classifications for Metallic Materials	
WK71303 Additive manufacturing — Interchangeability of powder spreadsheets for powder bed fusion (PBF) processes				ISO/ASTM AW 52909 Additive manufacturing — Finished part properties — Orientation and location dependence of mechanical properties for metal powder bed fusion — 30,00		
				ISO/ASTM D18 52911 Additive manufacturing — System performance and reliability — Standard test method for acceptance of powder-bed fusion machines for medical materials for aerospace application — 40,00		
				WK69371 Standard practice for generating mechanical performance data		
				WK71306 Additive manufacturing — Accelerated quality improvement for powder bed fusion process		

AM-standardoinnissa on monia aukkoja, jotka rajoittavat AM-tekniologioiden käyttöönnottoa, eikä ydinenergiateollisuudelle spesifisiä AM-standardeja vielä ole. Puutteet standardoinnissa tunnistettiin yhdeksi keskeiseksi kysymykseksi, joka hidastaa AM:n käyttöä ydinenergia-alalla (kuva: VTT Oy).

Virtuaalimatka RRFM 2020 -konferenssiin

Kevästä syksyyn ja samalla 100 %:sesti verkkoon siirretty RRFM 2020 -konferenssi pidettiin lokakuussa. Seurattavana oli esityksiä, puheita, haastatteluja ja paneelikeskustelu. Aiheet kattoivat tutkimusreaktoreiden ja niiden polttoaineen elinkaaren suunnittelusta ja käytöstä aina käytöstäpoistoon. Kuulimme tutkimusreaktoreiden nykyisistä käytötavoista ja uusista tutkimusreaktorihankkeistakin.

Teksti: Pekka Viitanen **Kuvat:** VTT



TkL Pekka Viitanen

Johtava tutkija
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
pekka.viitanen@vtt.fi

RRFM-KONFERENSSI PIDETTIIN tänä vuonna virtuaalisesti. Kaikkiaan osallistujia oli 260 henkilöä 32 maasta. Kiinnostus oli siis suhteellisen mittavaa ja lopun paneelikeskusteluakin jaksoi seurata liki 60 tunnollista osallistujaa. Laajaa osanottoa osaltaan selittää kiinnostavan aiheen lisäksi myös osallistumisen helppous ilman pitkäjäisiä matkoja.

Positiivistakin on siis löydettävissä nykyisestä matkustusrajoitusten ja etätyön ajasta, mutta ilman muuta laitosvierailujenkin lisäksi jotain jäi puuttumaan. Konferenssihän oli alun perin tarkoitus pitää Helsingissä, joten nyt virtuaalivierailtamme jäi kokematta tutustuminen Otaniemen FiR 1 -reaktorille ja muihin atomitekniikan kannalta kiinnostaviin tiloihin.

Konferenssin ohjelma

Konferenssin ohjelma kattoi lähes kaiken mahdollisen reaktoreiden elinkaareissa. Esi-



FiR 1 -reaktorin purku on ajoitettu vuosille 2022–2023.

tyksiä oli uusista reaktorihankkeista, käytön ajan käytännöistä muun muassa turvajärjestelyistä, pohdintaa käytön jatkamisesta ja käytöstäpoistosta. Ohjelmaan kuului myös kaksi posterisessiota, joissa myös suuret laite- ja järjestelmävalmistajat esittivät järjestelmiään ja laitteitaan.

Polttoaineen elinkaari

Tutkimusreaktorin polttoaineen elinkaari oli aihe, joka varmasti kiinnosti suomalaista yleisöä. VTT edistää tällä hetkellä käytetyn polttoaineen huoltoa kahdella rintamalla. Edelleen ensisijainen tavoite on polttoaineen palauttaminen alkuperämaahansa Yhdysvaltoihin, mitä ajatellen tekniset valmistelut on tehty mahdollisimman valmiiksi.

Tämän rinnalla on aloitettu Fortumin kanssa välivarastoinnin valmistelu Loviisan voimalaitoksella, jotta reaktorin purkamisen aika-

Hyvityksenä nyt peruuntuneesta konkreettisesta konferenssista saimme tiedon, että ensi syksyn konferenssin paikkana on edelleen Helsinki. Merkatkaa kalentereihinne 26.–30.9.2021!



VTT:n Antti Rätty mittaamassa annosnopeuksia tutkimusreaktorin polttoaine-elementin lyhennetyistä instrumentaatioputkesta Idaho National Laboratoryn teknikoiden seurattessa operaatiota.

taulu on voitu lyödä lukkoon. Mahdollinen loppusijoitus Suomessa ei ole vielä polttavan ajankohtainen kysymys, sillä Yhdysvallat on jatkanut tutkimusreaktorien polttoaineen vastaanotto-ohjelmaa vuoteen 2029 asti.

Tutkimusreaktoreiden käyttö

Tutkimusreaktoreiden hyödyntäminen tällä hetkellä on monille operattoreille päivänpolttava kysymys. Maailmalla tutkimusreaktoreiden käyttö lääketieteessä sekä tieteen ja tutkimuksen apuna jatkuu. Esitettyjen vuoden takaisten lukemien mukaan käytössä on 224 tutkimusreaktoria, 13 reaktoria on tilapäisesti sammutettu ja 13 reaktoria on pitkäaikaisessa sammutustilassa. FiR 1 kuuluu viimeiseen kategoriaan.

Maailmanlaajuisesti on suunnittelun eri vaiheissa kaikkiaan noin 40 uutta tutkimusreaktoria. IAEA:n esityksen mukaan on kuitenkin useiden reaktoreiden hyötykäyttö tällä hetkellä vähäistä, ja operaattoreiden on valittava jatkokäytön tai lopullisen sulkemisen välillä lähitulevaisuudessa.

Reaktoreiden käytön jatkamiseen liittyviä esityksiä oli myös reaktoreiden käytöstä ja

eliniän hallinnasta. Suunnitelmia ja konsepteja uusien reaktorien rakentamiseksi esiteltiin neljässä esityksessä.

Käytöstäpoisto

Käytöstäpoisto yhtenä pääaiheena kiinnosti varmasti suomalaista yleisöä ajankohtaisuutensa takia. Aiheesta oli kahdeksan esitystä, jotka käsittelivät käytöstäpoiston eri osa-alueita, muun muassa purkamistekniikoita, riskien hallintaa, jätehuoltoa sekä polttoaineen jälleenkäsittelyä.

Tässä sessiossa oli mukana esitys FiR 1:n käytöstäpoiston lupamenettelyistä. Esityksessä tuotiin esiin myös mittavaa taustatyötä, jota luvituksen eteen on tehty. Käytöstäpoistojätteen aktiivisuuden arvioiminen laskennallisina ja tätä tukevan näytteenoton ja mittausten menettelyin on ollut välttämätöntä pohjatyötä käytöstäpoistoluvan saamiseksi.

Turvallisuus ja turvajärjestelyt

Käytöstäpoisto-osuuden kanssa rinnakkaisia esityksiä oli tutkimusreaktoreiden turvallisuudesta ja turvajärjestelyistä. Aiheet eivät

suoranaisesti koskettaneet turvajärjestelyjä, mutta esimerkiksi valmiustointia sivuavaa laskentaa esiteltiin jonkin verran. Vanhaa leviämislaskijaa sykhdyttivät erityisesti Wienin keskustaan lasketut leviämiskarit.

Innovatiiviset menetelmät

Konferenssin tieteellisin osuus käsitteli reaktorifysiikan ja termohydrauliikan innovatiivisia menetelmiä. Aiheesta oli neljä esitystä, jotka pitkälti koskivat analyysikoodien validointia ja benchmarkkausta.

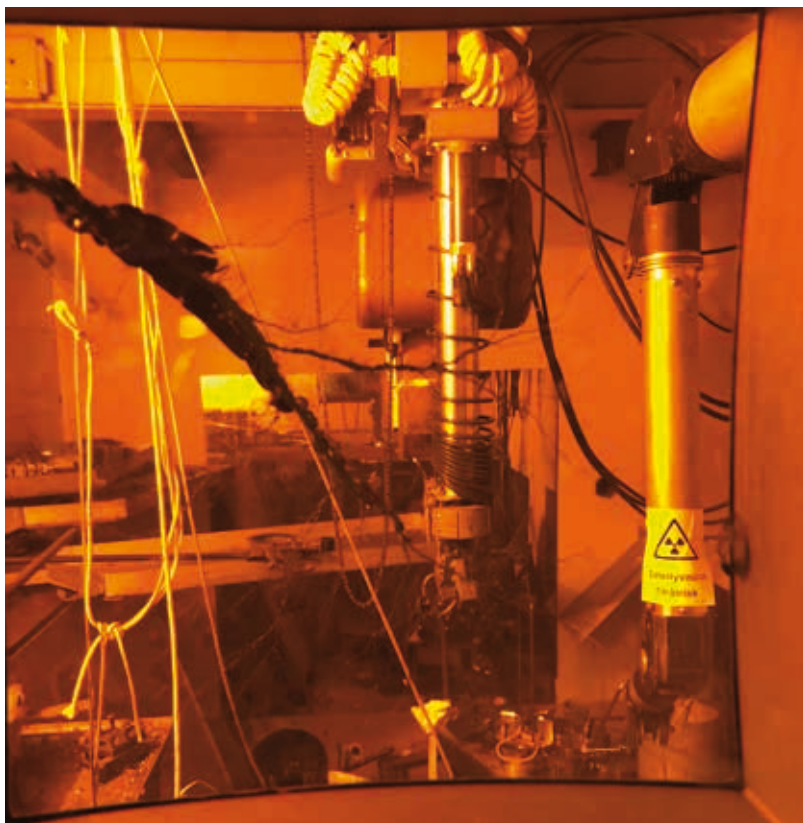
Vierailu, joka siis ei toteutunut, Reaktorilaboratorioon

Fyysisen läsnäolon ohella jäivät RRFM 2020:ssä kokematta suunnitellut laitoskäynnit. Näihin olisi kuulunut myös vierailu Otakaari 3:een VTT:n FiR 1 -reaktorille. Asiasta kiinnostuneille olisi esitelty myös samassa kiinnostuneille olisi esitelty myös samassa kiinnostuneissa aikoinaan toimineita hot cell -tiloja.

Reaktorihallissa voi edelleen kurkistaa reaktorisydämeen ja todeta Tšerenkov-säteilyn sinisen hohteen hiipuneen. Reaktorin valvomo on edelleen toiminnassa ja siellä seurataan ve-

Radioaktiivisten materiaalien tutkimuslaboratoriossa haastavimpia kohteita ovat reaktorimateriaalien työstämisessä käytetyt tilat, joissa suurien annosnopeuksien takia ennen purkamista vaadittu siivoustyö on tehtävä kauko-ohjatusti vanhoilla "reumaattisilla manipulaattoreilla".

Oikealla alhaalla: VTT:n maanalaisissa tiloissa sijaitsee aiemmin radioaktiivisten materiaalien tutkintaan käytetty, nyt jo säteilyvalvonnasta vapautettu tutkimushalli.



den laatua ja puhdistuspiirien toimintaa. Myös BNCT-asema on edelleen paikoillaan, joskin suuri osa irtaimistosta on jo purettu.

Materiaalitutkimustilojen käytöstä poistaminen etenee toiminnalle myönnetyn säteilylain alaisen turvallisuusluvan mahdollistamana, kuten on laajemmin kerrottu ATS Ydintekniikan numerossa 2/2020. Suurin osa käyttökelpoisista tutkimuslaitteista on siirretty uusiin moderneihin tiloihin toisaalle Otaniemeen.

Purkutyö keskittyy nyt vuosikymmenien aikaisessa tutkimustoiminnassa kertyneiden aktiivisten näytteiden ja jätteiden pakkaamiseen. Työ etenee tällä hetkellä hyvin, ja parhaassa tapauksessa vuoden päästä esiteltävänä on enää tyhjiä, puhtauttamia kiiltäviä tiloja ja hyvässä järjestyksessä varastoituja jätetynnyreitä.

Ensi vuonna uusi yritys, RRFM 2021

Paras konferenssiuutinen VTT:n ja Suomen kannalta oli se, että ensi syksynä konferenssi aiotaan jälleen järjestää Helsingissä, tarkalleen 26.-30.9.2021. Otaniemen tilojen lisäksi on jo alustavasti suunniteltu vierailua Loviisaan, missä päästäisiin tutustumaan tiloihin, joihin FIR 1:n purkujätettä aiotaan loppusijoittaa. ☸



Robottiikan hyödyntäminen ydinvoimalassa

Robottiikasta voidaan saada teollisuusympäristössä monenlaisia hyötyjä. Yksi tärkeimmistä hyödyistä koskee työtehtävien suorittamista ihmisille hankalissa ja vaarallisissa paikoissa. Yksi tällainen tehtävä on Loviisan ydinvoimalaitoksen höyrytimien neljän vuoden välein tehtävä tarkastus ja puhdistus, joka on ihmisvoimin toteutettuna vähintään epämiellyttävä operaatio ja aiheuttaa myös merkittäviä säteilyannoksia työtä suorittaville henkilöille.

Teksti: Ville Lestinen, Jaakko Oksanen **Kuvat:** Jaakko Oksanen

L OVIISAN YDINVOIMALAITOKSELLA lämpö siirretään primääripiiristä sekundaariin vaakahöyrytimien avulla. Höyrytimien suunnitellun mukainen toiminta on edellytys sille, että voimalaitos tuottaa halutun määrän energiaa. Höyrytimet toimivat myös rajapintana primääripiirin radioaktiivisen veden ja sekundaaripuolen säteilemättömän veden välillä. On siis tärkeää, että höyrytimien putket ja muut rakenteet pysyvät puhtaina ja ehjinä käytön aikana, jotta lämpö siirtyi halutusti, höyrytintä toimii suunnitellusti ja säteilevä vesi ei pääse vääriin paikkoihin.

Höyrytimet avataan neljän vuoden välein puhdistusta ja rakenteiden tarkastusta varten. Höyrytimien pohjalle kerääntyä ajan myötä magnetiittia syöttöveden mukana tulevan raudan vuoksi. Mahdollisimman suuri osuus kerääntyneestä magnetiitista imuroidaan ihmisvoimin pois höyrytimestä höyrytimen avaamisen yhteydessä. Samalla tehdään erilaisia visuaalisia tarkastuksia höyrytimen sisärakenteista.

Höyrytimen sisäosat ovat ihmiselle vähintään epämiellyttävä työympäristö ja myös työturvallisuusriski. Lisäksi höyrytimessä työskentely tuottaa suhteellisen suuria säteilyannoksia

työntekijöille. Loviisan höyrytintä on siis erinomainen kohde robotisaation hyödyntämiseen. Robotin avulla saadaan vähennettyä merkittävästi ihmisten tarvetta mennä höyrytimen sisälle. Samalla työturvallisuus paranee ja säteilyannokset vähenevät.

Projektin taustaselvitykset

Jo ennen tätä projektia Loviisassa on selvitetty mahdollisia vaihtoehtoja höyrytimen puhdistuksen ja tarkastuksen suorittamiseksi robotilla tai muulla laitteella. Esille tulleet vaihtoehdot ovat kuitenkin olleet sellaisia, että ne ovat tukeutuneet höyrytimen tuubeihin, joihin ei haluta koskea, jotta ne eivät vaurioitu.

Aiemmistä selvityksistä huolimatta robotin kehittäminen aloitettiin kartoittamalla vielä kerran olemassa olevia robotteja ja muita vastaavalaisten höyrytimien puhdistukseen ja tarkastukseen käytettyjä ratkaisuja. Selvityksessä ei löytynyt uusia reunaehdot täyttäviä ratkaisuja, joten projektissa päätettiin yhdessä Loviisan voimalaitoksen kanssa aloittaa oman robotin kehittäminen.

Työ tehtiin yhteistyössä Jyväskylän ammattikorkeakoulun (JAMK) kanssa. Suunnittelu, kehitystyö ja tehdastestit tehtiin Jyväskylässä ja Fortumlaiset toimivat projektin vetäjänä sekä höyrytimen puhdistus- ja tarkastusprosessin asiantuntijoina. Projekti rahoitettiin Fortumin ydinvoimapuolen Future Nuclear Technology T&K-ohjelmasta. Suunnittelutyö aloitettiin 2019 ja laitetta päästiin testaamaan Loviisa 1:n vuosihuollossa syyskuussa 2020.

Suunnittelutyö ja tehdastestit

Monien ideoiden ja ajatusten kautta päädyttiin kehittämään lauttaa, joka kuljettaisi mukanaan tarvittavia valoja, kameroita, sähkökaapeleita ja hydrauliliikkeitä sekä imurin letkua. Imurin letku päätettiin kuljettaa lautalle kelluvan suojaputken avulla. Imurin letkuun yhdistettiin myös endoskooppi höyrytimen pohjan tutkimista varten.

Lautan ohjaus hoidettiin vesisuihkuilla, joiden tarvitsema paine tuotettiin tehokkaalla kompressorilla. Lautan päälle sijoitettiin ohjattava kamera ja alaspäin kuvaaminen hoidettiin endoskoopin avulla.

