

SUOMEN
ATOMITEKNILLINEN
SEURA-

ATOMTEKNISKA
SÄLLSKAPET
I FINLAND r.y.



ATS

YDINTEKNIikka

SISÄLTÖ

URAANI 200 V JA FISSIO 50 V

Kivestä sähköä	1
Suomen tie ydinenergian hyväksikäyttäjäksi — kohokohtia ja mieleenpainumia	2
Uraanin synty	4
Uraanin geologinen historia	7
Uraanin etsintä Suomessa	11
Uraanin käytön historiaa	14
Uraanin tuotantovaiheet ja maailmankauppa	18
Uraanin tie polttoaineeksi	20
Ydinmateriaalin kansainvälinen valvonta	22
Riittävätkö maailman uraanivarat?	23
Fissio 50 vuotta	26
Ydinreaktorin toimintaperiaate	28
Ydinvoimala ei ole pommi	32
Ydinvoima ja ympäristö	34
Ydinjätteiden huolto ja turvallisuus	37
Luonnon uraaniesiintymät mallina loppusijoitukselle	40
Kylmäfuusio ei tuo ratkaisua	42
Lyhyesti maailmalta	46
Suomen Atomiteknillinen Seura	47
English Abstracts	48

ERIKOISNUMERO:
URAANI HALKEAA

ATS

YDINTEKNIikka

JULKAISIJA

Suomen Atomiteknillinen Seura —
Atomtekniska Sällskapet i Finland ry.

TOIMITUS

Päätoimittaja
DI Heikki Raumolin
Perusvoima Oy
PL 138, Malminkatu 16
00101 Helsinki
P. 90-60906017

Erikoistoimittaja
FK Osmo Kaipainen
Teollisuuden Voima Oy
Fredrikinkatu 51—53
00100 Helsinki
P. 90-605022

Erikoistoimittaja
DI Jorma Aurela
Imatran Voima Oy
PL 23
07901 Loviisa
P. 915-550576

Erikoistoimittaja
DI Kirsti Tossavainen
Säteilyturvakeskus
PL 268
00101 HELSINKI
P. 90-708 2388

Toimitussihteeri
DI Pertti Salminen
Teollisuuden Keskusliitto
PL 220, Eteläranta 10
00131 Helsinki
P. 90-180 9233

JOHTOKUNTA

Pj DI Ilkka Mikkola
Teollisuuden Voima Oy
Fredrikinkatu 51—53 B
00100 Helsinki
P. 90-605022

Vpj. TKT Rainer Salomaa
TKK/Teknillisen fysiikan laitos
Otakaari 2
02150 Espoo
P. 90-4513199

Rh DI Anna-Maija Kosonen
VTT/Metallilaboratorio
PL 26
02151 Espoo
P. 90-4566858

Siht. DI Jussi-Pekka Palmu
Imatran Voima Oy
PL 112
01601 Vantaa
P. 90-5084562

Jäs. DI Klaus Kilpi
VTT/Ydinvoimatekniikan laboratorio
Lönrotinkatu 37
00180 Helsinki
P. 90-648931

Jäs. DI Leif Blomqvist
Säteilyturvakeskus
PL 268
00101 Helsinki
P. 90-70821

Jäs. DI Jorma Kotro
Imatran Voima Oy
PI 112
01601 Vantaa
P. 90-5082416

TOIMIHENKILÖT

Yleissihteeri
DI Petra Lundström
Imatran Voima Oy
PL 112
01601 Vantaa
P. 90-5085422

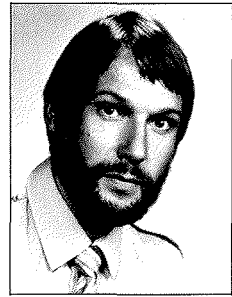
Kans.vällyhteyks.siht.
DI Klaus Kilpi
VTT/Ydinvoimatekniikan lab.
Lönrotinkatu 37
00180 Helsinki
P. 90-648931

Ekskursios sihteeri
DI Jorma Aurela
Imatran Voima Oy
PL 23
07901 Loviisa
P. 915-550576

ATS-Info puheenjohtaja
DI Antti Hanelius
Suomen Voimalaitosyhdistys ry.
Lönrotinkatu 4 B
00120 Helsinki
P. 90-602944

DI Ilkka Mikkola on TVO:n polttoainetoimiston päällikkö ja ATS:n puheenjohtaja, p. (90) 605 022.

Ilkka Mikkola



Kivestä sähköä

Saksalainen tiedemies Martin Klaproth pelkisti uraanioksidia hiilellä jo 200 vuotta sitten. Uraanin valtava energiasisältö keksittiin kuitenkin vasta 50 vuotta sitten, ja uraanilla on tehty sähköä jo yli 30 vuotta. Suomen Atomiteknillinen Seura (ATS) julkaisee näiden merkkipäivien johdosta tämän uraanitiedon erikoisnumeron. Se kertoo myös tämän miljoonia vuosia vanhan aineen kiehtovasta historiasta ja sen energiakäytön ensi askeleista.

*Uraanienergia ei ole vain tieteellinen lupaus, vaan se on jo nyt tieteen toimiva sovellutus, jonka talous näkyy Suomen voimayhtiöiden tilinpäätöksissä. Uraanivoima ei saastuta ilmaa ja sen jätekustannukset kerätään sähkön hinnassa: **Kivestä tieteen avulla sähköä ja jäte takaisin kalliioon**, sitä on uraanienergian tuotanto tiivistetysti. Raakauraanin osuus kustannuksista on alle 1 p/kWh.*

Suomessa ydinvoimaa on tuotettu runsaat 10 vuotta. Siinä aikana on tutkimustyön avulla laitosten turvallisuutta lisätty ja uraanin ominaiskulutusta saatu alennetuksi noin 15 %. Tieteen mahdollisuuksien kannalta ollaan kuitenkin ydinvoiman kehityskaaren alkupäässä. Siksi olisi aiheellista vauhdittaa hyvin valittuja kotimaisia tutkimushankkeita sekä kansainvälisiä yhteisprojekteja, tavoitteena mm. yksinkertaisemmat, turvallisemmat ja taloudellisemmat ratkaisut.

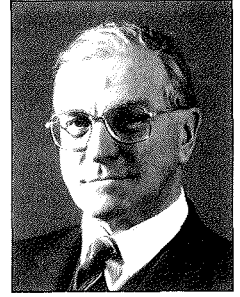
Uraanin uudelleenkäytön kansainvälinen tutkimus ja hyötöreaktoreiden kehitys on hidastunut uraanin hyvien saantinäkymien takia. Se ei saisi vaikuttaa meillä nykyisin käytössä olevien reaktorityyppien tutkimustyöhön, jolla on merkitystä sekä maamme talouden että ympäristön kannalta.

Julkaisija:
Suomen Atomiteknillinen Seura (ATS)
c/o VTT/Ydinvoimatekniikan
laboratorio
PL 169, 00181 HELSINKI
Puh. (90) 648 931, telefax (90) 462 382

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

ISSN-0356-0473

Suomen tie ydinenergian hyväksikäyttäjäksi — kohokohtia ja mieleenpainumia



Suomi on siirtynyt ydinenergian käyttäjäksi järjestelmällisemmällä ja harkitummalla tavalla kuin useimmat muut valtiot. Jo alusta alkaen on tämä uusi energiamuoto nähty yleisen energiantuotannon osana ja toimenpiteet on keskitetty sen oikea-aikaiseen, taloudelliseen ja turvalliseen käyttöön ja hyödyntämiseen. Tie tähän ei kumminkaan ole ollut suoraviivainen päätösprosessi vaan monien peräkkäisten ja osittain myös epäloogisten päätösten ketju, joka kumminkin on johtanut ainakin hyvän arvosanan ansaitsevaan lopputulokseen.

Jotta voitaisiin ymmärtää 20—30 vuotta sitten tehtyjä päätöksiä, on pyrittävä palauttamaan mieliin maailmanlaajuinen poliittinen tilanne ja energia-alan käsitykset tulevaisuuden näkymistä sekä projisoitava nämä Suomen olosuhteisiin ja meillä tällöin käytettävissä oleviin voimavaroihin ja tiedon tasoon. Ajattelu energiapolitiikassa oli vielä voimakkaasti kriisien sävyttämää, toinen maailmansota oli tuoreessa muistissa ja Suezin kriisi osoitti Lännen energiahuollon kriisiherkkyyden. Yleinen käsitys oli, että energian saatavuudessa ja hintakehityksessä tulee esiintymään voimakkaita häiriöilmiöitä. Saatavuus ja kohtuullinen hinta pyrittiin turvaamaan kansallisella tasolla, eräs tavoite oli riippuvuuden vähentäminen arabiohjyistä.

Toisen maailmansodan aikana oli ydinaseiden kehittämisen yhteydessä luotu valtava tietomäärä ydinfysiikasta ja -tekniikasta ja oli yleisesti tiedossa, että sitä voitiin käyttää myös rauhanomaisiin tarkoituksiin energiantuotannossa ja monilla muillakin aloilla kuten isotooppien sovellutuksissa tutkimuksessa, teollisuudessa ja lääketieteessä. Kieltää ei myöskään voine sitä, että useat sotilaallisissa sovellutuksissa mukana olleet tunsivat voimakasta tarvetta käyttää hankkimaansa tietoa ihmiskunnan hyväksi rauhanomaisissa sovellutuksissa, joista ylivoimaisesti tärkein oli energiantuotanto. Tälle sovellutukselle saatiin myös voimakas valtiovallan tuki, joka ilmeni mm. suurien

ydinenergiatutkimuskeskusten perustamisessa myös pieniin maihin. Ydinenergia muodostui suosituksi imagotieteeksi, jonka katsottiin kuvastavan maan yleistä edistyneisyyttä. Kytkeä energiainfarktiin ja käytännön energiantuotantoon jäi usein luvattoman heikoksi. Tästä seurasi monien laadittujen suunnitelmien epärealistisuus ja teoreettisuus, tutkijoilla ei ollut riittävää teollisuuden ja käytännön elämän tuntemusta.

Suomessa tilanne oli muista poikkeava. Ydintutkimus oli ollut meillä suhteellisen vaatimatonta laajuudeltaan, samaa voidaan sanoa myös muusta tutkimuksesta. Sota oli katkaissut koko toiminnan, eikä maamme luonnollisesti ollut hyötynyt ydinaserakentelun tutkimuskonjunktuurista. Asiantuntemus oli siis erittäin vähäistä. Toisaalta energialla oli, niin kuin on nytkin, suuri merkitys kilpailukyvyillemme päätuotteittemme osalta. Varmuuskököhdät koettiin hyvin keskeisiksi ja ydinenergian osalta pyrittiin tästä johtuen jopa uraanimavaraisuuteen. Eräänä tärkeänä tavoitteena oli teollisuuden rakennemuutoksen nopeuttaminen ja tuotannon kotimaisuusasteen lisääminen. Tämän ajateltiin nopeimmin tapahtuvan valtion toimenpitein. Verojen muodossa oli käytettävissä silloin niin vaikeasti saatavaa pääomaa. Suomi lähti ydinenergiin tabula rasa -tilanteessa, kaikki oli mahdollista niin suuret viisaudet kuin suuret tyhmyydetkin.

Ydinenergian soveltamisen ongelmavyöhyt

Ydinenergian soveltaminen maassamme muodosti laajan ongelmavyöhydin. Koulutus oli saatava pikaisesti käyntiin, tutkimustoimintaa tarvittiin monilla aloilla, teollisuus oli luotava ja kansainväliset suhteet solmittava. Monissa asioissa meillä oli puuttuvien traditioiden vuoksi muita suurempi toiminnan vapaus, niinpä me valitsimmekin usein muiden ratkaisusta poikkeavan toimintalinjan. Keskeinen merkitys lopputulokseen oli Suomen Akatemian aloitteesta perustetulla Energiakomitealla, joka toimi vuosina 1955—56. Komitean puheenjohtajalla prof. Erkki Laurilalla oli ratkaiseva asema komitean kannanottoihin sen nimestä alkaen, joka korostaa ydinenergiaa energiantuotannon eräänä vaihtoehtoisena osana.

Komitean ehdotukset toteutuivat yllättävän nopeasti ja muuttumattomina. Koulutus aloitettiin aluksi akateemisella tasolla Teknillisessä korkeakoulussa ja Helsin-

gin yliopistossa. Myös alan professuuri perustettiin. Ydintekniikan tietoa levitettiin erityisillä kursseilla, joihin osallistui runsaasti käytännön tuotantoelämässä olevia henkilöitä. Asiaa kohtaan syntyi syvä kiinnostus, joka ilmeni uhrautuvana työnä työaikoja laskematta. Kerrotaan valtion tilintarkastajien tehneen huomautuksen valojen palamisesta työajan ulkopuolella korkeakoulun tiloissa.

Tutkimus saatiin käyntiin ja alalle hakeutui aivan erinomaista oppilasainesta. Etevinä ja kielitaitoisina nämä suorittivat tutkintonsa nopeasti ja hakeutuivat monille aloille, eräät jopa ydintekniikan palvelukseen menestyen useimmiten erinomaisesti. Eräiltä kursseilta teknillisessä fysiikassa väitteli noin puolet ja väittelemättömätkin ovat kohonneet huomattaviin yhteiskunnallisiin asemiin. Eräänä synnä tähän oli perustetun Atomienergianeuvottelukunnan aikaansaama stipendiaattijärjestelmä, mikä loi kokopäiväiset opiskelumahdollisuudet sekä avasi portit myös ulkomailla tapahtuvaan opiskeluun.

Tutkimusta tuettiin monilla tavoin ja sen käyttöön hankittiin Triga-merkin pulsseeraava 250 kW tutkimusreaktori, jonka ympärille muodostui alkuvuotena vilkas toiminta, mikä omalta osaltaan poisti asiantuntemuksemme kapeutta ydintutkimuksessa ja -tekniikassa. Reaktorin vihki käyttöön presidentti Urho Kekkone laukaisemalla pulssin. Itse asiassa ohjelmasta poiketen laukaistiin kaksi pulssia, toinen valokuvaaajien kehokuvasta ja siten määräyksistä poiketen. Mutta Trigahan on turvallinen kaikissa olosuhteissa.

Teollisuus saatiin käyntiin. Se valmisti vaativiakin komponentteja ja laitteita, joista eräistä tuli pitkäaikaisia tuotteita. Varmasti oli havaittavissa myös spin off -ilmiöitä teknologian siirron ja sen tason nousun muodossa. Luultavasti näistä asioista puhuttiin ensimmäistä kertaa eksplisiittisesti tässä yhteydessä. Tieto tuli hyvään tarpeeseen myöhemmin toteutettaessa Suomen ydinvoimalaitosten rakentamista ja sillä lienee merkitystä myös niiden havaituille hyville käyttöominaisuuksille. Polttoaineomavaraisuuden pyrkiminen johti uraanin prospektointiin ja myös eräisiin lupaaviin löydöksiin. Koerikastusta suoritettiin useille malmeille ja perustetun Atomienergia Oy:n toimesta harjoitettiin jopa uraanin vientiä. Se kumminkin lopetettiin kannattamattomana. Osoituksena suunnitelmien rohkeudesta voidaan mainita, että suunniteltiin

toisen, kotimaisen tutkimusreaktorin rakentamista tähtäimessä teollisuuden toimituskyvyn lisääminen ydinenergiavoimalaitoshankkeissa. Polttoaine-elementtien valmistuksesta Suomessa keskusteltiin myös vakavasti.

Jälkeenpäin ajatellen suhtautuminen ydinenergiaan oli liian ongelmatonta, usko omiin mahdollisuuksiin oli suuri, mikä sinänsä on tietenkin kunnioitettavaa, mutta syntyviä ongelmia ei osattu aavistaa. Teknilliset vaikeudet olivat arvioitua suuremmat, turvallisuuden keskeinen merkitys tiedettiin, mutta sen poliittiset ja psykologiset ulottuvuudet jäivät liian pienelle huomiolle. Saman virheen tekivät muutkin, joten olemme meitä suurempien seurassa.

Kansainväliset suhteet luotiin nopeasti sekä poliittisella että yhteistyötasolla. Tarvittavat bi- ja multilateraalit sopimukset solmittiin väkevöidyn uraanin saami-

seksi ja kansainvälisesti valvotut turvallisuusjärjestelyt saatettiin voimaan. Suomi oli ensimmäisiä maita, joka jatkuvasti ja järjestelmällisesti alkoi käyttää IAEA:n tarjoamia mahdollisuuksia hyväksi. Myös kotimaassa luotiin säteilyturvallisuusorganisaatio sekä voimistettiin turvallisuuteen liittyvää tutkimustyötä.

Energiakomitean keskeiset tavoitteet, ydinenergian näkeminen vain eräänä energiatuotannon vaihtoehtona sekä sen taloudellinen, turvallinen ja luotettava soveltaminen rauhanomaiseen energiantuotantoon, toteutuivat pääpiirteissään. Myös se, että tutkimusta ja koulutusta tuettiin hajautetusti ilman, että olisi perustettu suurta tutkimuslaitosta tätä tarkoitusta varten, on osoittautunut onnistuneeksi ratkaisuksi. Varoja näihin tarkoituksiin olisi saanut olla käytettävissä enemmän, sillä usein työ- ja vastuupaine ovat muodostuneet melkein sietämättömiksi.

Määrätietoinen mutta mutkikas tie

Suomen ydinenergian käyttöönotto on perustunut energiatarpeen analyyseille ja ydinenergian osuuden arvioille. Vuonna 1962 sähkön tuotannon arvioitiin kasvavan seuraavasti:

Vuosi	Tuotanto/TWh
1965	14,5
1970	20,0
1975	29,0
1980	40,0

Arvio on siis vähintään tyydyttävästi paikkansa pitävä.

Vuonna 1965 arvioi akateemikko Erkki Laurila ydinenergian tehon kehittyvän seuraavasti:

Vuosi	Lisäteho/MW
1970—71	300
1974—75	400
1977—78	400
1979—80	500
Yhteensä	1 600

Ottaen huomioon arvion ajankohdan voidaan sitä pitää erinomaisesti oikeaan osuneena!

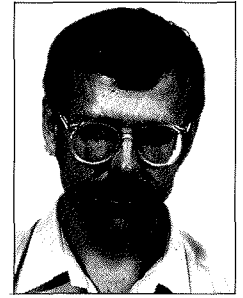
Jos jälleenpäin ajatellen monet tekemämme päätökset ovat olleet hyviä, ei pidä uskoa, että tie olisi ollut suora ja ongelmaton. Monessa asiassa on haparoitu, oltu eri mieltä ja viritelty riidanpoikaasiakin. Yksi asia on kumminkin selvä: Sodanjälkeinen sukupolvi on kaikessa pyrkinyt edistämään maamme asioita, se on uskonut vaikeinakin aikoina Suomen mahdollisuuksiin nousta myös tekniikan ja tutkimuksen alalla huomattavaan kansainväliseen asemaan.

Ydinenergian käyttöönotto maassamme oli eräs niitä impulsseja, joiden avulla teknillistieteellistä jälkeenjääneisyttämme voitiin kaventaa. Se on osaltaan taannut energiahuoltomme ongelmattomuuden vaihtelevissa ulkoisissa olosuhteissa. Huolehtimalla perusasioista, parhaasta tekniikasta ja henkilöstön tasosta, voimme turvallisesti katsoa tulevaisuuteen myös tänä päivänä vuosikymmeniä ratkaisevien päätösten tekemisen jälkeen. □



Presidentti Urho Kekkonen laukaisee 250 MW:n pulssin Triga-tutkimusreaktorin vikkimistilaisuudessa vuonna 1962 Espoon Otaniemessä. Toimitusta seuraavat General Atomicin toimitusjohtaja Frederic de Hoffman ja Teknillisen korkeakoulun ydinfysiikan professori Pekka Jauho.

Akateemikko Pekka Jauho on eläkkeellä VTT:n pääjohtajan virasta. Hän on ATS:n perustaja- ja kunniajäsen, p. 90-451 2882.



Uraanin synty

Maanpinnalla nähtiin 29.2.1987 ensimmäiset viestit Suuressa Magellaanin pilvessä räjähtäneestä supernovasta koodinimeltään 1987A. Emotähden kuollessa syntyi valtava määrä uusia alkuaineita — näiden joukossa myös uraania. Maankuoremme uraani on kertynyt samalla tavoin miljardeja vuosia sitten räjähtäneiden tähtien jäänteistä.

Miten maailmankaikkeus, aurinkokuntamme ja oma planeettamme ovat syntyneet? Mistä maapallon ja sen asukkaiden rakennusaine on muodostunut? Mitkä olivat ne mekanismit, joissa nykyisin havaittavat alkuaineet saivat alkunsa?

Useimmat kuuluisat fyysikot ovat pohtineet näitä kysymyksiä. Erityisesti alkuaineiden syntyä koskeviin arvoituksiin esittivät mm. Hans Bethe ja George Gamow ratkaisevia ideoita. Nykyinen kokonaiskuva nojautuu pitkälle Margaret ja Geoffrey Burbidgen, William Fowlerin ja Fred Hoyleen viisikymmenluvun lopulla esittämään teoriaan. Ansioistaan Fowler sai Nobel-palkinnon vuonna 1983.

Alkuaineiden runsauden keskimääräistä jakaumaa maailmankaikkeudessa esittää kuva 1. Jakauma on hyvin samankaltainen eri galakseissa. Silmiinpistävin piirre on vedyn valta-asema. Vetyä on kaikkiaan lähes 70 %; seuraavaksi yleisintä ainetta heliumia on noin 28 %. Muita alkuaineita on yhteensä vain muutama prosentti. Näiden joukossa on myös uraani. Joskin uraania maankamarassa on melko runsaasti, sen osuus maailmankaikkeuden kaikesta materiaasta on hyvin pieni murtoosa — noin 10^{-12} .

Kevyet ytimet syntyvät fuusioreaktioissa

Vedyn ja heliumin isotoopit sekä osa litiumia ovat jäänteitä noin 10–20 miljardia vuotta sitten tapahtuneesta alkuräjähdyksestä. Muut aineet ovat syntyneet tähtien sisuksien ydinreaktioissa. Rauta ja sitä keveämmät alkuaineet ovat fuusioreaktioiden tuotteita. Järjestysluvultaan raudan yläpuolella olevat aineet ovat neutronikaappauksissa syntyneitä. Maailmankaikkeuden materia on osin moneen kertaan prosessoitua. Tähdet syntyvät interstellaarisesta pölystä painovoiman vai-

kutuksesta. Aikanaan ne kuolevat räjähtäen uudelleen pölyksi. Samassa kiertokulussa luodaan jatkuvasti vanhoista alkuaineista uusia.

Syntyessään tähti puristuu kokoon ja kuumenee painovoiman vaikutuksesta. Lämpötila tähden sisuksissa kohoaa niin korkeaksi, että fuusioreaktiot voivat käynnistyä. Alussa sisustan pääaines vety 'palaa' heliumiksi. Fuusioreaktioissa tuotettu lämpö pitää tähden paineen niin korkeana, että kokoonpuristuminen hetkeksi pysähtyy. Vedyn ehtyminen kuitenkin aiheuttaa uuden luhistumisen ja kuumenemisen. Sisustan helium alkaa palaa hiileksi, tämä vuorostaan hapeksi, jne. Ketju voi jatkua aina rautaan saakka. Raudan kohdalla fuusioreaktiot eivät enää tuota energiaa vaan tähti romahtaa lopullisesti kasaan ja räjähtää supernovana. Ajallisesti vedyn poltto kestää miljoonia vuosia. Piin poltto raudaksi tapahtuu yhdessä päivässä! Varsinainen räjähdys kestää alle sekunnin.

