



ATS

YDINTEKNIikka

SISÄLTÖ

YDINVOIMALAITOSTEN KÄYTTÖIKÄ

Kohti optimaalista käyttöikää	1
Ydinvoimalaitosten teknisen käyttöiän pidentäminen	2
Mekaaniset laitteet ydinvoimalaitosten elinikä tarkastelussa	3
Ydinvoimalaitosten vanhenemiseen liittyvä tutkimus VTT:ssä	5
Putkistojen vanheneminen ja elinikä	5
Reaktoripaineastiatähtäksen säteilyvanheneminen	7
VTT:n ydinenergiatutkimus lisääntynyt	9
Muuttaako VTT ydinenergiakurssiaan?	11
— Tshernobyl, Suomi ja ydinenergian tulevaisuus	11
— Ydinenergian tulevaisuus	13
Visit to the Chernobyl Power Plant	14
Mielipideilmasto Tshernobylin jälkeen	16
Tshernobylin kuumien hiukkasten aiheuttamat terveyshaitat	17
Tshernobylin onnettomuutta on tutkittu paljon	18
CNS:n Suomen vierailu	20
HDR-reaktoriturvallisuusohjelma	22
Energia-alan kotimaisesta yhteistyöstä	26
Ytimekkäät	28
Vuosihuollot 1987	29
Kevytvesilaitosten kumulatiiviset käyttökertoimet	30
Lyhyesti maailmalta	31

ATS

YDINTEKNIikka

3/87, vol. 16

JULKAISIJA

Suomen Atomiteknillinen Seura —
Atomtekniska Sällskapet i Finland r.y.

TOIMITUS

Päätoimittaja FT Mikko Kara P. 90-790500	Imatran Voima Oy Viikintie 3, PL 138 00101 Helsinki
Erikoistoimittaja DI Klaus Sjöblom P. 915-550431	Imatran Voima Oy 07900 Loviisa
Erikoistoimittaja DI Ahti Toivola P. 938-3811	Teollisuuden Voima Oy 27160 Olkiluoto
Toimitussihteeri DI Pertti Salminen P. 90-456 4148	VTT/E-osaston kanslia Vuorimiehentie 5 02150 Espoo

JOHTOKUNTA

Pj TKT Erkki Aalto Imatran Voima Oy PL 138 00101 Helsinki P. 90-6160250	Jäs. FK Hannu Koponen Säteilyturvakeskus Kalevankatu 44 00180 Helsinki P. 90-61671
Vpj DI Antti Hanelius Suomen Voimalaitosyhdistys ry. Lönnrotinkatu 4 B 00120 Helsinki P. 90-602944	Jäs. DI Ilkka Mikkola Teollisuuden Voima Oy Fredrikinkatu 51—53 B 00100 Helsinki P. 90-605022
Rh DI Seppo Salmenhaara VTT/REA Otakaari 3 A 02150 Espoo P. 90-4566330	Jäs. TkL Björn Wahlström VTT/SÄH Otakaari 7 B 02150 Espoo P. 90-4566400
Siht. DI Jorma Aurela Imatran Voima Oy PL 138 00101 Helsinki P. 90-6160459	

TOIMIHENKILÖT

Yleissihteeri DI Lauri Rantalainen P. 90-6958322 Imatran Voima Oy PL 138 00101 Helsinki	Ekskursios sihteeri TkL Eero Patrakka P. 90-605022 Teollisuuden Voima Oy Fredrikinkatu 51—53 B 00100 Helsinki
Kansvälisyhteyks.siht. DI Klaus Kilpi P. 90-648931 VTT/Ydinvoimatekniikan lab. Lönnrotinkatu 37 00180 Helsinki	ATS-Info puheenjohtaja TKT Seppo Vuori P. 90-648931 VTT/Ydinvoimatekniikan lab. Lönnrotinkatu 37 00180 Helsinki

Kohti optimaalista käyttöikä

Olkiluodon voimalaitos suunniteltiin aikoinaan 40 ja Loviisan voimalaitos 30 vuoden käyttöä silmällä pitäen. Olkiluodon ja Loviisan laitosten osuus Suomessa käytettävästä sähköenergiasta on muutaman vuosikymmenen kulluttua 20—30 %. Tullaanpa Suomeen rakentamaan uusia ydinvoimalaitosyksiköitä tai ei, nykyisten laitosten optimaalisen käyttöiän määrittäminen ja saavuttaminen nousee merkittäväksi tavoitteeksi.

Yhdysvaltain kevytvesireaktoritekniikka on usein ollut esikuvana muille maille. Sen ydinvoimakapasiteetti saavuttaa ensi vuosikymmenen alussa 100 GW, millä tasolla se tulee pysymään pitkään. Nykyiset käyttöluvut on myönnetty yleensä 40 vuoden jaksoksi. Ellei käyttöikää jatketa tai rakenneta uusia laitoksia, Yhdysvaltain ydinvoimakapasiteetti tulee romahtamaan vuosina 2010—2030. Ydinvoimalaitosten taloudellinen käyttöikä voisi kuitenkin olla huomattavasti pitempi, esim. EPRIn näkemyksen mukaan yli 70 vuotta. USAn energiaministeriön (DoE) tutkimus on osoittanut, että käyttöiän jatkaminen 20 vuodella tarjoaisi konservatiivisesti arvioiden 230 miljardin dollarin nettohyödyn verrattuna uusien hiilivoimalaitosten rakentamiseen, vaikka hiilivoimaloiden ympäristöhaittojen kustannuksia ei laskettaisikaan mukaan. Niinpä onkin perusteltua, että ydinvoimaloiden käyttöiän jatkamiseksi ollaan käynnistämässä mittavia projekteja, joiden vuosisbudjetit ovat miljoonaluokkaa.

Ydinvoimalaitoksen käyttöikä on tekninen, taloudellinen ja hallinnollinen kysymys. Teknistä käyttöikää määritettäessä on arvioitava rakenteiden ja komponenttien vanheneminen ja vaihtomahdollisuudet, kasvavat viranomaisvaatimukset sekä riittävän käytettävyyden ja turvallisuuden takaaminen. Rakennuskustannusten tultua kuoletetuksi vanhemmankin ydinvoimalaitoksen käyttö voi olla taloudellisesti hyvin houkuttelevaa; toisaalta käyttö- ja kunnossapitokustannusten merkitys tulee korostumaan.

Viranomaisten ja voimayhtiöiden tulee yhdessä selvittää käytön jatkamisen edellytyksiä sekä sitä miten vaatimukset heijastuvat suunnitteluperusteisiin ja käytännön toteutukseen. Mahdolliset uudet vaatimukset oletettavastikin muuttuvat, mutta kansalaisten turvallisuus tuskin edellyttää käänteentekeviä muutoksia ydinvoimalaitostemme järjestelmiin tai käyttöön.

On realistista odottaa, että myös yleinen mielipide ja poliittiset päättäjät tulevat ottamaan kantaa ydinvoimalaitostemme käyttöikään. Tämän vuoksi on tärkeää että julkisuudessa muodostuu myönteinen kuva ydinvoiman käytöstä. Laajalle levinnyt käsitys siitä, että nykyisten ydinvoimalaitosten riskeihin liittyvät kysymykset poistuvat päiväjärjestyksestä siirtymällä toisen tyyppiin voimalaitoksiin, tulee saada oikaistuksi, jotta ydinvoimalaitostemme käyttöikä voitaisiin jatkaa aiemmista suunnitteluperusteista.

Kaupallisen sähköntuotannon kehittymisellä on suhteellisen pitkät aikavakit ja siten muutokset vaativat aikansa. Toimenpiteisiin käyttöiän jatkamisen edellytysten selvittämiseksi ja saavuttamiseksi tulee ryhtyä ajoissa, jotta tarvittavat muutokset laitosten rakenteessa sekä tarvittavat menettelyt käytössä, kunnossapidossa ja dokumentoinnissa ehdittäisiin toteuttaa riittävän aikaisessa vaiheessa. Ennen kuin nykyisten ydinvoimalaitosyksikköjemme alkuperäiseen suunniteltuun käyttöikään on enää korvaavan kapasiteetin rakentamiseen tarvittava aika, olemme monien kauaskantoisten ratkaisujen edessä. □

ATS YDINTEKNIikka (16) 3/87

YDINVOIMALAITOSTEN KÄYTTÖIKÄ

Vuoden 1987 seuraavien numeroiden teemat:

No. 4 "Ranska"
artikkelit viimeistään 30.10.

Vuosikerran tilaushinta muilta kuin ATS:n jäseniltä: 200 mk

Ilmoitushinnat: 1/1 sivua 950 mk
1/2 sivua 750 mk
1/4 sivua 400 mk

Toimituksen osoite:

ATS Ydintekniikka
c/o Pertti Salminen
VTT/E-osaston kanslia
Vuorimiehentie 5
02150 ESPOO
p. 90-456 4148
telex 122972 vttha sf
telefax 90-462382

Lehdessä julkaistut artikkelit edustavat kirjoittajien omia mielipiteitä, eikä niiden kaikissa suhteissa tarvitse vastata Suomen Atomiteknillisen Seuran kantaa.

ISSN-0356-0473

Ydinvoimalaitosten teknisen käyttöiän pidentäminen

Ydinvoimalaitoksen ja sen tärkeimpien komponenttien teknillinen käyttöikä määritellään jo laitosta suunniteltaessa ja mitoitettaessa. Käyttöikä vaihtelee tavallisesti 25—40 vuoden välillä ollen nykyisin yleensä 40 v. Vanhimmat ydinvoimalaitokset ovat jo saavuttamassa tämän iän. Lähivuosina yhä kasvava määrä laitoksia saavuttaa suunnitellun käyttöikänsä, varsinaisen huipun osuessa vuoden 2010 tienoille.

Maissa, joissa ydinenergian tuotanto ensimmäisenä aloitettiin, on tultu siihen tilanteeseen, että on ratkaistava, miten käyttöikänsä saavuttaneen laitoksen tuotantokapasiteetti korvataan. Eräänä vaihtoehtona on noussut esiin pidentää jo rakennettujen laitosten käyttöikää mahdollisesti tarvittavien kunnostustoimenpiteiden avulla. Tätä vaihtoehtoa tukee se, että uusien, korvaavien ydinvoimalaitosten rakentaminen on tällä hetkellä poliittisista syistä useissa maissa vaikeata.

Selviä toimintalinjoja ja käyttöiän jatkamiskriteereitä ei vielä ole. Asiaa kohtaan tunnettava kasvava kiinnostus on kuitenkin havaittavissa mm. alan kongressien lisääntyvästä määrästä. Helmikuun lopulla 1987 pidettiin Pariisissa eräs tällainen kongressi, jonka aiheistoon tämä kirjoitus osittain perustuu.

Käyttöikä rajoittavat tekijät

Ydinvoimalaitoksen teknistä käyttöikää rajoittavat periaatteessa seuraavat kaksi tekijää:

1. Komponentit, joiden vaihtaminen uusiin on käytännössä mahdotonta tai erittäin kallista ja aikaavieppää. Tästä tyypillisinä esimerkkinä voidaan pitää reaktoripaineastiaa. Laitostyyppistä riippuen tällaisia komponentteja saatetaan olla muitakin, kuten esimerkiksi reaktorin suojarakennus.

Pääosa ydinvoimalaitoksen komponenteista ja putkistoista on kuitenkin helposti korvattavissa uusilla normaalien polttoaineenvaihtoseisokkien yhteydessä, joten vain harvat komponentit muodostavat teknisessä mielessä rajoituksen laitosten käyttöiälle.

2. Vaikeudet modifioida laitos siten, että se täyttäisi muuttuvat ja lisääntyvät turvallisuusmääräykset koko käyttöikänsä.

Tämä kysymys on mitä suurimmassa määrin laitostyyppikohtainen. Tähänastiset selvitykset osoittavat, että tämäkin tekijä vain harvoin muodostuu käyttöiän kannalta määräväksi.

Tähän mennessä suoritettujen tutkimusten perusteella on reaktoripaineastia käytännöllisesti katsoen ainoa komponentti, joka määrää ydinvoimalaitoksen teknisen käyttöiän. Asiaa edelleen pelkistettäessä voidaan todeta, että ratkaisevat tekijät käyttöiän kannalta ovat reaktorin paineestiamateriaalin ominaisuudet, paineestiamateriaalin käyttöaikanaan saama säteilyannos ja paineestiaan kohdistuvat termiset kuormitukset/1/. Kun nämä tekijät ovat nykytekniikalla hyvin hallittavissa, ovat edellytykset ydinvoimalaitosten käyttöiän pidentämiselle erinomaiset.

Tutkimustoiminta

Käyttöiän pidentämiskaavavilut ovat viritäneet vilkkaan tutkimustoiminnan. Se on kohdistunut sekä taloudellisiin että teknisiin seikkoihin.

Taloudellisella puolella on selvitetty, mikä olisi edullisin tapa korvata spesioidun käyttöikänsä saavuttaneen laitoksen kapasiteetti. Jo rakennetun ydinvoimalaitoksen käyttöiän pidentäminen on osoitettu monissa tapauksissa halvemmaksi kuin muita polttoaineita käyttävien voimaloiden rakentaminen /2/.

Teknisellä puolella tutkitaan mm. tekijöitä, jotka voivat rajoittaa ydinvoimalaitoskomponenttien käyttöikää. Tutkimuksen kohteena ovat terminen vanheneminen, väsyminen, korroosio eri muodoissaan sekä säteilyhaurastuminen. Korjausten, kuten korjaushitsausten ja hiontojen, komponenttia vanhentavaa vaikutusta selvitetään. Tärkeä tutkimuksen kohde on myös se, mille tasolle ydinvoimalaitoskomponenttien tekninen kunto saa laskea, ennen kuin se on lopullisesti poistettava käytöstä.

OECD:nkin piirissä toimii näitä asioita tutkiva työryhmä, jossa on myös suomalaisia edustajia /3/.

Myös laitoskohtaisia analyysejä käyttöikää rajoittavien tekijöiden löytämiseksi on tehty useissa maissa. Analyysit osoittavat yleisesti, että laitosten käyttöikä

voidaan pidentää kymmeniäkin vuosia. Erään laitostyyppin käyttöiäksi on mainittu jopa 100 v. Myös TVO:ssa suoritettujen alustavien selvitysten osoittavat, että Olkiluodon ydinvoimalaitosten käyttöikä voidaan merkittävästi pidentää alunperin suunnitellusta 40 v:sta.

Vilkasta keskustelua käydään myös siitä, miten laitosten pidentäminen pitäisi toteuttaa ja lisensoida. Tällä hetkellä ei asiassa vielä liene yhtenäistä käytäntöä.

Toimenpiteitä käyttöiän pidentämiseksi

Käyttöiän pidentäminen on pitkä prosessi, joka alkaa jo silloin kun ydinvoimalaitos otetaan käyttöön. Jokapäiväiset käyttö- ja kunnossapitotoimenpiteet vaikuttavat suoraan laitoksen kuntoon ja siihen, miten paljon laitosta vanhennetaan. Niillä voidaan siis vaikuttaa ratkaisevasti laitoksen käyttöikään ja sen pidentämismahdollisuuksiin. Jotta varmistettaisiin mahdollisimman pitkä käyttöikä, tulisi erityisesti seuraaviin seikkoihin kiinnittää huomiota:

1. Käyttötavan tulisi olla laitoksia säästävää. Kriittisiin komponentteihin, kuten primääripiirin komponentteihin ja erityisesti reaktoripaineestiaan kohdistuvat kuormitukset tulisi saada mahdollisimman lieviksi. Käyttötavan tulisi olla sellainen, että esimerkiksi lämpöshokkeja aiheutettaisiin mahdollisimman vähän. Vähentämällä esimerkiksi kylmän veden pumppauskertoja kuumaan reaktoripaineestiaan kasvatetaan laitoksen käyttöikää.
2. Kunnossapitostrategia tulisi suunnitella pitkää käyttöikää ajatellen. Ennakko-ohjelmatoimenpiteet tulisi suunnitella ja toteuttaa siten, että laitevauriot saataisiin estettyä. Samalla ehkä pystytään estämään laitosta vanhentavien transienttien syntyminen. Vaurioituneiden komponenttien korjaukset pyritään suorittamaan aina aikaisempaa rakennetta tai materiaalia parantaen siten, että vian syntyminen uudelleen saadaan estettyä.
3. Laitosseuranta tulisi suorittaa ja dokumentoida siten, että sitä voidaan käyttää hyväksi silloin, kun käyttöikäkysymys tulee ajankohtaiseksi. Tällöin tarvitaan yksityiskohtaisia tietoja vesikemiasta ja vaihteluista eri vuosina, komponentteihin kohdistuneista kuormituksista, transienteista ja säteilyannoksista, korjauksista, huolto- ja tarkastushistoriasta jne.

Mekaaniset laitteet ydinvoimalaitosten elinikä tarkastelussa

Ydinvoimalaitosten elinikä on viime vuosina tuotu tiivistetysti esille alan kansainvälisessä keskustelussa. Keskustelun kiihtymisen katalysaattorina lienee ollut vanhimpien yhdysvaltalaisien reaktorien lopullinen alasajo ja sikäläinen kaavamainen käyttöön lisensiointi, joka edellyttää laajoja teknisiä selvityksiä kriteerien ollessa kuitenkin epäselviä.

Mekaanisten komponenttien turvallisen elämänkaaren varmistaminen ja riittävän turvallisuusmarginaalin olemassaolon jatkuva seuranta on itse asiassa aina ollut yhtenä perusteena viranomaisten laatiessa teknillistä vaatimustasoa, tarkastustointia ja käytön valvontaa koskevia

Laitosseuranta on tärkeätä myös siksi, että siitä saadaan palautetietoa mahdollisten laitosta kuluttavien virheellisten käyttö- yms. tottumusten korjaamiseksi.

4. Laitosta parantavien muutosten suunnitteluun ja toteutukseen tulisi kiinnittää erityistä huomiota. Ne muutokset, jotka tiedetään välttämättömiksi laitoksen käyttöön pidentämistä ajatellen, tulisi toteuttaa optimaalisena ajankohtana siten, että pitkät seisokit voitaisiin välttää.

Verrattuna monien muiden maiden ydinvoimalaitoksiin on edellä mainitut seikat otettu suomalaisilla laitoksilla erittäin hyvin huomioon, joten valmiudet ydinvoimalaitosten käyttöön pidentämiseen ovat olemassa. □

Lähdeluettelo

- 1/ H. Nakajima, N. Nakajima and T. Kondo "Life prediction study of reactor pressure vessel as essential technical foundation for plant life extension", OECD/NEA-Symposium on Plant Life Extension, Paris 1987
- 2/ L. MaKovick, T. Fletcher and D.L. Harrison "U.S. National and Regional Impacts Nuclear Plant Life Extension", OECD/NEA-Symposium on Plant Life Extension, Paris 1987.
- 3/ N.R. McDonald "Technical Issues Limiting the Long-Term Integrity of Water Reactor Pressurized Components and Their Fittings. Report on a Workshop", OECD/NEA-Symposium on Plant Life Extension, Paris 1987

määräyksiä. Ydinvoimalaitoskomponentteihin, rakenneaineisiin ja tarkastusmenetelmiin kohdistunut tutkimuspanos Suomessa ja muualla maailmassa on osaltaan palvellut samoja päämääriä, joten aiheen korostunut esilläolo elinikäkysymykseksi kiteytyneenä ei sinänsä tuo tarkasteltavaksi mitään uusia ilmiöitä, mutta edesauttane ongelmialueen kokonaisvaltaista käsittelyä.

Elinikää rajoittavat tekijät

Mekaanisten komponenttien elinikää rajoittavat metallurgiset ja mekaaniset tekijät, jotka pienentävät niiden kykyä kantaa kuormaa käyttöolosuhteissa tai sellaisissa poikkeustilanteissa, joiden esiintymistodennäköisyys katsotaan suureksi. Mekaanisen rakenteen tai sen osan riittävä turvallisuusmarginaali voidaan useimmiten ylläpitää teknisin toimenpitein kuten huolto-, korjaus- ja vaihtotoiminnalla. Jopa metallurgiset käsittelyt voivat tulla kysymyksen rakenneaineiden ominaisuuksien palauttamiseksi kohti entistä turvallista tasoa.

Metallisten rakenteiden rasituksen sietokyvyn heikkenemiseen johtavien ajasta riippuvien mekanismien voidaan jakaa kahden pääryhmään: rakenneaineen mekaanisten ominaisuuksien muutokset ja rakenteen eheydessä tapahtuvat muutokset. Usein nämä nivoutuvat tiiviisti toisiinsa.

Rakenneaineiden ominaisuuksien muutokset

Rakenneaineessa esiintyvät tärkeimmät kevytvesireaktoreissa huomioon otettavat muutosprosessit ovat:

- säteilyhaurastuminen
- terminen vanheneminen
- myötövanheneminen
- termomekaaninen vanheneminen.

Painevesilaitosten reaktoripaineastioiden rakenneaineen haurastuminen neutronisäteilyn vaikutuksesta on tämän laitostyyppin keskeisin elinikäongelma. Kiehuusvesilaitoksissa säteilyannos jää niin alhaiselle tasolle, ettei säteilyhaurastumisesta muodostu ongelmaa.

Säteilyhaurastuminen johtuu neutronisäteilyn aiheuttamasta teräsrakeiden sisäisten hilavirheiden lisääntymisestä sekä suotautumis- ja erkautumisilmiöiden etenemisestä mikrorakenteessa kuten kuparin siirtyminen kiinteästä liuoksesta erillisiin erkaumiin. Tapahtuneet muutokset heijastuvat mekaanisiin ominaisuuksiin siten, että teräksen lujuus ja kovuus kas-

vavat mutta sitkeys heikkenee ja ennen kaikkea transitiolämpötila eli lämpötila, missä murtumismekanismi muuttuu sitkeästä hauraaseen, nousee.

Materiaaliominaisuuksien muutoksia seurataan reaktoriin sijoitettujen materiaalinäytteiden avulla (surveillance näytteet).

Määräajoin poistettavien näytteiden koestustulosten perusteella saadaan ennakoivasti tietoja muutosten suuruudesta, koska säteilyvuon näytteiden kohdalla suurempi kuin reaktoripaineastian seinämässä. Tämä edistymä on yleensä niin suuri, että riittävä aika eliniän ennakoivaan määrittelyyn on käytettävissä. Kun Loviisa 1:n reaktorista poistettiin ensimmäiset näytteet, säteilyturvakeskus edellytti uusien, toista sulatuserää edustavien näytteiden sijoittamista reaktoriin tilastollisen tietopohjan laajentamiseksi. Myöhemmin näytevalikoimaa on edelleen laajennettu huomattavasti eri muuttujien vaikutusten kartoittamiseksi.

Säteilyhaurastumiseen vaikuttavat

- kokonaisannos, transitiolämpötilan siirtymä on verrannollinen neutronisäteilyn annoksen potenssiin n. 0.35
- säteilytysnopeus, hidas säteilytys antaa suuremman siirtymän
- neutronispektri, suurienergiset neutronit antavat suuremman vauriot
- säteilylämpötila, säteilyhaurastuminen vähenee säteilytettäessä yli 300°C:ssa
- teräksen koostumus, mm. Cu, P ja Ni ovat epäedullisia kiihdyttäen säteilyhaurastumista
- mahdollisesti jännitystilasta.

Vaikuttavien tekijöiden runsaus ja se tosiasia, että murtumismekaaniset tarkastelut tehdään sellaisten parametrien avulla, joiden mittaukseen käytetään toisenlaisia koekappaleita kuin surveillance ohjelmassa, tuo arviointeihin tiettyä epävarmuutta. Eri maissa erikseen ja yhteistyössä IAEA:n aloitteesta on meneillään laajoja tutkimusohjelmia haurastumismekanismien selvittämiseksi ja yksittäisten tekijöiden vaikutuksen selvittämiseksi. Iskusitkeys-kokeilla mitattujen suureiden ja murtumissitkeysparametrien muuttumisen välisen korrelaatioiden varmentaminen on myös laajan selvitystyön kohteena. VTT on aktiivisesti mukana kansainvälisessä tutkimusyhteistyössä. Puutteena todettakoon, että päähuomio kohdistuu länsimaiseen paineastiateräkseen, joten Loviisan laitosten elinikä määrittely jää edelleen kansalliseksi haasteeksi.

Kuvassa 1 on esitetty Gundremmingen A:n reaktoripaineastiasta irroitetuista näytteistä saatuja koestustuloksia sijoitettuna Reg. Guide 1.99 Rev. 1:n diagrammiin. Katkoviivalla on merkitty teräksen kemialliseen analyysiin perustuvat ennustearviot. Kaikki mittaukset sijaitsevat ennusteen epäkonservatiivisella puolella.

Koska osa neutronisäteilyn aiheuttamasta haurastumisesta johtuu hilavirheiden muodostumisesta, sitkeys on tältä osin mahdollista palauttaa lämpökäsittelmällä. Tarvittavan teräslaatuun sidotun perustiedon laajuus ja käytössä olevien reaktoripaineastioiden todellisia ominaisuuksia koskevan tiedon niukkuus asettaa huomattavat esteet tällaisen käyttöön jatkamismahdollisuuden lisensoimiselle.

Muut edellä mainitut vanhenemisilmiöt ovat vaikutukseltaan marginaalisia säteilyhaurastumisen rinnalla. Materiaalivalinnassa ja valmistukseen liittyvissä lämpökäsittelyissä ne on otettu huomioon. Käytönaikaisten korjaushitsausten yhteydessä saattaa tulla tilanteita joissa asianmukainen myöstöhehkytys ei ole mahdollinen ja myöstövanhenemisen mahdollisuus on otettava huomioon.

Rakenteiden vaurioituminen

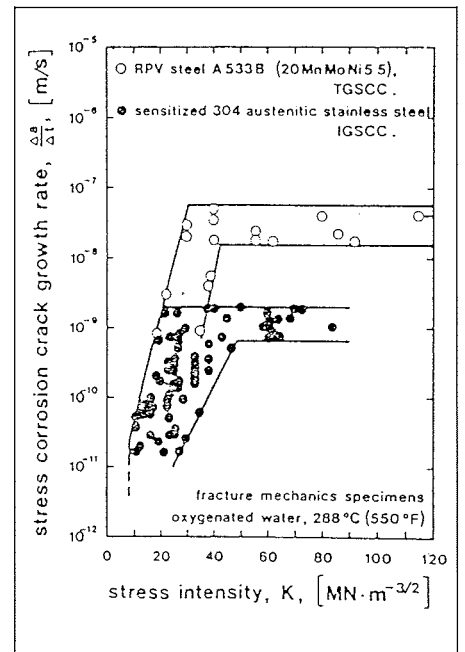
Rakenteiden eheyteen vaikuttavia ajasta riippuvia prosesseja ovat

- jännityskorroosio
- muut korroosioilmiöt
- väsymisilmiöt
- eroosio
- kuluminen.

Kiehuvesilaitoksissa austeniittisten terästen ja nikkelivaltaisten seosten jännityskorroosio on osoittautunut merkittäväksi ongelmaksi eräiden putkistojen ja reaktoripaineastiassa sijaitsevien rakenteiden eliniän kannalta. Vaurioituneet rakenteet ovat kuitenkin vaihdettavissa kohtuullisin ponnistuksin, joten laitoksen elinikä ei tästä syystä ole uhattuna. Kyseessä on vetojännityksen, rakenneaineen sopimattoman mikrorakenteen ja kiehuvesilaitosten happipitoisen primaariveden yhteisvaikutuksesta ydintyvä ja kasvava särö, joka olosuhteiden niin sallien kasvaa rakenteen läpi. Epäedullinen jännityskorroosiolle altis mikrorakenne syntyy tavallisesti hitsiliitosten läheisyyteen, jossa mikrorakenne herkistyy eli teräksen raerajoille erkautuu kromirikkaita karbideja, jolloin ympäröivä alue köyhtyy kromista ja altistuu korroosiolle. Herkistyminen saattaa tapahtua myös pitkän ajan kuluessa käyttölämpötilassa, etenkin jos karbidien ydintyminen on alkanut jo hitsauksen tai lämpökäsittelyn yhteydessä. Neutronisäteilyn vaikutuksesta kehittyy myös fosforin raerajasuotautumia, jotka lisäävät voimakkaan säteilyn alaisten rakenteiden taipumusta interkristalliiniseen jännityskorroosioon.

Kuvassa 2 on esitetty jännityskorroosiosärön kasvunopeuksia jännitysintensiteetin funktiona. Olosuhteista riippuen saattaa muissakin kuin austeniittisissä teräksissä esiintyä jännityskorroosiota.

Korjaus- ja muutostöiden yhteydessä voidaan parantaa muotoilua ja siirtä rakenteineisiin, joiden jännityskorroosion kestävyys on todettu hyväksi kiehuvesilaitosolosuhteissa, esim. matalahiiliisiin ($C < 0.03\%$) austeniittisiin teräksiin joiden lujuutta on korotettu typpiseostuksella.