Etukäteen haasteita aiheuttavaksi tekijäksi uskottiin höyrytimen sisäosien hankala rakenne. Puolivälissä höyrytintä on poikittainen syöttövesiputki, joka katkaisee lautan vapaan kulkureitin.

Jyväskylän uimahallissa tehdyissä testeissä havaittiin kuitenkin muitakin kriittisiä ongelmia. Heti aluksi huomattiin, että alkuperäinen lautta ui liian syvällä. Tämä ratkaistiin ohentamalla



DI Ville Lestinen
Development Manager
Fortum
ville.lestinen@fortum.com



DI Jaakko Oksanen
Lehtori
Jyväskylän ammattikorkeakoulu Oy
jaakko.oksanen@jamk.fi



Loviisan voimalaitoksessa on molemmilla yksiköillä 6 vaakahöyrystintä, joiden tehtävä on siirtää reaktorin tuottama energia sekundääripiiriin.

alumiinisten ponttonien materiaalipaksuuksia ja vaihtamalla lautan kannen materiaali kevyemmäksi eli hiilikuiduksi. Myös lautan ohjaamiseen tarvittava paine vaati hieman testailua ja lopulta päädyttiin hyvin tehokkaaseen kompressoriin, jonka huono puoli oli suuri koko ja paino.

Ehkä suurin haaste oli kuitenkin imurin letkun liikkuminen kelluvassa suojaputkessa. Letkun ja suojaputken väliin syntyvä kitka aiheutti suuria vaikeuksia. Lopulta löytyi sellai-

nen suojaputki, jonka sisällä imurinletku liikkui ongelmitta.

Testit höyrystimellä

Lopulta kaikki toimi uimahalliympäristössä hyvin ja lautta päästiin testaamaan Loviisan voimalaitoksen vuosihuollon yhteydessä höyrystimellä. Testauksen alkuvaihe hieman viivästyi monistakin syistä, mutta lopulta pääsimme höyrystimelle asentamaan laitteita käyttökuntoon.

Höyrystintila itsessään asetti ensimmäiset haasteet. Laitteiden, letkujen ja kaapeleiden siirtely ja pujottelu ahtaassa tilassa vaatii kekseliäisyyttä, kuntoa ja hyviä hermoja. Kaikki saatiin kuitenkin lopulta paikalleen ja testit käyntiin.

Etukäteishuoli siitä, että lautta ei pääse syöttövesiputken ohi höyrystimen perälle, osoittautui oikeaksi. Ongelma on varmasti ratkaistavissa tavalla tai toisella, mutta eräs yksinkertainen vaihtoehto on myös se, että lautta vain käydään nostamassa syöttövesiputken yli höyrystimen takaosaan.

Lautan ohjausjärjestelmä toimi erinomaisesti. Lautta saatiin ohjattua haluttuihin paikkoihin eikä se ollut edes kovin vaikeaa. Muu-

taman minuutin harjoittelulla lautta kulkee haluttuun paikkaan.

Höyrystimien yläosien kuvaaminen onnistui erinomaisesti. Ehkä valoja olisi tarvittu hieman enemmän, mutta valoja on helppo lisätä joko lautalle tai höyrystimen vaipan sisäpinnalle. Endoskoopin valoteho sen sijaan pitäisi olla selkeästi parempi.

Endoskooppi ja imurinletku saatiin laskettua onnistuneesti haluttuihin paikkoihin, mutta valon määrä olisi saanut olla höyrystimen tuubien keskellä suurempi. Imurointia ei vielä päästy testaamaan.

Yhteenveto

Kokonaisuutena lautan testaus onnistui erinomaisesti. Monia kehityskohteita kuitenkin tuli ilmi testeissä ja imuroinnin testaaminenkin on vielä edessä, joten työtä riittää ennen kuin lautta on käyttövalmis.

Nämä ensimmäiset testit höyrystimessä onnistuivat kuitenkin odotettuakin paremmin, joten jatkokehittelyyn voidaan lähteä positiivisin mielin. Toivottavasti tulevina vuosina voimme vähentää merkittävästi ihmisten tarvetta työskennellä höyrystimien sisällä!



Loviisan höyrystimen tarkastus- ja puhdistusrobotti tehdasteisteissä Jyväskylän uimahallissa.

Ydinvoima-ala tarvitsee Systems Engineeringiä

Ydinvoima-alan yleinen tehottomuus on tabu, josta ei juuri puhuta. Vielä 2020-luvun atomiyhteisössäkin on verinen synty kyseenalaistaa 1970-luvun oppien soveltuvuus tähän päivään. Kuitenkin tehokkaiden toimintatapojen oppiminen on ydinvoimateollisuuden selviämisen kohtalonkysymys. Yksi ratkaisun avaimista on systems engineering.

Teksti: Mika Koskela

SATSUMA-KAPINA on eräs Japanin historian virstanpylväistä. Meiji-restauraation myötä valtaan noussut keisari modernisoi maataan ja vei Japanin teolliseen aika-kauteen. Myös asevoimat uudistettiin. Sotavoimien painopiste siirtyi tuliaseiden käyttöön ja jalkaväen massakoulutukseen. Samalla sodankäynnin taito muuttui. Vuosikausien koulutuksen vaativa miekankäytön taide vaihtui liipaisinsormen koukistamiseen.

Entinen eliitti menetti asemansa, kuten myös aiemmin etuoikeutettu ja arvostettu samurailuokka. Tyytymättöminä kohtaloonsa sitkeimmät muutosta edeltäneestä valtaeliitistä julistivat itsensä perinteisten arvojen puolustajiksi ja nousivat kapinaan oman asemansa ja vanhan yhteiskuntamallin palauttamiseksi.

Kapinan loppu on romantisoitu elokuvamaailmassa miekkamiesten toivottomaksi taisteluksi konekiväärejä vastaan. Elokuva "The Last Samurai" kuvasi tarinaa hollywoodmaisittain, mutta ehdottomasti paras tulkinta on ruotsalaisen räminärockyhtyeen sanoitus, joka on kuin tarkka kuvaus globaalista ydinvoimateollisuuden tilanteesta:

*It's the nature of time
That the old ways must give in
It's the nature of time
That the new ways comes in sin
When the new meets the old
It always end the ancient ways*
(Sabaton: Shiroyama)

Historiallisen totuuden nimissä täytynee todeta, että myös Saigo Takamorin johtamilla traditionalisteilla oli käytössään jonkin verran kivääreitä ja kevyttä tykistöä, ei pelkkiä takorautamiekkvoja. Isossa mittakaavassa kyse oli kuitenkin sukupolvikokemuksesta: oliko kansakunnalla aika astua askel modernimpaan maailmaan vai tarrautuako kiinni perinteisiin.

Tekniikan kehityksessä sukupolvikokemukset ovat toimialasta riippumatta yllättävän samanlaisia. Tyypillisesti ensimmäinen sukupolvi on kokeilua, käsityöläistaidetta ja mestari-kisällikulttuuria. Toinen sukupolvi on kasvottomien massojen ohjaamista, ja kolmannesta eteenpäin lähdetään optimoimaan tiimien ja erikoisosaamisen hyödyntämistä. Ison mittakaavan kuvio toiminnan kehityksessä on pitkälti samankaltainen, oli kyseessä sodankäynti, autojen valmistaminen tai ydinvoimalaitosten suunnittelu.

Systems engineering syntyi toisen maailmansodan jälkeen

"Systems engineering" – olkoon suomeksi vaikka "systeemyö" virallisemmän suomenoksen puutteessa – on suunnittelunäkökulma, joka syntyi kasvavien projektien ja monimutkaisuuden hallintaan. Käytännössä systems engineering on työkalupakki suunnittelunhallinnan menetelmiä, joiden käyttöä ohjaa systeemiajatteluun pohjautuva, ongelmien



Mika Koskela

DI, kerettiläinen
CEO, Partner
IntoWorks Oy

mika.koskela@intoworks.fi

ennakoivaa hallintaa painottava poikkitekninen suunnitteluparadigma.

Harhaluulojen vastaisesti systems engineering ei syntynyt ohjelmistoteollisuuden tarpeisiin, vaan pelastamaan amerikkalaisen panssarirautaan painottuneen sotateollisuuden toiminta. Varaosahallinnan ja siihen liittyvän konfiguraationhallinnan tarve oli tullut esille jo toisen maailmansodan aikana. Hajonneesta panssarivaunusta ei saanut taistelukelpoista, mikäli korjaamiseen hankitut varaosat olivat pari tuotesukupolvea vanhempaan runkorevisioon.

Mitä monimutkaisemmaksi asejärjestelmät kävivät, sitä selkeämmäksi kävi ymmärrys, että suunnittelussakaan kyse ei ole pelkästään suunnittelusta ja suunnittelun katselmoinnista. Ydinkysymys on analyysien ja mallintamisen lisäksi tekemisen tavasta, eri organisaatioihin jyvitetyn suunnittelun tehokkaasta johtamisesta. Käytännön elementeiksi yleistyivät myöhemmin työn vaiheistaminen (elinkaari), ja vaiheiden ja vaiheita toteuttavien organisaatioiden oikean (vaatimusmäärittelyt ja väli tuotteiden verifiointi ja validointi) ja yhdenmukaisen (konfiguraationhallinta) kommunikaation varmistaminen päätöksentekomenettelyineen.

Mitä systems engineeringin käyttäminen käytännössä siis tarkoittaa? On olennaista huomata, että kyse ei ole laadun maksimoinnista, vaan riittäväksi määritellyn laadun saavuttamisesta halutussa aikataulussa rajatuilla resursseilla. Keinona tähän on ylimääräisen hallinnollisen työn karsiminen vähentämällä ennakoivasti organisaatioyksiköiden välistä *ad hoc* -toimintaa.

Työvaiheen syötettä ei oteta käyttöön, jos se ei ole valmis käyttöön otettavaksi. Laadunvarmistus ja kokonaisuuden synkronisointi suoritetaan etupainotteisesti, jolloin yllätyksiltä ja hintavilta muutoksilta vältytään. Pullonkaulojen ollessa selkeästi tunnistetta-

vissa myös rationaalinen priorisointi on mahdollista ja aikataulut ovat ennakoitavissa.

Luonnollisesti *ad hoc* -sekoilun vähentäminen tarkoittaa tarkempaa toiminnan suunnittelua. Systems engineering -pohjaisessa ajattelussa työn suunnittelulla ja kirjatulla suunnitelmilla on suuri rooli.

On selvää, että oikein toteutettuna systems engineering vähentää keskitason suunnittelujohdon vapaata päätösvaltaa. Tämä on nimenomainen tarkoituskäsi, koska laajoissa suunnitteluprojekteissa juuri ylimääräinen *case-by-case*-päätöksenteko kokoustamisineen ja valmisteluineen vaatii aikaa ja resursseja. Ratkaisukaavojen etukäteen miettimisen ja erityyppisten suunnitelmien ja toimivien päätöksentekoprosessien merkitys on siis tehokkuuden kannalta erittäin merkittävää.

Onko tämä niitä ohjelmistokoodareitten foliohattujuttuja?

Niin, systems engineering syntyi asejärjestelmäkehityksen aikana, jolloin ohjelmistojen olemassaoloa ei vielä oikeastaan edes ymmärretty. Mutta linkki asioiden välillä toki on.

Ohjelmistoteollisuuden varhainen symbioosi systems engineeringiin lienee syntynyt luonnostaan 1970-luvulla. Niin USA:ssa kuin muuallakin varhainen ohjelmistoteollisuus oli kovin läheisessä kytköksessä puolustusvälineiteollisuuteen. Systems engineeringin ensimmäisten kehittäjien listassa vilisevät nimet kuten Bell Laboratories, MIT ja Rand Corporation. Samat organisaatiot olivat myös ohjelmistotekniikan pioneereja.

Läheinen suhde lienee ollut vaikuttamassa myös ohjelmistotuotannon perusopin kappaleiden syntymiseen. Kun hallittavien kokonaisuusien monimutkaisuus räjähti ohjelmistotekniikassa epätoivon vimalla silmille, ratkaisumallien lähtökohta oli luonnollista ha-

kea läheltä. Myöhemmin ohjelmistoteollisuuden kehitys on ollut kiivasta, mutta evoluution luomista ominaispiirteistä huolimatta kytkös systems engineeringiin on vahva.

Systems engineering on resurssien käytön ohjausta

Ongelmaa ei toki ole, jos alalla rahaa riittää. Kyse on vain resurssien tehokkaasta käytöstä. Ei ole periaatteellista estettä käydä sotaa miekkamiesten voimalla, eikä ole periaatteellista estettä käyttää vanhan sukupolven suunnittelumenetelmiä. Tällöin on kuitenkin oltava varaa ylläpitää vanhan sukupolven postuumiin tarkastukseen painottuvaa suunnitteluorganisaatiota suunnittelunhallintarakenteineen, jolloin vaadittava pääluku eroaa modernimmasta lähestymistavasta vähintään dekadilla. Kyse ei ole lopputuloksesta, vaan ympäröivän yhteiskunnan kehityksen asettamista rajoitusehdoista.

Keskeinen tekijä on toiminnan painopisteen sijoittaminen. Ydinvoimateollisuus on tottunut suunnittele- ja -analysoi-tyyppiseen postuumiin ongelmanratkaisuun, ei vaatimuslähtöiseen. Lopputulos ja siihen liittyvä vaatimustaso eivät alemmilla tuotehierarkian tasoilla välttämättä ole etukäteen edes tiedossa, vaan pyritään parhaaseen ja katsotaan mitä lopuksi saatiin.

Käsityöläismieleessä tässä ei ole mitään pahaa, jos yksittäisillä suunnittelijoilla on riittävästi aikaa kiillottaa suunnittelun tuloksiaan. Organisatorisesti tapa johtaa kuitenkin kiireen kertyessä osaoptimointiin, haasteisiin isompien kokonaisuusien hallinnassa, ja ennen kaikkea toiminnan rajapintoihin liittyvien ongelmaehtoisten suhteellisen myöhäiseen havaitsemiseen.

Useammallekin lukijalle herää väistämättä kysymys, miksi tämä on ongelma nyt, miksei 1970-luvulla? Vastaus on ilmeinen, mikäli vertailee esimerkiksi keskimääräisen luvanhaltijan organisaation insinöörivoimaa 1980-luvun alun ja tyyppisten nykyprojektien osalta. Saamani tiedon mukaan Loviisan rakentamisen aikana silloisen Imatran Voiman engineering-yksikössä työskenteli yli tuhat insinööriä.

Vertailua menneisyyden ja oman tai toimitajiensa nykyisen resurssitilanteen välillä voidaan tehdä kukin ydinvoimaorganisaatio itse. Toinen hyvä pohdinnan aihe on toki miettiä, onko 2020-luvun organisaatioissa henkistä tilaa kasvattaa moniosaajia, joita tarvitaan vanhan sukupolven käsityöläissuunnittelun koodintointiin lead-designer-rooleissa.

Katastrofin ainekset ovat luonnollisesti kassassa, jos resurssit mitoitetaan nykypäivän



Saigo Takamori ja Shiroyaman viimeiset. Alkuperäisen maalauksen tekijä tuntematon (kuva: Wikimedia Commons).



Saigo Takamori upseereineen (kuva: Le Monde Illustré, 1877, Wikimedia Commons).

suunnittelutiimien mukaisesti mutta käytössä ovat kuitenkin vanhan sukupolven menetelmät. Vertauskuvana sotilasmaailmaan: moderni hyvin varustettu erikoisjoukko on pienenäkin joukko-osastona varsin toimintakykyinen, mutta jokainen voi miettiä mitä tapahtuu, jos pahisten panttivankeja lähdetään vapauttamaan toisen maailmansodan taktiikoilla ja vipulukkokivääreillä.

Reaktorifysiikan perusteet eivät ole vuosikymmeniin muuttuneet, kuten ei ihmisen vahingoittamisen anatomiakaan, mutta ympäröivä yhteiskunta sekä tavoitteineen että työkaluineen on, oli sitten kyse sodankäynnistä tai projektoinnista.

Edistys voi tapahtua pienillä askelilla, mutta suunnan on oltava selvä

On kohtalaisen selvää, että systems engineering tulee aikaa myöten hakemaan oman roolinsa myös ydinlaitosten kokonaissuunnittelun filosofiasa. Käytännössä kaikki modernit turvallisuussuunnittelun hallinnan menetelmäkehyyk-

set nojaavat systems engineering -ajatteluun. Vaihtoehtoa ei yksinkertaisesti näytä olevan. Murros on enemmän tai vähemmän tapahtunut jo muualla, lentotekniikan ollessa pisimmällä.

Se millaiseksi ydinvoimateollisuuden tekniikanalariippumaton systems engineering lopulta muodostuu, on kohtalainen kysymysmerkki. Ajattelun kääntäminen postuumista tilanteen analysoinnista systems engineeringin etupainotteisuuteen on vähintäänkin haastavaa, ja vaatii nykyistä parempaa ymmärtämystä kokonaisuuksista.