Neutronit luovat raskaat alkuaineet

Rautaa raskaammat alkuaineet ovat syntyneet neutronikaappauksissa joko raudasta tai sitä keveämmistä alkuaineista. Kun alkuaineen X ydin ${}^A X$ (A on ytimen massaluku) kaappaa neutronin, se muuttuu raskaammaksi isotoopikseen ${}^{A+1} X$.

Neutronikaappaus voi toistua, jolloin peräkkäin syntyvät isotoopit ${}^{A+2} X$, ${}^{A+3} X$, jne. Ketjun katkaisee yleensä beetahajoaminen, jossa yksi ytimen neutroneista muuttuu protoniksi ja ulos sinkoutuu elektroni. Protonien lukumäärän (ts. alkuaineen järjestysluvun Z) muuttuessa syntyy uusi kemiallinen alkuaine.

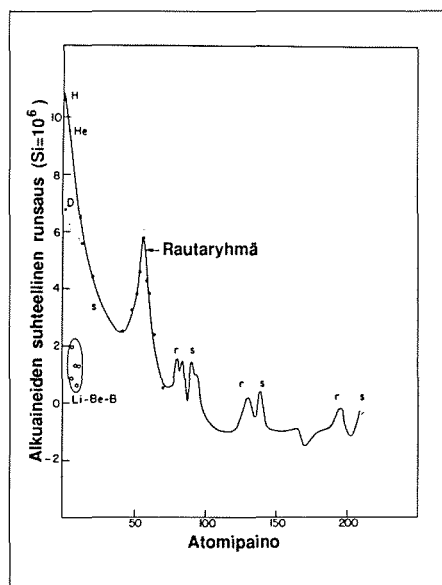
Tarkastellaan esimerkkitapausta. Kun rautaisotooppi ${}^{58} Fe$ kaappaa neutronin syntyy isotooppi ${}^{59} Fe$, joka beetahajoaa 44,5 päivän puoliintumisaajalla koboltti-ytimeksi ${}^{59} Co$. Seuraavassa kaappauksessa voi ${}^{59} Co$ -ydin muuttua ${}^{60} Co$:ksi. Tämä vuorostaan hajoaa nikkeli-isotoopiksi ${}^{60} Ni$ 5,3 vuoden puoliintumisaajalla. Jos ${}^{60} Co$ ehtii siepata toisen neutronin ennen hajoamistaan, syntyy isotooppi ${}^{61} Co$. Tämä elää vain muutaman tunnin muutuen ${}^{61} Ni$ -yttimeksi. Tutkimustarkoituksiin rakennetuissa fissioreaktoreissa neutronien kaappausreaktioita käytetään hyväksi mitä erilaisimpien ytimien tuottamiseen.

Ytimien synteesi riippuu kaappausreaktioiden tahdistä verrattuna beetahajoamisen nopeuteen. Mikäli neutronivuo on pieni, kaappausreaktioita tapahtuu harvoin ja syntyneet isotoopit ehtivät välillä hajota beetasäteilyn kautta rakenteeltaan pysyvämmiksi ytimiksi, joiden massaluku on A mutta joiden järjestysluku Z on suurempi kuin emoytimen. Tapahtumatyyppejä kutsutaan s-prosessiksi ($s = \text{slow}$). Siinä uudet alkuaineet syntetisoidaan lähtien raudasta pysyvimpien luonnossa esiintyvien ytimien viitoittamaa polkua pitkin.

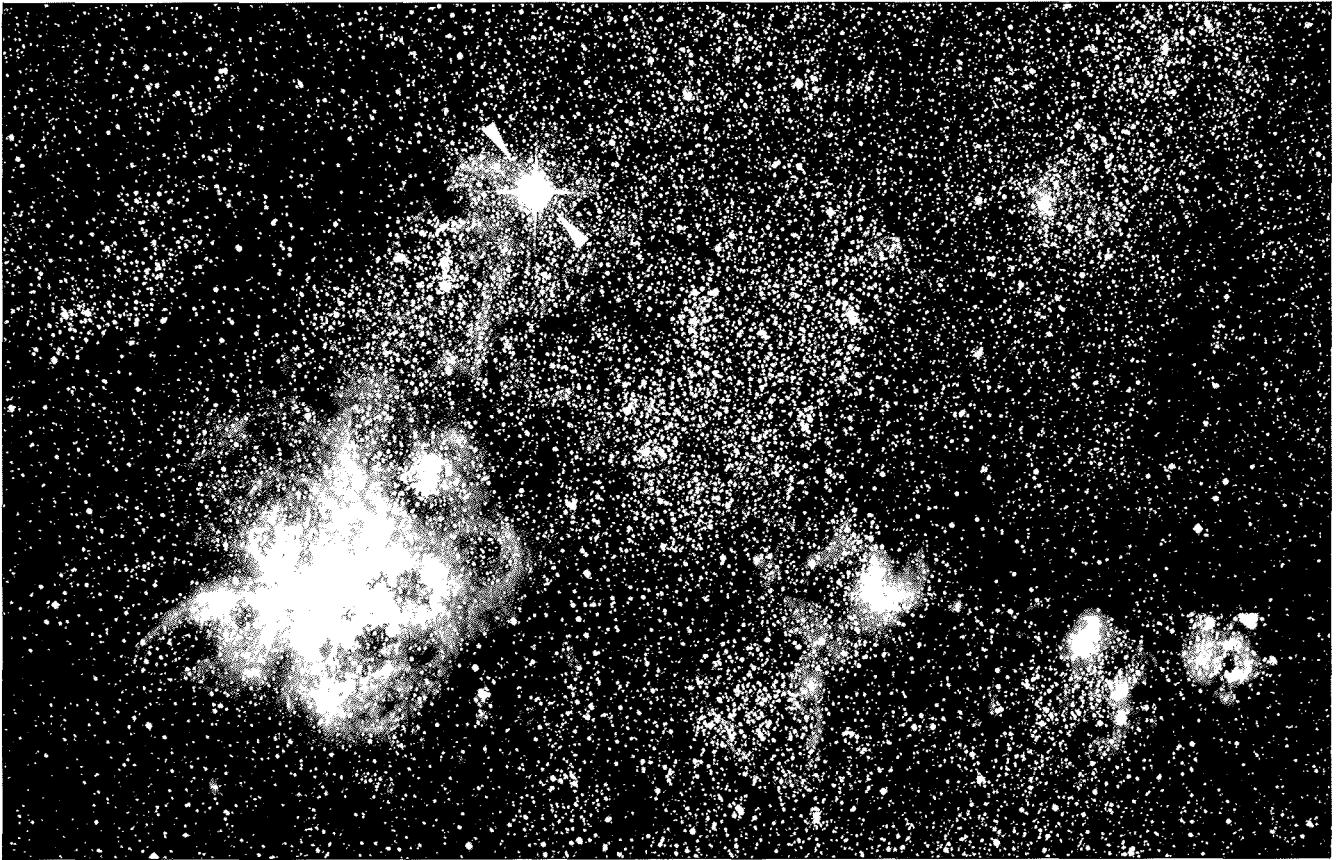
Jos tähden neutronivuo on hyvin suuri, ytimet rakentuvat siten, että kaappausreaktiot jatkuvat kunnes viimeksi syntyneessä ytimessä neutroni juuri ja juuri enää pysyy. Prosessia, jossa monta neutronia kaappautuu peräkkäin kutsutaan ytimien synteesissä r-prosessiksi ($r = \text{rapid}$). Neutronisäteilytyksen lakattua tällaiset varsin epävakauttavat ytimet hajoavat kohti pysyvämpien ytimien aluetta. Eräät neutronilukumäärät vastaavat poikkeuksellisen vakaata ydinrakennetta, johon ei helposti voi lisätä neutroneja. Nämä ytimet toimivat nukleosynteesissä eräänlaisina pysäkkeinä.

Alkuainesynteesi katkeaa fission

Eräs todiste erillisten r- ja s-prosessien olemassaololle on, että kuvassa 1 alkuaineiden runsauksissa on vierekkäisiä huippuja. Näistä pienemmällä A :n arvolla esiintyvä voidaan osoittaa aiheutuvan r-



Alkuaineiden suhteellinen runsaus logaritmisella skaalalla esitettynä. Vaaka-akselilla on nuklidin atomipaino.



Raskaat tähdet päättävät päivänsä näyttävästi suurissa supernovaräjähdyksissä. Tähten ydin romahtaa äärimmäisen tiheäksi kappaleeksi ja tästä vapautuva energia räjäyttää tähden ulommat osat rajusti ympäröivään avaruuteen. Räjähäntänyt tähti loistaa viikkoja yhtä kirkkaana kuin miljardit tavalliset tähdet.

Kuvassa näkyy naapurigalaksissamme Suuressa Magellanin pilvessä 24.2.1987 räjähtänyt Supernova 1987A (merkitty nuolilla). Se näkyi kuu-kausien ajan paljain silmin, vaikka se on meistä 170 000 valovuoden päässä.

Joka vuosi havaitaan kaukaisissa galakseissa yhteensä parisenkymmentä supernovaa, mutta niiden etäisyys on yleensä satoja miljoonia valovuosia.

Suuren Magellanin pilven supernova oli selvästi kirkkain vuoden 1604 jälkeen havaituista supernovista. Sen merkitys on hyvin suuri. Nyt on käytössä kaikki nykyaikainen havaintotekniikka, näkyvän valon lisäksi on havaittu infrapuna-, ultravioletti- ja röntgensäteilyä sekä radioaaltoja ja neutriino-hiukkasia. Se on jo tuonut paljon aivan uudentyypistä tietoa ja supernovan jäännös pysyy tähtitieteilijöiden tärkeimpiin kuuluvana tutkimuskohteena tuhansien vuosien ajan.

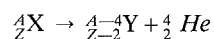
Seppo Linnaluoto, URSA

prosessista ja suuremmalla A :n arvolla oleva s -prosessista. Hidas s -prosessi ei myöskään johda kuin massalukuun $A = 209$ saakka. Syynä on, että kun ainoa pysyvä kyseisen massaluvun isotooppi vismutti ^{209}Bi kaappaa neutronin syntyy alfa-aktiivinen nuklidi ^{210}Bi , joka hajoaa nopeasti, ensin poloniumiksi ja sitten lyijyksi.

Uraanin on täytynyt syntyä r -prosessissa. Myös uraania raskaampia aineita voi r -prosessissa ilmaantua. Näiden elinikä on usein varsin lyhyt, sillä ne hajoavat joko alfasäteilyn tai fission kautta. Ydin-teoriat ennustavat, että massaluvuilla $A = 300$ esiintyisi hyvin stabiilien ytimien saareke. Joskin eräitä superraskaita alkua-aineita on pystytty laboratorio-oloissa syntetisoimaan, ei ole yksimielisyyttä siitä syntykö niitä tähdissä. Massaluvun $A = 250$ ohittaminen näyttää nopean fissioitumisen vuoksi kovin vaikealta.

SANASTOA

Alfahajoaminen Radioaktiivinen hajoaminen, jossa emittoituu alfahiukkanen,



Alfahiukkanen Heliumydin ${}^4_2 \text{He}$

Beetahajoaminen Radioaktiivinen hajoaminen, jossa ytimen neutroni muuttuu protoniksi ja samalla emittoituu elektroni ja antineutrino, ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}$.

(On olemassa myös käänteinen hajoamismuoto, jossa emittoituu elektronin antihiukkanen positroni sekä neutrino.)

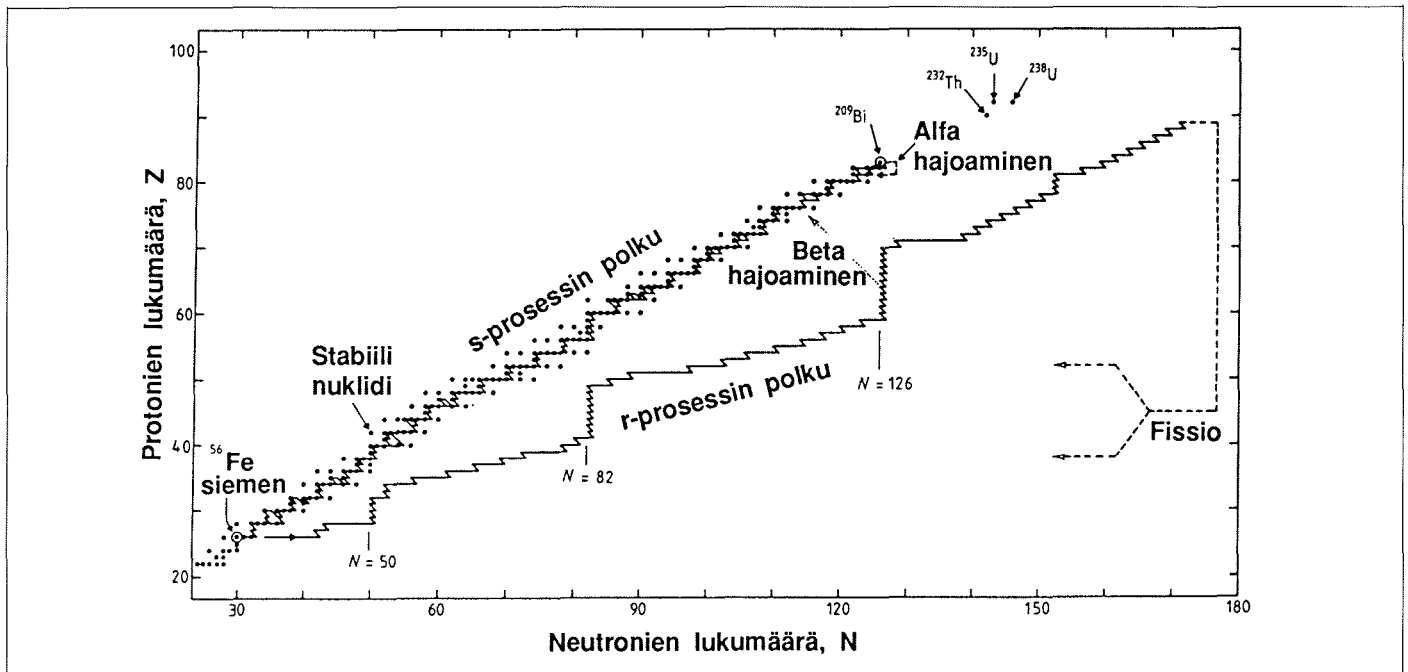
Fuusio Kahden kevyen ytimen sulautumisreaktio, esim. ${}^1_1 \text{H} + {}^2_1 \text{H} \rightarrow {}^3_2 \text{He}$.

Fissio Raskaan ytimen halkeaminen kahdeksi likimain samankokoiseksi palaseksi. Samalla usein vapautuu muutama neutroni.

Isotoopit Nuklidit, joilla on sama määrä protoneja, mutta eri määrä neutroneja.

Neutronikaappaus Ydinreaktio, jossa ydin kaappaa neutronin, ${}^A_Z X + n \rightarrow {}^A_{Z+1} X$.

Nuklidi Yleisnimi ytimelle, jossa on tietty lukumäärä protoneja ja neutroneja. Protonien lukumäärä ilmoitetaan järjestysluvun Z avulla. Neutroneja on $A - Z$ kpl, jossa A on ytimen massaluku.



Polut, joita pitkin alkuaineita syntetisoidaan neutronikaappausreaktioissa. Kuvan esittämään nuklidikarttaan on ytimet merkitty pisteinä niiden protoni- ja neutroniluvun mukaisesti.

Missä ja milloin uraani syntyi?

Edellä on esitetty hyvin pelkistetty kuvaus niistä reaktioista, joiden tuloksena uraanikin on syntynyt. Aurinkokuntamme iäksi arvioidaan 4,6 miljardia vuotta, joten lähes kaikki r-prosesseissa luodut ytimet, joiden massaluku on yli 209, ovat aikojen kuluessa hajoaneet. Jäljellä ovat enää luonnon radioaktiivisuusketjujen emoaineet, uraanin isotopit ^{238}U (puoliintumisaika on 4,5 miljardia vuotta) ja ^{235}U (0,7 miljardia vuotta), thorium ^{232}Th (14 miljardia vuotta), sekä näiden radioaktiiviset tytärytimet, joiden pitoisuudet ovat tasapainossa emoytimien hajoamistahdin kanssa. Eräs tapa arvioida maapallomme ikää perustuu juuri näiden isotooppien nykyisiin runsauksiin.

Uraanin syntyseutuja etsittäessä herää kysymys minkälaisissa oloissa neutronivuo nousee niin suureksi, että r-prosessissa voitaisiin päätyä aina uraaniin saakka. Varmaa vastausta ei vielä tiedetä. Las-

kennallisesti r-prosessi edellyttäisi lämpötilan, joka on suuruusluokkaa 1 miljardia astetta, ja neutronitiheyden $10^{24} \dots 10^{28}$ kpl/cm³. Tällöin 1–100 sekuntia kestävä leimahduksen aikana kyettäisiin syntetisoidaan raudasta lähtien kaikki alkuaineet massalukuun $A = 250$ saakka siten, että niiden runsaus likimain vastaisi havaittua jakautumaa.

Sopiva uraanikattila saattaisi löytyä läheltä supernovaräjähdyksen neutronitähtikeskustaa tai tähtien kehissä esiintyvistä äärimmäisen energettisistä iskuaalloista ja plasmapurkauksista. Sydänalueen neutronit syntyvät, kun elektronit ja atomiytimien protonit valtavassa tiheydessä yhtyvät. Supernovien sekä massiivisten tähtien ulkokehien alueella neutroneja vapautuu etupäässä alfahiukkasten törmätyksessä hiili- ja neonytimiin ^{13}C ja ^{22}Ne .

Supernova 1987A demonstroi miten alkuaineita luodaan

Supernovaräjähdykset eivät ole kovin

yleisiä. Meidän linnunradassamme niitä tapahtuu arviolta joka neljäskymmenes vuosi. Maailmankaikkeus on kuitenkin niin laaja, että tähtitieteilijät rekisteröivät tällaisia mullistuksia kymmeniä vuosittain. Luonto oli äärimmäisen runsaskätinen 29.2.1987. Tällöin nähtiin maan pinnalla Sanduleak nimisen tähden räjähdys Suuressa Magellaanin pilvessä noin 170 000 valovuotta meistä. Supernovaa kutsutaan nimellä 1987A. Sen kehitysvaiheita seurattaessa on varsin tarkoin pystytty havaitsemaan nukleosynteesin eri askeleet. Alussa näkyivät vety ja helium. Ulkokehän haihtumisen myötä ilmaantuivat raskaampien alkuaineiden spektriviivat. Viime aikoina on havaittu myös rauta, nikkeli ja koboltti. Kun pilvi edelleen haihtuu nähdään ehkä myös raskaammat tuotteet. Ensi kertaa myös röntgen- ja gammasädemittaukset ovat olleet mahdollisia näihin erikoistuneiden satelliittien ansiosta. Supernova 1987A:sta on ehkä jäänyt jäljelle neutronitähti. 'Silmiemme' edessä luonto juuri nyt näyttää miten alkuaineita luodaan. Näytelmä on ainutlaatuinen.

Taulukko. Alkuaineiden syntytyapa ja -paikka.

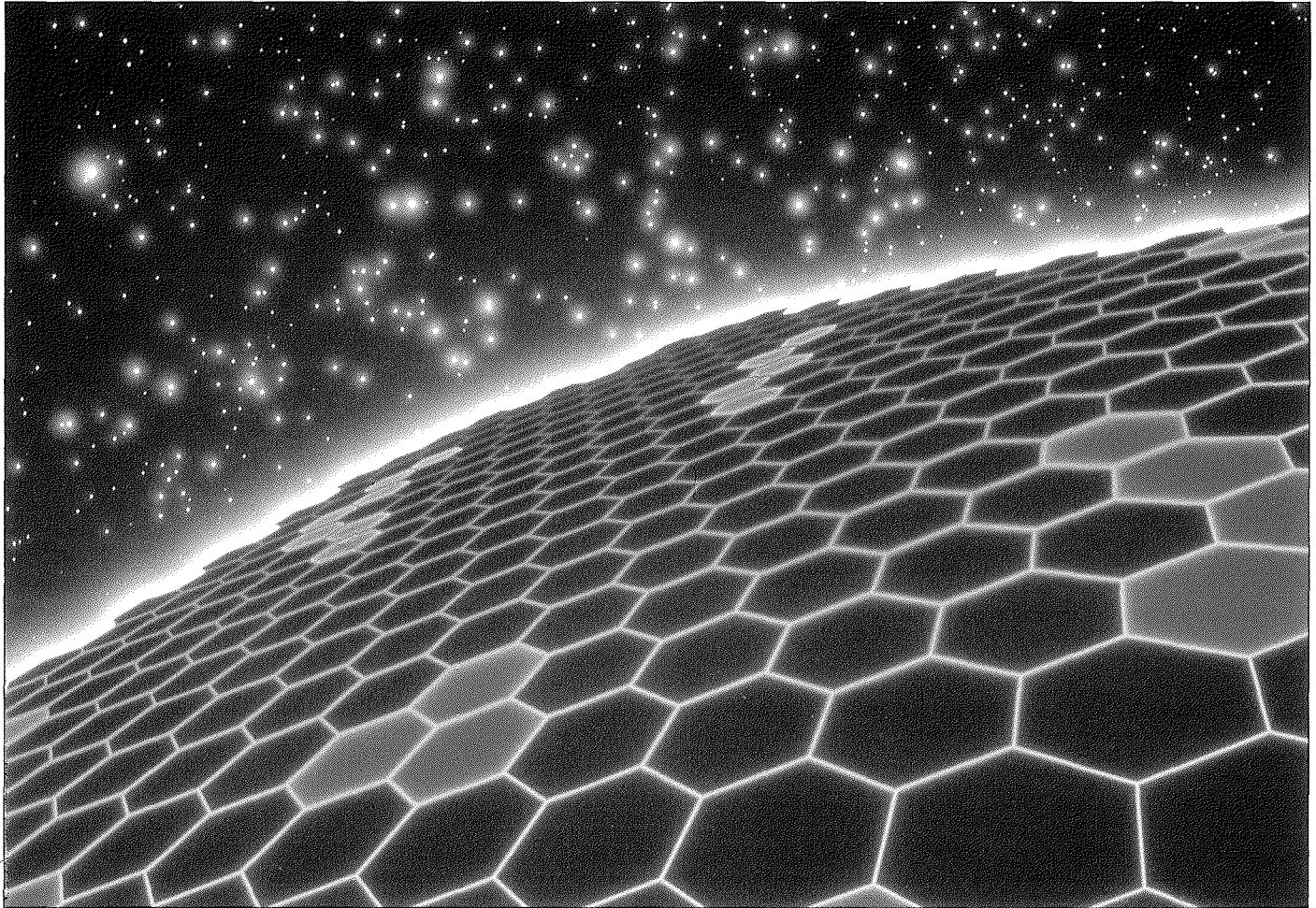
Tuote	Prosessi	Paikka
H, He	Alkumaterian jäähtyminen	Alkuräjähdyks
Li, Be, B	C, N, O pilkkoutuminen	Tähtipöly (kosmiset säteet)
^{12}C , ^{16}O	Heliumfuusio	Raskaat ja keskiraskaat tähdet
^{13}C , ^{14}N , ^{15}N	Vetyfuusio	Tähtien sisäosat
O—Ne	Hiilifuusio	Raskaat tähdet
Mg-ryhmä	Neonfuusio	Raskaat tähdet
Si-ryhmä	Happifuusio	Raskaat tähdet
Rautaryhmä	Piifuusio, C-O leimahdukset	Massiiviset tähdet, supernovat
Pysyvät isotopit ($A > 60$)	Hidas neutronikaappaus rauta lähtöaineena (s-prosessi)	Raskaat ja keskiraskaat tähdet
Neutronirikkaat isotopit ($A > 60$)	Nopea neutronikaappaus rauta lähtöaineena (r-prosessi)	Supernovat (?)
Neutroniköyhät isotopit ($A > 60$)	Protonien lisäys tai neutronien poisto (p-prosessi)	Supernovat (?)