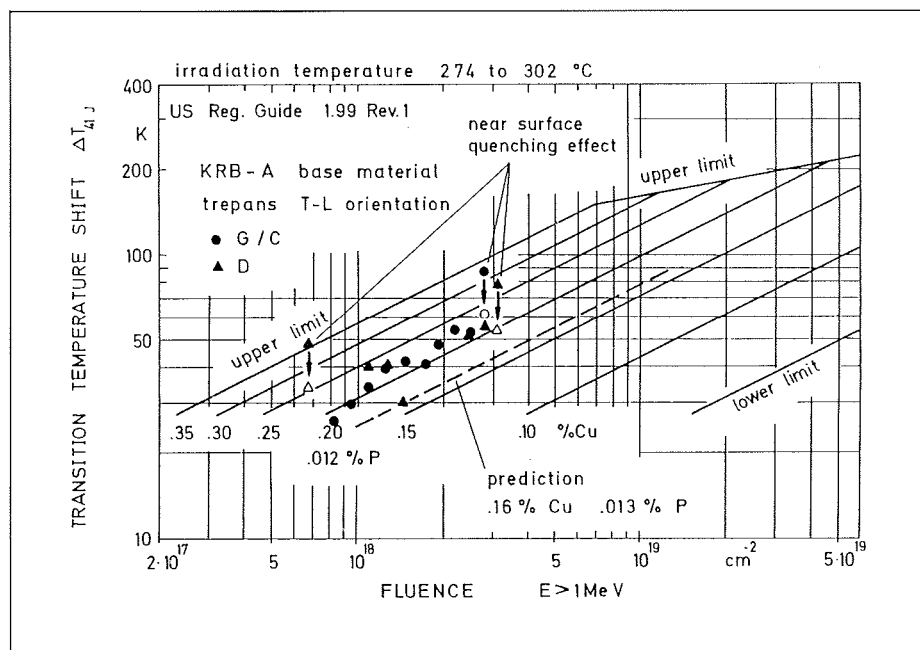
Kuva 2. Jännityskorroosiosärön särönkasvunopeudet paineastiateräksissä ja ruostumattomissa putkistomateriaaleissa (Speidel, 1985).

Jännityskorroosion mahdollisuus on otettu huomioon määräaikaistarkastusohjelman laadinnassa. Niihin on lisäksi tehty muutoksia siten, että kohteiden määrää on lisätty ja on varmistettu altimpien kohteiden mukana olo. Tarkastusmenetelmät ovat osaltaan jatkuvan kehityksen kohteena. Määräaikaistarkastuksissa pyritään siihen, että muodostumassa oleva särö havaitaan hyvissä ajoin ennen kuin kasvu on saavuttanut rakenteen kantokykyä vaarantavan koon.

Yhteenveto

Ydinvoimalaitosten mekaaniset laitteet ja rakenteet ovat periaatteessa kaikki vaihdettavissa uusiin. Teknilliset vaikeudet ovat pääkomponenttien vaihdon osalta sitä suuruusluokkaa, että taloudellinen optimointi saattaa puoltaa uuden laitoksen rakentamista esimerkiksi reaktoripaineastian vaihtamisen sijasta, etenkin jos muutkin rakenteet ovat jatkuvasti lisääntyvän uusinnan ja korjaustoiminnan kohteena. Suunnittelussa on Suomessa yleisesti käytetty lähtökohtana passiivisille laitteille 30/40 v. käyttöikä. Aktiivisten laitteiden käyttöikä on usein huomattavasti tätä lyhyempi.

Säteilyturvakeskus valvoo kokonaisvaltaisesti ydinlaitosten rakenteiden turvallisuutta ja luotettavuutta. Valvonta käsittää yksittäisten rakenteiden rakennesuunnitelmien hyväksyntää, valmistuksen valvontaa, rakenteisiin kohdistuvia tarkastuksia ja käytön aikaista valvontaa sekä määräaikaista tarkastuksia. Tavoitteena on varmistaa, että rakenteet ja laitteet täyttävät niille asetetut vaatimukset laitoksen koko käyttöajan aikana ja että ajoissa ryhdytään tarpeellisiin muutostöihin. □



Kuva 1. Gundremmingen A (KRB-A) reaktoripaineastiasta leikattujen näytteiden koestustuloksia sijoitettuna Reg. Guide 1.99 Rev. 1 transitiolämpötilan säteilysiirtymän arviointidiagrammiin. Tulokset osoittavat analyysiin perustuvan arviointin (katkoviiva) epäkonservatiiviseksi. (K. Kussmaul, 1987)

Ydinvoimalaitosten vanhenemiseen liittyvä tutkimus VTT:ssa

Konventionaalisista voimalaitoksista ja prosessiteollisuudesta saatu kokemus osoittaa, että laitosten käytettävyyttä alkaa vähentyä vanhenemisilmiöiden takia tyypillisesti noin 10 käyttövuoden jälkeen. Tähänastiset kokemukset osoittavat samanlaisten vanhenemisilmiöiden vaikuttavan myös ydinvoimalaitosten käytettävyyteen ja saattavan johtaa myös turvallisuusmarginaalien pienenemiseen, ellei tarpeellisiin ehkäiseviin ja korjaaviin toimenpiteisiin ryhdytä. Myös ydinvoimalaitosten käyttöiän pidentäminen yli suunnitellun 30 tai 40 vuoden edellyttää vanhenemisilmiöiden huomiointia.

Parin viime vuoden aikana on maailmanlaajuisesti nostettu ydinvoimalaitosten vanhenemisilmiöiden tutkiminen prioriteettiasemaan. Osittain on kysymys jo aiemmin käynnissä olleiden, esim. rakennemateriaaleihin kohdistuvien tutkimusten niputtamisesta uuden otsikon alle, mutta osittain on syntynyt täysin uutta tutkimusta esim. luotettavuustekniikoiden käytöstä elinikäjärjestyksissä.

Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa on ydinvoimalaitosten vanhenemiseen liittyvää tutkimusta osana useaa projektia lähinnä ydinvoimatekniikan, metalli-, reaktori- ja sähkötekniikan laboratorioissa. Nämä tutkimukset keskittyvät mekaanisiin komponentteihin; instrumentointiin, kaapeleiden yms. vanhenemista selvitetään lähinnä luotettavuusteknisin keinoin. VTT:n projekteihin liittyen osallistutaan tai seurataan tärkeimpiä kansainvälisiä vanhenemistutkimuksia, mm. IAEA:n, OECD/NEA:n, U.S.NRC:n ja EPRI:n puitteissa tehtäviä. VTT:n tutkimusten päärahoittaja on Kauppa- ja teollisuusministeriö; osa rahoituksesta saadaan mm. voimayhtiöiltä, Säteilyturvakeskukselta ja pohjoismaiselta ministerineuvostolta.

Reaktoripaineastiaan liittyviä vanhenemisilmiöitä, jotka on kuvattu Christer Ottossonin artikkelissa, tutkitaan projekteissa **Rakennemateriaalit ydinvoimalaitoksissa ja Ydinvoimalaitosrakenteiden**

turvallisuus. Ensinmainitun projektin puitteissa selvitetään mm. reaktoripaineastiatäräksen vanhenemista neutronisäteilyn (ks. Matti Valon artikkeli) ja termomekaanisen väsymisen vaikutuksesta. Merkittävä osa projektista kohdistuu erilaisten korroosioilmiöiden selvittämiseen. Näitä ovat mm. rakennemateriaalien jännityskorroosio ja korroosioväsyminen, joita tutkitaan primaaripiiriä simuloivissa olosuhteissa erityisesti autoklaavilaitteistossa. Projektin tuloksena on syntynyt myös laitospäätösoveltuutta vesi-kemian monitorointiantureita, joiden avulla vesikemia voidaan helpommin säätää korroosioireaktiot minimoivaksi.

Ydinvoimalaitosrakenteiden turvallisuusprojektin puitteissa kehitetään erilaisten väsymisilmiöiden kuvaamisessa tarvittavia laskentavalmiuksia, sekä deterministisiä että todennäköisyyspohjaisia.

Ydinvoimalaitosputkistojen vanheneminen ja elinikä -projekti kohdistuu nimensä mukaisesti putkistojen elinikäkysymyksiin. Projektin puitteissa selvitetään putkistomateriaalien vanhenemisen lisäksi vesikemian, mekaanisten ja termisten

kuormitusten sekä tarkastus- ja korjaustekniikoiden vaikutuksia eliniän määrittämiseen (ks. Irina Aho-Manttilan artikkeli). Projektin tuloksia hyödynnetään **Ydinvoimalaitosten ikääntymisen luotettavuustekninen arviointi** -projektissa, jossa selvitetään ikääntymisen satunnaismallien soveltuvuutta vanhenemisilmiöiden mallintamiseen sekä mallien yhteensopivuutta todennäköisperustaisen turvallisuusanalyysin (PRA) kanssa.

Ydinvoimalaitoksen ikääntymistä sivuavia projekteja ovat edellämainittujen lisäksi **Ydinvoimalaitosten käyttöturvallisuuden parantaminen NDT-menettelyin ja Katastrofaalisen murtumisen estäminen paineastoissa ja putkistoissa sekä Katastrofaalisen murtumisen laskennalliset arviointimenetelmät.** Ensinmainitussa projektissa selvitetään rikkomattomien testausmenettelyjen luotettavuutta ydinvoimalaitoksen käytön aikana syntyvien säröjen, erityisesti jännityskorroosiosäröjen määrittämiseen. Viimemainituissa projekteissa selvitetään kokeellisesti ja laskennallisesti säröjä sisältävien paineastioiden ja putkistojen käyttöturvallisuutta. □

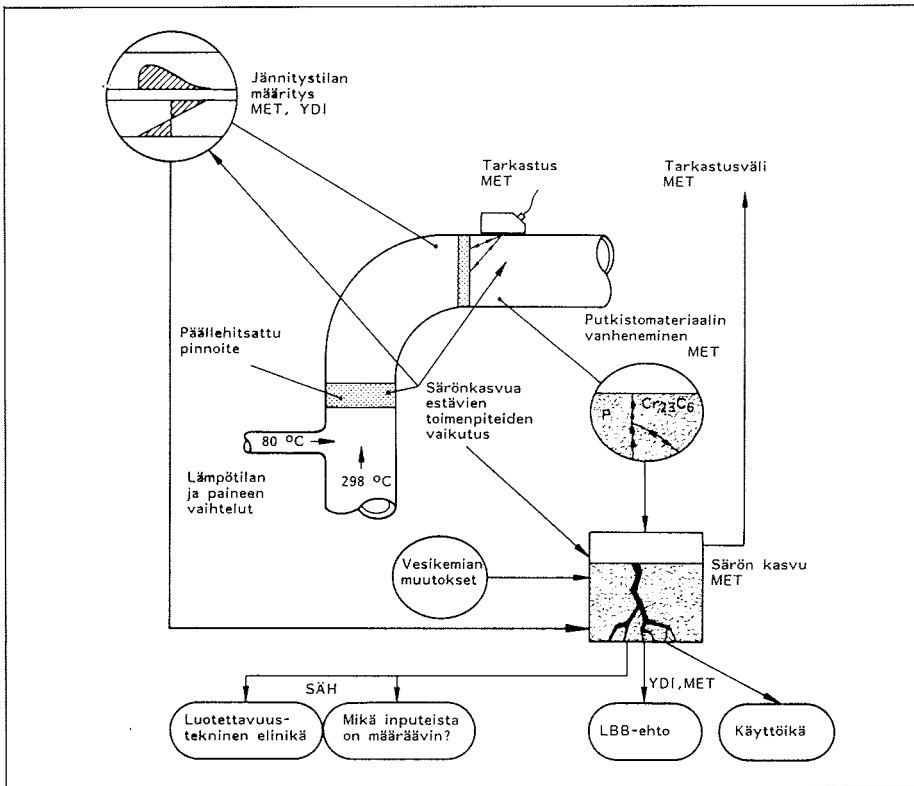
Irina Aho-Mattila, VTT/Metallilaboratorio

Putkistojen vanheneminen ja elinikä

Austeniittisten ruostumattonien teräspankistojen elinikä BWR-laitoksissa rajoittaa usein ympäristövaikutteinen särönkasvu, jonka nopeus on riippuvainen vanhentuneen putkistomateriaalin ominaisuuksista, laitoksen vesikemiasta ja vallitsevista kuormituksista. Putkistojen eliniän arvioinnissa tarvitaan myös tietoja tarkastustekniikan luotettavuudesta. Näiden asioiden selvittämiseksi VTT:ssa on aloitettu uusi ydinenergia-alan projekti.

Varsinkin USA:ssa kiinnostus ydinvoimalaitosten eliniän pidentämiseen on lisääntynyt valtavasti viime vuosina. Syynä lie-nee nykyisin käytössä olevien laitosten mahdollinen lähes samanaikainen käytöstäpoisto jo ennen vuotta 2010. Eliniän pidentämisellä voidaan turvata sähköntuotanto kunnes uudet ydinvoimalaitokset tai muunkaltaiset energiantuotantomuodot saadaan käyttöön. Lisäksi taloudellisesti voimalaitosten lisävuodet merkitsevät huomattavaa pääoman kertymistä tulevia investointeja varten.

Eliniän pidentämistä silmälläpitäen ydinvoimalaitoksen käytön ja kunnossapidon ohjeena voisi olla ajatus, että ehkäisevät toimenpiteet ovat parempia kuin korjaukset. Vaikka nykyisin on täysin mahdollista vaihtaa primääripiirin hyvinkin aktiivi-



sia komponentteja tai putkistojen osia tai vaikkapa kokonaisia putkistoja, tulisi käytössä mieluummin pyrkiä mahdollisimman säästävään tapaan ja aika ajoon ryhtyä ehkäiseviin toimenpiteisiin. Jo alusta alkaen tapahtuva komponenttien vanhenemisen estäminen mahdollistaa eliniän pidentämisen ja tuotantoseisokkien vähentämisen turvallisella ja taloudellisella tavalla.

Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen metallilaboratoriossa aloitettiin vuoden 1987 alussa kauppa- ja teollisuusministeriön ja VTT:n yhdessä rahoittama projekti: "Ydinvoimalaitosputkistojen vanheneminen ja elinikä". Projektin kutsunimi PUVA tulee sanoista "putkiston vanheneminen", jotka rajoittavat käsiteltävän vanhenemisongelman putkistoihin ja niistäkin alkuvaiheessa austeniittisiin ruostumattomiin teräsputkistoihin.

Putkistojen vanheneminen

Austeniittinen ruostumaton teräs on altis raerajoja pitkin etenevälle jännityskorroosiolle (intergranular stress corrosion cracking, IGSCC), jonka takia lukuisia putkistoja on jouduttu korjaamaan tai vaihtamaan uusiin esim. USA:ssa, Ruotsissa ja Espanjassa. Myös Suomessa BWR-laitokset ovat kärsineet raerajajännityskorroosiosäröistä ruostumattomissa teräsputkissa.

Kun putkisto vanhenee, myös materiaalin ominaisuudet muuttuvat. Osa näistä muutoksista tunnetaan, osaa epäillään. Hitsauksen yhteydessä tapahtuva herkistyminen ja käytön aikana tapahtuva matalalämpötilaherkistymisen nimellä tunnettu ilmiö saattaa putkistomateriaalin sellaiseen tilaan, että jännityskorroosiosärön ydintyminen on mahdollista. Vielä ei tiedetä, onko epäpuhtauksien suotautu-

misella myös vaikutusta ydintymiseen. Projektin tavoitteena on juuri määrittää mahdolliset vanhenemisilmiöt putkistomateriaalissa sekä vikojen synty ja särönkasvunopeudet ikääntyneessä materiaalissa.

Tiedetään hyvin, että paras korjaava toimenpide on putkistomateriaalin vaihtuuteen kestävämpään materiaaliin. Korjaavana toimenpiteenä käytetään myös erilaisia lämpökäsittelyjä sekä päällehitsattua pinnoitetta. Laitoksen käytössä voidaan kuitenkin myös toimia niin, että jännityskorroosion ydintyminen vaikeutuu ja särönkasvunopeudet pienenevät. Laitosten vesikemian, erityisesti happi- ja epäpuhtauspitoisuuksien monitorointi ja säätö sallituille tasoille voi estää ympäristövaikutteisen särönkasvun. Sallitut tasot taas voidaan määrittää materiaalin sähkökemiallisen potentiaalinvuon avulla. Tämänkaltaisia toimenpiteitä tulisi noudattaa myös uusien tai uusittujen putkistojen kohdalla, jotta alunalkaen hyväkuntoiset putkistot olisivat sitä myös pitkän käyttöikänsä loppuvaiheissa.

PUVA-projektin kokeellisen työn tavoitteena on määrittää särönkasvunopeudet eri tavoin vanhentuneessa ruostumattomassa teräksessä sekä hitsausliitoksessa tai päällehitsatussa pinnoitemateriaalissa. Projektissa mitataan myös särönkasvunopeuksia ruostumattomassa teräksessä erilaisten vesikemioiden vallitessa. Kokeiden aikana putkistomateriaalin ominaisuuksia mitataan sähkökemiallisten korkealämpötila-antureiden avulla.

Ruostumattomien terästen jännityskorroosiosäröjen kasvunopeuksia on pitkään tutkittu USA:ssa Argonne National Laboratoryssa, jonka kanssa VTT:lle on tarjoutunut tilaisuus olla yhteistyössä.

Putkistojen kuormitukset

Putkistojen kuormitusten selvitysten avulla pyritään laskennallisesti määrittämään putkistojen todennäköisiä vikaantumiskohtia. Putkistossa vallitsevat jännitykset määräävät myös särönkasvua ajavan voiman eli särönkärjen jännitysintensiiteetin putken paksuussuunnassa.

Ympäristövaikutteiselle särönkasvulle tai ylipäänsä sallitulle vikakoolle putkistossa voidaan määrittää yläraja, jonka ylittäminen saattaa johtaa putkistomurtumaan. Vanhentumisen aiheuttamat materiaaliparametrien muutokset voivat vaikuttaa ns. vuoto ennen murtumaa (Leak-before-break, LBB) -ehdon toteutumiseen.

Kuormitusten tutkimuksessa voidaan hyödyntää kansainvälisenä yhteistyönä jatkuvan Heissdampfreaktor (HDR) -projektin III-vaihetta, jonka puitteissa suoritetaan täyden mittakaavan putkistokokeita HDR-laitoksella Saksan Liittotasavallassa.

Putkistojen vikojen määrittäminen

Laitoksen ikääntymisen hallinta aiheuttaa lisääntyviä vaatimuksia tarkastusten luotettavuudelle. Esimerkiksi särönkasvua estävänä toimenpiteenä käytetty päällehitsattu pinnoite vaikeuttaa ellei kokonaan estä tarkastusten suorittamista. Toisaalta ruostumattomien teräsputkien hitsausliitosten tarkastus teräksen ominaisuuksien takia on jo sinällään vaativa tehtävä.

Tarkastusten luotettavuuden arvioinnissa pitää toisaalta erottaa toisistaan ja toisaalta yhdistää särön havaitsemisen luotettavuus ja särön koon määrittämisen luotettavuus, jotka yhdessä määräävät tarkastuksen luotettavuuden. Ruostumattomien terästen tarkastusten luotettavuutta on tutkittu hyvin vähän, mutta se on aiheena kansainvälisessä OECD-maiden PISC III (Programme for the Inspection of Steel Components) projektissa, jossa VTT on mukana.

Putkistojen elinikä ja luotettavuus

Putkistojen vanheneminen-projektilla on yhtymäkohtia VTT:n sähkötekniikan laboratorion IKÄ-projehtiin (Ydinvoimalaitosten ikääntymisen luotettavuustekninen arviointi). Alkavan IKÄ-projektin yhtenä tavoitteena on selvittää olemassa olevia ikääntymisen satunnaismalleja ja niiden soveltuvuutta ko. putkistojen vanhenemisilmiöiden mallintamiseen sekä mallien yhteensopivuutta ko. putkistojen vanhenemisilmiöiden mallintamiseen sekä mallien yhteensopivuutta todennäköisyysperustaisen turvallisuusanalyysin (PRA) kanssa.

Putkistojen elinikään vaikuttavia tekijöitä on lukuisia ja niitä on havainnollistettu oheisessa kuvassa. Ympäristövaikutteisen särönkasvun ollessa kyseessä tarvitaan aina sopiva materiaalin tila yhdessä kuormitusten ja sopivan ympäristön kanssa aikaansaamaan putkiston vaurio. Putkistojen vanheneminen -projektissa pyritään ottamaan huomioon kukin näistä osaluista eliniän määrittämisessä. □

Reaktoripaineastiateräksen säteilyvanheneminen

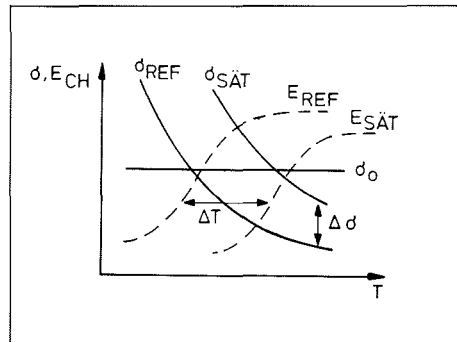
On tunnettua, että nopean neutronisäteilyn vaikutuksesta teräs muuttuu lujemmaksi, mutta hauraammaksi. Ilmiö on ydinvoimalaitoksen turvallisuuden kannalta teknisesti merkittävä. Jos paineastian haurastuminen on riittävän voimakasta ja siinä on riittävän suuria säröjä, saattaa paineistetussa hätäjäähdytystilanteessa syntyvä teoriassa ydintää hauraan murtuman. Tällaista tilannetta ei ydinvoimalaitoksissa ole todellisuudessa esiintynyt. Säteilyhaurastuminen jatkuu koko ydinvoimalan käytön ajan, joten kysymyksessä on vanheneemisilmiö. Säteilyhaurastumisen nopeus hidastuu huomattavasti ajan mukana.

Artikkelissa käsitellään säteilyhaurastumisen mekanisme ja niitä menetelmiä, joilla ajan mukana muuttuvia turvallisuusanalyysissa tarvittavia paineastiateräksen mekaanisia ominaisuuksia määrätään. Lisäksi käsitellään kansainvälistä ohjelmaa, johon Suomesta VTT ja IVO osallistuvat ja jonka tarkoituksena on kehittää edellä kuvattuja määritysmenetelmiä sekä säteilyhaurastumisen poistamista toivutusheikkuttamalla.

Säteilyvaurioitumisen mekanismi ja sen yhteys säteilyhaurastumiseen

Uraaniytimen haljetessa vapautuu keskimäärin 2,5 neutronia, joiden keskimääräinen energia on 2,0 MeV. Energia on niin suuri, että neutronin törmätessä metalliatomiin voi suuri määrä atomeja siirtyä pois paikaltaan. Koska kaikki atomit eivät törmäysten jälkeen palaa alkupeiräistä asemaansa vastaavaan asemaan, synnyttää törmäys tyhjää tilaa eli vakanssityyppejä hilavirheitä ja välisija-atomeja. Tämä lisää atomien liikkuvuutta, joka mahdollistaa materiaalia lujittavien erkaumien muodostumisen.

Teräksen haurastuminen on suora seuraus lujuuden kasvusta, kuten kuvassa 1 on kaavamaisesti esitetty. Kuvassa σ_0 on haurasmurtumislujuus, jonka ylittyminen johtaa hauraaseen murtumaan ja pieneen



Kuva 1. Lujuuden kasvun ja sitkeystransition säteilysiirtymän välinen yhteys.

energia-absorptioon. Jos materiaali sen sijaan myötää pienemmällä jännityksellä kuin σ_0 , murtuu kappale sitkeästi ja murtumaan sitoutuu suuri energiamäärä. Kuvassa $1 \Delta\sigma$ on säteilytyksen aiheuttama myötöjännityksen kasvu ja ΔT säteilytyksen aiheuttama hauras-sitkeä-transitiolämpötilan kasvu.

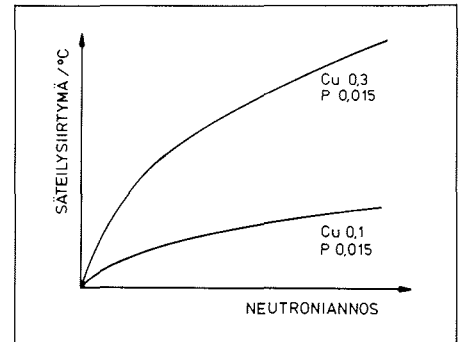
Todelliset atomitasolla vaikuttavat säteilyhaurastumisen mekanismit paineastiateräksissä ovat alkaneet osittain selvitä vasta aivan viime vuosina uusien fyysikaalisten mittausten menetelmien soveltamisen myötä. Jo 1970-luvulla oli kerätty melko suuri tietokanta Charpy-V-kokeilla mitausta säteilyn aiheuttamista sitkeystransition lämpötilasiirtymistä materiaaleilla, joiden seosainepitoisuuksia oli systemaattisesti varioitu. Tietokantaa tilastollisesti analysoimalla löydettiin yhteys säteilysiirtymän ja eräiden seosainepitoisuuksien välille. Itse asiassa on esitetty useita toisistaan poikkeavia funktiomuotoja. Kaikkiaan kaavoissa on kuitenkin kupari- ja fosforipitoisuus mukana suurella painokertoimella. NRC on käyttänyt esimerkiksi seuraavaa kaavaa, Regulatory Guide 1.99,

$$\Delta T = [40 + 1000(\%Cu - 0.08) + 5000(\%P - 0.008)] \cdot (\Phi / 10^{19})^{1/2}$$

missä Φ on neutroniannos.

Kuva 2 esittää kaavan mukaista funktiota.

Ilmeisesti teräksessä ylikylläisenä olevan kuparin erkautuminen säteilyn kiihdyttämän diffuusion avulla on yksi tärkeä säteilyhaurastumisen mekanismi. Puhtaissa rauta-kupariseoksissa, joissa kuparipitoisuus on suuri ($> 0,6\%$), Cu-erkaumat voidaan nähdä läpivalaisuelektronimik-



Kuva 2. Säteilysiirtymä neutroniannoksen funktiona.

roskoopilla (TEM). Paineastiateräksissä niitä ei sen sijaan ole havaittu TEM:llä. Vasta ns. atomic-probe-kenttäionimikroskopiolla (AP-FIM) on havaittu säteilyteityissä paineastiateräksissä n. 0,8–5 nm:n suuria kuparirikkaita erkaumia, joissa kupari on rikastunut 5–100-kertaisesti. Myöskin neutronien pienkulmasiirronalla (SANS) on havaittu pieniä erkaumia, jotka eivät kuitenkaan voi olla puhtaasti kuparia. Tulosten tulkinta ei kuitenkaan ole toistaiseksi yksikäsitteistä. Positroniannihilaatio (PA) on edellisiä täydentävä menetelmä, joka mittaa vain materiaalisia olevat vakanssityyppeiset hilavirheet.

Mikromekanismien tutkimisessa onkin välttämätöntä tutkia kaikilla yllä mainituilla menetelmillä samoja näytteitä. Tällainen yhteistyö on käynnissä ja suomalaiset ovat siinä vahvasti mukana sillä PA-mittaukset tehdään Teknillisen korkeakoulun fysiikan laboratoriossa professori Hautojärven ryhmässä.

Jos reaktoripaineastian säteilyvanhenemisen rajoittaa reaktorin käyttöikä, on mahdollista periaatteessa palauttaa paineastia toivutusheikkuttamalla lähes alkupeiräiseen tilaansa. Säteilyhaurastumisen mikromekanismien luotettava tunteminen olisi suureksi avuksi ja loisi varmuutta arvioitaessa tällaisella toimenpiteellä saatavattavaa hyötyä, joka riippuu paineastiamateriaalin käyttäytymisestä säteilylämpökäsittely-uudelleensäteilytyksikäyttöjaksossa ja sen mahdollisissa toistoissa.

Sitkeys materiaaliparametrina ja ydinvoimalaitoksen reaktoripaineastiateräksen sitkeysarvon määrääminen

Teräksen sitkeyttä on perinteisesti mitattu pienellä, $10 \times 10 \times 55$ mm, Charpy-V-koesauvalla. Koe on kuitenkin kvalitatiiv-

vinen eikä se anna suoraan laskennallisessa analyysissä tarvittavia lukuarvoja. Lukuarvojen saamiseksi tarvitaan erikseen määrättäviä Charpy-V-kokeen ja murtumismekaanisesti paremmin määriteltyjen kokeiden välisiä korrelaatioita. Tällaisia murtumismekaanisia kokeellisesti määrättäviä sitkeyshparametreja ovat lineaaris-elastinen jännitysintensiteettitekijä K_{IC} ja elastis-plastinen Ricen esittämä J-integraali, (J_{IC} ja J- Δa -käyrä). Sitkeyttä määrättäessä on olemassa seuraavat reunaehdot:

- Reaktorisydämissä on vain melko vähän tilaa koesauvojen säteilytystä varten.
- Standardin vaatima sauvakoko K_{IC} -kokeessa kasvaa kohtuuttoman suureksi sitkeystason kasvaessa.
- Pätevä J-koe voidaan tehdä huomattavasti pienemmällä koesauvalla kuin K_{IC} -koe. Koe on kuitenkin huomattavasti vaikeampi suorittaa kuin K_{IC} -koe ja standardisoitu mittausmenetelmä on vasta vuodelta 1981 (ASTM-E813-81).