Painopiste siirtyy "systems, structures and components"-näkökulmasta "plant, functions and systems"-suuntaan. Elinkaari pohjainen ajattelu alleviivaa ajallisen dynamiikan hallinnan merkitystä. Myös lisensioinnissa on oltava selkeää, mikä on viranomaisen kannalta riittävää kussakin hankkeen vaiheessa, ilman kristallipalloa ja ohjevoodoota.

Tulevaisuus vaatii töitä. Ydinvoima on keskeinen työkalu ilmastonmuutoksen hallintaan, mutta ratkaisuna toimiakseen alan on väistämättä uudistuttava, suunnittelumenetelmiä

myöten. SMR-mantran hokeminen ei riitä, jos toimintaa ei tehosteta siten, että kokonaisuus toimii myös länsimaaisessa markkinataloudessa. Olisi varsin surullista, mikäli ydinenergian kansallisen aikuistumisen sijaan päädyttäisiin tilanteeseen Shiroyama-vuorella: "surrounded and outnumbered".

Suomi ydinsulun ja rauhanomaisen ydinenergian käytön edelläkävijänä

Tänä vuonna ydinsulkusopimuksen (NPT, Non-Proliferation Treaty) solmimisesta tuli 50 vuotta. Meille ja tuleville sukupolville on tärkeää ymmärtää mitä Suomessa on aikanaan tehty, miksi on tehty ja miten nuo silloiset tekemiset nyt näkyvät ja mitä ne meille merkitsevät. Miten rauhanomainen ydinenergian käyttö alkoi Suomessa: mikä oli poliittisten päätösten rooli, millainen taas teollisuuden merkitys?

Teksti: Petri Paju ja Elina Martikka (johdanto)

SUOMI TUNNETAAN RAUHANOMAISEN ydinenergian käytön edelläkävijänä. Tutkimuksen toivottiin antavan vastauksia moniin kysymyksiin: Miksi Suomessa on haluttu kehittää ydinenergiaa? Mitä on keskusteltu, mitä sovittu? Ketkä asioita ovat pohitaneet ja millä tasolla? Mitkä olivat motivaatiot, että Suomi lähti aktiivisesti hoitamaan NPT-asioita? Vaikuttiko naapurimaa Ruotsin ydinaseohjelma?

Tutkimus valottaa ydinenergian rauhanomaisen käytön alkutaivalta Suomessa, ja samalla antaa osviittaa siihen, mitkä asiat tekevät Suomesta mallimaan maailmalla. Tämä on tärkeä ymmärtää, että osaamme jatkossa

vaalia hyviä käytäntöjämme. On hienoa voida kertoa ydinalan tulokasmalle, miten ydinenergian käyttö meillä alkoi. Vaikka asioita ei ole tästä vinkeleistä selvitetty aikaisemmin, liian myöhäistä ei ollut vielä, sillä useat noista 1970-luvun vaikuttajista ovat vielä menossa mukana.

Suomi ydinaseiden leviämisen estäjänä

Ydinaseiden leviämisen estäminen koskee käytännössä jokaista ydinalan toimijaa. Siitä on puoli vuosisataa pitänyt huolen kansainvälinen ydinsulkusopimus (NPT) ja sen perustalle

rakennetut ydinmateriaalien valvontajärjestelmät, mukaan lukien ydinalan vientivalvonta. Sääntö pätee myös ydinaseettomissa maissa kuten Suomi. Nykyään viisi maailman maata ei ole allekirjoittanut ydinsulkusopimusta.

Suomessa ei ole koskaan haluttu kehittää kansallista ydinasepelotetta, siis omaa atomipommia. Silti ydinaseiden leviämisen estäminen on ollut olennaista yhtäältä Suomessa ja toisaalta Suomelle. Säteilyturvakeskukseen tilaamassa tutkimuksessa selvitettiin, miten Suomi on ottanut osaa ydinaseiden leviämisen estämiseen viimeisten viidenkymmenen vuoden aikana. Seuraavassa nostetaan esiin tutkimusraportin keskeisiä tuloksia.

Ydinenergian käytön varjopuolten ehkäisy

Yhdistyneissä Kansakunnissa solmittu ydinsulkusopimus täytti 50 vuotta tänä vuonna. Sopimus on keskeinen edellytys ydinenergian rauhanomaiselle käytölle Suomessa, sillä ilman sopimuksen vaatimaa valvontaa ydinaseiden leviämisen estämiseksi ydinmateriaalien kauppa ja alan teknologia edustaisivat kaikkea muuta kuin tavanomaista kaupankäyntiä.

Keskeinen kysymys tutkimuksessa oli se, että kuinka ja millä motiivein Suomi on toiminnut ydinsulkusopimuksen toimeenpanossa tutkitulla ajanjaksolla 1960-luvun lopusta 2010- ja 2020-lukujen taitteeseen. Tutkimuksen aiheistona käytiin läpi monipuolinen valikoima



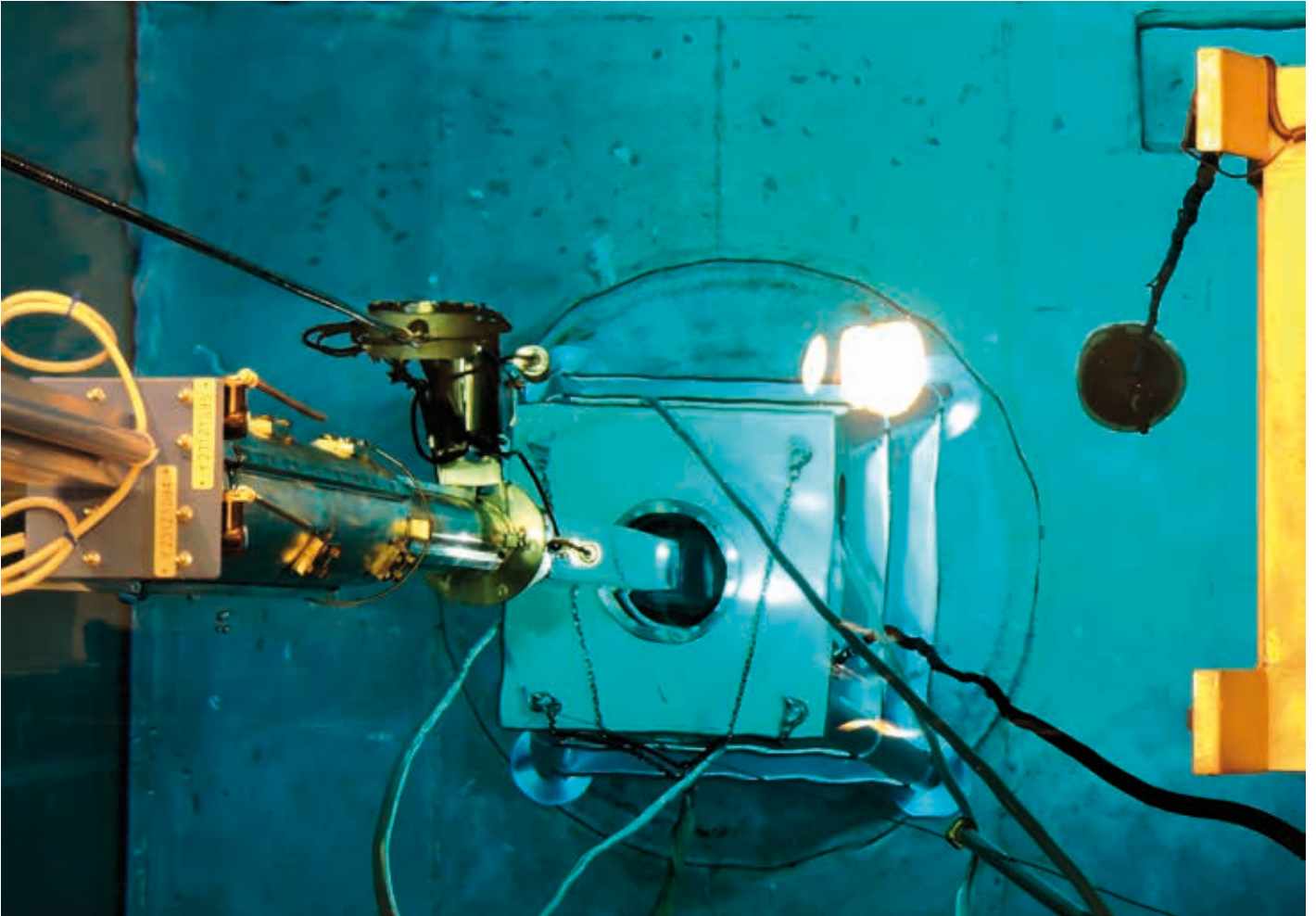
FT Petri Paju

Dosentti, tutkijatohtori
Turun yliopisto, kulttuurihistoria
petpaju@utu.fi



FM Elina Martikka

Kansainvälisen yhteistyön päällikkö
STUK
elina.martikka@stuk.fi



Tutkimusraportin kannessa komeilee tämä PGET (Passive Gamma Emission Tomography) + PNAR -laite, jolla käytetty polttoaine voidaan todentaa polttoainesauvan tarkkuudella. Laitteistoa käytetään Suomessa ennen polttoaineen loppusijoitusta Onkaloon, joten sillä toteutettava verifiointi on olennaisen tärkeä sekä IAEA:n että Suomen ydinmateriaalivalvonnan kannalta. Laite on Suomen IAEA:n tukiohjelman tulosta, ja IAEA hyväksyi sen käyttöön vuonna 2017. Laitteen kuvasi Tommi Lamminpää / TVO.

kirjallista aineistoa ja haastateltiin eri alojen asiantuntijoita ulkopoliittikan osajista ydinmateriaalitarkastuksen konkareihin.

Tutkimuksen rahoittamisessa ja ohjausryhmässä olivat mukana Säteilyturvakeskuksen lisäksi ulkoministeriö, työ- ja elinkeinoministeriö, Fortum Power and Heat Oy, Posiva Oy ja Teollisuuden Voima Oyj.

Pitkä ja mutkikas ydinenergian käyttöönoton valmistelu

Toisen maailmansodan jälkeen Suomi pysytteli erossa ydinaseista jo Pariisin rauhansopimuksen (1947) takia. Se kielsi maalta atomiaseen. 1950-luvun puolivälin jälkeen Suomessa elätettiin toiveita (silloisin termein) atomivoiman käyttöönotosta, mutta uuden tekniikan alue oli ulkopoliittisesti haastava, sillä ydinaseval-

lat varvioivat tiukasti ydinpolttoaineen tuotantoa ja jakelua. Valtioiden väliset sopimukset olivat tarpeen ydinenergian rauhanomaisessa käytössä ja Suomi halusi pysyä mahdollisimman puolueettomana ja kaukana suurvaltojen kiistoista.

Kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA) avulla Suomi pystyi kuitenkin hankimaan ydinpolttoainetta Otaniemen TRIGA-kooreaktoriin FiR 1, joka käynnistettiin vuonna 1962. Suomen 1960-luvun toiveet ydinenergian käyttöönotosta törmäsivät kuitenkin jatkuvasti ulkopoliittikkaan, sillä useat maat kylmän sodan kahdesta pääleiristä tarjosivat maalla ydinvoimalaitosta keskenään kilpaillen. Suomi tasapainoili idän ja lännen välillä myös ydinvoima-asioissa.

Ydinsulkusopimusta neuvoteltiin kylmän sodan suurvaltojen Neuvostoliiton ja Yhdys-

valtojen johdolla 1960-luvun jälkipuolella. Tarkoitus oli paitsi lieventää kansainvälisiä jännitteitä ja ydinsodan uhkaa myös sopia valvontakeinoista, jotta ydinenergian ennakoitu käyttöönotto yhä useammassa maassa ei johtaisi aseiden leviämiseen seuraavina vuosikymmeninä. Puolueeton Suomi seurasi neuvotteluja, jotka olivat edistyneet merkittävästi vuoden 1967 alkuun mennessä.

Hiljattain perustettu Suomen Atomiteknillinen Seura valikoitui vuonna 1967 kansalliseksi foorumiksi, joka virallisesti esitti eri tahojen ja edustaneiden suomalaisten asiantuntijoiden hahmottaman sopimusmallin valtiolle toimenpiteitä varten. Sen mukaan maa tarvitsi sekä valtioiden kahdenväliset sopimukset keskeisiin maihin että kansainvälisen valvontasopimuksen IAEA:n kanssa, mikä korvaisi valtiotasopimusten valvontapöytäkirjan ja tekisi kaiken

valtioiden kahdensivälisen valvonnan tarpeettomaksi. Tarkoituksena oli paitsi Neuvostoliiton vaikutusvallan ja valvonnan myös mahdollisen kylmän sodan suurvaltojen vastakkainasettelujen torjuminen kansainvälisellä yhteistyöllä ja valvonnalla.

Tutkimuksessa tarkasteltiin kriittisesti asiantuntijoiden muistitietoa, josta on sittemmin tullut monelle perimätietoa, että Suomi luonnosteli kattavan valvontasopimuksen IAEA:n kanssa. Pyrkimyksenä oli saada asiaa haastateltavilta toisiinsa verrattavia lausuntoja sekä löytää alkuperäislähteistä esimerkiksi arkistoista vahvistus kertomuksille ja muisteleille.

Koronaviruspandemia käytännössä esti laajemmat arkistotutkimukset, mutta onneksi tutkimustyössä jatkavan IAEA:n entisen varapääjohtajan Olli Heinosen avulla saatiin käyttöön IAEA:n Safeguards-komitean (1970–1971) ensimmäisen kokouksen pöytäkirja, jossa mainitaan Suomen IAEA:n kanssa tekemä sopimusluonnos.

Vaativien neuvottelukierrosten jälkeen Suomi sai ATS:n kautta ehdotetun sopimusmallin solmittua 1970-luvun alussa. Sopimukset varmistivat, että ydinalan kauppa ydinpolttoaineen hankintoihin muodostui poliittisesti latautuneesta vaihdannasta lähinnä tavanomaiseksi kaupan alaksi. Se takasi ydinenergian tuotannon kannattavan tulevaisuuden myös Suomen kaltaisissa puolueettomissa maissa.

Puolueettomuuden vahvistamista ja tukea EU-jäsenyydelle

Ydinsulkusopimus ja sen vaatimat muut järjestelyt kuten ydinalan vientirajoitukset palvelivat Suomea kylmän sodan jännitteiden liennytyksen lisäksi nimenomaan puolueettomuuspolitiikan näyttönä ja vahvistamisessa 1960- ja 1970-luvuilla. Ydinenergiatuotannon rakentaminen sovitettiin kylmän sodan jännitteisiin ydinsulkusopimusjärjestelmän avulla ja tavallaan se myös palveli tuota puolueettomuuden asiaa.

Muiden aloitteiden rinnalla Suomi on toiminut IAEA:n tukena safeguards-tekniologiaa kehittämässä 1980-luvun alusta asti keskittyen erityisesti ainetta rikkomattomien mittausmenetelmien parantamiseen. Tukiohjelma FINSP virallistettiin 1988. Suomalaiset ydinalan yritykset ovat pitkin matkaa tukeneet kehitystyötä antamalla tilojaan ja ydinmateriaalia usein kansainvälisten kehitysprojektien käyttöön.

Neuvostoliiton lakkauttaminen vuonna 1991 ja Persianlahden sota samana vuonna loivat akuutin tarpeen Suomen aktiivisuudelle ydinaseiden leviämisen estäjänä 1990-luvulla,


ja samalla Suomi pääsi aiempaa laajemmin vaikuttamaan kansainväliseen ydinsulkuun erityisesti entisen Neuvostoliiton maissa, joihin piti luoda uudet järjestelmät ydinmateriaalien kontrollia varten. Samalla suomalaisia vaikutti IAEA:n tehtävissä mukana Etelä-Afrikassa ja Irakissa ydinaseohjelmia tuhoamassa.

Ulkopolitiikassa Suomi otti päättäväisen suunnan länteen ja EU-jäsenyyden varmistamiseen. Nämä tavoitteet olivat vahvoja vaikuttimia, kun Suomi ajoi ydinasevalvonnan kehittämistä 1990-luvulla ja kannatti muun muassa ydinsulkusopimuksen muuttamista pysyväksi. Päätös siitä syntyi sopimuksen tärkeässä vuoden 1995 tarkastelukonferenssissa.

Viime vuosien näkyvin väittely Suomessa on käyty ydinaseet kokonaan kieltävästä sopimuksesta, joka hyväksyttiin YK:ssa vuonna 2017. Eri tahojen näkemykset eroavat toisistaan historiallisen paljon siinä, että onko Suomelle parempi liittyä uuteen kieltosopimukseen vai jatkaa vakiintuneen ydinsulkusopimuksen kehittämistä sinnikkäästi, sillä jälkimmäiseen ovat sitoutuneet myös ydinasevaltiot. Asia on parhaillaan entistä ajankohtaisempi, koska ydinaseiden kieltosopimus on tulossa voimaan sen allekirjoittaneissa maissa tammikuussa 2021.