Maapallomme uraanikin on siis mitä todennäköisimmin syntynyt tällaisissa korkeintaan muutaman minuutin supernovaräjähdyksissä raudasta hyvin intensiivisen neutronisäteilytyksen tuloksena. Räjähdysten energiaa on hitunen jäänyt uraaniytimiin varastoon. Tätä energiaa vapautuu, kun uraaniydin halkeaa. □

TkT Rainer Salomaa on Teknillisen korkeakoulun ydintekniikan vs. professori, p. 90-451 3199.



Uraanin geologinen historia



Uraani on levinnyt melko tasaisesti erilaisiin geologisiin muodostumiin rikastuen kuitenkin lähinnä pii- ja kaliumrikkaisiin magmakivilajeihin sekä tiettyihin kerrostuneisiin muodostumiin. Rikastumat ovat erittäin monentyppisiä, usein kompleksisia, ja niitä on runsaasti. Uraanin runsaus ja pitoisuusjakauma geologisissa muodostumissa sekä hyödyntämisen teknis-taloudellinen mekanismi takaavat, että maailmanlaajuisesti ei ole pelkoa uraanin taloudellisten malmiesiintymien loppumisesta lähitulevaisuudessa.

Uraani on mantereitten kivikuoressa levinnyt suhteellisen vähäisin pitoisuusvaihteluin erittäin monenlaisiin ympäristöihin. Se seuraa geokemiallisessa leviämisessään lähinnä toriumia. Kivikehän keskimääräinen uraanipitoisuus on noin 4 g/t eli neljä miljoonasosaa, kun vastaava pitoisuus toriumilla on 18 g/t. Taloudellisesti käytökelpoisiin malmiesiintymiin vaaditaan nykyisin uraania eräissä tapauksissa vain alle 1000 g/t, toisin sanoen vain noin 250-kertainen luonnollinen rikastuminen. Tällaisia rikastumia onkin runsaasti mitä erilaisimmissa geologisissa muodostumissa.

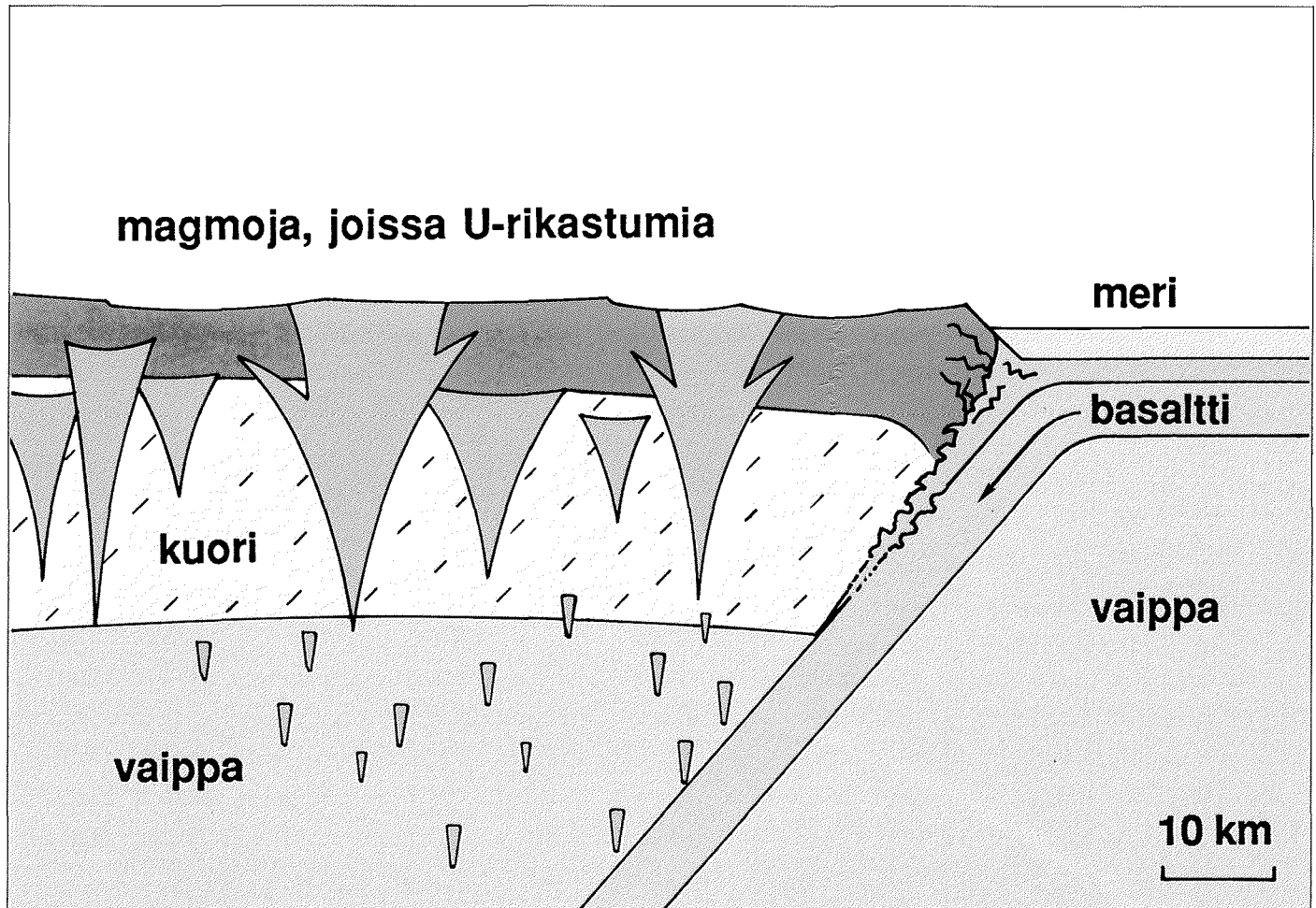
Maapallon mittakaavassa tarkasteltuna mantereisen, 30–50 km paksun kuoren alla ja valtamerialueilla suoraan meren pohjakerrostumien alla on maapallon mantteli eli vaippa, joka koostuu kuorta raskaammasta aineesta. Tietyistä manttelia edustavista basalteista on analysoitu keskimääräiseksi U-pitoisuudeksi 0,01

g/t. Mantteliin verrattuna on siis uraani suuresta ominaispainostaan huolimatta rikastunut mantereiseen kivikuoreen vähintään noin 400-kertaisesti.

Kivilajien pääryhmistä ovat sulasta jäähmettyneet eli magmakivilajit (syväkivet ja vulkaaniset eli tulivuorenkivet) järjestettävissä sarjaan, jossa U-pitoisuus kasvaa felsisyyden eli pii- ja kaliumpitoisuuden mukana (taulukko 1). Kalium/uraani-suhde on näissä kivilajeissa tällöin pyöreästi 10 000.

Kerrostumalla syntyneet muodostumat näyttävät vaihtelevan U-pitoisuudeltaan säännöttömästi. Tyypillisimpien analyysien mukaan voidaan sedimenttien U-pitoisuuksia luonnehtia taulukossa 2 esitetyllä luokittelulla.

Muuttuneissa eli metamorfisissa kivilajeissa ilmenee U-pitoisuuden huomattavia vaihteluita. Ne ovat osaltaan peräisin



Merenpohjan painuminen mantereen alle sekä uraania ja toriumia maankuoreen keräävien magmamassojen kohoaminen.

e.m. alkuperäiskivilajien vaihteluista mutta myös itse metamorfoosiprosessien moninaisista vaikutuksista.

Veden kiertokulussa mantereitten aineet liukenevat vaihtelevin määrin veteen eli joutuvat maapallon vesikehään, jonka valtaosaa edustavat meret. Meriveden U-pitoisuus on enimmäkseen välillä 0,0005—0,005 g/l, mikä on jopa 100-kertainen meriveden liuenneseen toriummäärään verrattuna. Merivedessä oleva ja siihen jatkuvasti liukeneva uraani edustaa suunnatonta malmireserviä; teknisesti uraaniin rikastaminen suoraan merivedestä hallitaan, mutta kustannukset ovat vielä joitakin kertoja suurempia kuin tavannaomaisten mantereitten U-malmien hyödyntämisessä.

Uraani mineraaleissa

Erilaisia mineraaleja uraani pystyy muodostamaan kolmatta sataa. Taloudellisesti tärkeimmät mineraalinsa se muodostaa valenssilla 4+. Näissä uraani osittain korvautuu hilassa muilla metalleilla kuten lantanideilla ja kalsiumilla. Tärkein U-mineraali ja uraaniin yleisin primäärinen kiteytymistuote on uraniiniitti (UO₂), jonka suhteellinen runsaus kytkeytyy sen vaikealiukoisuuteen. Massamaista uraniiniittia (UO₂—U₃O₈) nimitetään yleisesti pikivälkkeeksi.

Primääristen U-mineraalien hapettumisessa uraani muodostaa mm. alkuaineitten Nb, Ta, Mo, Ti ja C kanssa joukon erilaisia yhdisteitä esiintyen hilan eri asemissa jopa eri valensseilla (4+—6+) samanaikaisesti. Mukana hilassa voi olla vettä. Loput U-pitoisista mineraaleista kuuluvat lähinnä seuraaviin ryhmiin:

- niobaatit, tantalaatit ja titanaatit, joissa uraani osittain korvaa yhdisteen päämetallia (mm. pyrokloori),
- sekundaariset hapettumistuotteet (etenkin erilaiset uranyylioksidit ja -hydraatit),
- uranyylisilikaatit, -fosfaatit, -arsenaatit, -vanadaatit, -molybdaatit, -sulfaatit, -karbonaatit, -selenaatit ja -telluraatit,
- mineraalit, joissa uraania esiintyy vain vähän piilevästi.

Uraanin radioaktiivisen hajoamisen tuloksena U-mineraalien hilassa (sekä hilaa rikkoen) esiintyy lisäksi iästä riippuen vaihtelevia määriä hajoamisen välituotteita (etenkin toriumia) sekä lopputuotteita (lyijyä ja heliumia). Uraanin saanti malmin riippuu suuresti malmin mineralogiasta.

Isotooppisuhteet

Uraanilla on kaksi luonnollista radioaktiivista hajoamissarjaa, joitten lähtöisotoopit ovat U-238 ja U-235 (puoliintumisa-

ajat vastaavasti 4 500 miljoonaa vuotta ja 700 miljoonaa vuotta). Uraani vastaa pyöreästi lähes puolesta maankuoren radiogeenisestä lämmöntuotosta (torium samoin lähes puolesta ja kalium pyöreästi runsaasta kymmenesosasta). Valtaosa uraanista on U-238-isotooppia U-235:n osuuden ollessa 0,72 %. Kolmas luonnollinen U-isotooppi on U-234, jota syntyy U-238:n hajoamissarjassa. Koska U-234:n puoliintumisaika on ”vain” 250 000 vuotta, on sitä luonnonuraanista vain noin 50 miljoonasosaa.

Luonnonuraanin isotoopit U-238 ja U-235 eivät geologisissa prosesseissa fraktioidu, joten isotooppisuhde U-238/U-235 eri kivilajeissa ja vesissä on varsin vakio, 137,5 ± 0,5. Nopeammin hajoavaa isotooppia U-235 on menneisyudessa ollut paljon enemmän; 4 500 miljoonaa vuotta sitten — maankuoren synnyn aikoihin — isotooppia U-235 oli uraanista 22,5 %. Hajoamisen lopputuloksen, lyijyn, määrä on vastaavasti kasvanut kautta geologisen historian; tätä käytetäänkin tärkeänä geologisten materiaalien iänmäärityspersusteena.

U-238:n hajotessa U-234:ksi välituotteina ovat Th-234 ja Pa-234, jotka varsinkin veteen liukenemisessä ja siitä saostumisessa poikkeavat vähän uraanista ja tarjoavat mahdollisuuden kemialliseen fraktioitumiseen. Samoin hajoamisten rekyylivai-

Taulukko 1.
Magmakivilajien tyypillisiä uraanipitoisuuksia g/t.

Magmakivilajiryhmä	U-pitoisuus g/t
Ultramafiitit (duniitit, serpentiniitit ym.)	0,01— 0,05
Mafiset kivilajit (basaltit, gabrot ym.)	0,25— 0,7
Intermediääriset kivilajit (andesiiitit, dioriitit, granodioriitit ym.)	1,5 — 5
Felsiset kivilajit (ryoliitit, graniitit ym.)	2 —15

Taulukko 2. Erilaisten sedimenttien jakautuminen U-pitoisuuden mukaisiin ryhmiin.

U-pitoisuus g/t	Sedimenttinen kivi- tai maalajiryhmä
alle 0,1	maaöljy, evaporiitit
0,1— 1	kalkkikivi, dolomiitti
1 — 10	hiekkakivet, syvänmeren sedimentit, saviliuskeet, bentoniitti
10 —100	bauksiitti, mustaliuske, mätälēju, maaöljyn tuhka
yli 100	fosfaattikivet, rusko- ja kivihiili

Taulukko 3. Maapallon historian viisi suurta uraanikautta.

Miljoonaa vuotta ennen nykyhetkeä	Uraanin pääasialliset rikastumisyyt
yli 2200	U-mineraalien mekaanis-sedimenttinen kerrostuminen oli laajamittaisesti mahdollista silloin kun ilmakehä vielä oli hapeton.
2000—1700	Meren elämän kehittyminen ja samalla tapahtunut laajamittaisten pelkistävien vyöhykkeitten synty loi edellytykset hiatus- ja juonityyppisten U-esiintymien runsaudelle.
700— 500	Suuret tektoniset prosessit mm. Afrikan ja Brasilian tienoilla yhdessä ilmakehän lisääntyneen happimäärän ja elollisten mantereisten sedimenttien vähäisyyden kanssa mahdollistivat uraanin uuden kompleksisen rikastumisen.
n. 300—100	Hiilikaudella kasvit valtasivat mantereet, mistä johtui valtaviin kivihiili-, maaöljy- ja maakaasuvarantojen ja niihin läheisesti liittyvien kerrosellisten uraaniesiintymien syntyminen.
n. 65	Kenotsooisella kaudella laajoille alueille levisivät kuivat autiomaolosuhteet, jotka mahdollistivat tietyt haihtumis- ja rapautumisprosessit sekä niitten mukana nuoriin sedimentteihin liittyvien U-malmiesiintymien synnyn.

kutuksissa on eroja. Niinpä on todettu eräissä rapautumistuotteissa U-234:n määrän olevan selvästi vähäisempi ja merivedessä olevan noin 15 % enemmän isotooppia U-234 kuin radioaktiivinen tasapaino U-238:n kanssa edellyttäisi. Fraktioitumista voi samoin tapahtua kivilajien synnyssä ja kiteytymisessä, sillä kivilajit eivät muodosta suljettuja systeemeitä. Fraktioitumista on mahdollista käyttää apuna U-pitoisten geologisten materiaalien vaellusten ja iän selvityksissä, mitä nykyään tutkitaan vilkkaasti Suomessa.

Uraani geologisissa prosesseissa

Uraanin jakautuminen maapallon kehiin ja geologisiin muodostumiin selittyy sen geokemiallisesta käyttäytymisestä toisaalta suurrakenteissa ja toisaalta pinnallisissa rapautumis- ja kerrostumisprosesseissa. Tuhansien vuosimiljoonien kuluessa mantteli on näin köyhtynyt uraanista ja toriumista ja kuori vastaavasti rikastunut.

Magmapurkaukset liittyvät usein maankuoren suurrakenteisiin mullistuksiin, joissa kivisulaan joutuu myös aineksia aiemmista, alunperin kerrostuneista ja koostumukseltaan voimakkaasti erilaistuneista kivilajeista. Tällöin kemiallisten, lämpötila-, paine- ja liikeolosuhteitten monimutkaiset yhdistelmät tarjoavat paikoin hyvät edellytykset uraanin voimakkaalle, malmiesiintymiäkin muodostavalle rikastumiselle.

Mantereisten kivilajien rapautumisessa ilmastollisten tekijäin vaikutuksesta uraani toisaalta runsastuu, toisaalta vähenee (vrt. taulukko 2). Koska uraani liukenee toriumia huomattavasti helpommin veteen poistuen alkuperäiskivestään, pienee U/Th-suhde rapautumiskuoressa.

Pinnallisissa kulkeutumis- ja kasautumisprosesseissa uraani on voinut rikastua myös mekaanisesti suuren ominaispainonsa tai muodostamiensa mineraalien kovuuden (kulumislajuuden) takia. Usein rikastumiseen liittyy kuitenkin monimutkaisia kemiallisia ja biologisia prosesseja; mm. orgaaninen materiaali adsorboi uraania helposti liuoksesta.

Uraanin malminmuodostuksen geologisessa historiassa on huomionarvoista se, että merkittäviä määriä (nykyisiä) malmivaroja on syntynyt vain tiettyinä geologisina ajanjaksoina. Tämä johtuu osittain laajamittaisten tektonisten ja metamorfisten prosessien rytmisyydestä mutta ennen kaikkea ilmasto-olojen muuttumisesta maapallon historiassa. Geologisessa historiassa voidaan erottaa viisi ”uraanijaksoa” (taulukko 3).

Uraanimalmien syntytavat

Geologisten prosessien vaihtelevuuden mukaisesti U-malmiesiintymien syntytavat ovat erittäin moninaiset. Tämä pätee myös verrattaessa uraanin ja yleensä muitten aineitten malmiesiintymiä. Geo-

logisen ympäristönsä mukaan U-malmit jaetaan nykyisin kahdeksaan päätyyppiin: — proterotsooiset kvartsimukulaiset konglomeraatit (etenkin Kanadassa ja Etelä-Afrikassa) — hiastustyyppiset esiintymät (varsinkin Kanadan Saskatchewanissa, mm. Cigar Lake, ja Australian Alligator Riversissä) — proterotsooiset kerrossidonnaiset ja remobiloituneet esiintymät mantereisissa sedimenteissä (kuten Roxby Downs Etelä-Australiassa ja Gabonin Oklo, jossa 1700 miljoonaa vuotta sitten käynnistyi spontaani fissio) — pirote-, pegmatiitti- ja kontaktiesiintymät magmaattisissa ja metamorfisissa muodostumissa (kuten Namibian Rössing) — juoniesiintymät (kuten Tšekkoslovakian Jachymov (Joachimsthal)) — hiekka- ja silttikiviesiintymät (mm. Länsi-Kordilleereilla USA:ssa sekä Alpeilla) — muut pinnalliset sedimentit (mm. Australiassa, Namibiassa, Somaliassa) — muut esiintymät (kuten fosfaattiset kalkkikivet ja hiilipitoiset esiintymät).

Suomen U-esiintymät, jotka Enon Paukujanvaaraa lukuunottamatta eivät vielä ole yltäneet oikeiksi malmeiksi, kuuluisivat lähinnä neljään ensinmainittuun ryhmään.

Uraanimalmien taloudellinen luonne

Geologinen uraanirikastuma muodostaa malmin eli taloudellisesti hyödynnettävän esiintymän aina siltä osaltaan, miltä se täyttää seuraavat peruskriteerit:

- Tiedon riittävyys:** Geologista tietoa esiintymästä (sen mineraaleista, rakenteista, asemasta ja ympäristöstä) on riittävästi hyödyntämisen suunnitteluun ja toteutukseen.
- Tekninen valmius:** Esiintymään yksilöllisesti soveltuvat, teknisesti luotettavat hyödyntämisprosessit on kehitetty.
- Esiintymän taloudellinen laatu:**
 - Arvomineraalipitoisuus on tarpeeksi korkea ja esiintymistapa riittävä selväpiirteinen mahdollistamaan mineraalien teollisen rikastamisen.
 - Arvomineraali(e)n U-pitoisuus on tarpeeksi korkea uraanin teolliseen erottamiseen mineraalirikasteista.

— Uraanin kokonaismäärä on riittävä tuotantoon, joka pystyy maksamaan takaisin investoinnit ja korvaamaan aiheutetut haitat.

Mitään yleispäteviä pitoisuus- ja määrärajoja ei ole olemassa, vaan vaatimukset vaihtelevat olosuhteitten mukaan yksittäisessä esiintymässäkin sekä paikallisesti että ajallisesti.

Rikasteen alhainen hinta sallii vain harvoihin esiintymiin soveltuvan halvan hyödyntämistekniikan. Tuotteen kysynnän kasvaessa ja hinnan noustessa tulevat yhä kalliimpia hyödyntämismenetelmiä vaativat alhaisemmat U-pitoisuudet taloudellisesti hyödynnettäviksi eli malmi-käsitteen piiriin. Täten rikasteen hinta on myös keskeinen esiintymän louhittavan osan kokoon ja malmivarojen kokonaismäärään vaikuttava tekijä. Niinpä monet jo "loppuun louhitut" U- ja muittenkin arvoaineitten esiintymät samoin kuin van-

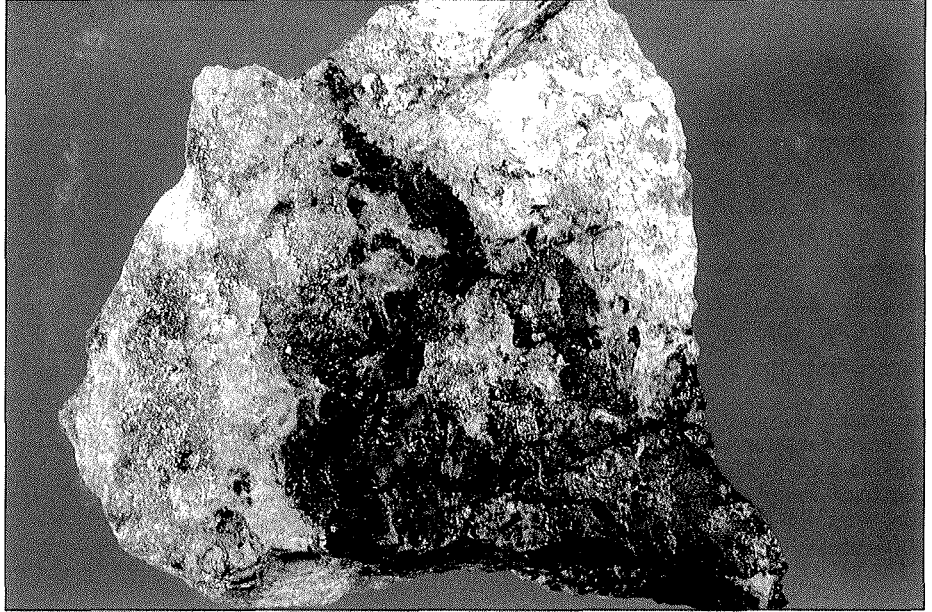
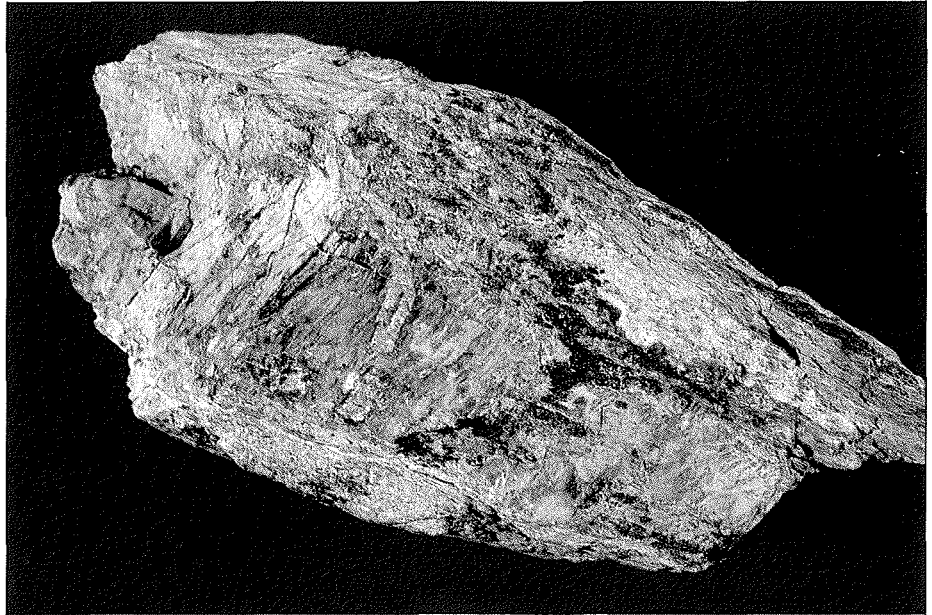
URAANI

- Uraanin keksi saksalainen Klaproth pikivälkkeestä vuonna 1789 ja uusi alkuaine sai nimensä samoihin aikoihin löydetyn planeetta Uranuksen mukaan.
- Uraanin järjestysluku on 92, molekyylipaino 238, tiheys 18,95 g/cm³, sulamispiste 1132 °C, kiehumispiste 3818° C.
- Uraani kuuluu aktinoideihin ja se on hopeanvalkoinen hiukan terästä pehmeämpi, taottava, lievästi paramagneettinen metalli.
- Uraanilla on neljätoista radioaktiivista isotooppia massaluvuilla 227—240. Luonnossa esiintyvä uraani sisältää eniten seuraavia isotooppeja:

U-238 99,28 %, puoliintumisaika = $4,5 \times 10^9$ vuotta, U-235 0,71 %, puoliintumisaika = $7,1 \times 10^8$ vuotta, U-234 0,005 %, puoliintumisaika = $2,5 \times 10^5$ vuotta.

