

# ATTS

1|2022

Vol. 51

## YDINTEKNIikka

SUOMEN ATOMITEKNILLINEN SEURA – ATOMTEKNISKA SÄLLSKAPET I FINLAND

### Posiva jätti käyttö- lupahakemuksen

Posiva hakee käyttö lupaa käytetyn ydinpolttoaineen kapselointi- ja loppusijoituslaitokselle – hakemuksen tukena perusteellinen 17000 sivun aineisto.

### Olkiluoto 3 käynnistetty

TVO ajoi OL3-reaktorin kriittiseksi joulukuussa ja korottaa tehotasoa vähitellen kevään aikana valmistautuessaan kaupalliseen käyttöön.

### Hanhikivi 1:n suuria komponentteja valmistetaan

Fennovoiman ydinvoimalaitoksen generaattorin akseli on valmistettu Japanissa ja kuljetettu Ranskaan jatkotyöstettäväksi.



## Julkaisija / Publisher

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

### Johtokunta / Board

#### Puheenjohtaja / President

TkT Markus Airila  
puheenjohtaja@ats-fns.fi

#### Varapuheenjohtaja / Vice President

MSc Ana Jambrina  
ana.jambrina@vtt.fi

#### Sihteeri / Secretary General

FM Jussi Peltonen  
sihteeri@ats-fns.fi

#### Rahastonhoitaja / Treasurer

FM Maria Lindholm  
rahastonhoitaja@ats-fns.fi

#### Jäsenet / Board Members

SK Tuomo Huttunen  
tuomo.huttunen@fennovoima.fi

DI Olli Nevander  
olli.nevander@rosatom.fi

TkT Antti Snicker  
antti.snicker@aalto.fi

DI Elina Syrjälähti  
elina.syrjalahti@tvo.fi

### Toimihenkilöt / Functionaries

#### ATS Young Generation

DI Pekka Pihlanko  
pekka.pihlanko@platom.fi

#### Kansainvälisten asioiden sihteeri / International Affairs

DI Santeri Myllynen  
santeri.myllynen@fortum.com

#### Women in Nuclear Finland

FT Eveliina Muuri  
eveliina.muuri@gmail.com

#### www.vastaava / Webmaster

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

#### ATS-Seniorit / ATS-Seniors

TkL Eero Patrakka  
eero.patrakka@kolumbus.fi

### Toimitus / Editors

#### Vastaava päätoimittaja / Editor-in-Chief

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

#### Tieteellinen päätoimittaja / Scientific Chief Editor

FT Antti Rätty  
antti.ratty@vtt.fi

#### Ajankohtaispäätoimittaja / Topical Chief Editor

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

#### Ulkoasu ja taitto / Layout

Katariina Korhonen  
Creatus  
katariina@creatus.fi

#### Toimitus / Editorial Staff

FM Sophie Haapalehto  
sophie.haapalehto@posiva.fi

DI Klaus Kilpi  
klaus.kilpi@gmail.com

TkT Henri Loukusa  
henri.loukusa@gmail.com

DI Alekski Savolainen  
aleksi.savolainen@tvo.fi

FT Mervi Söderlund  
mervi.soderlund@fennovoima.fi

### Toimituksen yhteystiedot

#### ATS Ydintekniikka

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

#### Painopaikka

Hämeen Kirjapaino Oy, Espoo

ISSN-0356-0473

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

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

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

# Juhlavuoden jälkinäytös: 200. lehti



**P**ITELET KÄSISSÄSI TAI RUUDULLASI kahdettasadatta ATS Ydintekniikka -lehteä. Tämä antaa pienen jälkinäytöksen juhlavuodelle 2021, joka oli lehden 50. vuosikerta ja jota juhlistettiin monenlaisin menoin: kannen koristelulla, arkiston helmien julkaisulla, verkkosivun artikkelihakukoneella ja juhlaseminaarilla.

Kun lehti ilmestyy neljästi vuodessa ja 50 vuosikertaa on täynnä, nopea päässäälaskija olettaa lehden 4/2021 olleen 200. numero. Näin ei kuitenkaan ole: lehden ensimmäisenä kolmena vuotena julkaistiin yhteensä 13 numeroa, yhtenä vuonna ei julkaistu numeroa 4 ja yhtenä vuonna julkaistiin yhdistetty numero 3–4. Tämän voi itse kukin tarkistaa seuran verkkosivujen lehtiarkistosta.

Sinänsä ei ole tarvetta erikseen juhlia 200 julkaistua lehteä, vaikka kyseessä onkin mukavan suuri ja pyöreä luku, vaan kyllä yli 50 vuoden taival on joka tapauksessa kunnioitettava saavutus. Se osoittaa seuran ja sen lehden elinvoimaa suomalaisen ydinenergian alkuajoista nykypäivään. Harvalla meistä riittää kristallipallossaan näkyvyyttä samanmittaiselle matkalle eteenpäin.

Kaiken kaikkiaan ydinenergia-alalla on ollut Suomessa aihetta juhlaan viime aikoina. Kirkkaita virstanpylväitä vuosien 2021–2022 taitteessa olivat Teollisuuden Voiman Olkiluoto 3 -yksikön ensimmäinen kriittisyys, Posivan käyttöluvapahakemus käytetyn ydinpoltoaineen kapselointi- ja loppusijoituslaitokselle ja Fennovoiman Hanhikivi 1 -luvitusaineiston jättäminen Säteilyturvakeskukselle. Lisäksi Fortum ilmoitti hakevansa käyttö lupaa Loviisan voimalaitokselle vuoteen 2050 saakka.

Tässä valossa myös ATS:n ja sen lehden tulevaisuus näyttää selkeältä, kunhan hankkeiden toteuttajat muistavat, ehtivät ja jakavat pysähtyä kirjaamaan kokemuksiaan edes lyhyen lehtiartikkelin verran. Yksi ATS

Ydintekniikan tehtävistä on dokumentoida alamme kehitysaskelaita ja siinä tehtävässä tarvitsemme niitä kuuluisia hevosen suita. Kiitos kaikille tämän numeron kirjoittajille!

Helmikuussa Venäjä aloitti sotilaallisen hyökkäyksen Ukrainaan, mikä aiheuttaa mittavaa kärsimystä Ukrainan väestölle ja vaarantaa Ukrainan ydinlaitoksia. Sota langettaa myös varjonsa Suomeen ja ydinalalle. ATS:n vuosikokous hyväksyi johtokunnan laatiman lausunnon, jossa Venäjän toiminta tuomitaan jyrkästi ja siltä vaaditaan välitöntä sotatoimien lopettamista.

**Jarmo Ala-Heikkilä**

Vastaava päätoimittaja

## SISÄLTÖ

### Vakiopalstat

Päätoimittajalta: Juhlavuoden jälkinäytös: 200. lehti	3
Pääkirjoitus: Vahvuksiemme avulla eteenpäin	4
Editorial: Our strengths help us forward	5

### Tapahtumat

Syysseminaari 2021 koronaviruksen varjossa	6
Ydinenergiain kokonaisuudistus kirvoitti ajatuksia ja toiveita Ydinturvallisuusseminaarissa	8

### Ajankohtaista

YJK-kurssi siirtyi digiaikaan – koulutus varmistaa ydinalan ja sen osaamisen kehittämisen nykyaikaisin oppimismenetelmin	10
Hiilivapaata kaukolämpöä kallioon sijoitetulla SMR-voimalalla	12
Olkiluoto 3 saavutti kriittisyyden	16
Posivan hanke eteni käyttöluvapahakemukseen	18
<b>Tiede ja tekniikka</b>	
Suomen ensimmäinen ydinreaktori	21

Hanhikivi 1 Gigatop 4-Pole Generator Rotor <i>Krzysztof Dominiczak, Murat Agcay</i>	26
Diplomityö: Palohasardianalyysi reaktorirakennukselle <i>Annmarie Oksa</i>	29
Master's thesis: Verification and Validation of Passive Heat Removal Systems' Simulation Models <i>Topias Zein</i>	32
Diplomityö: Nodaalinearitoniikkakoodi Antsin aikariippuvan mallin verifiointi <i>Unna Lauranto</i>	34
Dissertation: Sorption and Diffusion of Se(IV) Species in Crystalline Rock: Experimental Studies and Modelling Development <i>Xiaodong Li</i>	35

# Vahvuksiemme avulla eteenpäin



**M**EITÄ KAIKKIA ON VARMASTI JÄRKYTTÄNYT Venäjän mieli puolinen aggressio, joka puhkesi käsittämättömällä tavalla sodaksi Euroopassa. Sota ja taloudelliset pakotteet ovat osuneet hyvin konkreettisesti useiden jäsenemme arkeen, sillä tapahtumat kietoutuvat monilla tavoilla edustamiemme organisaatioiden toimintaan. Erityisesti Hanhikiven laitoshanke on Suomessa joutunut kaikkein kuumimpaan polttopisteeseen, eikä sen tulevaisuutta ole nyt helppo ennustaa. Olen pahoillani niiden kollegoiden puolesta, joiden vuosikausia tekemä määrätietoinen työ ilmastoystävällisen energian edistämiseksi on joutunut vaaraan. Monen muunkin ydintekniikan ammattilaisen osaksi on tullut tämän kriisin hoitamista.

Onneksi meillä on käytettävissämme omat erityiset vahvuutemme, joiden avulla pystymme työskentelemään vaikeissakin tilanteissa. Alamme erityispiirteisiin kuuluva tietoinen ja systemaattinen poikkeaviin tilanteisiin varautuminen antaa epäilemättä vahvan pohjan säilyttää toimintakyky ja harkinta paineenkin alla. Samoin meille niin keskeisen hyvän turvallisuuskulttuurin edellytyksistä, kuten virheistä oppimisesta ja avoimuudesta, kumpuaa hieno voimavara, tiimien ja organisaatioiden psykologinen turvallisuus. On tärkeää, että käytämme näitä kykyjämme pitääksemme työnantajamme ja Suomen hyvässä vireessä.

Kaiken pohjalla on kuitenkin välittämisen yksilötasolla läheisistä, työtovereista ja niistä, joihin tapahtumat koskevat kovimmin. Annetaan heille aikaamme. Muista myös kuulostella itseäsi ja pitää huolta omasta jaksamisestasi lisääntyneen kuormituksenkin alla. Jos työpöydälle tai arkeen hiipii uusia asioita, mistä vähemmän tärkeistä voisit samalla luopua?

Odotetaanko ATS:ltä tässä tilanteessa jotakin erityistä? Mielestäni ei, sillä konkreettista toimintaa suomalaisen yhteiskunnan hyväksi saamme parhaiten aikaan omissa organisaatioissamme ja verkostoissamme. Yhdistykselle taas paras keino huolehtia jäsenistään on lämpimien kohtaamisten mahdollistaminen, yhdistettynä tiedonvaihtoon muun muassa kor-

keatasoisten jäsentilaisuuksien muodossa. Eli tuttua ja turvallista.

Viime vuonna teimme jo muutampia hyviä yrityksiä seuran muiden vakiintuneiden toimintamuotojen palauttamiseksi kohti koronanjälkeistä normaalia. Välillä tarvittiin ketteryyttä ja nopeaa reagointia muutoksiin, mutta olen tyytyväinen ja kiitollinen jäsenistön antamasta myönteisestä palautteesta niistä tilaisuuksista, joissa pääsimme kohtaamaan. Tämän vuoden toimintasuunnitelma on juuri valmistunut, ja tätä luettaessa vuosikokous on sen myös käsitelty. Uskomme, että normaalimuotoinen toiminta on jälleen mahdollista, ja tavoittelemme 2–3 kertaa niin suurta määrää tapahtumaosallistujia kuin kahtena viime vuotena oli mahdollista saavuttaa.

Seuralle vuoden 2022 päätapahtuma on marraskuun alussa kolmatta kertaa järjestettävä Suomalaisen Ydintekniikan Päivät. Olen toiveikas sen suhteen, että symposiumin tekniistä ja tieteellistä ohjelmaa hallitsevat ne lukuisat hyvät uutiset, joille suomalainen ydintekniikka on viime aikoina antanut aiheita. Tuoreimpana on Fortumin viisas päätös hakea Loviisan voimalaitoksen käytölle jatkoluoppa aina vuoteen 2050 saakka. Erinomaisen mielenkiintoista kuultavaa voin lupaila maailmanlaajuisesti myönteisessä julkisuudessa kylpeneestä Posivan loppusijoitushankkeesta ja Olkiluoto 3:n säännöllisen sähköntuotannon aloittamisesta. Ja paljon muuta teemalla ”kestävää ydintekniikkaa”.

Monelle jäsenelle näkyvin osa seuran toimintaa on tänäkin vuonna ATS Ydintekniikka-lehti, jonka jatkuvasti korkeasta tasosta olen ylpeä niin sisällön, ulkoasun kuin myös säännöllisen ilmestymisen osalta. Tästä kiitos kuuluu luonnollisesti toimitukselle ja laajalle, alati uudistuvalla kirjoittajajoukolla. Nytkin kädesäsi on tuore, innostava lukupaketti, joka toivottavasti imaisee ajatukset hetkeksi toiseen maailmaan.

## TKT Markus Airila

Principal Scientist

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

ATS:n johtokunnan puheenjohtaja

# Our strengths help us forward

**WE MUST ALL HAVE BEEN SHOCKED** by Russia's insane aggression, which in an incomprehensible manner turned into war in Europe. The war and economic sanctions have had a very concrete impact on the daily lives of many of our members, as events are intertwined in many ways with the activities of the organisations we represent. In particular, the Hanhikivi power plant project in Finland has been in the hottest of hot spots, and it is not easy to predict its future at this time. I feel sorry for colleagues whose years of determined work to promote climate-friendly energy have been put at risk. Also for many other nuclear professionals, managing this crisis has become part of their job.

Fortunately, we have our own particular strengths at our disposal, which enable us to work in difficult situations. A conscious and systematic preparedness for abnormal situations, which is typical in our field, undoubtedly provides a strong basis for maintaining our judgement and our ability to act under pressure. Another great asset is the psychological safety of teams and organisations, which stems from transparency and learning from mistakes. These are essential building blocks of a good safety culture, which is always so essential for us. It is important that we use these talents to keep our employer and Finland fit.

But at the heart of it all is caring at an individual level for our loved ones, colleagues and those hardest hit by events. Let us give them our time. Remember also to listen to yourself and take care of your own wellbeing, even under increased stress. If big new things creep up on your desk or in your daily life, what are the less important things you could give up at the same time?

Is anything specific expected of ATS in this situation? I don't think so, because the best place to take concrete action for Finnish society is within our own organisations and networks. For a scientific society, on the other hand, the best way to look after its members is to facilitate warm encounters, combined with the exchange of information, for

example in the form of high-quality member events. In other words, the familiar and the safe.

Last year, we already made some good attempts to bring the established activities of ATS back to post-covid normality. Sometimes it took agility and a quick response to changing circumstances, but I am pleased with and grateful for the positive feedback from many members on the occasions we were able to meet. This year's action plan has been finalised and at the time of reading this, it has also been discussed at the annual meeting. We believe that business as usual is again possible, and we are aiming for 2–3 times the number of event participations that we were able to achieve in the last two years.

In 2022, the main event for our society will be the third Nuclear Science and Technology Symposium (SYP2022) in early November. I am hopeful that the technical and scientific programme of the symposium will be dominated by the numerous good news stories that the Finnish nuclear community has recently given rise to. The most recent is Fortum's wise decision to apply for an extension of the operating licence of the Loviisa power plant until 2050. I can also promise some very interesting news on the Posiva disposal project, which has been greeted with positive publicity worldwide, and the start of regular power generation at Olkiluoto 3. And much more on the theme of "sustainable nuclear technology".

For many members, the most visible part of ATS activities continues to be this quarterly magazine, which I am proud of for its consistently high standard of content, layout and regular publication. Thanks for this go, of course, to the editorial team and the large, ever-renewing group of authors. Again now you have in your hands a fresh, inspiring reading package that will hopefully send your thoughts to another world for a while.

## **D.Sc. (Tech.) Markus Airila**

Principal Scientist

VTT Technical Research Centre of Finland Ltd.  
Chairperson of Finnish Nuclear Society ATS

# Syysseminaari 2021 koronaviruksen varjossa

ATS:n vuoden 2021 Syysseminaari järjestettiin marraskuussa perinteikkäässä hotelli Paasitornissa Helsingissä. Tapahtuma keräsi paikan päälle noin 90 koronapassin omaavaa osallistujaa ja heidän lisäkseen esityksiä seurasi suoran verkkolähetyksen (Zoom livestream) kautta 70 muuta jäsentä.

**Teksti:** Jussi Peltonen ja Olli Nevander **Kuva:** Jarmo Ala-Heikkilä

**L**OPPUSYKSYN KORONA-AALLON iskiessä Suomeen jouduttiin ilman verkkoistoa suunnitellun Syysseminaarin toteutustapaa laajentamaan viikon varoitusaajalla: esiintyjien sekä seuran jäsenten toiveesta järjestettiin myös verkkolähetyksen. Tämä oli jälkikäteen arvioiden ehdottomasti hyvä valinta turvallisen seminaarin järjestämiseksi, vaikka ratkaisu vähensi osallistujamäärää Paasitornissa.

Saman päivän aamupäivälle suunniteltu TEM:n Ydinturvallisuusseminaari siirrettiin ko-

konaan vuodenvaihteen ylitse, ja tämä puolestaan tuki ja loi lisää kysyntää Syysseminaarin etäosallistumismahdollisuudelle. Seminaariin liittyvä perinteinen iltapala ja virvokkeet tarjottiin fyysisesti paikalle saapuneille alkuperäisen suunnitelman mukaan.

Puheenjohtaja Markus Airilan avaussanojen jälkeen päästiin viiden vuoden välein järjestettävään palkintojenjakoon ansioituneille jäsenille. Jo keväällä 2021 pidetyssä ATS:n vuosikokouksessa julkistetut uudet kunniajäsenet Jukka Laaksonen, Ilkka Mikkola ja Eero

Patrakka saivat palkintonsa. Heidän jälkeensä viiden vuoden aikana kautensa päättäneet puheenjohtajat Kai Salminen ja Tuomas Rantala, sihteeri Henri Loukusa, Antti Rätty ja Lauri Rintala, sekä SYP2019-puheenjohtaja Ville Tulkki saivat viirinsä ansiokkaasta työstään toimihenkilöinä.

## Voimayhtiöiden esitykset

Palkintotilaisuutta seurasi voimayhtiöiden puhujien esitykset. Fennovoiman teknillinen johtaja Janne Liuko kertoi pohjoisen Suomen Hanhikivi 1 -hankkeen valmisteluprosessin etenemisestä. Kaikki rakentamislupaan vaadittavat aineistot saadaan vuoden 2021 loppuun mennessä STUKin käsittelyyn. Vuoden 2022 aikana edessä on lupa-aineistojen parannukset ja täydennys STUKin kommenttien perusteella, hankintaketjujen laadunhallinnan varmennus sekä laitoksen perussuunnittelun viimeistely rakentamisen aloittamisen vaatimalle tasolle. Laitoskaivannon louhintatyöt, sekä hallintorakennuksen ja sataman rakentaminen ovat jo hyvässä vaiheessa.

Loviisan ydinvoimalaitoksen johtaja Satu Katajala puolestaan piti esityksen ydinvoimalaitoksen tulevaisuudesta ja lupaprosessien monimutkaistumisesta. Loviisan voimalaitoksen YVA (ympäristövaikutusten arviointimenettely) oli parhaillaan meneillään. YVA-menettelyssä tarkastellaan vaihtoehtoina Loviisan voimalaitoksen käyttöluvan pidentämistä vuoteen 2050 tai poistoa käytöstä yksiköiden nykyisten lupajaksojen (2027/2030) päättyessä. Menettelyssä arvioidaan ja täydennetään myös tarvittavia menettelyjä loppusijoitettaessa Loviisan luolaan muusta kuin Loviisan voimalaitosalueen toiminnasta muodostunutta suomalaista vähä- ja keskiaktiivista radioaktiivista jätettä.

Jarmo Tanhua jakoi TVO:n vuoden kuuluisia esityksessään, joka alkoi railakkaan ja jääkiekkohenkisen Olkiluoto-musiikkivideon säestämällä. Maaliskuussa tehty ensimmäinen reaktorin polttoainelataus ja matalapaineturbiinin sisäpesän korjaukset oli viimeistely. Nykyisellä aikataululla OL3 saavuttaisi ensimmäisen kriittisyyden vuoden 2022 tammi-kuussa. Viimeisten eri tehotasoilta tehtävien häiriötilannetestien ja takuukokeiden jälkeen voimalaitos siirtyy säännölliseen sähköntuotantoon kesään 2022 mennessä.

## Posiva ja muu toiminta

Voimayhtiöiden esityksiä seurasi kahvitauko ja katsaus alan ajankohtaisiin projekteihin. Posiva Solutions Oy:n toimitusjohtaja Mika



**FM Jussi Peltonen**

Tutkija

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy  
jussi.peltonen@vt.fi



**DI Olli Nevander**

Nuclear Safety and Licensing Expert  
Rosatom

olli.nevander@rosatom.fi

Pohjonen kertoi lähellä Olkiluodon laitosta sijaitsevan loppusijoituspaikan ONKALON aika-aulusta ja teknisestä toteutuksesta. Esityksen teemana oli se, että maailman ensimmäisen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen valmistuminen ja ottaminen käyttöön tapahtuu juuri Suomessa. Käytetyn ydinpolttoaineen kapselointi- ja loppusijoituslaitoksen käyttölupahakemus oltiin jättämässä vielä kulluvana vuonna. Vuosina 2023–2024 tullaan tekemään loppusijoituksen kokeiluja, kunnes varsinainen loppusijoitustoiminta alkaa vuonna 2025.