Ydinsulkusopimuksen velvoitteet koskevat myös käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitusta. Sen kohdalla Suomi on jälleen joutunut tai päässyt edelläkävijän haastavaan asemaan ratkomaan kysymyksiä siitä, kuinka ennennäkemättömän loppusijoituslaitoksen ydinmateriaalivalvonta tulee toteuttaa siten, että niin Suomi kuin muun muassa IAEA pystyy sitä uskottavasti valvomaan erittäin pitkällä aikavälillä, ns. hamaan ikuisuuteen. Tässä saattaa edelleen auttaa, että Suomi on varsinkin 1990-luvulta lähtien ollut ydinsulkupolitiikassaan ”enemmän insinööri kuin poliitikko”.

Suomen ”salaisuuksia” ydinsulkuasioissa ovat olleet niin onnistunut, varhaisessa vaiheessa pohjustettu kansallinen yhteistyö samoin kuin pitkäjänteinen, sinnikäs työskentely konkreettisten tavoitteiden eteen. Samalla Suomi ja IAEA ovat pitkään toimineet toistensa apuna ja yhdessä vahvistaneet ydinsulkua.

Suunnitelmien mukaan Suomi on 2020-luvulla kasvattamassa vastuitaan ydinenergian parissa: ydinpoltoainekierto alkaa ensi kertaa uraanin tuotannolla kotimaassa Terrafamen kaivoksella ja toisaalta käytetyn ydinpoltoaineen loppusijoituksen on tarkoitus alkaa Onkalossa. Samalla Suomi pysyy täysin riippuvaisena edelleen ydinsulkusopimukseen perustuvasta kansainvälisestä valvontajärjestelmästä. 

Ydinsulkusopimus, NPT

Sopimus ydinaseiden leviämisen estämisestä, Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons, on kansainvälinen, valtioiden välinen sopimus, joka solmittiin vuonna 1968 ja astui voimaan 5. päivänä maaliskuuta 1970. Sopimus täytti siten 50 vuotta vuonna 2020.

Ydinsulkusopimuksella tavoitellaan kolmea päämäärää, jotka ovat ydinaseiden leviämisen estäminen, ydinaseriisunta sekä ydinenergian rauhanomaisen ja turvallisen käytön edistäminen. Tavoitteet tukevat toisiaan. Sopimusta kutsutaankin usein kolmen pilarin tai korin järjestelmäksi. Sopimustekstissä ei kuitenkaan puhuta pilareista, vaan kyseessä on tapa tiivistää ja samalla tulkita sen ydinkohdat.

Ydinsulkusopimusta on yhtäältä pidetty kaikkein onnistuneimpana, pitkäaikaisena kansainvälistä rauhaa ja turvallisuutta vahvistavana sopimuksena. Toisaalta on aiheellisesti kysytty, kuinka hyvin se toimii edelleen nykyään, syntyhetkeensä nähtävin toisenlaisessa maailmassa.

Esitelty tutkimus:

Paju, Petri. Ydinsulku ja Suomi. 50 vuotta ydinsulkusopimuksen kansallista toimeenpanoa. STUK TR 32. STUK, Helsinki 2020. Saatavilla: www.julkari.fi/handle/10024/140617

Muita lähteitä:

- Cronberg, Tarja & van der Meer, Sico: Working Towards a Successful NPT 2020 Review Conference. The Clingendael Institute 2017.
- Heinonen, Olli: IAEA Mechanisms to Ensure Compliance with NPT Safeguards. UNIDIR 2020.
- Honkamaa, Tapani, Marko Hämäläinen, Erja Kainulainen, Elina Martikka, Mika Nikkinen & Tero Varjoranta: ”Ydinmateriaalivalvonta kansainvälisen asevalvonnan edelläkävijänä.” Teoksessa Sandberg, Jorma (toim.). Ydinturvallisuus. Säteilyturvakeskus, Helsinki 2004, 322–353.
- Patokallio, Pasi: ”Ydinaseiden omistus jäi pieneen piiriin.” Kanava 1/2020, 12–16.

Gammaemissiotomografia paljastaa ydinpolttoaineen sisällön

Samuli Siltanen¹, Riina Virta^{2,3}

¹Matematiikan ja tilastotieteen osasto, Helsingin yliopisto, ²Säteilyturvakeskus, ³Helsinki Institute of Physics

Käytetyn ydinpolttoaineen geologinen loppusijoitus on suunnitelmissa aloittaa Suomessa ensimmäisenä maailmassa 2020-luvun puolivälissä. PGET (passiivinen gammaemissiotomografia) on polttoainetta rikkomaton kuvantamismenetelmä, jolla käytetyn polttoaineen sisältö voidaan varmentaa ennen loppusijoittamista. Ydinmateriaalivalvonnan kannalta on tärkeää tietää, ettei polttoainenuipista puutu sauvoja ja ettei niitä ole peukaloitu hämäräperäisissä tarkoituksissa. Nykyaikaisen inversiolaskennan keinoin on mahdollista tuottaa tarkkoja ja luotettavia viipalekuvia, joista näkyy sekä polttoaineen tiheys että säteilyemissio. Harvoilla ainetta rikkomattomilla menetelmillä voidaan havaita vain yhden sauvan puuttuminen, mutta PGETillä se onnistuu.

Finland will be the first country in the world to start geological disposal of spent nuclear fuel around the mid-2020's. The spent fuel will be verified prior to disposal with a non-destructive assay (NDA) method PGET (Passive Gamma Emission Tomography). For the purposes of safeguards, it is extremely important to verify that no fuel rods are missing from the fuel assembly and that no nuclear material has been tampered with. With the help of modern inverse computing it is possible to produce accurate and reliable cross-sectional images where both the density and the emission of the fuel can be seen. Only a few non-destructive methods allow a single missing fuel rod to be observed, but PGET succeeds in this.

Käytetty ydinpolttoaine verifioidaan ennen loppusijoittamista PGET-laitteella, jotta varmistutaan ydinmateriaalideklaraation paikkansapitävydestä. Munkkirinkilän muotoinen laite pyörähtää polttoainenuipun ympäri ja mittaa viivakameralla siitä tulevan säteilyprofiilin eri suunnista. Matemaattinen rekonstruktioalgoritmi koostaa datasta kaksi poikkileikkauskuvaa: emissio- ja attenuaatiokuvan, joiden avulla polttoainesauvojen sisältö luokitellaan. Kansainvälinen atomienergiajärjestö (IAEA) hyväksyi PGET-menetelmän käytetyn polttoaineen verifiointiin vuonna 2017. Itse menetelmä on kehitetty jo 1980-luvulta lähtien.

Heti vuonna 2017 alkoikin uusi suomalainen PGET-menetelmän kuvantamisyhteistyö. FiDiPro-professori Peter Dendooven (Helsinki Institute of Physics) ja teollisuusmatematiikan professori Samuli Siltanen (Helsingin yliopisto, Inversiomallinnuksen ja kuvantamisen huippuyksikkö) toivat tutkimusryhmänsä yhteiseen aivoriiheen. Dendoovenin ryhmä oli kokeissaan todennut, että perinteinen suodatettu takaisinheitto (Filtered Back-Projection, FBP) ei tuottanut tarpeeksi luotettavia kuvia PGET-datasta. Parannusta ryhdyttiin etsimään uusien matemaattisten inversiotekniikoiden kautta.

Parempi menetelmä saatiinkin laadittua käyttämällä klassista Tikhonovin säännöllistämistä yhdistettynä uuteen, joustavaan tapaan

lisätä etukäteistietoa kuvanmuodostukseen [1]. Se saavutti toisen sijan IAEA:n PGET-haastekilpailussa ja johti onnistuneisiin koekuvauksiin Olkiluodossa ja Loviisassa. Tässä artikkelissa esittelemme uuden kuvantamismenetelmän yksityiskohdat ja kerromme Suomen ydinvoimalaitoksilla mitatuista tuloksista.

Kehitystyön taustaa

PGET-laitteen kuvantamispulma osoittautui inversiomatemaatikon mielstä mukavasti kutkuttavaksi käänteisongelmaksi.

Helsingin yliopiston inversio-ongelmien tutkimusryhmässä on tutkittu pitkään transmissiotomografiaa, jossa röntgenlähde on kuvattavan kappaleen ulkopuolella ja röntgenkamera vastakkaisella puolella. Lähde ja kamera pyörivät kohteen ympäri ja keräävät säteiden vaimennusdataa monesta suunnasta. Kuvantamisongelman voi ratkaista klassisella suodatetulla takaisinheitolla, jos data on kerätty pienellä kulmavälillä [2,3,4]. FBP-menetelmä perustuu Radon-muunnoksen analyyttisiin integraalikaavoihin, ja yksinkertainen selostus sen toiminnasta on videomuodossa tässä: https://youtu.be/dn358iX_WxQ. Näin tehdään saarialoiden tietokonetomografia eli TT-kuvaukset.

Jos data on näytteistetty harvalla kulmavälillä, transmissiotomografian käänteisongelma kannattaa ratkaista diskretisoimalla tuntematon kohde pikseleillä (tai vokseleilla) ja kirjoittamalla rekonstruktio pulma lineaarisiksi yhtälöryhmäksi. Yhtälön ratkaisu täytyy säännöllistää, koska viipalekuvaus on huonosti asetettu inversio-ongelma, jonka ratkaisut ovat äärimmäisen herkkiä mittauskohinalle ja mallinnusvirheille.

PGET ei kuitenkaan ole transmissiotomografiaa, koska kuvantamiseen käytetään kohteesta itsestään eli polttoainepusta tulevaa säteilyä. Tilannehan on vastaava kuin lääketieteellisessä SPECT-kuvantamisessa (single-photon emission computerized tomography), jossa potilaan verenkiertoon on viety säteilevää ainetta. Toimisivatko SPECT-algoritmit suoraan PGET-datalle?

Niin helpolla emme kuitenkaan päässeet. Lääketieteellisessä SPECT-kuvantamisessa yleensä oletetaan säteilyn vaimennuskertoimen jakauma tunnetuksi, koska se voidaan kuvata TT-menetelmällä ennen SPECT-kuvausta. Tämä tekee inversio-ongelmasta lineaarisen. Me emme voi PGET-sovelluksessa olettaa vaimennusta tunnetuksi, koska tavoitteena on paljastaa mahdolliset puuttuvat polttoainesauvat tai sauvojen vaihtaminen muuhun aineeseen.

Joudumme siis takaisinlaskemaan sekä vaimennuskertoimen että emissiojakauman. Kävisikö Novikovin kehittämä vaimennettun Radonmuunnoksen käänteiskaava [5,6]? IAEA:n Tim White evästi meitä heti alkuun, että he ovat kokeilleet tuota kaavaa, eikä se toimi datan epädeaaluuksien vuoksi.

Niinpä lähdimme rakentamaan käänteiselle laskennalle menetelmää alkutekijöistä samaan tapaan kuin kirjassa [7] tehdään transmissiotomografialle. Tarvitsimme kaksi asiaa: ensiksikin diskretisoidun mallin suoralle ongelmalle eli simulaatiosoftan, joka laskee virtuaaliselle polttoainepulle vastaavat mittaustulokset kuin oikea laite antaa vastaavalle kohteelle. Toiseksi oli kehitettävä epälineaarinen takaisinlaskentamenetelmä, jonka epävakaus säännöllistetään pois lisäämällä laskentaan etukäteistietoa kohteesta. Tuo etukäteistieto ei kuitenkaan saa olla liian rajoittavaa, koska loppukäyttäjät eli IAEA ei voi hyväksyä vääriä positiivisia tuloksia poliittisesti arkaluontoisissa tarkastushankkeissa.

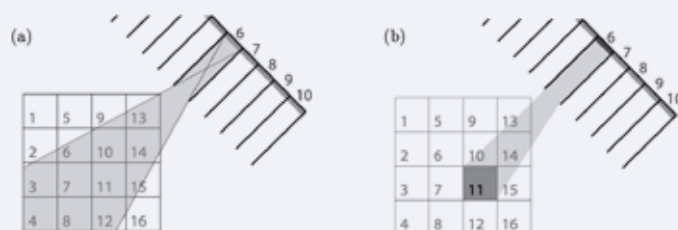
Suoran ongelman malli

Diskretisoidun mallin rakentamisessa mittaukseen vaikuttavan osan polttoainepusta oletetaan olevan sauvojen suunnassa homogeeninen sekä vaimennus- että aktiivisuusominaisuuksiltaan. Mittausta käsitellään siis 2D-poikkileikkauksena akselin suunnassa. Ensinnä muodostetaan mittaukset tietyssä ilmaisimien kulmassa, josta saadaan kaikki muut mittauskulmat pyörittämällä aktiivisuus- ja vaimennuskuvia sopivasti.

Jokaiselle pikselille lasketaan todennäköisyys, jolla pikselin keskeltä emittoitunut fotoni lähtee kohti tietyn ilmaisimen näkyvää osaa. Yksittäisistä pikseleistä laskettua yhteisvaikutusta käytetään suoran ongelman mallissa yhdessä pikselien vaimennuskertoimien kanssa, kun lasketaan data tietylle mittauskulmalle. Asiaa on havainnollistettu kuvassa 1, jossa esitetään yksinkertaistettu esimerkki siitä, miten kollimaattorit rajaavat ilmaisimien havaintokenttää ja miten yksittäisen pikselin emittoiman säteilyn vaimenemiseen vaikuttavat sen ja ilmaisimen välissä olevat muut pikselit.

Takaisinlaskennan säännöllistäminen

Takaisinlaskentaongelma muotoillaan sitten rajattuna minimointiongelmana, jossa on sekä datatarkkuustermi että säännöllistämistermejä. Säännöllistämisen tarkoituksena on kompensoida datan epätäydellisyyksiä käyttämällä ennalta saatavissa olevaa tietoa takaisinlaskennan

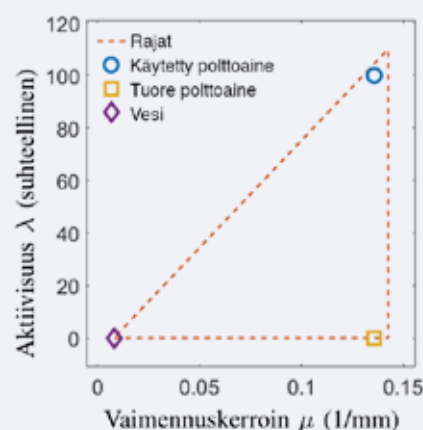


Kuva 1. Diskreetin mittaussmallin yksityiskohtia. Tässä yksinkertaisessa havainnekuvasa tuntematon kohde on karkeasti jaettu 16 pikseliin, ja lineaarisessa gammakamerassa on vain 10 ilmaisinta. Kuvassa näkyy vain yksi kameran suunta; kokonaisessa mittauksessa suuntia on useita satoja. (a) Kollimaattorit rajaavat aluetta, josta säteily pääsee ilmaisimelle. Esimerkiksi ilmaisimen 6 lukemaa mallintaessa ei tarvitse huomioida pikselien 1 ja 5 emittoimaa säteilyä. (b) Kuinka paljon pikselin 11 emittoimaa gammasäteilyä on vaimentunut saapuessaan ilmaisimeen 6? Tämän laskeamiseen tarvitaan tieto pikselien 10, 13, 14 ja 15 vaimennuskertoimista.

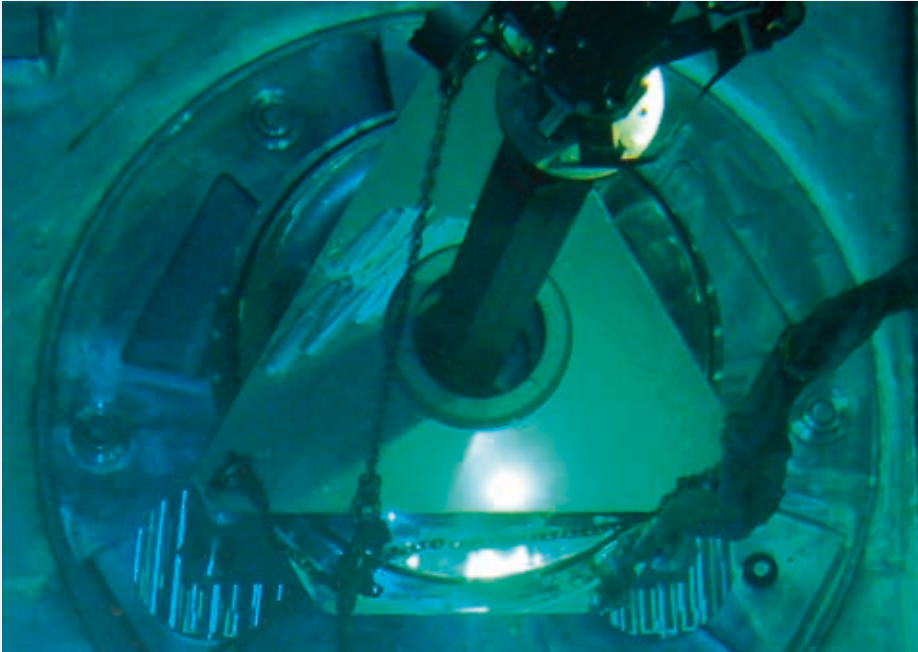
tuntemattomista muuttujista, tässä tapauksessa esimerkiksi mitattavan nipun tyyppiä.