- Maankuoressa on uraania keskimäärin 4 g tonnissa ja merivedessä keskimäärin 0,1—10 mg tonnissa.
- Metallinen uraani liukenee happoihin, hapettuu ilmassa muodostaen pinnalleen oksidikerroksen ja esiintyy yhdisteissään useilla hapetusasteilla, joista pysyvimpiä ovat +4 ja +6.
- Vahvasti elektroposiitiivisena alkuaineena uraani muistuttaa alumiinia ja magnesiumia. Uraanin kuudenarvoiset yhdisteet muistuttavat siirtymämetallien kromin, molybdeenin ja wolframin yhdisteitä.

Anneli Nikula, TVO



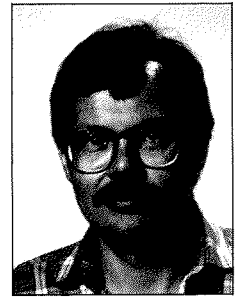
Enon Paukkajanvaaran uranikaivoksen tyypillisimmät uraanimineraalit: musta on pikivälkettä (U₃O₈) ja keltainen erästä vesipitoista U-Ca-silikaattia, uranofaania.

hat sivukivi- ja jättevarastot (mm. kultamalmien jäteliete) saavat louhinnan edistyessä jälleen "arvonnousun" U-malmeiksi. Samaan luokkaan kohoavat taitotiedon kehittyessä aikanaan tietyt fossiilisten polttoaineitten esiintymät — turve mukaanlukien — niiden tuhkan korkean U-pitoisuuden vuoksi. Ja kuten jo todettu, myös merivesi tulee kysymykseen valtaisan U-malmiina.

Uraanivarojen tarkkaa määrää on paljolti tilastoitu ja luokiteltu mm. kunkinhetkisten tuotantokustannusten mukaan. Sekä historiallinen kokemus että taloudelligeologiset perusteet osoittavat kuitenkin, että tällaiset inventoinnit ovat helposti harhaanjohtavia malmivarojen pitkän tähtäyksen riittävyuden ennustamiseen. Malmivarojen edellä kuvatun tiedollisteknis-taloudellisen luonteen mukaan niiden jäljelläoleva määrä ei suinkaan yksioikoisesti vähene edistyvän hyödyntämisen funktiona. Vaikka esiintymät eivät

ehdi geologisesti muuttua, paranee niiden hyödynnettävyys yleisesti ottaen kaikkien edellä mainittujen kolmen peruskriteerin osalta; samalla niitä etsitään ja löydetään lisää uusista muodostumista ja suoraan pintaa syvemältä. Nämä seikat mahdollistavat U-malmivarojenkin määrän jopa progressiivisen kasvun lähivuosisatoina. Geologis-teknis-taloudellisiin perusteisiin niinollen uraanin loppumisesta ole pelkoa sinä ajanjaksona, joksi fissiovoimalaitosten käyttöä on suunniteltu. □

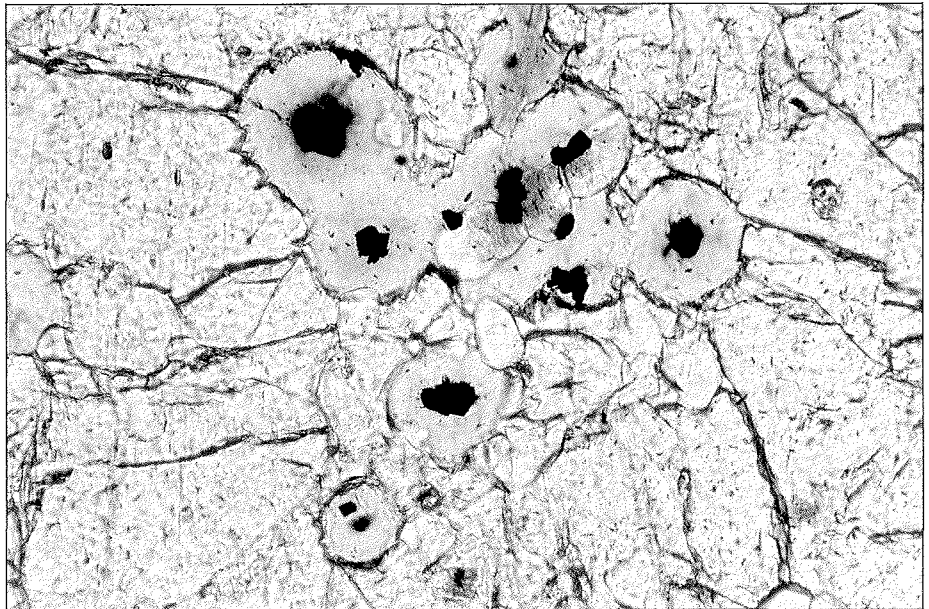
FT Heikki Niini on Teknillisen korkeakoulun taloudellisen geologian professori, p. 90-451 2720.



Uraaninetsintä Suomessa

Uraaninetsintä aloitettiin Suomessa 1955 käytännöllisesti katsoen tyhjästä: mallina käytettiin uraaninetsinnän tuloksia muilta peruskallioalueilta. Ensimmäisten löytöjen siivittämän ryntäysmäisen innostuksen jälkeen etsintä tasoittui pitkäjänteisemmäksi ammattiorganisaatioiden työksi, johon ulkopuoliset suhdanteet ovat kuitenkin heijastaneet runsaan viiden vuoden mittaisia nousuja ja laskuja. Kolmen vuosikymmenen etsinnöissä on löydetty lukuisia uraaniesiintymiä ja -malmiivitteitä, mutta kaikki löydöt ovat olleet liian pieniä johtaakseen taloudellisesti kannattavan kaivoksen avaamiseen. Näennäisen kielteisistä tuloksista huolimatta maamme kallioperän ikä ja laatu ovat otolliset myös suurten uraanimalmien löytämiseen.

Laatokalta 1889 löydetylle mineraalille annettiin suomalaisen geologin F.J. Wiikin mukaan nimi "wiikiitti" samoihin aikoihin, kun Becquerel havaitsi radioaktiivisuuden ja Marie ja Pierre Curie aloittivat työnsä radiumin eristämiseksi pikivälkkeestä. Kiinnostus mineraalien radioaktiivisuuden tutkimiseen levisi myös Suomeen: Leonard Borgström ja Gustaf Aartovaara havaitsivat 1910-luvulla valokuvauslevyjen ja elektrometrien avulla useat Suomen pegmatiittikivien mineraalit radioaktiivisiksi; näiden joukossa oli tantaloniobaatteja, fosfaatteja ja silikaatteja mm. Impilahdelta, Kiskosta, Kangasalta ja Kuortaneelta. Mineraalien radioaktiivisuuden aiheutti kuitenkin torium; ainoa uranimineraali joukossa oli juuri wiikiitti, harvinaisia maametalleja sisältävä niobaatti, joka Lauri Lokan jo 1920-luvulla tekemien määritysten mukaan sisältää 5—10 % uraania. Maassamme ei kuitenkaan ryhdytty etsimään raska-aineita radiumteollisuuden tarpeisiin, ja 1950-luvulle saakka wiikiitti oli ainoa Suomesta tunnettu uranimineraali (tosin sen löytöpaikat Impilahdella ja Sallassa sijaitsevat Neuvostoliitolle luovutetuilla alueilla). Vuoden 1949 malminetsinnän



Uraniniittejä Vihannin Lampinsaaren uraanimalmassa. Niitä ympäröivissä kehissä kalsiumsilikaatti on muuttunut kiillemäiseksi silikaattimassaksi. Mikrovalokuva, kuvan korkeus on 0,3 mm.

oppikirjaankin oli Martti Sakselan haettava esimerkki radioaktiivisten malmien etsinnästä siitä, kuinka sairaalan sädehoito-osastolta kadonnut radiumlaatta löydettiin Geiger-Müller-kojeiston avulla.

Vesistä terveyttä?

Pegmatiittimineraalien lisäksi havaittiin vuosisadan alkupuolella radioaktiivisuutta lähdevesissä. Aartovaara ja Gunnar Nordström tutkivat vesien radioaktiivisuutta ja radiumpitoisuutta 1910- ja 20-luvuilla Etelä-Suomessa ja Nilsiässä; innoittajana oli tietysti ulkomaisten terveyskylpylöiden vesien radioaktiivisuus. Tunnetuin näistä havainnoista lienee kylpylaitos "Imatran" lähde Helsingin Malminkadulla.

1950-luvun lopun uraanikuume

YK:n konferenssi Genevessä elokuussa 1955 oli lähtölaukaus uraaninetsinnälle. Geologian tutkimuskeskuksen (GTK; tuolloin Geologinen tutkimuslaitos) malmingeologi Oke Vaasjoki levitti 1955—57 ammattipiireihin uudet tiedot uraanimalmien geologiasta ja etsinnästä. Uraaninetsintä aloitettiin tutkimuskeskuksessa ja Outokumpu Oy:n Malminetsinnässä, mutta näyttävimmän lähti liikkeelle puunjaloosteollisuus perustamalla uraanin etsintää ja hyödyntämistä varten oman yhtiön, Atomienergia Oy:n. Uraaninetsintään ryhtyivät myös muutamat muut yh-

tiöt, esimerkiksi Imatran Voima Oy sekä monet yksityishenkilöt, erityisesti A. Viento.

Uraaninetsinnän alkua voi luonnehtia ryntäykseksi: ensimmäisiin löytöihin Porvoon ympäristössä ja Pohjois-Karjalassa keskitettiin suurin osa etsinnän panostuksesta, työt tehtiin nopeasti ja ne vietiin samantien tuotantokokeilujen asteelle hankkeiden taloudellisuuden selvittämiseksi.

Porvoon seutu: Pernaja ja Askola. Ensimmäiset valtauksen johtaneet uraanilöydöt teki A. Viento Lopella 1955. Lähökohtanaan vanha tieto lähdevesien radioaktiivisuudesta Viento valtasi 1956 Pernajan Käldestä uraaniesiintymän, jossa kallion hirtovyöhykkeeseen liittyy pieniä mutta rikkaita (0,5 — > 10 % U) uraanimalmipahkuja. Oy Perno Ab hallitsi Käldestä kaivospiiriä 1959—77 (loppuvaiheessa yhtiön osakkeet siirrettiin Machinery Oy:lle).

Imatran Voima Oy löysi 1956 autoon asennetulla säteilymittarilla Askolasta "Alhon lohkarin", joka sisälsi 30 % uraania. Tästä alkaneet etsinnät johtivat kymmeniin uraanivaltauksiin Askolassa ja Porvoon maalaiskunnassa; valtauksia teki myös Suomen Mineraali Oy. Imatran Voima Oy:n valtaukset Askolan Lakeakallion alueella määrättiin kaivospiiriin

1958. Vuosina 1958—61 yhtiö louhi kahdesta louhoksesta 557 tonnia malma rikkastuskokeiluihin, jotka tehtiin paikalle rakennetussa laitoksessa. Malmin keskipitoisuus oli 0,1 % U.

Lukuisista valtauksista huolimatta ei rikkasta malma löydetty kalliosta. Vasta vuosina 1979—84 GTK jäljitti Alhon lohokareen kaltaisten irtokivien lähtöpaikan kalliosta Askolan Särkijärvellä: uraani esiintyy rakotäyteenä ja pesäkkeinä, joissa voi olla 1—2 % U. Tulokset osoittavat, etteivät Porvoon ympäristön esiintymät satunnaisista rikkaista malmipesäkkeistä huolimatta sisällä tarpeeksi uraania taloudellista louhintaa varten.

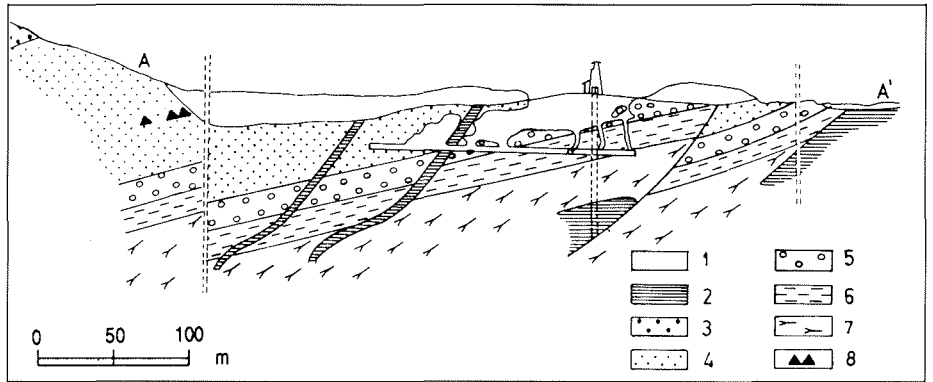
Atomienergia Oy Pohjois-Karjalassa.

Atomienergia Oy ansaitsee oman lukunsa Suomen uraaninetsinnän historiassa. Kajaani Oy, Kemi Oy, Oulu Oy, Rauma-Repola Oy ja Veitsiluoto Oy perustivat yhtiön syyskuussa 1955.

Atomienergia Oy:n toimet Pohjois-Karjalassa tunnetaan parhaiten, vaikka yhtiö etsi uraania myös Etelä-Suomessa, Pohjanmaalla ja Kainuussakin. Justanderin veljesten uraanilöytö kotivaaroillaan vei yhtiön geologit 1957 Enon Hutunvaaraan ja johti laajoihin etsintöihin Kolin kvartsiittijaksolla. Muutaman vuoden aikana yhtiö tutki 30 kilometrin pituisen alueen Kolin ja Kaltimon välillä ja löysi satoja uraanimalmihkareita sekä useita uraaniesiintymiä kalliosta. Näistä kaksi, Ylä-Paukkajanjärven pohjoispuolella sijaitsevat Kunnansuon ja Märtenssonin esiintymät kairattiin ja koelouhittiin 1958. Samana vuonna esiintymät määrättiin kaivospiiriin, joka oli voimassa vuoteen 1973; kaivoksen nimenä oli ensin Hutunvaara, vuodesta 1959 alkaen Paukkajanvaara.

Paukkajanvaarassa tutkittiin ensin rikkaan palamalmien tuottamista murskauksen ja lajittelun avulla; tulokset olivat kuitenkin huonot. Yhtiö jatkoi kokeilua 1959 liuotusrikkastuksella laboratoriomittakaavassa, ja näissä kokeissa saatiin tuotetuksi sekä hyvälaatuista uraanirikastetta että neutralointisaostukseen perustuvaa puolirikastetta. Yritys laajennettiin teollisuusmittakaavaiseksi tuotantokokeiluksi rakentamalla kaivos ja rikastamo. Rikkihappoliuotuksella ja neutralointisaostuksella saatiin 20—30 % U sisältänyt tuote; prosessin keskimääräinen saanti oli 73 %. Rikkastusmenetelmän valintaan vaikutti oleellisesti puolirikasteen hyvä menekki. Kaivoksen tuotteet myytiin ulkomaille. Käyntiaikanaan 1960—61 kaivos ja rikastamo työllistivät noin 100 henkilöä.

Yhtiö nosti Paukkajanvaaran kaivoksesta ja Kolin alueen avolouhoksista 1958—61 runsaat 40 000 tonnia malma, jonka keskipitoisuus oli 0,1—0,2 % U. Kaivoksen malmin keskipitoisuus oli 0,177 % parhaana ja 0,109 % huonoimpana kuukautena. Tuotantokokeilu päättyi louhittavien malmiesiintymien loppumiseen. Kolin jakson tutkimukset näyttivät vaativan niin laajaa tutkimusohjelmaa, ettei yhtiö



Tynin laetima Paukkajanvaaran kaivoksen pituusleikkaus. 1. moreenia, 2. metadiabaasia, 3. arko-siittia, 4. kvartsiittia, 5. konglomeraattia, 6. serisiitti-kvartsiilusketta, 7. (arkeista) graniittigneissä, 8. Ylä-Paukkajanjärven (Ruunaniemen) esiintymän tyyppistä uraanimalmia.

katsonut voivansa laajentaa etsintäänsä, ja tutkimusalueet ja työn jatkaminen siirrettiin keskinäisellä sopimuksella Outokumpu Oy:n haltuun.

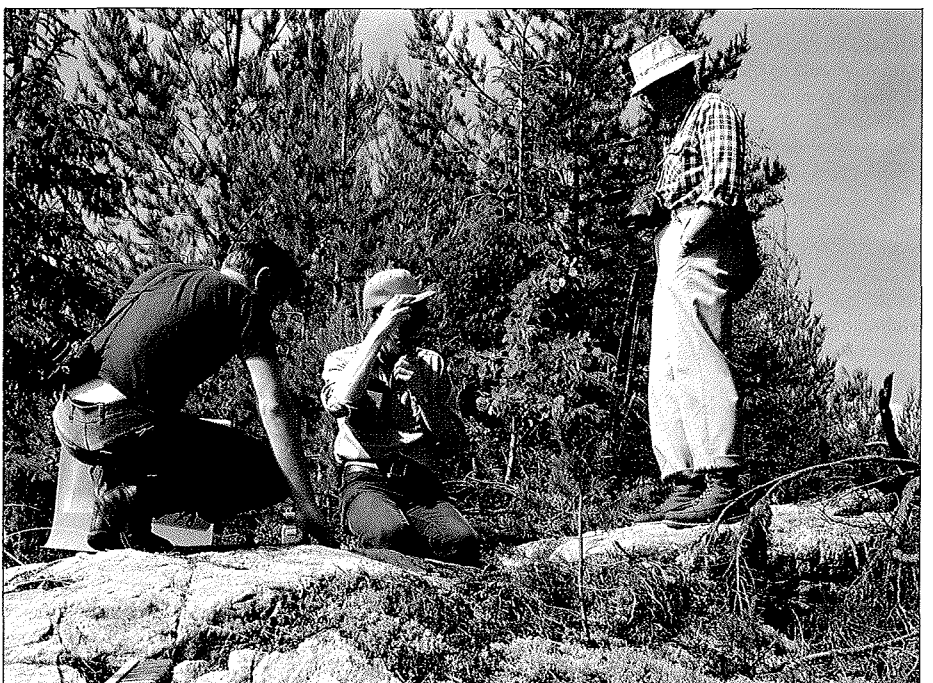
Outokummun järjestelmällinen työ

Outokumpu Oy etsi uraania systemaattisesti 1958—75; perustan loi geologi Aarto Huhma, ja työtä jatkoivat Jyry Saastamoinen ja Risto Sarikkola. Tutkimalla kvartsiittijaksot Pohjois-Karjalasta Kainuun, Kuusamon ja Lapin perukoille yhtiö löysi Nuottijärven ja Kesänkitunturin esiintymät (taulukko 1) sekä pienen Ipatin malmin Koliilta; lisäksi yhtiö jatkoi Atomienergia Oy:n tutkimuksia Enossa kairaamalla Ylä-Paukkajanjärven alle ulottuvan Ruunaniemen esiintymän.

Yhtiön geologit huomasivat 1960-luvun lopulla uraania ja fosforia sisältävien liuskeiden esiintymät paitsi uraanimalmi-

aiheiksi myös kallioperän avainyksiköiksi, joiden avulla voitaisiin etsiä sulfidimalmiesiintymiä. Nuottijärven ohella merkittävin näistä on Lampinsaaren esiintymä, joka paikannettiin 1973—74 Vihannin kaivoksen sinkkimalmien vierestä. Kittilän Pahtavuoman kupariesiintymän kairauksissa 1971 löydettiin yllättäen uraania sisältäviä juonia, mikä johti hyvälaatuiseen mutta pienen uraaniesiintymän varmistamiseen kairauksin.

Yhtiössä kehitettiin 1973—75 kallioperän arkeisten ja proterotsoisten yksiköiden rajalla sijaitsevien uraanimalmien etsintäohjelmaa. Töitä oli suunnattu myös Kuusamon alueelle, josta havaittiin uraanin ja kunnan mineraaliumia. Systemaattinen uraaninetsintä lopetettiin kuitenkin 1975, ja samalla päättyi toistaiseksi merkittävin, käytettyihin resursseihin verrattuna hyvin tuloksiin yltänyt vaihe Suomen uraaninetsinnässä.



IUREP-lähetystö Enon Revonkylän esiintymällä 1980. Vasemmalta Esko Räisänen GTK:sta sekä OECD:n konsultti Terry McKillen Irlannista ja Jorma Kalliokoski USA:sta.

Taulukko. Suomen todetut uraanivarat OECD:n ja IAEA:n luokittelun mukaan.

Kunta Esiintymä	Tyyppi Keskikipit. % U	Uraanivarat in situ 80—130 US\$/kg U	(tonnia U) 130—260 US\$/kg U
Nummi-Pusulaa Palmottu	migmatiitti 0,10	1 000	
Kittilä Pahtavuoma	juoni 0,19	500	
Kolari Kesänki	kvartsiitti 0,06		950
Eno; Lieksa Ruunaniemi ym.	kvartsiitti 0,08—0,14		250
Paltamo Nuottijärvi	fosforiitti 0,04		1 000
Vihanti Lampinsaari	fosforiitti 0,03		700
Yhteensä		1 500	2 900

Muut 1970-luvun uraaninetsijät. Kauppa- ja teollisuusministeriö rahoitti 1970-luvulla suoraan osan yhtiöiden, GTK:n ja yliopistojen ja korkeakoulujen geologisista uraanitutkimusprojekteista. Ministeriön tuella kehitettiin etsintämenetelmiä ja -laitteita esimerkiksi aeroradiometrisiä mittauksiin ja geologisten joukkonäytteiden analysointiin. GTK aloitti systemaattisen geofysikaalisen matalalentokartoituksen sekä alueellisen geokemiallisen kartoituksen ja lisäsi kohteellista uraaninetsintää vuosiksi 1974—75. Myös Rautaruukki Oy tutki radioaktiivisia esiintymiä, tärkeimpinä Soklin karbonatiitti Savukoskella ja Mustamaan uraani-fosfori-esiintymä Tervolassa. Pienessä mitassa uraaninetsintää rahoittivat myös Neste Oy ja Kuusamon alueella Kemi Oy ja Lemminkäinen Oy.