Emilio Mínguez tuli esittämään European Nuclear Societyn tervehdyksen ATS:lle, tiivistäen 2021 mittaan järjestetyt konferenssit ja muut jäsentapahtumat. Syksyllä järjestettiin Helsingissä European Research Reactor Conference 2021, Tarragonassa European Nuclear Young Generation Forum (ENYGF) sekä Santanderissa Top Fuel 2021 keräivät runsaasti osallistujia paikan päällä, kun taas Brysselissä loppusyksystä järjestetty NEST-ydinkoulutustapahtuma löysi suuren yleisön etäosallistujista.

Marraskuussa pidetyssä ENS:n kokouksessa vuoden väitöskirjatyöstä palkittiin Dr. Marco Tiberga, jonka teos käsitteli hyötöreaktoreille kehitettyä multifysiikkatyökalua. ENS:n johtokuntaan haetaan vuodelle 2022 uutta puheenjohtajaa sekä toimijoita. Myös ATS hakee jäsenistöään uutta edustajaa ENS:n kokouksiin ja toimintaan.

## Katsaus tutkimusprojekteihin


Antti Snicker ja Andrea Sand Aalto-yliopistosta kertoivat ITER- ja FinnFusion-projektien edistymisestä. ITERin rakentaminen Etelä-Ranskassa lähellä Italian rajaa on edistynyt pandemiatilanteesta huolimatta, ja kaksi tokamak-in jättimäistä toroidikäämeistä on valmistunut ja läpäissyt testaukset. Komponentteja valmistetaan osallistujien toimesta ympäri maailmaa, ja niiden tarkastukset ja kuljetukset Ranskaan etenevät.

ITER-laitteiston valmistuttua ja saatua asianmukaiset käyttöluvut, on ensimmäinen kontrolloidulla plasmalla toteutettava ITER-koe suunniteltu tapahtuvan jo tämän vuosikymmenen loppupuolella. Aikataulun mukaan deuterium-tritium-polttoaineen käyttö on tarkoitus aloittaa vuoden 2035 aikoihin. Muita vuoden tuoreita aiheita olivat Business Finlandin rahoittama ECO-Fusion-aloite ja mediassakin uutisoitu Advanced Computing Hub -tekoälykeskus, jota Helsingin yliopisto johtaa Kumpulan kampukselta käsin.

Andrea Sandin johtama Aalto-yliopistolle perustettu Nuclear Materials and Engineering (NuME) -tutkimusryhmä tutkii materiaali- ja säteilyvaurioita tarjoten tutkimusmahdollisuuksia kolmelle jatko-opiskelijalle ja yhdelle diplomityöntekijälle. Sand toi esille ryhmän käynnissä olevia tutkimusohjelmia, jotka käsittelevät mekaanisesti vaurioituneen materiaalin säteilyvaurioita ja perusvuorovai-

kutusten suhdetta energisiin atomeihin säteilyvahinkoja tarkastellessa. Rakenne- ja pinnoitemateriaalien kestävyys fuusioreaktorin sydämessä on yksi kriittisimmistä fuusiotutkimuksen ja fuusion kaupallisen käytön kysymyksiä, joihin tutkimusaiheet luovat uutta alan osaamista.

Seminaarin viimeisen esityksen ennen virvokkeiden nautiskelua piti VTT:n ydinenergian tutkimusalueen johtaja Tommi Nyman, joka kertoi ajankohtaisista ydinenergiaprojekteista VTT:llä. Nyman esitti konseptitason suunnitelman 50 MW:n modulaarisesta pienreaktorista kaukolämmön tuotantoon ja suolanpoistoon. Viime vuonna malliin on tutkimuksessa kytketty kaukolämpöverkon kuormanseuranta sekä suolanpoistolaitoksen Apros-malli.

Tänä vuonna työ jatkuu teknistaloudellisilla analyyseillä ja turvallisuusanalyysillä sekä primääripiirin ja lämmönvaihtimien tarkemmalla suunnittelulla. Toisena isona puheenaiheena Nyman kertoi FiR 1 -koereaktorin käytöstäpoistosta. TEM on myöntänyt reaktorirakennukselle käytöstäpoistoluvan, jonka myötä STUKille luovutetaan suunnitelma käytöstäpoiston toteutuksesta ja purkutyöt voidaan aloittaa tämän vuoden aikana. 

*Uudet kunniajäsenet ja edellisen vuosijuhlan jälkeensä päättäneet toimihenkilöt palkittiin perinteisin ATS:n viirein.*



# Ydinenergialain kokonaisuudistus kirvoitti ajatuksia ja toiveita Ydinturvallisuusseminaarissa

Työ- ja elinkeinoministeriön järjestämässä perinteisessä Ydinturvallisuusseminaarissa käsiteltiin energiapolitiikan isoa kuvaa mutta myös tarkempia kehityskohteita ja toiveita liittyen ydinenergialain kokonaisuudistukseen.

**Teksti:** Henri Loukusa

**T**YÖ- JA ELINKEINOMINISTERIÖN järjestämä Ydinturvallisuusseminaari järjestettiin toista kertaa koronapandemian johdosta webinaarimuodossa. Tilaisuus siirtyi pandemian vuoksi syyseltä 2021 pidettäväksi 28.1.2022. Liisa Heikinheimo avasi tilaisuuden huomioiden ydinenergia-alan suuret tapahtumat viime kuukausina – Olkiluodon kolmosreaktorin käynnistyminen ja Posivan käyttöluupa – mutta myös Ruotsissa myönnetty rakentamislupa SKB:n loppusijoituslaitokselle.

## Energiapolitiikan iso kuva

Ensimmäinen puhuja kansanedustaja Atte Harjanne puhui isosta kuvasta energiapolitiikan



**TkT Henri Loukusa**  
Toimittaja  
ATS Ydintekniikka  
henri.loukusa@gmail.com

kan taustalla, ja energiapolitiikassa Harjanteen mukaan ydinenergia on yhtenä tuotantomuotona tärkeässä roolissa. Sen lisäksi, mitä energiapolitiikalla on vaikutusta ilmastonmuutokseen, Harjanne otti myös esiin luontokadon ja luonnonvarojen kasvavan käytön. Luontokato on vaikeammin mitattava asia kuin hiilidioksidin määrä, mutta yhtä lailla vakava haaste.

Harjanne mainitsi kestävän tulevaisuuden edellytyksiä olevan päästöjen vähentämisen ja nollaamisen, luonnon säästämisen, kiertotalouden siirtymisen ja hyvinvoinnin mahdollistamisen kaikille. Tähän kaikkeen tarvitaan paljon päästötöntä energiaa ja aivan erityisesti sähköä. Harjanteen mielestä ydinenergialain rohkealle uudistamiselle on aito tarve ja kasvava tilaus. ”Politiikalla voi tehdä mahdollisesta mahdollista, muttei mahdottomasta mahdollista”, Harjanne päätti esityksensä.

Professori Sanna Syri jatkoi samanlaisella viestillä kuin Harjanne. Totaalinen täyskäännös päästöjen määrässä on tarpeen erittäin nopealla aikataululla. Syrin mielestä on vaikea kuvitella, miten kaikkia vähäpäästöisiä teknologioita ei tarvittaisi käännöksen toteuttamiseksi. ”On aivan selvää, että kaikkia teknologioita tarvitaan”, Syri kommentoi. 81 % maailman energiantarjonasta vuonna 2019 tuli fossiilisista polttoaineista, ja osuus on pienentynyt noin prosenttiin vuodessa.

Vuoden 2021 lopulla kehitys on kääntynyt Euroopassa jopa päinvastaiseen suuntaan, kun fossiilisten polttoaineiden käyttö sähköntuotantoon lisääntyi. Sähköntuotannon lisäksi

Euroopassa käytetään kuitenkin vielä enemmän fossiilisia polttoaineita lämmöntuotantoon, mutta aiheesta puhutaan edelleen vähemmän kuin olisi tarpeen. Syrin mukaan ydinenergialainsäädännön pitäisi kaikkialla muuttua mahdollistamaan esimerkiksi SMR-teknologian joustava lisensointi.

## STUKin ja voimayhtiöiden näkemyksiä uudistukseen

STUKin pääjohtaja Petteri Tiippanan mukaan uusia toimia vaadittaisiin kolmella tasolla: kansainvälisellä tasolla, kansallisella tasolla ja viranomaistoiminnan tasolla ja vaikuttavuudella. Ydinenergian käytön Suomessa kasvaessa yhteiskunnan kokonaisedun arviointi on entistä tärkeämpää.

Säteilysuojelun kattojärjestö ICRP on aloittamassa säteilysuojeluperiaatteiden uudistamista. Kansainvälisellä kentällä ALARA-periaatteen soveltamisesta käydään voimistunutta keskustelua ja erityisesti LNT-periaatteen purkamisesta. Kentän mielestä säteilysuojelun kentässä on paljon konservatiivisuutta. ”Johtopäätös on ollut, että järjestelmä kaipaa yksinkertaistamista”, Tiippana kertoi keskusteluista.

ICRP:n työn kytkös ydinenergialakiin on tärkeä mutta epäsuora, ja työtä on syytä seurata ja siihen vaikuttaa. Ydinenergialain kokonaisuudistuksen yhteydessä tulisi Tiippanan mukaan miettiä, missä määrin kansainvälisiä vaatimuksia tulee ottaa huomioon kansallisen tason vaatimuksissa. Tiippana kertoi myös STUKin sisäisistä kehittämistoimista, jotka liittyvät riskitietoisempaan lähestymistapaan ja luvanhaltijan vastuun kasvattamiseen.

Johtaja Peter Tuominen Fortumista kertoi yrityksen näkemyksiä ydinenergialain kokonaisuudistukseen liittyen. Säännöstö on Tuomisen mukaan Suomessa kehittynyt yksityiskohtaiseen suuntaan ja laitostoimittaja joutuu tekemään paljon muutoksia laitoksiin, jotta Suomispesifiset vaatimukset täytetään. Tuomisen mukaan kehitys, jossa ongelmiin vastataan tarkemmalla valvonnalla ja yksityiskohtaisemmalla sääntelyllä, aiheuttaa itsessään ongelmia. Tuominen käytti ruuanlaittoon liittyvää esimerkkiä: ”Taidot kokkina eivät kehity sillä, että luen vain keittokirjaa.” Laitosten räätälöinti Suomea varten ei tule olemaan mahdollista enää tulevaisuudessa.

Myös periaatepäätösprosessi kirvoitti ajatuksia. Periaatepäätöksen rooli oli alun perin poliittisesti vihreän valon saaminen. Yhä enemmän viedään periaatepäätösprosessiin asioita, joita olisi tarkoituksenmukaisempaa hoitaa myöhemmässä vaiheessa prosessia. Tämä on johdannut samojen asioiden tekemiseen eri syvyydellä eri kohdissa prosessia.



## I OSA YLEISET SÄÄNNÖKSET

## II OSA YDINMATERIAALIT JA JÄTTEET

## III OSA YDINLAITOKSET

## IV OSA YDINLAITOSTEN JÄTEHUOLTO

## V OSA VALVONTA JA SEURAAMUKSET

## VI OSA ERINÄISET SÄÄNNÖKSET

*Uuden ydinenergiain alustava kuusiosainen rakenne.*

Lakiasiaintojohtaja Ulla-Maija Moisio TVO:lta avasi keinoja, motivaatiota ja asennetasoa miten Tuomisen esittämiin tavoitteisiin päästäisiin. Moisio kävi läpi ydinalan historiaa sadan vuoden ajalta, päättäen Glasgow'n COP26-kokoukseen, jonka myötä Moisioon mukaan on selvää, että myös nuorten tuki ydinenergian käytölle on olemassa.

Alalla on kuitenkin useita huolia: liiketoiminnan on oltava kannattavaa, mutta alan kustannuskehitys huolestuttaa. Moisio esitti kysymyksen: "Onko ilmastotyö ainoa kilpailuetumme?" Kilpailuetua on kuitenkin jo kehitetty, ja Moisio esitti esimerkkeinä kilpailuedun kehittämiseen tärkeistä hankkeista KELPO-hankkeen, tekoälyn käytön, LEAN-lähestymistavan prosesseihin, verkostomaisen toimintatavan lisäämisen ja työnteon tapojen muutoksen.

Ydinenergiain kokonaisuudistuksessa olisi vältettävä luomasta "lainsäädännöllisiä tehottomuuden suvantoja, joilla huononnamme ydinenergian kilpailukykyä" muuta energiantuotantoa vastaan. Ydinenergiain kokonaisuudistuksen tulee olla yhteinen projekti.

### Paneelikeskustelussa yksityiskohtia ja ideoita

Ydinturvallisuusseminaarin toinen osa koostui paneelikeskustelusta ydinenergiain kokonaisuudistuksen tarpeesta. Panelistit olivat johtaja Kirsi Alm-Lytz STUKista, kansanedustaja Sanni Grahn-Laasonen, johtaja Petra Lundström Fortumista, professori Juhani Hyvärinen LUT-yliopistosta ja toimitusjohtaja Timo Okkonen Reqrisk Oy:stä. Moderaattorina toimi TEM:n alivaltiosihteeri Elina Pylkkänen.

Kukin osallistuja kertoi kolme tärkeintä asiaa, jotka heidän mielestään uudistuksessaan olisi tärkeää ottaa huomioon. Ensimmäisenä vuorossa ollut Petra Lundström listasi tärkeimmiksi seikoiksi graded approachin turvallisuus-

nessa, yhteistyön YVL-ohjeiden kehittämisessä ja jaksotuksen luvitusprosessissa. Sanni Grahn-Laasonen sen sijaan listasi ilmastotavoitteisiin pääsemisen, kokonaisuuden selkeyttämisen ja ennustettavan toimintaympäristön.

Kirsi Alm-Lytz korosti perustuslain vaatimusten täyttämistä, sitovien määräysten keräämistä lain ja määräysten tasolle ja ohjeiden sitovuudesta luopumista. Viimeisenä Alm-Lytz otti esiin vielä eri tahojen osaamisen hyödyntämisen mutta myös viranomaisten määrärahojen nykyisen tason.

Juhani Hyvärisen puheenvuorossa korostui tekniikan ymmärrys. Ydinvoimaan liittyvät vaarat olisi arvioitava ja tunnettava oikein, jotta toimenpiteet voidaan kohdentaa oikein. "Tärkeä osaaminen, jota tarvitaan, on syvällistä ymmärtämistä siitä, miten maailma toimii", Hyvärinen kommentoi. Myös Timo Okkonen korosti tekniikan tunteesta, mutta kävi asian kimppeun iskevällä Tekniikka, Toiminta ja Tulokset -sloganiilla. Näistä viimeisintä kohtaa saadaan aikaan vain yhteisönä, Okkonen korosti.

Seuraavaksi keskusteltiin ydinvoiman yhteiskunnallisesta hyväksyttävyydestä. Grahn-Laasonen nosti esiin ilmastomuutoksen suuren vaikutuksen hyväksyttävyyteen. Myös Lundström, Hyvärinen ja Alm-Lytz korostivat hyväksyttävyyden olevan tärkeässä roolissa.

Alm-Lytzin mukaan tulevaisuudessa on edessä suuri viestintähaaste, kun viranomaisilta siirretään vastuuta alan toimijoille. Suomessa on perinteisesti ollut korkea luottamus nimenomaan viranomaistoimintaan. Okkonen muistutti, että uudistus tulee kuitenkin "edellyttämään muutakin kuin twiittaamista".

Moderaattori nosti ydinvoiman kustannustehokkuuden seuraavaksi aihepiiriksi. Hyvärinen huomautti, että on olemassa toimintaympäristöjä, joissa isoja laitoksia on tehty kalliilla, mutta toisaalla on tehty hyviä laitoksia halvalla nykyäänkin. "Uniikkikappaleiden tekeminen väärin

kahteen kertaan, niin että vasta kolmannella kerralla onnistuu" nostaa kustannuksia.

1970–80-luvulla tehtiin hyviä ja turvallisia laitoksia, ja kaikki osapuolet alihankintaketjua myöten tiesivät mitä pitää tehdä, Hyvärinen jatkoi todeten, että Aasiassa on maita joissa ollaan nytkin tuossa tilanteessa. Prosessitehokkuuden parantamisen avulla ydinvoimalaitoksia "tulee kuin makkaraa tehtaasta".

Grahn-Laasonen kommentoi periaatepäätöksen tulevaisuudesta: "Tulevaisuudessa kun saadaan käyttöön pienydinvoimaloita, ne eivät voi olla valtioneuvostotason luvitettavia." Ydinvoiman luonnetta energiantuotannossa tulisi normalisoida ja siirtyä viranomaistason päätöksiin. Myös Hyvärinen jatkoi samalla linjalla, todeten periaatepäätökselle olevan erilaisia mahdollisuuksia. Yksittäisten yritysten investointipäätöksiin ei tarvitsisi ottaa kantaa.

### Uusi laki alustavasti eduskuntaan 2026

Anja Liukko TEM:stä esitteli lainsäädäntöuudistusprojektia ja sen aikataulua. Alustavana tavoitteena on saada uusi laki eduskuntaan 2026. Tällöin laki voitaisiin vahvistaa 2027 ja täytäntöönpano alkaisi vuonna 2028.

Uudistuksen tarkoituksena on osittain kirjoittaa laki kokonaan uusiksi niiltä osin, kun vaatimuksia uudistetaan. Kuitenkin esimerkiksi ydinmateriaalivalvonnan osalta perusta on pysynyt muuttumattomana, vaikka sääntelyä voitaisiinkin muuttaa. Toisaalta esimerkiksi Valtion ydinjätehuoltorahaston uudistuksen yhteydessä lakia on osaltaan käyty perustavanlaatuisesti läpi eikä uutta keskustelua välttämättä tältä osin tarvita.

Tilaisuuden päätti ylijohtaja Riku Huttusen puheenvuoro. Maailmalla ydinenergian hyväksyttävyyden ei ole niin hyvällä tasolla kuin Suomessa. Ydinvoimalla on rooli ilmastopoliitikassa, ja Huttunen uskoo, että kustannuksia voidaan leikata sekä sarjatuotannolla että järkevällä sääntelyllä. "Aika on rahaa, kun miljardien hankkeista puhutaan."

Huttunen ei näe SMR-tekniikan pienuutta tekniikan pääkohtana, vaan nimenomaan modulaarisuuden. Sen sijaan kysymykset turvajärjestelyistä ja ydinjätehuollon hoitamisesta eivät poistu modulaarisuudella. Jos lämmöntuotantoa halutaan reaktoreilla tehdä, on reaktori sijoitettava lähelle asutuskeskuksia, missä lämpöä tarvitaan.

Toimitajan yhteenvetona seminaarista voitaisiin vetää yksinkertaisesti, että ydinenergiain uudistus on työläs hanke, mutta poliittinen keskustelu on tullut pragmaattisemmaksi. Paljon töitä on siis edessä, mutta mahdollisuudet ovat myös suuret.

# YJK-kurssi siirtyi digiaikaan – koulutus varmistaa ydinalan ja sen osaamisen kehittymisen nykyaikaisin oppimismenetelmin

Ydinala työllistää Suomessa noin 4000 eri alojen ammattilaista. YJK-kurssilla varmistetaan ydinalalla työskentelevien eri alojen ammattilaisten osaamisen kehittäminen Suomessa.

*Lukuvuoden 2021–2022 YJK18-kurssi vieraili Olkiluodossa joulukuussa 2021, jolloin lähiopetuspäivillä päästiin keskustelemaan juuri opituista asioista kurssikavereiden kanssa livenä.*

**Teksti:** Salla Mikkonen **Kuvat:** Tapani Karjanlahti, Teollisuuden Voima Oyj

**VUODESTA 2003 ALKAEN JÄRJESTETYN** kansallisen ydinturvallisuus- ja ydinjätehuoltokurssin (YJK) tavoitteena on antaa ydinvoima-alan eri alojen ammattilaisille kattava näkemys alan turvallisuus- ja muista erityispiirteistä. Yhteistyössä ydinalan toimijoiden ja viranomaisten kanssa vuosittain toteutettava kurssi koostuu kuudesta jaksosta, joilla ydinalan ammattilaiset opiskelevat ydinvoimalaitosten ja ydinjätehuollon keskeisiä asiakokonaisuuksia.

Opiskeltavia kokonaisuuksia ovat ydinvoimalaitosten ja ydinjätehuollon turvallisuuden peruseriaatteet, turvallisuusanalyysit, käytöturvallisuus ja käyttöiän hallinta sekä laitosten käyttöehdot, ikääntyminen, valmius- ja viranomaistoiminta. Kurssilla tutustutaan myös

ydinalan toimipaikkoihin ja ydinvoimapaikkakuntiin ympäri Suomea.

Jatkuvan parantamisen periaatteen mukaisesti YJK-kurssia kehitetään vuosittain kurssista saatujen ja kerättyjen palautteiden perusteella. Eri toimijoiden pitämien koulutusjaksojen mahdollisia päällekkäisyyksiä on pyritty karsimaan vuosien varrella. Kurssiohjelmaan on lisätty myös alan ajankohtaisia asioita, millä on varmistettu kurssin pysyminen alan kehityksessä mukana. Tällaisia ajankohtaisia aiheita ovat esimerkiksi SMR (Small Modular Reactors), ilmastopolitiikka, ydinaseiden leviämisen ehkäiseminen sekä viranomaisyhteistyön periaatteet.

”Lähes 20 vuotta vanhalla YJK-kurssilla on edelleen merkityksellinen rooli koko alan yhteistyön ja toiminnan kehittämisen näkökulmasta. Kurssin sisältöä on koko sen historian ajan kehitetty vastaamaan paremmin ydinalan tarpeisiin. Kun alun perin kurssin tavoitteena oli antaa kattavat lähtötiedot ydinturvallisuuden perusteista uusille alalla työskenteleville, nyt se toimii laajempuna johdantona koko suomalaisen ydinalaan”, YJK-kurssin suunnitteluryhmän puheenjohtaja ja Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston ydintekniikan mallintamisen professori Juhani Hyvärinen kertoo.