Paineastian sitkeyshparametrin arvo voidaan määrittää tapauksesta riippuen kolmella eri tavalla.

Tapa 1

Jos on olemassa vain referenssimateriaalia koskevat tiedot ja materiaali on standardityyppiä, esimerkiksi länsimaissa käytettävää A533B:tä, käytetään materiaalityypille kokeellisesti määrättyä kaavaa, esim. edellä esitetty kaava, josta säteilysiirtymä ΔT lasketaan neutroniannoksen funktiona.

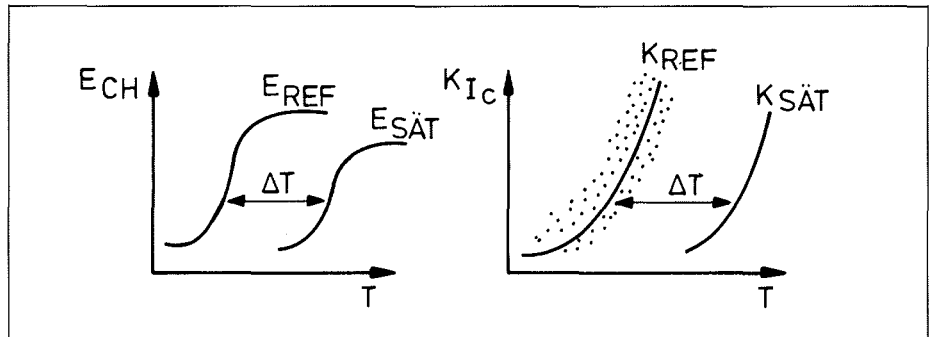
Tapa 2

Normaalimenettely on se, että paineestiamateriaalista valmistetaan materiaaliominaisuuksia monitoroivia Charpy-V- (ns. surveillance) koesauvoja, jotka sijoitetaan useaan säteilytyskapseliin paineastian sisälle. Kapselit poistetaan reaktorista tietyin aikaväleihin, jotta voidaan mitata materiaalin Charpy-transiitokäyrä neutroniannoksen funktiona. Koesauvat saavat suuremman säteilyannoksen kuin paineastian seinämä, joten paineastian ominaisuuksien ekstrapolointi koesauvojen antamista mittaustuloksista edellyttää neutronivuon paikkariippuvuuden (ja absoluuttiarvon) tuntemista. Neutronidosimetriasaa käytetään sekä laskennallisia että kokeellisia menetelmiä.

Charpy-V-koesauvoilla mitatusta säteilyn aiheuttamasta transiitolämpötilan siirtymästä päästään absoluuttisiin sitkeysharvoihin olettamalla, että säteily aiheuttaa Charpy-V-sitkeyshtransitioon samansuuruisen lämpötilasiirtymän kuin K_{IC} -transiitokäyrään. Säteilystä riippumattoman referenssimateriaalin sitkeysh voidaan mitata suurella sauvamäärällä, johon voi sisältyä myös suurikokoisia koesauvoja. Kuva 3 esittää ko. menetelyä.

Tapa 3

Paineestiamateriaalin sitkeyshominaisuuksia voidaan monitoroida myös suoraan



Kuva 3. Säteilytetyn materiaalin K_{IC} -arvojen määrittäminen Charpy-V-sauvoilla mitatusta säteilysiirtymästä.

murtumismekanikan kannalta paremmin määritellyillä J-integraalikoikkeilla.

Esimerkiksi Loviisan paineestiamateriaalin surveillance-ohjelmaan kuuluu n. 900 koesauvaa/laitos ja siihen sisältyy sekä Charpy-V-koesauvoja että väsytyssä-röllisiä murtumismekaanisia koesauvoja. Vapautuneisiin surveillance-positioihin on sijoitettu lisäksi uusia ja osittain uudentyyppisiä koesauvoja.

Surveillance-metodologian kehittäminen

Ydinvoimalaitoksen paineastian sitkeyshominaisuuksien määrittäminen on monivaiheinen prosessi ja sillä saavutettava tarkkuus riippuu lukuisista eri tekijöistä. Paineastian säteilyhaurastuminen voi olla voimalaitoksen käyttöikä rajoittava tekijä. On ilmeistä, että lähestyttäessä tietyn analyysin tuloksena määriteltyä käyttöikää, kasvaa luotettavan ja tarkkan tiedon tarve, jotta voidaan taata laitoksen turvallinen käyttö eikä toisaalta syöllistyä tiedon puutteesta johtuviin ylikonservatiivisiin arvioihin.

IAEA on organisoinut jo kaksi reaktori-paineastiatäräksen säteilyhaurastumista käsittelevää kansainvälistä tutkimusohjelmaa. Kolmas ohjelma, IAEA Co-ordinated Research Programme on "Optimizing of Reactor Pressure Vessel Surveillance Programmes and Their Analyses", Phase 3, johon Suomikin (VTT, IVO) osallistuu, on parhaillaan käynnissä. Kukin yhteistyöohjelmaan osallistuva maa määrittelee itse oman ohjelmansa ja kustantaa omat tutkimuksensa. IAEA toimittaa veloituksetta osallistujien käyttöön muutamaa eri tyyppiä olevaa terästä ja julkaisee tutkimuksen tulokset. Keskeisiä kansainvälisen tutkimuksen kohteena olevia kysymyksiä, joihin myös IAEA:n tutkimusohjelma pyrkii vastaamaan, ovat mm.

1. Korrelaatio Charpy-V-kokeen ja K_{IC} -kokeen antamien tulosten välillä, erityisesti kummallakin kokeella mitattujen transiitolämpötilasiirtymien välillä.

Melko suuri datamäärä osoittaa, että K_{IC} -kokeella mitattu transiitolämpötila $T_{100 MPa \sqrt{m}}$ voidaan laskea Charpy-V-transiitolämpötilasta $T_{28 J}$ hyvällä tarkkuudella kaavalla

$$T_{100 MPa \sqrt{m}} = T_{28 J} - \text{vakio}$$

Koska korrelaatioissa on mukana sekä referenssimateriaalia että säteilytettyä materiaalia, olisi tämän mukaan kummallakin kokeella mitattu säteilysiirtymä sama. IAEA:n tutkimusohjelman tuloksena saadaan runsaasti lisäpisteitä ko. korrelaatioon.

2. Murtumissitkeyden riippuvuus koesauvan koosta ja erityisesti pienen surveillance-positioon mahtuvan koesauvan käyttökelpoisuus.

Koesauvan koko vaikuttaa tunnetusti kokeesta saatavaan sitkeysharvoon lähinnä seuraavista syistä:

Sauvakoko ja geometria vaikuttaa säteilyn kärjen jännitysjakautuman muotoon.

Haurasmurtuman tapauksessa esiintyy tilastollinen sauvakokoefekti.

3. Säteilysiirtymän riippuvuus neutroniannoksesta ja teräksen kemiallisesta koostumuksesta

$$\Delta T = A(\text{Cu, P, Ni, ?}) \cdot \Phi^n,$$

$$n = 1/3 - 1/2$$

4. Annosnopeuden vaikutus säteilysiirtymään.

Säteilytyksiä tehdään sekä tutkimusreaktoreissa että ydinvoimalaitoksissa. Neutroniannosnopeudet poikkeavat toisistaan noin tekijällä 100—500.

5. Oikean neutroniannoksen mittayksikön löytäminen.

Käytössä on kaksi eri mittayksikköä:

— Tietyn energian ylittävien neutronien lukumäärä, tavallisimmin $E > 1 \text{ MeV}$.

— Fysikaalinen mitta, joka perustuu neutronin kykyyn siirtää metalliatomin ytimiä pois hilapaikaltaan. Annoksen mitta on metalliatomia kohti laskettujen siirtymien lukumäärä (displacement per atom, dpa). PWR-laitoksen paineastian suunnittelussa käyttöiässään saama maksimiannos on noin $\leq 0,1 \text{ dpa}$.

Oikeampana neutroniannoksen mittayksikkönä voidaan pitää sitä, joka antaa pienemmän hajonnan mitatuille säteilysiirtymille. Käytettävä annosmitta vaikuttaa mm. siihen, kuinka nopeasti säteilyannos vaimenee siirryttäessä paineastian sisäpinnalta ulkopinnalle, dpa-yksikön muutoks on vain noin 50 % toisen yksikön muutoksesta.

Toistaiseksi ei ole voitu osoittaa, että toinen mittayksikkö olisi selkeästi toista parempi.

6. Neutroniannoksen mittausteknikan kehittäminen on myös surveillance-metodologiaan oleellisesti liittyvä tekijä, joskin sitä kehitetään etupäässä muiden tutkimusohjelmien puitteissa.

IAEA:n tutkimusohjelmassa käytettävää materiaalia on valmistettu runsaasti. Muutamassa vuodessa siitä muodostuu hyvin tutkittu materiaali, jota mahdollisesti käytetään säteilytutkimuksissa referenssimateriaalina. Ohjelma toimii myös laboratorioden välisenä vertailutestinä ja sen perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä mittaus- ja analyysimenetelmien tämähetkisestä luotettavuudesta.

Suomalaisten tutkimuspanos keskittyy kohdissa 1 ja 2 mainittujen ongelmien selvittämiseen. Kolmivuotiset säteilytykset, jotka aloitettiin 1985 ja 1986, suoritetaan Loviisassa.

Toivutushehku

Säteilyn haurastuttama teräs voidaan palauttaa alkuperäiseen tilaansa lämpökäsittelyllä. On todettu, että toivutushehku noin 100–150°C säteilytyslämpötilaa korkeammassa lämpötilassa palauttaa lähes täysin alkuperäisen sitkeystason.

Toivutushehkuksen aiheuttamista mikrorakenteen muutoksista on olemassa muutamia tutkimuksia.

Eräät neutronisironatulokset viittaavat siihen, että osa oletetuista kuparierkaumista pyrkii liukenemaan matriisiin ja osa kasvamaan suuremmiksi. On myös viitteitä siitä, että toivutushehkuksen jälkeinen haurastumisnopeus olisi eräissä tapauksissa huomattavasti pienempi kuin alkuperäinen haurastumisnopeus. Tämä voitaisiin selittää toivutushehkuksessa tapahtuneella erkaumien karkenemisellä.

Koska toivutushehku voi olla käyttökelpoinen keino palauttaa reaktoripaineastian alkuperäinen sitkeystaso, on se vilkkaan kansainvälisen tutkimuksen kohteena. Loviisassa on parhaillaan säteilytyksessä suurehko määrä toivutushehku-tettuja koesauva-aihiota, jotka on valmistettu testatuista surveillance-sauvoista. Aihioista valmistetaan nopealla hitsausmenetelmällä myöhemmin täysikokoisia koesauvoja. Tämän tutkimuksen tavoitteena on kerätä teknisiä tietoja materiaalin käyttäytymisestä, jotta toivutuskäsittelyllä mahdollisesti saavutettavissa olevaa hyötyä voidaan arvioida realistisesti.

Toistaiseksi on suoritettu ainakin kaksi todellisen ydinreaktorin paineastian toivutushehkuksista. Vuonna 1967 toivutushehkuksia Yhdysvaltain armeijan reaktoria SM-1A 144 tuntia lämpötilassa 300°C. Reaktorin käyttölämpötila oli 221°C. Lämpökäsittelyllä päästiin lämpötilasiirtymässä noin 70 %:n toipumisasteeseen.

Vuonna 1984 toivutushehkuksia belgialaisen tutkimusreaktorin BR-3:n paineastiaa 168 tuntia lämpötilassa 343°C. Reaktorin käyttölämpötila on 260°C. Lämpökäsittelyllä saavutetun hyödyn arviointi on vielä kesken, sillä arkistomateriaalin puuttuessa on jouduttu valmistamaan ja säteilyttämään simulointinäytteitä.

Molemmassa toivutuskäsittelyissä paineestiat on lämmitetty vedellä, jolloin paineastian paineenkestävyys on asettanut ylärajan toivutuslämpötilalle.

Yhteenveto

Säteilyhaurastumista teknisenä ilmiönä on tutkittu melko paljon ja tärkeimpien sitkeyden säteilysiirtymään vaikuttavien

muuttujien, kuten epäpuhtauspitoisuuksien (Cu, P, Ni), neutroniannoksen ja säteilytyslämpötilan, vaikutus tunnetaan pääpiirteittäin. Nykyisin voidaankin valmistaa laitteita, joissa säteilyhaurastumisen jää lähes merkityksettömäksi, käyttämällä riittävän puhtaita teräksiä ($P \sim 0,01 \%$, $Cu < 0,1 \%$), kasvattamalla polttoaineen ja paineastian seinämän välistä etäisyyttä, jolloin teräksen saama neutroniannos jää pieneksi ja siirtämällä hitsisaumat, joiden epäpuhtaus on yleensä suurempi kuin perusmetallin, kauemmaksi sydänalueelta.

Säteilyhaurastumisen aiheuttavat mikrorakenteen muutokset ovat edelleenkin puutteellisesti tunnettuja, mikä johtuu muutosten pienestä mittakaavasta ($\sim 1 \text{ nm}$) ja siitä, että vaikuttavia muutujia on paljon.

Paineastian toivutushehku on yksi periaatteellinen mahdollisuus poistaa säteilyhaurastumisesta erällä vanhemmilla laitteilla aiheutuneita ongelmia. Tätä mahdollisuutta pohjustavaa tutkimus- ja selvitystyötä tehdään usealla taholla. □

Pertti Salminen

VTT:n ydinenergiatutkimus lisääntynyt

VTT:ssa käytettiin ydinenergia-alan toimintaan vuonna 1986 yhteensä 146 henkilötyövuotta, mikä merkitsee 9 % kasvua edellisvuoteen verrattuna. Vastaavat kokonaiskustannukset ovat 50 Mmk. Ydinvoimalaitosten ikääntymiseen liittyvä turvallisuustutkimus kasvaa voimakkaasti ja tutkimuksen painopiste on yleensäkin siirtynyt yhä enemmän ydinvoimalaitosten käyttöturvallisuuden suuntaan. Vahvasti turvallisuuspainotteinen tutkimus muodostikin lähes puolet kokonaistyöpanoksesta vuonna 1986.

Seuraavan sivun taulukossa on esitetty ydinenergia-alan toiminnan laajuus VTT:ssa vuosina 1985 ja 1986. Tutkimusvolyyymi on ilmoitettu henkilötyövuosina,

mikä on markkoja kuvaavampi mittayksikkö puhuttaessa tutkimuksesta. Tutkimus on ryhmitelty KTM:n käyttämän tutkimusaluejaottelun mukaan ja sen mukaan, onko kysymyksessä KTM:n rahoittama projekti vai ei. Muista kuin KTM:n rahoittamista projekteista on valtaosa voimayhtiöiden ja teollisuuden tilaamia toimeksiantoja. Tärkeitä rahoittajia ovat myös STUK ja VTT itse. Vuonna 1986 kokonaisrahoitus oli 50 Mmk, josta KTM:n osuus 12 Mmk, VTT:n 16 Mmk (sisältäen myös julkisrahoitteen tutkimuksen laskennalliset erät) ja muiden 22 Mmk.

Taulukosta on selvästi havaittavissa painopisteen siirtyminen turvallisuustutkimuksen suuntaan. Tosin Tshernobylin onnettomuus aiheutti poikkeuksellista tutkimustarvetta vuonna 1986 ja vielä tänäkin vuonna. Erytisestä on lisääntynyt voimalaitosten ikääntymiseen, rakenne-materiaaleihin sekä häiriö- ja onnettomuustilanteisiin liittyvä tutkimus. Tutkimusreaktorin käytön osalta merkittävän pienemmissä vuoteen 1985 verrattuna aiheutti isotooppiuotannon siirtyminen VTT:n reaktorilaboratoriosta VTT Technology Oy:n hoidettavaksi.

Tutkimusalueet

Tutkimusalueet kattavat varsin laajasti koko ydinenergia-alan tutkimuksen. Seuraavassa esitetään luettelomaisesti kuvaus VTT:n toiminnasta eri tutkimusalueilla tärkeimpine tutkimusaiheineen:

1. Ydinvoimalaitosten rakenteellinen turvallisuus ja käyttöturvallisuus sekä ydinenergian tuotannon ympäristövaikutukset:
 - rakennemateriaalit (säteilyaurastuminen, murtumismekanismit, reaktoriveden vaikutus materiaaleihin)
 - rakenteiden kestävyys (rakenne- ja vaurioanalyysit, murtumismekaaniset turvallisuustarkastelut, suojarakennuksen kestävyys)
 - häiriö- ja onnettomuustilanteiden analyysit (lämpö- ja virtaustekniset kokeet ja analyysit, vakavien reaktorionnettomuuksien arviointi, ydinvoimalaitosanalysointin kehitystyö)
 - luotettavuustekniikka ja todennäköisyysperustainen turvallisuusanalyysi (PSA/PRA menetelmän kehitys, komponenttien ikääntymisen todennäköisyysperustainen tarkastelu, käyttökokemusten hyödyntäminen, komponenttien ja järjestelmien kunnonvalvonta)
 - ydinvoimalaitosautomaatio (säätö- ja ohjausjärjestelmät, valvomot, laitoksen muut informaatiojärjestelmät, käyttöhenkilöstön koulutus, simulaattoritekniikka)
 - ympäristövaikutukset (reaktorionnettomuuksien ympäristöseuraukset, eri energiamuotojen vertaileva ympäristötutkimus)
 - testaus-, tarkastus- ja mittaustointi (NDT-menetelmien tutkimus- ja kehitystyö, reaktori-mittaustekniikka, aktiivisten rakennemateriaalien testaus)
2. Ydinpolttoainehuolto
 - polttoainekierto (uraanin kysyntä- ja tarjonta-arviot, kustannusseuranta, jälleenkierätyksen taloudellisuuden ja merkityksen arviointi)
 - polttoaineen käytön suunnittelu (reaktorifysiikka, transienttilaskut, latauskaavioiden suunnittelu, tekoälyn soveltaminen)
 - polttoaineen käyttöominaisuudet (uusien polttoaineiden ominaisuudet ja laadunvarmistus, polttoaineen kestävyys ja suorituskyky, polttoaineen säteilytyskokeet)
3. Ydinjätehuolto
 - voimalaitosjäte ja käytetty polttoaine (loppusijoitustilan turvallisuusanalyysit, radionuklidien kulkeutumismallit, ihmisen altistuminen säteilylle, käytetyn polttoaineen varastointi)
 - laitosten käytöstäpoisto ja purkujäte (purkamisen turvallisuusanalyysit, purkamistekniikka, jätteiden loppusijoitus, FiR 1-tutkimusreaktorin purkamisen suunnittelu)

Taulukko. VTT:ssä ydinenergiatutkimukseen käytetty työaika henkilötövuosissa tutkimusalueittain vuosina 1985 ja 1986.

Tutkimusalue	KTM-rahoitettiset projektit		Muut projektit ja toimeksiannot		Yhteensä	
	1985	1986	1985	1986	1985	1986
1. Ydinvoimalaitosten rakenteellinen turvallisuus ja käyttöturvallisuus sekä ydinenergian tuotannon ympäristövaikutukset	35	38	21	32	56	70
2. Ydinpolttoainehuolto	6	7	5	6	11	13
3. Ydinjätehuolto	11	14	10	11	21	25
4. Ydintekniikan perustutkimus ja erityissovellukset	3	3	36	28	39	31
5. Ydinvoimalaitosten määräaikaistarkastukset	—	—	6	7	6	7
Yhteensä	55	62	78	84	133	146

4. Ydintekniikan perustutkimus ja erityissovellukset
 - ydinenergiajärjestelmät (ydinenergiatuotannon kilpailuasema tulevaisuuden energiahuollossa, uusien laitoistyyppien soveltuvuus Suomeen)
 - fuusiotutkimus (perustietämyksen ylläpito)
 - FiR 1-tutkimusreaktori (reaktorin käyttö ja ylläpito, neutronifysiikka, isotooppiuotannon menetelmän kehitystyö, muut reaktorin käyttöön perustuvat toimeksiannot)
5. Ydinvoimalaitosten määräaikaistarkastukset
 - NDT-mittaukset (akustinen emisio, ultraääni, pyörrevirta)

Tutkimuksen tuloksellisuus

Tutkimuksen laajuus ja siihen käytetty rahamäärä ovat varsin helposti mitattavissa, mutta tutkimuksen tarpeellisuuden ja tuloksellisuuden arviointi on jo huomattavasti vaikeampaa. Suomalaisesta ydinenergiatutkimuksesta voidaan kuitenkin todeta, että se on ollut ja on tärkeä osatekijä nykyisten voimalaitosten käyttövarmuustason ja turvallisuuden saavuttamisessa ja ylläpitämisessä. Mahdollisten

uusien laitosten kannalta tutkimuksellisen tietotaidon ylläpitäminen on myös ensiarvoisen tärkeää. Alan tutkimukseen sijoitettu pääoma on varmasti tuottanut voittoa riippumatta siitä, tarkastellaanko asiaa voimayhtiöiden, teollisuuden vai Suomen kansantalouden kannalta.

Suomen ydinenergiatutkimus on erittäin riippuvainen kansainvälisestä yhteistyöstä ja tiedonsaannista. Suhteellisen pienelläkin omalla tutkimuspanoksella voidaan saada käyttöön laajojen kansainvälisten yhteistyöprojektien tulokset. Siten eräs tapa mitata tutkimuksen tuloksellisuutta on tarkastella kansainvälisten yhteistyöprojektien kokonaislaajuutta ja tuloksellisuutta. Vuonna 1986 VTT:ssä käytettiin ydintekniikan alalla kansainvälisiin yhteistyöprojekteihin ja sopimus pohjaiseen tiedonvaihtoon noin 40 henkilötövuotta. Näiden projektien kokonaislaajuus on noin 5000 henkilötövuotta.

Julkaisu toiminnan tasoa ja laajuutta pidetään myös eräänä tutkimuksen tuloksellisuusmittarina. Vuonna 1986 KTM:n rahoittamissa VTT:n ydinenergiaprojekteissa valmistui 61 sarjajulkaisua, 6 opinnäytettä sekä 400 artikkelia, esitelmiä tai työraporttia. □

TVO ryhtyy hankkimaan uraania Kiinan kansantasavallasta 17.6. tehdyn sopimuksen mukaisesti. Kiinasta toimitetaan noin 30 % TVO:n vuosien 1988—1995 raakauranitarpeesta. Kaupan arvo on 150 miljoonaa markkaa. Uraani väkevöidään Neuvostoliitossa ja valmistetaan polttoaineeksi Ruotsissa ja Saksan liittotasavallassa.

TVO:n tiedote 17.6.87

Loviisan ydinvoimalaitoksen hukkalämpöä voitaisiin käyttää talvipuutarhan lämmittämiseen. Talvipuutarha olisi kiinnostava turistikohde trooppisine kasveineen ja apinoineen. Asiaa käsitellään Loviisan kaupunginhallituksessa. Nucleonics Week, 16.7.1987

Muuttaako VTT ydinenergiakurssiaan?



VTT:n eläkkeelle siirtynyt pääjohtaja Pekka Jauho ja nykyinen pääjohtaja Markku Mannerkoski vaihtavat pääjohtajan nuijaa.

VTT:n pitkäaikainen pääjohtaja, professori, FT Pekka Jauho (64) jäi eläkkeelle 1.2.1987. Jauho toimi VTT:n pääjohtajana vuodesta 1970. VTT:n uudeksi pääjohtajaksi nimitettiin 1.4.1987 alkaen professori, TkT Markku Mannerkoski (50). Ennen nimitystään Mannerkoski toimi Oulun yliopiston rehtorina.

Pekka Jauho tunnetaan pitkän linjan ydinenergiämiehenä ja hän on peruskoulutukseltaan ydinfyysikko. Jauho toimii edelleen mm. Atomienergieneuvottelukunnan puheenjohtajana. Hän oli ATS:n ensimmäinen puheenjohtaja ja on nykyään yksi Seuran neljästä kunniajäsenestä. Jauhon työn merkitys Suomen onnistuneen ydinenergiatuotannon suunnittelu- ja käynnistämisvaiheessa on huomattava. Erityisesti Jauho ymmärsi kor-

kean kotimaisen tietotaidon ja koulutustason merkityksen onnistumisen osatekijänä.

Ydinvoimaihmisille Markku Mannerkoski on Jauhoa huomattavasti tuntemattomampi henkilö. Hänen ansioihinsa on luettava Oulun yliopiston nostaminen nykyiselle korkealle ja arvostetulle tasolle 19-vuotisen rehtorin uransa aikana. Lisäksi hänen panoksensa Oulun teknologiakylän syntymiseen ja Oulun teknologiakaupungin maineen luomiseen on kiistaton. Peruskoulutukseltaan Mannerkoski on metallurgi ja Jauhoon verrattuna hänet tunnetaan ehkä paremminkin teollisuus- ja talousasiantuntijana kuin syvällisenä tekniikan ihmisenä.

Seuraavissa artikkeleissa professorit Jauho ja Mannerkoski pohtivat hyvin vapaaehtoisen toimeksiannon pohjalta toisistaan riippumatta ydinenergian nykytilaa ja tulevaisuutta sekä sen merkitystä Suomelle koko energiahuollon osatekijänä. Otsikon kysymyksen voivat lukijat itse päätellä vastauksen. □

Pekka Jauho

Tshernobyl, Suomi ja ydinenergian tulevaisuus

Ydinenergian voimakas ja organisoitu vastustus, sattuneet onnettomuudet, lähinnä Tshernobyl ja TMI sekä sähkön kysynnän kasvun pieneneminen liitettyinä ydinsähkön kilpailukykyyn huononemiseen ovat johtaneet maailmanlaajuiseen ydinenergiakriisiin. Se ilmenee uusien voimalaitostilausten vähäisyytenä ja loogisten ja sisäisesti ristiriidattomien ydinenergioiden murentumisena. Linjansa ovat voineet säilyttää vain Ranska ja, Tshernobylistä huolimatta, Neuvostoliitto. Asiantila on erittäin huolestuttava ja varsinkin epävarmuus

pitkän aikavälin ratkaisuihin voi johtaa vakaviinkin energiakriiseihin.

Ydinenergiaratkaisut ovat luonteeltaan globaalisia

Maailman energiahuolto on nähtävissä olevaksi ajaksi sitoutunut öljyyn, kivihiileen, maakaasuun, biomassaan, vesivoimaan ja ydinenergiaan. Kaikki muut energialähteet voidaan 50 vuoden tähtämällä unohtaa paitsi jo olemassaolevien järjestelmien piirissä tapahtuvaa käytön tehostusta ja säästämistä. Me olemme nykyisen järjestelmän vankeja, sillä muutokset kestävät useita vuosikymmeniä ja ei vain elintasomme vaan myös elämisen tasomme, itse asiassa koko elämämme on riittävän ja häiriintymättömän energiantuotannon varassa.

Ydinenergian osuus on suuri useiden teollistuneiden maiden sähköntuotannosta, kokonaisuudessaan se vastaa energiaekvivalenttisesti koko Saudi Arabian öljyn tuotantoa. Jos jostakin syystä, esimerkiksi alhaiseksi arvioidusta turvallisuustasosta johtuen, ydinenergian tuotanto jouduttaisiin keskeyttämään maailmanlaajuisesti, se johtaisi sietämättömään öljyn kohdistuvaan paineeseen, sillä öljy on ainoa, joka riittävän nopeasti kykenisi korvaamaan poistuvan sähkön tuotannon. Luopumispäätöksestä seuraisi todennäköisesti kaikkia entisiä energiakriisejä vakavampi maailmanpoliittinen tilanne uhreineen, joiden lukumäärä ylittäisi moninkertaisesti ydinenergian käytön haittavaikutusten pessimistisimmätkin arviot. Ydinenergia on siis globaalisesti välttämätön edellyttäen, että sen riittävä turvallisuustaso ja ympäristövaikutusten hyväksyttävyyden voidaan saavuttaa ja ylläpitää kaikilla reaktorityypeillä jokaisessa käytön vaiheessa.