Öljykriisin jälkeinen loppukiri ja hiljentyminen

Öljykriisin vilkastuttaman uraaninetsinnän hyvät löydöt Kanadassa ja Australiassa näkyivät meilläkin: Geologian tutkimuskeskus aloitti tehostetun uraaninetsinnän syksyllä 1979. Aluksi osallistuttiin OECD:n ja IAEA:n uraanivarojen arviointiprojektiin (IUREP), jonka konsultit Jorma Kalliokoski ja T.N. McKillen työskentelivät täällä kesällä 1980. He arvioivat Suomen uraanimahdollisuudet kohtalaisiksi; kallioperämme löytäjänsä odottavissa malmeissa pitäisi geologisen ennusteen mukaan olla ainakin 8 000—18 000 tonnia uraania.

GTK:n uraaninetsintäryhmien työt keskitettiin Itä- ja Pohjois-Suomen liuske-alueille sekä Etelä-Suomessa Askolaan ja Länsi-Uudellemaalle. Uusia löytöjä tehtiin Askolassa, Kajaanissa, Kuhmossa, Kuusamossa, Kittilässä ja Enontekiöllä, mutta parhaaksi nousi Palmotun esiinty-

mä Nummi-Pusulassa (taulukko). Kuusamon uraanilöydöt johdattivat koboltti- ja kultamalmin etsintähankkeeseen, jossa alueelta on todettu useita, ehkä kaivos-toimintaankin yltäviä kultaesiintymiä. Uraani on näissä esiintymissä mahdollinen sivutuote. Vuolijoen Otanmäessä GTK:n uraaninetsijät löysivät toriumia sisältävän niobi-lantanidiesiintymän, jonka jatkotutkimukset siirtyivät Rautaruukki Oy:lle.

Tehostus jäi lyhytaikaiseksi, sillä 1980-luvun alun yltäjänsä vuosiksi GTK alkoi supistaa uraaninetsintäänsä vuodesta 1984 alkaen. Varat ohjattiin muiden metallien ja teollisuusmineraalien etsintään, eikä uusia uraaninetsintähankkeita ole pantu alulle.

Kolmen vuosikymmenen tulokset

OECD:n ja IAEA:n arvioissa maailman uraanivarat ryhmitellään malmiesiintymien inventointiasteen ja tuotantokustannusten perusteella; uraania tuotetaan esiintymistä, jotka kuuluvat luokkaan "todetut varat / < 80 US\$/kg U". Suomen todetut uraanimalmivarat (taulukko 1) ovat vähäiset verrattuna kallioperän antamiin edellytyksiin malmien löytämiselle: vain kaksi esiintymää — 1 500 t U — on voitu sijoittaa tuotantokustannusten mukaiseen keskiluokkaan. Muiden esiintymien hyödyntäminen tulee kalliimaksi alhaisen uraanipitoisuuden, ratkaisemattoman rikastustekniikan tai kaivostoiminnalle herkän ympäristön vuoksi. Kaikkiaan on maassamme todettu olevan 4 400 tonnia uraania itse uraniesiintymissä ja lisäksi sama tai kaksinkertainen määrä mahdollista "sivutuoteuraania" Sotkamon Talvivaaran mustaliesiintymässä ja Soklin karbonatiitissa. Maamme nykyisten ydinvoimaloiden vuotuinen polttoainetarve on 500 tonnia luonnonuraania.

Suomen 30 vuotta kestänyt uraaninetsintä ei ole tuottanut tavoiteltuja suuria ja rikkaita malmeja; lukuisat maassamme tehdyt uraanilöydöt ovat osoittautuneet pikkumalmeiksi tai taloudellisesti merkitysettömiksi rikastumiksi. Tulos ei juuri poikkea Ruotsin tilanteesta: Ranstadin suurta mutta pitoisuuksiltaan alhaista, ympäristöhaittojen vuoksi kalliisti louhitavaa esiintymää lukuunottamatta Ruotsin todetut varat — 4 000 t U — jakautuvat kahden esiintymän kesken. Näiden arvioidut lisämalmivarat sisältävät noin 6 000 t U.

Uraania tuotetaan kaivoksista, joiden malmi on hyvin rikkaita tai joissa tuotantokustannukset muuten ovat alhaiset. Uraaninetsinnän laman vuoksi näyttää 1990-luvulla tulevan puutetta näistä malmeista; ellei niitä etsitä ja löydetä lisää, uraanin hinta nousee. Uraania kuitenkin riittää, sillä hinnan noustessa voidaan ottaa tuotantoon nykyisin kannattamattomia esiintymiä.

Uraaninetsinnän edellytykset Suomessa ovat nyt paremmat kuin koskaan: alueellisella kartoituksella kerätään perustietoa yhä lisää, tekninen valmius on hyvä ja Suomessa hallitaan nykyaikaiset etsintämenetelmät. Oman geologisen tutkimuksen ja kansainvälisen yhteistyön perusteella tiedämme, millaisia malmityyppejä maassamme kannattaa etsiä. Otollisimmat kohteet ovat rikkaat juonityypiset ja albiittikivien uraanimalmit esimerkiksi Kittilän alueella, Kuusamossa ja Pohjois-Karjalassa sekä pirotetyypiset uraniniittimalmit Etelä-Suomen migmatiittialueella. Lisäksi tulisi ennakkoluottomasti tutkia uraanin tuottamista ns. nuorista uraanirikastumista, jotka ovat sitoutuneet eloperäisiin maalajeihin uraania sisältävistä lähdeveistä jääkauden jälkeen, viimeisten 5 000—10 000 vuoden aikana. Näiden etsintä- ja hyödyntämistekniikka poikkeaa kallioperän malmeille soveltuvasta tekniikasta.

Malmiesiintymän löydön ja kaivoksen avaamisen välillä kuluu tutkimuksiin kymmenisen vuotta; vähäisempikin löytö vaatii tutkimusresursseja kunnes varmistetaan, ettei sen varaan voida perustaa kaivosta. Suomen uraaninetsintää on räsittänyt resurssien ja ajan puute, sillä 50-luvulta alkaen on kunkin kymmenluvun taitteessa suuri osa panostuksesta jouduttu käyttämään menetelmä- ja laitekehittelyyn, ja sinänsä kutkuttavat mutta sitten pieniksi todetut löydöt ovat syöneet loput tutkimusresursseista ja geologien ajasta. Rahoittajien kärsivällisyyden mita näyttää olleen noin viisi vuotta, mikä malminetsinnässä on kovin lyhyt aika hyviin tuloksiin pääsemiseksi. □

FK Olli Aikäs on Geologian tutkimuskeskuksen malmiosaston geologi Kuopiossa, p. 971-205 111.



Uraanin käytön historia

Uraani löydettiin v. 1789, mutta käyttöä sille (lasin värjäykseen) löytyi vasta 1826. Sen radioaktiivisuuden havaitseminen v. 1896 aiheutti sen käyttöä radioaktiivisuuden tutkimukseen: sen malmeista löytyi muita radionuklideja, mm. polonium ja radium. Viimeksimainittua alettiin v:sta 1904 käyttää ihosyövän hoitoon. Vasta fission keksiminen v. 1938 ja sitä seurannut ydinreaktorien käyttö plutoniumin tuottamiseksi ydinaseiden räjähdysaineeksi teki uraanista tärkeän teollisen raaka-aineen. Uraanin pääkultuttajia ovat nyt rauhanomaiset ydinvoimalat, joita maailmassa on 430 kpl ja jotka vuosittain kuluttavat runsaat 40 000 tonnia uraania.

Uraani löydettiin jo 200 vuotta sitten, mutta mitään käyttöä ei tälle uudelle alkuaineelle aluksi löytynyt vuosikymmeniin. Uraanin löysi v. 1789 saksalainen kemisti Martin Klaproth pikivälkkeen typpihappouutetta potaskalla saostaessaan. Hän sai keltaisen sakan (U_3O_8) jonka hän päätteli sisältävän uutta alkuainetta. Hiilellä pelkistäessään hän sai sakaista mustaa pulveria (UO_2) jota hän huuli ko. alkuaineeksi. Hän nimitti sen uraaniksi Herschelin v. 1781 löytämän silloisen uloimman planeetan Uranuksen mukaan.

Käyttöä uraanin yhdisteille alkoi löytyä vasta vuodesta 1826, jolloin Josef Riedelin lasitehdas Böömissä alkoi tuottaa uudentyyppisiä värillisiä lasia "Annagrün" ja "Annagelb". V. 1843 ranskalainen lasitehdas Baccarat'issa alkoi myös tuottaa uraanilla värjättyjä keltaisia ja vihreitä lasia nimellä "Chrysoprase". Uraania metallina valmisti ensimmäisenä E. M. Pélinget v. 1841 kuumentamalla kuivaa uraanitetraakloridia kaliumin kera platinaupokkaassa. Pariisin maailmannäyttelyssä v. 1867 oli jo suurehko määrä uraani-metallia näytteillä. Tällöin oli uraanilla lasin ja lasitteiden värjäyksen lisäksi jo muitakin vähäisiä käyttötapoja. 1800-luvun lopulla uraanin oksideja käytettiin porseliiniväreinä — keltainen,

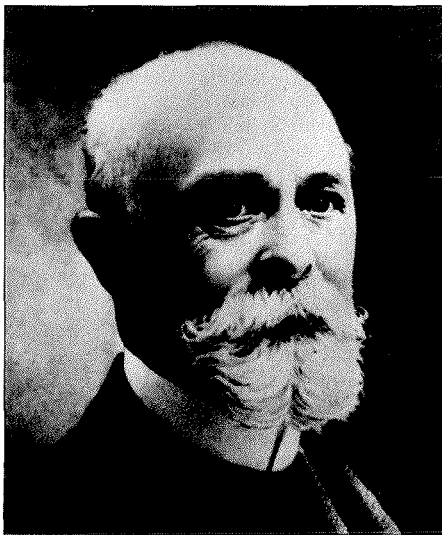


Saksalainen kemisti Martin Klaproth (1743—1817) löysi uraanin vuonna 1789.

oranssi, musta — ja uraanisuoloja valokuvauksessa sävyttiminä. Eräitä uraanisuoloja käytettiin laboratorioissa reagensseina. Kemistit tunsivat tällöin uraanin jo aika hyvin.

Uraanin radioaktiivisuus

Kun A. H Becquerel v. 1896 havaitsi uraanin radioaktiivisuuden, se joutui uuden tieteellisen innostuksen kohteeksi. Hänen isänsä E. Becquerel — myös fysiikan professori — oli vuosikymmenien ajan tutkinut uraanisuolojen fosforesenssia (jälkihohtoa valotuksen jälkeen).



Ranskalainen fyysikko Henri Becquerel (1852—1923) havaitsi uraanin radioaktiivisuuden vuonna 1896. Hän sai Nobelin fysiikanpalkinnon vuonna 1903.

Röntgensäteilyn tultua tunnetuksi (v. 1895) Becquerel kokeili lähettäisikö kaliumuranylsulfaatti fosforesenssin lisäksi myös röntgensäteilyn kaltaista läpikulkevaa ja valokuvauslevyyn vaikuttavaa säteilyä, ja sehän lähettikin sellaista! Pian Becquerel totesi uraanisuolojen lähettämän mystisen säteilyn olevan kotoisin itse uraani-alkuaineesta. Hänen oppilaansa Marie Curie ja hänen miehensä Pierre Curie löysivät sitten v. 1898 pikivälkkeestä kaksi uutta radioaktiivista alkuainetta, jotka lähettivät samantapaista salaperäistä säteilyä, poloniumin ja radiumin. He antoivat alkuaineista lähtevälle ionisoivalle säteilylle yleisnimen radioaktiivinen säteily ja itse ilmiölle nimen radioaktiivisuus. Nyt tuli uraanille tärkeä uusi käyttömuoto radioaktiivisuuden tutkimisessa.



Ranskalaiset fyysikot Marie ja Pierre Curie (1867—1934, 1859—1906) häämällä. He tutkivat menestyksellisesti radioaktiivisuutta ja antoivat alkuaineista lähtevälle mystiselle säteilylle yleisnimen radioaktiivinen säteily. He saivat Nobelin fysiikanpalkinnon vuonna 1903 ja Marie vielä Nobelin kemianpalkinnon vuonna 1911.

Uraani-teräkset

Samanaikaisesti radioaktiivisuuden keksimisen kanssa alkoi kiinnostus uraanin käyttöön teräksen sitkeyden ja venyvyyden parantamiseksi lisääntyä. Uraanimineraalien pikivälke ja karnotiitti louhinta kasvoi. Itävallassa louhittiin pikivälkettä v. 1897 49 tonnia vuodessa, Cornwallissa Englannissa v. 1900 30 tonnia ja Koloradossa USA:ssa v. 1889 10 tonnia vuodessa. V. 1898 löytyi Koloradosta myös toista uraanimineraalia, karnotiittia. Tämän malmin uraanipitoisuus oli usein alhai-

sempi kuin pikivälkkeen, mutta se sisälsi jopa 15 % vanadiinia, joka sai pian suuren kysynnän jaloteräksen valmistuksessa ja syrjäytti kokonaan paljon vaikeammin käsiteltävän uraanin käytön teräksessä.

Radium-kuume

Uusi ja entistä paljon suurempi uraanin kysyntä syntyi v. 1903 Marie Curien eristettyä metallista radiumia pikivälkkeestä ja Bertram Boltwoodin osoittettua v. 1904 että "radiumia on uraanimineraaleissa aina 1:1350000 -osa uraanista". Radiumin säteilyä havaittiin voitavan käyttää ihosyövän parantamiseen ja kun se oli ainoa tunnettu menetelmä tähän tarkoitukseen radiumin kysyntä kasvoi valtavaksi. Uusia uraanikaivoksia avattiin ympäri maapallon — Ruotsissa Billingenissa, Norjassa Thorin kaivos, Australiassa Olary'ssa Radium Hill ja Portugalissa, Kanadassa ja v.1915 Belgian Kongossa jättiläiskaivokset.

Kiinnostus kohdistui vain radiumiin, ei uraaniin, joka jäi jätetuotteeksi. Vaikka Sir William Ramsay kehitti v. 1909 teollisen radiumin eristämismenetelmän jolla pian saatiin valmistettua ennätysmäinen tuotos, 1 g radiumia kuukaudessa, kysyntä oli niin kova että grammasta radiumbromidia (joka sisältää 53.6 % radiumia) maksettiin v. 1911 US \$ 120 000—160 000! Mainittakoon, että gramma kulta maksoi tuolloin vain dollarin.

Käyttö loisteväriin valmistukseen

Maailmansodan aikana (1916) radiumille tuli lääketieteellisen käytön lisäksi toinen suuri käyttöala, itsevalaisevien värien valmistukseen. V. 1918 käytettiin Yhdysvalloissa tällaisiin maaleihin 95 %, lääketieteessä vain 5 % maassa käytetystä radiumista. Englannin amiraliteetti määräsi että loisteväriin tuli sisältää 0,4 mg radiumbromidia 1 g sinkkisulfidia kohti. Radiumin intensiivinen säteily hajotti kuitenkin nopeasti sinkkisulfidin niin että loisteväriin säteilyintensiteetti putosi vuodessa puoleen alkuperäisestä. Radiumin käytön kasvaessa myös käyttökelvottomana pidetyn uraanin jätevuoret kasvoivat.

V. 1923 oli Belgian Kongon uraanimalmitus tuotanto vallannut maailman uraanimarkkinat malmin korkean uraanipitoisuuden ja alhaisten tuotantokustannusten takia. Uraanin lousinta kaikkialla muualla pysähtyi aina vuoteen 1943, jolloin Yhdysvaltain hallitus käynnisti Koloradossa laajan uraanituotannon Manhattan-projektin nimellä tunnettua atomipommiohjelmää varten. Siitä alkoi uusi luku uraanin käytön historiassa.

Manhattan-projekti

Saksalaiset Otto Hahn ja Felix Strassmann osoittivat v. 1938 uraaniatomin voivan haljeta eli fissioitua neutronin vaikutuksesta. Jo vuosisadan alusta tiedettiin että tällaisessa reaktiossa täytyy vapautua useita neutroneita ja valtavasti

ydinenergiaa, mikä pian kokeellisesti vahvistettiin. Amerikassa asuva unkarilaissyntyinen fyysikko Leo Szilard esitti syksyllä 1939 presidentti Rooseveltille että Yhdysvallat valtuutettiin tutkimaan atomipommin valmistusta. Näin syntyi Manhattan-projekti. Uraanille syntyi uusi ja valtavaksi paisuva kysyntä: ydinaseiden räjähteiksi, plutoniumin raaka-aineeksi ja myöhemmin rauhanomaisten ydinvoimailoitten polttoaineeksi.

Uraania oli tuhansia tonneja vanhojen "radiumkaivosten" jätetasoissa mutta jo v. 1943 oli Yhdysvalloissa käynnistettävä uusia uraanikaivoksia ja sodan päätyttyä "uraanikuume", ylikuumentunut prospektusointo, levisi eri puolille maailmaa, Suomeenkin 1960-luvulla.

Vaikka useat raskaat nuklidit voivat fissioitua, vain kaksi soveltuu ydinaseiden valmistukseen: U-235 ja Pu-239. U-235 on luonnonuraanin vähäisempi isotooppi, jota siinä on vain 0,711 %. Kun U-235 toimii hyvin ydinräjähteenä vain ollessaan lähes 100-prosenttista, on se rikastettava luonnonuraanista hyvin hankalan prosessin avulla. Kaikki ydinasevaltiot ovat käyttäneet tähän ns. kaasudifusioprosessia, nyt on käytössä jo muitakin menetelmiä uraanin rikastamiseksi reaktoripolttoaineeksi. Yksi tonni luonnonuraania sisältää 7,1 kg U-235:ttä, mutta vain vajaat puolet, n. 3 kg, saadaan tavallisesti rikastuksessa eristetyksi toisen puolen jäädessä "jätteeseen", so U-238:aan. Aseuraani, "oralloy", sisältää 93,5 % U-235:ttä.

Toinen räjähteeksi sopiva nukliidi, Pu-239, valmistetaan luonnonuraanista tai em. "jäteuraanista" säteilyttämällä neutroneilla ydinreaktorissa. Lämpöehotetaan 3 000 MW reaktorissa kuluu 4 kg U-235:ttä vuorokaudessa ja syntyy suunnilleen saman verran Pu-239:ää. Syntyvä Pu-239 alkaa kuitenkin reagoita edelleen raskaammiksi Pu-isotoopeiksi joista erityisesti Pu-241 on haitallinen. Kun sen pitoisuus plutoniumissa on kasvanut 6 %:ksi on polttoaine poistettava reaktorista ja plutonium eristettävä kemiallisesti. Aseplutonium sisältää 93,5 % Pu-239:ää.

Näiden kahden fissioasetyyppin lisäksi on käytössä myös vetypommeja, joissa vain syytyn on fissioräjähde, mutta pääasiallisena polttoaineena on litium-6-deuteridi,



Hiroshimaan pudotettu atomipommi nimeltään "Pikku Poika".

josta syntyy sytyttimen räjähtäessä tritiumia; vetypommi saa pääosan räjähdysvoimastaan deuteriumin ja tritiumin yhtessä fuusiossa.

Ensimmäinen fissiopommi, Gadget nimeltään, räjäytettiin kokeeksi Alamogordossa, Uudessa Meksikossa 16.7.1945. Se sisälsi 6,1 kg plutoniumia ja sen räjähdysenergia oli 22 ± 2 Kt (1 Kt vastaa 1 000 tonnoin rotulia räjähdysvoimaa).

Toinen atomipommi, "Little Boy", räjäytettiin jo tositarkoitukseen; sillä tuhoettiin Hiroshiman kaupunki Japanissa 6.8.1945. Se sisälsi 60 kg U-235:ttä ja sen räjähdysenergia oli 12—15 Kt. Kolmas atomipommi, "Fat Man", räjäytettiin Nagasakin tuhoamiseksi 9.8.1945. Se oli samanlainen kuin Gadget. Muita kuin nämä kaksi ydinasetta ei ole sodassa käytetty.

Yhdysvaltain ydinaseiden lukumäärä kasvoi sitten lähes eksponentiaalisesti vuoteen 1967, jolloin se oli 32 000, räjähdysvoimaltaan 18 000 Mt (= megatonnia, miljoonaa rotulitonnia). Nyt on lukumäärä n. 26 000 ja räjähdysvoima n. 6 000 Mt. Tarkkuuden kasvaessa on räjähdysvoimaa voitu pienentää. Yhdysvaltojen ydinaseet sisältävät uraania n. 6 kertaa enemmän kuin plutoniumia; n. puolet niistä on vetypommeja, puolet fissiopommeja, samoin puolet ns. "taktisia" eli lyhyen matkan ydinaseita, puolet "strategisia".

Neuvostoliiton ydinaseiden lukumäärä on samaa suuruusluokkaa kuin Yhdysvaltain, mutta sen aseet ovat paljon järeämpiä. Neuvostoliiton ydinaseistuksen räjähdysvoima lienee noin 8 000 Mt. Englannilla, Ranskalla ja Kiinalla on kullakin joitakin satoja ydinaseita.

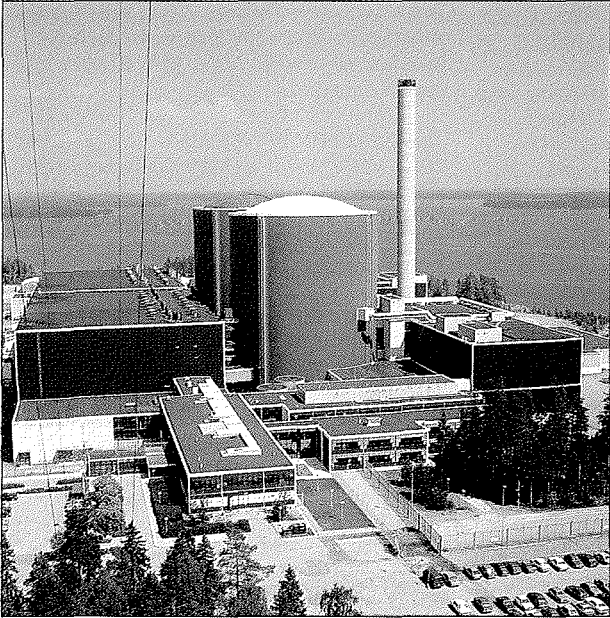
Kaikkiaan lienee maailmassa aseluokan uraania muutama tuhat tonnia ja aseluokan plutoniumia pari sataa tonnia. Muutama tonni plutoniumia on räjäytetty sadoissa ilmakehissä suoritetuissa koeräjähdyksissä ja sen pääosa on laskeutunut maanpinnalle radioaktiivisena laskeutmana.

Rauhanomainen ydinvoima

Uraanin suurin käyttö nykyään on rauhanomaisen ydinvoiman polttoaineena, joka maailman 430 ydinreaktoria kuluttavat. Uraanin hinta on ollut pitkäaikaisissa ostosopimuksissa vakaa. Spot-hinta kuitenkin vaihtelee huomattavasti ja on nykyisin merkittävästi pitkäaikaisia sopimuksia halvempi.

Varsinaiset voimalareaktorit

Ydinvoimat tuotantoa varten on kehitetty lukuisia erilaisia reaktoreita mutta valtaosa nykyisistä on ns. termisiä kevytvesireaktoreita. Niissä hidastetaan fissiossa nopeina syntyvät neutronit vedellä "termisiksi", so. nopeuteen millä kaasumolekyylit liikkuvat huoneenlämmössä, jolloin ne reagoivat hyvin U-235:n kanssa. Hidastimena ja jäähdyttimenä käytetään tavallista vettä. Polttoaineen on oltava U-235:n suhteen n. 3-prosenttista. Näitä kevytvesireaktoreita on kahta ala-lajia.