## Ydinalan ammattilaisten oppimisen kehittäminen siirtyi digiaikaan

Vuonna 2020 alkanut maailmanlaajuinen koronaepidemia käynnisti myös Suomessa yh-



**Salla Mikkonen**  
Viestinnän asiantuntija  
Teollisuuden Voima Oyj  
salla.mikkonen@tvo.fi



teiskunnallisen työelämän muutoksen. Poikkeuksellisissa olosuhteissa terveysturvallisen työn tekemisen mahdollistamiseksi useilla eri aloilla otettiin käyttöön uusia joustavia ja digitaalisia työn tekemisen tapoja. Yhteiskunnallinen muutos näkyy myös YJK-kurssilla. Nyt käynnissä oleva 18. vuosikurssi on ensimmäinen, joka on suunniteltu kokonaan hybriditoteutuksena.

Hybriditoteutus sisältää sekä perinteisiä lähiopetuspäiviä että etäopetusta digitaalisessa ympäristössä. Lähiopetuspäivillä on tutustuttu liveinä kurssikavereihin ja ydinvoimapaikkakuntiin ja -toimipaikkoihin virustilanteen näin sallissa. Etäopetusjaksoilla taas on ollut käytössä laaja-alaisesti erilaisia digitaalisia oppimismenetelmiä ja -kanavia, kuten podcasteja, videoita ja erilaisia verkkokoulutusmateriaaleja.


"Nyt käynnissä oleva YJK18-kurssi on loistava konkreettinen osoitus siitä, miten alana pystymme ratkaisemaan edessä olevia haasteita yhdessä. Korona-aikana lähi-

opetus siirtyi etäopetukseen. Samasta syystä myös YJK-kurssin käytännön toteutusta jouduttiin arvioimaan hyvin tarkasti viime vuonna. Kurssin siirtäminen osittain verkkoon on vaatinut paljon kurssin räätälöintiä, uusia digitaalisia työkaluja sekä rohkeaa kokeilukulttuuria ja asennetta niin kurssin suunnittelijoilta ja vetäjiltä kuin opiskelijoiltakin", YJK-suunnitteluryhmän jäsen ja TVO-konsernin koulutuspäällikkö Tiina Kuusimäki kertoo.

YJK18-hybridikurssi on tätä kirjoittaessa vielä kesken, mutta se on jo antanut paljon ideoita ja oppeja tulevaisuuden kurssien suunnittelua varten. Digitaaliset työn tekemisen tavat ovat tulleet jäädäkseen, mistä syystä kurssin monimuotototeutuksen kehittäminen on tärkeää myös jatkossa.

"YJK-kurssin sisällön lisäksi kurssin opetusmenetelmiä on kehitettävä samaan tahtiin, kun yhteiskunnassa muutenkin löydetään ja otetaan käyttöön uudenlaisia oppimisen tapo-

ja. Kun 2000-luvun alussa opiskelijat saivat YJK-kurssin aineistot painettuina oman työhuoneen kirjahyllyn mappeihin, nyt harvalla kurssilaisella on enää omaa työhuonetta työelämän siirtyessä enemmän digitaaliseen työympäristöön. Työelämän muutos koskee koko yhteiskuntaa, ja siinä meidän tulee olla ydin-alana myös mukana", Hyvärinen nostaa esille.

"YJK-kurssia kehitetään aina opiskelijoilta saatujen ja kerättyjen palautteiden perusteella. Olemme jo nyt saaneet paljon hyviä kehitysehdotuksia kurssilaisilta tulevaisuuden kurssien kehittämiseen liittyen. Kurssin suurimpia arvoja on alan toimijoiden hyvän yhteistyön vaaliminen ja vahvistaminen. Verkostoituminen ja vuorovaikutuksen luominen on kuitenkin haastavampaa etäyhteyksien välityksellä kuin liveinä. Tämä on ehdottomasti yksi asia, johon seuraavien kurssien suunnittelussa meidän kannattaa kiinnittää huomioita", Kuusimäki jatkaa. 





# Hiilivapaata kaukolämpöä kallioon sijoitetulla SMR-voimalalla

Suomi on asettanut tavoitteen olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Tämä edellyttää fossiilisten polttoaineiden polttamisesta syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen huomattavaa vähentämistä. Yksi keino tähän on käyttää SMR-laitoksia kaukolämmön tuotantoon lämmittämään kaupunkijamme siten, että muun muassa lämmön tuotto fossiilisia polttoaineita polttamalla lopetetaan. Kaukolämpö tuotetaan nykyisin suurimmaksi osaksi fossiilisilla polttoaineilla, mutta tulevaisuudessa SMR-kaukolämpövoimalat voisivat lämmittää kaupunkijamme. Niiden sijoittaminen kalliooperään on yksi turvallinen ja vastuullinen vaihtoehto, jota tarkastellaan seuraavassa.

**Teksti:** Jorma Autio ja Juho Danska



**TkL Jorma Autio**  
Toimialapäällikkö  
Kalliosuunnittelu Oy Rockplan Ltd  
jorma.autio@rockplan.fi



**BSc Juho Danska**  
Projektipäällikkö  
Kalliosuunnittelu Oy Rockplan Ltd  
juho.danska@rockplan.fi

**VUONNA 2019 LAADITUN** hallitusohjelman tavoitteena on hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä. Päästövähennysten saavuttamisella on ennennäkemätön kiire, joka on aiheuttanut voimakkaan muutoksen energiasektorin kaikilla osa-alueilla. Tämän meneillään olevan siirtymäkauden, energiamurroksen, aikana on luotava päästötön, kustannustehokas ja toimitusvarma energijärjestelmä, joka perustuu myös erilaisiin tuotantotapoihin ja energiasysteemin älykkääseen integraatioon.

## **Pienet ydinvoimalat - SMR**

Yksi merkittävä jo olemassa oleva päästötön energian tuotantotapa on ydinvoima ja erityisesti uudet kehitteillä olevat pienet modulaari-

*Rolls-Roycen havainnekuva maan päälle sijoitetusta SMR-voimalaitoksesta (kuva: Rolls-Royce).*

set enintään sähköteholtaan 300 MW ydinvoimalat, joista käytetään lyhennettä SMR (Small Modular Reactors). Näitä kehitetään usean tahon toimesta, joista julkisuudessa ovat olleet esillä muun muassa NuScalen, GE Hitachin ja Rolls-Roycen hankkeet. Esimerkiksi NuScalen SMR-laitokset ovat USA:ssa jo suunnitteluvaiheessa.

Myös Suomessa on kehitteillä VTT:n ja Lappeenrannan yliopiston toimesta kaukolämmön tuotantoon sopivia SMR-ratkaisuja. Pieniä ydinvoimaloita on käytetty jo pitkään eri tarkoituksiin, niin laivoissa kuin sukellusveneissäkin. Uutta modernissa SMR-tekniikassa on erityisesti modulaarinen rakenne ja sitä tukeva tuotanto- ja toteutustapa, jossa sarjavalmistetut moduulit voidaan kuljettaa kokonaisuutena varten laitospaikalle.

Pienten SMR-voimaloiden sarjatuotanto tehtaissa mahdollistaa sarjatuotannon edut, nopeammat valmistusajat ja tehokkaan kustannusten hallinnan verrattuna perinteisiin paikalla rakennettuihin isoihin ydinvoimaloihin. SMR-laitos on myös investointina huomattavasti pienempi kuin isot perinteiset

ydinvoimalat, ja aika laitoksen tilauksesta käyttööntöön on nopeampi.

SMR-lämpölaite mahdollistaisi fossiilisten polttoaineiden polttamisen selvän vähentämisen lämmön tuotannossa. Teknisesti SMR-laitokset soveltuisivat pienen tehonsa puolesta hyvin kaupunkien kaukolämmön tuottamiseen. Lämmön tuoton hyötysuhde on korkea ja voimalat ovat yksinkertaisia.

Ne voidaan mahdollisesti sijoittaa tulevaisuudessa lähelle taajamia, sillä kaukolämmön siirto on paljon taloudellisempaa lyhyillä etäisyyksillä ja olemassa olevaa kaukolämpöverkkoa käyttäen. Lämmön tuotannon ohessa voidaan myös tuottaa sähköä perinteiseen tapaan sekä moniin muihin käyttötarkoituksiin kuten esimerkiksi vetytaloudessa tarvittavan vedyn tuottamiseen.

### SMR maan alle

Voimaloiden sijoitus maanpinnalle kaupunkialueille on haastavaa ja tämä pätee myös SMR-voimaloihin. Modulaarisuus ja kuljetettavuus sekä Suomen hyvä kallioperä ja kalliorakentamisen korkealuokkainen osaaminen mahdollistavat SMR-voimalan sijoittamisen kalliioon. Lisäksi niiden vaatimat tilat vastaavat kooltaan ja toteutettavuudeltaan monia muita maanalaisia tiloja kuten metroasemia.

Ydinvoimalan sijoittamista maan alle on

*NuScalen havainnekuva maan päälle sijoitetusta SMR-voimalaitoksesta (kuva: NuScale Power).*



suunniteltu ulkomailla 1950-luvulta lähtien ja vuosina 1955–1962 rakennettiin Euroopassa neljä ydinreaktoria osittain tai kokonaan maan alle: Halden Norjassa, Ågesta Ruotsissa, Chooz Ranskassa ja Lucens Sveitsissä. Usein motiivina on ollut turvallisuus ja sopivan laitospaikan puute.

Asea-Atom kehitti 1970-luvulla Secure-kaupunkireaktoria, jonka suunnittelun lähtökohdat olivat hyvin samanlaiset kuin nyt suunnitteilla olevissa SMR-laitoksissa: passiiviset turvallisuusjärjestelmät, matala käyttöpaine ja kallioon sijoittaminen. Secure-lämpöreaktorin käyttöä pääkaupunkiseudun lämmittämiseen selvitettiin ja kehitystä seurattiin ATS Ydintekniikka -lehden julkaisuissa: numerossa 3/1977 oli Matti Hannuksen laatima havainnollinen kuvaus projektista.

SMR-voimalan sijoittamiseen maan alle liittyy merkittäviä etuja ja haasteita. Sen potentiaalin arvioimiseksi ja konkretisoimiseksi laadittiin geneerinen suunnitelma kallioon sijoitettuksi SMR-kaukolämpölaitokseksi. Työ tehtiin Rockplanin arkkitehti- ja kalliorakennussuunnitteluryhmän johdolla yhteistyössä Fortum Power and Heat Oy:n, Helen

Oy:n ja TVO Oy:n kanssa, jotka kaikki ovat myös EcoSMR-hankkeen yrityskumppaneita. EcoSMR-hanke (Finnish Ecosystem for Small Modular Reactors) on Business Finlandin rahoittama ja se kokoaa suomalaisia toimijoita kehittämään liiketoimintaa pienreaktoreiden tarjoamien mahdollisuuksien ympärille.

### Suunnitelma

Tällä hetkellä maailmalla on kehitteillä yli 70 eri SMR-voimalaitosta eri tarkoituksiin. Näiden koot ja toteutusperiaatteet vaihtelevat. Lisäksi niiden tekninen kypsyys vaihtelee. Osa on hyvin alustavassa vaiheessa ja osa jo pilotointi-, toteutus- tai käyttöönottovaiheessa. Edellä mainituista valittiin suunnittelun lähtökohdaksi nykyisen tyyppiset maalla sijaitsevat kevytvesireaktorit, joille nykyiset turvallisuuteen liittyvät vaatimukset on kehitetty.

Näistä tässä esitetyn suunnittelun lähtökohdaksi valittiin SMR-kaukolämpövoimalaksi soveltuvat teknologialtaan ja kypsyydeltään potentiaalisiksi katsotut kevytvesireaktorit. Tämän tyyppisiä suunnitteilla olevia SMR-laitoksia ei

*SMR-kaukolämpölaitos sijoitettuna fiktiiviselle entiselle satama- ja pienteollisuusalueelle (kuva: Rockplan).*



ole suunniteltu maanalaista sijoitusta varten ja ratkaisun jatkokehitys edellyttääkin sitä.

Suunnitelma tehtiin geneerisesti käytävän lähtökohtana näistä pidemmälle kehitettyjen laitosten kuten NuScale- ja BWRX-300-reaktorien paineastian vaatimaa tilaa. Suomalaisien kehitteillä olevien konseptien katsottiin mahtuvan hyvin näistä lähtökohdistaan suunniteltuun tilaan.

Geneerisen suunnittelun lähtökohtana oli tyypillisesti SMR-lämpövoimalassa tarvittavat tilat ja kustannusoptimoitu monikerroksinen tilaratkaisu. Tilan muoto optimoitiin kalliomekaanisiin, louhintateknisiin ja taloudellisiin perusteisiin. Kuljetusyhteydet mitoitettiin niin, että laitoksen moduulit, paineastia mukaan lukien, siirretään ajotunnelia pitkin.

Tilaan vuotava pohjavesi kerätään altaaseen, joka on mitoitettu riittämään useamman vuorokauden vuodolle ilman pumppausta. Työssä ei tarkasteltu lähemmin pohjaveden ja sen vaikutusten hallintateknikoita SMR-tyyppisessä tilassa. Hallintaan on olemassa erilaisia teknikoita ja niiden yhdistelmiä, joista on kokemuksia muista tilatyypeistä (esim. metro, tekniset laitetilat).

Laitoksen suurin yksittäinen tila on 30 m leveä ja 20 m korkea reaktorihalli. Hallissa olevan reaktorialtaan syvyys on 27 m. Koko maanalaisen tilan pituus on 75 m, minkä lisäksi tarvitaan kuulut ja ajotunneli. Suunnitelma on visualisoitu fiktiiiviseen, käyttötarkoitukseltaan muutostarpeessa olleeseen ja jo valmiiksi rakennettuun teolliseen kaupunkiympäristöön. Sen läheisyydessä on liikunta- ja virkistyskäyttöön tarkoitettuja alueita sekä kauempana toimisto- ja liikerakennuksia.

Nykymääräykset eivät mahdollista SMR-laitoksen sijoittamista kaupunkiympäristöön tässä esitetyllä tavalla, sillä ydinlaitoksen ympärille vaaditaan 5 km laajuinen suojavyöhyke ja noin 20 km säteeltään oleva varautumisalue. Lainsäädännön ja ohjeistuksen muutostarvetta ollaan kuitenkin arvioimassa.

## Johtopäätökset

Kallioon sijoitettu SMR-kaukolämpövoimala voi olla ratkaisu kaupunkien lämmitykseen tulevaisuudessa. Se edellyttää kuitenkin nykyisten SMR-ratkaisujen monialaista kehittämistä. Teknisten suunnitelmien kehittämisen lisäksi yksi merkittävä SMR-laitosten käyttöönottoon ja integrointiin energiasysteemiin liittyvä edellytys on turvallisuuden lisäksi taloudellinen kannattavuus, johon liittyy olennaisesti investointiympäristö ja taksonomia.

Tärkeitä kehityskohteita ovat myös lainsäädäntö, luvitusprosessit ja näihin liittyvät esimerkiksi suojavyöhykkeille asetettavat vaatimukset,

joiden osalta maanalainen sijoitus herättää useita kysymyksiä. Ydinjätehuoltoon liittyy myös kysymyksiä, mutta siihen liittyvät isot periaatteelliset ratkaisut ovat meillä Suomessa onneksi jo pidemmälle vietyjä kuin monissa muissa maissa, sillä Suomessa on hyvin kehittynyt ja organisoitu ydinjätehuolto kiitos Posiva Oy:n ja viranomaisten pitkäjänteisen kehitystyön.

SMR-voimalaitoksen maanalaisella sijoittamisella on useita etuja:

- Turvallisuus ulkoisia uhkia vastaan: kallioperä suojaa laitosta samoin kuin esimerkiksi S-6-luokan kalliosuojissa.
- Laitoksen sijoitettavuus, sillä yleisesti ottaen suomalainen kallioperä soveltuu teknisesti ja seismisesti hyvin maanlaiseen rakentamiseen. Sopivia paikkoja löytyy energiaverkostojen alueelta ja kaupunkialueilla maanpäällisille voimalaitoksille on tyypillisesti vaikea löytää käyttökelpoista maa-alaa.
- Ympäristöystävällisyys verrattuna maanpäällisiin voimalaitoksiin: sijoitusalueella laitoksesta on näkyvissä vain rajatut maanpintayhteydet, joten muu ympäristö voidaan muuttaa esimerkiksi viheralueeksi.
- Kustannustehokkuus, erityisesti jos maan päälle jäävän rakennusoikeuden arvo voidaan ottaa huomioon.

Selvitys indikoi, että maanalaisen SMR-kaukolämpövoimalan kalliorakennuskustannus on noin 5–6 miljoonaa euroa, mikä on todennäköisesti pieni murto-osa koko laitoksen kokonaiskustannuksista, eikä kallioon sijoittamisessa kalliorakennuskustannukset muodosta mitään ilmeisimmin esteeksi hankkeen toteutettavuudelle. Tämänhetkiset kaupalliset SMR-kaukolämpövoimalat eivät sellaisenaan sovellu maan alle sijoitettavaksi.


On todennäköistä, että joillakin osa-alueilla maanalaisen ratkaisun kokonaiskustannukset voivat nousta (esim. tekniset maanpintayhteydet) ja joillakin pienentyä (esim. suojarakennus) verrattuna maanpintasijoitukseen. Paljon riippuu myös potentiaalisten toimittajien halukkuudesta kehittää ratkaisuja maan alle sijoitettaviksi. Tähän mennessä kiinnostus on selvästi herännyt, mutta jatko riippuu markkinoiden kehityksestä ja SMR-voimaloiden roolista osana koko energiasysteemiä.

Kaupunkialueilla on mahdollista hyödyntää jo olemassa olevia maanalaisia tiloja. Tällöin kalliorakennuskustannukset laskevat merkittävästi. Maanalainen sijoittaminen voi mahdollistaa arvokkaan rakennusoikeuden vapautumisen muihin tarkoituksiin riippuen suoja-aluevaatimuksista. Joissain kalliorakennuskohteissa kasvaneen rakennusoikeuden

arvo on ollut suurempi kuin maanalaisen rakentamisen kustannukset.

Kallioperä on kautta aikojen tarjonnut turvallisen sijoituksen maamme turvallisuuden kannalta kriittisille toimintoille kuten väestösuojille, johto- ja telekeskuksille sekä puolustushallinnolle. Merkittävä määrä infrastruktuuria on myös sijoitettu turvallisesti maan alle, kuten liikenne, sähkö-, lämpö- ja vesiyhteydet sekä niihin liittyvät tekniset tilat.

Kallio on itsessään mahtava suojarakennus ja turvallinen sijoituspaikka SMR-voimalalle ulkoisia uhkia vastaan. Kallio on myös ympäristön kannalta turvallinen vaihtoehto niin jätevedenpuhdistamoille kuin ammusvarastoillekin. Kaikki maanpintayhteydet ovat rajattuja, sijoitettavissa joustavasti ja suljettavissa ilmatiiviisti kuten väestösuojissakin.

Hiilineutraaleilla energiaratkaisuilla on kiire. SMR-voimalat itsessään ja niiden sijoitus kallioon voi olla ratkaisu, jolla tulevaisuudessa lapsemme ja lapsenlapsemme heräävät aamuun lämpimissä asunnoissa, katsovat ulos kirkkaaseen aamuun ja hengittävät puhdasta raikasta ilmaa. Pienydinvoiman maanalaisessa sijoittamisessa on paljon potentiaalia, jota on syytä kehittää lisää. 

# Olkiluoto 3 saavutti kriittisyyden

Tätä kirjoittaessa Olkiluoto 3:n sähköntuotanto ei ole vielä alkanut. Historiallisen kriittisyyden saavuttaminen on kuitenkin aiheellista tässä lehdessä noteerata. Yksityiskohtaisempi, useamman kirjoittajan jatko-osa on paikallaan sitten, kun sähköä luotettavasti tuotetaan ja #suomensuurinilmastoteko on toteutunut.

**Teksti:** Juha Poikola **Kuvat:** Teollisuuden Voima Oyj



**Juha Poikola**  
MMM, MBA  
Yhteiskuntasuhdepäällikkö  
Teollisuuden Voima Oyj  
juha.poikola@tvo.fi

**F**RAMATOME TOIMITTI OL3:N ensimmäisen polttoaine-erän Olkiluotoon vuoden 2017 lopussa Saksan Lingenistä. Paljon oli kuitenkin vielä työtä, ennen kuin laitossyksikkö täytti latauslupan edellytykset ja STUKin lupa saatiin 26. maaliskuuta 2021. Luvan saantia edelsi 300 järjestelmälle tehdyt 3 000 onnistunutta testiä. Lisensioidut operaattorit istuivat simulaattorilla 3 575 koulutuspäivää, ja koko OL3-organisaatiolle koulutusta järjestettiin 53 000 päivää.

STUK totesi latauslupapäätöksessään, että OL3-ydinvoimalaitossyksikkö täyttää sille asetetut turvallisuusvaatimukset ja sen turva- ja valmiusjärjestelyt sekä menettelyt ovat riittävät polttoaineen lataamiseksi reaktoriin. Myös ydinaseiden leviämisen estämiseksi tarpeellinen valvonta on järjestetty asianmukaisesti ja ydinlaitoksen haltijan vahingonkorvausvastuu ydinvahingon varalta on järjestetty siitä säädettyllä tavalla.

## Kriittisyyttä edelsi onnistunut polttoaineen lataus

Polttoaineen lataus käynnistyi 27. maaliskuuta 2021. Urakkaan osallistui yhteensä noin 50 hengen joukko TVO:lta ja laitostoimittajalta. Monenlaista osaamista oli paikalla: polttoaineenkäsittelijöitä, polttoaineenlatausvalvoja,

polttoaineinsinöörejä, polttoaineteknikoita, polttoainehankinnan pääinsinööri, reaktori-insinööri, reaktorivalvonnan pääinsinööri sekä reaktorifysikoita. Laitostoimittajan puolelta olivat paikalla muun muassa operoijat, valvojat, yleiskäyttöönnoton käyttöönottoinsinöörit ja kunnossapidon henkilöstöä. Polttoaineenkäsittelylaitteiden toimittajien tuki oli koko ajan valmiudessa mahdollisia ongelmatilanteita varten.