Olemme keskittyneet kahden erilaisen säännöllistämistermin tutkimiseen ja kehittämiseen. Toinen ohjaa takaisinlaskentaa kohti sileitä ratkaisuja, joissa muutokset aktiivisuudessa ja vaimennuksessa ovat vähittäisiä liikuttaessa pikselistä toiseen. Toinen lähestymistapa hyödyntää tunnettua nipun geometriaa ja olettaa, että polttoainesauvojen halkaisijat ja suhteelliset paikat tunnetaan. Polttoainehilan paikka arvioidaan aluksi lasketusta suodatetusta takaisinheittokuvasta.

Säännöllistämisen lisäksi ratkaisusta rajataan epäfysikaaliset materiaalit pois asettamalla lineaariset rajat siten, että esimerkiksi korkeasti aktiivinen mutta vain vähän vaimentava materiaali ei ole mahdollinen. Rajoja on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Lineaariset rajat vaimennus-aktiivisuustasossa. Esimerkkinä kolme mahdollista sauvapaikan tyyppiä: käytetty polttoaine säteilee ja vaimentaa voimakkaasti (sininen ympyrä), tuore polttoaine ei säteile mutta vaimentaa (keltainen neliö) ja vesi ei säteile eikä juurikaan vaimenna (violetti timantti). Katkoviivan sisäpuolella olevat arvot ovat sallittuja. Kolmion muotoinen rajoitusalue rajaa pois rekonstruktioista materiaalit, jotka vaimentavat heikosti kuten vesi mutta säteilevät voimakkaasti. Tällaisen etukäteistiedon voinee luottaa aina pitävän paikkansa.



Kuva 3. Polttoainenippua mitataan PGET-laitteella käytetyn polttoaineen varastoaltaassa (kuva: Fortum).

Mittauksia Suomen ydinvoimalaitoksilla

Olemme mitanneet käytettyä polttoainetta jo usean vuoden ajan mittauskampanjoissa sekä Olkiluodon että Loviisan voimalaitoksilla. Mittaukset suoritetaan syvässä vesialtaassa käytetyn polttoaineen vä-livarastossa. Kuvassa 3 PGET-laite näkyy vesialtaan pohjalla mittaus-ten aikana.

Donitsin muotoinen PGET-laite koostuu kahdesta kollimoidusta CdZnTe-gammailmalainpankista, jotka on sijoitettu vastakkaisille puo-lille laitetta. Käytetty polttoainenippu asetetaan laitteen keskelle ja dataa kerätään PGET-laitteen pyörahdyksliikkeen aikana eri kulmista neljässä energiaikkunassa. Kaavakuva laitteesta on esitetty kuvassa 4.

Vuosina 2017–2020 olemme mitanneet painevesireaktorien kuusi-kulmaisia VVER-440-nippuja sekä yhdeksää eri tyyppiä kiehutusvesire-aktorien nelikulmisiä nippuja. Käytöstä poistettujen polttoainenippujen palamat ovat vaihdelleet välillä 5,72 – 55,9 GWd/tU ja jäähtymisajat välillä 1,87 – 34,6 vuotta. Mittauksessa kerätään gammaemissiodatan lisäksi myös neutronidataa sekä gammaspektri, jotta fissiotuotteet voi-daan tarvittaessa erottaa aktivoituneesta rakennemateriaalista kuten koboltista.

Yksittäinen puuttuva sauva havaitaan

Takaisinlasketusta poikkileikkauksista voidaan erottaa yksittäiset puuttuvat sauvat, vesikanavat ja joissakin tapauksissa myös palavat absorbaattorisauvat. Yksittäisen sauvan aktiivisuuskeskiarvoa verrataan muiden sen ympärillä olevien sauvojen aktiivisuuteen ja mikäli ero on merkittävä, luokitellaan sauva puuttuvaksi. Nykyisellään luokittelussa on vain kaksi kategoriaa, mutta tulevaisuudessa algoritmia kehitetään kattamaan myös tilanteet, joissa sauva on korvattu toisella aineella tai siitä on poistettu vain osa.

Kuvassa 5 on esitetty takaisinlasketut aktiivisuus- ja vaimennus-kuvat VVER-440-polttoainenipulle, josta puuttuu kolme sauva.

Oikeimmanpuolisessa kuvassa näkyy luokit-telualgoritmin tulos: siniset sauvat ovat paikal-laan kuten pitääkin, mutta oranssit puuttuvat. Keskellä on nipputyypille ominaisesti vesika-nava, joka luokitellaan puuttuvaksi.

Kuvassa 6 esitetään samantyyppiset aktii-visuus- ja vaimennuskuvaajat sekä sauvojen luokittelu ATRIUM10-tyypin kiehutusvesireak-torinipulle. Keskellä näkyy 3x3 sauvan kokoi-nen vesikanava ja sen lisäksi nipusta puuttuu kaksi sauva. Ylärivillä näkyvät mittausluokset sellaiselta korkeudelta, että osapitkät sauvat ovat kuvausalueella. Alarivillä puolestaan on tulos mittausasemasta, jossa osapitkät sauvat ovat mittausalueen ulkopuolella ja niiden pai-koilla on siis vettä. Luokittelualgoritmi onnis-tuu havaitsemaan kaikki osapitkät sauvapaikat puuttuviksi kuten kuuluukin.

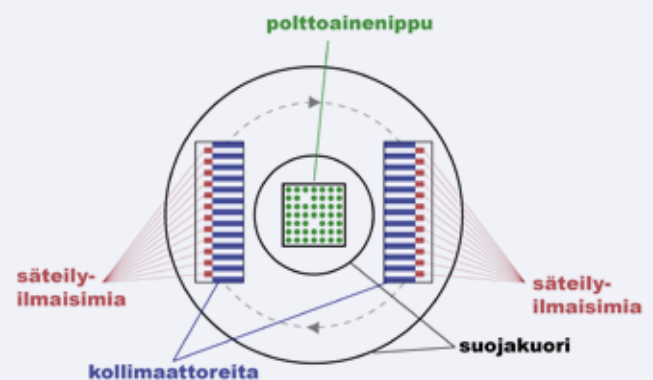
PGET-datan haasteita

Pitkään jäähtyneiden käytettyjen polttoaine-nippujen kuvantamiseen liittyy muutamia haasteita, joiden voittaminen on ensiarvoisen tärkeää täsmällisten tulosten saavuttamiseksi. Polttoainesauvat on pakattu nippuun tiiviisti ja itse polttoaine vaimentaa hyvin gammasä-teilyä. Siksi gammakvanttien päätyminen ni-pun keskeltä aina ilmaisimelle asti on harvinaista ja vaikuttaa siten rekonstruktion laatuun, kun ulommat sauvat ikään kuin varjostavat keskiosaa. Vaikeusastetta lisää myös se, että pitkään jäähtyneissä ni-puissa gamma-aktiivisuus on jo kohtalaisen heikkoa ja korkeamman energian gammapiikkien osuus vähenee.

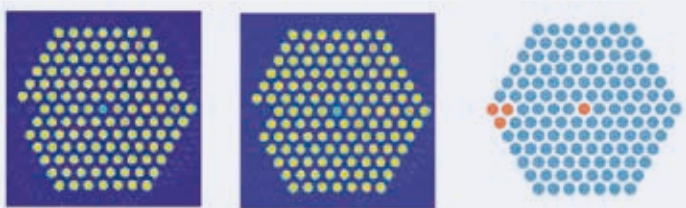
Tällä hetkellä menetelmää ollaan kehittämässä entistä tarkemmaksi ja tulevaisuudessa prosessi on myös automatisoitava, jotta loppusijoi-tuksen alkaessa mittauksen tekeminen tehokkaasti ja jatkuvalla syötöllä on mahdollista. Polttoaineen verifiointi PGET-menetelmällä on tär-keä osa loppusijoittamisen turvallisuutta sekä kansainvälistä ydinma-teriaalivalvontaa.

Tällä hetkellä menetelmää ollaan kehittämässä entistä tarkemmaksi ja tulevaisuudessa prosessi on myös automatisoitava, jotta loppusijoi-tuksen alkaessa mittauksen tekeminen tehokkaasti ja jatkuvalla syötöllä on mahdollista. Polttoaineen verifiointi PGET-menetelmällä on tär-keä osa loppusijoittamisen turvallisuutta sekä kansainvälistä ydinma-teriaalivalvontaa.

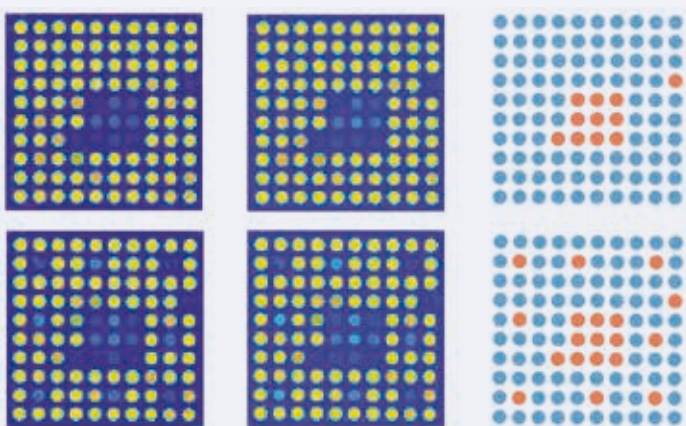
Tässä artikkelissa esitetyt tutkimustulokset on lähetetty julkaista-vaksi alan lehdessä [8].



Kuva 4. PGET-laitteen kaavakuva: poikkileikkaus kohtisuorassa akselia vasten. Punaisella on merkitty ilmaisimet, sinisellä kollimaattorit ja vihre-ällä itse polttoainenippu donitsinmuotoisen laitteen keskireiässä.



Kuva 5. Takaisinlasketut aktiivisuus- ja vaimennuskuvat sekä sauvojen luokittelu VVER-440-nipusta, josta puuttuu kolme sauvaa. Vesikanava näkyy keskellä. Oranssilla on merkitty puuttuvat ja sinisellä paikallaan olevat sauvat.



Kuva 6. Takaisinlasketut aktiivisuus- ja vaimennuskuvat sekä sauvojen luokittelu ATRIUM10-nipulle. Ylärivissä normaalikorkeudelta ja alarivissä niin, että osapitkät sauvat (8 kpl) eivät näy. 3x3-vesikanava näkyy keskellä ja kaksi sauvaa puuttuu. Oranssilla on merkitty puuttuvat ja sinisellä paikallaan olevat sauvat.

Viitteet

- [1] R. Backholm, T.A. Bubba, C. Bélanger-Champagne, T. Helin, P. Dendooven, and S. Siltanen. Simultaneous reconstruction of emission and attenuation in passive gamma emission tomography of spent nuclear fuel. *Inverse Problems & Imaging*, 14(2):317–337, 2020.
- [2] Thorsten M. Buzug. Computed tomography. In *Springer Handbook of Medical Technology*, pages 311–342. Springer, 2011.
- [3] Avinash C. Kak, Malcolm Slaney, and Ge Wang. *Principles of computerized tomographic imaging*, 2002.
- [4] F. Natterer. *The mathematics of computerized tomography*, volume 32 of *SIAM Classics in Applied Mathematics*. SIAM, 2001.
- [5] Roman G. Novikov. An inversion formula for the attenuated X-ray transformation. *Arkiv för matematik*, 40(1):145–167, 2002.
- [6] Jean-Pol Guillemin and Roman G. Novikov. Optimized analytic reconstruction for SPECT. *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*, 20(4):489–500, 2012.
- [7] Jennifer L. Mueller and Samuli Siltanen. *Linear and nonlinear inverse problems with practical applications*. SIAM, 2012.
- [8] R. Virta, R. Backholm, T.A. Bubba, T. Helin, M. Moring, S. Siltanen, P. Dendooven, and T. Honkamaa. Fuel rod classification from passive gamma emission tomography (PGET) of spent nuclear fuel assemblies. Submitted to *ESARDA Bulletin*.

Kirjoittajat



Tkt Samuli Siltanen

Teollisuusmatematiikan professori
Matemaattis-luonnontieteellisen tiedekunnan varadekaani
Helsingin yliopisto
samuli.siltanen@helsinki.fi



DI Riina Virta

Tutkija
Säteilyturvakeskus ja Helsinki Institute of Physics
riina.virta@stuk.fi

Kraken – kotimaisen reaktori-mallinnuksen tulevaisuus?

Ville Valtavirta
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

VTT:llä on viime vuosina aloitettu uuden Kraken-nimisen reaktori-mallinnuksen laskentajärjestelmän kehitys. Kraken rakentuu erityisesti uuden sukupolven suomalaisten ratkaisijoiden kuten Serpentin, FINIXin ja Antsin varaan. Nykyisin käytössä olevien HEXBU3D, HEXTRAN ja TRAB3D -pohjaisten laskentaketjujen eläköityessä Krakenia tullaan käyttämään VTT:llä riippumattomien determinististen turvallisuusanalyysien tekoon. Tämän perinteisen käyttötarkoituksen lisäksi Krakenia hyödynnetään jo nyt esimerkiksi VTT:n sisäisessä projektissa, jossa suunnitellaan matalan lämpötilan pienreaktoria kaukolämmön tuotantoon. Krakenin kehityksellä on merkittävä rooli uusien suomalaisten reaktoriosaaajien koulutuksessa ja uusi sukupolvi saakin Krakenin kautta lähdekooditason osaamisen niistä työkaluista, joilla tulee analyysinsä tulevaisuudessa tekemään.

The development of a new Kraken nuclear reactor modelling computational framework has been started at VTT in recent years. Kraken is especially built on a new generation of Finnish solvers such as Serpent, FINIX and Ants. As calculation chains currently in use based on HEXBU3D, HEXTRAN and TRAB3D are retired, Kraken will be used at VTT to perform independent deterministic safety analyses. In addition to this traditional use case Kraken is already used in a VTT internal project, where a low-temperature small modular reactor is being designed for production of district heat. The development of Kraken has a significant role in educating a new generation of nuclear engineers and the new generation obtains source-code level expertise on the tools they will use to perform safety analyses in the future.

Kraken-laskentajärjestelmän juuria on vaikea erotella VTT:n pitkäaikaisesta reaktori-mallinnustyökalujen kehityksestä, jolla lienee alkunsa 1970-luvulla, jolloin Loviisaan hankittujen VVER-laitosten mallintamiseen tarvittiin luotettavia työkaluja. Jätän suomalaisten mallinnustyökalujen kehityskaaren tarkemman katsauksen jonkun asianosaisemman kirjoitettavaksi ja lähden itse liikkeelle vuodesta 2017.

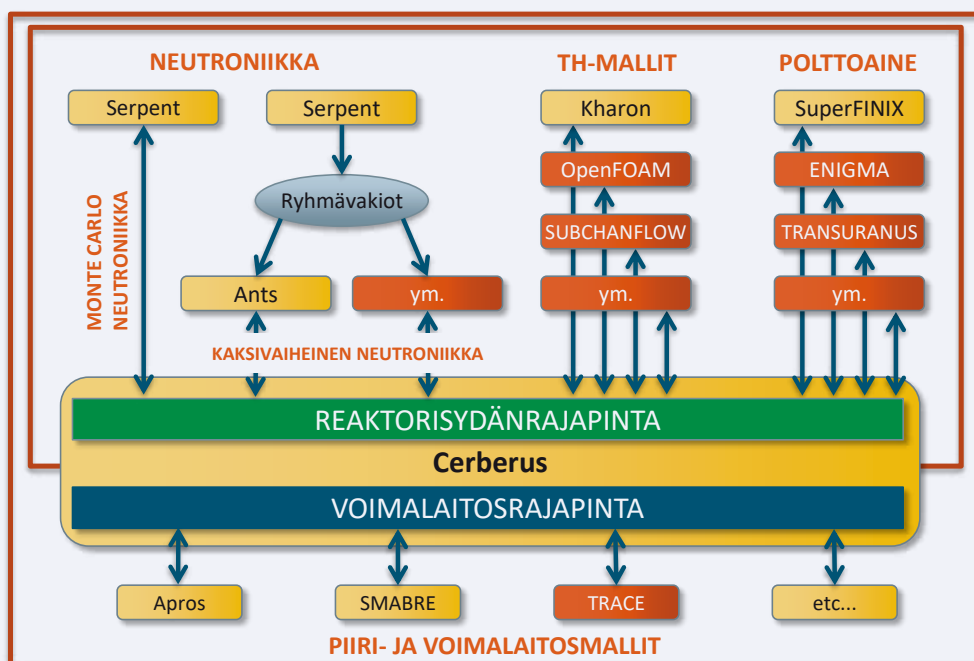
Vuonna 2017 Serpent Monte Carlo -ratkaisijaan oltiin saatu muutamana vuoden intensiivisen kehityksen tuloksena kattavat multifysiikkaominaisuudet, joiden avulla Serpentia voitiin käyttää reaktorisydämen neutroniikan ratkaisemiseen yhdessä Serpentiin kytkettyjen termohydrauliikka- ja polttoaineratkaisijoiden, kuten VTT:llä vuodesta 2013 kehitetyn FINIXin kanssa. Nopeampaa neutroniikkaratkaisua vaativiin soveluksiin VTT:llä käytettiin (ja käytetään edelleen) HEXBU3D, HEXTRAN ja TRAB3D -ratkaisijoita Aprosien lisäksi.