Ei ole olemassa mitään kvantitatiivista keinoa sanoa, mikä on hyväksyttävä turvallisuustaso, mutta kvantitatiivinen turvallisuusanalyysi antaa osviittoja päätöksenteon tueksi. Jos oletetaan, että nyky näkymillä maailmassa toimii muutaman vuosikymmenen kuluttua 1 000 voima-reaktoria, niin voisi kuvitella, että yksi vakava sydämen sulamisonnettomuus olisi siedettävissä korkeintaan kerran sadassa vuodessa. Tämä merkitsisi sitä, että sulamistodennäköisyys oli noin 10^{-5} vuodessa reaktoria kohti. Vakavia ympäristövaikutuksia voisi aiheutua joka kymmennessä tapauksessa eli kerran 1 000 vuodessa. Uskon, että nämä mielestäni hyväksyttävät arvot ovat saavutettavissa moitteettomalla teknisellä ratkaisulla, valiolaatuisella henkilöstöllä, hyvällä turvallisuusvalvonnalla, ennakoivalla huollolla ja taitavalla toiminnan johtamisella.

Suomen rooli ydinenergian käyttäjänä

Huolimatta siitä, että ydinenergian osuus sähköntuotannostamme on suuruusluokkaa 40 % on maamme merkitys koko maailmanlaajuisen ydinenergian tuotannon kohdalla vain suuruusluokkaa prosentti. Suomella ei siis ole globaalista merkitystä ei ydinenergian eikä myöskään energian maailmanlaajuisen tuotannon kannalta. Energiatekniikan ja tuotantojärjestelmien osalta maamme on täysin ulkomaisen kehityksen varassa, me voimme korkeintaan kehittää omia osajärjestelmiä ehkä suurellakin menestyksellä sekä soveltaa mielekkäästi tarjolla olevia järjestelmiä.

Suomi kuuluu niihin pieniin, pitkälle teollistuneisiin maihin, joissa ydinenergian käyttökokemukset ovat olleet hyvät. Käyttö on muodostunut taloudellisesti kannattavaksi ja kilpailukykyiseksi verrattuna muihin energiantuotantomuotoihin. Tuotanto on ollut luotettavaa ja turvallista. Tila ei anna mahdollisuutta analysoida tähän tilanteeseen johtaneita syitä, mutta ydinenergian näkeminen vain erääksi energiantuotannon vaihtoehdoksi ja siten sen kytkeminen olemassaolevan energiantuotantojärjestelmän asiantunteemukseen sekä koulutukseen ja henkilöstön tasoon alusta alkaen kiinnitetty huomio ovat hyvän tuloksen avaintekijöitä.

On ehdottoman tärkeää muistaa, että ydinenergian turvallisuus riippuu ensisijaisesti käytönaikaisesta turvallisuudesta; jätehuollon ja voimalaitoksen purkamisen ongelmat ovat kertalukua pienempiä, vaikka ne ovat saaneet mm. julkisessa keskustelussa usein liian suuren suhteellisen huomion. Taloudellinen menestys edellyttää luotettavuutta, joka puolestaan kytketty usein, ei kumminkaan aina, turvallisuuteen. Taloudellisesti hyvin toimiva laitos on pääsääntöisesti myös turvallinen ja se kykenee kantamaan turvallisuuden edellyttämät suuret kustannukset, joiden keskeisiä aiheuttajia ovat huolto, koulutus, turvallisuusvalvonta ja jätekäsytysten hoito.

Voidaan tyydytyksellä todeta, että maamme on edelläkävijä ydinenergian kustannusten paikallistamisessa niiden aiheuttajalle. Niinpä ydinvoimalaitosten käytön

aikana kerättävä jätehuolto- ja purkamiskustannusmaksu sekä sen rahastointi valvotusti otettiin käyttöön ihan ensimmäisten maiden joukossa maailmassa. Tämä menettelyhän on ainoa oikea pyrittäessä suoritamaan eri energiamuotojen objektiivisia kustannusvertailuja. Myöskin ydinenergian hyväksyttävyydelle yleisön keskuudessa on tärkeää, ettei meidän sukupolvemme aiheuttamia kustannuksia, joiden hyödyn olemme nauttineet, siirretä tulevien sukupolvien maksettaviksi. Meidän voimayhtiömme osoittivat jätehuollon järjestelyssä sukupolvien yli ulottuvaa taloudellista vastuuntuntoa.

Ydinenergian käyttö on osaltaan taannut maamme sähköenergian kohtuullisen ja teollisuutemme kilpailukyvyyn takaavan hintatason. Se on myös osallistunut sähköntuotantomme korkean laatutason säilyttämiseen, tehontarve- ja energiatarvekriisiin todennäköisyyden on pysynyt hyvin pienenä sekä jännite- ja taajuusstabiilius moitteettomana. Nykyisessä yhteiskunnassa näiden useasti unohdettujen laatu- ja elintärkeiden merkitys on sananmukaisesti elintärkeä!

Tarvitaanko maassamme energiaa tulevaisuudessa?

Tarvitaanko maassamme energiaa tulevaisuudessa, on kysymys, johon ei ole yksikäsitteistä vastausta. Mikäli tämän energiamuodon taloudellisuus ja kilpailukyky, riittävä turvallisuustaso verrattuna muihin energiatuotannon muotoihin sekä hyväksyttävä ympäristö- ja terveysvaikutus voidaan ylläpitää, on syytä edelleenkin pitää ydinenergiaa realistisena vaihtoehtona. Perusteluna tälle voidaan mainita mm. seuraavaa:

- Maamme koko olemassaolo on riittävän ja kaikissa olosuhteissa toimintakykyisen energiantuotantojärjestelmän varassa. Elämä ei yksinkertaisesti olisi mahdollista nykyisellä väestömäärällä meidän pohjoisissa olosuhteissamme ilman hyvin toimivaa energiantuotantoa.
- Energiatuotannon varmistamiseksi on käytettävä mahdollisimman laajaa primäärienergiaperäisiä eli on turvaututtava maakaasuun, öljyyn, kivihiileen, uraaniin, vesivoimaan ja biomassaan.
- On pyrittävä eri energiamuotojen korvaavuuteen ja järjestelmän joustavuuteen sekä tuotetun energian hinnan stabiiliisuuteen primäärienergiälähteiden hintavaihteluita vastaan.
- Kaikissa primäärienergioissa on taattava riittävä varmuusvarastointi. Tämä on helppoa ja suhteellisen halpaa ydinpolttoaineen kohdalla.
- Meillä on moraalinen velvollisuus osallistua omalla pienellä osuudellamme myös maailman energiaongelman mahdollisimman kitkattomaan hoitamiseen hillitsemällä öljyn kohdistuvia paineita ydinenergian käytön avulla. Tämä on rikkaiden teollistuneiden maiden tehtävä, sillä vain niillä on tällä hetkellä riittävä tietotaso, pääomat ja infrastruktuuri ydinenergian taloudelliseksi ja turvallisesti tuottamiseksi.
- Meillä ei ole riittävästi kotimaisia korvaavia energialähteitä ydinenergian ti-

lalle. Itse asiassa ydinenergia on suu- relta osalta "kotimaista" kustannus- rakenteen pääomapainotteisuuden vuoksi.

Meidän on siis ydinenergian kohdalla jatkettava tulokselliseksi osoittautunutta realistista linjaamme. Energian tuotantomme on pitkällä tähtäimellä kytkettävä kysyntään ja rakennettava järjestelmä, joka käyttäytyy hyvin kaikissa ajateltavissa olosuhteissa. Tässä järjestelmässä on ydinenergialla oma osuutensa.

Keskeisiä tehtäviä ovat huolehtiminen alalle antautuvan henkilöstön tasosta. Tämä ongelma on kaiken avain ja onnistuminen sen ratkaisussa takaa ydinenergian turvallisen käytön myös tulevaisuudessa. Eräänä tärkeänä osatehtävänä on alan tutkimuksen tason ja määrän säilyttäminen sekä tehtävän työn sisällön kehittäminen kiinnostavaksi. Näin taataan menestyksen edellytyksenä olevan luovan tieteellisen ilmapiirin syntyminen sekä edesautetaan tarpeellisten ulkomaisten yhteyksien syntymistä ja säilymistä.

On myös välttämätöntä huolehtia valvontaviranomaisen toimintamahdollisuuksien ylläpidosta sekä henkilöstön että aineellisten voimavarojen osalta. Ydinenergian kilpailukyky on pidettävä oikeudenmukaisena muihin energialähteisiin verraten säilyttämättä sille ylimääräisiä kohtuuttomia kustannuksia. Näin menetellen voidaan maamme maine ydinenergian menestyksellisenä soveltajana säilyttää myös tulevaisuudessa.

Yhteiskunnallinen päätöksenteko ei perustu matematiikkaan

Mikä ydinenergian rooli on maassamme tulevaisuudessa, se riippuu poliittisesta päätöksenteosta. Poliitikot ja viimekädessä kansa on saatava vakuuttumaan, että tämä energiamuoto on välttämätön Suomen tulevaisuuden energiahuollolle. Ydinenergia on syntynyt tieteellisen tutkimuksen tuloksena, sen ovat ottaneet käyttäntöön vailla poliittista kokemusta olevat korkealaatuiset tutkijat ja teknikot, sitä varjostaa ydinaseen varjo. Tehtävä ei siis ole helppo, ei meillä eikä muualla. Kumminkin siinä on onnistuttava, sillä en ole havainnut yhtään realistisena pitämäni pitkän tähtäimen energiaskenariota, jossa ydinenergialla ei olisi merkittävä osa. Mielestäni Suomi ei voi olla osallistumatta globaalisen energiaongelman ratkaisuun jättämällä käyttämättä erästä valmiiksi kehitettyä energiantuotantojärjestelmää, jonka käytön hallitsemisen se on käytännössä osoittanut.

On mahdoton ennustaa, mitä kriisejä ja vaikeuksia tarvitaan ennen kuin päätöksiin ollaan valmiita. Toivoa voi, että yleinen mielipide vähitellen kykenee muodostamaan objektiivisen ja kiihottoman kuvan eri energiantuotantomuotojen mahdollisuuksista, vaaroista ja ympäristövaikutuksista. Tässä tehtävässä on demokraatioissa medioilla, lehdistöllä ja televisioilla, erittäin suuri vastuu; vain tosiasioissa pidättäytyvän tiedon levittämällä voidaan päästä järkeviin ratkaisuihin. □

Ydinenergian tulevaisuus

Viime talvena maassamme käytiin hyödyllinen julkinen keskustelu arvostetun filosofimme Georg Henrik von Wrightin tekniikan kehityksestä ja vaikutuksesta esittämien ajatusten pohjalta. Ne olivat luonteeltaan varsin pessimistisiä. Esillä olivat niin "romanttinen anti-teknologia" kuin sen taustalla ns. teknologinen determinismin. Viimeksi mainitun hypoteesin mukaan tekniikka kehityy autonomisesti ja sen luomukset otetaan käyttöön joka tapauksessa, kokonaisvaikutuksista ja ihmisen tahdosta riippumatta. Miten on käynyt ydinenergian kohdalla?

Radioaktiivisuuden havaitsivat ja sen perusteet selvittivät aikoinaan perustutkimuksen edustajat. He eivät tällöin tähänneet mihinkään sovellutuksiin, ydinvoimaloista tai -räjähteistä puhumattaakaan. Ne molemmat kuitenkin aikanaan toteutuivat tieteen ja tekniikan kehityksessä. Onko siis kysymyksessä ollut ihmisen tahdosta riippumattomien lakien määräämä eteneminen? Ei sentään aivan. Ensimmäisten ydinräjähteiden kehittäminen ja käyttö sotatoimissa oli nimenomaan suurvallan tietoisien poliittisten päätösten seurausta, vaikka jotkut vapaat tutkijat kieltämättä siinä kovasti avittivatkin. Sittenmin on puolestaan seurannut aikakausi, joka on kyllä joutunut näkemään yli 150 uutta sotaa, mutta ydinaseita ei ole niissä käytetty. Juuri ydinaseisiin perustuen on tietoisella politiikalla ylläpidetty "kauhun tasapainoa". Sen merkeissä aikaisempi sotien polttopiste, Eurooppa, on saanut nauttia pisimmästä rauhan kaudesta 1800 vuoteen.

Ydinenergian ottaminen rauhanomaiseen käyttöön on sekä edellyttänyt paitsi "tekniikan sisäisiä", myös poliittisia päätöksiä. Erityisesti viime vuosien tapahtumat osoittavat, että myös varsinaisen päätöksentekomekanismin ulkopuolisella kansalaismielipideilmastolla on tässä asiassa suuri vaikutus.

Onhan ydinenergiainnostuksen kautta seurannut aika, jona uusia voimaloita on perusteilla ennakoitua olennaisesti vähemmän ja joissain maissa on päätetty

luopuakin niistä, jopa ennen käyttöäin täyttymistä. Ydinenergiaa voikin vain vain käyttää esimerkkinä teknologisesta determinismistä, jonka mukaan kaikki tekniikan tarjoamat mahdollisuudet myös toteutuvat. Ihminen voi kyllä valita.

Minkälaisin perustein sitten valinta tapahtuu? Lähtökohtana on tietenkin ihmisen halu saavuttaa jotain. Ja jos haluamme yhtä, meidän on yleensä tehtävä ja hyväksyttävä samalla jotain muuta. Jos esimerkiksi halutaan työttömyysasteen maassamme pysyvän enintään 5 % paikkeilla ja ylläpitää hyvinvointivaltiota, tarvitaan tässä reaalisessa maailmassa tavoitteen saavuttamiseksi taloudellista kasvua. Työehtosopimusneuvottelut ja niihin usein liittyvät lakot osoittavat kouriintuntuvasti että kansalaiset eivät ole valmiit luopumaan myöskään henkilökohtaisten tulojensa lisäyksestä. Ihmisten tahdosta näissä suhteissa ei ole epätietoisuutta.

Näihin tavoitteisiin pääsy edellyttää toimivaa energiahuoltoa. Sen käytössä olevat perusergialähteet ovat Suomessa suhteellisen niukat. Vesivoima on jo valjastettu niin suurelta osin, että vaikka ympäristönäkökohdat täysin sivuutettaisiin, koskia rakentamalla ei pitkälle päästäisi. Puuvarastoistamme vain jäte on mielekäästä jättää niin alhaiselle jalostusasteelle, mitä pelkkä energiaksi muuttaminen edustaa. Turvevaramme ovat suhteellisen suuret, mutta todella käyttökelpoiset varat sittenkin melko rajalliset ja niihin liittyy myös muita hyödyntämismahdollisuuksia kuin polttaminen. Ja koska ne ovat luonteeltaan käytännössä uusiutumattomia, niiden riittävyteen oman kansantaloutemme puitteissa on syytä kiinnittää huomiota vastaavin perustein kuin öljyn riittävyteen globaalisti. Hiili-, turve-, öljy- ja kaasuvoimaloiden oksidipäästöillä on jo nyt ollut mittavia haittavaikutuksia ja niiden pitkällä tähtäyksellä aiheuttamasta kasvihuoneilmioista voi tulla hyvin suuri ongelma. Tuulen ja suoran aurinkoenergian käytöllä taas voi olla määrällisesti vain marginaalinen merkitys. Ainakin lähivuosikymmenet on selvittävä "vanhoin keinoin", kun saasteeton fuusioenergiakin on vielä perin kaukana.

Energiaa säästämällä, eli sen käyttöä tehostamalla, voidaan kyllä päästä yllättävän hyviin tuloksiin, mutta ei määräänsä pitemmälle.

Tällaisiin yksinkertaisiin, yleisesti tiedossa oleviin perustein päädyn siihen, että ydinenergiaan turvautumista on pidettävä

edelleen maamme energiahuoltoa kehitettäessä olennaisen tärkeänä vaihtoehtona. Valinta on osaltamme tietysti omista käsissämme. Tätäkään valintaa tehtäessä ei voida valita vain etuja. Jos tahdomme niitä, on hyväksyttävä myös haittoja ja riskejä.

Tähän kantaan ei johda nykyiseen virka-asemaani liittyvä "determinismi", vaan näkökohtien puntarointi. Tukena on tieto siitä, että ydinvoimalla on osaltaan taattu sähköntuotantomme korkea laatu ja kohutuullinen hintataso, ja että ydinvoimaloidemme käytettävyyttä ja turvallisuutta on kansainvälisesti vertaillen huipputasolla. Käsitteiden mukaan myös loppuunkäytettyjen laitosten purkamiseen sekä radioaktiivisten jätteiden käsittelyyn ja varastointiin liittyvät ongelmat, kustannusten kattamista myöten, ovat olennaisilta osiltaan ratkaistuja ja meillä hallinnassa. Suomi voi hyödyntää ydinenergiaa hyvällä omallatunnolla, vaikka emme voikaan lähteä siitä, että virheet ovat mahdollisia vain muille. Olennaisen tärkeätä on, että alaan liittyvän tiedon ja osaamisen korkea taso säilytetään. VTT tulee tekemään tässä osaltaan edelleen parhaansa. Sen tutkimustyö tulee tietenkin edelleen suuntautumaan lähinnä valtakunnallisten energiapolitiittisten tavoitteiden mukaan. On luonnollista, että voimaloiden käytön turvallisuuteen liittyvän tutkimuksen merkitys korostuu. Muita keskeisiä alueita tulevat yhä olemaan energiahuollon varmuus, energian käytön tehostaminen, kotimaisten energialähteiden tarjoamat mahdollisuudet sekä ydinjätteisiin liittyvät asiat.

Ihminen on valmis hyväksymään suuria riskejä, kunhan se tapahtuu vapaaehtoisesti. Näissä yhteyksissä usein mainitut liikenne, tupakka ja alkoholi käyvät hyivistä esimerkeistä.

Ydinenergian rauhanomainen käyttö aiheuttaa niihin verrattuna vähäisiä vaaroja. Kun ydinvoimaa ei valita käyttöön samanlaisella henkilökohtaisella päätöksellä, siihen liittyvän riskin pitää kuitenkin jo psykologisista syistä olla paljon pienempi, jotta se siedettäisiin. Niinpä ydinvoiman jatkuvan käytön ja kehittämisen ilmeinen ehto on, että alan tekniikka ja sitä hallitseva kansainvälinen järjestelmä kykenee kehittymään riittävän nopeasti. Riski on kyettävä saamaan nykyistä olennaisesti vähäisemmäksi. Näin on siitä huolimatta, että kansakunnat samanaikaisesti kilpailevat ihmiselle jo nyt totaalisella uhkalla merkitsevien, ydinenergian käyttöön perustuvien tuhoaseiden edelleen kehittämisessä. □

Visit to the Chernobyl Power Plant

Here is a factual account of our visit to the Chernobyl power plant, led by Mr. Jacques LECLERCO, on the 6th June 1987. It is part of a mission — permission given by Mr. Y. K. SEMENOV (a) when he came to Paris a month ago — devoted to scientific and technical cooperation for reactor operation which took place on the 1st to the 7th June. Members of the team were Leclerco (Director General of EDF), Flory (French Ambassador to Moscow), Carlier, Rolland, Vignon, Doljanski (interpreter) and Saitcevsy.

The information in this report — which comes under the following headings (b):

1. the accident and its consequences
2. return to a normal situation
3. 'mopping-up' operations

— comes from the people we met and from our own observations (c). We must emphasize the way they welcomed our mission (we seem to be the first group of western 'specialists') and also the way they are determined to achieve more satisfactory environmental conditions as soon as possible.

Before looking at the facts, we cannot help calling to mind our general impression: Chernobyl, a restricted area with a radius of about 30 km, which all its inhabitants have left. The fields are no longer cultivated, homes and even cities have been abandoned. Even though work on Units 5 and 6 have stopped, intense human activity is going on, entirely devoted to:

1. operating Units 1 and 2
2. making Unit 3 operational
3. avoiding at all costs the contamination of the Dniepr.

Even outside the site there is a continuous flow of military vehicles and civil traffic, military camps are visible on the circumference of the site. Roads have been raised and widened so that they can be better shielded from contamination. The area around the plant has been transformed into an enormous work-site: deforestation, banking and digging,

building a railway line..... This gigantic effort in a particularly hostile environment has already given appreciable results.

The accident and its consequences on operation

Among the operating staff (d) that we met, only one person belonged to the management staff before the accident (Mr. G. BORODAVKO, Instrumentation and Automatic Control Engineer before the accident is now the plant's Communist Party Secretary). The new plant manager was previously manager of the Leningrad power plant.

The court proceedings against the main people responsible, which has been announced many times in the Russian press, will take place at the beginning of July in Kiev. "Many witnesses are liable to join the accused during the trial".

The test

The test, which was the original cause of the accident had, it seemed, already been proposed to 3 other power plants which refused to do it: our interlocutors blame the arrogance of the people at Chernobyl for agreeing to do it. During the test, the deputy Technical Manager of the plant was present in the control room, and it is he who would have made all the decisions. In the RBMK plants someone of this rank must be present every time there is a change in reactivity: according to our interlocutors, the liability of the electrical engineer who was directly in charge of the test, and whose presence has been confirmed, was in no way involved.....

The accident

The emergency cooling circuits of the stricken reactor which went into operation should have continued for several days, then stopped because of flooding in Unit 3 (according to the IAEA it stopped after a few hours). This injection would have limited the release of activity which contributed to the low radiation of the first inhabitants to be evacuated (notably those from Prypiat).

The tunnel under Unit 4 was dug to fortify the stability of the foundation raft and to install temperature sensing devices. No liquid nitrogen was injected into the ground.

A large-scale mobilization of means of transport was needed to evacuate the people living in the 30 km zone. About

1200 buses, including 800 from Kiev were used. Some of the vehicles are now considered as non-decontaminable and are stocked at Prypiat. Others have been decontaminated and are only used in the 30 km zone; the seats are covered with plastic and the inside of the vehicles is regularly decontaminated by jets of water. And some have been restored to normal use. This also goes for the private vehicles belonging to the inhabitants of the zone.

Prypiat is a city of 45000, built along the lines of the typical large housing schemes of the 50s and 60s. Its inhabitants (average dose 3.3 rem) were rapidly and easily evacuated. Evacuating the remaining 90000 living in the 30 km zone took nearly five days. The vinyl sheeting still visible on the windows of numerous isbas, including those outside the 30 km zone, confirms the confinement measures: the average dose for the 24000 living in the 3 to 15 km (excluding Prypiat) was 43 rem.

Present state of the units

Unit 3's control room has never raised any environmental problems. This has facilitated supervision of this unit during shutdown. But, other areas of this unit are not easily accessible: decontamination continues. The reactor core "hasn't suffered" and "if all goes well, the unit should be operational towards the end of the year". Unit 2 has just finished its annual shutdown for maintenance; the collective dose during this shutdown is no higher than the previous ones. Of course, you must add the dose received outside the unit. The dose rate in the turbine hall when we were there was 0.3mrad/h; therefore, the operating staff would get on average an individual dose of 3 rem/yr (compare with 0.2—0.3 for French PWRs).

-
- /a/ Mr. Semenov is vice-president of the Electricity and Coal for the Electricity dept. of the Fuel and Energy Bureau. This Bureau coordinates the activities of the various ministries which are involved in the energy sector. It is chaired by Mr. Chcherbina who is of vice-prime minister rank.
- /b/ We didn't use any information already published, especially Russian information to the IAEA.
- /c/ Although we weren't given any written document.
- /d/ Power Plant Manager, Technical Manager, Deputy Technical Manager. We also spoke to the shift supervisor of Unit 1, who was working on the first shift after the accident, in this unit.

Units 1 and 2 are operating normally at the moment. They have, since the accident, produced 6 Twh up till now. Work on Units 5 and 6 has been suspended, but the final decision to stop work has not been officially made, contrary to information printed in the west. However, this decision is highly probable (according to some of our interlocutors).

Some modification have been made and are already working in Units 1 and 2 (replacing fuel elements with absorbers, installing a rapid rod-dropping device, addition of an antireactivity margin indicator and several alarms). Operating procedures have been altered to integrate these modifications, but their write-up and organization have remained the same. Technical notices, several dozens of pages long, are stored in a cupboard — the shift supervisor has the key.

Present environmental conditions

The restricted 30 km area around the plant is maintained and there is no activity in this area, except that which is directly linked to the plant and the accident. Sanitary monitoring measures are regularly carried out on the crops within a radius of 100 km around the station; it should remain, for a long time yet, within 'international standards'. There will be six entry points to the zone; between Kiev and the entry point nearest to this city, there are two checkpoint controlling vehicle movements.

Anybody entering the 30 km zone must obey the following instructions: close vehicle windows, do not go on the roadsides, do not wander about, do not use spring water, wear sunglasses when it is sunny, avoid smoking. To give you an idea of the radiation level, the dose rate at Prypiat, about 7 km north of the plant is 0.3 mrad/h in the atmosphere and 3 mrad/h on the ground. All itinerant animals have been slaughtered (though we did catch sight of a dog).

The inhabitants of twelve villages have gone back to their dwellings: two in the Ukraine and ten in Bielorrussia (further north of the site). Agricultural activity carries on in keeping with the Ministry of Agriculture's recommendations. Crop growing is normal (potatoes, wheat) but there are regulations on agricultural methods (methods which raise dust are forbidden, the tractors must have closed cabins....). The houses have been decontaminated in these villages, but the ground hasn't had any particular treatment. It doesn't look as if other villages will be repopulated.

Return to a normal situation

Organisation

In 1986 a State Commission was set up, directly dependent on the Council of the Ministers and its mission is to 'mop-up' Chernobyl. This commission, under Mr. CHTCHERBINA, regularly holds coordination meeting on the site: it is composed of an 'operational group'

which has a permanent office in the zone area (the only new prefabricated building at Chernobyl, 15 km from the plant). It liaises between the various ministries and in particular between the military and the non-military.

In the 30 km zone, civil activity is concentrated in a Combinat of 10.000 people (of whom 4000 are the normal plant staff) and 6000 take part in the 'mopping up' operations. These 6000 people work in transport, foodstuff and communication operations and also operational activities such as permanent road decontamination by spraying water, specific jobs.....etc.

We didn't get any information concerning the army (apparently they are as numerous as the civilians). They are under the command of a Division General.

Living conditions

The army live under canvas on the circumference of the zone: the drafted men work for about a month in the highly contaminated areas, getting doses up to about 4 rem, then they work in less contaminated areas: the reservists, about 30—35 years old, are called up for periods of a month. On no account does the dose exceed 5 rem.

The civilians who do not work at the plant are housed at Chernobyl where they must take special precautions (frequently clean their rooms with water, frequently wash their clothes, linen etc...); earth has been piled in front of some of the buildings (eg. restaurants) to grow flowers. Most of the other civilians and notably the operating staff live in a prefabricated city on the banks of the Dniepr, 40 km from the plant (this area is known as Green Cape). In the very beginning, the Dniepr's river buses were brought here and used as accommodation. The operating staff are taken daily to the plant where they work in a 12-hour shift. After a total of 150 hours' work they return to their families for about the same time. There has been practically no 'non-stop' work. In the beginning, the staff used to go to the plant from Green Cape in armoured vehicles, but for a long time now they have been coming by bus.

In time, a new city for about 70.000 will be built at Slavoutich, 60 km from the site. It will lodge operating staff and their families.

The civilians are very well paid (at present they are on double wages, but before it seems it was even more...). Our interlocutors belong to a spontaneous and massive solidarity movement and there is no shortage of volunteers.

Dosimetry is also checked and 5 rem is the strict limit, although it seems to us that this has been evaluated more on the different work areas than on individual dosimetry. About 10 % of the operating staff have reached levels of 5 rem and

have had to be replaced: during the first four months, 80 % of the operating staff were under 1 rem.

'Mopping-up' operations

Besides the operation of Units 1 and 2 and the entombment construction, work is orientated towards Unit 3 recovery, restoring satisfactory environmental conditions for the operating staff and limiting the consequences of water pollution.

Work in the immediate vicinity of the plant

A great step forward was made with the building of the entombment which was finished last winter. The most active debris was gathered in one place; a pyramid was built using large prefabricated steel panels and was then filled in with concrete; within 3 months 300.000 m³ of concrete and 10.000 tons of steel were used.

Large scale measures were taken both in terms of manpower and equipment (at least 1000 vehicles according to one estimate). Although we didn't actually see this equipment, it is evident that transport for the public works have been fitted up with sealed cabins and that many of them have been remote controlled.

In the immediate vicinity of the stricken reactor, up to one metre of ground has been scraped off and put in heaps covered with blocks of precast cement to restrict the radiation (sandy soil: initial dose at about 300 m from the plant — several thousands of rad/h; is now 16 mrad/h).

Nearby (500 m — 1 km), a pine forest has been cut down and buried and the stumps covered with earth. It is called the 'russet forest'. 30 hectares have already been similarly dealt with and 50 more are planned for next winter. It seems that this forest is not only unsightly but is also alpha contaminated.

The roofs and walls of the buildings at Prypiat have been decontaminated, no doubt to avoid contamination going back to the plant by air. It doesn't seem likely that this city will be salvaged.

For the rest, the Russians want to 'fix' the contamination by spraying products to help the contamination diffuse towards the soil. We didn't receive any information on the products used, surfaces treated.....

There are large suction lorries around the plant equipped with filters which suck up to about 1 metre of soil — this restricts contamination by dust.