Kunnian ensimmäisen nipun lataamisesta sai Klaus Frisk. Historiallista tässä oli myös se, että Klausin isä Kalevi Frisk oli ladannut ensimmäisen nipun paikalleen Olkiluodossa OL2:lle reilut 41 vuotta aiemmin.

OL3:sta tuli polttoaineen latauksen alkamisesta lähtien käytössä oleva ydinvoimalaitos. Lataus saatiin valmiiksi 1. huhtikuuta, neljä päivää, 18 tuntia ja 23 minuuttia työn aloittamisesta.

## Kriittisyys saavutettiin kuudennella yrityksellä

Kriittisyyteen tarvittavat toimenpiteet voitiin aloittaa sen jälkeen, kun STUK myönsi 16. joulukuuta 2021 TVO:lle kriittisyys- ja pien-tehokoeluvan. STUKin mukaan käyttöönotto-kokeet osoittavat, että laitos toimii suunnitellulla tavalla.





Käynnistyminen aloitettiin vetämällä säätösauvat lähes kokonaan ulos reaktorista ennalta määritettyihin asemiin. Tämän jälkeen aloitettiin jäähdytysveden laimentaminen eli veden booripitoisuutta vähennettiin tiettyyn, ennalta määriteltyyn rajaan saakka. Reaktori tehtiin kriittiseksi vetämällä säätösauvoja vielä enemmän ulos.

Polttoaineen latauksen yhteydessä kolmeen polttoainenippuun oli sijoitettu kalifornium-252-isotoopista tehty primääri-neutronilähde. Neutronilähteiden avulla kriittisyyden lähestymistä voidaan seurata luotettavasti lähdealueen neutronivuodetektoreilla.

Kriittiseen booripitoisuuteen liittyviä epävarmuuksia etenkin uudella reaktorilla eikä booripitoisuutta saada edes tarkasti mitattua laimennuksen aikana. Siksi kriittisyyttä lähestyttiin hyvin varovaisesti. Laimennus lopetettiin, kun lähdealueen detektoreista mitattu neutronivuo oli noin kolminkertaistunut laimennuksen aloittamisesta.

Tämän jälkeen reaktori yritettiin tehdä kriittiseksi vetämällä säätösauvoja ulospäin. Jos se ei riittänyt, niin ne työnnettiin takaisin ja jäähdytettä laimennettiin hieman lisää ennen

seuraavaa yritystä. Näin menetellen kriittisyys saavutettiin vasta kuudennella säätösauvojen vedolla. Yhteensä laimentamiseen ja säätösauvojen vetoon kriittisyyteen kului aikaa noin 17 tuntia.

Viiden päivän kuluttua luvan saamisesta historiallinen hetki toteutui ja joulukuun 21. päivänä klo 3.22 Olkiluoto 3:n reaktori ajettiin ensimmäisen kerran kriittiseksi, eli ketjureaktio käynnistettiin.


### **Tehonnostoa portaittain, pikasulku viivästytti aikataulua**

Käyttöönottovaiheen alussa reaktorin teho pidettiin pitkään nollassa prosentilla tehotasolla reaktorisydämen pientehokokeiden suorittamisen ajan. Sen jälkeen teho nostettiin viiteen prosenttiin. Siitä eteenpäin tehoa nostettiin portaittain.

Tammikuussa päästiin 25 prosentin tehotasolle. Koekäytön aikana laitosyksikköä ja sen turvajärjestelmiä testataan ja laitoksen suunnittelun mukaista käyttäytymistä varmistetaan. Koekäyttövaiheen testeissä toteutetaan suunnitellusti myös reaktorin pikasulkuja.

14. tammikuuta 2022 höyrystimen pinnansäädön käyttöönottokeita tehtäessä tapahtui suunnittelematon reaktorin pikasulku. Se tapahtui, kun kokeen aikana yhden höyrystimen pinnankorkeus nousi yli reaktorin pikasulkurajan. Laitoksen tila pysyi koko ajan turvallisena. Tapahtuman syyt selvitettiin ja OL3 käynnistettiin uudelleen.

Uudelleen käynnistämisen jälkeen koekäyttövaiheessa huomattiin tarvetta muuttaa muun muassa laitosyksikön säätötoimintoihin liittyvää automaatiota. Myös automaation lisätestauksia tarvittiin. Korjaavat toimenpiteet aiheuttivat viivettä sähköntuotannon aloitukseen.

Kuten alussa totesin, OL3-tarina on vielä kesken ja jatkoa seuraa. Tunnilleen tarkka sekä koko koekäyttöjaksoa koskeva tuotantoennuste löytyvät osoitteesta [www.tvo.fi/ol3ennusteet](http://www.tvo.fi/ol3ennusteet). 

# Posivan hanke eteni käyttölupahakemukseen

Posivan kapselointi- ja loppusijoituslaitoksen käyttölupahakemus jätettiin valtioneuvostolle vuoden 2021 lopussa. Laitosten toteutusprojektit ovat edenneet hyvin ja suunnitellusti.

**Teksti:** Tiina Jalonen ja Petteri Vuorio

**P**OSIVAN LOPPUSIJOITUSHANKKEESA saavutettiin merkittävä virstanpää vuodelle 2021 lopussa, kun vuosikymmenien tutkimus-, kehitys-, suunnittelu- ja toteutustyö tiivistettiin yhdeksi ehyeksi käyttölupahakemusaineistoksi. Samassa yhteydessä toimitettiin Säteilysuorituskeskukselle lopullinen turvallisuusseloste (FSAR), pitkäaikaisturvallisuusperusteluaineisto sekä muut ydinenergia-asetuksessa edellytetyt selvitykset.

## Aineiston laajuus lähes 17000 sivua

Itse käyttölupahakemus liitteineen on vajaan neljänsadan sivun laajuinen aineisto. Siinä haetaan käyttölupaa kapselointi- ja loppu-

sijoituslaitokselle 2070-luvun loppuun asti. Tämänhetkisen suunnitelman mukaisesti kaikki Olkiluodon laitosyksiköiden 1 ja 2 sekä Loviisaan laitosyksiköiden nykyisten laitosten käyttöikä mukainen käytetty polttoaine on saatu loppusijoitettua tämän käyttöluvan aikana.

Sen jälkeen haetaan käyttölupalle jatkoa OL3-laitosyksikön käytetyn polttoaineen loppusijoitukselle. Hakemuksessa käytetyn polttoaineen kokonaismäärä on eri laitosyksiköiden käytetyn polttoaineen loppusijoituksen periaatepäätösten mukaisesti yhteensä enintään 6500 tU.

Käyttölupahakemus sisältää myös enintään 3000 kuutiometrin laajuinen matala-

ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituslaitoksen, jolle on jo aiemmin saatu rakentamislupa. Loppusijoituslaitoksen rakentamisesta päätetään myöhemmin, sillä ainakin käyttötoiminnan alussa Posivan kapselointilaitoksessa syntyvä matala- ja keskiaktiivinen jäte on suunniteltu sijoitettavan TVO:n käytössä olevaan VLJ-luolaan Olkiluodossa. Posivan laitosjättilä on alustavasti suunniteltu ONKALO®:n ajotunnelin varteen noin -180 metrin syvyyteen.

Huomattavasti käyttölupahakemusta laajempi aineisto toimitettiin hakemuksen jättämisen yhteydessä Säteilysuorituskeskukselle. Aineisto sisälsi muun muassa lopullisen turvallisuusselosteen FSAR yleisen osan luvut sekä järjestelmäosan, jossa oli noin 180 järjestelmän kuvaukset. Lisäksi FSAR-aineistossa on aihekohtaisia raportteja muun muassa eri turvallisuusanalyysistä. Lopullisen turvallisuusselosteen rakenne ja sisältö noudattelee kansainvälisiä malleja ja ydinvoimalaitosten vastaavaa dokumentaatiota.

Muita STUKille toimitettuja aineistoja olivat ydinenergia-asetuksen §36 mukaiset muut selvitykset kuten esimerkiksi todennäköisyysperusteinen riskianalyysi PRA, luokitusasiakirja, turvallisuustekniset käyttöehdot (TTKE), ikääntymisenhallintaohjelma ja käyttövaiheen organisaatiosuunnitelma. Kokonaisuudessa STUKille toimitetun aineiston laajuus oli lähes 17000 sivua.

Yksi loppusijoituksen luvituksen erityispiirre on pitkäaikaisturvallisuuden arviointi, jonka aineisto toimitettiin myös STUKille. Turvallisuusperusteluaineisto (Safety Case) pitää sisällään teknistieteellisen aineiston, analyysijä, havaintoja, kokeita, testejä ja muita todisteita, joilla perustellaan loppusijoituksen turvallisuus ja turvallisuudesta tehtyjen arvioiden luotettavuus.

Loppusijoitus on suunniteltu aloitettavan Olkiluodon käytetyn polttoaineen varastossa olevalla polttoaineella. Polttoaineen kuljetus Loviisasta Olkiluotoon luvutetaan yksityiskohtaisesti myöhemmin lähempänä polttoainekuljetusten aloitusta.

## Turvallisuusperustelun sisältö ja päätulokset

Posivan käyttölupahakemuksen turvallisuusperustelu on viranomaisvaatimusten mukaisesti laadittu, kahdeksasta pääraportista koostuva aineisto, jolla osoitetaan käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen turvallisuus pitkällä aikavälillä Säteilysuorituskeskuksen määräysten ja YVL-ohjeiden mukaisesti.

Posivan loppusijoitussuunnitelma perustuu luonnollisista ja teknisistä vapautumisesteistä koostuvaan kokonaisuuteen, jonka pit-



**DI Tiina Jalonen**  
Kehitysjohtaja  
Posiva Oy  
tiina.jalonen@posiva.fi



**DI Petteri Vuorio**  
Tekninen päällikkö  
Posiva Oy  
petteri.vuorio@posiva.fi



*Kapselointilaitoksen (kuvassa takimmainen rakennus) rakennustyöt käynnistyivät kesällä 2019 ja rakennus nousi harjakorkeuteen joulukuussa 2021 (kuva: Posiva Oy).*

käaikaisturvallisuutta eivät vaaranna ulkoiset tapahtumat tai prosessit, kuten muutokset geologiassa tai ilmastossa.

Turvallisuusperustelussa on osoitettu, että Olkiluodon kallioperässä vallitsevista olosuhteista käytetty ydinpolttoaine ja sen sisältämät radionuklidit pysyvät kuparikapseloiden sisällä todennäköisesti yli miljoonan vuoden ajan. Loppusijoitustilojen sijainti 400–450 metrin syvyydessä maanpinnasta eristää tilat pintaympäristöstä ja suojaa niitä tahattomalta tunkeutumiselta.

Turvallisuusperustelutyöhön on sisällytetty loppusijoitusjärjestelmän toimintakyvyn systemaattinen analysointi, jossa otetaan huomioon epävarmuudet loppusijoitusjärjestelmän alkutilassa sekä sen kehityskuluissa pitkällä aikavälillä. Tehty toimintakykyarvio osoittaa, että odotetuissa kehityskuluissa mahdolliset hyvin kauaksi tulevaisuuteen ajoittuvat radioaktiivisuuspäästöt jäävät alle säteilyturvallisuusvi-

ranomaisen asettamien raja-arvojen. Lisäksi epätodennäköisissäkin, pessimistiseksi oletetuissa kehityskuluissa radionuklidien maksimipäästönopeudet ovat monta kertaluokkaa alle YVL-ohjeessa D.5 määritettyjen aktiivisuuspäästöjen enimmäisarvojen.

Biosfäärianalyysin tulokset osoittavat, että säteilyannokset eniten altistuville ja muille ihmisille jäävät selvästi alle viranomaisrajojen. Koko miljoonan vuoden käsittävä yksinkertaistettu annoslaskenta osoittaa, että jopa pessimististen kehityskulkujen seurauksena ihmisten säteilyannokset jäävät murto-osiin keskimääräisestä luonnollisesta taustasäteilyannoksesta.

Kapselointilaitoksen matala- ja keskiaktiiviselle jätteelle 180 metrin syvyyteen suunniteltu LILW-loppusijoitustila voidaan tarvittaessa turvallisesti sijoittaa käytetyn polttoaineen loppusijoitustilan yhteyteen, jos se myöhemmin päätetään rakentaa.

### Ajankohtaiset kehitysasiat

Käyttöluvahakemukseen mukana toimitettiin Olkiluodon loppusijoituspaikan kuvaus, Olkiluoto Site Description, joka kokoaa yhteen kaikkien Olkiluodossa lähes neljän vuosikymmenen aikana tehtyjen paikkatutkimusten ja mallinnusten tulokset ja niiden tulkinnat. Kuvaus kattaa Olkiluodon loppusijoituspaikan geologiset, hydrogeologiset, hydrogeokemialliset, kalliomekaaniset ja pintaympäristön erityispiirteet.

Posivan määrittämiä loppusijoituskonseptin ja -paikan tutkimuksia, mallinnuksia ja käytännön kokeita on jatkettu Posivan hankkeen ohjelmassa ja projekteissa. Niiden tuloksia on koottu useisiin turvallisuusperustelun taustaraportteihin. Sekä turvallisuusperustelun että sen taustaraporttien avulla on myös laadittu ja toimitettu STUKille aineistot, joilla täytetään ne vaatimukset, jotka STUK on asettanut Posivalle sen rakentamislupahakemuksen turvallisuusperustelun pohjalta.

Posiva on jatkanut loppusijoituskapselin komponenttien sekä sitä ympäröivän bentoniittipuskurin ja tunnelien toimittajakandidaattien kanssa toimitusketjujen kelpoitus- ja



tuotantovalmiuteen sekä tuotantosopimukseen tähtääviä testejä ja neuvotteluja.

Posiva on kerännyt lisää tietoa loppusijoitusjärjestelmän käyttäytymisestä ONKALoon aiemmin toteutetun täyden mittakaavan järjestelmäkokeen seurannalla.

### Laitosten toteutuksen tilanne

Kapselointi- ja loppusijoituslaitosten toteutus on edennyt hyvin. Koronapandemiasta huolimatta isot toteutusurakat ovat edenneet ainakin tähän asti ilman suurempia häiriöitä. Kapselointilaitoksessa saavutettiin harjakorkeus joulukuussa 2021 ja loppusijoituslaitoksessa viiden ensimmäisen loppusijoitustunnelin louhinnat ovat edenneet yli puolivälin.



Kapselointilaitoksen toteutuksessa siirrytään vuoden 2022 alussa rakennusvaiheesta asennusvaiheeseen. Rakennusvaiheen aikana on jo asennettu taloteknisiä järjestelmiä kerrostasoinnain, mutta nyt ovat alkaneet myös ensimmäiset kapselointiprosessin järjestelmien asennukset. Polttoaineen käsittelykammio vapautettiin rakennustöiltä järjestelmäasennuksille vuoden 2021 lopussa.

Samaan aikaan laitevalmistus eri konepajoilla Suomessa ja muualla Euroopassa jatkuu kiivaana. Yhtenä ensimmäisistä laitteista valmistui loppusijoituskapselin kuparikannen kitkatappihitsauslaite, jolla on suoritettu täyden mittakaavan hitsauskokeita valmistajan tiloissa Yhdysvalloissa ennen laitteen asennusta kapselointilaitokseen. Myös polttoaineen kuljetus-

*Loppusijoitusreiän poralaite on valmistettu Saksassa ja sillä on suoritettu koeporauksia valmistajan koealueella. Laite on saapumassa Olkiluotoon kesällä 2022 (kuva: Herrenknecht AG).*

säiliön käsittelyyn käytettävä järea siltanosturi on jo asennettu kapselointilaitokseen.

Loppusijoituslaitoksessa louhinnat ovat loppusuoralla ja niiden odotetaan valmistuvan kesään 2022 mennessä. Samaan aikaan toteutetaan tilojen varustelua eri järjestelmillä. Suuritoisimpia asennustöitä ovat isojen ilmanvaihtokanavien asennukset laitoksen tiloihin. Henkilö- ja kapselikuilun rakennus- ja lujitustyöt ovat valmistuneet ja henkilöhisin asennus henkilökuiluun on käynnissä. Loppusijoitusreikien porauksessa käytettävä laite on valmistunut ja sillä on suoritettu ensimmäisiä poraustestejä valmistuspaikalla Saksassa. Laite saapuu Olkiluotoon kesällä 2022 ja ensimmäisten reikien poraus on alkamassa loppuvuodesta.

### Seuraavat virstanpylväät ennen käytön aloitusta

Seuraava iso virstanpylväs Posivan hankkeessa on laitosten yhteistoimintakokeen aloittaminen laitosten käyttöönoton valmistuttua vuonna 2023. Kokeessa on suunniteltu valmistettavan neljä loppusijoituskapselia, joihin asennetaan kapselointilaitoksessa polttoaine-elementtejä, jotka on valmistettua tätä koetta varten ilman käytettyä ydinpolttoainetta.

Kapselit hitsataan ja tarkastetaan ja ne sijoitetaan tätä varten toteutettuun yhteistoimintakoetunneliin. Tunneli täytetään täyttömateriaalilla ja tunnelin päähän rakennetaan betonitulppa. Kokeessa osoitetaan Posivan valmius loppusijoitustoiminnan aloittamiseen käytännössä.

Käyttöluvan Posiva odottaa saavansa vuosikymmenen puoliväliin mennessä. Tämän jälkeen STUK arvioi vielä Posivan valmiuden käyttötoiminnan aloittamiseen, minkä jälkeen voidaan polttoaineen siirtosäiliön kansi aukaista kapselointilaitoksella ensimmäisen kerran ja polttoaineen kapselointi aloittaa. Alkuvaiheessa tuotannossa tähdätään yhden loppusijoitustunnelin eli noin 35 loppusijoituskapselin tuotantomäärään vuodessa. 🌀

*Loppusijoituskapselin kuparikannen kitkatappihitsauslaite on valmistunut ja sillä on suoritettu testihitsauksia valmistuspaikalla ennen toimivasta kapselointilaitokseen (kuva: Posiva Oy).*

# Suomen ensimmäinen ydinreaktori

Jaakko Leppänen  
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

1950-luvun lopusta 1970-luvun alkuun käytössä ollut alikriittinen reaktori, eli eksponentiaalimiilu, oli ensimmäinen suuren mittakaavan ydintekninen koelaitte Suomessa. Miilu valmistui puiseen parakkiin Otaniemen kampusalueelle vuonna 1958, ja se toimi Teknillisen korkeakoulun tutkimus- ja opetuskäytössä vuoteen 1973 saakka. Alikriittisen miilun merkitys on jäänyt myöhemmin valmistuneen kriittisen FiR 1 -reaktorin varjoon, mutta aikanaan kyse oli tärkeästä tutkimuslaitteesta, jolla oli paikkansa Suomen ensimmäisen ydinenergia-alan asiantuntijasukupolven koulutuksessa. Tämä kirjoitus perustuu kattavaan valokuvista ja dokumenteista koostuvaan arkistomateriaaliin, jonka on koonnut TkT Pertti Aarnio Aalto-yliopistosta.

The first large-scale experimental facility used in Finland for nuclear energy research was a sub-critical reactor, or exponential pile, which was operated from the late 1950's until the early 1970's. The pile was constructed in a wooden cabin in the Otaniemi campus area in 1958, and it was used for teaching and fundamental research at Helsinki University of Technology until 1973. The sub-critical pile was later overshadowed by the critical FiR 1 reactor, but in its time, it played a major role in the education of the first generation of experts in the Finnish nuclear field. This article is based on the vast amount of archived material and photos compiled by Dr. Pertti Aarnio from Aalto University.

Ydinreaktorin määritelmästä voidaan olla monta mieltä, ja Suomen ensimmäiseksi reaktoriksi nimetäänkin tavallisesti Otaniemessä vuoteen 2015 saakka toiminut TRIGA Mark II -sarjan koereaktori FiR 1. Ennen Otaniemen TRIGAn käyttöönottoa yliopiston kampuksella oli kuitenkin toiminut jo neljän vuoden ajan alikriittinen reaktori, jota kutsuttiin myös eksponentiaalimiiluksi. FiR 1:een verrattuna miilun tarina on varsinkin nuoremman sukupolven keskuudessa selvästi vähemmän tunnettu. Kyse oli kuitenkin merkittävästä koelaitteesta Suomen ydinenergia-alan historiassa. Miilun tarina juontaa juurensa 1950-luvulle, jolloin ydintekniikka alkoi kylmän sodan keskellä vapautua siviilipuolen käyttöön.

## Reaktoriteknologian varhainen kehitys

Ensimmäiset ydinreaktorit rakennettiin toisen maailmansodan jälkipuoliskolla Manhattan-projektin eli liittoutuneiden ydinaseohjelman tarpeisiin. Reaktoreissa valmistettiin uutta keinotekoisia alkuainetta, plutoniumia, jota käytettiin ydinpommien raaka-aineena. Kehitys tapahtui salassa ja vei kaikkiaan vain muutaman vuoden. Itseään ylläpitävä ketjureaktio käynnistyi ensimmäisen kerran joulukuussa 1942. Nobel-

palkitun fyysikon Enrico Fermi vetämän tutkimusryhmän suunnittelema reaktori oli kasattu Chicagon yliopiston urheilukentän alla sijaitsevalle vanhalle squash-kentälle. Uraaniytimen halkaiseva fissioreaktio oli löydetty Saksassa vasta neljä vuotta aikaisemmin.

Kun ketjureaktion toimintaperiaate oli saatu demonstroitua, reaktoriteknologian kokeellinen tutkimus alkoi keskittyä Tennesseeen osavaltioon perustettuun Oak Ridgen laboratorioon. Lyhyen pilottivaiheen jälkeen ydinmateriaalin tuotannossa siirryttiin teolliseen mittakaavaan. Washingtonin osavaltiossa sijaitsevassa Hanfordissa otettiin käyttöön kolme plutoniumintuotantoreaktoria vuosina 1944–1945. Hanfordin reaktorit olivat nykymittapuulla arvioituna varsin alkeellisia, mutta ne tuottivat energiaa jo satojen megawattien teholla.