Modernimman Ants-nodaalinearaktoriikkaratkaisijan kehitys oli kuitenkin aloitettu juuri vuonna 2017 entistä tarkempien ratkaisumenetelmien, tuoreemman lähdekoodin sekä horisontissa häämöttävien entistä pienempien ja heterogeenisempien reaktorisydämien vuoksi. Jotta Antsia voitaisiin käyttää tulevaisuuden reaktorien käyttöjaksen

mallinnukseen sekä transienttilaskuihin, laskentaan täytyi saada mukaan sydämen kaksi muuta fysiikan osa-aluetta: termohydrauliikka ja polttoainemallinnus.

Täytyi siis miettiä millä tavoin muiden fysiikoiden ratkaisut halutaan Antsiin kytkeä. Selvältä tuntui ainakin, että vanhoja HEXTRANissa ja TRAB3D:ssä käytettyjä termohydrauliikkamalleja ei lähdetä siirtämään Antsiin sellaisenaan. Lisäksi suoraa Serpent-ratkaisua haluttiin käyttää kaksivaiheisen Serpent-Ants-neutroniikkaketjun validointiin, mikä onnistuisi parhaiten mikäli Serpentin voisi kytkeä samoihin polttoaine- ja termohydrauliikkaratkaisijoihin joita Ants käyttää. Kaikkein helpointa itse asiassa olisi, mikäli polttoaine- ja termohydrauliikkamalleja ei tarvitsisi muuttaa lainkaan, kun vaihdetaan neutroniikkaratkaisija nodaalidiffuusiosta Monte Carloon.

Vastaavasti voitaisiin käyttää tarkempia termohydrauliikka- tai polttoaineratkaisumalleja tavallisesti käytettävien validoimiseen, mikäli myös nämä ratkaisijat olisivat helposti vaihdettavissa. Syntyi siis ajatus laskentajärjestelmästä, joka koostuu itsenäisistä modulaarisista ratkaisijoista, jotka keskeisen multifysiikkakomponentin avulla saavat ratkaistua reaktorisydämen mallinnuksen kytketyn ongelman.



Kuva 1. Kraken-laskentajärjestelmän suunnitellut kytkennät. Keltaiset laatikot kuvaavat VTT:llä kehitettäviä ratkaisijoita, kun taas oranssit viittaavat ulkopuolisiin työkaluihin. VTT on OpenFOAM-projektin kontribuuttori. Yksittäisten ratkaisijoiden tarvitsee keskustella ainoastaan keskeisen multifysiikkakomponentin Cerberuksen kanssa.

Yhdessä mutta erikseen

Aivan ensimmäiseksi täytyi päättää, millä tavoin eri ratkaisijoita käytännössä lähdetään kytkemään toisiinsa. Erilaisia ratkaisuja on tarjolla laidasta laitaan. Spektrin yhdessä ääripäässä eri ratkaisijoita ajetaan manuaalisesti vuorotellen ja yhden ratkaisijan tulokset siirretään tämän tulostiedostoista toisen syöttötiedostoihin manuaalisesti tai automatisoidusti. Tämä ei vaadi yksittäisiltä ratkaisijoilta mitään, on käytettävissä kaikissa tilanteissa, mutta vaatii käyttäjältä paljon eikä ole kovinkaan tehokas tapa ratkaista ongelmaa.

Vastakkaisesta päästä löytyvät ratkaisut, joissa eri fysiikkaongelmat kuvataan yhden koodin sisällä samaa hilaa käyttäen, jolloin eri fysiikat voidaan ratkaista täysin samanaikaisesti yhtenä yhtälöryhmänä. Ratkaisu on tehokasta, tiedonsiirrosta ei tarvitse erikseen huolehtia, mutta paras hyöty saadaan, kun kaikki ratkaisijat kirjoitetaan uusiksi samalle pohjalle. Välimaastoon menevät monet eritasoiset tiedosto-, socket- ja jaetun muistin kytketyt laskentajärjestelmät.

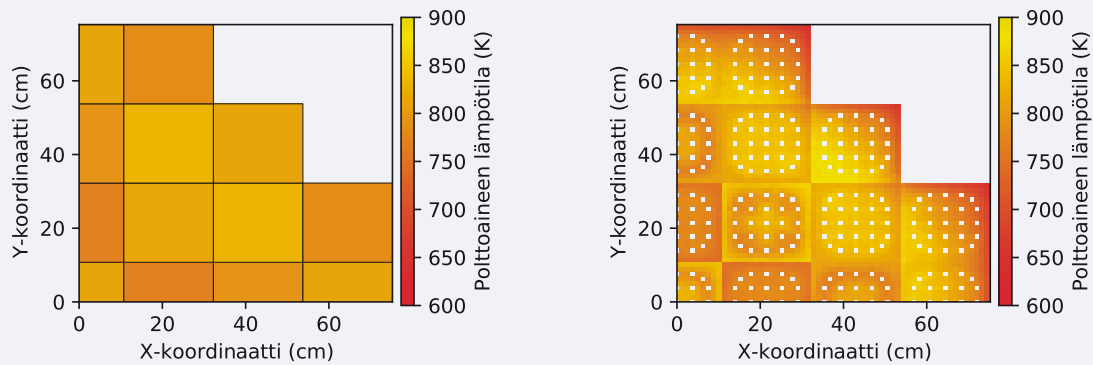
Krakenin kytkentäfilosofian valinnassa lähdettiin muutamista lähtökohdista:

- Laskentajärjestelmässä täytyy pystyä käyttämään:
 - Uusia modulaarisia ratkaisijoita, joiden kehitys tapahtuu täysin Krakenin ehdoilla.
 - Olemassa olevia VTT:llä kehitettäviä ohjelmistoja, jotka ovat edelleen muokattavissa ja sikäli joustavia kytkentätapansa osalta.
 - VTT:n ulkopuolella kehitettyjä työkaluja, jotka ovat vähemmän joustavia esimerkiksi siksi, että niiden lähdekoodia ei ole saatavilla.

- Erillisiä ratkaisijoita täytyy jatkossakin pystyä kehittämään erillään, yksittäisinä fysiikkamoduuleina, niin ettei näiden kehittäjien tarvitse erityisesti huomioida, mitkä muut ratkaisijat laskuun osallistuvat.
- Yksittäisten ratkaisijoiden sisäisessä rakenteessa saattaa tapahtua suuriakin muutoksia, jotka eivät saisi heijastua muiden komponenttien kehitykseen.
- Tietyn fysiikan ratkaisijoiden pitäisi olla keskenään vaihdannaisia siten, että esimerkiksi neutroniikkaratkaisijan vaihtamisen ei pitäisi vaikuttaa termohydrauliikka- tai polttoaineratkaisuun.
- Laskentajärjestelmän kehitykseltä halutaan alustavia stationäärilaskujen tuloksia mahdollisimman pian, mutta kytkentää tullaan todennäköisesti laajentamaan ajan kuluessa palamalaskuihin ja transienttimallinnukseen.

Lopulta suunnittelussa päädyttiin ns. ulkoiseen kytkentään, jossa jokainen ratkaisija toimii omana ohjelmanaan, jotka vaihtavat tietoa vain Cerberus-nimisen multifysiikkakomponentin kanssa. Viestintä kulkee socket-rajapinnan kautta, mikä mahdollistaa erillisten ohjelmien välillä tiedostorajapintaa nopeamman tiedonsiirron. Cerberus hoitaa eri ratkaisijoiden käynnistämisen, kytketyn ratkaisun ohjaamisen sekä kenttien siirron ratkaisijoiden välillä. Kunkin ratkaisijan täytyy osata keskustella ainoastaan Cerberuksen kanssa. Tätä kytkentälähestymistapaa on havainnollistettu kuvassa 1, johon on sisällytetty jo valmistuneita ja vielä suunnitteilla olevia kytkentöjä.

Cerberus itsessään on vielä ratkaisija-tiedoton. Se tarjoaa työkalut ratkaisijoiden, kenttien ja kytketyn ratkaisun määrittämiseen, mutta ei



Kuva 2. Pienreaktorin sydämen polttoaineen lämpötilajakauma SuperFINIXillä ratkaistuna. Kuvassa keskiarvoistetut jakaumat nipputasolle (vasen) ja sauvatasolle (oikea), missä jakaumat ovat peräisin samasta SuperFINIX-mallista.

varsinaisesti tiedä mitä fysiikan ongelmia eri moduulit ratkaisevat tai mikä kytketty ongelma on ratkaistavana. Käyttäjä pystyykin Cerberuksen avulla luomaan omat kytketyt ratkaisunsa. Kukin ratkaisijamoduuli paljastaa Cerberukselle tiedot tulos- ja syöttökentistään ja muuttujista, jolloin näitä voidaan lukea ja muokata laskun aikana Cerberuksesta.

Käytännössä esimerkiksi reaktorisydämen mallinnusta varten Cerberuksen pohjalta rakennetaan sovelluskohtainen sydänsimulaattori, jossa tiedetään mitä fysiikoita ratkaistaan ja jopa mikä neutroniikkaratkaisija on kulloinkin käytössä. Cerberus mahdollistaa sen, että eri ratkaisijoiden tulossuureet ovat käytettävissä sydänsimulaattorissa ja niiden pohjalta voidaan laskun aikana muokata muiden ratkaisijoiden syöttösuureita.

Kansalliset ja kansainväliset tutkimusohjelmat mahdollistajina

Kraken-kehitystä koordinoidaan tällä hetkellä SAFIR2022-ohjelman LONKERO-nimisessä excellence-projektissa, jonka kunnianhimoisena nelivuotistavoitteena on yhdistää alun perin erilliset ratkaisijat käyttökelpoiseksi käyttöjaksen ja transienttien mallinnustyökaluksi. Parhailtaan meneillään on projektin toinen vuosi, joka keskittyy kytkettyyn palamalakentaan ja sitä kautta käyttöjaksen mallinnukseen. Aikariippuvien irtosydänlaskujen vaatimat toteutukset ja tällaisten transienttien demonstrointi ovat vuorossa ensi vuonna (2021), ja viimeisenä vuonna (2022) fokus siirtyy transienttimallinnukseen piiri- ja laitosmallikytkennällä.

Krakenin lonkerot ulottuvat useaan muuhunkin SAFIR2022-ohjelman projektiin, jotka tukevat osaltaan Kraken-kehitystä. Esimerkiksi INFLAME-projektissa kehitetään Krakenissa käytettävää FINIX-polttoaineratkaisijaa, ja CATS-projektissa toteutetaan kytkentää Krakenin ja TRACE-ohjelmiston välille ja muotoillaan moderneja tapoja termisten marginaalien laskemiseksi. CFD4RSA-projektissa puolestaan kehitetään OpenFOAM-pohjaista porositeettiratkaisijaa, jota myös tullaan hyödyntämään Krakenissa.

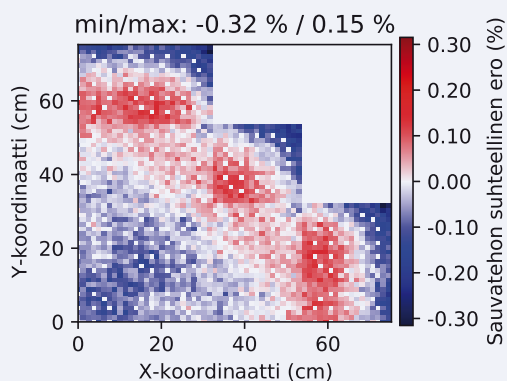
SAFIRin lisäksi Euratomin tutkimus- ja koulutusohjelma on edelleen merkittävässä roolissa Kraken-kehityksessä ja -kelpoistuksessa. Serpentin osalta kytkettyä laskentaa päästiin harjoittelemaan jo McSAFE projektissa (2017–2020), jossa osoitettiin mahdollisuus mallintaa todellisia käyviä reaktoreita polttoainesauvatasen resoluutiolla kytkemällä Monte Carlo -neutroniikkaratkaisija alikanavatason termohydrauliikkaan ja edelleen sauaeroteltuun polttoaineratkaisuun.

Tänä syksynä alkanut jatko projekti McSAFER (2020–2023) on Kraken-laskentajärjestelmälle todellinen testi, kun laskentajärjestelmän eri laskentaketjuilla mallinnetaan NuScale-pienreaktorikonseptin käyttöjaksosia ja transientteja. Projektin tavoitteena on selvittää miten yhtiöltä perinteiset voimayhtiöiden työkalut (kuten CASMO/SIMULATE tai WIMS/PANTHER) tai toisaalta tuoreemmat kehittyneet laskentajärjestelmät (kuten Kraken) selviävät pienreaktorien transienttimallinnuksesta. Mukana onkin eurooppalaisten tutkimusorganisaatioiden (VTT, CEA, UJV Rez, ym.) lisäksi teollisuuden edustajia kuten Preussenelektra, Tractebel ja Jacobs.

Vanhoja ja uusia sovelluksia

Krakenin selkein käyttötarkoitus tulee olemaan riippumattomien determinististen turvallisuusanalyysien tekeminen, mikä tarkoittaa erityisesti transienttilaskentaa ja turvallisuusparametrien arviointia. Krakenia ei kuitenkaan kehitetä pelkästään tällaisia laskuja varten. Erityisesti seuraavaan reaktorisukupolven liittyen Krakenia halutaan soveltaa sekä uusien reaktorikonseptien käyttöjaksomallinnuksen varmentamiseen (jakson pituus, reaktiivisuuskertoimet, sulkumarginaalit ym.), mutta myös uusien reaktorikonseptien suunnitteluun.

Erityisesti uusien reaktorikonseptien mallinnuksessa on tärkeää kykyä käyttämään vähäisen kokeellisen datan lisäksi laskennallista kelpoistusta. Krakenin ratkaisijoiden modulaarisuus ja vaihdannaisuus mahdollistaa yksinkertaisempien ratkaisijoiden kelpoistuksen tarkemmilla ratkaisijoilla osana reaktorisydämen kytkettyä mallinnusta.



Kuva 3. Nipputasolle keskiarvoistettujen polttoaineen lämpötilojen vaikutus Serpentin ennustamaan sauvatehojakaumaan käyttäen referenssinä sauvatasolle keskiarvoistettuja polttoaineen lämpötiloja.

Kraken onkin otettu välittömästi käyttöön VTT:n sisäisessä projektissa, jossa kehitetään matalan lämpötilan ja paineen pienreaktorikonseptia suomalaiseen kaukolämmöntuotantoon. Krakenia on hyödynnetty reaktorisydämen suunnittelussa käyttöjaksen pituuden arviointiin, laaussuunnitteluun, säätösauvasuunnitteluun sekä reaktiivisuuskertoimien, säätösauvan arvojen ja sulkumarginaalien laskemiseen käyttöjaksen eri vaiheissa.

Alamme huippuyliopistoissa uusien reaktorikonseptien suunnittelu oppilastyönä on pikemminkin sääntö kuin poikkeus. Suomessa ei tällä hetkellä ole omia työkaluja tehdä vastaavia projekteja yliopistokoulutuksen osana, mutta Kraken pystyy vastaamaan tähän ongelmaan erityisesti muokattavuudellaan. Kurssiprojekteja varten voidaan eri fyysikoiden ratkaisemiseen käyttää yksinkertaistettuja ratkaisijoita, jotka voidaan haluttaessa kehittää kurssityönä.

Uusien työkalujen myötä voidaan nähdä myös uudenlaisia sovelluksia. Muutamat mielenkiintoiset lähinäköpiirissä olevat sovellukset juontuvat oikeastaan nodaalineutroniikkaratkaisija Antsin uusista kyvyistä verrattuna aiempiin ratkaisijoihin.

Antsiin toteutettu laskennan aikainen sauvatehorekonstruktio mahdollistaa sauvatasoisten turvallisuusparametrien laskemisen suoraan perusratkaisun aikana, etenkin jos eri sauvoille lasketaan erilliset polttoaineratkaisut ja jäähdytteen virtaus ja lämmönsiirto ratkaistaan alikana-avatasolla. Reaktorisydämen polttoaineratkaisua varten kirjoitettiin nopeasti SuperFINIX niminen polttoainemoduuli, joka jakaa sydäntason polttoaineratkaisun sadoiksi tai tuhansiksi yksittäisiksi FINIX-ratkaisuiksi halutusta resoluutiosta riippuen ja kerää polttoaineratkaisun tulokset halutulle resoluutiolle esimerkiksi sauva- tai nippuerotelusti. Alikanavataso termohydrauliikkakytkennästä saatiin huomattavasti kokemusta McSAFE EU-projektissa, jossa sauvatasolla kytketyillä Serpent-SUBCHANFLOW-TRANSURANUS laskuilla mallinnettiin kahden eurooppalaisen painevesilaitoksen ensimmäistä käyttöjaksoa (pre-Konvoi ja VVER-1000). McSAFE-projektissa, joka alkoi 2017, kytkentä ei vielä tapahtunut Krakenin kautta.