Suomen ydinvoimalaitokset, Imatran Voima Oy:n (IVO) Loviisa 2×445 MW ja Teollisuuden Voima Oy:n (TVO) Olkiluoto 2×710 MW. Loviisan yksiköt otettiin käyttöön vuosina 1977 ja 1981 sekä Olkiluodon vuosina 1978 ja 1981.

Ensimmäinen on ns. painevesireaktori joka työskentelee n. 320°C lämpötilassa ja 2 200 psi:n paineessa. Loviisan reaktorit kuuluvat näihin. Toinen on ns. kiehuvesireaktori, joka toimii n. 290°C lämpötilassa ja 1 000 psi:n paineessa. Olkiluodon reaktorit ovat tällaisia.

Kanadalaisessa deuterium-uraani-reaktorissa (CANDU) on hidastimena raskas vesi (deuteriumoksidi) ja polttoaineena luonnon uraani. Polttoainesauvat voidaan vaihtaa reaktoria sammuttamatta. Korkealämpötilainen kaasujäähdytteinen reaktori toimii 790 asteen lämpötilassa, siinä on grafiitti hidasteena, heliumkaasu jäähdytteenä ja polttoaineena suuresti rikastettu uraani + torium.

Hyötöreaktori

Nopea hyötöreaktori käyttää sulaa natriumia jäähdytteenä. Siinä on jätteenuraanivaipalla varustettu plutoniumydin plutoniumin toimiessa polttoaineena. Ylijäämäneutronit tuottavat uraanivaipassa enemmän plutoniumia kuin polttoaineena kuluu, mistä nimitys ”hyötö”. Hyötöreaktorin merkitys on jossain etäämpänä tulevaisuudessa, kun uraanista alkaa olla pulaa. Kevytvesireaktoreilla saadaan käytännössä poltettua vain n. puolet siitä $0,7\%$:sta, joka on luonnonuraanin U-235-pitoisuus. Loput, $99,7\%$ jää ”jätteenuraaniksi”. Hyötöreaktoreilla saadaan uraanin käyttöaste nostettua n. 60–70-kertaiseksi kun ne hyötävät jätteenuraanista plutoniumia. Hyötämällä tulee uraani ja siitä hyödetty plutonium riittämään polttoaineeksi tuhansiksi vuosiksi.

Reaktorit laivojen voimanlähteinä

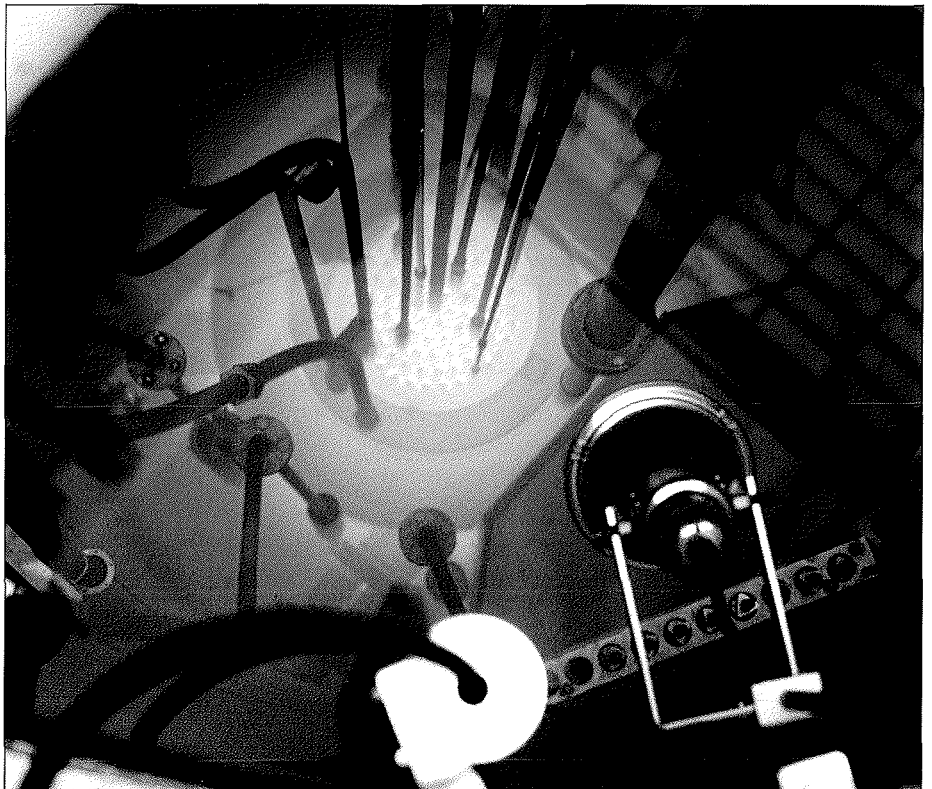
Ydinenergia on korvaamaton voimanlähde kulkuvälineisiin, joiden on kuljettava suurella nopeudella pitkiä matkoja ilman polttoainetäydennystä. Ydinenergiaa on menestyksellä käytetty mm. sukellusveneissä, lentotukialuksissa ja satelliiteissa sekä muutamissa siviilialuksissa, kuten venäläisissä jäänsärkijöissä.

Ensimmäinen ydinkäyttöinen sukellusvene Nautilus laskettiin vesille Yhdysvalloissa vuonna 1955. Siinä oli vesihidasteinen uraani-238 käyttävä reaktori, jossa oli väkevästi rikastettu polttoaine ja zirkonium-kuori. Vuonna 1958 se kulki 2 500 km:n matkan sukelluksissa pohjoisen napajäätikön alitse 20 solmun nopeudella; ensimmäinen polttoainelataus riitti 110 000 km:n matkaan. Vuonna 1986 Yhdysvaltain laivasto käsitti 136 ydinkäyttöistä sukellusvenettä, joista 38 on ballistisin ohjuksin varustettuja strategisia ja 98 taktisia hyökkäyssukellusvenettä sekä 9 risteilijää ja 4 lentotukialusta.

Neuvostoliitto rakensi ensimmäiset ydinsukellusveneensä, 13 Marraskuu-luokan venettä, vuodesta 1958 alkaen. 1986 sillä oli operatiivisina 185 ydinkäyttöistä sukellusvenettä, joista 62 strategisia sekä 50 ohjuksin ja 73 torpedoilla varustettuja taktisia sukellusvenettä. Ne edustavat hyvin monenlaista ydinteknologiaa ja paria-kymmentä eri sukellusvenetyyppiä.

Englannilla on 18, Ranskalla 10 ja Kiinalla 7 ydinkäyttöistä sukellusvenettä.

Amerikkalaiset alkoivat vuonna 1946 myös ydinkäyttöisen strategisen pommi-



VTT:n Triga-tutkimusreaktorin sisäkuva. Reaktoria käytetään hyväksi mm. alkuaineanalytiikassa, prosessiteollisuuden merkkiainemittauksissa, isotooppilääketieteessä, materiaalitutkimuksessa ja ydintekniikan opetuksessa.



Neuvostoliiton tilaama ja Wärtsilän rakentama ydinkäyttöinen jäänmurtaja.

koneen suunnittelun. 10 vuoden kuluttua työ kuitenkin lopetettiin, kun osoittautui, että koneesta tulisi mm. säteilysuojusten takia liian raskas ja ohjukset osoittautuivat pommitustehtävään edullisemmiksi.

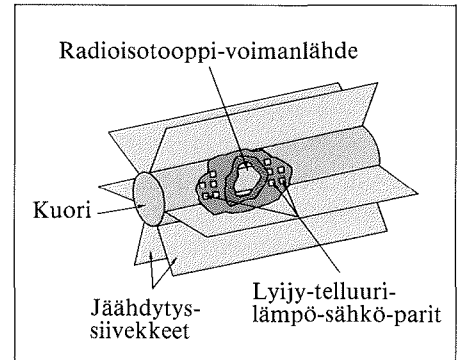
Reaktorit ja isotooppiparistot satelliittien ja avaruusalusten voimanlähteinä

Sekä Yhdysvallat että Neuvostoliitto ovat käyttäneet ydinreaktoreita satelliittien voimanlähteinä. Yhdysvallat on kuitenkin käyttänyt viime aikoina vain isotooppi-

paristoja. Edullisin voimanlähte niissä on plutonium-238. Sen puoliintumisaika on 87,7 vuotta, ominaisaktiivisuus 17 Ci/g ja tehontiheys 0,57 W/g. Eräs tällaisista oli paristona useilla Apollo-kuumatkoilla 1970-luvulla ja myöhempi malli Jupiteriin, Saturnukseen ja Uranukseen lähetyksissä avaruusaluksissa.

Mielenkiintoisimpia Marsin matkaan suunniteltuja varhaisia raketteja olivat Rover-projektin tuotteet. Niissä oli väkevästi rikastettu uraani-235 polttoaineena, grafiitti hidasteena ja reaktorin ytimen läpi johdettiin vetyä, joka kuumentui hyvin korkeaan lämpötilaan.

Vuonna 1983 alkoi Yhdysvalloissa uusi kehitysvaihe NASA:n, energiaministeriön ja puolustusministeriön tutkimuslaitoksen yhteistyönä. Se tähtää megawatin tehoisiin reaktoreihin, joiden elinikä olisi noin 7 vuotta ja paino noin 7,5 tonnia.



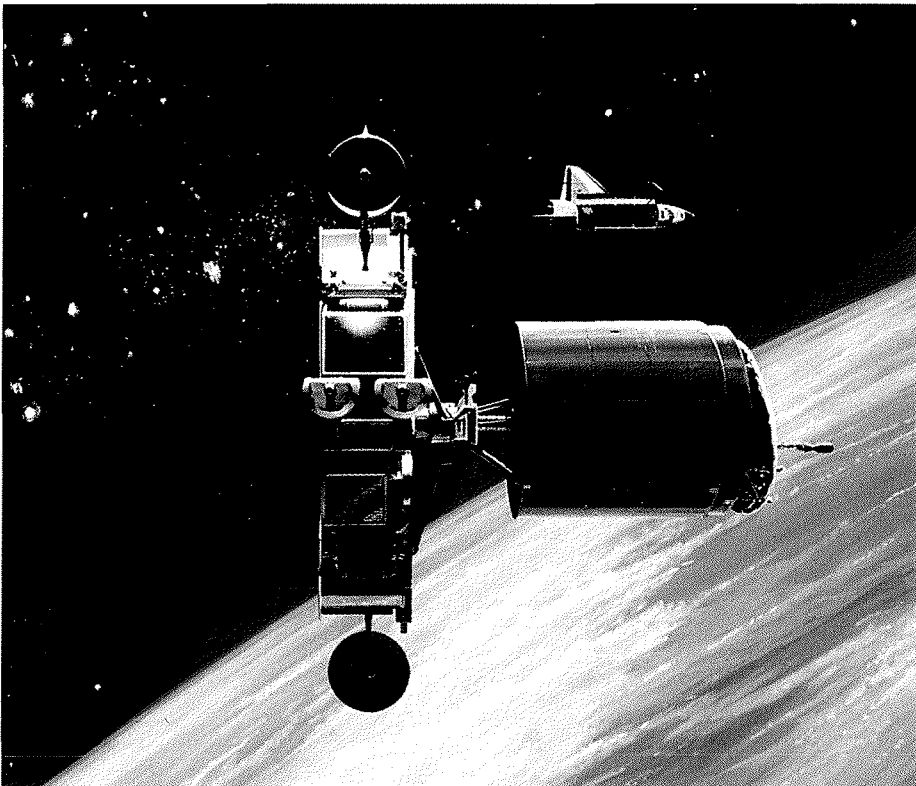
Apollo-lennoilla 1970-luvulla käytetty radioisotooppi-voimanlähte SNAP-27. Sen paino on 20 kg, Pu-238:n paino 2,6 kg, aktiivisuus 44 500 Ci, lämpötila 732°C, lämpöteho 1480 W, sähköteho 74 W, jännite 16 V, toiminta-alue -173°C - +121°C.

On luultavaa, että matka Marsiin suoritetaan ydinkäyttöisellä avaruusaluksella. Sen rakenne on vielä arvoitus. Paras teho saadaan kenties kuumentamalla ja ionisoimalla vetyä, joka sitten kiihdytetään sähkö- tai magneettikentässä. Marsin matka on mahtava haaste, joka tuottaa luultavasti uusia, pitkälle kehitettyjä reaktorityyppejä.

Tulevaisuus

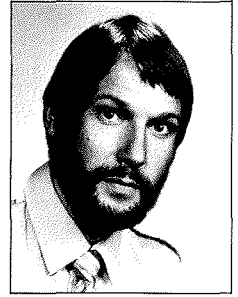
Harrisburgissa USA:ssa v. 1979 ja Tshernobyliissä Neuvostoliitossa v. 1986 tapahtuneet ydinvoimalaonnettomuudet sekä poliittinen vastustus ovat jarruttaneet n. vuosikymmenen ajan ydinvoiman kehittämistä useissa maissa, mm. Yhdysvalloissa ja Ruotsissa. Fossiilienergian tuottamien ns. kasvihuonekaasujen aiheuttamat tulevat sääntömuutokset ja öljyn ja maakaasun saannin vaikeutuminen lähivuosikymmeninä tulee kuitenkin lisäämään ydinenergian käyttöä, onhan se täysin saasteeton ja kasvihuonekaasuja tuottamaton energialähde.

Halpuutensa ja suuren tiheydensä takia "jäteuraani" on saanut jonkin verran muutakin käyttöä kuin ydinräjähteenä ja -polttoaineena. Sitä käytetään vähäisessä määrin mm. säteilysuojuksiin ahtaissa tiloissa, purjeveneiden köleihin, ns. kineettisiin panssaritorjunta-ammuksiin, pyrofoorisiin ammuksiin ym. Uraanin käyttö tällaisiin tarkoituksiin on kuitenkin merkityksetöntä verrattuna sen käyttöön ydinpolttoaineena. □



Piirros viallisen satelliitin pelastamisoperaatiosta.

Professori emeritus Jorma K. Miettinen on Helsingin yliopiston radio-kemian laitokselta, p. 90-449 038.



Uraanin tuotantovaiheet ja maailmankauppa

Uraani on metalli, jonka tärkein hyödyllinen käyttötapa on energian tuotanto. Uraanin kauppahinta vaihtelee kysynnän ja tarjonnan mukaan paljonkin — kuten esim. kuparin tai koboltin hinta. Alkuvuodesta 1989 raakauraanin hinta oli alle 200 mk/kg. Pitkäaikainen keskimääräinen hinta on kuitenkin korkeampi ja siihen perustuen uraanin maailmankaupan vuotuinen arvo länsimaissa on noin 10 miljardia markkaa. Kun mukaan luetaan uraanin väkevöinti sekä polttoaineen valmistus, uraaniteollisuuden kaupan arvo on noin 30 miljardia markkaa.

Useiden metallien tunnetut varat vastaavat vain arvioitua 20—40 vuoden kulu- tusta. Tätä on tulkittu niinkin, että tämän ajan kuluttua ao. metallin varoja ei sitten enää ole. Tämä on virheellinen käsitys. Kaivosyhtiöt pyrkivät turvaamaan vain noin 20 vuoden kohtuuhintaiset reservit. Reservien vähetessä tai hinnan nousuvaiheessa etsintätoiminta yleensä el- pyy. Kokemuksen mukaan reservit lisääntyvät tällöin tarpeen mukaan — tosin vii- veellä — ja tuotantoa se lisää yleensä yli tarpeenkin. Uraanista ei sinänsä ole pulaa maapallolla. Sitä on valtavia määriä, eivätkä uraanivarat lopu 40 vuoden kuluttua.

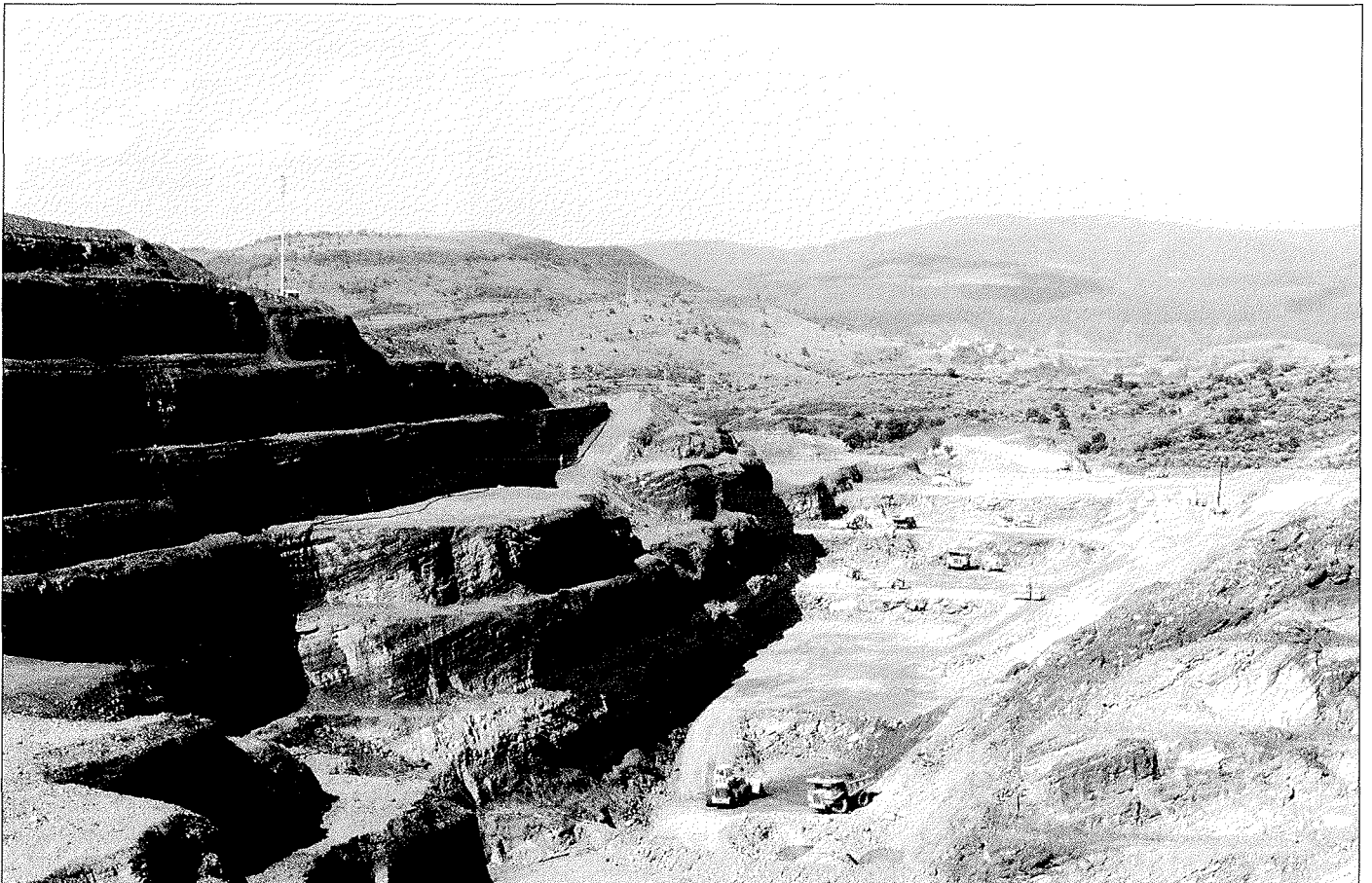
Kysyntä ja tarjonta siis heiluttavat raakauraanin hintaa paljonkin. Uraanilla tuotetun energian hinnan kilpailukyvyyn kannalta sillä ei ole suurta merkitystä. Uraanilla tuotetussa sähkössä raakauraanin osuus on alle 1 p/kWh, kun tuotantokustannukset kaikkiaan ovat esimerkik- si Olkiluodossa noin 12 p/kWh. Uraanin

spot-hinnan jopa moninkertaisen hinta- muutosten varalta suojaudutaan kuiten- kin (esim. Euroopassa ja Japanissa) pit- kääikaissopimusten avulla ja ostamalla uraania varastoon, jopa useiden vuosien tarve.

Raakauraanin tuotanto

Raakauraanin tuotetaan erityisistä uraani- kaivoksista, tai sivutuotteena kupari-, hopea- ja kultakaivoksista. Sitä tuotetaan lisäksi muiden kaivosten jätelietteestä ja kultakaivosten jäteliettestä. Uraania erotetaan myös fosfaatista ennen fosfaatin lannoitekäyttöä. Lisäksi on tekniikoita, joissa uraania liuotetaan pumppaamalla happo-vesi-liuosta sopivan läpäisevän maaperän läpi, kaivamatta kaivosta.

Kaivokseen liittyy malmirikastamo, jonka valmistama uraanirikaste pakataan pelti- tynnyreihin kuljetusta ja varastointia var- ten. Sekä malmirikastamo että kaivosta koskevat vuosien mittaan tiukentuneet



Héraultin avouraanikaivos Etelä-Ranskassa, Lodévessa. Sen vuosituotanto on 1200 tonnia.



Uraanirikaste muunnetaan puhtaaksi uraaniheksafluoridiksi (UF_6) konversiolaitoksessa. Kuvassa on Port Hopessa Kanadassa sijaitseva konversiolaitos, jonka vuosikapasiteetti on 10500 tonnia uraania.

ympäristö- ja työsuojelumääräykset samalla tavalla kuin muutakin kaivostoimintaa. Suurin tuottajamaa on Kanada, muita ovat mm. USA, Australia, Niger, Gabon, Etelä-Afrikka, Namibia, Ranska, Portugali, Brasilia, Argentiina, Kiina ja Neuvostoliitto.

Jalostusvaiheet

Uraanirikasteen "jalostusputki" alkaa konversiolaitoksella, jossa raakauraani eli uraanirikaste puhdistetaan kemiallisesti 99,9 % puhtaaksi "luonnonuraaniksi" ja muutetaan heksafluoridiksi väkevöintiä varten. Tämä luonnonuraani sisältää 0,7 % isotooppia U-235. Seuraavassa vaiheessa väkevöintilaitoksella suolan tapainen heksafluoridi kaasutetaan kuumentamalla ja separoidaan siitä ominaispainon tms. perustuen erilleen väkevöityä uraania, jossa isotoopin U-235 osuus on 2–4 %.

Polttoainetehtaalla uraani konvertoidaan takaisin oksidiksi sekä puristetaan ja sint-rataan napeiksi. Napit kapseloidaan sormenpaksuisiin metalliputkiin, jotka kootaan sauvanipukuksi (64—100 sauva).

Konversiopalveluihin on hyvin riittänyt USA:n, Kanadan, Englannin ja Ranskan kapasiteetti; lisäksi NL on myynyt palveluaan. Väkevöintimarkkinoita puolestaan leimaa vieläkin kaasudiffuusiolaitosten ylikapasiteetti, jota USA ja NL rakensivat kylmän sodan aikana, kun suuria määriä uraania väkevöitiin sotilaskäyttöön yli 90 % väkevöintiasteelle (vrt. "siviiliuraani" noin 3 %). Euroopan siviilipalveluiden riippumattomuuden turvaamiseksi Ranskaan on rakennettu kansainvälisenä yhteistyörytensä Eurodifin suuri kaasudiffuusiolaitos. Lisäksi Urencon uusia, pieniä, vähän energiaa käyttäviä sentrifugilaitoksia on rakennettu tarpeen mukaan Englannissa, Hollannissa ja Länsi-Saksassa. Ydinpoltoaineen valmistustehtaita Länsi-Euroopassa on mm. Ruotsissa, Länsi-Saksassa, Ranskassa, Espanjassa ja Englannissa.