Water

A discontinued cast wall, 45 m long was built near the units. Pumping wells are there but have not been used as the contamination level had been judged acceptable. Very extensive work has been done to stop the transport of surface

water contamination towards the Dniepr: 136 dams of porous composites (earth, zeolite, etc) with ditches upstream hold back the alluvium which fixes most of the contamination. In addition, at the entrance of the Kiev reservoir, an alluvium trap has been dug (a wide and deep transversal trench at the bottom of the river Prypiat).

The Russians are very satisfied with the results. They now think that these precautions were more than necessary, but after the thaw the river levels were lower than expected.

Replanting

At the moment it is impossible to fix a date for replanting although some land

will be rewooded. Hot houses which existed before the accident are now being used for experimental crop growing at Prypiat.

These crops are grown on a soil which is ten times less contaminated than that of Prypiat — This corresponds to the natural state of the earth 20 km from the site. We were told that other crops had grown, and that a large project is being undertaken.

Conclusion

The Russians have visibly set up a powerful and efficient organisation devoted to returning to a more normal state of affairs by the end of 1988 and it seems as if they will succeed. They are

working extremely hard to protect their large labour force from radiation and three most important aims are:

- putting Unit 3 back into service by the end of the year.
- obtaining more satisfactory environmental conditions around the plant: meanwhile the operating staff will ultimately be housed in a new city 60 km away.
- stopping the contamination of the Dniepr.

In the long term it is highly problematical that other aims will be achieved, namely — repopulating the 30 km zone and getting back to its initial activities and also continuing work on Units 5 and 6. □

Antti Hanelius, Suomen Voimalaitosyhdistys

Mielipideilmasto Tshernobylin jälkeen

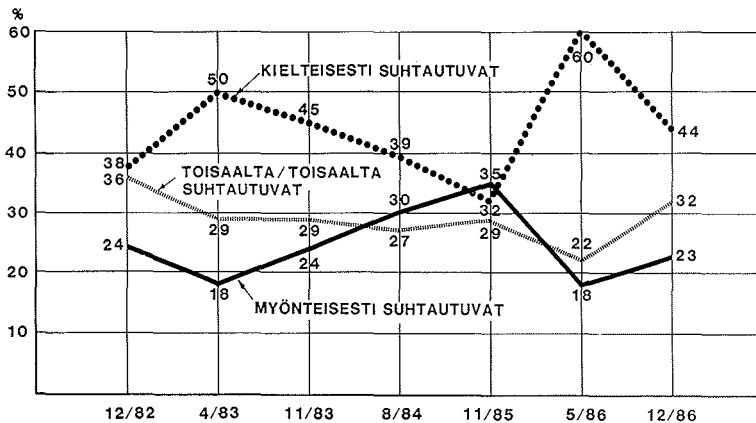
Oli puhdas sattuma, että Voimalaitosyhdistys uusi vakiokyselynsä ydinvoimasta huhtikuun puolivälissä 1986 juuri ennen onnettomuutta. Onnettomuuden jälkeen päätettiin seuraavat kyselyt tehdä uudelleen noin 2 viikon, 1 kuukauden ja 6 kuukauden kuluttua onnettomuudesta.

Samanlaisina joulukuusta 1982 esitetyt kysymykset koskevat suhtautumista ydinvoimaan yleisesti energialähteenä sekä siihen, että seuraava suurvoimalaitos olisi ydinvoimalaitos. Kuvissa 1 ja 2 on esitetty mielipiteiden jakaantuminen eri ajankohtina. Vastaajan on valittava viiden vaihtoehdon välillä: asennoituu täysin myönteisesti, pääpiirteissään myönteisesti, toisaalta myönteisesti/toisaalta kielteisesti, pääpiirteissään kielteisesti ja täysin kielteisesti. Piirroksissa on yhdistetty ryhmät "täysin" ja "pääpiirteissään" kuvaamaan kokonaiskannatusta ja -vastustusta. Touko- ja kesäkuun 1986 kyselyn tulokset olivat käytännössä samat.

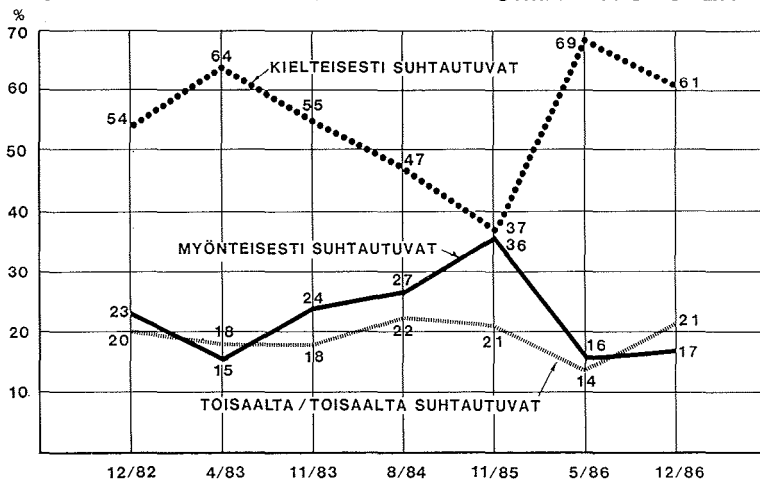
Kysely uusittiin toukokuussa 1987 kun onnettomuuden vuosipäivää oli ehditty käsitellä tiedotusvälineissä. Ajankohta valittiin tarkoituksellisesti näin vaikka onnettomuuden käsittely tiedotusvälineissä todennäköisesti hetkellisesti muutti mielipiteitä. Toukokuun tuloksia ei ole esitetty oheisissa kuvissa, jotka ovat peräisin joulukuulta 1986. Muutokset ovat kuitenkin joko virherajojen sisällä tai marginaalisia lukuunottamatta suhtautumista ydinvoimaan energialähteenä, jossa kielteisesti asennoituvat olivat saaneet toisaalta/toisaalta-ryhmältä 6 %-yksikön lisän. Tämä lienee täysin onnettomuuden 1-vuotispäivän aiheuttama ilmiö.

Kaiken kaikkiaan asenteet ovat palautumassa, tilanne nyt vastaa suunnilleen vuoden 1983 huhti-marraskuussa vallinnutta. Vastaava palautuminen on tapahtunut myös muissa maissa, Englannissa oli jopa jo marraskuussa 1986 palattu helmikuun 1986 tasolle. □

SUHTAUTUMINEN YDINVOIMAAN ENERGIALÄHTEENÄ



SUHTAUTUMINEN UUTEEN YDINVOIMALAITOKSEEN



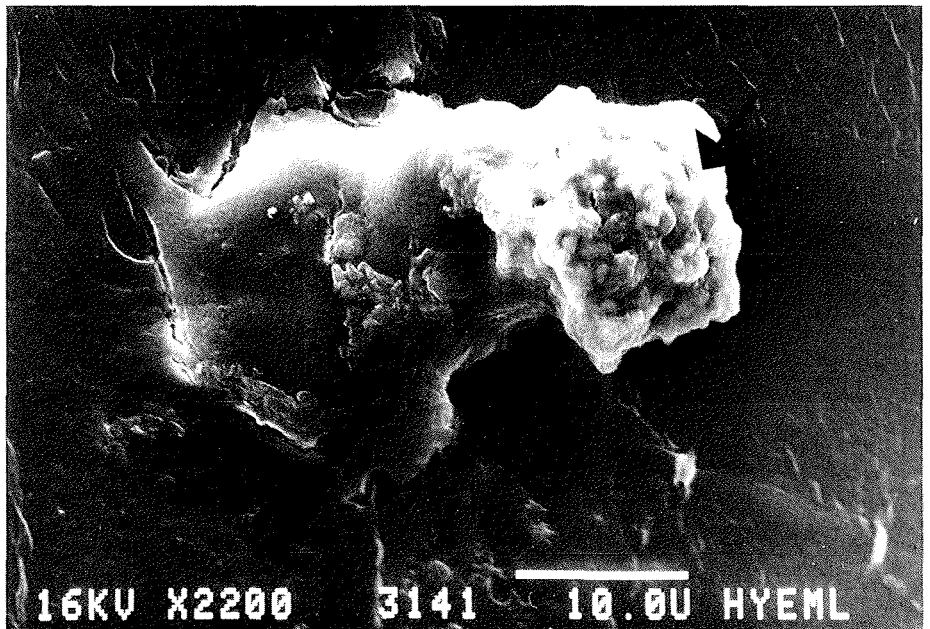
Tshernobylin kuumien hiukkasten aiheuttamat terveyshaitat

*Tshernobylin turmassa vapautui räjähdysten ja tulipalojen yhteydessä jauhemaiseksi muuttunutta ydinpolttoainetta, joka aiheutti odottamattoman laskeuman lähialueella. Tästä laskeumasta johtuivat pelastustöihin osallistuneiden saamat vakavat, usein hengenvaaralliset ihon ja limakalvojen beeta-palovammat. Beetapalovam-
mojen pisteittäinen jakautuminen näkyi selvästi monien potilaiden iholla.*

Mikroskooppisen pieniä ydinpolttoainekappaleita, kuumia hiukkasia, kulkeutui ilmavirtojen mukana — ja jonkin verran muillakin tavoilla, esim. ajoneuvojen pinoilla — myös kauas turmapaikalta. Suomessa eristettyjen ja eri tavoilla analysoitujen hiukkasten (elektronimikroskopia, alkuaineanalyysi, gammaspektrometria) nuklidikoostumus on tyypillinen ydinpolttoaineelle. Uraanimatriksissa on todettavissa palaman funktiona kaikki nuklidit, jotka eivät höyrystyneet turmassa vallineissa lämpötiloissa. Poikkeuksellisesti käyttäytyi kuitenkin rutenium, joka hapettuessaan muuttuu helposti haihtuvaksi. Tästä syystä osa uraaniaerosoleista sisältää vähän tai ei lainkaan ruteniumia, mutta karannut rutenium on sitten tiivistynyt toisten uraanihiukkasten pintaan. Näin on muodostunut potentiaalisesti vaarallisin uraaniaerosoli, sillä pienimmänkin, 1—2 mikrometrin kokoisen ruteniumilla rikastuneen polttoainehiukkasen aktiivisuus voi ylittää 10 kBq.

Uraaniaerosoleihin liittyvän terveyshaitan arviointia ei voi tehdä konventionaaliseen tapaan. Elimistöön joutuneen uraanihiukkasen sisältämän aktiivisuuden muuttuminen efektiiviseksi annosekvivalentiksi on laskutoimitus, jossa tavanomaisilla muunnoskertoimilla ei enää ole mitään vastinetta biologisessa todellisuudessa. Laboratoriokokeissa uraaniaerosolilla saa aikaan pahanlaatuisen solumuutoksen (syövän) tasaisesti jakautuneeseen säteilyyn verrattuna jopa kertaluokkia pienemmällä keskimääräisellä annoksella.

Olemme tutkineet asiaa soluviljelmissä, joissa säteilylähteenä on ollut eristetty uraaniaerosoli. Kokeissa käytetyissä hiukkasissa Ru-106:n ja/tai Ce-144:n aktiivisuudet olivat 1.2, 0.4 ja 0.3 kBq. Liukenemattoman 1 kBq:n hiukkasen vieressä annosnopeus oli yli 1 Gy h⁻¹, 1 mm:n



Kuva. Pyyhkäiselektronimikroskooppinen kuva maaperästä eristetyistä kappaleesta, jonka yläosassa on osaksi hautautuneena uraaniaerosoli (nuoli). Hiukkanen on soluviljelmämaljan pohjalla ja sen ympärillä näkyvä orgaaninen matto on syntynyt säteilyn tappamista soluista. Mittaviivan pituus on 10 mikrometriä.

päässä se on 10 mGy h⁻¹ ja 6 mm:n päässä 0.1 mGy h⁻¹; valtaosa viljelmän soluista saa annoksen, joka on luonnon taustasäteilyä pienempi. Kahdessa viljelmässä kolmesta syöpäsolupesäke oli todettavissa 4—6 viikon kuluttua; kolmannessa aikaa kului enemmän. Kaikki pesäkkeet olivat 2—4 mm:n päässä säteilylähteestä. Syöpäsoluissa aktivoitui useita eri syöpägeenejä.

On ilmeistä, että biologisesti tärkein tekijä, joka uraaniaerosoleilla tehdyissä kokeissa helposti johtaa pahanlaatuisen solumuutoksen ilmituloon, on seuraus annoksen epätasaisesta jakautumisesta. Säteilylähteen välittömässä läheisyydessä kaikki solut saavat tappavan annoksen ja viljelmiin muodostuu pieni, krooninen ”haava”. Tämän alueen reunoilla olevat solut, jotka myös saavat suuren, mutta ei-tappavan säteilyannoksen, jakautuvat koko ajan vilkkaasti ja yrittävät korjata syntyneen haavan. Vilkkaan solukasvun seurauksena säteilyn aiheuttama satunnainen genomivaurio kloonituu tehokkaasti (monistuu, periytyy tytärsoluille) ja vauriolla on siten suuri mahdollisuus tulla näkyviin. Uraaniaerosoli toimii näin ollen sekä syöpäsolukon initiaattorina (aiheuttajana) että erittäin voimakkaana promootorina. Tasaisessa säteilytyksessä kloonitutumisen promootio jää kokonaan pois.

Laboratoriossa aikaansaatuja myöhäisvai-
kutusten kannalta poikkeuksellista tilan-
netta ei onneksi voi yleistää koskemaan
olosuhteita, jotka syntyvät uraaniaeroso-
lien joutuessa ihmisen iholle, hengitystei-
hin tai ruoansulatuskanavaan. Hiukkasen
pysyminen täysin liikkumatta paikoillaan
niin kauan, että ympärille kehittyisi kroo-
ninen haavauma, on käytännössä lähes
mahdotonta. Keuhkojen alveoleissa ura-
nihiukkanen saattaisi kiinnittyä alveolin
seinämään pysyvästi, mutta sinne asti
kulkeutuvan aerosolin koko on niin pie-
ni, että hiukkasen aktiivisuus (annosno-
peus) ei yleensä riitä kroonisen haavan
synnyttämiseen.

On selvä, että Tshernobylin turmassa va-
pautuneiden uraaniaerosolien aiheuttama
terveyshaitta ei tule koskaan näkymään
Suomen syöpätalustoissa. Tällaisten aeo-
solien potentiaalista merkitystä ei kuiten-
kaan tule vähätellä epärealististen annos-
laskujen avulla. Vaaran mahdollisuus tulle
myös ottaa huomioon tulevaisuuden
suunnitelmissa. Näin erityisesti siksi, että
suojautuminen uraaniaerosoleilta on suhteellisen yksinkertaista. Sisätiloissa oleskelu laskeuman aikana yleensä riittää. Liukenemattomien uraanihiukkasien sisältämät radionuklidit eivät normaalioloissa vapaudu elolliseen aineenvaihduntaan eivätkä ne siten kulkeudu esim. ravintoketjuihin. □

Tshernobylin onnettomuutta voidaan kutsua tähän mennessä tehoreaktoreilla tapahtuneista onnettomuuksista paitsi vakavimmaksi myös monipuolisimmiksi. Eri maissa onnettomuuden jälkeisen vuoden kuluessa julkaistut raportit antavat onnettomuudesta selkeän käsityksen.

Tshernobylin onnettomuudesta on nyt kulunut yli vuosi. Itse onnettomuuspaikalla ja sen lähiympäristössä on tehty valtava työ. Onnettomuusreaktori on ympäröity sarkofagilla, ensimmäinen ja toinen laitosyksikkö on jälleen otettu sähköntuotantoon ja kontaminoituneita rakenteita ja alueita on puhdistettu. Dekontaminointityö jatkuu. Uusia asutuskeskuksia on rakennettu evakuoituille ihmisille.

Paljon työtä on tehty myös Tshernobylin ja jopa Neuvostoliiton ulkopuolella. Onnettomuuden syitä ja vaikutuksia on selvitetty. Kansainvälisiä sopimuksia on solmittu tai tarkistetaan. Raportteja, artikkeleita ja tiedotusmateriaalia on julkaistu lähes alalta kuin alalta. Hakusanalla "Tshernobyli" saa runsaan viiteluettelon mistä tahansa tietokannasta. Suomessa-kin Tshernobylin onnettomuutta ja seurauksia on käsitelty jopa Ulkopoliitiikka-

Tshernobylin onnettomuuteen vaikuttaneet käyttövirheet Neuvostoliiton raportin /1/ mukaan.

1. Reaktorin sisällä olevien säätösauvojen määrää pienennettiin huomattavasti sallitun rajan alapuolelle.
2. Koetta jatkettiin, vaikka teho laski alle koeohjelmassa edellytetyn ja määräyksissä sallitun tason.
3. Kytettiin kaikki pääkiertopumput päälle, jolloin pumppujen virtausmäärä ylitti määräyksissä sallitun arvon.
4. Ohitettiin pikasulkusignaali, joka olisi lauennut vielä pyörivän turpiinin ja sen mukana pyörivän generaattorin pysäyttämiseksi (toinen generaattori oli pysäytetty jo aikaisemmin).
5. Ohitettiin pikasulkusignaali, jotka olisivat lauennet h öyryrummun matalasta paineesta tai pinnasta.
6. Kytettiin irti hätäjähdytysjärjestelmä.

Onnettomuutta ei olisi tapahtunut, jos mikä tahansa virheistä 1—5 olisi jäänyt tekemättä. Virheellä 6 ei ollut suoraa yhteyttä onnettomuuteen.

Heikki Raumolin, PEVO

Tshernobylin onnettomuutta on tutkittu paljon

lehdessä. Teknillistieteellisten tietokantojen perusteella valtaosa julkaistuista selvityksistä käsittelee radioaktiivisuuden laskeumaa ja leviämistä ympäristöön. Maa-kohtaisia raportteja tästä aiheesta ovat julkaisseet ydinenergiamaiden ja -järjestöjen lisäksi muun muassa Norja, Irlanti ja Israel.

Tämän kirjoituksen tarkoituksena on tarkastella Tshernobylin laitosta ja onnettomuuden kulkua sekä niistä tehtyjä selvityksiä ja raportteja. Muut seikat, kuten laskeuma ja sen vaikutukset, energia-poliittiset seuraukset, informaatiokokeukset jne., on jätetty niitä enemmän seuranneiden analysoitaviksi. Kirjoituksessa ei pyritä samaan yksityiskohtaisuuteen kuin Tshernobylin onnettomuutta käsitellessä ATS Ydintekniikka 3/86:ssa syksyllä 1986.

Selvitystyö ja raportit

Ajallisesti ja sisällön puolesta raportit voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- perusinformaatio
- yleisselvitykset
- joitakin erityisaiheita koskevat tarkemmat selvitykset

Perusinformaatioon kuuluu Neuvostoliiton IAEA:n Wienin kokouksessa 25.—29.8.1986 antama raportti /1/. Siihen voidaan lukea myös IAEA:n turvallisuusasiantuntijaalimen INSAG:n review-kokouksen 30.8.—5.9.1986 raportti /2/. Näihin raportteihin viitataan lähes kaikissa myöhemmin tehdyissä selvityksissä.

Yleisselvityksiin kuuluvat eri valtioissa ja kansainvälisissä järjestöissä tehdyt onnettomuuden arvioinnit. Niiden tarkoituksena on ollut

- käydä läpi tiedot onnettomuusreaktorista ja onnettomuuden kulusta ja arvioida niitä tarvittaessa omin selvityksin ja laskelmin
- arvioida vastaavan onnettomuuden mahdollisuutta oman maan tai organisaation reaktoreiden kohdalla.

Lisäksi yleisselvityksiin liittyy tietysti kansallisia lisäpiirteitä.

Tehdyistä yleisselvityksistä voi mainita Ruotsissa julkaistun asiantuntijatyöryhmän raportin hallitukselle /3/, USA:ssa julkaistun NRC:n raportin /4/, ydinvoimateollisuuden "positio"-paperin /5/ ja "response"-paperin /6/, Länsi-Saksassa julkaistun GRS-raportin /7/, Ranskassa tiedeakatemian raportin teollisuusministeriölle /8/, Espanjan voimayhtiöiden raportin /9/ ja Kanadassa julkaistun AECL:n raportin /10/.

Ruotsissa julkaistu raportti sisältää Tshernobylin onnettomuuden mahdollisten reaktoriturvallisuusvaikutusten arvioinnin lisäksi mm. arvioinnin mahdollisten tulevien reaktorionnettomuuksien riskeistä. Seikkaperäisimminkin Tshernobylin onnettomuuden kulkua ja itse voimalaitosta kuvataan em. raporteista NRC:n raportissa /4/.

Erityisaiheita koskevia selvityksiä on jatkuvasti menossa. Julkaistuista tuloksista voi mainita esimerkiksi Nuclear Safety-lehden artikkelin /11/, jossa on pohdittu lähdetermiä (onnettomuudesta vapautuneiden radioaktiivisten aineiden määrää ja koostumusta) ja tarkasteltu todettuja eroja kevytvesireaktoreiden onnettomuusanalyysseissa käytettyihin lähdetermeihin sekä VTT/YDI:n työraportin /12/, jossa on mm. esitetty vertailevia reaktorifysiikkaalisia laskuja ja arvioitu, olisiko hypoteettinen suojarakennus pystynyt estämään Tshernobyliissa tapahtuneet ympäristöpäästöt.

Mitä onnettomuudesta nyt tiedetään

Tehdyt selvitykset ovat vahvistaneet syksyllä 1986 esitetyt tiedot. Onnettomuuden syistä ja tapahtumien kulusta ensimmäiseen räjähdykseen saakka ollaan varsin yksimielisiä. Ulkopuolelta havaitun toisen räjähdysen syytä ja laatua (reaktorifysiikkaalinen tai kemiallinen tehonpurkaus) ei ole ollut mahdollista selvittää yhtä varmasti.

Yleisselvitysten raporteissa vahvistetaan jo INSAG:n raportissa esitetty kannanotto, että Tshernobylin onnettomuus ei tuonut esille perustavaa laatua olevia virheitä tai puutteita teknillis-luonnontieteellisessä tiedossa.

Tshernobylin onnettomuus tapahtui käyttövirheiden sarjan ja eräiden reaktorityyppikohtaisten epäedullisten ominaisuuksien, erityisesti positiivisen aukkokertoimen yhteisvaikutuksesta. Näin ollen ei ole yllättävää, että kaikissa selvityksissä on päädytty siihen, että vastaavanlaista onnettomuutta ei muuntuyppisissä reaktoreissa voi tapahtua. Erityisesti kevytvesireaktoreiden kohdalla perustelut ovat selkeät ja samantyyppiset kaikissa raporteissa.

Onnettomuuden syiden selvittämisessä on luonnollisesti painotuseroja. Yleisselvitysraporteissa kiinnitetään enemmän huomiota RBMK-reaktorien teknillisiin heikkouksiin kuin Wienin kokouksessa elokuussa 1986. Reaktorin sammutusjärjestelmän toimintakyyky ja säätösauvojen hi-

Chinese Nuclear Societyn (CNS) edustajat vierailivat Suomessa kesäkuun alussa ATS:n kutsusta. Matkasta sovittiin alustavasti ATS:n Kiinan ekskursion yhteydessä. Vierailun aikana allekirjoitettiin Seurojen välinen sopimus tieteellisteknisestä yhteistyöstä ja tiedonvaihdesta. Vieraat tustustuivat viikon aikana Suomen ydinvoimalaitoksiin ja ydinenergia-alaa sivuvaan teollisuuteen.

Kiinalaisten seurueen johtaja oli CNS:n presidentti, professori Jiang Shengjie. Muut jäsenet olivat rouva Yang Huiming sekä herrat Xu Honggui ja Geng Zhan-Xiu. Xu on CNS:n varapääsihteeri, Yang CNS:n toimiston johtaja ja Geng toimiston henkilökuntaa. Jiang on myös Kiinan parlamentin jäsen ja vastaa siellä ydinenergian turvallisuudesta. Hänen asemansa on erityisesti korostunut Tshernobylin onnettomuuden jälkeen. CNS:sta on kerrottu enemmän ATS:n Kiinan ekskursion matkakertomuksessa Ydintekniikan numerossa 4/86.

Yhteistyösopimus allekirjoitettiin juhlallisessa allekirjoitustilaisuudessa vierailun alussa. Kiinan suurlähettiläs rouva Lin Aili oli läsnä allekirjoitustilaisuudessa. Hän oli myös mukana Olkiluodon ydinvoimalaitoksella.

Kiinalaiset vaikuttivat tyytyväisiltä vierailuunsa ja täällä saamaansa kohteluun. Lukuisista yrityksistä huolimatta heistä oli hyvin vaikea saada irti, mikä tai mitkä vierailukohteet olivat tehneet vaikutuksen heihin. Kuitenkin suomalaista "managementia" he kehuivat ja siitä heillä on omien sanojensa mukaan paljon opittavaa. "Managementilla" kiinalaiset tarkoittivat järjestystä ja puhtautta voimalaitoksilla ja tehtaissa sekä kaikenlaista suomalaista organisointikykyä. He totesivat myös muun muassa Qinshanin ydinvoimalaitostyömaan projektihallinnon olevan retuperällä. Loviisan koulutussimulaattorista he olivat kiinnostuneita huolimatta siitä, että tietokoneen vaihdon takia minkäänlaista demoesitystä ei ollut mahdollista nähdä. VTT:n osalta he tiedustelivat mahdollisuuksia tutkijavaihtoon ja pitivät ulkoisia puitteita erinomaisina menestyksellisen tutkimustyön suorittamiselle.

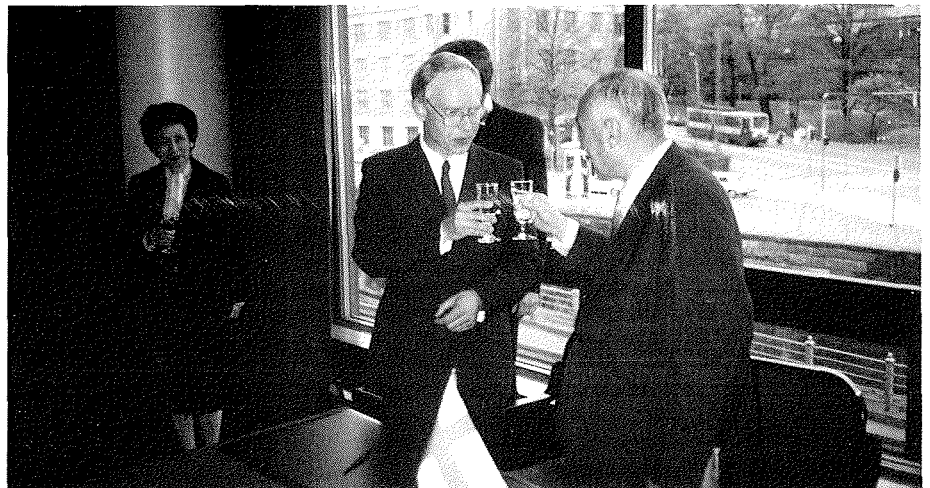
Oman ydinvoimaohjelmansa he totesivat etenevän pääpiirtein suunnitelmien mukaan, joskin Tshernobylin onnettomuus on lisännyt keskustelua ydinvoiman tarpeellisuudesta Kiinassa. Tällä hetkellä suomalaisten mahdollisuudet Kiinassa ydinenergian alalla lienevät projektihallinnon konsultointi ydinvoimalaitostyömailla, koulutussimulaattoriasiantuntimus lähinnä koskien Qinshanin voimalaitosta ja tutkijavaihto. □

Pertti Salminen

CNS:n Suomen vierailu



Sopimusta allekirjoittamassa Jorma Aurela, Erkki Aalto, Jiang Shengjie ja varapääsihteeri Xu Honggui.



Puheenjohtajat Jiang ja Aalto kohottavat maljoja. Taustalla tapahtumaa seuraa suurlähettiläs Lin.



TVOlainen kumarrus. Varatoimitusjohtaja Esko Haapala tervehtii vieraita.