SuperFINIX suunniteltiin jo alun perin Kraken-filosofian mukaan joustavaksi siten, että sama SuperFINIX-malli kykenee ottamaan vastaan tehojakaumia ja antamaan polttoaineen lämpötilajakaumia monella eri tasolla – erityisesti nipputasolla, sauvatasolla ja sauvan sisällä säteittäisinä jakaumina. Näitä kykyjä testattiin mallintamalla Serpent-SuperFINIX kytkennällä kaikki sauvat erotellen, mutta takaisinkytkentäkiittä siirrettiin ratkaisijoiden välillä joko tarkkoina sauvan sisäisinä jakaumina tai sauva- tai nipputasolle keskiarvoistettuna. Kuvassa 2 on esitetty SuperFINIXin polttoaineen lämpötilaratkaisu nipputasolle (vasen) ja sauvatasolle (oikea) keskiarvoistettuna. Nipputasolle keskiarvoistettujen jakaumien käytön vaikutukset ennustettuun sauvatehojakaumaan on esitetty kuvassa 3.

Toinen Antsiin implementoitu menetelmäkokonaisuus, mikrodepleetio, mahdollistaa reaktorisydämen eri materiaalien nuklidisisältöjen seuraamisen käyttöjaksen aikana. Perinteisesti tätä lähestymistapaa on käytetty huomioimaan fissiomyrkkyjen (xenon ja samarium) vaikutus neutroniikkaratkaisuun, mutta samaa lähestymistapaa voi käytännössä soveltaa myös polttoaineen, säätösauvojen ja reaktorisydämen rakennemateriaalien aktiivisuusinventaarin laskemiseen. Mikäli vertailulaskut Serpentiin osoittavat, että inventaarit lasketaan riittävän oikein, Antsia pystytään soveltamaan aktiivisuuslaskennan yhtenä työkaluna tuottamaan ensimmäisen arvion eri aktiivisuusinventaaareista normaalin käyttöjaksen mallinnuksen sivutuotteena.

Tekemällä oppii

Krakenin rakentamisella on tärkeä osa suomalaisen reaktorimallinnusosaamisen uudistamisessa. Siinä missä parhaillaan eläköityvä osaa sukupolvi pääsi oppimaan rakentaessaan tällä hetkellä käytössä olevia reaktorimallinnuksen työkalujamme, seuraava sukupolvi pääsee rakentamaan ammattitaitoaan ja työkalujaan samaan tapaan. Turvallisuusanalyysijä tehtäessä on tärkeää, että tekijät tuntevat työkalujensa vahvuudet ja heikkoudet mahdollisimman hyvin, ja Kraken-

kehityksen tärkeänä alullepanijana olikin tarve säilyttää lähdekooditason asiantuntemus niistä työkaluista, joilla deterministisiä turvallisuusanalyysyjä VTT:llä tehdään.

Krakenin parissa työskentelevät VTT:läiset ovatkin nuoria, enimmäkseen jatko-opiskelijoita, jotka pääsevät hyvin konkreettisesti vaikuttamaan siihen minkälaisilla työkaluilla haluavat tulevaisuudessa analysi-sejään tehdä.

Kraken on modulaarisuutensa vuoksi erinomainen mahdollistaja tutkimusprojekteille, sillä sen eri ratkaisijoiden parista löytyy monen eri fysiikan tutkimusaiheita ja ratkaisijoiden vaihdannaisuus tarkoittaa sitä, että uusien moduulien ottaminen mukaan ratkaisuun on helppoa.

Äärettömään ja sen ylitse

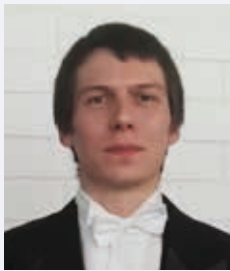
Nyky suunnitelmien mukaan vuoden 2022 lopussa Kraken tarjoaa perustoiminnallisuudet stationääri-, käyttöjakso- ja transienttimallinnukseen useamman eri laskentaketjun turvin. Monia kehittyneempiäkin toiminnallisuuksia on jo nyt saatavilla ja laskentaketjujen kelpoistus on alkanut siten, että ensimmäiset kelpoistustulokset ovat valmistuneet

käyttöjakson mallinnuksesta, irtosydäntransienteista sekä laitosmalli-kytkennällä lasketuista transienteista.

Tällä hetkellä vaikuttaa siltä, että neljässä vuodessa todellakin on mahdollista edetä stationäärilaskuista käyttöjakson mallinnuksen kautta irtosydän- ja lopulta laitostransientteihin, mutta kehitystyöstä suuri osa kohdistuu selkärangattoman lonkeroeläimen mukaan nimetyn laskentajärjestelmän perustoiminnallisuuksien eli selkärangan rakentamiseen. Erityisesti kelpoistamisessa päästään pikemminkin pitkän tien alkuun kuin maaliin, ja eri reaktorityyppien mielenkiintoisiin yksityiskohtiin ei varmastikaan ehditä paneutua niin paljolti kuin tulee olemaan tarpeen. Kehittyneempien ominaisuuksien ja uusien sovellusten osalta pystytään varmasti toteuttamaan ensimmäiset demonstraatiot, mutta varsinaisten sovelluskohteiden löytäminen teollisuuden puolelta tapahtunee suurilta osin tulevaisuudessa.

Tehtävää ja opittavaa siis riittää vielä vuosiksi ja vuosikymmeniksi. Yhtenä haasteena onkin pitää laskentajärjestelmän kehitys ja siihen liittyvä asiantuntemus elinvoimaisena, kun alun suuret kehityspanokset on tehty ja Krakenin käyttö muuttuu rutiininomaisemmaksi.

Kirjoittaja



Tkt Ville Valtavirta

Erikoistutkija

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
ville.valtavirta@vtt.fi

Väitös: Ydinvoimalaitosten rakenne- materiaalien korroosiotestaus ja mallintaminen ylikriittisessä vedessä

Sami Penttilä
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Ydinenergian tuotantoon liittyvät vaatimukset paremmalle polttoainetehokkuudelle ja turvallisuudelle ajavat uudenlaisien innovaatioiden esiintuloa esimerkiksi kehitettäessä neljännen sukupolven (Gen IV) laitoksia. Väitös-kirjassa tutkittiin kokeellisesti polttoaineen suojakorimateriaalien kestävyyttä eräissä Gen IV -konseptissa.

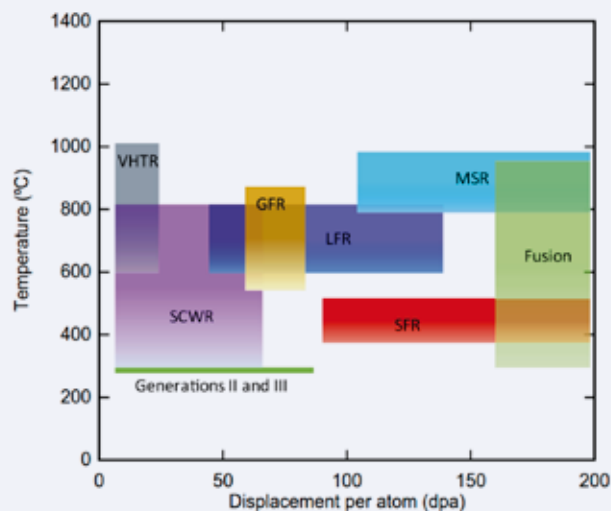
Demands for better fuel efficiency and safety in nuclear power generation are driving the emergence of new innovations, such as the development of fourth generation (Gen IV) plants. The durability of fuel cladding materials in the conditions of a Gen IV reactor were studied in this dissertation.

Yleisesti ottaen Gen IV -reaktorit käyttävät polttoainetta tehokkaammin verrattuna nykyisiin kevytvesireaktoreihin johtuen suljetusta polttoainekierrosta, korkeammasta palamasta, paremmasta termisestä hyötysuhteesta tai näiden yhdistelmästä. Näistä Gen IV -konsepteista ylikriittisen veden reaktori (Supercritical Water Reactor, SCWR) on ainoa, joka käyttää vettä jäähdytteenä.

Kuva 1 esittää lämpötilat ja komponenttien suurimmat "end-of-life" -säteilyannosalueet tulevaisuuden Gen IV -laitoksille ja fuusiokonseptille verrattuna nykyisiin II- ja III-sukupolven kevytvesireaktoreihin. Säteilyn aiheuttamaa mikrorakenteen vaurioitumista kuvataan materiaalitekniikassa tyypillisesti dpa-suureella (displacement per atom), joka kertoo, kuinka monta kertaa hilapaikaltaan siirtymisiä per atomi syntyy tietyllä altistumisajalla ja vuolla.

Korroosio ylikriittisen veden haasteena

Yleinen korroosio on yksi merkittävimmistä materiaalien vanhenemismekanismeista ylikriittisen veden olosuhteissa. Kirjallisuudessa on käsitelty laajasti vaihtoehtoisia kandidaattimateriaaleja SCWR:n komponenteille. Yleensä tutkimukset on suoritettu hyvin erilaisissa olosuhteissa ja tuloksien vertaaminen keskenään on haastavaa. Tässä työssä selvitettiin materiaalien käyttäytymistä ylikriittisen veden olosuhteissa ja tuloksilla pyrittiin täydentämään kirjallisuuden tietoaukkoja. Erityisesti keskityttiin erilaisten potentiaalisten suojakorimateriaalien käyttäytymiseen



Kuva 1. Tulevaisuuden Gen IV -laitosten ja fuusiokonseptin lämpötilat ja "end-of-life"-säteilyannosalueet reaktorin sisäosille verrattuna II- ja III-sukupolven kevytvesireaktoreihin [1].

ylikriittisessä vedessä aina 700 °C lämpötilaan asti käyttäen erilaisia karakterisointimenetelmiä ja mallinnusta.

Polttoaineen suojakuoren arvioitu maksimilämpötila on noin 620–630 °C eurooppalaisessa konseptissa ja voi nousta aina 850 °C asti kanadalaisten CANDU-tyyppisessä SCWR-konseptissa. Tämä työ keskittyi pääasiassa eurooppalaiseen konseptiin, jolloin suojakuorimateriaalin lämpötilatavoitteeksi asetettiin 650 °C EU-projektin HPLWR (High Performance Light Water Reactor) analyysituloksiin perustuen.

Suunnittelukriteerit suojakuorimateriaalin vaatimuksille lähtevät liikkeelle oletuksesta, että suojakuori ei voi vikaantua arvioidussa maksimilämpötilassa. Suojakuoren vikaantuminen korroosion näkökulmasta voi tapahtua joko 1) yleisenä korroosiona läpi seinämän vahvuuden, 2) oksidin kerrostumisesta ja lämmön siirron häiriintymisestä tai 3) jännityskorroosion johdosta. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi mekaaniset ominaisuudet ja säteilyn vaikutus, mutta nämä jätettiin huomiotta tässä työssä kuten myös oksidifilmin kerrostumisesta johtuvat ilmiöt ja jännityskorroosio. Pääpaino oli näin ollen yleiseen korroosioon liittyvissä haasteissa.

Komponenteille, joiden operointilämpötilat ovat yli 300 °C ja joiden säteilyannokset ovat useita dpa:ta, kandidaattimateriaalit ovat joko ferriittis-martensiittisiä teräksiä tai perinteisiä austeniittisiä teräksiä. Nämä teräkset eivät kuitenkaan ole soveltuvia ylikriittisessä vedessä yli 500 °C lämpötiloissa johtuen liian suuresta korroosionopeudesta. Koetuloksien perusteella on selvää, että rakennemateriaalissa vaaditaan korkeampi kromipitoisuus (yli 20 paino-%), jotta saavutetaan suojaavan oksidifilmin muodostuminen käyttölämpötilassa.

Korroosioon vaikuttavia tekijöitä on useita

Tutkimustyön perusteella voidaan todeta, että materiaalien käyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä yleisen korroosion näkökulmasta ovat perusaineen koostumus, lämpötila ja näytepinnan esikäsitteleminen. Perinteiset zirkoni-seokset (Zr-4, Zr-2, Zirlo, Zr-Nb jne.), jotka ovat laajalti käytössä kevytvesireaktoreissa, sekä austeniittiset ruostumattomat teräkset, joiden kromipitoisuudet jäävät alle 20 paino-%, eivät saavuta polttoaineen suojakuorelle vaadittavaa korroosiokestävyyttä.

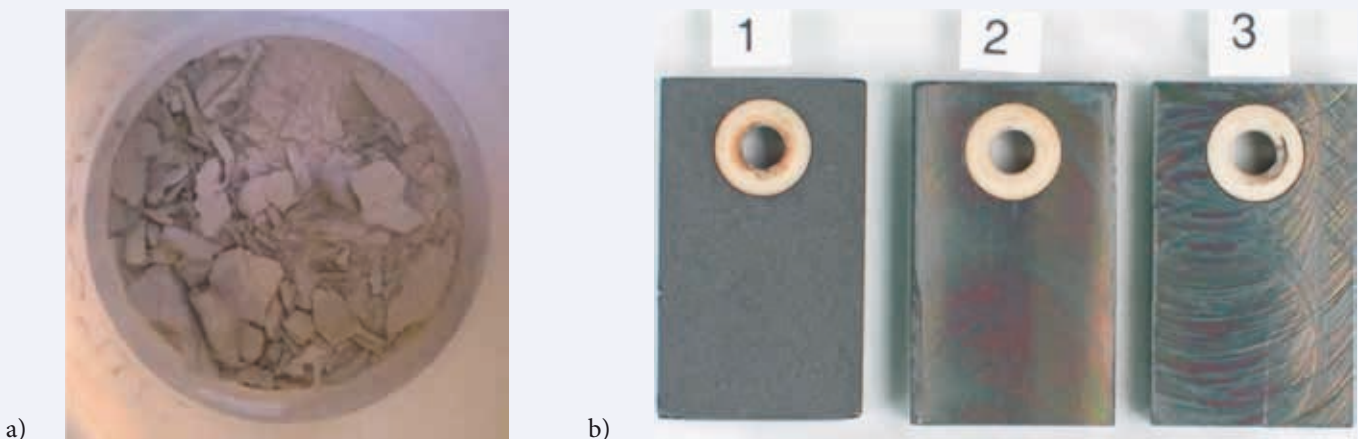
Austeniittisten ruostumattomien terästen korroosiokestävyyttä voidaan tuloksien perusteella kuitenkin parantaa kylmämuokkaamalla materiaalin pintaa, vaikkakin kylmämuokkauksen positiivisen vaikutuksen kestoa ei toistaiseksi tiedetä. Kuvassa 2 on esitetty zirkonipohjaisen näytteen jäänteet (a) ja kolme eri tavoin pintakäsiteltyä austeniittisestä ruostumattomasta teräksestä valmistettua kuponkinäytettä (b) ylikriittisessä vedessä altistamisen jälkeen.

Kylmämuokkauksen positiivinen vaikutus perustuu kromin nopeamman diffuusion materiaalin näytepintaan lisääntyneiden diffuusiopolkujen ansiosta. Austeniittisen ruostumattoman teräksen 316L korroosiokestävyyttä tutkittiin altistamalla näytteitä aina 3000 h asti 650 °C lämpötilassa. Kuvan 2b perusteella voidaan sanoa, että altistuskokeiden tulokset olivat lupaavia kylmämuokkausasteen kasvaessa näytteen pinnalla (#1 < #2 < #3), jolloin korroosionopeus pieneni vastaavasti kertaluokkaa alaspäin. Tämä havainto poissulkee kuitenkin useat ydinvoimalaitoskäyttöön jo lisensioidut materiaalinvaihtoehdot niiden ollessa tyyppisessä lähtötilassaan. Avoimia kysymyksiä ovat erityisesti kylmämuokkauksen vaikutus materiaalin pinnan jännityskorroosioherkkyyteen kuten myös pidempiaikaisen altistuksen vaikutus korroosion kestävyteen yli 10 000 h altistusajoilla.