Tieto ydinaseiden olemassaolosta pidettiin visusti salassa aina Hiroshiman ja Nagasakin atomipommituksiin saakka. Toinen maailmansota päättyi Japanin antautumiseen syyskuussa 1945. Vaikka reaktoriteknologia oli alun perin kehitetty ydinase materiaalin tuotantoon, reaktoreille alkoi heti sodan jälkeen löytyä käyttökohteita myös siviilipuolelta. Ketjureaktiossa syntyneitä neutroneita hyödynnettiin fysiikan perustutkimuksessa. Ydinreaktoreilla voitiin myös valmistaa uusia radioaktiivisia isotooppeja lääketieteen ja teollisuuden tarpeisiin.



Kuva 1. Kuvia miilun alkutaipaleelta. a) Uraanitankojen kapselointi Ahlströmin konepajalla Varkaudessa; b) Puinen miiluparakki Otaniemessä; c) Polttoainesauvoista muodostuva reaktorin sydän vesitankissa; d) Presidentti Kekkonen seuraamassa miilun vihkiäisiä 22.5.1958.

Uuden teknologian houkuttelevin käyttökohde oli kuitenkin energiantuotanto. Sodan jälkeinen jälleenrakennuskausi johti monessa maassa nopeaan teollistumiseen, joka vaati jatkuvasti lisää energiaa. Yhdysvalloissa mielenkiinto suuntautui jo vuosikymmenen vaihteessa väkeväidyllä uraanilla toimiviin kevytvesireaktoreihin. Ensimmäiset painevesityyppiset reaktorit kehitettiin sukellusveneiden voimanlähteiksi. Pidemmälle tulevaisuuteen tähtäävissä suunnitelmissa hämmöttävät plutoniumilla toimivat nopeat hyötöreaktorit, jotka kykenivät jatkuvasti uudistamaan oman polttoainementaarisensa.

Ydintekniikan kehitys oli nopeaa myös USA:n liittolaismaissa. Kanadan Ontarioon perustetussa Chalk Riverin tutkimuslaboratoriossa kehitettiin raskasvesitekniologiaa jo Manhattan-projektin aikana. Kanadan ensimmäinen ydinreaktori ZEEP (Zero Energy Experimental Pile) aloitti toimintansa vain muutama päivä toisen maailmansodan päättymisen jälkeen.

Manhattan-projektin riveissä työskennelleet eurooppalaiset tutkijat toivat reaktoritekniikan mukanaan palattuaan sodan jälkeen kotiin. Kehitys lähti etenemään nopeasti myös Iso-Britanniassa ja Ranskassa. Neuvostoliitto pidettiin ulkona länsiliittoutuman ydinaseohjelmasta, mutta Manhattan-projektissa toimineet vakoojat saivat toimitettua niin paljon teknistä materiaalia Moskovaan, että maa oli sodan jälkeen kehityksessä vähintään samalla viivalla Iso-Britannian ja Ranskan kanssa.

### Atomit rauhan asialla

Toisen maailmansodan päättyessä Yhdysvallat oli maailman ainoa ydinasevaltio. Monopoliasema jäi kuitenkin lyhytaikaiseksi. Neuvostoliitto teki ensimmäisen ydinkokeensa vuonna 1949, ja seuraavilla vuosikymmenillä myös Iso-Britannia, Ranska ja Kiina liittyivät ydinasevaltioiden joukkoon. Myös ydinaseiden tuhovoima kasvoi nopeasti. 1950-luvulla kehitetyt vetypommit vastasivat voimakkuudeltaan satoja tai jopa tuhansia Hiroshimaan ja Nagasakiin pudotettuja fissiopommeja. Jännite suurvaltojen välillä kasvoi, ja ydinaseiden leviäminen maailman jokaiseen kolkkaan alkoi näyttää hyvinkin konkreettiselta uhkakuvalta.

Globaalin ydinsodan uhan liennyttämiseksi Yhdysvaltain presidentti Dwight D. Eisenhower piti joulukuussa 1953 järjestetyssä YK:n yleiskokouksessa puheen, jossa ehdotettiin teknologiayhteistyön avaamista kaikille jäsenvaltioille. Ajatus oli, että pidättäytymällä asetekniikan kehittämisestä ydinaseettomat maat pääsisivät osallisiksi rauhanomaisen ydinenergiantuotannon hyödyistä. Ydinasevaltiot puolestaan lupautuivat olemaan toimittamatta asetekniologiaa ydinaseettomille maille. Samoien ajatusten pohjalta perustettiin myös Kansainvälinen atomienergiajärjestö IAEA neljä vuotta myöhemmin.

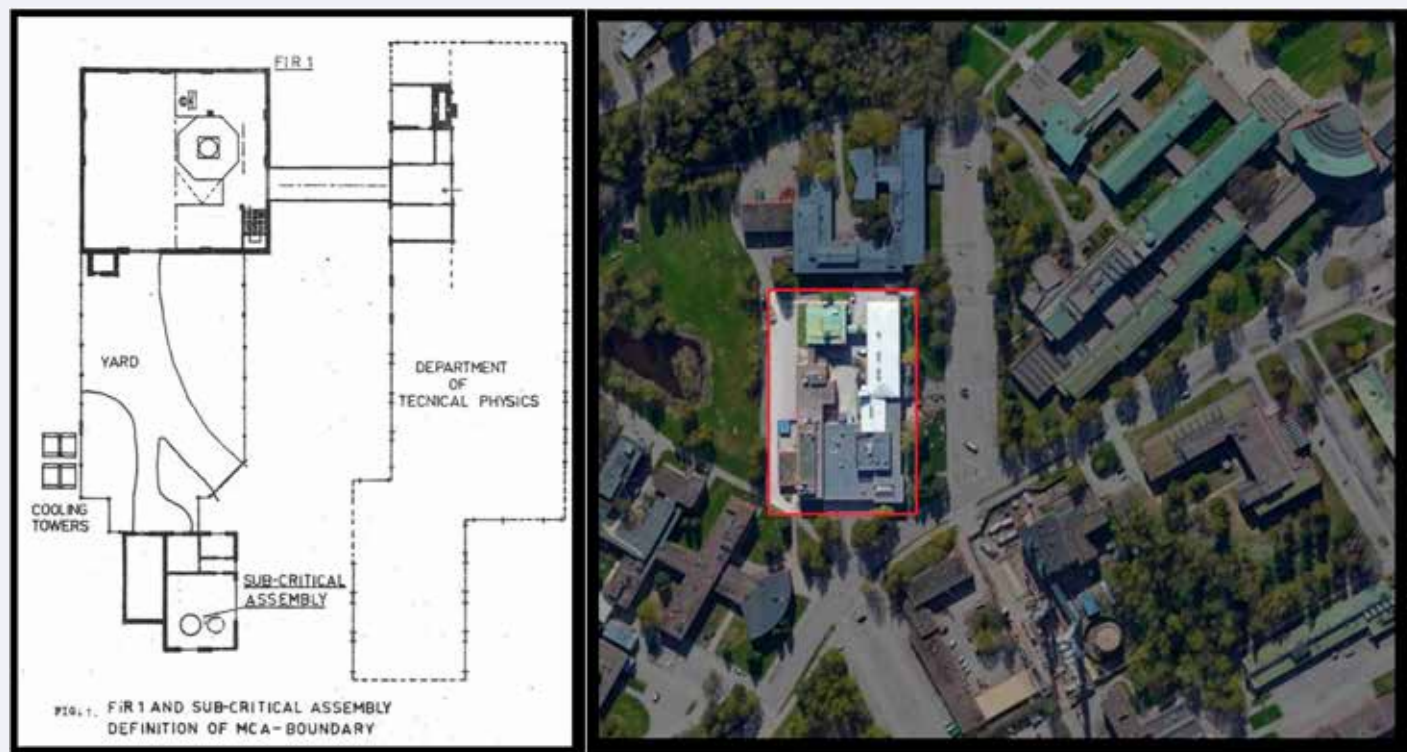
Eisenhowerin Atoms for Peace -puheen taustamotiivit eivät olleet täysin vilpittömät. Yhdysvalloissa ymmärrettiin, että ydinenergiasta kiin-

nostuneet maat saataisiin parhaiten pidettyä ulkona Neuvostoliiton vaikutuspiiristä sitouttamalla ne länsimaiseen teknologiaan. Avoimuuden lisääminen antaisi myös paremmat mahdollisuudet seurata kehitystä rautaesiripun toisella puolen. Suurvaltojen välistä asevarustelukierrettä ei saatu katkaistua, mutta ydinaseettomille maille teknologiayhteistyön avautuminen tarjosi paljon uusia mahdollisuuksia. Ydinteknologia alkoi levitä nopeasti myös sellaisiin maihin, jotka olivat aikaisemmin olleet kehityksestä sivussa.

Suomessa ensimmäiset konkreettiset selvitykset ydinenergian hyödyntämisestä aloitettiin 1950-luvun puolivälissä Teknillisen korkeakoulun professorin Erkki Laurilan johdolla. Yhteiskunta oli nopeasti teollistumassa, energian kulutus kasvoi jatkuvasti, ja Suomen suurten jokien kosket oli pian valjastettu vesivoiman tuotantoon. Uuden energiamuodon hyödyntäminen vaikutti luontevalta askeleelta tulevaisuuteen. TKK:lla alettiin valmistelemaan ydinenergiatekniikan opetusta, minkä lisäksi lainsäädäntöä ja viranomaistoimintaa päivitettiin ajan tasalle. Tukea saatiin myös teollisuuden suunnalta. Sellu- ja paperiteollisuusyri-tysten perustama Voimayhdistys Ydin alkoi jakaa stipendejä ydintekniikan opintoihin Yhdysvalloissa. Suomalaisia asiantuntijoita koulutettiin esimerkiksi Argonnessa ja Oak Ridgessä.



Kuva 2. Havainnekuva miilurakennuksen sisältä. Kuvasta on jätetty selvyuden vuoksi pois reaktoritankin yläpuolelle sijoitetut tukirakenteet, joita käytettiin polttoainesauvojen ripustukseen. Värimaailman ja pintamateriaalien osalta visualisoinnissa on käytetty mielikuvitusta. Miilurakennuksen sisältä on vain muutama mustavalkoinen valokuva.



Kuva 3. Miilun sijainti Aalto-yliopiston kampusalueella Otaniemessä. Vasemmanpuoleiseen kaaviokuvaan on piirretty FiR 1 -reaktorin ja alikriittisen miilun (sub-critical assembly) sijainti entisen Teknillisen fysiikan osaston vanhan siiven vieressä. Vihreäkattoinen reaktorirakennus erottuu selvästi myös oikeanpuolimmaisesta ilmakuvasta. Miilun paikalla on nykyisin rakennuksen laajennusosa.



Kuva 4. Havainnekuva miilun polttoaineesta. Vasemmalla vanhantyyppinen polttoainesauva, joka koostui alumiiniputken sisälle kapseloidusta tuuman paksuisista uraanitangoista. Oikealla uuden sydämen polttoaine-elementti, joka oli kasattu 25 ohuemmasta polttoainesauvasta.

### Kokeellinen tutkimus käynnistyy

Vuonna 1957 Voimayhdistys Ydin päätti lahjoittaa TKK:lle alikriittisen ydinreaktorin, jota kutsuttiin myös eksponiaalimiiluksi tai lyhyemmin vain miiluksi. Vastaavia koelaitteita käytettiin 1950-luvulla yleisesti reaktoritutkimuksen perustyökaluina. Alikriittisessä reaktorissa ketjureaktio ei toimi itseään ylläpitävässä tilassa, vaan reaktori tavallaan monistaa ulkoisen lähteen tuottamaa neutronisuihkua. Vaikka toimintaperiaate poikkesi energiantuotantoon käytetyistä reaktoreista, miilulla voitiin tarkastella monia vastaavia neutronien kulkeutumiseen liittyviä ilmiöitä. Laitteen nimi viittasi siihen, että alikriittisen reaktorin neutronitiheys laskee eksponentiaalisesti kuljettaessa kauemmas lähteestä. Jakauman muoto määräytyy neutronimonistuksen voimakkuuden mukaan.

Miilu valmistui pitkälti kotimaisella osaamisella, joskin sen ydintekniset komponentit jouduttiin tilaamaan ulkomailta. Polttoaine valmistettiin Iso-Britanniasta tilatuista tuuman paksuisista luonnonuraanitangoista, joita käytettiin myös kaasujäähdytteisissä MAGNOX-reaktoreissa. Uraani kapseloitiin 140 senttimetriä pitkien alumiiniputkien sisälle Ahlströmin konepajalla Varkaudessa. Puhdas uraani ei ole niin radioaktiivista, että sen käsittely edellyttäisi erityisiä säteilysuojelutoimenpiteitä.

Polttoainesauvojen valmistusta vaikeutti kuitenkin se, että uraani toimitettiin metallisessa olomuodossa. Metallinen uraani on pyroforinen aine, joka voi syttyä itsestään palamaan päästessään kosketuksiin ilman kanssa.

Reaktori muodostui 150 cm leveästä ja 170 cm korkeasta sylinterimäisestä vesitankista, jonka sisälle voitiin asettaa 112 polttoainesauvaa erilaisiin geometrioihin. Neutronilähde oli sijoitettu reaktoritankin alle, ja ympäröity grafiitilla. Miilun käyttöehdoissa neutronien monistusta mittaavan kasvutekijän maksimiarvoksi oli määritetty 0,97. Vesitankkiin upotetut polttoainesauvat olisivat tällöin vahvistaneet lähteen tuottaman neutronisuihkun noin 30-kertaiseksi. Käytännössä kasvutekijä ja monistuskerron jäivät vielä tässä vaiheessa paljon maksimiarvojen alapuolelle. Vanhoja valokuvia Miilun alkutaipaleelta on esitetty kuvassa 1, ja 3D-renderöity hahmotelma miilurakennuksen sisältä kuvassa 2.

Miilu kasattiin Otaniemen uudelle kampusalueelle Teknillisen fysiikan osastoa vastapäätä rakennettuun puuparakkiiin alkuvuonna 1958. Yliopisto toimi vielä pääosin Hietalahdentorin laidalla Helsingissä. Presidentti Kekkonen vihki miilun käyttöön saman vuoden toukokuussa. Otaniemeen on kampusalueen perustamisen jälkeen noussut niin paljon uusia rakennuksia, että miiluparakin sijainti ei vanhoja valokuvia tai alueen nykyistä karttaa silmäillessä ole aivan ilmeinen. Rakennus purettiin vuonna 1976 Teknillisen fysiikan osaston laajennusosan tieltä. Suunnilleen samoissa koordinaateissa sijaisi 2000-luvun alkuun saakka Fysikkokillan kiltahuone, sekä luentosali F1. Nykyisin paikalla oleva rakennus tunnetaan Terveysteknologian talona. Miilurakennuksen tarkka sijainti selviää kuvasta 3.

Miilua käytettiin 1950–1960-lukujen vaihteessa aktiivisesti ydintekniikan kursseilla opetus- ja havainnointivälineenä. Oppilastöiden aiheissa vilahtelee tuttuja, joskin jo hieman vanhahtavia termejä, kuten reaktorin kupevuuden, termisen käyttösuhteen sekä migraatioalan mittaukset. Reaktorilla tehtiin myös useita oppinäytetöitä. Osa töiden otsikoista voisi hyvinkin olla myös tältä vuosikymmeneltä. Esimerkiksi diplomi-insinööri Koskisen lisensiaatintyössä selvitettiin heterogeenisten reaktoreiden anisotrooppisia polttoainejakaumia. Vastaavia analyysejä tehdään nykyisin laskennallisen mallinnuksen keinoin.

### Uusi sydän

Miilu toimi alkuperäisellä sydämellä vuoteen 1964 saakka, jolloin Neuvostoliitosta saatiin uutta polttoainetta, jossa uraanin väkevöintiaste oli nostettu kymmeneen prosenttiin. Väkevöidyt "EK-10"-polttoainesauvat poikkesivat ulkomitoiltaan niin paljon vanhoista, että koko reaktorin perusrakenne päätettiin suunnitella uusiksi. Muodoltaan lyhyet ja ohuet polttoainesauvat liitettiin pareittain yhteen Ahlströmin Varkauden konepajalla. Vanhat luonnonuraanisauvat lähetettiin Ruotsiin ASEAlle. Vastineeksi saatiin sama määrä uraania uusia polttoainesauvoja vastaavissa mitoissa. Luonnonuraani- ja väkevöidyistä polttoainesauvoista koottiin 25 sauvan elementtejä, jotka muodostivat reaktorin uuden sydämen. Vanhan ja uuden polttoainetyypin eroja on havainnollistettu kuvassa 4.

Helposti fissioituvan <sup>235</sup>U-isotoopin pitoisuus on luonnonuraanissa niin matala, ettei ketjureaktio olisi edes teoriassa voinut käynnistyä vanhassa sydämessä. Uusi väkevöity polttoaine mahdollisti reaktorin kasvutekijän nostamisen lähemmäs kriittisyysrajaa. Tämä kasvatti reaktorin neutronimonistuskerronta, mutta toi mukanaan myös uusia haasteita. Reaktorilla tehdyt muutokset eivät siis olleet ainoastaan rakenteellisia, vaan myös toimintatapoja ja turvallisuusperiaatteita jouduttiin tarkentamaan.



Reaktorille hankittiin myös uusia instrumentteja, mukaan lukien voimakkaampi neutronilähde. Reaktoritankki vaihdettiin kooltaan pienempään astiaan, ja sen ympärille rakennettiin korotettu lava työskentelyä helpottamaan. Reaktoritankkiin asennettiin myös lämmitysvastukset, mikä mahdollisti esimerkiksi erilaisten reaktiivisuuskertoimien määrittämisen. Uudesta konfiguraatiosta ei ole säilynyt valokuvia, mutta reaktoritankin ympärille rakennetun lavan rakennepiirustukset on esitetty kuvassa 5.

Amerikkalaisvalmisteinen FiR 1 -reaktori valmistui viereiseen rakennukseen vuonna 1962. Uudistuksista huolimatta miilu kävi lopulta tutkimuslaitteena tarpeettomaksi. Käyttö loppui vuoteen 1973 mennessä, ja kolme vuotta myöhemmin puinen miiluparakkki sai tehdä tilaa Teknillisen fysiikan osaston uudelle siivelle.

### Myöhemmät vaiheet

Miilun mekaaniset osat lahjoitettiin käyttökelpoisia mittalaitteita ja ydinteknisiä komponentteja lukuun ottamatta Tekniikan museolle. Väkevöityä urania sisältävät polttoainesauvat siirrettiin reaktorilaboratorion holviin, ja luonnonuraanisauvat TKK:n laserlaboratoriossa olevaan kassakaappiin (samoissa tiloissa toimi myöhemmin VTT:n jodilaboratorio). Polttoaine ei reaktorin mitättömän pienen tehon vuoksi sisältänyt merkittäviä määriä korkea-aktiivisia fissiotuotteita. Uraaniin ja erityisesti väkevöityyn polttoaineeseen liittyi kuitenkin ydinmateriaalivalvonnasta seuraavia velvoitteita.

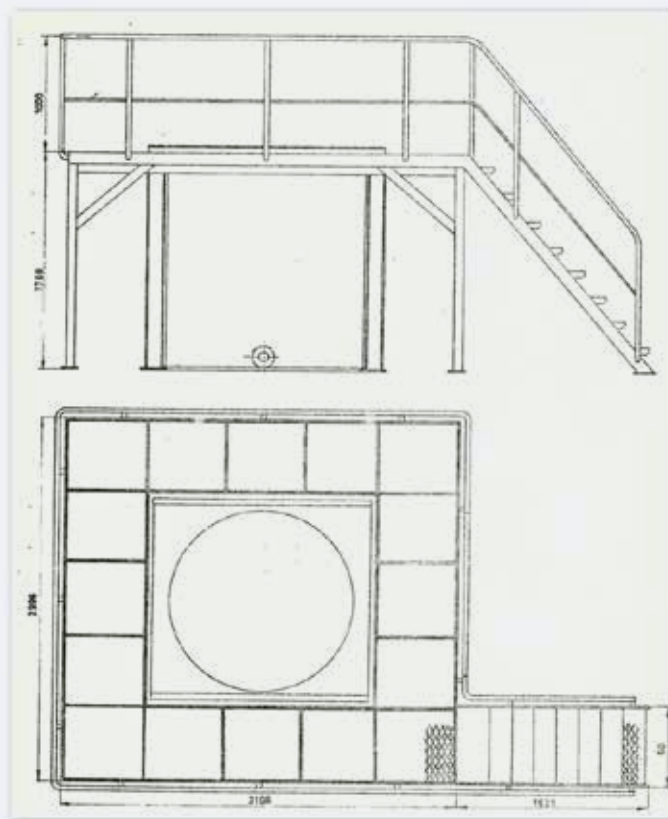
Uraanipolttoaineelle löytyi neljä vuosikymmentä myöhemmin lopulta uutta käyttöä. Vuonna 2018 miilun polttoainesauvat lahjoitettiin Prahan Teknilliselle yliopistolle, missä ne tullaan aikanaan lataamaan alikriittiseen VR-2-reaktoriin. Reaktori toimii miilun alkuperäisen käytötarkoituksen tapaan tutkimus- ja opetusvälineenä.

Miilusta jäi yli myös neljä tonnia grafiittia, joka ympäröi reaktorias-tian alapuolelle sijoitettua neutronilähdettä. Myöskään grafiittielementit eivät olleet aktivoituneet reaktorin käytön aikana, mutta uraanin tapaan myös reaktorilaatuinen erittäin puhdas grafiitti kuuluu ydinmateriaalivalvonnan piiriin. Materiaalin koostumuksesta ei hankintavaiheessa saatu tarkkaa tietoa, minkä vuoksi elementtejä säilytettiin monta vuosikymmentä lukitussa varastossa, joka sijaitsi Otaniemen yhteisväestönsuojan tiloissa Dipolin alapuolella.