Vierailun ohjelma

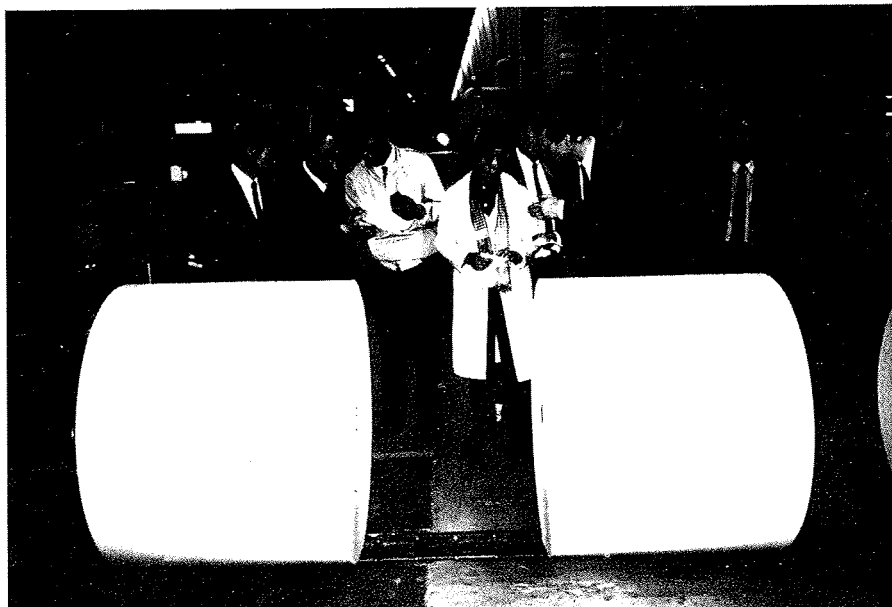
- 31.5. — Tutustuminen Helsinkiin ja Suomenlinnaan
- 1.6. — METATOM, Suomen teollisuuden ja energiahuollon esittely
 - VTT:n metallilaboratorio ja reaktorilaboratorio
 - Sopimuksen allekirjoitus-tilaisuus
- 2.6. — Olkiluoto, KPA-varasto ja voimalaitos
- 3.6. — Valmetin instrumenttitehdas Tampereella
 - Lokomon terästehdas Tampereella
- 4.6. — Loviisa, simulaattori ja voimalaitos
- 5.6. — Kymmene paperitehdas Lappeenrannassa
 - Huberin isännöimä Saimaan risteily
- 6.—7.6. — Käynti Lapissa



Lohen kalastusta Inarinjärvestä.



Saimaan risteilyllä oli hymy herkässä. Vasemmalta Yang, Jiang, Geng ja Xu.



Paperin tekotaito on keksitty Kiinassa. Silti suomalaisen paperin korkea laatu hämmästytti.

Kiinan Ydintutkimusseuran ja Suomen Atomiteknillisen Seuran yhteistyösopimus

Kiinan Ydintutkimusseura (kotipaikka Beijing) ja Suomen Atomiteknillinen Seura (kotipaikka Helsinki) ovat molempien maiden tieteenharjoittajien tahdon mukaisesti, lisätäkseen molemminpuolista tietämystä ja edistääkseen Seurojen välistä tieteellisteknistä vaihtoa ja yhteistyötä, solmineet ystävällisten neuvottelujen tuloksena seuraavan sopimuksen.

I Artikla

Tämän sopimuksen tarkoituksena on kehittää Seurojen välistä ystävällistä vaihtoa ja yhteistyötä sekä edistää ydintutkimuksen ja ydinteknologian rauhanomaista käyttöä.

II artikla

Kaikki Seurojen tässä vahvistamat tai sopimat oikeudet ovat molemminpuolisia.

III artikla

Molemmat osapuolet ovat sopineet toteuttavansa seuraavia tavoitteita:

1. Seurat pyrkivät edistämään molempien maiden korkeakoulujen ja tutkimuslaitosten välisiä yhteyksiä.
2. Seurat pyrkivät kaikkiin tavoin auttamaan vierailujen, koulutuksen ja lyhytaikaisten kurssien järjestämisessä vastapuolen ydintutkimuksen ja ydinteknologian edustajille.
3. Seurat vaihtavat ja lähettävät toisilleen molemminpuolisen edun mukaisesti teknistä informaatiota ja alan aikakauslehtiä.
4. Seurojen välisiä yhteyksiä vahvistetaan keskinäisellä kirjeenvaihdolla tai edustajien tapaamisella.
5. Seurat informoivat toisiaan oman maansa kansainvälisistä kokouksista. Jos kokoukset ovat jomman kumman Seuran järjestämiä, kolme toisen Seuran edustajaa voi osallistua niihin ilman osallistumismaksua.

IV artikla

Tämä sopimus astuu voimaan allekirjoituspäivämäärästä lähtien. Sopimus on automaattisesti voimassa, ellei toinen osapuoli ilmoita toiselle kirjallisesti sopimuksen purkamisesta kuuden kuukauden irtisanomisajalla. Jos sopimusta halutaan muuttaa tai täydentää, on tästä kirjallisesti ilmoitettava toiselle osapuolelle.

V artikla

Kumpikaan Seura ei ole vastuussa mistään tähän sopimukseen liittyvistä kustannuksista, ellei asiasta ole aiemmin tehtyä kirjallista sopimusta.

VI artikla

Tämä sopimus on allekirjoitettu kesäkuussa 1987 Helsingissä. Se on tehty kahtena kappaleena, toinen kiinaksi ja toinen suomeksi, molempien ollessa yhtä päteviä.

Helsingissä 1.6.1987

Kiinan Ydintutkimusseura
Suomen Atomiteknillinen Seura

HDR-reaktoriturvallisuusohjelma

Heissdampfreaktor (HDR) -reaktoriturvallisuustutkimusohjelma on tämän hetken suurin yksittäinen Saksan liittotasavallan tutkimuksen ja teknologian ministeriön rahoittama reaktoriturvallisuusaihepiirin tutkimusprojekti. Käytöstä poistetussa HDR-laitoksessa on suoritettu lähes täyden mittakaavan kokeita vuodesta 1976 lähtien. Tutkimusaihepiireinä ovat ainetta rikkomaton testaus (NDT), materiaalien karakterisointi, termohydrauliikka, rakenteiden dynamiikka ja vaurioitumiskäyttäytyminen, paloturvallisuus ja käytöstäpoisto. Valtion teknillinen tutkimuskeskus on osallistunut yhteistyöhön vuodesta 1979 lähtien. Osallistumisen ovat rahoittaneet KTM, VTT, voimayhtiöt ja STUK.

Heissdampfreaktor - reaktoriturvallisuusohjelma (HDR) on yksi Saksan liittotasavallan huomattavimpia kokeellisia reaktoriturvallisuusaihepiirin tutkimusohjelmia. Varsinainen tutkimusprojekti käynnistyi vuonna 1976. Kuten useiden merkittävien aihepiirien kokeellisten tutkimusprojektien yhteydessä, tämänkin ohjelman käynnistymistä edelsivät monet vaiheet, joiden aikana vähitellen havaittiin voimantuotantoon tarkoitettujen prototyyppi-ydinvoimalaitoksen soveltumattomuus alkuperäiseen tarkoitukseensa. Lähempää löytyy meille tunnetumpana esimerkkinä Marvikenin ydinvoimalaitos Ruotsissa.

HDR-laitos sijaitsee Kahlissa n. 40 km itään Frankfurtista. Tulistetulla höyryllä sähköä tuottava 100 MW reaktori rakennettiin vuosina 1965—1969 (kuva 1). Puolentoista vuoden käytön aikana havaittiin merkittäviä turvallisuuspuutteita, erityisesti polttoainesauvojen vuotamista. Tämän seurauksena laitos poistettiin käytöstä. Samanaikainen PWR- ja BWR-laitosten yleismaailmallinen kehitys vaikutti myös siihen, että muiden laitosyhteyksien kehitys väheni tai täysin lopetettiin.

Vuosina 1972—1973 valmistui SLT:n tutkimuksen ja teknologian ministeriössä (BMFT) HDR-tutkimusohjelma. Entisen voimaa tuottavan reaktorin todettiin soveltuvan erinomaisesti suuren mittakaavan reaktoriturvallisuuskokeisiin. Laitoksen dekontaminointi toteutettiin ja HDR-projekti käynnistyi. Alun perin ohjelman piti kestää runsaat viisi vuotta. Aluksi oli määrä tehdä laitoskonstruktiota vähemmän rasittavia kokeita. Projektin päätösvaiheessa suunniteltiin tehtäväksi kokeita, jotka osittain vaurioittaisivat suojarakennusta ja paineastiaa. Tämän jälkeen laitos oli määrä sulkea.

Kehitys ei kuitenkaan kulkenut 1970-luvun alussa suunniteltuja uomia. HDR-tutkimusohjelman toteutus viivästyi muuttaman vuoden. Samaan aikaan tapahtumat maailmalla, erityisesti TMI-2-onnettomuus, asettivat uusia vaatimuksia reaktoriturvallisuudelle. Syntyi uusi HDR-tutkimusohjelma, jolloin alkuperäinen ohjelma sai nimekseen HDR Phase I. Se toteutettiin lopulta vuosina 1976—1983. HDR Phase II suunniteltiin nelivuotiseksi ja toteutettavaksi vuosina 1984—1987. Hyvin palvellut reaktoriveteraani ei tällöin vielääkään pääse ansaitsemalleen levolle, vaan mm. putkistojen ikääntymiskysymykset ovat aiheuttaneet sen, että on ryhdytty valmistelemaan noin kolmevuotista koeohjelmaa HDR Phase III. Ohjelma suunnitellaan toteutettavan vuosina 1988—1991. Sikälinen ministeriö Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) on alustavasti suostunut rahoittamaan jatko-ohjelman.

Alkujaan HDR-tutkimusohjelma oli täysin saksalainen ohjelma. Useat SLT:n tutkimuslaitokset sekä myös laitosvalmistajat osallistuivat tutkimukseen, joka rahoitettiin kokonaan julkisella rahoituksella. Vähitellen eräiden muiden maiden tutkimuslaitoksia liittyi mukaan, näiden muassa Valtion teknillinen tutkimuskeskus Ruotsin Studsvik Energiteknik AB:n sopimuskumppanina vuonna 1979. Yhdysvalloista yhteistyössä on mukana NRC ja EPRI, Sveitsistä EIR Würenligen (kuva 2).

HDR vaihe I (1976—1983)

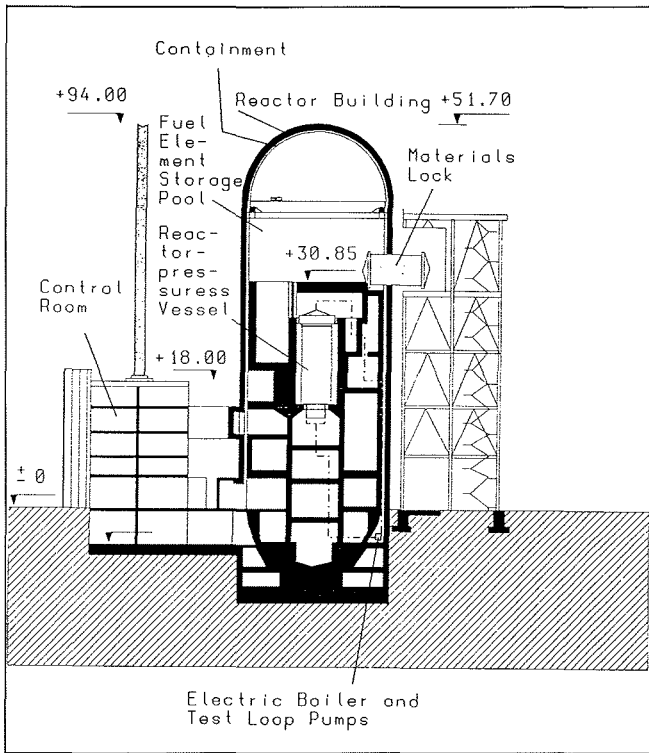
HDR vaihe I oli kokonaiskustannuksiltaan lähes 100 MDEM. Se oli toinen kahdesta suuresta BMFT:n rahoittamasta reaktoriturvallisuustutkimusohjelmasta, kuitenkin selvästi pienempi kuin ”suurin ja kaunein”, Projekt Nukleare Sicherheit (PNS). Nytemmin HDR-projekti on jo suurin yksittäinen BMFT:n rahoittama reaktoriturvallisuustutkimusohjelma PNS-

projektin päätyttyä vuonna 1986 ja uudemman suurprojektin, 2D/3D-projektin, kustannusten kääntyttyä laskuun. Projektin johto on alusta pitäen ollut Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK).

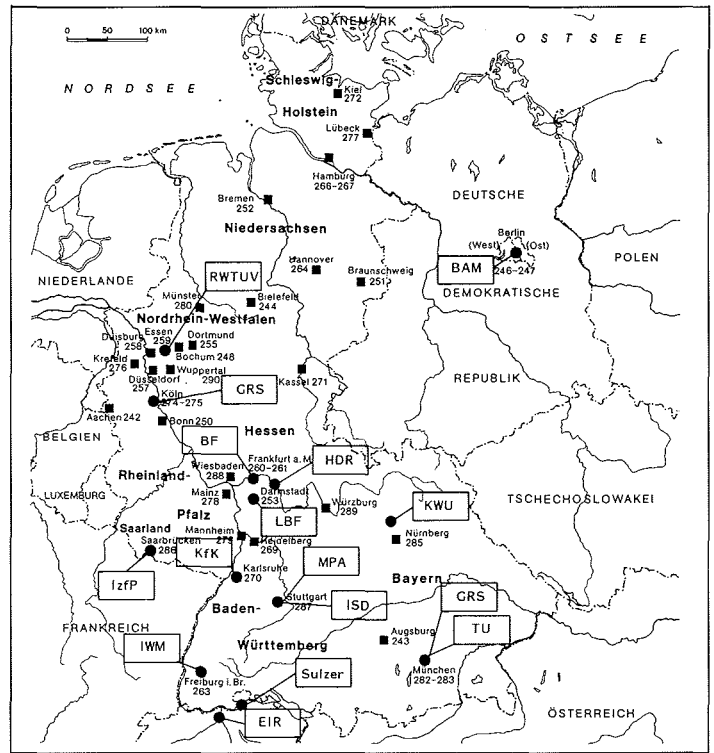
Ohjelma jaettiin viiteen osaohjelmaan EV 1000, 2000, ..., 5000. Osaohjelma EV 1000 käsitti ainetta rikkomattomien aineenkuetusmenetelmien (NDT) tutkimuksen. Sen vastuullinen tutkimusorganisaatio on IzfP Saarbrücken. Tutkimusohjelman perusajatus on, että HDR-laitoksen komponenteille, erityisesti paineastialle, tehdään NDT-tutkimuksia eri menetelmillä. Lopuksi tehdään ainetta rikkovat mittaukset, joiden avulla arvioidaan eri NDT-menetelmien soveltuvuus, edut ja haitat. Mittausmenetelmien soveltuvuudesta materiaalissa olevien säröjen löytämiseen ja särön geometrian määrittämiseen saadaan arvokasta tietoa. Tutkimus jatkuu edelleen HDR vaihe II:ssa jo pelkästään siksi, ettei ainetta rikkovia kokeita voida tehdä niin kauan kuin laitosta käytetään muihin HDR-ohjelman kokeisiin.

Osaohjelmassa EV 2000 tutkittiin paineastian ja putkiston kuormituksia ja materiaaliominaisuuksia. Myös tämä tutkimus jatkuu edelleen HDR vaihe II:ssa. Selvitettävillä rakenteisiin kohdistuvat kuormitukset ja toisaalta rakenteiden kuormitettavuus onnettomuusolosuhteissa saadaan selville rakenteiden turvallisuusmarginaali, so. kuinka kaukana materiaali on murtumisrajasta. Todellisissa onnettomuusolosuhteissa kuormitus vaihtelee ajallisesti ja paikallisesti, samoin materiaaliominaisuudet vaihtelevat. Osaohjelman tutkimus on käsittänyt kokeellista suuren ja pienen mittakaavan tutkimusta (termoshokkikokeet, korroosiotutkimus, autoklaavit, fraktografia) ja laskentamenetelmien kehitystä. Vastuullinen tutkimuslaitos on Materialprüfungsanstalt Stuttgart (MPA). VTT:n tutkija osallistui runsaan vuoden ajan projektin työhön MPA:ssa vuosina 1982—1983.

VTT:n yhteistyö HDR-projektin kanssa alkoi ensimmäisen kerran osaohjelman EV 3000 yhteydessä. Tässä ohjelmassa suoritettiin primaaripiirin suurten komponenttien toimintakykyä selvittäviä kokeita (eristysventtiilit, takaiskuventtiilit), suihkun törmäyskokeita sekä suojarakennuksen blowdown kokeita. Rinnan kokeellisen tutkimuksen kanssa kehitettiin termohydrauliikan laskentamenetelmiä. VTT ja TVO toteuttivat yhdessä Studsvikin kanssa erityisventtiilien lisensioitavuuden tukiprojektin (IVLSP). Yhteistyö oikeutti



Kuva 1. Poikkileikkäuskuva HDR-laitoksesta.



Kuva 2. HDR-tutkimusohjelmaan osallistuvat organisaatiot.

suomalaisen osapuolen saamaan myös HDR-ohjelman tutkimustulokset vasta- korvauksena sille, että KfK sai IVLSP:n tulokset. IVLSP-sopimus oli erillinen sopimus, joka oikeutti Studsvikin kanssa yhteistyössä olevan suomalaisen tahon osapuoleksi myös Studsvikin ja KfK:n väliseen HDR-Marviken II Critical Flow Tests -tiedonvaihtosopimukseen. HDR vaihe I:n aikana EV 3000 oli tärkein osahjelma, mutta sittemmin erityisesti EV 2000:n merkitys on korostunut.

Osohjelmissa EV 4000 (maanjäristyskoeket, rakenteiden dynamiikka) ja EV 5000 (muut kokeet, mm. suojarakennuksen tiiviys) VTT ei ollut aktiivisesti mukana. Osohjelmien osuus koko tutkimusohjelmasta oli noin 20 %. EV 4000-osaohjelman perusajatuksena oli suorittaa kokeita, joissa rakenteisiin kohdistuva kuormitus vähitellen kasvaa. Viimeisissä kokeissa ennen laitoksen lopullista sulkemista kuormitukset nousevat niin suuriksi, että rakenteet osittain murtuvat. Mm. tämän johdosta osohjelman koosuunnitelmaa on jouduttu viimeisten kokeitten osalta siirtämään samalla kun keskiuusia kuormituskokeita suoritetaan useamman tyyppisinä (lentokonetörmäyssiinnot, täristyskokeet, melukokeet).

HDR vaihe II (1984—1988)

VTT solmi HDR vaihetta II koskevan yhteistyösopimuksen KfK:n kanssa vuonna 1984. Myöhemmin myös IVO liittyi mukaan sopimukseen. Projektin toinen vaihe on kustannuksiltaan runsaat 40 MDEM. Aihepiireiltään se jatkuu hyvin kiinteästi ensimmäisen vaiheen pohjalta. Painopisteaihepiirit ovat EV 2000 ja EV 4000. VTT on sitoutunut suoritta-

maan 10 henkilötyövuoden tutkimuspanoksen, josta noin puolet tullaan suoritamaan tutkijatyönä Saksan liittotasavallassa. Suomessa tehtävä työ tukee samalla HDR-projektin tutkimusohjelmaa. Se liittyy valtaosaltaan todellisten kuormitusten ja rakenteiden kuormitettavuuteen sekä vaurioitumismekanismien tutkimiseen (EV 1000 ja EV 2000) ja on tältä osin KTM:n rahoittamaa. Jonkin verran on ollut myös EV 3000 ja EV 5000-osaohjelmiin liittyvää tutkimusta, mikä on suoritettu IVO:n ja VTT:n rahoituksella.

EV 1000 osohjelmissa VTT:n tutkija työskenteli vuoden ajan (1984—1985) IzfP Saarbrückenissa. Yhteistyö jatkuu pienemmällä laajuudella edelleen. Talvesta 1986 lähtien toinen VTT:n tutkija on työskennellyt EV 2000-osaohjelmassa MPA Stuttgartissa. Tämä työkomennus päättyi alkusyksystä 1987, mutta yhteydet SLT:aan säilyvät edelleen tiiviinä, sillä kuluvan vuoden kesäkuussa työskentelynsä aloitti kaksi VTT:n tutkijaa, toinen Institut für Werkstoffmechanik (IWM) Freiburgissa ja toinen osittain MPA:ssa ja KfK:ssa. Komennukset liittyvät EV 2000-ohjelman töihin ja kestävät runsaan vuoden.

Osohjelmien tutkimusaihepiirit ovat valtaosaltaan ensimmäisen vaiheen tutkimuksen jatkoa. Näin on erityisesti osohjelmissa EV 1000, EV 2000 ja EV 4000. Osohjelmissa EV 3000 komponenttikokeet ovat jääneet pois, uusina kokeina on suoritettu paineastian ja putkiston lämpötilan sekoituskokeita. Viimeksi mainitut kokeet tukevat EV 2000-osaohjelman kokeita, IVO on tässä aihepiirissä KfK:n yhteistyökumppani. Osohjelman EV 5000 tutkimus koske-

suojarakennuksen palokokeita ja laitoksen komponenttien ja betonirakenteiden käytöstäpoistokokeita. VTT on osallistunut paloturvallisuusaiheiseen tutkimukseen pienellä työpanoksella.

Suomalais-saksalainen yhteistyö on laajimmillaan osohjelmissa EV 2000, joka on jaettu kahteen tutkimusaiheeseen: lämpötransienttien vaikutukset ja putkisto- ja vaurioitumiskokeet.

Lämpötransienttien vaikutukset

Termoshokkiohjelma sisältää seuraavat koesarjat:

- jaksottaisia lämpöshokkikuormituksia reaktoripaineastian yhdealueelle
- jaksottaisia lämpöshokkikuormituksia reaktoripaineastian seinämälle
- vesien sekoittumiskokeet reaktoripaineastiassa, yhteessä ja siihen välittömästi liittyvässä putkisto-osassa
- pitkävaikutteinen lämpötransientti reaktoripaineastiassa, jonka seinämässä ja yhteessä sijaitsee syvä särö

Termoshokkikokeita on suoritettu projektin alusta lähtien. Vaiheessa I kuormitettiin paineastian yhdettä ja vaiheessa II lisäksi paineastian seinämää. Koe- ja mitausjärjestelyä esittää kuva 5. Kokeissa paineastian paine on 106 bar ja lämpötila 300°C ja jäähdytettävän veden lämpötila 60°C. Kuormitus on tähän asti suoritetuissa kokeissa ollut 45 s kestävä jäähdytys jota seuraa pitempi lämpenemisvaihe, jonka jälkeen kuormitus toistetaan. Termoshokkiohjelmaa päätetään vaiheessa II

paineistettua termoshokkia simuloiviin kokeisiin, joissa suoritetaan pitkäkestoinen jäädytys. Nämä kokeet suoritetaan alkuvuodesta 1988 ja niissä on tarkoitus saada aikaan rajoitettu särön stabiili kasvu. Kokeille suoritettavien etukäteisanalyysojen ja esikokeiden avulla pyritään varmistamaan, että särönkasvu on alle 10 % särön syvyydestä ja ettei vuotoa synny.

Yhdealueella on kuormituksella synnytetty säröjä alunperin ehjään rakenteeseen ja syvin särö on tällä hetkellä noin 25 mm. Säröjen ydintäminen paineastian seinämään osoittautui odotettua hankalammaksi ja hitaammaksi, jolloin koesarjan tavoitteiden saavuttamiseksi on kuormitusalueelle tehty useita lovia, joista syvin ulottuu perusaineeseen. Paineastian seinämän alueella ovat syvimät säröt tällä hetkellä noin 25 mm.

Suoritettuja kokeita on analysoitu useilla eri menetelmillä aina 3-dimensioisiin elementtimenetelmällä suoritettuihin epälineaarisiin analyyseihin asti. Analysointiin on myös osallistunut useita eri laitoksia. Kokeiden aikana on säröjen kasvua seurattu mm. akustisen emissioita avulla ja kokeiden jälkeen on suoritettu tarkastus useilla eri NDT-menetelmillä. Yhdealueelta otettiin vaiheen I aikana koepala ja kokeiden loputtua tullaan ottamaan lisää koepaloja. Koepalojen murtopinnalta pystytään jäljittämään särön syvyys ja kasvunopeus, jolloin sekä NDT- että laskentamenetelmien todellinen tarkkuus saadaan selville.

Vaikka laskennallisten analyysojen tulokset ovat reippaasti yliarvioineet särönkasvun ja NDT-tutkimukset puolestaan aliarvioineet todellisen särönsyvyyden, on projektin kuluessa menetelmien tarkkuutta voitu huomattavasti parantaa.

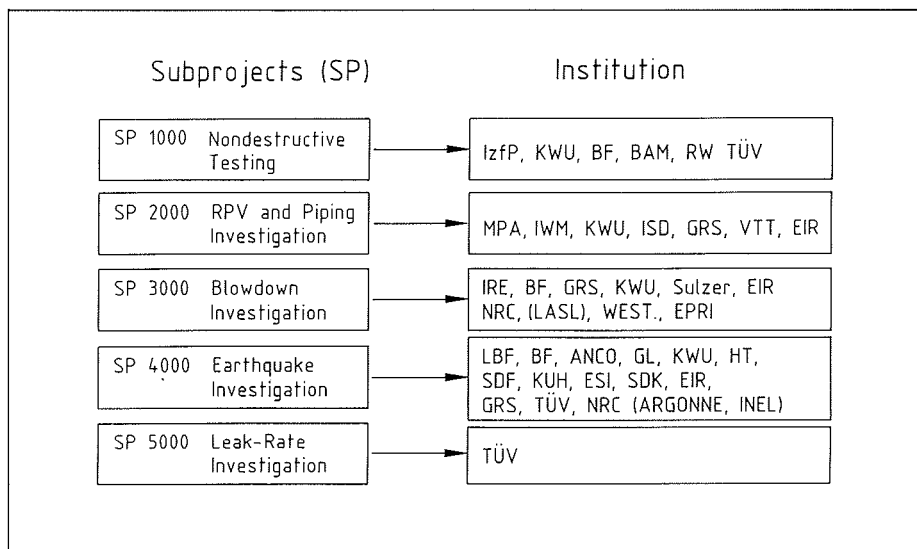
VTT:lla on ollut merkittävä osuus materiaaliominaisuuksien karakterisoinnissa (autoklaayikokeet) lämpöshokkisäröjen kasvumekanismien ja syvyyden määrittämiseen liittyvissä tehtävissä. Lisäksi on suoritettu numeerista analysointityötä, johon liittyy VTT:n tutkija työskentelee Institut für Werkstoffmechanik'ssa (IWM) Freiburgissa kesästä 1987 lähtien noin vuoden ajan.

Putkistojen vaurioitumiskokeet

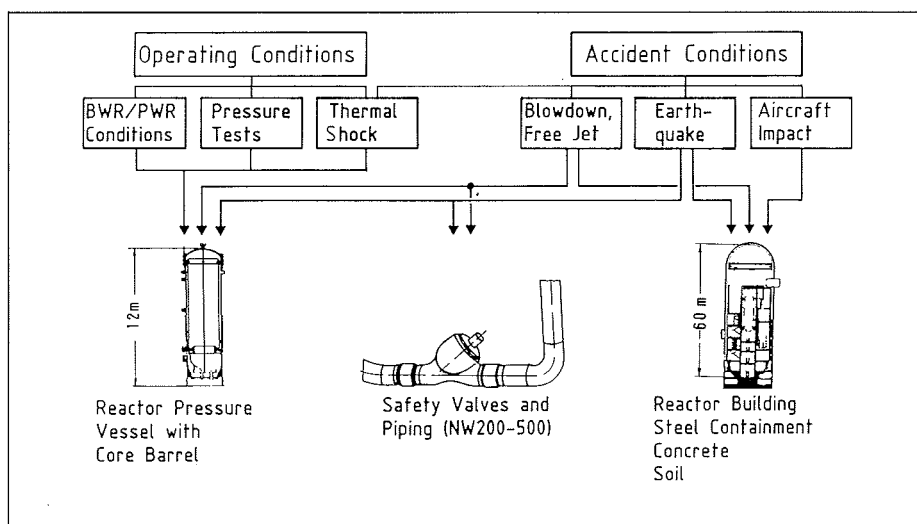
Putkistokokeita on suoritettu alusta lähtien kuvan 6 putkistolla, joka vastaa primariipiirin putkistoa pituudeltaan sekä tuennaltaan ja jäykkyydeltään.

Vaiheen I aikana kokeet keskittyivät taikaiskuventtiilien toiminnan varmistamiseen sekä syntyvän paineiskun numeeriseen analysointiin. Putkisto oli särötön. Blowdown kokeet jatkuivat myös vaiheessa II, jolloin painopiste oli paineiskun putkistoon aiheuttaman kuormituksen analysoinnissa.

Vaiheessa II suoritettiin kolme blowdown koetta, joissa syntyvää paineiskua joka kerralla kasvatettiin. Jokaisen kokeen kuormitus vastasi giljotiinimurtuman pri-



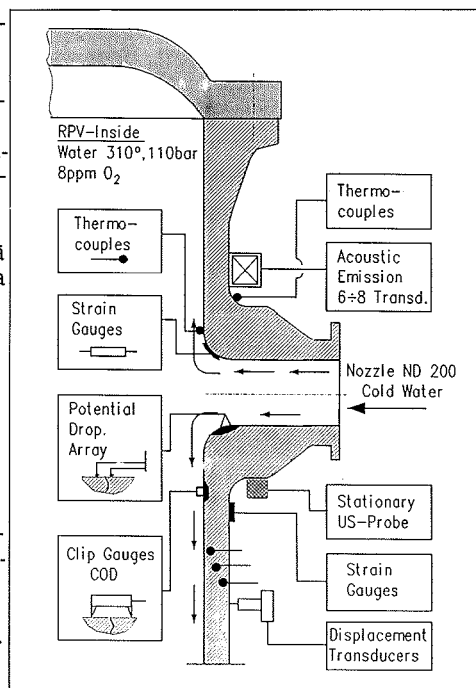
Kuva 3. HDR-tutkimusohjelman osa-alueet ja osallistajat.