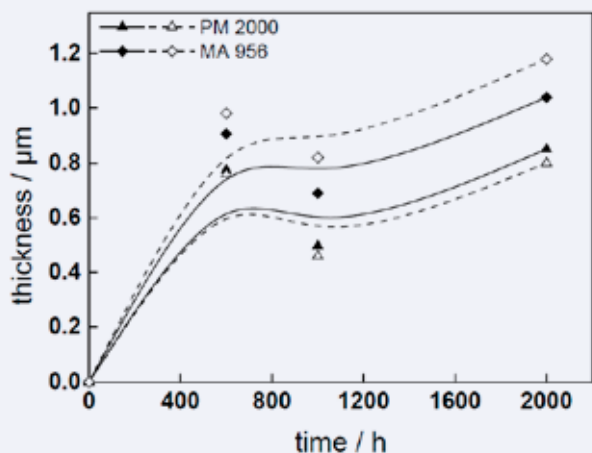
Toisaalta teräkset, joiden kromipitoisuus ylittää 20 paino-%, sekä nikkelpohjaiset seokset ja oksididispersiolujitetut (Oxide Dispersion Strengthened, ODS) teräkset ovat osoittaneet myös käyttökelpoisuutensa, mikä todettiin myös tämän työn puitteissa. Merkittäviä rajoituksia näiden materiaalien käyttöönotossa liittyy perusaineen korkeaan kromi- ja nikkelpitoisuuteen sekä materiaalien liitettävyyteen. Korkea kromipitoisuus austeniittisissä ruostumattomissa teräksissä alentaa vurmiskestävyyttä, korkea nikkelpitoisuus puolestaan vaikuttaa epäedullisesti reaktorisydämen neutroniikkaan, ja ODS-teräksillä liitoskohdan lujuusominaisuudet ovat tyyppisesti perusainetta huonommat.

Tutkimustuloksia mallinnettiin ylikriittisen veden olosuhteissa

Yleisen korroosiokestävyyden arvioimiseksi kehitettiin ja sovellettiin myös niinsanottua MCM-menetelmää (Mixed Conduction Model), jolla



Kuva 2. a) Zr-2.5Nb kuponkinäytteen jäännökset pienessä muovirasiassa 100 h autoklaavikokeen jälkeen (600 °C/25 MPa). b) Ruostumattoman teräksen 316L kuponkinäytteet 600 h altistuksen jälkeen (650 °C/25 MPa). Näyte #1 pintakäsittelemätön 316L kuponkinäyte, jossa korroosionopeus on liian suuri suojakuorimateriaalille. Pinnaltaan kylmämuokatut näytteet #2 ja #3 osoittavat kertaluokkaa parempaa korroosiokestävyyttä muodostaen kromirikkaan suojaavan oksidifilmin näytteen pintaan [2].



Kuva 3. Oksidifilmin paksuuden kehittyminen ajan funktiona yli-kriittisessä vedessä (650 °C/25 MPa) kokeellisesti määritettynä GDOES (Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy) -syvyysprofiilista (mustat symbolit) sekä verrattuna MCM-mallin antamiin tuloksiin (valkoiset symbolit) noin 20 paino-% kromia sisältäville ODS-teräksille PM2000 ja MA956 [3].

määritettiin valittujen materiaalien pitkäaikaiskäyttäytymistä yli-kriittisen veden olosuhteissa. Mallin avulla pystyttiin määrittämään rakennemateriaalien pitkän aikavälin korroosiokestävyyttä ja lupaavimmat tulokset saatiin noin 20 paino-% kromia sisältävillä ODS-teräksillä. Muodostuvan suojaavan oksidifilmin paksuus jäi noin 1 μm luokkaan 2000 h altistuksen jälkeen. Kokeelliset tulokset tukivat mallinnuksesta saatuja arvioita, kuten kuvassa 3 on esitetty.

Materiaalien mallintaminen yli-kriittisen veden olosuhteissa antoi uutta ymmärrystä siihen, miten rakennemateriaalien korrosio kyseisessä ympäristössä todennäköisesti tapahtuu ja miten sitä voidaan mallinnuksen kautta selittää. Tuloksista on kuitenkin vielä matkaa siihen, että kyseisiä materiaaleja voidaan hyväksyttää ydinvoimalaitoksien suoja-kuorisovelluksiin.

Väitöskirja on hyväksytty Aalto-yliopistossa 22.5.2020.

Viitteet

- [1] D. Guzonas, R. Novotny, Supercritical water-cooled reactor materials – Summary of research and open issues, *Progress in Nuclear Energy* 77 (2014) 361–372
- [2] S. Penttilä, Structural materials corrosion testing and modelling assessment in supercritical water, Aalto University publication series, Doctoral Dissertations 70/2020, <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/44065/isbn9789526038674.pdf>
- [3] S. Penttilä, I. Betova, M. Bojinov, P. Kinnunen, A. Toivonen, Oxidation Parameters of Oxide Dispersion-Strengthened Steels in Supercritical Water, *Nuclear Engineering and Radiation Science* 2 / 011017-1 (2016), DOI: 10.1115/1.4031127

Kirjoittaja



TkT Sami Penttilä

Tiimipäällikkö

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

sami.penttila@vtt.fi

Ydinsähköä – ei enää kiitos

KESKITETYSTI SUURILLA YKSIKÖILLÄ tuotettu sähkö on kallista, vaikka siirtoverkon ylläpito ei enää rasita tuottajia. Tuleeko ydintekniikan alalla yllätyksenä, että valtioiden rahahanasta valuu hunajaa pienvoimaloiden tutkijoille ja vihertävästi johdettu valtio suosii pientä, myös pieniä ydinvoimaloita. Pääomia vaativa ydinvoima on henkitorissaan sähköpörssin ansaintalogiikalla, ja ydinsähkö on liian kallista myyntiin. Onneksi tässä lehdessä voi vielä muistella ydintekniikan alan lähihistoriaa ja suuria linjoja Suomessa.

Noin viisikymmentä vuotta sitten yhteiskunta panosti ydinvoiman osaamiseen. Suomalaista osaamista ruokkiva idän insinööriprojekti sekä teollisuuden rahapiirien vanhasta emämaasta tilaama länsiprojekti nostivat Suomen ydinvoimatietämyksen ja projektirakentamisen osaamisen uudelle tasolle. Projektit ja viranomaisten vaihto ”rapakon taa” oppiin toivat maahan itse viritetyt tai Ruotsissa jalostetut ydinvoiman turvallisuus- ja lupamallit, joiden taso ylitti alkuperäisen lähteensä. Osaamista syntyi yhdistämällä puun ja paperin tuotannon huippuosaaminen ja projektimallit ydinvoiman vaateisiin.

Lupaavan ja seksikkään ydintekniikan alan toimijoiksi valikoituvat ikäluokkien innokkaimmat ja lahjakkaimmat nuoret insinöörit. Maahan syntynyttä tekniikan ja projektien osaamista hyödynnettiin 30 vuotta puunjalostusteollisuudessa, raskaassa teollisuudessa ja jopa voimalaitosrakentamisen viennissä. Ydinvoimaprojektien luomaa osaamista ulosmitattiin 30 vuotta, pohtimatta mitä se oli ja miksi tuo osaaminen oli saatu aikaan!

Jo 1970-luvulla mausteensa soppaan antoivat ydintekniikan hankkeisiin kuuluva poliittinen ja teollisuuspoliittinen peli. Kehityksen aikakauden loppuessa 1990-luvulla politiikan valtaapitävät loivat Fortumin. Näin itsenäisesti toimivasta ja poliittista ohjausta tottelemattomasta IVOn johdosta sekä Nesteen investointitoiminnan ongelmista päästiin eroon. Yhdistettiin kaksi yhtiötä, joista toisella oli yli-

suuret investoinnit ja toisella ylisuuri kassa. Uudelle yhtiölle valittu pörssikehitys tarkoitti tulevaisuuden tekniikkaan suunnattujen kehitysrönsyjen ja tutkimuspanoksien leikkaamista.

Kaksinapaisen konsernin johtoon palkattu metsuri käytti yhtiöstä sahattujen oksien myynnistä saatua kassaa laajennuksiin naapurimaihinkin. Noissa maissa johdon kieli oli tuttu ja metkut tunnettiin vanhastaan. Myös insinööriosaaamista ylläpitäneestä voimalaitosten rakentamisesta ja kohta myös voimalaitosten palvelumyynnistä ulkomailla luovuttiin. Insinööriyön kasvattamat monihaaraiset oksat ja kustannukset karsittiin, henkilöstö tasapäistettiin, sähköverkko ja sen ylläpito ulkoistettiin. Liällinen osaaminen ulkoistettiin.

Optio-osaajat ja ulkomaiset omistajat iskivät sähköön tuotantoon kuin korppikotkat haaskalle. Oli luotu uljas poliitikkojen helpposti ohjaama rahasampo, joka imi modernin sähköpörssin hinnoilla sähkö käyttäjän rahat omistajien, myös valtio-omistajan pussiin. Optioleikeissä syntynyt uusi sähköverkkoyhtiö taas pitää yllä minimitarpeen mukaista palvelutasoa. Haja-asutusalueiden jakelukatkosten estäminen ja korjaaminen on optimoitu vastaamaan alueellisen monopoliaseman mukaista tasoa. Pimeässä ja kylmässä kodissaan verkkoyhtiön palvelunumeroon jonottava kuluttaja voi vain pohtia: ”Poltanko talon vai pissaanko housuun, molemmat lämmittävät hetken!”

Osa poliittista taustaohjausta ovat aina olleet toimet, joilla ydinsähkön hinta Suomessa pyritään saamaan ylös. Korkeamman hinnan on uskottu johtavan uusiutuvien energialähteiden eli tuulen, auringon, maakuntien puun ja biopolttoaineiden käytön kannattavuuden nousuun ja uusiin rahavirtoihin niiden tuotantoketjuun. Tämän avuksi tuulimyllyjen ja aurinkovoiman tekninen kehitys on muuttanut ne kannattaviksi. Tämä kehitys toteuttaa aiottua energiantuotantopohjaista tulonsiirtoa. Toisaalta uusiutuvien tuotanto-

Neuvostoliittolaisten, saksalaisten, amerikkalaisten ja suomalaisten hääriessä yhdessä valtiollisen IVOn johdolla valmistui ainutlaatuinen Loviisa 1 -reaktoriyksikkö, kuvassa vasemmalla, aikanaan kuudessa vuodessa (kuva: Fortum).

muotojen voimakas tukeminen on halpuuttanut sähkön tukkuhinnan koko pohjoisessa Euroopassa.

Poliittinen ohjaus ja uusiutuvia energialähteitä tukeva linjaus huipentui Fortumin Loviisa 3 -hankkeen luvan epäämiseen vuonna 2010. Päätöksellä sähkön kuluttajahinta pyrittiin betonoimaan ylös ja ohjaamaan valitua uusiutuvien rakentamista sekä varmistamaan alueellisiin tulonsiirtoihin sopiva hanke: biovoima pääkaupunkiseudun kaukolämmön tuotannossa. Toivottavasti päättäjät muistivat, että hiilidioksidia syntyy aina poltettaessa. Hiilidioksidi ei huomaa, syntykö se uusiutuvan vai fossiilin aineen polttamisesta. Tuo päätös sulki pois helpon ja halvan mahdollisuuden saada Helsingin alueen kaukolämpö tuotettua ilman hiilidioksidin syntymistä.

Tehdystä lupapäätöksestä seuranneet hankkeiden vaikeudet ilman Fortumin osaamista ja tukea oli helppo arvata. Toinen laitos-hankkeista raukesi kokonaan ja toinen toivoo ja rukoilee rakentamislupaa vuonna 2021 tai sen jälkeen. Vuoden 2010 poliittinen valinta oli myös valinta kotimaan huippuosaamiseen perustuvan tai avaimet käteen tarjottavan ydinvoiman välillä. Laitosavaimien odottelu on karistanut viimeisenkin seksikkyyden ydinvoimainsinöörin hommista.

Suuremmalla poliittisella kentällä näkyy se, että Euroopan laitostoitumattajille on hankkeiden valmistumista tärkeämpää sulkea aasialaiset kilpailijat ulos Euroopan markkinoilta. Energialalla ja kaikissa suurissa hankkeissa on linkki rahoja laskevan johdon ja hommia tekevien asiantuntijoiden välillä katkenut. Moni omistaja voisi etsiä pätevän projektijohdon, joka noudattaisi Kimi Räikkönen -metodia: ”Leave me alone, I know what I’m doing”.

Ydinvoimaprojekteissa säännöstöperustan liikkuminen korostaa omapäisen osaamisen tarvetta. Hyvä projektijohto aloittaa korjaavat toimet tunneissa eikä kuukausissa ja tekee sen ilman viranomaisen harhaan ohjausta. Mutta ilman nopeita päätöksiä väärä info le-

viää aina läpi projektin ja saastuttaa kaiken kuin koronavirus tanssiklubilla.

Suomen ydinturvallisuusviranomaisen on viime vuosina määrittänyt kaiken ydinvoimalaitoksessa olevan turvallisuuden kannalta tärkeäksi ja vähintään kaksinkertaistanut valvonnan ja paperien tekemisen. Laitteiden turvallisuuden tarkastamisen sijaan kysytään: onko tekemisen suunnittelu varmasti aloitettu juuri viranomaisen esittämällä toimintatavalla? Tästä herää kysymyksiä: Mistä vaaditun toimintatavan tietää toimivan, kun sillä ei koskaan ole tuotettu tai edes suunniteltu mitään? Kuka tarkastaa riippumattomasti tulokset, kun viranomaisen antaa toimintatavat ja siis johtaa suunnittelua? Miten tämä kaikki parantaa turvallisuutta? Viranomaisen on osaava, mutta ehkä ei erehtymätön?

Vaatimusten jatkuva kiristyminen herättää kysymyksen lupaviranomaisen vuosien varrella kasvaneiden valtuuksien sopivuudesta. Vertaillaanpa ydinvoimahommia muuhun elämään! Onkohan siihen olemassa joku syy, miksi yksi ja sama viranomaisen eli poliisi ei tee kaikkea? Poliisihan voisi säätää autojen suunnittelusäännökset ja opastaa lain laadinnassa, ohjeistaa valmistusprosessit ja materiaalit, tarkistaa suunnittelijoiden koulutukset ja pätevyudet, hyväksyä auton valmistustehtaat, valvoa valmistusta tehtaalla ja listata mitä malleja saa tuoda

maahan. Lopuksi voisi vielä ohjeistaa autojen käytön ja ajonopeudet, katsastaa autot, valvoa huollon riittävyyttä ja kuljettajien ajotaitoja.

Kuinkahan moni poliisikomisario tai pikkupaikan ”Reinikainen” edes haluaisi säätää autojen suunnittelusäännöksiä tai tieliikennelakeja? Monessa maassa ydintekniikan säännökset tuotetaan asiantuntijaryhmissä. Niissä otetaan huomioon aiemmat kokemukset ja yleisen tekniikan kehityksen antamat mahdollisuudet, ei vain valvontaviranomaisen mieltymyksiä, kokemuksia ja muita intressejä. Olisiko Suomen ydinvoimaohjeistoa arvioitava suomalaisesta ydinvoimayhteisöstä riippumattomien, oikeiden ydinalan asiantuntijoiden voimin?

Ydinvoiman rakentaminen oli 30 vuotta sitten Suomen parhaiden insinöörien avainosamista, vaan ei ole enää. Ydinvoimayhtiöiden johdolle on ollut vaikea ymmärtää, että ydinvoimalaitosten käytön huipputason osaaminen ei tuota rakentamisen osaamista. Projektiosaaminen vaikuttaa ydinvoimahankkeissa puuttuvan sekä toimittajalta että omistajalta. Eräskin omistaja on huvittavasti organisoanut laitosprojektin käyttöorganisaation mallin mukaan.

Kahdessa ydinvoimalaitosprojektissa opitaan rakentamaan ydinvoimalaitos 20 vuoden pituisena iteratiivisena projektina. Pakolliset

ohjeistot vaativat muokkaamaan projektin ja toimittajien organisaatiot tämän suomalaisen mallin mukaan. Prosessien seurauksena Suomen ydinalan yhtiöt menettävät osaamisensa – enää ei tule ”kerralla valmista” kuten oli tarkoitus 1980-luvun voimalaitoshankkeissa. Nykypäivän ydinvoimaprojektissa vaaditaan pitkää pinnaa ja raamatusta tuttua logiikkaa: ”Anna heille anteeksi, sillä he eivät tiedä mitä tekevät”.

Suomen ydinvoimarakentaminen on päätyntä monimutkaiseen toimintamalleihin, jotka ovat kauhistus maailman ydinvoimateollisuudelle. Toivottavasti näitä oppeja ei viedä muihin maihin. Monen liian kiltin, nuoren insinöörin kannattaisi pohtia noiden mallien kyseenalaistamista tai alan vaihtoa.

Suomen ydinvoima-ala on täynnä projektikonkareita, jotka tarvittaessa kertovat miten ydinvoimaprojektia on tehtävä. Itse sitä huomaamatta he jakavat oppia siitä, miten projektia ei pitäisi tehdä. Onneksi ydinvoimaloiden käyttö ja seisokkisuuennittelu vielä onnistuvat. Jo nyt Suomen pitkien ydinvoimaprojektien tehtävien kirjaaminen ansiolistaan johtanee kansainvälisessä työhaussa ilmoitukseen: ”Pahoittelemme, mutta valintamme ei tällä kertaa kohdistunut Teihin”.

Ydininsinööri

Palautusosoite:

Suomen Atomiteknillinen Seura
PL 78
02151 ESPOO

Osoitteenmuutokset:

sihteeri@ats-fns.fi



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