Uraanikaupan valvonta

Uraanikaupan erikoisuus on se, että nykyisestä uraanituotannosta suurin osa leimataan ja kirjataan viimeistään konversiovaiheessa rauhanomaiseen käyttöön, jossa sen tulee pysyä valvonnan alaisena. Valvonta on ollut tehokasta niissä puitteissa kuin on sovittu. Valvonta ei estä suurvaltoja käyttämästä valvonnan ulkopuolella olevaa uraania sotilaskäyttöön, eikä se koske sopimuksen ulkopuolisia maita, joihin on sovellettavissa vain muita poliittisia pakotteita. Tärkeimmät ydinvoimamaat ovat valvonnan piirissä, ja suurvaltojen osalta suuntaus on ollut se, että ne ovat varanneet sotilaskäyttöön entistä vähemmän uraania, jota on vapautunut siviilikäyttöön.

Valvonta tekee uraanikaupan luvanvaraiseksi ja uraanin haltijoista kirjanpitovelvollisia ja mm. kuljetuksen ajaksi säiliöt sinetöidään. Luvat ja suostumukset rajoittavat kaupankäyntiä ja lisäävät kustannuksia jossakin määrin. Uraaniteollisuudenkin piirissä pidetään kuitenkin erittäin tärkeänä tehokasta kansainvälistä valvontaa, jolla voidaan estää ydinaseiden leviäminen ja osoittaa siviiliuraanin pysyvän rauhanomaisessa käytössä. □

DI Ilkka Mikkola on TVO:n polttoainetoimiston päällikkö ja ATS:n puheenjohtaja, p. 90-605 022.

SUOMALAISIA MAAILMAN URAANITEOLLISUUDESSA

Sudburystä kotoisin oleva kaivosinsinööri Emil Walli palkattiin Kanadan ensimmäisen uraanikaivoksen johtajaksi Port Radiumiin noin 1933 (1930-luvulla uraanista käytettiin hyväksi vain tytäraine radium). Wallin talo oli paikan ainoa perheasunto ja hänen sairaanhoitajavaimonsa Virginia paikan ainoa nainen, sillä yhtiöt eivät päästäneet mainarien vaimoja kaivosleireille. Wallin mainitaan kuitenkin parantaneen asumisoloja asuntolan keskuslämmitystä ja vesiklosetteja myöten. Jouluna 1936 Wallien hella upposi ikiroutaan, joka ei kestänyt henkilökunnan kestitsemisen, kalkkunanpaiston yms. aiheuttamaa pitkää kuumuutta. Walli hoiti myös geologin toimen, sillä pitkän lentoyhteyden päähän Edmontonista koilliseen, Ison Karhujärven rannalla, ei ollut varaa palkata geologia.

Samana firman, Eldoradon, kaivososaston johtajana toimi 1970- ja 1980-luvuilla Kenneth Haapanen. Tänä aikana väki siirtyi 7-päiväiseen viikkoon ja 11-tuntisiin päiviin Rabbit Laken ja Key Laken uusilla kaivoksilla. Viikon kuluttua väki lennätettiin viikoksi koteihinsa, osa Saskatooniin asti 700 km päähän, ja mm. intiaanit omiin kyliinsä perinteiseen elämäntapaan.

Gulf Mineralsin Toronton neuvotteluhuoneessa oli vuonna 1976 kunnia-paikalla valokuva tuuheapartaisesta suomalaisesta prospektori Solanderista, joka oli pätevä uraanesiintymien kartoittaja. Samoan Australian Pohjoisterritorion alueelta suomalaiset prospektorit löysivät 1950-luvulla lupaavia kiviä. Alueen Nabarlek-kaivoksesta on 1980-luvulla toimitettu TVO:lle uraania.

Maailman kaivoksilla on mm. Outokummun prosesseja sekä Tamrockin, Koneen ja Valmetin koneita. Suomalaisia tai muuten suomea puhuvia henkilöitä on tavattu kaivosyhtiöissä monenlaisissa tehtävissä. Heistä lie-nee kohonnut korkeimmalle Virosta lähtenyt Arvi Parbo, joka on Australian Western Mining Co:n hallituksen puheenjohtaja. Siirtolaisasioiden ansioistaan aateloitunut Sir Arvin yhtiöllä on maailman suurin uraanesiintymä, uraania ainakin 200 vuodeksi. Sir Arvin juttuvalikoimaan kuului Helsingissä mm. kuvaus suomalaisesta mainarista, joka 11 kk uurastettuaan lähti joka kesä lomamatkalle Suomeen. Matkalla hän maksoi porukalle pöydän koreaksi pysähdysasemilla. Rahat loppuivat aina jo ennen Perthiä ja hän palasi takaisin pääsemättä laivaan asti.



Uraanin tie polttoaineeksi

Olkiluodon ydinvoimalaitokselle tähän mennessä hankittu uraani on louhittu ja rikastettu Australian, Kanadan, Kiinan ja Nigerin kaivoksissa. Uraanin konversio tapahtuu Kanadassa, Neuvostoliitossa ja Ranskassa ja uraanin väkevöinti Neuvostoliitossa ja läisämäärien osalta Länsi-Euroopassa. Polttoainesauvat ja -niput valmistetaan Ruotsissa ja Saksan Liittotasavallassa. Loviisan ydinvoimalaitokselle uraani hankitaan Neuvostoliitosta valmiina polttoainenipuna.

Tärkein uraanimineraali on kuutiollinen, musta uraniniitti, UO_2 , joka esiintyy usein hienokiteisenä tai amorfisena muunnoksena (pikivälke). Uraania louhitaan malmiesiintymistä, joiden uraanipitoisuus on yleensä vähintään 0,05 %. Louhinnan jälkeen uraani rikastetaan malmista. Uraanin talteenottoon liittyy malmirikasteen jauhatus, liuotus, useita ioninvaihtoja, neste-ekstrahointeja, suodatuksia ja saostuksia. Näiden prosessien jälkeen saadaan uraanikonsentraatti, jossa on 60–70 % uraania.

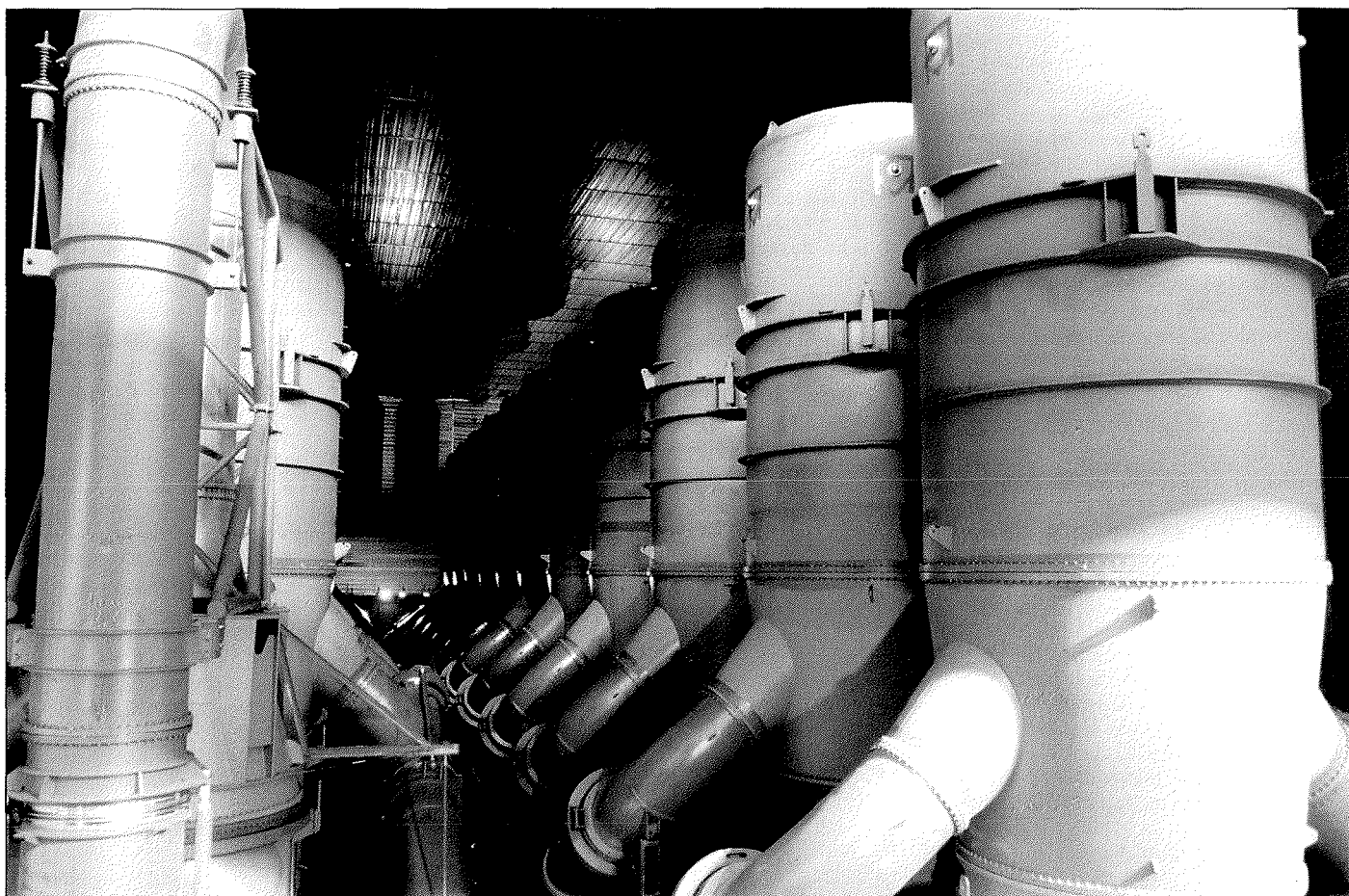
Konsentroidin yhteydessä päästään eroon monista epäpuhtauksista ja lopputuloksena on uraanirikaste, ”yellow cake”, jossa uraani on U_3O_8 -muodossa. U_3O_8 kuljetetaan lisäpuhdistusta varten konversiolaitokselle. Epäpuhtausaineet, kipsi ym. jätteet loppusijoitetaan takaisin kaivokseen tai sen lähelle.

Uraanin konversio

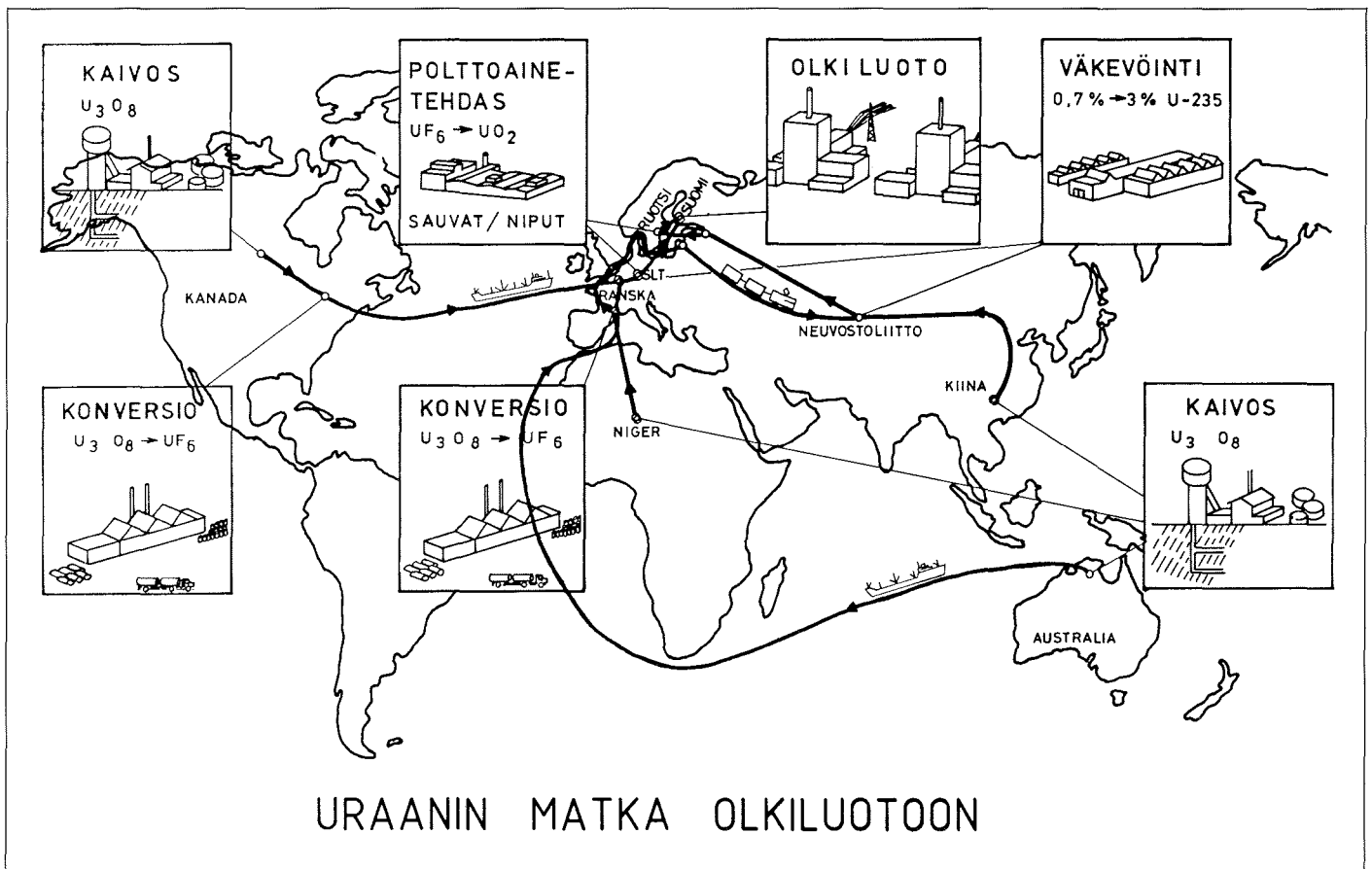
Konversiossa uraanirikaste muunnetaan puhtaaksi uraaniheksafluoridiksi ($U_3O_8 \rightarrow UF_6$). UF_6 on huoneenlämpötilassa väritön, kiinteä, kiteinen aine. Uraaniheksafluoridi sublimoituu normaali ilmanpaineessa eli muuttuu suoraan kiinteästä olomuodosta kaasumaiseksi $56,4^\circ C$:n lämpötilassa.

UF_6 muodostaa veden kanssa uraanyylifluoridia (UO_2F_2) ja fluorivetyä (HF). UF_6 ei reagoi hapen, typen eikä kuivan ilman kanssa. Useiden metallien (mm. nikkeli, kupari, alumiini, rauta) kanssa UF_6 muodostaa pinnalleen fluoridikerroksen, joka voi pysäyttää reaktion.

Konversiosta UF_6 kuljetetaan paineistetuissa kuljetussäiliöissä väkevöintilaitokselle isotooppirikastusta varten. UF_6 :n kuljetus ja varastointi tapahtuvat aina UF_6 :n kiinteässä muodossa.



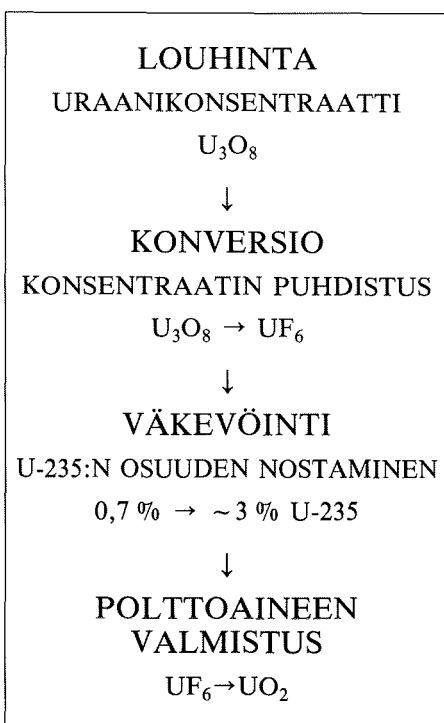
Uraanin väkevöintilaitos, jossa uraani-235:n osuus nostetaan 0,7 %:sta noin 3 %:iin.



Väkevöinti

Luonnonuraanissa U-235:n pitoisuus on 0,71 %. Isotooppiirikastuksen eli väkevöinnin avulla tämä osuus nostetaan keskimäärin noin 3 %:iin.

Väkevöintilaitoksella tapahtuvassa isotooppiirikastuksessa käytetään nykyään



uraani-isotooppien massaeroihin perustuvia menetelmiä: kaasudiffuusio ja sentrifugointi. Väkevöinti tapahtuu UF_6 :n kaasumaisessa muodossa.

Uraanin väkevöimiseksi on kehitteillä laser-tekniikka, jolloin isotooppiirikastus voidaan tehdä joko molekulaarimenetelmällä uraaniheksafluoridille tai atomaarisella menetelmällä höyrystyneelle alkuaineuraanille. Väkevöintilaitokselta uraani kuljetetaan kiinteänä uraaniheksafluoridina erityisissä kuljetussäiliöissä polttoainetehtaalle.

Polttoaineen valmistus

Polttoainetehtaalla uraaniheksafluoridin annetaan hydrolysoitua uranyylifluoridiksi, saostetaan ammoniumuranaattina ja sen jälkeen pelkistetään UO_2 :ksi (uraanidioksidi).

Vihreänharmaasta UO_2 -jauheesta puristetaan polttoainetabletteja, jotka sintrataan. Polttoainenapit ladotaan zirkaloy-metallisiin polttoainesauvoihin, jotka kootaan nipuiksi siten, että yhdessä polttoainenipussa on enintään 300 kg uraania ja 10 kg U-235:tä.

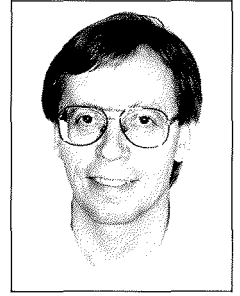
Polttoainenapissa oleva sintrattu UO_2 on mustaa uraanioksidia, jonka tiheys on $10,96 \text{ g/cm}^3$ ja sulamispiste 2500° C . UO_2 liukenee typpihappoon ja väkevään rikkihappoon. Syvän pohjaveden hapettomissa olosuhteissa uraanioksidiliuenee erittäin hitaasti.

Kuljetuksen turvallisuudesta

Uraanin tuotanto on tyypillistä kemian ja metallurgian teollisuutta, johon liittyvät riskit johtuvat pääasiassa käytetyistä kemikaloista ja uraanin radioaktiivisuus on vasta toisella sijalla. Väkevöity uraani suojataan kriittisyydeltä kuljetuspakkauksen ja säiliöiden geometrian avulla. Kuljetuksista on pitkät kokemukset ja niissä kuljetuspakkaukset ovat toimineet asianmukaisesti.

Suurta kohua aiheuttaneen Mont Louis-laivan haaksirikossa vuonna 1984 uraaniheksafluoridisäiliöt kestivät tiiviinä ankaran myrskyn. Säiliöiden rikkoutumistakaan tuskin olisi ollut vaaraa, koska merivedessä on luonnostaan miljoonia tonneja uraania ja vielä paljon enemmän fluoria. Uraanidioksidin ja valmiin ydinpolttoaineen kuljetuksissa kemiallinenkin vaara on vähäinen. □

FK Anneli Nikula on TVO:n ydinjätetoimiston jaospäällikkö, p. 90-605 022.



Ydinmateriaalin kansainvälinen valvonta

Ydinmateriaalit ovat monipuolisen valvonnan kohteena. Ensisijaisesti ydinmateriaalien käyttöä valvotaan kansallisella tasolla. Kansallisen valvonnan tehokkuus on puolestaan perusedellytys kansainvälisen valvonnan onnistumiselle. Kansainvälisestä valvonnasta huolehtii IAEA (International Atomic Energy Agency), jonka pääkonttori sijaitsee Itävallassa Wienissä. IAEA:n valvontaan kuului vuoden 1988 lopussa yhteensä 920 ydinlaitosta 57 maassa. Valvonnan päätarkoituksena on varmistaa, että ydinmateriaaleja ei siirretä pois rauhanomaisesta käytöstä.

Uraani on eräs ydinmateriaali. Muita ydinmateriaaleja ovat mm. plutonium ja torium, jotka soveltuvat ydinenergian tuottamiseen, sekä laitteet ja laitteistot, joilla on erityistä merkitystä ydinmateriaalien tuottamiselle.

Ydinmateriaalit ovat laajan kansainvälisen valvonnan kohteena. Päätarkoituksena on varmistaa, että ydinmateriaaleja ei siirretä pois rauhanomaisesta käytöstä.

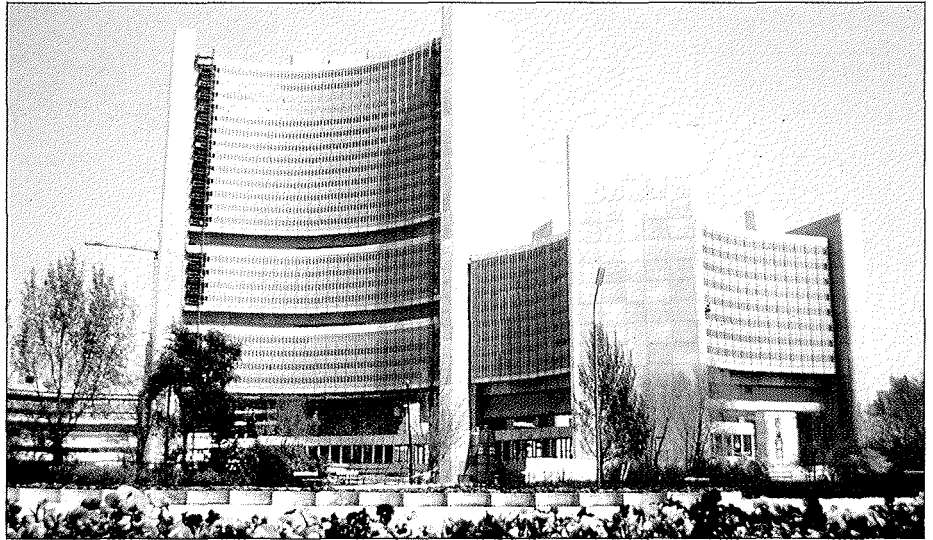
Ydinsulkusopimus valvonnan lähtökohtana

Kansainvälisen ydinmateriaalivalvonnan keskeisenä perustana on ydinsulkusopimus. Se tuli voimaan 1970. Sen osapuolina on 135 valtiota.

Ydinsulkusopimus on nimensä mukaisesti valtioiden poliittinen tahdonilmaisu ydinaseiden leviämisen estämiseksi. Sopimus sisältää kuitenkin lukuisia velvoitteita osapuolille, joiden on kansallisella tasolla huolehdittava sopimuksen toteuttamisesta. Sopimukseen sisältyy myös kansainvälistä valvontaa koskevat periaatteet. Tässä valvonnassa Kansainvälisellä Atomienergiajärjestöllä (IAEA) on keskeinen ja tärkeä tehtävä. Tehtävänsä IAEA hoitaa jäsenmaidensa, joita on yhteensä 113, hyväksymien resurssien puitteissa.

IAEA:n valvontasopimukset

Tekemiensä valvontasopimusten mukaisesti IAEA:n tehtävänä on todentaa, että ydinmateriaalia ei siirretä pois rauhan-



Wienissä sijaitseva YK:n keskus, jonka suojissa IAEA työskentelee.

omaisesta käytöstä. Siten ilmoituksen mahdollisuus ehkäisee jo ennalta ydinmateriaalien siirtoja ydinasetoollisuuteen tai muuhun vastaavaan toimintaan. Valvontasopimusten nojalla IAEA:lla on oikeus tarkastaa valvottavassa maassa olevat ydinmateriaaleja käyttävät laitokset ja seurata niiden toimintaa. Valvonta kohdistuu erityisesti ydinmateriaalien käyttöön ja tuotantoon, kuljetuksiin sekä maastavientiin ja maahantuontiin. Valvonnan kohdevaltioiden on lähetettävä säännönmukaisia raportteja IAEA:lle ydinmateriaaleja koskevasta toiminnastaan. Mikäli IAEA havaitsee ydinmateriaaleja koskevia väärinkäytöksiä sopimukseen nähden, voi se raportoida asiaa YK:n turvallisuusneuvostolle.