Vuonna 2013 tehdyissä tarkemmissa selvityksissä grafiitin epäpuhtauspitoisuuksien todettiin ylittävän reippaasti reaktoriluokan grafiitille määrätyn valvottavuusrajan. Materiaali vapautettiin valvonnasta, ja väestönsuojan peruskorjauksen yhteydessä elementit siirrettiin lukittuun varastokonttiin Konalaan ja sieltä myöhemmin kierrätykseen. Vuonna 2015 osa grafiittielementeistä päätyi osaksi kuvanveistäjä Crystal Bennesin modernin taiteen installaatiota "One Hundred Thousand Cities of the Sun".

Alikriittinen miilu ja FiR 1 -reaktori olivat aikanaan tärkeitä tutkimuslaitteita, joilla koulutettiin ensimmäinen suomalainen ydinenergiateknikan asiantuntijasukupolvi. Tälle osaamiselle tuli käyttöä 1970-luvulla, kun Loviisaan ja Olkiluotoon alettiin rakentamaan ensimmäisiä kaupallisia ydinvoimalaitoksia. Erityisesti Neuvostoliitosta tilatun Loviisan laitoksen tarina pitää sisällään niin eriskummallisia juonenkäänteitä, että ilman vahvaa kotimaista osaamista lopputulos olisi voinut näyttää hyvinkin erilaiselta.

*Kirjoitus on alun perin julkaistu Fissioreaktori-blogissa syksyllä 2021 (<https://fissioreaktori.wordpress.com/2021/11/02/suomen-ensimmainen-ydinreaktori/>).*



Kuva 5. Uudemman miilukonfiguraation reaktoritankin ympärille rakennetun tukilavan piirustukset.

### Kirjoittaja



**Tkt Jaakko Leppänen**

Tutkimusprofessori  
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy  
Jaakko.Leppanen@vtt.fi

# Hanhikivi 1 Gigatop 4-Pole Generator Rotor

Krzysztof Dominiczak, Murat Agcay  
Fennovoima Oy

This article presents the generator design for Hanhikivi 1 focusing on the generator rotor and its manufacturing status, supplied by GE Steam Power as part of its equipment supply contract for the Turbine Island. At the beginning, the article presents the status of the project as well as Turbine Island main equipment and their relevance to power production availability and reliability. A special attention is paid to the generator shaft forging manufacturing done by Japan Steel Works Ltd., as contracted by GE Steam Power. The generator shaft forging manufacturing started in 2019 and was finished at the end of 2020.

Tämä artikkeli esittelee Hanhikivi 1:n generaattorin suunnittelua keskittyen erityisesti generaattorin roottorin ja sen valmistuksen tilanteeseen. Generaattorin roottorin toimittaa GE Steam Power osana turbiinisaarekkeen toimitussopimusta. Artikkelin alussa käydään läpi projektin nykytilanne, sekä turbiinisaarekkeen päälaitteet sekä näiden merkitys sähköntuotannon saatavuudelle sekä luotettavuudelle. Erityistä huomiota kiinnitetään generaattorin akselin takeen valmistamiseen, jonka suoritti The Japan Steel Works Ltd. GE Steam Powerin tilaamana. Generaattorin akselin takeen valmistus aloitettiin vuonna 2019 ja saatettiin päätökseen vuoden 2020 lopussa.

The Hanhikivi 1 nuclear power plant will be constructed at Hanhikivi peninsula by Finland's latest nuclear power company Fennovoima Oy and RAOS Project Oy, the Plant Supplier. Hanhikivi 1 project is one of the biggest investment projects in Finland. Fennovoima's goal is to obtain the construction license during 2022 and to begin the construction of the Hanhikivi 1 nuclear power plant in 2023. Commercial operation of the plant is scheduled to begin in 2029.

The construction license will be issued on the basis of a positive safety assessment by the Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK). Therefore, the focus of Fennovoima and the Plant Supplier has been on the design and safety-related documentation to demonstrate them to STUK. Although the safety comes first, an aspect of power generation reliability has not been forgotten. Further in this article the heart of power generation equipment, i.e., generator and its rotor, the most vital part of the generator, is described.

## Turbine Island of Hanhikivi 1

The Turbine Island includes key components, which convert thermal energy from pressurized steam into electrical energy. These main components are:

- The Arabelle steam turbine, which converts thermal energy entrapped in pressurized steam into mechanical energy of rotating turbogenerator shafts line.
- Gigatop 4-pole generator [1], which converts mechanical energy of rotating turbogenerator shaft into electrical energy by electromagnetic induction phenomenon.

- Condenser, which is a heat exchanger used to condensate steam from the last stages of steam turbine.
- Condensate-Feedwater System, which heats the condensate to a temperature close to saturation and then supplies the condensate to steam generator.
- Moisture Separator Reheater, which removes moisture and reheats steam from the high-pressure turbine part exhaust steam before admission to intermediate-pressure turbine part.
- Cooling System, which supplies the condenser with cold water and removes waste heat to be discharged by transfer to a water body.

The biggest building in the Turbine Island is the turbine building, which contains most of the main components of the thermodynamic cycle. Only the steam generator is located at the Nuclear Island side, in the reactor building. Figure 1 shows the longitudinal cross-section of the turbine building.

## Turbogenerator set

The top view on the main floor of the turbine building is shown in figure 2. The main floor is mainly occupied by the turbogenerator set. The overall length of the set is around 80 meters and it weighs almost 2500 metric tons. The set consists of a high-intermediate pressure turbine module, three low pressure turbine modules and a generator connected in the one-shaft line rotating at 1500 rpm.

The set is based on GE Steam Power's Arabelle technology (figure 3) for the steam turbine and GIGATOP 4-pole technology (figure 4)

for the generator. The set will be supplied by GE Steam Power, which is a well-known and experienced supplier. GE Steam Power's steam turbines are installed in 50% of the nuclear power plants around the world.

The electric power output is up to 1200 megawatts. The plant will produce altogether about 10 TWh per year. This is over twice the electricity consumption of Helsinki and will cover about 13% of electricity needs of Finland.

### The generator and its rotor

Based on the principle of the Faraday law of electromagnetic induction, the generator converts mechanical energy into electricity. Whenever a conductor is placed in a varying magnetic field, then electromagnetic field is induced which is equal to the rate of change of flux coupling.

The cross-section view is shown in figure 4 and the basic characteristics of Hanhikivi 1 generator are shown in Table 1. The generator consists of two main parts:

- Rotor, which is the rotating part of the generator. The rotor has a winding, to which the excitation unit feeds in direct current. The rotation generates a controlled electromagnetic field.
- Stator, which is the stationary part and surrounds the rotor. Electric current is induced in the stator winding by the changing electromagnetic field.

Generator rotor consists of a solid steel shaft. There are slots on the shaft, which run lengthwise along the outside of its cylindrical shape. Laminated copper bars are inserted into the slots and are kept stationary with metal wedges. These copper bars create the field winding of the rotor. The winding is isolated from the slots. Moreover, each winding turn is isolated from the next turn. The windings are held at the ends of the rotor by retaining rings.

There are many challenges relevant for the generator rotor design. Further in the article just a few of these are briefly highlighted. The first one is the cooling of the field winding. In case of the Hanhikivi 1 generator rotor, the radial flow direct conductor cooling of the rotor winding is used. Hydrogen enters rotor windings through full length slots in the copper conductors at the end of the rotor body. Then it passes from the conductors through

Table 1. The basic characteristic of Hanhikivi 1 generator.

Type	Gigatop 4-pole generator
Apparent power (MVA)	1411,1
Weight (t)	880
Total length (m)	18
Height (m)	8
Width (m)	6,7

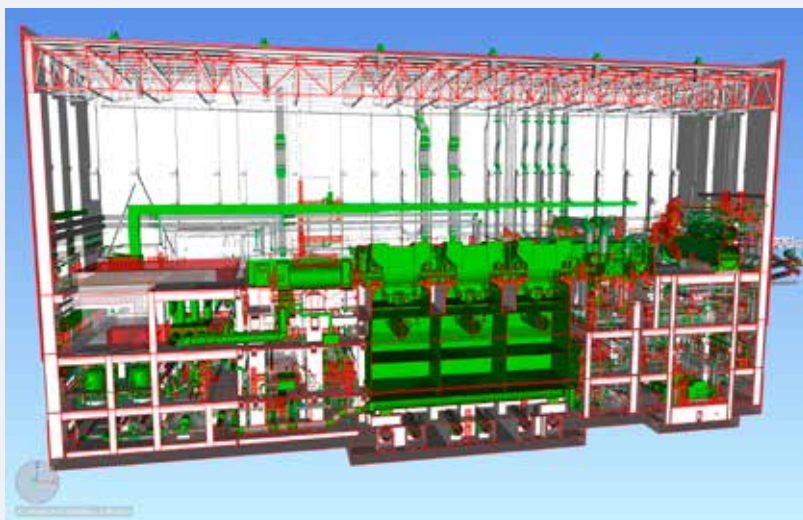


Figure 1. Hanhikivi 1 turbine building cross-section.

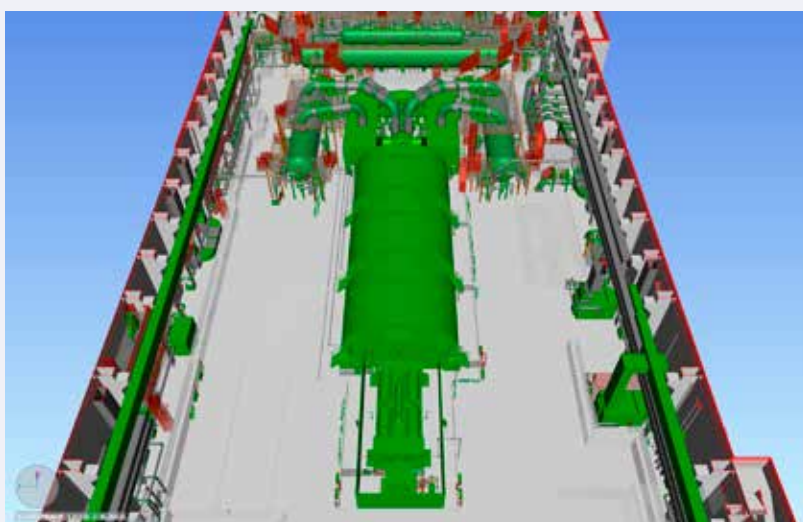


Figure 2. The top view on the main floor of the turbine building.



Figure 3. Arabelle steam turbine.

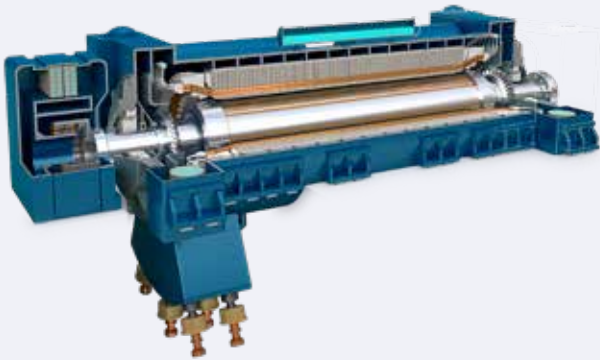


Figure 4. Generator cross-section [1].



Figure 5. Generator shaft forging lifting out from a barge.

the creepage blocks and wedges to so-called air gap, where it is directed through the stator core to the hydrogen coolers.

The next challenge worth mentioning is the generator rotor mechanical design, especially retaining rings. These rings, which support rotor end windings, act against centrifugal forces. They are the most highly stressed components of the generator, and therefore, important design requirements for retaining rings are high tolerance for high stress level, resistance to low cyclic fatigue and acceptable separating speeds.

All in all, the generator rotor plays a crucial role in energy transmission and conversion. This role makes generator rotor manufacturing crucial for safe and reliable generator operation.

### The generator shaft forging manufacturing

The main part of the generator rotor is the shaft, which is machined from a single steel forging. GE Steam Power contracted Japan Steel Works Ltd. (JSW), a key player on the global forgings market, for manufacturing this type of forgings. Generator shaft forging started in September 2019. Due to the Covid-19 pandemic situation, the manufacturing process was monitored by Fennovoima and the Plant Supplier in a "hybrid" mode, i.e., remotely and by the local inspectors witnessing the most relevant inspection steps like ultrasonic tests after quality heat treatment as well as magnetic particle examination of axial bore surface.

Generator shaft forging was completed in December 2020 and it was shipped from Japan to France. Figure 5 shows generator shaft forging lifting out from a barge. Next manufacturing steps will be machining, rotor winding and rotor balancing. These manufacturing processes together with factory acceptance tests (FAT) will be performed by GE Steam Power in their Belfort factory in France. An identical spare generator for Hanhikivi 1 will be manufactured in the later phase of the project.

---

### References

- [1] [www.ge.com/steam-power/products/generators/gigatop-4-pole](http://www.ge.com/steam-power/products/generators/gigatop-4-pole)

---

### Writers



**Dr. Krzysztof Dominiczak**  
Project Manager  
Fennovoima Oy  
[krzysztof.dominiczak@fennovoima.fi](mailto:krzysztof.dominiczak@fennovoima.fi)



**B.Sc. Murat Agcay**  
Generator & Auxiliaries Technical Manager  
Fennovoima Oy  
[murat.agcay@fennovoima.fi](mailto:murat.agcay@fennovoima.fi)

# Diplomityö: Palohazardianalyysi reaktorirakennukselle

Annmarie Oksa  
Fennovoima Oy

Diplomityössä tutkittiin Hanhikivi 1 -reaktorirakennuksen turvallisuutta palotilanteissa. Tutkimus piti sisällään kriittisten palojen tunnistuksen sekä rakenteellisen palohazardianalyysin, jossa tulipalojen vaikutuksia tutkittiin palosimulaatiolla. Lisäksi lopullinen vaikutus laitoksen turvallisuuteen arvioitiin toiminnallisessa analyysissä. Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan todeta nykyisen suunnittelun olevan riittävä ydinturvallisuuden kannalta tunnistetuissa palotilanteissa. Kuitenkin tutkimuksessa havaittiin myös parannuskohteita suojausmenetelmille.

The Master's Thesis examined the safety of the Hanhikivi 1 reactor building in fire situations. The study consisted of identification of the most critical fires as well as structural and functional fire hazard analyses. In the structural analysis, the damaged area was determined utilizing fire simulations. In the functional analysis, the consequences of the damage to nuclear safety were examined. Based on obtained results, it can be stated that the current design is sufficient to guarantee the safety of the plant in the identified fire situations. However, some improvement suggestions for the protection measures were also found.

Ydinvoimaloissa sattuneet onnettomuudet ympäri maailmaa ovat todistaneet kuinka haavoittuvaisia turvallisuusjärjestelmät ovat tulipaloille ja niiden seurannaisvaikutuksille. Tulipaloilla on potentiaalia vahingoittaa lukuisia järjestelmiä samanaikaisesti ja aiheuttaa merkittäviä turvallisuusuhkia laitoksella, minkä vuoksi ne on huomioitava suunnittelussa. Yleisin ja tehokkain suojausmenetelmä on jakaa rakennuksen tilat toisistaan hyvin eroteltuihin palo-osastoihin.

Tällaista osastointia ei kuitenkaan voida hyödyntää reaktorirakennuksessa, joka on yksi ydinvoimalaitoksen tärkeimmistä rakennuksista. Reaktorirakennuksessa on turvaututtava heikompisiin menetelmiin kuten osittain suojaaviin rakenteisiin, etäisyserotteluun sekä sammutusjärjestelmiin. Tästä syystä on erityisen tärkeää varmistua analyysin, että rakennuksessa hyödynnettävät menetelmät ovat riittäviä turvallisuuden takaamiseksi.

Diplomityössä arvioitiin Hanhikivi 1 -reaktorirakennuksen suunnittelun riittävyyttä palotilanteissa. Tutkimuksen tavoitteena oli varmentaa nykyisen fyysisen erottelun ja suojausten riittävyys palotilanteissa sekä ehdottaa mahdollisia parannuksia. Lisäksi työssä varmistettiin, että tarvittavat turvallisuustoiminnot ovat käytettävissä onnettomuuksien hallitsemiseksi sekä turvallisuuden varmistamiseksi palotilanteissa. Tutkimus koostui kriittisten tulipalojen tunnistamisesta sekä rakenteellisesta ja toiminnallisesta palohazardianalyysistä.

## Kriittisten palojen tunnistus laitosmallista

Tutkimus aloitettiin kriittisten tulipalokenaarioiden tunnistamisella, joka suoritettiin reaktorirakennuksen 3D-mallia ja järjestelmien kuvauksia

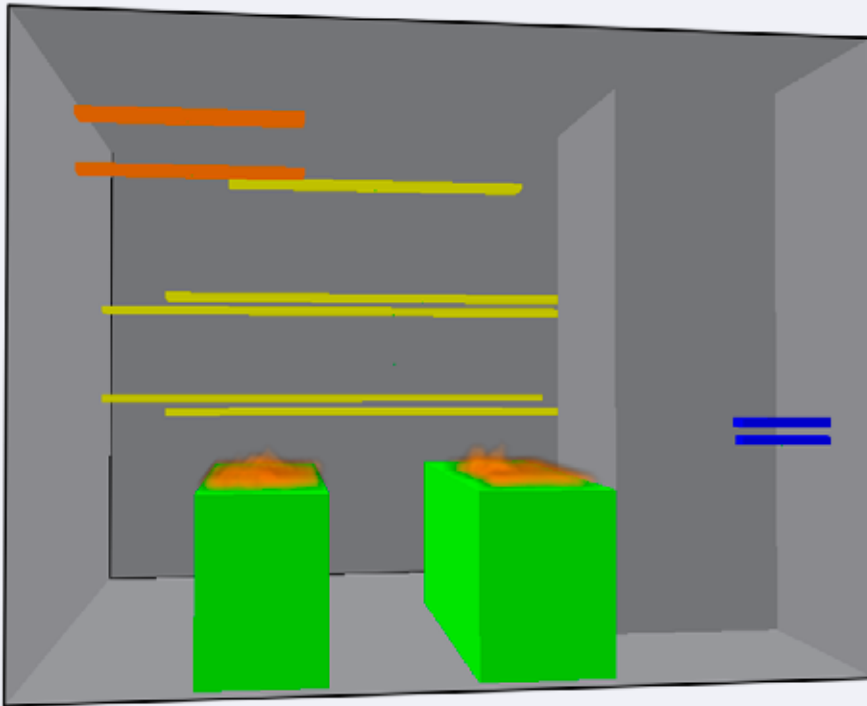
hyödyntäen. Keskeistä oli tunnistaa suuret palokuormat sekä alueet, joissa redundanttisten turvajärjestelmien fyysinen erottelu oli haastavaa. Tulipalokenaarioiden valintaan vaikutti myös saatavilla olevan suunnittelutiedon riittävyys.

Rakennuksen tarkastelun perusteella tutkimukseen valittiin suuren palokuormansa vuoksi ilmastointijärjestelmän aktiivihiihtäjäsuodattimien palo. Lisäksi rakennuksesta tunnistettiin kohtia, joissa redundanttisten järjestelmien kaapelivedot kulkevat lähekkäin, mikä voisi palotilanteessa tarkoittaa usean turvallisuusjärjestelmän menetystä. Suunnittelussa on tarkoitus tällaisissa tapauksissa turvautua kaapelikotelointiin, mikä tarkoittaisi nykyisellä sijoittelulla suuria määriä kotelointia.

Vaikka kaapelikotelointi suojaa tehokkaasti tulipalon vaikutuksilta, se aiheuttaa myös haittoja laitoksella. Kotelointi muun muassa vaikeuttaa kaapeleiden huoltotoimenpiteitä sekä voi aiheuttaa kaapeleiden ylikuumenemista. Tämän vuoksi diplomityössä haluttiin selvittää kaapelikoteloinnin välttämättömyyttä tutkimalla palon vaikutuksia kaapeleihin ilman erillistä suojausta.

## Palosimulaatiot

Kriittisten tulipalojen kartoituksen jälkeen valitut skenaariot analysoitiin rakenteellisessa paloanalyysissä. Rakenteellisen analyysin tavoitteena oli määrittää tulipalon aiheuttama vahinko. Tämä suoritettiin palosimulaatioilla, joissa analysoitiin tunnistetun kohteen palamisen aiheuttamia vaikutuksia lähellä sijaitseviin komponentteihin. Palosimulointi suoritettiin Fire Dynamic Simulator -ohjelmistolla (FDS), joka on tulipalojen mallintamiseen tarkoitettu laskennallinen virtausmekaniikkamalli.



Kuva 1. Suodatinpalon yksinkertaistettu mallinnusgeometria, joka sisältää kaksi suodatinyksikköä sekä kaapelivedot.

Ohjelmistossa mallintaja syöttää tarvittavat tiedot numeerisesta hilasta, ympäristön olosuhteista, tilan geometriasta, materiaalien ominaisuuksista sekä palamisen kinetiikasta ja mitattavista suureista.

Tutkimuksen malleissa käytettiin yksinkertaista palomallia hyödyntäen kirjallisuudesta saatavia maksimipalotehoja erilaisille materiaaleille. Malli rakennettiin konservatiivisesti niin, että se edustaisi palon pahinta mahdollista vaikutusta. Mitattavia suureita simuloinneissa olivat palon lähellä olevien komponenttien eli kohteiden saama maksimilämpövojo ja kohteiden pintalämpötila. Saatuja tuloksia verrattiin kohdemateriaalien taulukoituihin vaurioitumisraja-arvoihin. Mallinnuksessa ei huomioitu aktiivista palontorjuntaa, sillä ydinvoimalaitoksella passiivisten keinojen tulisi olla riittäviä yksinään varmistamaan turvallisuus palotilanteissa.

Suodatinpaloskenaariolle luotiin malli, jossa oletettiin kahden vie-rekkäisen aktiivihiihisuodattimen samanaikainen palo. Lisäksi malliin sisällytettiin lähellä olevat palavaa materiaalia sisältävät komponentit, jotka olivat tässä tapauksessa kaapeleita. Kuva 1 havainnollistaa kyseisen skenaarion mallinnuksessa käytettyä yksinkertaistettua geometriaa. Kuvassa vihreät laatikot edustavat suodattimia ja eriväriset suorakaiteet eri redundanssien kaapeleita, joiden pintalämpötilaa ja lämpövuota mitataan simulaatiossa. Palo tapahtuu suodattimien ulkopinnalla.