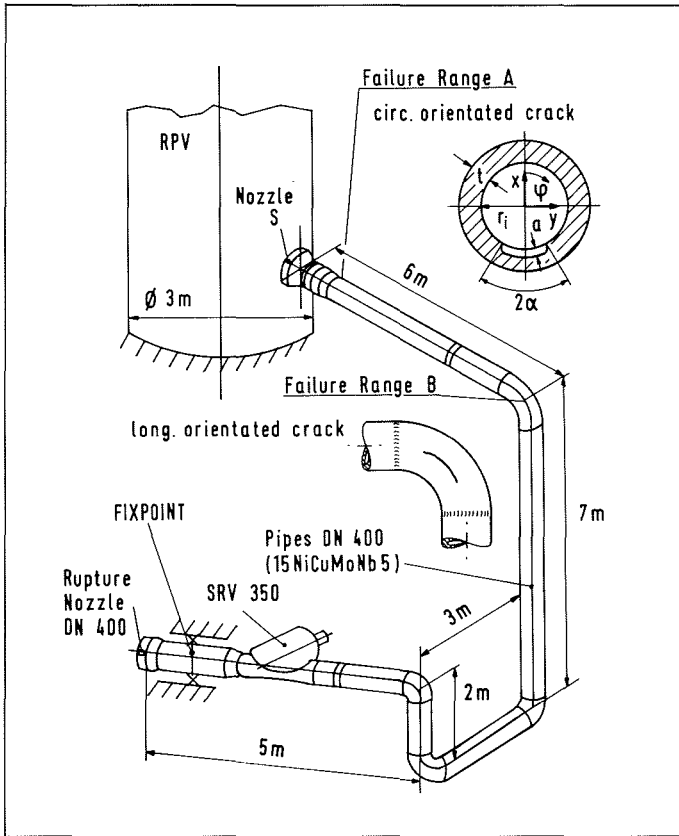


Kuva 4. Testauksen kohteena olevat komponentit ja tarkasteltavat kuormitustyyppit.

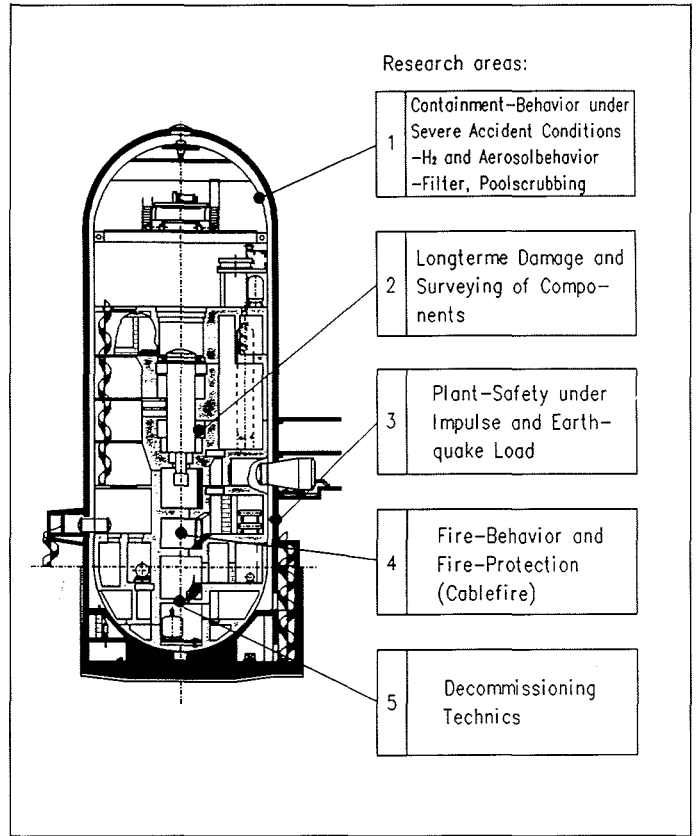
maariipiirille aiheuttamaa vastustusta. Mitattu pysyvä venymä oli kaikkien kokeiden suorituksen jälkeen suurimmillaan n. 3 % ilman, että putkistossa voitiin havaita vaurioita. Koesarjan kokeiden mitaustuloksia on käytetty lukuisten eri putkistoanalysointiohjelmien verifiointiin ja testaukseen, mm. VTT:n PIPEBREAK-ohjelma. Viimeisessä kokeessa kasvoivat putkiston kuormitukset niin suuriksi, että tarkkaan jännitysanalyysiin päästiin vasta epälineaarisiin analyyseihin soveltuvilla ohjelmilla.

Projektin toisen vaiheen loppupuolella suoritettiin putkistolla kaksi koetta, joissa putkistoa kuormitettiin vaurioon saakka. Ensimmäisessä kokeessa kasvatettiin väsyttävällä kuormalla suoraan putkeen sisäpinnalle tehdystä lovesta ydintyvä särö putken seinämän läpi: Kuvan 6 kohta A. Toisessa kokeessa ydintettiin putkimutkan alueelle alunperin ehjään putkimutkan särö, joka väsyttämällä kasvatettiin vuotoon saakka: kuvan 7 kohta B. Molemmat kokeet suoritettiin korkeassa lämpötilassa (240°C) ja korkeassa pai-





Kuva 6. Putkistokokeiden kohteena oleva HDR-laitoksen putkiston osa.



Kuva 7. Suunnitellun HDR-projektin III vaiheen tutkimusaiheet.

neessa (106 bar) ja molemmissa kokeissa pyrittiin aikaansaamaan korroosiosärönkasvua.

Molemmissa kokeissa oli tuloksena vuoto ennen murtumaa ehdon toteutuminen huolimatta siitä, että putkisto liittyi korkeapaineiseen paineastiaan. Putkimutkalte suoritettussa kokeessa tosin syntynyt vuoto oli varsin suuri.

VTT:lla on ollut näkyvä osuus putkiston vaurioitumiskokeiden numeeristen analyysien suorituksessa, johon liittyy on VTT:n tutkija työskennellyt kevästä 1986 lähtien MPA:lla Stuttgartissa. Lisäksi VTT on käyttänyt Blowdown kokeiden tuloksia oman putkistoanalyysi-valmiutensa kehittämisessä.

Tulevaisuuden näkymät

Projektin II-vaiheen toteutumisen aikana on sekä teollisuuden että viranomaisten taholta esitetty voimakasta tarvetta jatkaa tutkimusohjelmaa myös julkisella rahoituksella. Alunperin BMFT:n omaksuman linjan mukaan II-vaiheessa jäljelle jäävät tutkimuskohteet olisivat teollisuuden ja sähköntuottajien rahoittamia, esimerkkinä erityisesti laitosten

ikäntymisen aiheuttama tutkimustarve. Kesällä 1987 BMFT on tehnyt päätöksen HDR vaihe III:n käynnistämisestä vuosiin 1988–1991.

Alustavassa, tosin jo osittain vahvistetussa, tutkimusohjelmassa (kuva 7) uusi aihepiiri on vakavien reaktorionnettomuuksien tutkiminen, erityisesti vedyn käyttäytyminen suojarakennuksessa ja onnettomuuden hallinta. Entiset osaohjelmat jatkuisivat soveltuvin osin. Suomen kannalta kiinnostavina aihepiireinä ovat NDT-tutkimus, rakenteiden (reaktoripaineastia ja putkisto) ikäntymiseen liittyvä tutkimus sekä palokokeet.

Projektin II vaiheessa termoshokkikuormitusten alueella suoritettava tutkimus jatkuu, vaikka paineistettu termoshokki (PTS)-aiheen kokeita ei jatketa. Painopiste tulee siirtymään korkealla kuormitustasolla pienellä kuormitusamplitudilla tapahtuvan kuormituksen tutkimukseen. Käytännössä kokeissa simuloidaan erilaisia lämpötilan sekoittumisesta ja kerrostumisesta aiheutuvia ongelmia. Kuormitettavina rakenteina tulevat olemaan paineastian ja sen yhteen lisäksi putkisto.

Putkiston alueella jatketaan kokeita valmiiksi vaurioitettulla putkistolla. Kokeissa tullaan putkistoon liittämään valmiiksi säröytetty komponentti: suora putki, jossa on kehäsuuntainen särö, tai putkimutka, jossa on pituussuuntainen särö. Pääaiheina ovat särönkasvu voimakkaasti

korrodoivassa ympäristössä sekä putkiston lopullinen vaurioitumismekanismi. Putkiston vaurioituminen ja vuoto aiheutetaan paineiskulla ja koesarja tukee nk. vuoto-ennen-murtumaa (LBB, leak-before-break)-ehdon verifiointia ja analyysimenetelmien kehitystyötä.

VTT ottaa kuluvan syksyn aikana kantaa HDR-yhteistyön jatkamiseen. Tähänastinen kokemus yhteistyöstä on ollut myönteistä ja HDR-projektin tutkimustulokset useilta osin konkreettisesti hyödynnettävissä myös Suomessa. HDR-yhteistyö on tämän hetken tärkein ja laajin reaktoriturvallisuusaihepiirin yhteistyökohte Suomen ja SLT:n välillä. Näin vakiintuneet kontaktit ovat osaltaan auttaneet laajentamaan tutkimusyhteistyötä myös Suomen ja eräiden muiden SLT:n tutkimusorganisaatioiden kanssa. Suomessa on tärkeää tuntea SLT:n reaktoriturvallisuusaiheisen tutkimuksen viimeisimpiä tuloksia jo siksi, että muuten erityisesti amerikkalaisen turvallisuusfilosofian merkitys Suomessa saattaisi ylikorostua. □

Kuva 5. Lämpöshokkikokeiden koe- ja mitausjärjestely yhteen taivealueella ja reaktoripaineastian seinämässä olleiden säröjen kasvuedellytysten selvittämiseksi.

Energia-alan kotimaisesta yhteistyöstä

Julkisuudessa on aika ajoin kummasteltu energia-alan järjestöjen runsautta. Järjestöitymiseen on ollut kuitenkin rationaaliset perusteet. Voimantuotanto on Suomessa hajautettua ja yhdistyksillä on tällöin tärkeä koordinoititehtävä. Yhdistysten kannanotot viranomaisiin ja julkisuuteen päin ovat lisäksi uskottavampia kuin varsinaisten energiantuottajien.

Vuosisadan alkupuolella perustettiin Energiataloudellisen Yhdistyksen edeltäjä, Suomen Höyrykattilayhdistys (1911). 1920-luvulla syntyivät Maaseudun Sähköyhtymien liitto, Suomen Sähkölaitosyhdistys ja Suomen Vesivoimayhdistys. Yhdistyksiä tarvittiin paitsi teknisistä ja taloudellisista syistä myös alaan voimakkaasti vaikuttavan lainsäädännön vuoksi. Energiasektorilla oli alun pitäen turvallisuussäätelyä.

Myöhemmin synä järjestöille on ollut mm. vaikuttaminen energiahuollollisiin ratkaisuihin, kun valtiovallan taholta on kiinnitetty huomioon otettavaa huomiota energia-politiikkaan.

1960-luvun lapsia ovat Lämpölaitosyhdistys, Teollisuuden Sähköntuottajien Liitto ja ATS. 1970-luvulla perustettiin Sähköntuottajien Yhteistyövaltuuskunta.

Onko järjestöjä jo liikaa?

Totta on, että energia-alan järjestöjä on runsaasti. Toistaiseksi kullekin on löytynyt oma lokero. Käsiteltävät asiat menevät osin päällekkäin, mutta silloin on mahdollista antaa esimerkiksi yhteinen julkilausuma. Hyvänä esimerkkinä on muutaman vuoden takainen kannanotto ydinvoimasta, jossa mukana olivat Suomen Sähkölaitosyhdistys, Suomen Voimalaitosyhdistys, Sähköntuottajien Yhteistyövaltuuskunnan sihteeristö, Teollisuuden Sähköenergialiitto ja Lämpölaitosyhdistys.

Tässä yleisluontoisessa esityksessä järjestökenttää on käsitelty laajalti sikäli, että mukaan on otettu eräitä liittymiä, jotka eivät ole yhdistyksiä (esim. sähköhuollon neuvottelukunta). Toisaalta liiallisen painumisen välttämiseksi mukaan ei ole mahdutettu merkittäviä, alan ulkopuoli-

sia järjestöjä, joilla kyllä olisi painoarvoa (esim. Metsäteollisuuden Keskusliitto). Koska ajatuksena on tarkastella yhdistyksiä, joiden suoranaisten toimikenttä on energiahuollon ratkaisut, niin myöskään työmarkkinajärjestöt eivät ole mukana.

Yhteistyötä ja koordinaatit

Voimantuotanto Suomessa on hajautettu. Tämä on keskeinen syy yhtiöiden tarpeeseen kuulua yhdistyksiin. Viranomaiset tarvitsevat tietoja energiahuollosta, pyytävät lausuntoja mietinnöistä ja lakiehdotuksista sekä etsivät edustajia komiteoihin ja yhteistyöelimisiin.

Ilman yhdistysten koordinoitua työ olisi olennaisesti nykyistä hitaampaa ja tehotomampaa. Puhumattakaan siitä, että yritysten välille muodostuisi tarpeetonta kitkaa kun "teillä on jo edustus siellä ja siellä, niin miksi me emme päässeet tuonne."

Toinen keskeinen vaikutin yhdistyksille on kannanottojen uskottavuus. Yhdistykset eivät toimi voittoperiaatteen mukaan, vaan niillä on yleishyödyllinen rooli. Siksi niille on muodostunut viranomaisiin ja julkiseen sanaan päin "luotettavampi" kuva.

Henkilökohtaiset kontaktit

Yhdistyksiä perustellaan myös sillä, että niissä saadaan tarpeellisia kontakteja ja vaihdetaan tietoja ja kuulumisia.

Mitä enemmän yhdistyksiä, sitä useammat pääsevät luomaan kontakteja? Kyse on ehkä enemmänkin siitä, että jo koulutusvaiheessa eriydytään omille sektoreille, joilla toimivien on luontevaa pitää yhteyksiä keskenään.

Eri tasoja vaan ei yhdistyspyramidia

Osa yhdistyksistä on selkeitä painostusjärjestöjä, jotka pyrkivät välittämään tietoa ja kantoja poliittisille päättäjille ja jakamaan informaatiota sekä lehdistölle että suurelle yleisölle. Järjestöviuhkaan mahtuu myös henkilöjärjestöjä, joissa "vain" ylläpidetään asiantuntemusta.

Yhdistysten toimialat vaihtelevat melkoisesti. Laajin sektori on Energiataloudellisella Yhdistyksellä (ETY). Se ei kuitenkaan ole kattojärjestö. Järjestökenttä ei myöskään ole pyramidi, jossa alaosan muodostaisivat kapeat sektorijärjestöt, jotka aina kuuluisivat seuraavassa portaassa yhdistävään järjestöön. Kukin järjestö on omalla sektorillaan itsenäinen.

Valtionhallinnon elimet

Myös valtionhallinnossa toimii yhteistyöelimisiä, joissa on edustettuna eri tahoja ja joille on nimitetty jopa päätoimisia sihteeereitä samaan tapaan kuin yhdistyksillä on asiamiehiä.

Tunnetuimmat niistä kuuluvat kauppa- ja teollisuusministeriön alaisuuteen. Niitä ovat Energiapolitiikan neuvosto, Sähköhuollon neuvottelukunta, joka on lakisääteinen ja Atomienergianeuvottelukunta. Kullakin näistä on monia jaostoja.

Unohtaa ei kuitenkaan sovi esimerkiksi Puolustustaloudellisen neuvottelukunnan energiajaosta. Sähkötarkastuskeskus on yhdistys, tosin julkisoikeudellinen eli sen tehtävät ja asema on määritelty laissa.

Energia-alan järjestöissä korostuu alan osaaminen ja teknistaloudellinen asiantuntemus. Valtionhallinnon elimissä asiantuntemusta pyritään kytkemään muuhun yhteiskuntaan laajemmin kuin mitä yhdistykset ovat tehneet.

Case: sähköhuollon suunnittelu

Sähköhuollon suunnittelua ollaan uudistamassa. Tässä käytetään kuitenkin voimassa olevaa suunnitteluprosessia esimerkkinä.

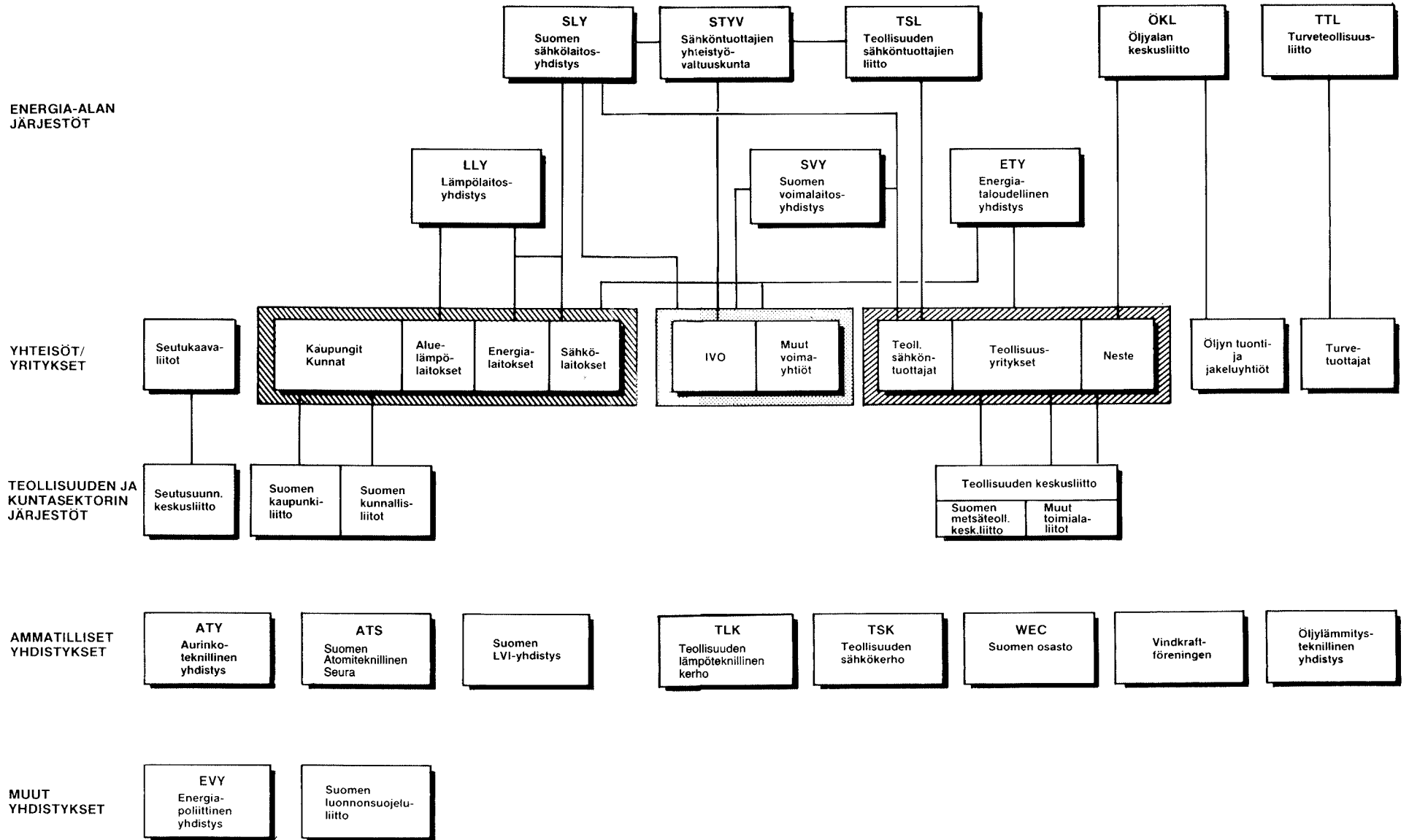
Keskeisen työn vuosittain vahvistettavasta sähköhuollon runkosuunnitelmasta tekee STYV, jonka käytettävissä onkin koko voimantuotanto- ja sähkökäyttösektoreiden asiantuntemus.

Kahden yhdistyksen, Suomen Sähkölaitosyhdistyksen ja Teollisuuden Sähköntuottajien Liiton, lisäksi STYV:n jäsenenä on IVO.

STYV:n hioma ja valtuuskunnan hyväksymä ehdotus käsitellään sähköhuollon neuvottelukunnassa. Sähköhuollon neuvottelukunta pyytää lausunnon STYV:n ehdotuksesta Energiapolitiikan neuvostolta.

Lausunnot pyydetään lisäksi noin puolelta sadalta taholta — mukana keskeiset alan järjestöt. □

Kuva. Energia-alalla toimivat järjestöt. Lähde: Energia-alan tiedonhankintaopas. Helsinki 1984. KTM, sarja A.



ZAPOROSHJEN VOIMALAITOSTYÖT EDISTYVÄT SUUNNITELMIEN MUKAISESTI

ATS:n jäsenet tutustuivat Neuvostoliiton ekskursion lokakuussa 1983 Zaporoshjen ydinvoimalaitoksen laitostyömaahan. Silloin oli suunnitelluista kuudesta 1000 MW:n painevesireaktorista (VVER-1000) ensimmäinen yksikkö käyttöönottoavaiheessa, toinen yksikkö rakennustyövaiheessa ja kolmannen perustustyöt oli juuri aloitettu.

Kesäkuussa 1987 kävivät Perusvoima Oy:n Anders Palmgren, Juhani Santaholma ja Heikki Raumolin Zaporoshjessa. He saattoivat todeta laitoksen nykytilanteen. Suunnitelmat oli pystytty toteuttamaan pääpiirteissään vuonna 1983 esitetyllä tavalla. Kolme yksikköä oli käytössä, neljännen asennusten loppuvaiheessa, viidennen reaktorirakennus valettu ja raskaiden komponenttien asennus alkamassa sekä kuudennen rakennustyöt alimpien kerrosten tasalla. Käytössä olevien yksiköiden valmistumisvuodet ovat 1984, 1985 ja 1986 ja rakentamisaikat 53—56 kk. Rakenteilla olevat yksiköt on tarkoitus saada käyttöön vuosina 1987, 1988 ja 1989.

Zaporoshjen käynnillä voitiin todeta, että suunnitelmallinen yksiköiden rakentaminen sarjatyönä vuoden vaihesiirrolla ja käyttäen apuna runsaasti esivalmisteita oli onnistuttu toteuttamaan ainakin tähän mennessä varsin hyvin. Rakennuselementtejä ja esivalmisteiden käyttöä on tarkemmin selvitetty em. ekskursion matkakertomuksessa ATS Ydintekniikassa 1/84. Mikäli jatko sujuu yhtä hyvin, pääsevät neuvostoliittolaiset ainutlaatuisen saavutukseen maailmassa. Ensimmäisen yksikön rakennustyöt aloitettiin keväällä 1980 ja vuosikymmenen kuluessa, vuoden 1989 loppuun mennessä, saadaan kuusi 1000 MW:n yksikköä käyttöön.

Heikki Raumolin, PEVO

STUK:N LOPPUSUJOITUSLAUSUNTO

STUK:n lausunto koskien TVO:n käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitusratkaisun turvallisuutta ja teknistä toteutuskelpoisuutta on valmistunut. Lausunnon mukaan kapselointi- ja loppusijoituslaitos ovat toteutettavissa esitetyllä tavalla. Kapselien täyttö- ja testausmenetelmiä sekä kalliotilojen täyttömenetelmiä on kuitenkin vielä hiottava. Edellytykset päästöjen ja työntekijöiden säteilyannosten pitämiseksi vähäisinä ovat hyvät eikä ympäristölle aiheutuisi vakavia säteilyhaittoja onnettomuussissakaan. STUK pitää varsin mahdollisena sitä, että loppusijoitusratkaisu täyttää hyväksyttävät pitkäaikaisen säteilyturvallisuuden tavoitteet. Turvallisuusarvioihin sisältyy kuitenkin puutteita ja epävarmuuksia, joita tulee vielä vähentää tutkimus- ja kehitystyöllä.

Pekka Lehtinen, STUK

Ytimekkäät

ATOMIENERGIANEUVOITTELUKUNNAN UUSIA JULKAISUJA

Taustatietoa ydinvoimasta, 2. painos. Helsinki 1987, Valtion painatuskeskus. KTM/Atomienergianeuvottelukunta, 35 s.

Julkaisu perustuu Atomienergianeuvottelukunnan toimeksiannosta koottuun tietoaaineeseen, jota ovat olleet laatimassa useat eri tehtävissä olevat asiantuntijat. Se on yleiskatsaus ydinvoimaan ja siihen on tehty Tshernobylin onnettomuutta ja vaikutuksia kuvaavia lisäyksiä.

Taustatietoa ydinvoimasta on helppotajuisesti kirjoitettu ja se sisältää olennaisen perustiedon ydinvoimasta. Siinä selvitetään mm. ydinvoiman tekninen toimintaperiaate, taloudellinen kilpailukyky, ympäristö- ja terveyshaitat, onnettomuusriskit, ydinenergian suhde ydinaseisiin ja ydinjätehuolto. Julkaisu sopii luettavaksi kaikille, jotka haluavat saada selkeän ja ilmeisen objektiivisen yleiskuvan ydin-

energiasta. Erityisesti se on kuitenkin suunnattu taustatiedoksi energiahuollon päätöksentekoon osallistuville.

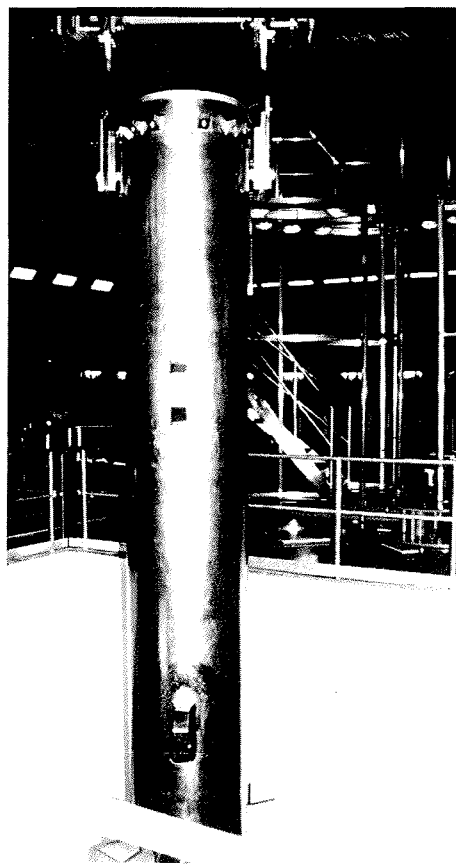
Ydinenergia-alan koulutuksen nykytilanne ja kehittämistarpeet. Helsinki 1987, Valtion painatuskeskus. KTM/Atomienergianeuvottelukunta, 27 s + liit. 5 s.

Raportissa Atomienergianeuvottelukunta esittää selvityksen ydinenergia-alan koulutuksen nykytilanteesta, lähitulevaisuuden koulutustarpeesta ja koulutuksen kehittämistarpeesta. Aiheesta on artikkeli seuraavassa ATS Ydintekniikan numerossa.

Raportti hyödyttää erityisesti alan koulutuksesta vastaavia henkilöitä korkeakouluissa ja yliopistoissa. Se kiinnostanee myös tutkimuskeskuksia ja voimayhtiöitä varsinkin jatkokoulutuksen osalta. Lisäksi tärkeä kohderyhmä on opetus- ja koulutusalan päätöksentekijät.

Pertti Salminen

OLKILUODON POLTTOAINETTA TUTKITTAVAKSI ENGLANTIIN



Käytetyn polttoaineen siirtosäiliötä nostetaan.

Olkiluodon ydinvoimalaitoksen varastoaltaista on poistettu käytettyä uraanipolttoainetta yhdeksän sauvaa. Ne kuljetettiin perjantaina 21.8. 20 tonnin siirtosäiliöillä Rauman satamaan ja sieltä edelleen Englantiin, jonne lähetys saapui ro-ro laivan mukana 26.8.1987. Siirtosäiliön kuljetti saksalainen Transnuklear-yhtiö viranomaisten tarkassa valvonnassa.

Englannissa yhdysvaltalaisen Battellen tutkimuslaitoksen toimeksiannosta selvitetään kuinka uraanipolttoaine voitaisiin käyttää entistä tehokkaammin ja siten säästää polttoainetta.

Aloite käytetyn uraanipolttoaineen viemiseksi Englantiin tuli Battellen tutkimuslaitokselta, joka myös vastaa kuljetuksen kustannuksista. Battelle kiinnostui TVO:n polttoaineesta, kun TVO oli "hinannut" pari nippua tavallista korkeampaan palamaan koeluontoisesti jättämällä niput kahdeksi ylimääräiseksi vuodeksi reaktoriin.