Mallinnuksen tuloksena selvisi, että palo ei vahingoita lähellä olevia kaapeleita eli etäisyys on riittävä estämään vaurioituminen sekä palon leviäminen. Kyseiselle paloskenaariolle suoritettiin myös kvalitatiivinen analyysi palon sekundääri-vaikutusten leviämisestä ilmastointijärjestelmässä palopellin vikaantuessa. Selvisi, että järjestelmä on yhteydessä höyrystintilaan, minkä vuoksi tutkimuksessa oletettiin myös kahden höyrystimen vikaantuminen, vaikka niiden vikaantumi-

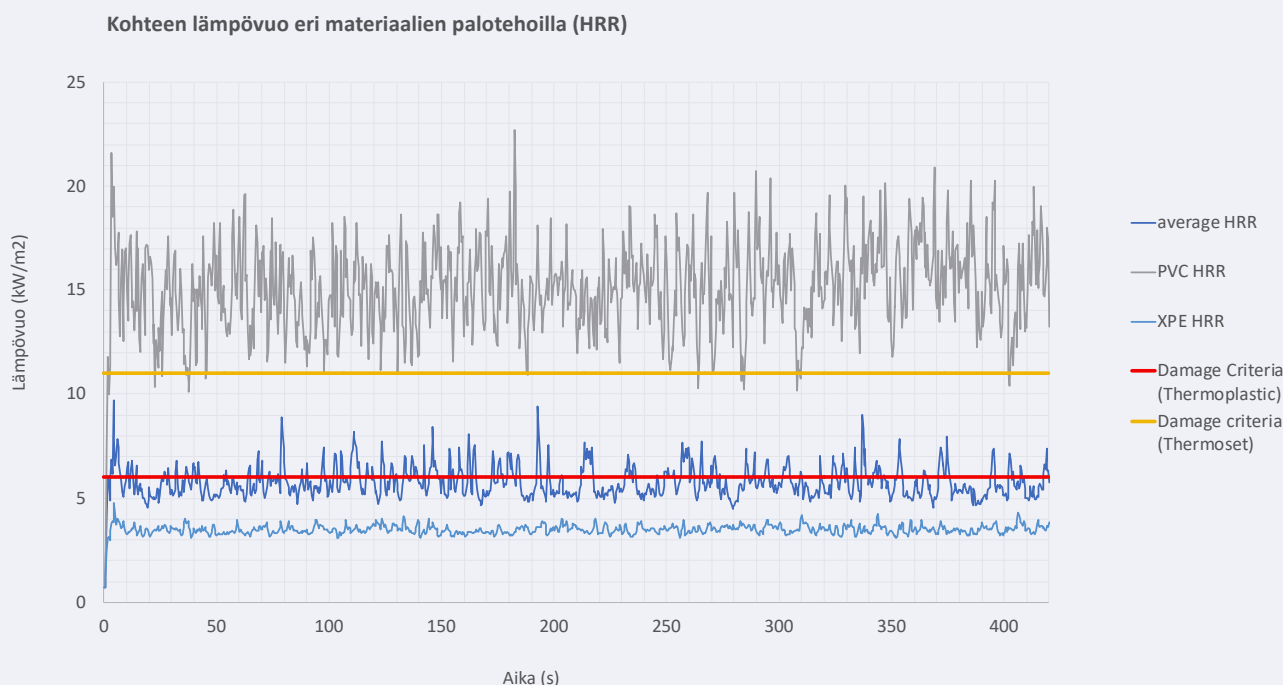
nen savun ja lämmön leviämisen vuoksi on erittäin epätodennäköistä todellisuudessa.

### Kaapelien vikaantumisen mallinnus

Toisena kohteena tutkimuksessa oli lähekkäin sijoitetut redundanttisten järjestelmien kaapelivedot. Tälle skenaariolle mallinnus suoritettiin ajamalla lukuisia eri simulaatioita erilaisilla lähtöarvoilla. Mallinnuksessa vaihdeltiin kaapeleiden materiaaliominaisuuksia, palotehoja, kaapelivetojen välisiä etäisyyksiä sekä kaapelien pituuksia. Mitattavia suureita olivat päällimmäisen kaapelivedon vastaanottama lämpövojo ja pintalämpötila, joiden perusteella voitiin päätellä kaapeleiden vikaantumisen. Mallinnuksessa ei huomioitu kaapelikotelointia.

Mallinnuksen tuloksena selvisi, että palon vaikutus yläpuolisiin kaapeleihin riippui pitkälti kaapelimateriaalin palotehosta. Suurilla palotehoilla, joita on esimerkiksi havaittu PVC-materiaalista (polyvinyylikloridi) valmistetuilla kaapeleilla, palon vaikutukset ovat suuremmat ja kohdekaapelit vaurioituvat palossa. Pienemmällä palotehoilla, joita on esimerkiksi havaittu XPE-materiaalin (ristisilloitettu polyeteeni) kaapeleilla, palo rajoittuu vain palon lähteenä olleeseen kaapeliin, jopa pienillä etäisyyksillä.

Kuvassa 2 näkyvä kuvaaja havainnollistaa kohteen eli ylemmän kaapelin saamaa lämpövuota eri palotehoilla 50 cm etäisyydellä palolähteestä. Kuvaajassa käytettyjä palotehon arvoja oli PVC- ja XPE-kaapeleiden paloteho sekä kirjallisuudesta saatu keskiarvo eri kaapelimateriaalien palotehosta. Lisäksi kuvaajassa näkyy yleisesti käytössä olevat kahden kaapelityypin vaurioitumista kuvaavat raja-arvot lämpövuolle. Kuvaajasta nähdään, että kaapeleiden paloteholla ja tätä kautta



Kuva 2. Kuvaaja palotehon vaikutuksesta kohdekaapelin lämpövuohon eri kaapelimateriaalien palotehoilla. Kuvaajassa myös kahden kaapelityypin vaurioitumisrajat.

materiaalivalinnalla on suuri merkitys palon vaikutuksiin. Mallinnuksen perusteella voitiin todeta, että ilmankin kaapelikotelointia voidaan rajoittaa palon aiheuttamia vaurioita ja leviämistä, mikäli hyödynnetään sopivaa kaapelimateriaalia.

*Opinnäytetyö on hyväksytty Aalto-yliopiston Insinöörیتieteiden korkeakoulussa 31.7.2021.*

#### Kirjoittaja

#### Tulipalojen vaikutus laitoksen turvallisuuteen

Rakenteellisen analyysin jälkeen suoritettiin toiminnallinen paloanalyysi, jonka tarkoituksena oli tunnistaa palon aiheuttamien vaurioiden vaikutukset ydinturvallisuuteen. Toiminnallisessa analyysissä arvioitiin kvalitatiivisesti, aiheutuuko tulipalosta alkutapahtuma laitoksella. Lisäksi määritettiin laitevikojen aiheuttamat mahdolliset turvallisuustoimintojen menetykset sekä mahdollisuus ajaa laitos turvallisesti alas tulipalosta riippumatta.

Toiminnallisessa analyysissä selvisi, ettei kumpikaan tutkituista paloskenaariosta aiheuta laitoksella alkutapahtumaa. Lisäksi redundanttisten järjestelmien vuoksi turvallisuustoimintoja ei menetetä palotilanteissa, vaikka oletettaisiin kaapelipalossa huonoin vaihtoehto eli molempien kaapelivetojen menetys. Tutkimuksessa todettiin, että laitos on mahdollista saattaa turvalliseen tilaan tulipalojen vaikutuksista huolimatta myös ilman kaapelikotelointia.

Kokonaisuudessa tutkimuksen tulokset osoittavat, että Hanhikivi 1 -reaktorirakennuksen nykyinen fyysinen erottelu ja hasardisuojaus ovat riittäviä varmistamaan laitoksen turvallisuus tunnistetuissa palotilanteissa. Tutkimuksessa havaittiin myös mahdollisia parannuksia nykyiseen suunnitteluun kaapeleiden osalta. Tutkimus osoittaa, ettei kaapelikoteloinnin käyttö ole välttämätöntä reaktorirakennuksessa ja sen pohjalta suositellaan tarkentavia tutkimuksia koteloinnin vähentämiseksi.



**DI Anmarie Oksa**  
Nuclear Safety Engineer  
Fennovoima Oy  
annmarie.oksa@fennovoima.fi

# Master's thesis: Verification and Validation of Passive Heat Removal Systems' Simulation Models

Topias Zein  
Fennovoima Oy

In this Master's thesis, a verification and validation process was carried out for two safety systems of the Hanhikivi-1 Apros model: the passive heat removal systems of steam generator and of containment. The study was done by completing various test runs with the model and comparing the results with commissioning test data from Leningrad-II nuclear power plant. The results showed that the model's output corresponds well to the results from the reference plant when using the Churchill and Chu mixed free and forced convection correlation in Apros.

Tässä diplomityössä suoritettiin verifiointi- ja validointiprosessi Hanhikivi-1 Apros-mallin kahdelle turvajärjestelmälle: höyrystimen sekä suojarakennuksen passiivisille lämmönpoistojärjestelmille. Tämä toteutettiin simuloimalla Aprosissa järjestelmien käyttöä ja vertaamalla tuloksia Leningrad-II voimalaitoksen käyttöönottokokeiden dataan. Tutkimus osoitti, että mallin tulokset vastaavat referenssilaitoksen tuloksia hyvin, kun Aprosissa on käytössä Churchill ja Chun vapaan ja pakotetun konvektion korrelaatio.

Deterministic safety analyses are performed in the nuclear industry to ensure that the plant in question can withstand certain postulated events. To study how the plant is affected by such transients or accidents, analyses are made using specialised software. In such computer simulation program, a model of the nuclear power plant is constructed to simulate the behaviour of the facility. At Fennovoima an Apros model of the Hanhikivi-1 plant has been in development since 2014. The model includes a 1D and a 3D neutronics core model, primary and secondary circuits, turbine, containment as well as all important safety systems and safety automation. Also, some main plant controllers are modelled.

This model is used at Fennovoima for its own deterministic safety analyses. The trustworthiness of the results of these analyses, however, depends on the accuracy of the model. As nuclear safety is the most important factor in the nuclear industry, it is essential to ensure that the model used for safety analyses is accurate and models the plant correctly. This process that quantifies the precision of a model is called verification and validation (V&V) of a simulation model.

## Objective

The objective of this thesis was to perform a verification and validation to two individual parts of the Hanhikivi-1 plant model, the passive heat removal systems (PHRS) of steam generator (SG) and of containment.

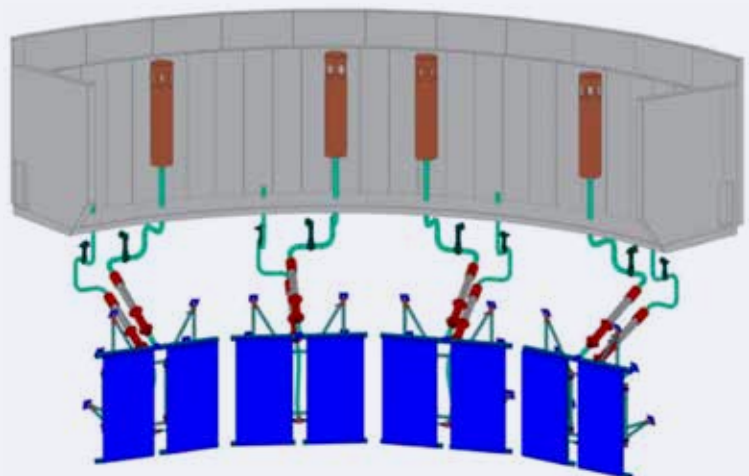


Figure 1: Containment passive heat removal system. The blue objects are the heat exchangers and they are connected to the PHRS tank (grey) with a riser and a down-comer.

These two new kinds of safety systems are employed in the upcoming Hanhikivi-1 VVER-1200 reactor.

The objective of the SG PHRS is to remove heat from the steam generator by circulating the steam in the secondary side of the SGs to



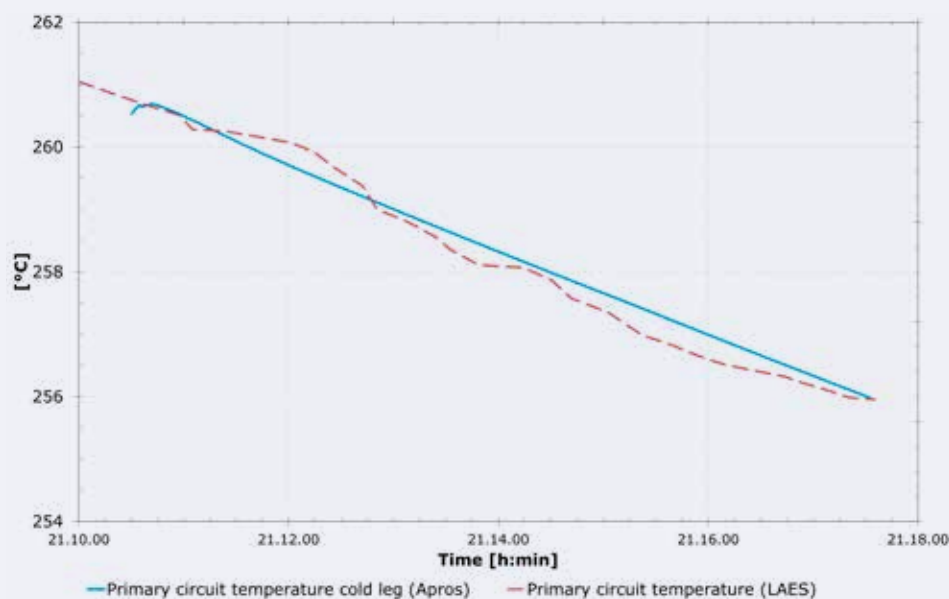


Figure 2: Primary circuit temperature during SG PHRS operation.

heat exchangers in the PHRS tanks, condensing it and returning it as water to the steam generator. The function of the containment PHRS in turn is to reduce and maintain the pressure inside the containment within design limits and to transfer heat to a heat sink, the PHRS water tank, which itself is cooled by the atmosphere (see Figure 1).

These two PHRSs were chosen because they are new safety systems unique to Generation III+ reactors and because commissioning test data is available for them from the Leningrad-II nuclear power plant. With this data, the V&V process is simpler and more trustworthy as this data can be compared with Apros model data to find out the precision of the plant model.

## Procedure

V&V is divided into two parts. Verification is the process of ensuring that the computer simulation model corresponds to the conceptual description and specifications of the system. In other words, it verifies that the model is built right. The validation process on the other hand ensures that the simulation model is an accurate representation of the real-world system for the intended application of the model. It ensures that the right model has been built.

The verification and validation process was carried out for both the steam generator and the containment passive heat removal systems. Verification was done by studying the model, modifying it to fix inaccuracies and performing preliminary calculations. Validation was done by performing sensitivity analyses and by comparing the results of the Apros model with data from the reference plant to quantify the accuracy of the model output.

## Results

Main takeaways from this V&V study were that the models for the steam generator and the containment passive heat removal systems built in Apros are sufficiently accurate and their output follows well the results from the reference plant with a small margin of error (see Figure 2).

However, to achieve this, firstly the two models needed to be updated based on newer design documentation. Secondly and more importantly, the heat convection correlation in Apros was changed from the default Dittus-Boelter to the Churchill and Chu mixed free and forced convection correlation. This latter depicts the heat transfer especially on the outer surfaces of the heat exchangers better and thus allows for more accurate results. Some differences in results existed but these could be mostly explained by the small variations in the plant state and by the quality of the data available. Therefore, the Apros models of the passive heat removal systems are deemed sufficiently accurate and simulate the systems well.

*The Master's thesis has been accepted in Aalto University School of Electrical Engineering in December 2021.*

## Writer



**M.Sc. (Tech.) Topias Zein**  
Nuclear Fuel Engineer  
Fennovoima Oy  
topias.zein@fennovoima.fi

# Diplomityö: Nodaalineutroniikkakoodi Antsin aikariippuvan mallin verifiointi

Unna Lauranto  
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Työn tarkoituksena oli suorittaa nodaalineutroniikkakoodi Antsin uuden aikariippuvan mallin verifiointi. Työssä laskettiin useita erilaisia transienttiskenaarioita, mukaan lukien säätösauvan uloslentotransientteja. Antsin antamat tulokset osoittautuivat hyvin yhteneväisiksi muiden nodaalikoodien tuloksiin.

The objective of this work was to perform verification of the time-dependent capabilities of the nodal neutronics solver Ants. In the verification process, multiple different transient scenarios were calculated, including rod ejection transients. The Ants results showed good agreement with other nodal solutions.

VTT:llä kehitetään parhaillaan uutta reaktori-mallinnuksen laskentajärjestelmää, Krakenia. Kraken koostuu erillisistä ratkaisijoista neutroniikalle, termohydrauliikalle ja polttoaineen mekaniikalle. Ants on Kraken-järjestelmän nodaalineutroniikkaratkaisija. Nodaalimenetelmiä käytetään usein rutiinilaskelmissa, joissa korkean tarkkuuden ratkaisijoiden laskenta-ajat voivat olla liian pitkiä. Nodaalimenetelmät perustuvat approksimaatioihin, jotka voivat lyhentää laskenta-aikoja merkittävästi tinkimättä liikaa laskentatulosten pätevydestä.

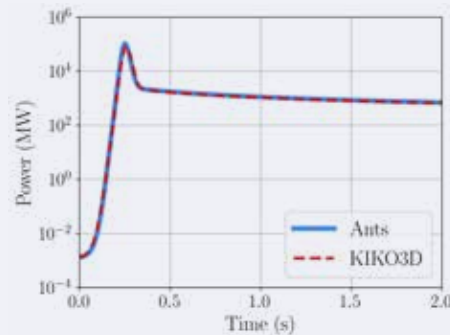
Ants käyttää ratkaisussaan yhdistelmää AFEN- ja FENM-menetelmistä, joissa käytetään analyttistä lähestymistapaa moniryhmäisen diffuusio-ongelman ratkaisemiseen. Antsin tasapainomallia on sovellettu menestyksekkäästi ajasta riippumattomissa ongelmissa. Uusin Antsiin toteutettu ominaisuus on transienttilaskentaominaisuus.

## Verifiointilaskut ja -tulokset

Tässä työssä Antsin aikariippuvan mallin verifiointi suoritettiin kuudella eri transienttitapauksella. Tapaukset vaihtelivat yksinkertaisesta yksiryhmäisestä pistekinetiikkaongelmasta realistisempiin koko sydämen laajuisiin sauvan uloslentoa koskeviin transientti-ongelmiin. Ongelmissa käytettiin erilaisia geometrioita hyvin yksinkertaistetuista malleista fyysisten reaktorien sydämiin.

Vertailuongelmat perustuivat pitkälti pelkän neutroniikkaongelman ratkaisemiseen, joskin osassa ongelmista huomioitiin myös reaktiivisuuden takaisinkytkentävaikutus. Doppler-takaisinkytkentä toteutettiin väliprosessoinnissa polttoaineen lämpötilan ja kaappausvaikutusalan välisenä yksinkertaisena riippuvuutena.

Työssä laskettiin muun muassa säätösauvan uloslentoa kuvaava AER DYN-002 -vertailuongelma, jossa käytetään VVER-440-reaktorisydämen geometriaa. AER DYN-002 -ongelmassa säätösauvan uloslennosta johutuva tehon nousu vaimenee Doppler-takaisinkytkennän vaikutukses-



Kuva 1. Antsin ja referenssikoodi KIKO3D:n laskemat tehot ajan funktiona säätösauvan uloslentotransientissa AER DYN-002.

ta. Antsilla laskettu teho transientin aikana ja KIKO3D-koodilla lasketut vastaavat vertailuarvot on esitetty kuvassa 1. Antsin ja vertailukoodin laskemat tehot ovat hyvin samankaltaisia.

Antsin transienttitulokset olivat hyvin yhteneviä muiden kirjallisuudessa esiintyvien nodaalikoodien tulosten kanssa. Eroja muiden nodaalikoodien tuloksiin oli havaittavissa etenkin vaikeissa transientti-ongelmissa, joskin suhteelliset erot pysyivät samoissa kokoluokissa kuin vertailukoodien väliset erot. Antsin moderni metodiikka eroaa huomattavasti vanhojen koodien menetelmistä, mikä voi aiheuttaa tuloksissa eroavaisuuksia. Kaiken kaikkiaan tulokset osoittivat Antsin transienttimallin oikeanlaisen menetelmän ja onnistuneen toteutuksen.

Diplomityö on hyväksytty Aalto-yliopiston Perustieteiden korkeakoulussa 10.2.2022.

## Kirjoittaja



DI Unna Lauranto

Tutkija  
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy  
unna.lauranto@vtt.fi

# Dissertation: Sorption and Diffusion of Se(IV) Species in Crystalline Rock: Experimental Studies and Modelling Development

Xiaodong Li

University of Helsinki, Radiochemistry Unit

Se-79 is one of the key nuclides in high level spent nuclear fuel. How to predict its environmental behaviour in biosphere and avoid human contacts is vital in the safety assessment of nuclear waste repository. This dissertation advanced understandings of Se behaviour concerning the sorption and diffusion aspects in bedrock. The dissertation includes both advances in experimental approaches and model development.

Se-79 on yksi tärkeimmistä radionuklideista korkea-aktiivisessa käytetyssä ydinpolttoaineessa. Se-79:n käyttäytymisen ennustaminen biosfäärissä ja ihmiskontaktien välttäminen on erittäin tärkeä osa ydinjätteen loppusijoitustilan turvallisuusarviota. Tämä väitöskirjatyö kehitti ymmärrystä seleenin käyttäytymiseen liittyen sen sorptio- ja diffuusiotekijöihin peruskalliossa. Väitöskirjatyö pitää sisällään sekä kokeellisten lähestymistapojen että mallinnuksen kehittämistä.