Tehty kuljetus oli ensimmäinen kerta, kun Olkiluodossa reaktorihallista siirretään pois käytettyä polttoainetta. Myöhemmin syksyllä TVO siirtää omalla 90 tonnin siirtosäiliöllä käytettyä uraanipolttoainetta erilliseen, Olkiluodon voimalaitosalueella sijaitsevaan käytetyn polttoaineen varastoon. Varasto turvaa käytetyn uraanipolttoaineen huollon pitkälle ensi vuosituhannelle.

Ilkka Mikkola, TVO

Vuosihuollot 1987

Loviisa

Loviisan ydinvoimalaitoksen kummallakin yksiköllä oli vuonna 1987 vuorossa ns. lyhyt vuosihuolto, jonka keston määrää pääasiassa reaktoripolttoaineen vaihto siihen liittyvine reaktorin avaus- ja kasaustöineen. Seisokin aikana oli ulkopuolisten yritysten työntekijöiden määrä keskimäärin 700.

LOVIISA 1 kytkettiin irti verkosta 27.6.1987. Käyttöjakson aikaiseksi käyttökertoimeksi vuoden 1986 seisokissa (ylös- ja alasajo mukana) muodostui 93,4 %. Käyttöjakson aikana oli Lo1:llä yksi kylmäseisokki ja yksi turpiinipikaulku. Lo1:n vuosihuolto kesti 20 vrk 23 h 6 min.

LOVIISA 2 kytkettiin irti verkosta 18.7.1987. Käyttöjakson aikainen käyttökerroin oli 96,8 % (ylös- ja alasajo mukana). Käyttöjakson aikana oli Lo2:lla yksi kylmäseisokki. Lo2:n vuosihuolto kesti 21 vrk 11 h 8 min. LOVIISA 2:lle tehtiin vuonna 1987 kontaintin tiiveyskoe, joka pitkitti vuosihuoltoa noin vuorokaudella ilman suuren kosteuspitoisuuden takia.

Lo1:llä jatkettiin aikaisemmissa revisioissa aloitettua lauhduttimien kunnostusta putkittamalla uudelleen yksi neljästä merivesilauhduuttimesta. Samantyyppinen uudelleen putkitus tehtiin -85 seisokissa ykkösturpiinin toiselle lauhduttimelle. Tämänvuotinen työ käsitti kuparinikkeliputkien vaihtamisen ruostumattomiksi SMO-putkiksi. 22 vrk aikana poistettiin ja asennettiin 10 500 putkea, hiottiin ja tarkastettiin 42 000 päätylevyn reikää sekä manklatettiin ja hitsattiin 21 000 putken päätä noin 50 asentajan voimin. Suuri työ määrä sekä kireä aikataulu edellyttivät koko seisokin ajan ympärivuorokautista työskentelyä sekä eri työvaiheiden suunniteltua limitystä.

Säätösaavakoneistoja tarkastettiin Lo1:llä 32 kpl ja Lo2:lla 27 kpl. Vanhimmissa säätösaavakoneistoissa havaittuja vaurion alkuja lukuunottamatta tarkastukset osoittivat primääripiirin laitteiden olevan moitteettomassa kunnossa.

Dieselgeneraattorien häiriötilanteiden varalle rakennettiin varasähköyhteys Ahvenkosken vesivoimalaitokselta Loviisan voimalaitokselle.

Laitosten käytettävyyden ja turvallisuuden parantamiseksi tehtiin instrumentointiin noin 50 muutostyötä. Suurin osa muutoksista kohdistui lukituksiin ja automatiikkaan.

Keväällä havaittujen polttoainevuotojen takia molemmilla yksiköillä tarkastettiin kaikki polttoaineniput. Vuotavia nippuja löytyi yksi kappale kummaltakin yksiköltä. Lo2:lta löydetty vuotava nippu kuului poistettaviin (kolme vuotta reaktorissa olleisiin) nippuihin. Lo1:ltä löydyntynyt vuotava nippu ei ollut loppuun palanut.

Lo1:llä säteilytasot olivat selvästi alhaisemmat kuin Lo2:lla. Lo1:n kollektiivinen säteilyannos 0,43 manSv, on kaikkien aikojen pienin revisioaikainen annos ko. laitosyksiköllä. Lo2:n kollektiivinen annos oli 0,80 manSv. Työntekijöiden keskimääräinen annos oli 2,2 mSv ja suurin henkilökohtainen annos 17 mSv.

Okiluoto

TVO II pysäytettiin vapunaattona ja käynnistettiin jälleen 15. toukokuuta. Seisokin pituudeksi muodostui 14 vrk 9 tuntia, noin 12 tuntia suunnitellusta poiketen. TVO I ajettiin seisokkiin 23. toukokuuta ja käynnistettiin 10. kesäkuuta 18 vrk ja 9 tuntia kestäneen seisokin jälkeen. Tämä seisokki venyi kolme vuorokautta suunniteltua pitemmäksi.

Kesän seisokit merkitsivät yhteensä noin sadan henkilötyövuoden urakkaa TVO:n ulkopuolisilla yrityksillä. TVO II:n seisokissa oli ulkopuolisia työntekijöitä enimmillään 630 henkeä ja TVO I:llä vastavasti 830. Ulkopuolinen työpanos TVO II:lla oli 85000 ja TVO I:llä lähes 95000 henkilötyötuntia.

Revision kokonaiskustannukset olivat TVO II:lla 18,7 milj. ja TVO I:llä 22,8 milj. markkaa. Työvoimakustannukset ovat lähes 90 % revisiobudjetista varosien ja tarvikkeiden osuuden jäädessä noin 10 %:iin.

Merkittäviä korjaus- tai muutostöitä ei sisällynyt TVO II:n seisokkiin. Sensijaan putkistojen ja paineastioiden määräraikaistarkastuksissa tehtiin poikkeuksellisen runsaasti töitä eri tarkastusjaksojen yhteensattumisen takia.

TVO I:llä asennettiin korkeapaineturbiinilta välitulistimelle johtaviin höyryputkiin ylimääräiset kosteuden erottimet. Vesipisaroiden tehokkaampi poistaminen höyryvirrasta säästää putkistoja ja laitteita eroosiovaurioilta ja parantaa samalla laitoksen hyötysuhdetta jonkin verran. Toinen merkittävä muutostyö TVO I:llä oli reaktorin jälkijäähdytysputkiston uusiminen suojarakennuksen sisäpuoliselta osalta. Vaihdon syynä olivat jännityskorroosion aiheuttamat säröt putkimateriaalissa.

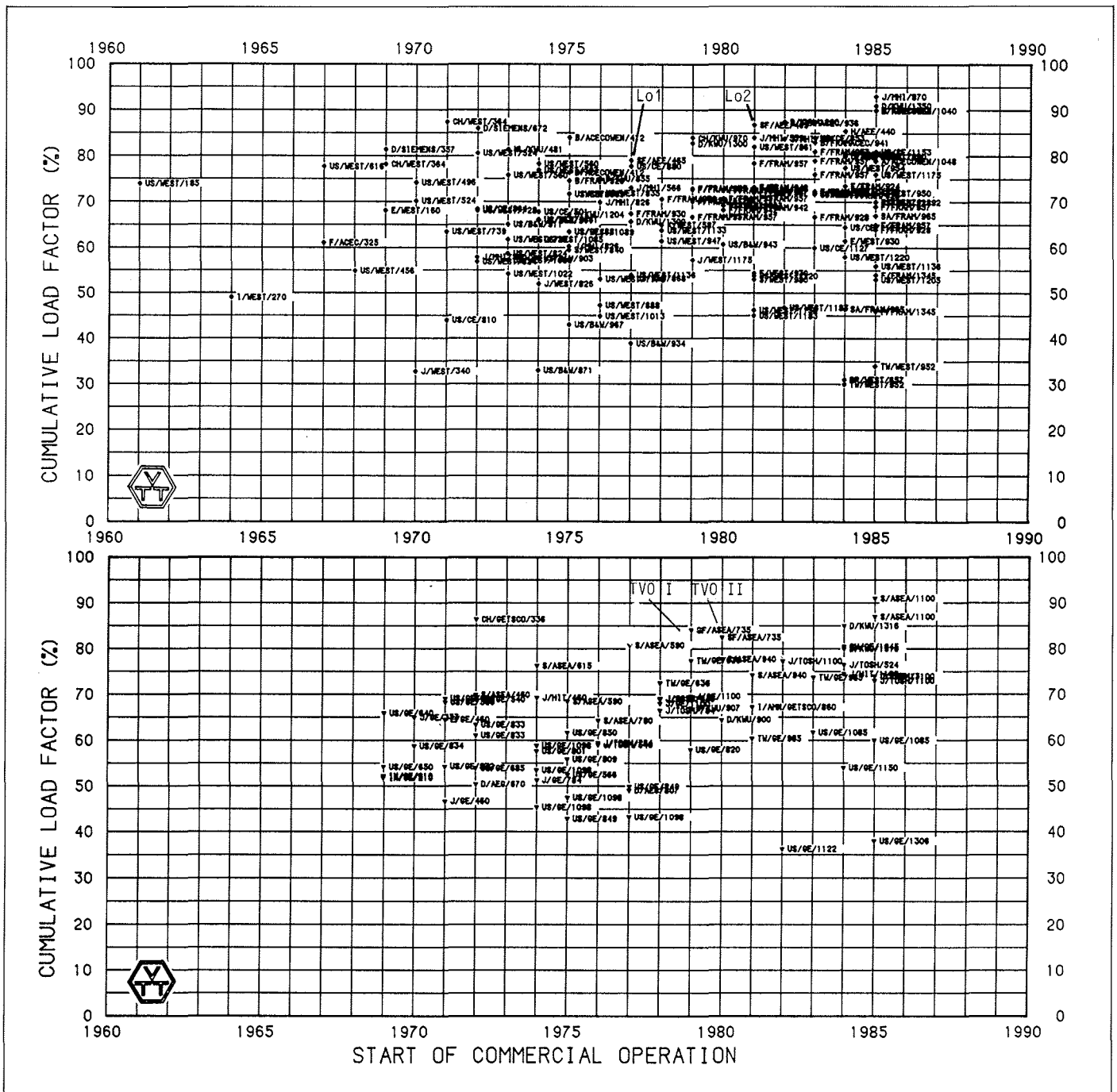
TVO I:n ylösajon yhteydessä todettiin kulumisesta aiheutunut vika reaktorin syöttövesilinjojen eristysventtiileissä suojarakennuksen sisällä. Vika esti venttiilien täydellisen sulkeutumisen. Venttiilien korjaus oli merkittävin syy seisokin venymisen yli suunnitellun pituuden.

TVO II on vähitellen siirtymässä käyttämään Asea-Atomin Svea-tyyppistä polttoainetta. Sitä ladattiin reaktoriin 54 nippua. Pääosa tuoreen polttoaineen latauksesta (yhteensä 144 nippua) oli vielä tässä seisokissa kuitenkin Asea-Atomin normaalia 8×8-polttoainetta. Lataus riittää täyden tehon ylläpitämiseen 11 kuukautta. Sen jälkeen teho laskee kolmen viikon pituisen venytysajan aikana noin 90 %:iin ennen seuraavaa polttoainevaihtoa, joka on suunniteltu alkavaksi 6.5.1988.

TVO I:n reaktoriin ladattiin KWU:n valmistamaa 9×9-polttoainetta 106 nippua ja 20 kpl Asea-Atomin 8×8-nippua. Latausjakson pituus on lähes sama kuin TVO II:lla, seuraavan seisokin alkaessa suunnitelman mukaan 3.6.1988.

Henkilökunnan kollektiivinen säteilyannos TVO II:n seisokissa oli 0,83 sievertiä ja TVO I:llä 0,68 sievertiä. Suurin henkilökohtainen annos oli 17 millisievertiä eli noin yksi kolmannes sallitusta vuosiansiosta. □

Kevytvesilaitosten kumulatiiviset käyttökertoimet



Painevesireaktorilaitosten (yläkuva) ja kiehuvesireaktorilaitosten (alakuva) vuoden 1986 lopussa saavuttamat kumulatiiviset käyttökertoimet.

Kaikkien vuonna 1985 tai sitä ennen kaupalliseen käyttöön otettujen ja käytössä olevien paine- ja kiehausvesireaktorilaitosten (poislukien Neuvostoliiton, Tšekoslovakian, Bulgarian ja Saksan Demokraattisen Tasavallan VVER-yksiköt) vuoden 1986 lopussa saavuttamat kumulatiiviset käyttökertoimet (laskettuna kaupallista käyttöönottoavuotta seuraavan kalenterivuoden alusta lähtien) on esitetty oheisissa kuvissa (kuvassa 1 painevesilaitokset, kuvassa 2 kiehausvesilaitokset). Ne on esitetty kaupallisen käyttöönottoavuoden mukaan (kääntäen iän mukaan) siten, että myös yksikön sijaintimaa, reaktorin toimittaja ja bruttosähköteho [MW] on ilmoitettu.

Taulukko. Painevesireaktorilaitosten (PWR) ja kiehausvesireaktorilaitosten (BWR) vuoden 1986 lopussa saavuttamien kumulatiivisten käyttökertoimien (%) jakaumat sekä Suomen vastaavien yksiköiden iällä painotetut keskiarvot.

Reaktori-tyyppi	10 %:n fraktiili	Keski-arvo	Mediaani	90 %:n fraktiili
PWR Lo 1&2	47	66 82	70	81
BWR TVO I&II	48	62 83	65	81

Oheisessa taulukossa on esitetty reaktori-tyypeittäin käyttökertoimien jakaumien mediaanit, yksilöiden iällä painotetut keskiarvot sekä alemmat että ylemmät 10 %:n fraktiilit. Myös Loviisan ja Olkiluodon laitosten yksiköiden iällä painotetut keskiarvot on esitetty.

Vähintään 70 %:n kumulatiivisen käyttökertoimen saavutti vuoden 1986 lopussa puolet painevesireaktorilaitoksista ja 30 % kiehausvesireaktorilaitoksista.

Loviisa 1:n (kaupallinen käyttöönotto-vuosi 1977) ja Loviisa 2:n (1981) vuoden 1986 lopussa saavuttamat kumulatiiviset käyttökertoimet olivat 79 % ja 87 % sekä TVO 1:n (1979) ja TVO II:n (1980) 84 % ja 83 %. □

Pekka Lehtinen, STUK

Lyhyesti maailmalta

Aihevalinnat ovat Pekka Lehtinen, puh. 616 7274. Palstalla julkaistaan tietoja ydinvoimalan yleisistä ja turvallisuuteen liittyvistä tapahtumista.

Ruotsin vähä- ja keskiaktiivisen voimalaitosjätteen loppusijoituslaitos SFR valmistuu hyvää vauhtia. Tunnelit ovat valmiit samoin kuin 50 metriä korkea betoninen jätesilo. Lopullista turvallisuuselostetta kirjoitetaan parhaillaan ja se luovutetaan viranomaisille tarkastettavaksi syksyllä käyttöluvan saamiseksi. Ensimmäisten jätepakkausten loppusijoittaminen tapahtuu ensi vuoden alussa. Loppusijoituslaitos sijaitsee Forsmarkin ydinvoimalaitoksen edustalla 60–120 metriä merenpinnan alapuolella.

OKG Aktueellt, juni 1987

Ruotsissa on tutkittu äidinmaidon radioaktiivisuutta. Näytteet kerättiin tammi-maaliskuussa 1987 eri puolilta maata. Kesium 137-pitoisuus oli 11 Bq/1 henkilölä, joka oli syönyt runsaasti poronlihaa ja sisäjärvikalaa. Kulutusmaidon kesium 137-pitoisuus oli 5–30 Bq/1 vastaavana ajankohtana.

Strålskyddsnytt Årg nr 4, 7.5.1987

Argentiina toimittaa Perulle Limaan elintarvikkeiden säteilyttämislaitoksen. Argentiinalle ennustetaan menestystä säteilyttämislaitosten markkinoinnissa. Maa tekee itse mm. säteilytyslaitteiston sydänosan ja tuottaa säteilylähteenä käytettävää koboltti 60 -isotooppia. Kanada hallitsee nykyisin säteilyttämislaitosmarkkinoita.

Nucleonics Week May 21, 1987

Espanjan Vandellos 1 -yksikön työntekijät olivat toukokuun alussa 48 tunnin laskossa parempien palkkaetujen saamiseksi. Yksikkö oli tarkoitus ajaa kylmäksi, mutta voimayhtiön, Hifrensan, toivomuksesta jäätiin 17 % tehotasolle.

Nucleonics Week May 7, 1987

Indonesia tullee päättämään ydinvoimaan siirtymisestään vuoden loppuun mennessä. Maa saa alustavat laitostarjoukset mm. Framatomelta, KWU:lta, Westinghouseelta, Mitsubishiilta, Ansaldolta ja AECL:lta.

Nucleonics Week May 28, 1987

Itävallan Zwentendorf 724 MW BWR KWU-yksikön purkaminen ja osien myynti on käynnistymässä. USA:n Bechtel Co. koordinoi hanketta. Osien mahdollisia ostajia olisivat lähinnä muut KWU:n toimittamat BWR-yksiköt. Purkamisen ja osien myynnin arvellaan kestävän 2,5 vuotta.

Nucleonics Week, 2.7.1987

Japanin Kashiwazaki-Kariva 6 ja 7 1356 MW Advanced BWR GE-yksiköt, joiden rakentaminen alkaa vuosina 1991 ja 1993, tulevat olemaan maailman suurimmat BRW-yksiköt. Yksikön hinnaksi on laskettu 2,4 miljardia dollaria.

Nucleonics Week May 21, 1987

Kanadan AECSB, Atomic Energy Control Board, vaatii voimayhtiöltä selvitystä palomiesten säteilyturvallisuudesta reaktori-palotilanteissa. Sammutusmenetelmät ja -laitteistot tullaan uudelleenarvioimaan.

Nucleonics Week May 28, 1987

Kandan Bruce 5 Candu -yksikkö saavutti 8.7.1987 440 vuorokauden keskeytymättömän käytön rajan. Tämä ylitti 439 vuorokauden mittaisen maailmanennätyksen, joka oli USA:n Oconee 3 PWR-yksikön nimissä. Bruce 5 aiotaan pysäyttää vasta syyskuussa määräaikaishuoltoon, jolloin se olisi ollut yhtäjaksoisesti toiminnassa yli 500 vuorokautta.

Nucleonics Week, 9.7.1987

Neuvostoliiton uusi ydinvoimalaitoshenkilöstön koulutuskeskus on otettu käyttöön Smolenskissa. Kaikkien ydinvoimalaitosoperaattorien on tästä lähtien suoritettava tutkinto Smolenskissa ennen laitoksille siirtymistään.

Nucleonics Engineering April, 1987

Ranska. St. Laurentin Magnox-yksiköllä tapahtui 17.—21.4.1987 vuoto, missä 48 m³ radioaktiivista vettä joutui Loire-jokeen. Vuoto johtui ulospumppaussäiliön epätiiviyistä venttiilistä. Päästön kokonaisbeta-aktiivisuus oli 42 megabequerelia. St. Laurentin ydinvoimalaitos koostuu kahdesta Magnox-yksiköstä ja 900 MW PWR-yksiköstä. Laitoksen vahvistettu vuosipäästöraja on 1 100 000 megabequerelia kaikelle nestemäiselle jäteelle.

Nucleonics Week May 7, 1987

Ranskan Superphenix 1240 MW -hyötyreaktori pysäytettiin toukokuun 26. päivänä kolmeksi kuukaudeksi polttoainemunan natriumvuodon korjaamiseksi.

Nucleonics Week June 4, 1987

KWU toimittaa **Saksan liittotasavallan** Krümmel ja Brunsbüttel BWR -yksiköiden suojarakennuksiin suodattun paineenlaskujärjestelmän. Järjestelmän hinta on noin 7 miljoonaa DM, mikä sisältää myös suojarakennuksen inertointijärjestelmän.

Nucleonics Week, 23.7.1987

Saksan liittotasavallan Hamm-Uentrop THTR-300 - korkealämpöreaktori otettiin kesäkuussa kaupalliseen käyttöön.

ATW News, 7/87

Sveitsi on saanut valmiiksi koko maan kattavan säteilyhälytysjärjestelmän. Järjestelmä on eräs Euroopan parhaimmista. Kahden tunnin kuluttua epänormaalien korkean säteilytason mittaamisesta kansalaisille ilmoitetaan, kuinka heidän on toimittava. Järjestelmään kuuluu ympäri-vuorokautinen mittausverkosto, asiantuntijaryhmä vaaran arvioimiseksi ja keskitetty tiedotusyksikkö. Zürichissä olevaan keskukseseen kuuluu 51 mittausasemaa, joista saadaan automaattisesti 10 minuutin välein säteilylukemat tietokoneelle. Tshernobylin onnettomuuden sattuessa mittausasemia oli vain 12. Hälytyskeskuksen henkilöstön määrä nostetaan 60:sta 90:een.

Nucleonics Week May 7, 1987

Tshekkoslovakian Bohunice 3 VVER-440 -yksikön yhdessä höyrygeneraattorissa olleiden säröjen korjaamiseksi oli yksikkö pysäytettynä helmikuun ja maaliskuun 1987. Säröt löydettiin ultraäänitarkastuksella kollektorin seinämästä. Bohunice 3 otettiin käyttöön vuonna 1985. Säröistä kerrottiin 27.5. pidetyssä Tshekkoslovakian atomienergiakomission, CKAE:n vuosittaisessa lehdistötilaisuudessa.

Nucleonics Week June 4, 1987

Tshekkoslovakia aikoo rakentaa lisää käytetyn ydinpolttoaineen välivarastointi-kapasiteettia, koska Neuvostoliitolla on jatkuvasti vaikeuksia jälleenkäsittelyssä ja polttoainepalautuksien vastaanotossa. Tshekkoslovakian laitoksilla olevat allasvarastot riittävät vielä kuudeksi vuodeksi. Tämän jälkeen tarvitaan lisää neljä 200 tonnin varastoallasta, mikä vastaa seitsemän VVER 440 -yksikön kymmenen vuoden aikana tuottamaa käytettyä polttoainetta.

Nucleonics Fuel May 8, 1987

Unkarin Paks 5 ja 6, 1000 MW VVER-yksikköjen tilaus on vahvistettu. Yksiköt valmistuvat vuosina 1994 ja 1996. Paks 4, joka on 440 MW VVER-yksikkö, on parhaillaan käyttöönottoaiheessa ja se kytketään verkkoon vielä tämän vuoden aikana. Paks 1, 2 ja 3 ovat toimineet hyvin ja niiden alkuvuoden energiankäytökertoimen keskiarvo on 97 %.

Nucleonics Engineering April, 1987

Unkarin Pak 1—4 440 MW VVER-yksikköjen backfitting-parannuksiin ja Paks 5 ja 6 1000 MW VVER-yksikköjen suunnitteluun tulaan käyttämään yhdysvaltalaisista Westinghousea, mikäli käytävät neuvottelut johtavat tulokseen. Teknisiä seikkoja ei haluta vielä paljastaa.

Nucleonics Week May 28, 1987

Unkarin Paks I VVER-440 -yksikön reaktoripaineastia tarkastetaan täydellisesti ensimmäisen kerran nyt kesäkuussa neljän käyttövuoden jälkeen. Ultraäänitarkastuslaitteisto on tilattu ruotsalaiselta ÅF-TRC Ab:lta. Päätös tarkastamisesta tehtiin Moskovassa viime joulukuussa pidetyn VVER-440 -tyypin turvallisuuden parantamista käsitelleen kokouksen jälkeen. Reaktoripaineastian haurastumisen lisäksi oli esillä säätösauvakoneiston iän pidentäminen viidestä kymmeneen vuoteen.

USA. Käytettyä ydinpolttoainetta kuljetettava ajoneuvo joutui liikenneonnettomuuteen kesäkuun 8. päivänä lähellä Oak Ridgea Tenneseen osavaltiossa. Valtatien liikenne oli puolitoista tuntia katkaistuna. Radioaktiivisia aineita ei päässyt ympäristöön.

Radwaste News, 15.6.1987

IAEA:n kassakriisi pahenee. Henkilöstön marraskuun palkanmaksua joudutaan siirtämään joulukuuhun, mikäli Yhdysvallat ei maksa vuoden 1986 osuutensa IAEA:n menoista siihen mennessä. Dollarin arvon lasku on yllättänyt amerikkalaiset ja IAEA:lle tarkoitetut varat ovat eh-

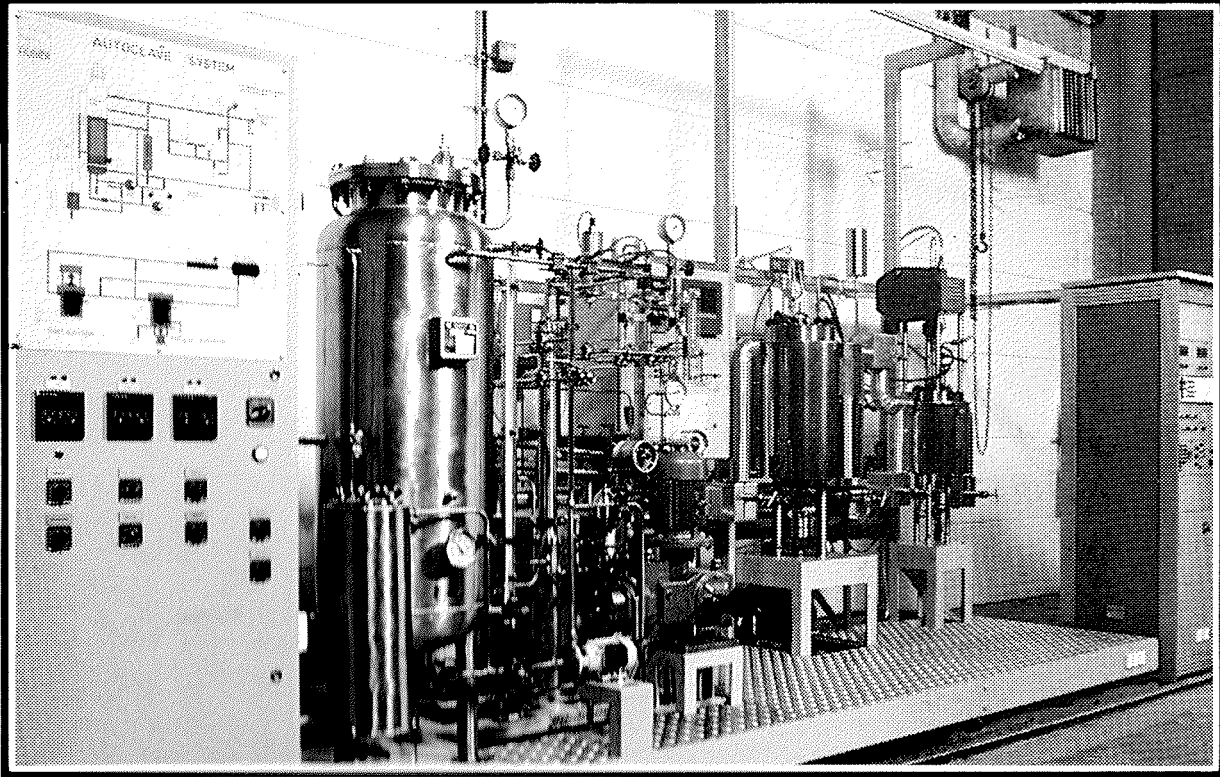
tyneet. Vuoden 1988 OSART-tarkastusten määrää tullaan supistamaan 2—15 tapausa.

Nucleonics Week May 28, 1987

NRC on hyväksynyt Saksan liittotasavallan GNS:n valmistaman voimalaitosjätteen superpuristimen. Puristimella pienennetään pakattu, 1:3 pienennetty, jäte-tilavuus vielä puoleen. Puristusvoima on 1 500 tonnia. Laitteen käsittelykapasiteetti on 80 tynnyriä päivässä. USA:ssa on aikaisemmin otettu käyttöön useita siirrettäviä jätepuristimia ja kuusi kiinteästi asennettua yksikköä.

Nucleonics Week May 7, 1987

RECIRCULATION AUTOCLAVE SYSTEM FOR MATERIALS TESTING



Huber Autoclave System.
The most efficient method for:

- corrosion testing
- slow strain rate testing
- fatigue testing

Advantages of the Huber System:

- compact design; user connects only power and water
- computerized, unmanned operation; automatic data acquisition and processing; choice of illustrative report formats
- service from start-up and operator training to support in scientific research
- state-of-the-art research and development through collaboration with the Technical Research Centre of Finland (VTT).



Oy Huber Ab

Industrial Division

P.O.Box 84, SF-01511 Vantaa, Finland
Phone +358-0-81 811, Telex 122 042
Telecopier 358-0-822 546