Just as burning coal will leave ash behind, and burning natural gas will produce carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), there is also a price to use nuclear materials. Nuclear waste is produced after uranium fuel is "burned" in a nuclear power plant. Currently, more than 450 nuclear power plants are operating worldwide, and they provide around 11% of the electricity produced. A large amount of "nuclear ash", called spent nuclear fuel, has been produced. According to the reports published by the International Atomic Energy Agency (IAEA), the disposal volume of the solid high-level spent nuclear fuel inventory is approximately 22,000 m<sup>3</sup> [1]. This is a volume roughly equivalent to a three-metre-tall building covering an area the size of a soccer pitch.

The spent nuclear fuel (SNF) will remain radioactive for a long time-scale (millions of years). This has led to the idea of storing them in a deep underground repository in stable geological formations. The idea has been widely accepted in Finland and Sweden, and Finland is the leading country in the world in this topic. The KBS-3 concept is used for long-term geological disposal of spent nuclear fuels. The concept is a technology that includes several engineering and natural barriers. The barriers are designed to isolate harmful radionuclides from reaching humans and the environment for 100,000 years.

This is often termed as "multi-barrier" concept. The first barrier, copper canisters, are designed to withstand corrosion and the mechanical forces that can result from movements in the rock surrounding the Spent Fuel Repository. The copper canisters will be surrounded by bentonite clay, which is the second barrier. The bentonite clay will act

as a buffer and protect the canisters from corrosion and minor movements. The final barrier is the surrounded bedrock in-depth (about 500 m) which provides a stable chemical and physical environment. If any radioactive substances were to escape from a canister and penetrate through the bentonite clay buffer, they would be transported in the water flowing fractures and be retarded by chemical sorption and diffusion in the minerals and pores of the bedrock.

From here comes the main role of my dissertation – selenium-79 (Se-79). It is a radionuclide that could migrate through the fractures if it could escape through the copper canister and bentonite buffer. Se-79 also has a long half-life which means that it will remain in the system for hundreds of thousands of years. Thus, Se-79 is evaluated as High-priority (II) according to the expectations that it may give a significant contribution to the doses in some biosphere scenarios in the SNF deposition [2].

Once escaped into the biosphere, Se-79 will not only be harmful by its radioactivity perspective but also by its chemical properties. The healthy range of Se intakes that result in toxicity and deficiency is relatively narrow. Because of this, the Se intakes, concerning both excess and deficiency, have become a critical problem worldwide in recent years. Therefore, to prevent damage of Se to future generations, we need to better understand the processes and mechanisms that control the behaviour of Se in the bedrock of a nuclear waste repository. The knowledge can be used for the safety assessment of a nuclear waste repository and predictions of potential Se problems in the environment.

### From constant $K_d$ to smart $K_d$

When migrating in the water flowing fractures of a bedrock, Se will experience two processes that can retard its migration: the sorption onto the surfaces of the rock minerals and the diffusion into the connected pore network of the rock matrix.

To evaluate the retardation of Se by sorption processes, the sorption distribution coefficient ( $K_d$ ) found from sorption databases is commonly used. However, these  $K_d$  values are usually determined under specific experimental conditions and they are constant values regardless of temporally and spatially changing environmental conditions. The advantage of utilizing constant  $K_d$  values is that it is straightforward and fast for calculations. However, this method cannot take into account the spatial and temporal changes of geological conditions. During the disposal of nuclear waste (hundreds of thousands of years), due to climate changes and mineralogy changes, the geochemical conditions (such as pH, ion concentrations, temperatures etc.) of the bedrock will also change.

In this dissertation, I tried to develop an innovative and more realistic approach, called smart  $K_d$ -concept, to evaluate the sorption behaviour of Se on mineral surfaces. The smart  $K_d$ -concept was first proposed in 2012. The former researchers mainly used surface complexation modelling and calculated multi-dimensional smart  $K_d$ -matrices to describe temporally and spatially variable  $K_d$  values. Their approaches are mainly based on the measured/calculated  $K_d$  values from others' work or databases. Thus, their method may lack sufficient experimental support and cannot be used for specific scenarios.

My method is based on the  $K_d$  measurements under various experimental conditions, such as titration, sorption edge and sorption isotherm experiments. The titration results provide information on site densities and the protonation and deprotonation properties of different sorption sites on bedrock surfaces. The sorption edge results give information of  $K_d$  values as a function of different pH conditions (from pH 3 to pH 11) while the sorption isotherm results determine the  $K_d$  values as a function of various tracer concentrations (from  $10^{-10}$  mol/L to  $10^{-3}$  mol/L). These experimental conditions can cover most, if not all, groundwater conditions one might meet during the long-term disposal of nuclear waste.

Then, a multi-site surface complexation model was developed based on these experimental data. The model was performed by fitting titration, sorption edge and sorption isotherm data iteratively. The iteration of the modelling process continued until a group of parameters that can describe all the experimental results successfully was found. Thus, all the experimental results can be described reasonably by the model. It is believed that the group of parameters deduced from the model have great constraints for errors and can reasonably reflect the real Se sorption properties on mineral surfaces.

To be more accurate and nearer to reality, together with my colleague Eini Puhakka, Density Functional Theory (DFT) molecular modelling was used to provide a clear sorption mechanism of Se [3]. This also provided basic sorption parameters used in the multi-site surface complexation modelling development. A molecular-level illustration of these two kinds of sorption sites is shown in Figure 1.

Compared with the smart  $K_d$ -concept developed by former researchers, the advantage of my approach is that it cannot only provide  $K_d$  values under various geochemical conditions (pH, sorbate concentrations etc.), but it also provides hypothesis or sorption mechanisms of the distributions of sorption sites, sorption reactions and sorbed species forms as a consequence of changing physicochemical conditions.

Figure 2 shows the distribution of sorption sites on biotite surface (SOH, SO<sup>-</sup>, SOH<sub>2</sub><sup>+</sup>) as a function of pH conditions. The reactions between different Se species and sorption sites were also assumed in the model. These reactions give us a hint of the sorption mechanisms which can be further proved by advanced spectroscopic techniques such as extended X-ray absorption fine structure (EXAFS) and X-ray absorption near edge structure (XANES).

### Coupling of geochemical model with computer language

For the development of multi-site surface complexation model, I developed a modelling tool that coupled PHREEQC with the computer language Python. PHREEQC is a popular and powerful geochemical modelling tool that is designed to perform a wide variety of aqueous geochemical calculations. Python is a high-level and the most popu-

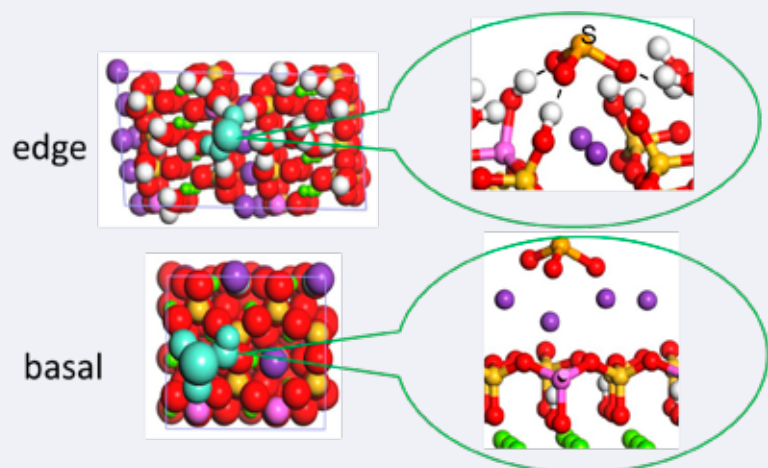


Figure 1. The molecular illustration of the sorption sites on the edge and basal surfaces of biotite (abundant mineral in Finnish bedrock) and the interpretation of the reactions that happened between biotite sorption sites and Se molecules.

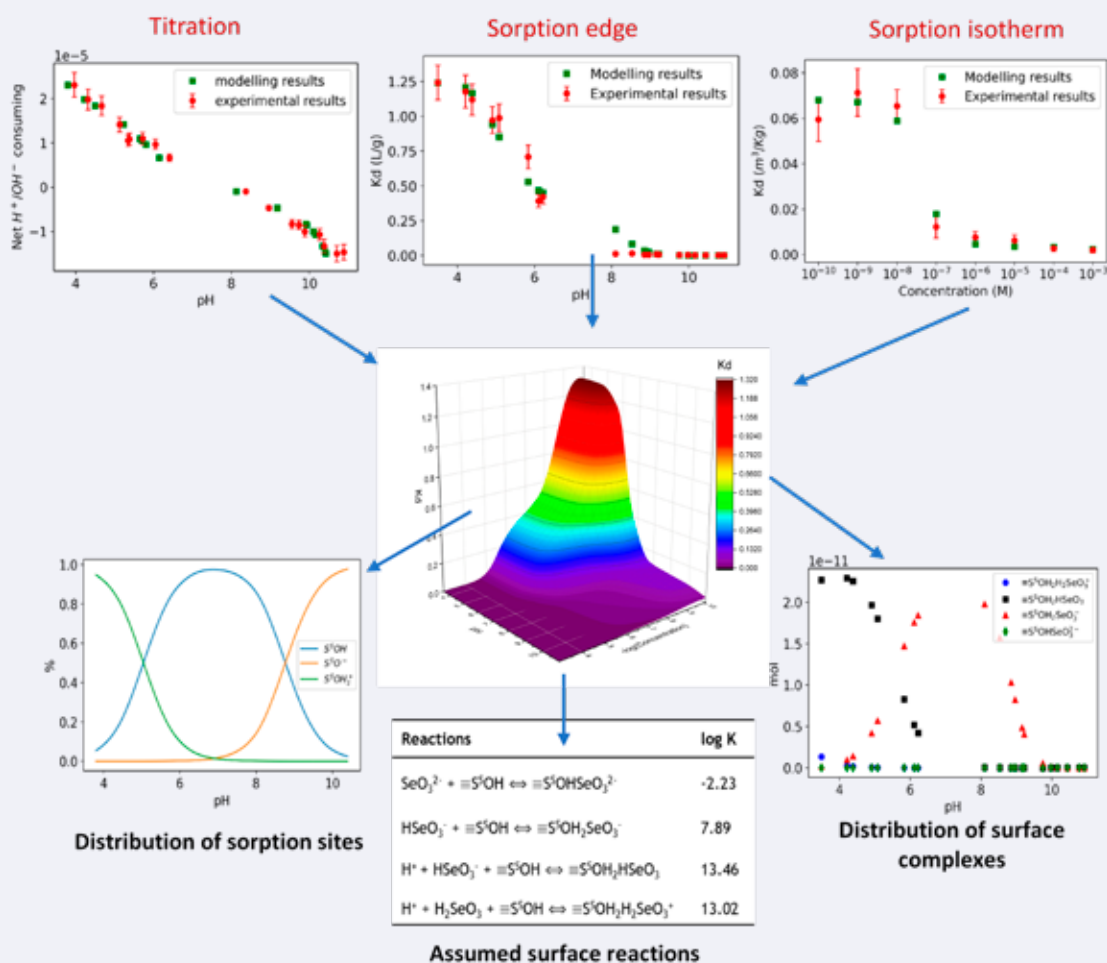


Figure 2. The development of the smart  $K_d$ -concept. A 3D figure that can predict the  $K_d$  values under changing environmental conditions was developed based on experimental data obtained from titration, sorption edge and sorption isotherm experiments. The smart  $K_d$ -concept includes assumed sorption mechanisms such as the distribution of surface sorption sites, surface reactions and distribution of surface complexes.

lar programming language. It has an extensive ecosystem of scientific libraries and environments, and it has great performance due to close integration with time-tested and highly optimized codes written in C and Fortran. All these features make Python a suitable language for scientific computing.

Because of the limitation of the PHREEQC tool, it is not suitable for flexible modelling such as fitting and optimizing results. The ability to visualise and present modelling results with PHREEQC is also limited. By coupling PHREEQC and Python, the functions of both tools are extended significantly. In the coupled modelling tool, PHREEQC acts as a reaction engine to calculate geochemical reactions. Python acts as a controlling tool of the fitting/iteration flow and acts as the optimization and visualization of modelling results.

### Electromigration technique development for faster diffusion experiments

Typically, the porosity of the bedrock is in the order of  $10^{-3}$  while the apertures of its micropores are in the order of  $10^{-6}$  m. As a result, the permeability of the rock matrix is very small and the pore water in the

rock matrix can be considered stagnant. Due to the low porosity and tortuous pores, the traditional diffusion experiments are very time-consuming in water phase.

To accelerate the transport of charged ions, the electromigration technique is getting more and more attentions in recent year. In the electromigration device, a small electric field is applied over the rock sample, which is placed between two chambers, one holding an electrolyte with a high concentration tracer (the source chamber) and one holding the same electrolyte initially free of the tracer (the recipient chamber). Recently, a Swedish team tested the migration behaviours of I<sup>-</sup> and Cs<sup>+</sup> ions with this device [4,5]. The results showed that the electromigration method is 1000 times faster (depending on the electric field applied) than traditional diffusion experiments. The experimental time can be reduced from several months/years to several days.

To evaluate the retardation of Se by diffusion processes, I chose to use the electromigration technique in my studies. However, as a new technique, to provide convincing experimental data, first I needed to further develop this technique and make a justification of the reliability of the experimental results.

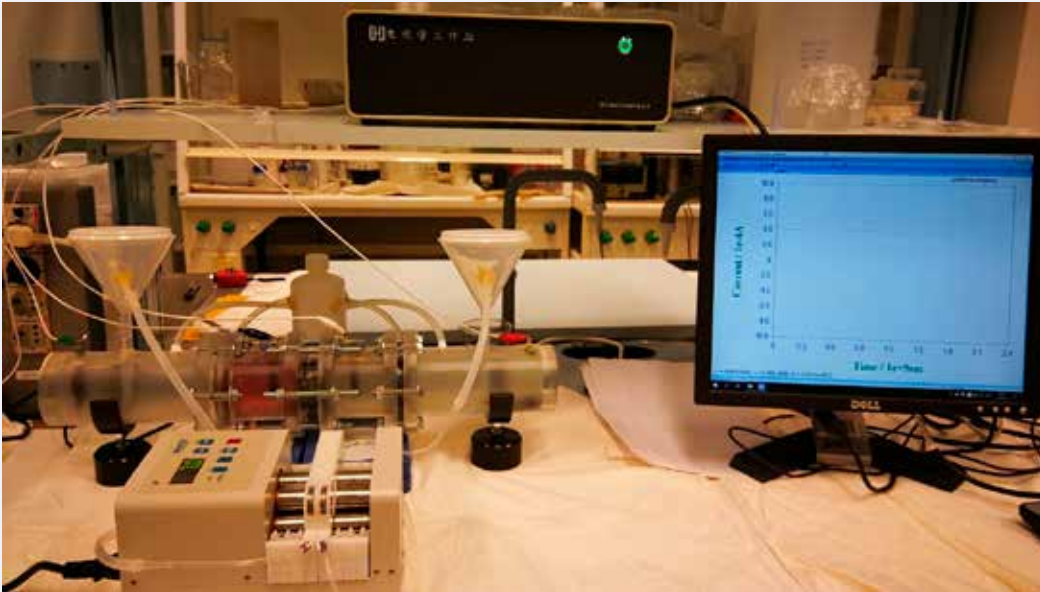


Figure 3. The modified electromigration device includes a potentiostat to keep a constant potential gradient across the rock sample.

I modified the electromigration device based on the former device designed by Löfgren and André [4,5]. The device (shown in Figure 3) was modified by introducing a potentiostat and adding pH buffers into the background electrolyte. The application of a potentiostat, by utilizing its four-electrode function, not only helps to keep a constant potential gradient over the test rock samples but also provides the information of flowing current through the rock sample automatically and continuously. In addition, I added  $\text{NaHCO}_3$  buffer into the background electrolytes to stabilize the pH of the solution.

As a result, the electromigration device designed in my work has the capabilities of voltage-self-controlling, continuous-current-recording and solution-pH-stabilization. Thus, the stability of the new electromigration device was improved significantly and it can provide reproducible and convincing experimental results. I studied the Se diffusion behaviour with the modified device. The breakthrough curve of Se could be obtained within 30 hours. To make a comparison, my former colleague performed Se diffusion studies with the traditional through diffusion method and he got the breakthrough curve at around 200 days [6].

To interpret the electromigration experimental results, I noticed that better modelling methods should be developed. Former researchers used the ideal plug-flow model for the interpretation of the results. However, this model accounts only for the effect of electromigration on ionic transport, whereas the contributions of electroosmosis and dispersion are entirely omitted.

To tackle this problem, I developed an advection-dispersion model together with my colleagues in KTH. The model accounts for more factors that can affect the ionic transport, including the influences of electromigration, electroosmosis and dispersion. It also avoids the use of the unrealistic assumptions associated with the ideal plug-flow model. Thus, the advection-dispersion model developed in my work can give more reliable results with small uncertainties.

One example showing the difference between the two models is given in Figure 4. The ideal plug-flow model simply makes a linear regression of the data at which a steady state seems to be achieved after the breakthrough time. This method gives a quick but rough estimate of the parameters with large uncertainties. The advection-dispersion model analyses the whole breakthrough curve instead, and more factors that could affect the results can be taken into account by fitting the breakthrough curve with a non-linear least squares algorithm. As indicated in Figure 4, the errors evaluated by the advection-dispersion model is at least 5 times smaller than the errors evaluated by the ideal plug-flow model.

In conclusion, my dissertation covers both the Se sorption and diffusion aspects which are the two most important mechanisms that can retard the migration of radionuclides from a nuclear waste repository to the biosphere. Due to the observed low sorption of Se in the studied conditions, Se will be retarded mainly by diffusion in granitic rock. Advances have been made by this thesis in both the sorption and diffusion aspects.

*The doctoral dissertation "Sorption and Diffusion of Se(IV) Species in Crystalline Rock: Experimental Studies and Modelling Development" by the author was successfully defended on the 15th of October 2021 at the University of Helsinki. The Faculty of Sciences approved the dissertation on the 29th of December 2021.*

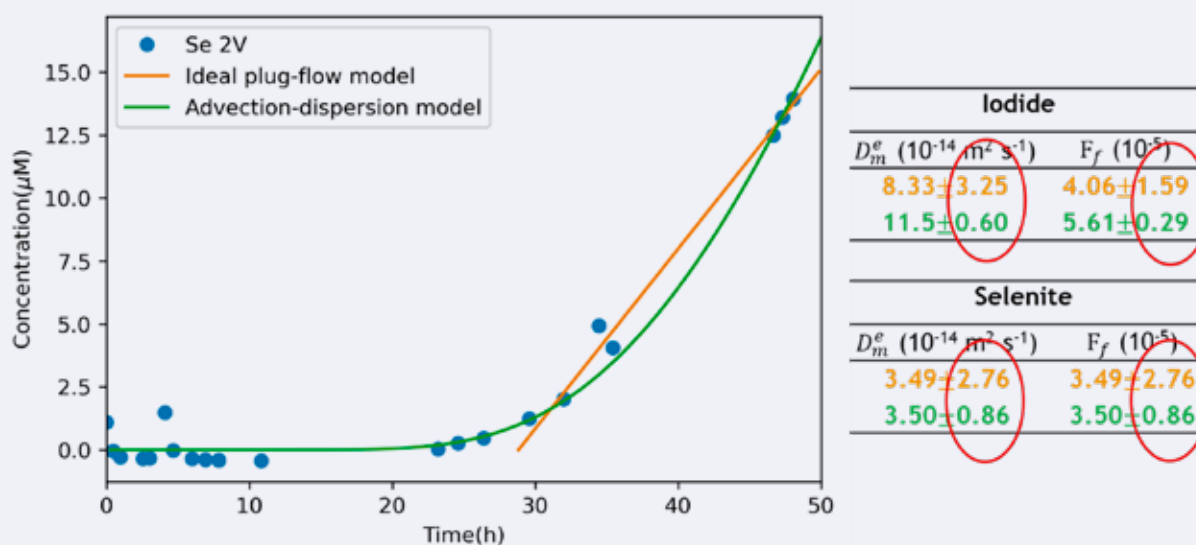
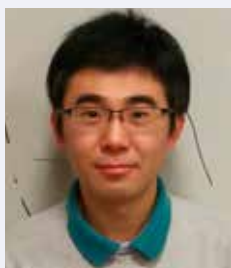


Figure 4. Comparison of the parameter acquisition from ideal plug-flow model and the advection-dispersion model. The table on right compares the errors of these two models.

## References

- [1] IAEA. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management; IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14, 2018.
- [2] Posiva Oy. Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto. Models and data for the repository system 2012. Parts 1 and 2; POSIVA Report 2013-1, 2013.
- [3] Puhakka, E.; Li, X.; Ikonen, J.; Siitari-Kauppi, M. Sorption of selenium species onto phlogopite and calcite surfaces: DFT studies. *Journal of contaminant hydrology* 2019, 227, 103553, doi:10.1016/j.jconhyd.2019.103553.
- [4] André, M.; Malmström, M.E.; Neretnieks, I. Determination of sorption properties of intact rock samples: New methods based on electromigration. *Journal of contaminant hydrology* 2009, 103, 71-81, doi:10.1016/j.jconhyd.2008.09.006.
- [5] Löfgren, M.; Neretnieks, I. Through-electromigration: A new method of investigating pore connectivity and obtaining formation factors. *Journal of contaminant hydrology* 2006, 87, 237-252, doi:10.1016/j.jconhyd.2006.05.006.
- [6] Ikonen, J.; Voutilainen, M.; Söderlund, M.; Jokelainen, L.; Siitari-Kauppi, M.; Martin, A. Sorption and diffusion of selenium oxyanions in granitic rock. *Journal of contaminant hydrology* 2016, 192, 203-211, doi:10.1016/j.jconhyd.2016.08.003.

## Writer



**Dr. Xiaodong Li**

Postdoctoral researcher

University of Helsinki, Department of Chemistry, Radiochemistry

xiaodong.li@helsinki.fi

**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**