Valtaosa IAEA:n tekemistä valvontasopimuksista perustuu ydinsulkusopimukseen. Sen lisäksi IAEA:lla on muita valvontasopimuksia. Nämä sopimukset perustuvat mm. siihen, että merkittävät ydinmateriaaleja ja -laitoksia muihin maihin toimittavat valtiot ovat sopineet toimitusperiaatteista, jotka edellyttävät mm. IAEA:n valvontaa. Toisaalta IAEA:n valvonta ei toistaiseksi ulotu ainakaan koko laajuudessaan eräisiin valtioihin, joilla saattaisi olla mahdollisuuksia kehittää ydinaseita.

IAEA:n valvonta nojautuu kansalliseen valvontajärjestelmään

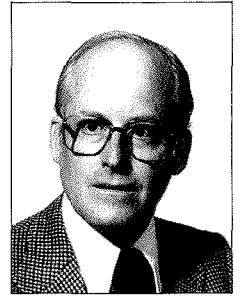
IAEA toimii tehtyihin sopimuksiin sisältyvien valtuuksien rajoissa. Eri valtioiden

oman valvontajärjestelmän tehtävänä on valvoa ydinmateriaaleja kansallisella tasolla ja huolehtia tässä mielessä myös estävistä toimista. IAEA seuraa riippumattomasti kansallisen valvontajärjestelmän toimintaa ja ydinmateriaalin siirtoja ja käyttöä. IAEA:n valvonta on kuitenkin kansallista valvontaa suppeampi eikä IAEA esimerkiksi seuraa ydinmateriaaleja niiden alkuperämaan tai omistussuhteen perusteella.

IAEA:n valvontaverkosto on laaja. Valvontakohteina oli vuoden 1988 lopussa 920 ydinlaitosta 57 maassa. Suomeen IAEA teki vuonna 1988 yhteensä 28 tarkastusta eri ydinlaitoksiin. Tarkastuksiin käytettiin Suomessa yhteensä 58 henkilötyöpäivää.

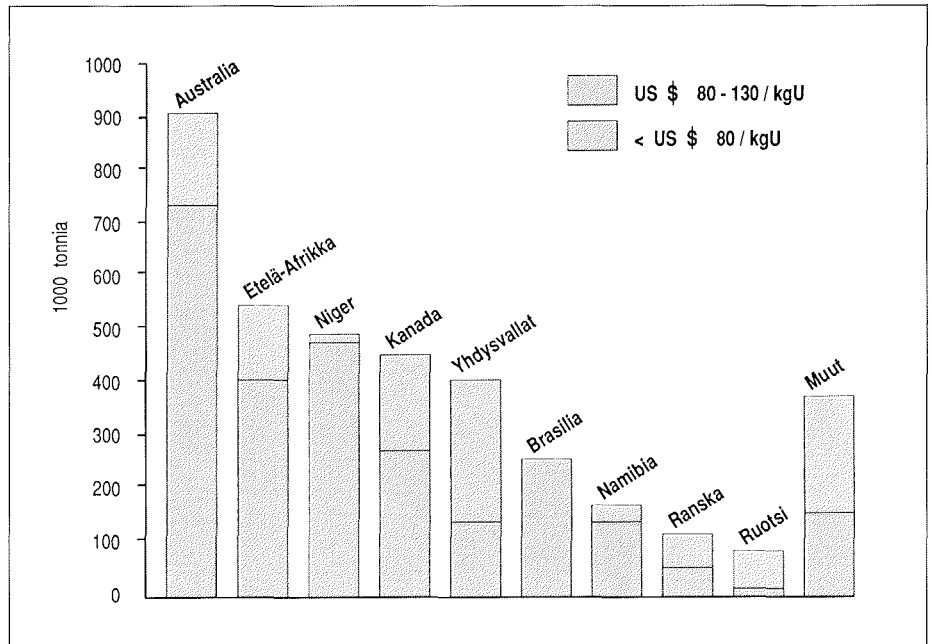
IAEA:n valvonta ei ole ongelmattonta. Valvontaa vaikeuttavia ongelmia ovat esimerkiksi uudentyypiset valvontaan tulevat ydinlaitokset, niiden valvontamenetelmien kehittäminen ja raportointiviiveet. IAEA on kuitenkin raportoinut sillä olleen riittävät perusteet todeta valvonnassa olevien ydinmateriaalien pysyneen rauhanomaisessa käytössä tai olleen muutoin riittävän kirjanpidon alaisena. □

FM Hannu Koponen on Säteilyturvakeskuksen ydinturvallisuusosaston vs. apulaisosastopäällikkö, p. 90-708 21.



Riittävätkö maailman uraanivarat?

Uraanivarojen riittävyys on olennainen kysymys päätettäessä ydinenergian jatkorakentamisesta. Markkinatalousmaiden nykyinen uraanituotanto, noin 40 000 tonnia vuodessa, on suunnilleen tasapainossa kysynnän kanssa. Suomi käyttää lähes 500 tonnia uraania vuodessa. Kuinka pitkään riittävät tunnetut uraanivarat, ja mitkä ovat potentiaaliset lisävarat? Riittävätkö uraanivarat, jos kulutus kaksin- tai kolminkertaistuu? Nämä ovat oikeutettuja ja ymmärrettäviä kysymyksiä, joihin Richard M. Williams varsin yksiselitteisesti vastaa Suomen Atomiteknilliselle Seuralle (ATS) pitämässään esitelmässä.



Markkinatalousmaiden tunnetut uraanivarat hintaluokassa 130 \$/kg ovat yhteensä noin 3,6 miljoonaa tonnia (NEA/IAEA 1988).

OECD:n ydinenergiajärjestö NEA (Nuclear Energy Agency) ja kansainvälinen atomienergiajärjestö IAEA (International Atomic Energy Agency) julkaisevat joka toinen vuosi raportin "Uraani: varat, tuotanto ja tarve". Tämän esityksen tiedot perustuvat pääosin maaliskuussa 1988 julkaistuun raporttiin. Valitettavasti Neuvostoliitosta, Itä-Euroopan maista ja Kiinasta, jotka ovat merkittäviä uraanin tuottajia, ei ole saatavilla numerotietoa uraanivaroista. Seuraavassa keskitytäänkin käsittelemään pelkästään markkinatalousmaiden uraanivaroja.

Markkinatalousmaiden uraanivarat

Uraanin tuotantokustannusten merkitys on olennainen arvioitaessa uraanivarojen hyödynnettävyyttä. Esiintymät jaetaan neljään luokkaan riippuen uraanikilon hinnasta seuraavasti:

- alle 80 US\$/kg
- 80—130 US\$/kg
- 130—260 US\$/kg
- yli 260 US\$/kg.

Uraanivarat voidaan jakaa neljään perusluokkaan:

1. Tunnetut uraanivarat (alle 130 \$/kg)

Tunnettuja uraanivaroja oli markkinatalousmaissa vuoden 1988 alussa 3,6 miljoonaa tonnia, josta alimpaan hintaluokkaan kuului noin 70 %. Pitkäaikaisten toimitussopimusten hinta onkin nykyään jonkin verran yli 80 \$/kg raakaurania. Suurimmat tunnetut uraanivarat sijaitsevat Australiassa, Etelä-Afrikassa, Yhdysvalloissa, Kanadassa, Nigerissä ja Brasiliassa. Uraania on viime vuosina löydetty lisää erityisesti Kanadasta ja Etelä-Afrikasta.

2. Arvioituidet lisävarat (alle 130 \$/kg)

Voidaan olettaa, että uraanivaroja löytyy lisää alueilla, joissa jo nyt on tunnettuja uraanivaroja ja louhitaan uraania. Huolimatta vähäisestä tutkimustyöstä arvioidaan tähän kategoriaan kuuluvan noin 1,7 miljoonaa tonnia uraania. Tärkeimmät maat ovat Kanada, Etelä-Afrikka ja Yhdysvallat.

3. Kalliisti ja vaikeasti hyödynnettävät uraanivarat

Hintaluokkaan yli 130 \$/kg kuuluu huomattavia määriä sekä tunnettuja (noin 0,5 milj. tonnia) että arvioituja (noin 0,6 milj. tonnia) uraanivaroja. Näiden louhinta ei lähitulevaisuudessa ole kannattavaa. Tär-

keimmät maat ovat Kanada, Etelä-Afrikka ja Yhdysvallat.

4. Spekulatiiviset uraanivarat (alle 130 \$/kg)

Huomattavasti edellistä kategoriaa tärkeämpiä ovat spekulatiiviset uraanivarat. Spekulatiivisten uraanivarojen kartoitukseen käytetään hyvin vähän voimavaroja eri maissa. Vuonna 1977 NEA ja IAEA käynnistivät projektin uraanivarojen kartoittamiseksi maailmanlaajuisesti. Työn tulokset julkaistiin vuonna 1983. Sen mukaan markkinatalousmaiden spekulatiiviset uraanivarat ovat 6,4—16,0 miljoonaa tonnia. Kuitenkin todennäköinen alaraja spekulatiivisille uraanivaroille on 9,6 miljoonaa tonnia, josta 80 % arvioidaan olevan Australiassa, Oseaniassa, Afrikassa ja Pohjois-Amerikassa.

Markkinatalousmaiden uraanituotanto

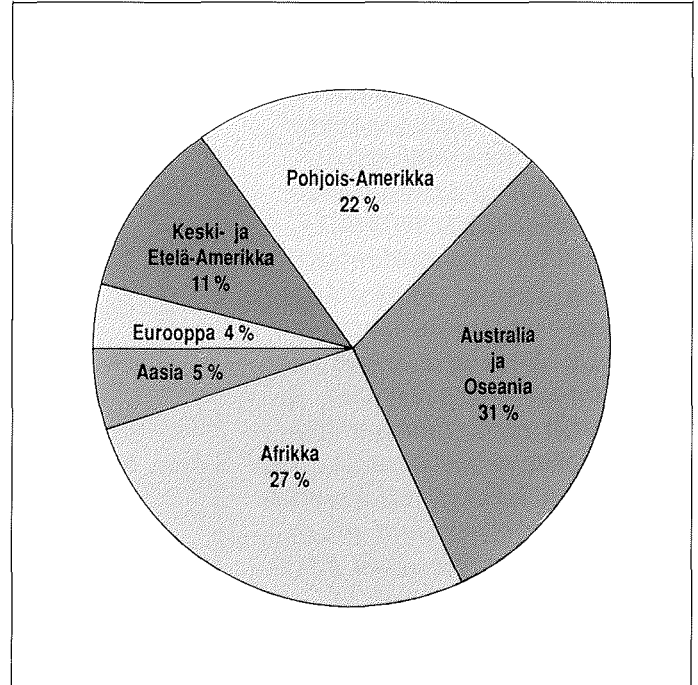
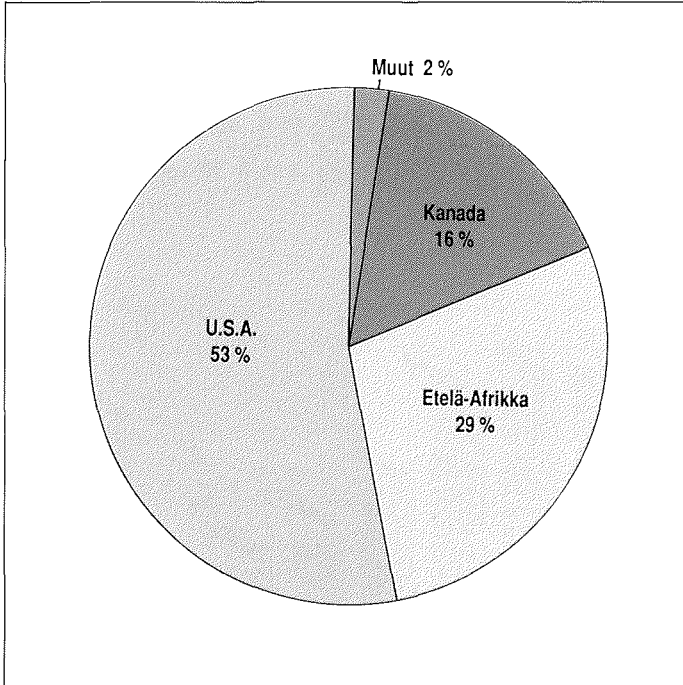
Yhteenlaskettu uraanin tuotanto markkinatalousmaissa 1930-luvun alkupuolelta vuoden 1987 loppuun on 890 000 tonnia. Yhdysvallat, Kanada ja Etelä-Afrikka ovat tuottaneet lähes 75 % koko tuotannosta. Muita tärkeitä uraanin tuottajamaita ovat olleet Ranska, Australia, Zaire, Gabon, ja viimeaikoina myös Niger ja Namibia.

Uraanin tuotanto saavutti huippunsa vuosina 1980 ja 1981, jolloin tuotettiin 44 000 tonnia uraania vuodessa. Siitä tuotanto laski alle 35 000 tonniin vuonna 1985 johtuen pääosin Yhdysvaltojen vähentyneestä tarpeesta. Kuitenkin vuosi 1985 oli merkityksellinen siinä mielessä, että ensimmäistä kertaa rauhanomaisen ydinenergian käytön historiassa uraanin käyttö ylitti tuotannon.

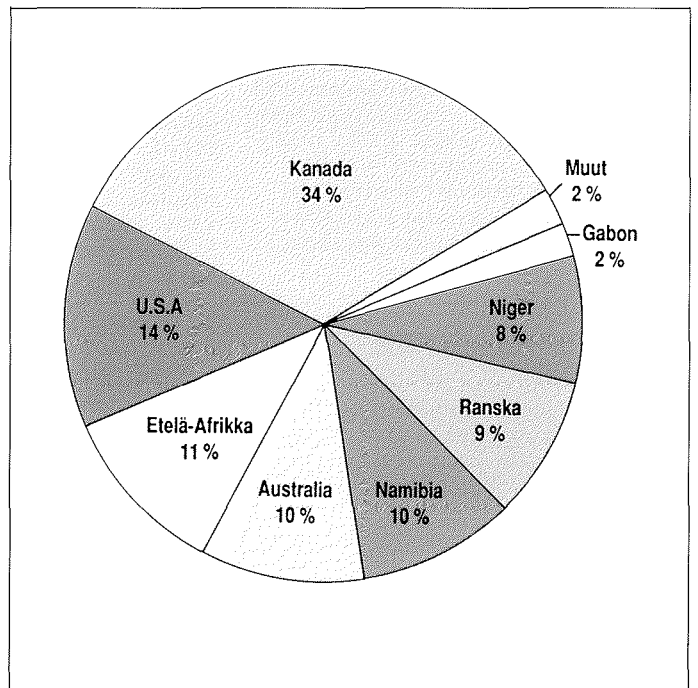
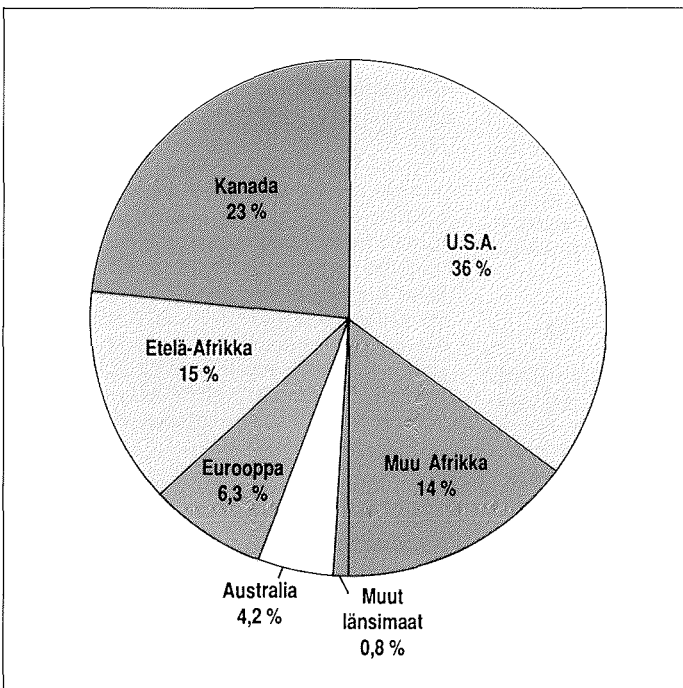
Kanada on johtava uraanintuottaja markkinatalousmaista. Sitä seuraavat Yhdysvallat, Etelä-Afrikka, Australia, Ranska, Namibia, Niger ja Gabon. 98 % markkinatalousmaiden uraanista tuotetaan näissä kahdeksassa maassa. Etelä-Afrikan uraanituotanto on poliittisista syistä viime vuosina pienentynyt jatkuvasti.

Uraanin etsintä vähentynyt merkittävästi

Uraanin tutkimus- ja etsintäkustannukset pienentyivät markkinatalousmaissa 80 % vuodesta 1979 vuoteen 1985. Erityisen voimakasta vähennys on ollut Yhdysvalloissa. Voimakas vähentyminen on seurausta toisaalta useiden suurten projektien keskeyttämisestä ja toisaalta siitä,



Markkinatalousmaiden arvioidut uraanin lisävarat hintaluokassa alle 130 \$/kg ovat yhteensä noin 1.7 miljoonaa tonnia (NEA/IAEA 1988).



Markkinatalousmaiden yhteenlaskettu uraanituotanto vuoden 1987 loppuun mennessä on 890 000 tonnia (NEA/IAEA 1988).

Länsimaiden uraanituotanto vuonna 1987 oli yhteensä 36 800 tonnia.

että monet pienet valtiot lopettivat kokonaan uraanin tutkimuksen. Poikkeuksena mainittakoon Ranska, jonka panos uraanitutkimukseen on edelleen merkittävä, ja se edustaa yli 40 % kaikesta markkinatalousmaiden uraanitutkimuksesta.

Yleisesti on keskitytty rikkaiden esiintymien etsintään tunnetuilla uraanialueilla ja jo olemassa olevien esiintymien kehittämiseen, jotta niitä voitaisiin taloudellisesti hyödyntää markkinatilanteen salissa. Näyttää siltä, että tutkimukseen käytettävä taloudellinen panos on vakiintunut nykyiselle tasolle.

Lähiajan näkymät

Nykyisten tuotantolaitosten kapasiteetti vähenee vuoteen 2000 mennessä 15–20 %. Tämä kapasiteetti on selvästi vähemmän kuin uraanin tarve länsimaissa vuosisadan lopulla. Tällä vuosisadalla lisätuotantokapasiteettia voidaan rakentaa lähinnä nykyisissä tuottajamaissa. Kapasiteettia saadaan joko nykyisiltä tuotantolaitoksilta kalliimman hintaluokan uraani- tai täysin uusista tuotantolaitoksista. Kumpikin vaihtoehto edellyttää uraanin hinnan korotuksia.

Lähi vuosina uraanin tuotantoon ja hintaan vaikuttavat useat tekijät. Tärkeimpinä mainittakoon nykyiset kuluttajien varastot ja päätökset niiden käytöstä, Australian tuleva politiikka uraanin tuotannon suhteen, Kiinan ja Neuvostoliiton uraanin tulo länsimarkkinoille sekä Etelä-Afrikan tuleva asema uraanintuottajana.

On tärkeää korostaa, että raaka-uraanin hinnalla on varsin pieni vaikutus ydinsähkön tuotantokustannuksiin. Nykyisillä uraanin hinnoilla (noin 85 \$/kg) polttoainekustannus (sisältää uraanin lisäksi polttoaineen valmistuksen ja jätehuollon) on Suomessa 24 % tuotantokustannuksista.

Mikäli uraanin hinta olisi 130 \$/kg, nousisi vastaava osuus 26 %:iin. Ydinsähkön nykyisiin tuotantokustannuksiin (noin 13 p/kWh) se merkitsisi 0,5 pennin korotusta. Uraanin hintakehitys ei siten ole ollenainen tekijä päätettäessä uusista ydinvoimalaitoksista. Mainittakoon, että hiilivoimalaitoksissa polttoaineen osuus kokonaistuotantokustannuksista on NEA:n mukaan 52 %.

Uraania riittää

Pitkän aikavälin kulutuksen kasvulle voidaan luonnollisesti esittää useita eri skenaarioita. Esimerkkinä tarkastellaan yhtä IAEN:n tutkimasta 23 kasvuskenaariosta. Siinä uraanin vuotuinen kulutus markkinatalousmaissa kasvaa vuoteen 2035 mennessä 160 000 tonniin. Tämä merkitsee 2,8 % vuotuista kasvua. Vaikka kasvu on varsin vaatimatonta ja tasaista, ei se nykyillä vaikuta mitenkään alimitoitulta. Tarkasteltavana 50 vuoden ajanjaksona kokonaistuotanto olisi 5 miljoonaa tonnia, josta valtaosa voidaan tyydyttää tunnetuilla uraanivarjoilla. Vain 1,6 miljoonan tonnin osalta on luotettava vielä löytymättömiin uraanivarjoihin, joita oli yhteensä arvioitu olevan yli 11 miljoonaa tonnia.

Luonnollisesti uraanin kysynnän tyydyttämiseksi tarvitaan tutkimus- ja kehitystyötä kunkin ajankohdan tarpeiden mukaan. Historia on osoittanut, että markkinavoimat pitävät huolta tarvittavasta tutkimustyöstä ja tarjonnasta. Tuottajan näkökulmasta on ensiarvoisen tärkeää varmuus kysynnän jatkumisesta tulevaisuudessakin. Tätä edesauttavat ehkä parhaiten pitkäaikaiset toimitussopimukset. Perustellusti voidaan sanoa, että uraanin saatavuus ei muodostu esteeksi ydinvoiman jatkorakentamiselle sinä ajanjaksona, jota nykyisin tehtävät ydinvoimaloiden rakentamispäätökset koskevat. □

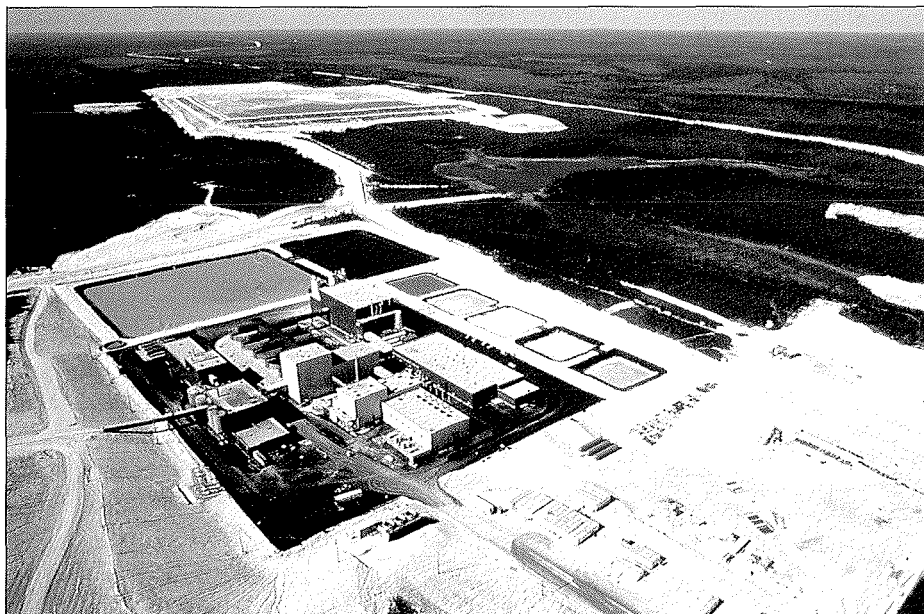
KANADA URAANIN TUOTTAJANA

Kanada on länsimaiden johtava uraanin tuottaja- ja viejämaa. Vuonna 1987 Kanadan uraanituotanto oli 12 400 tonnia, joka on kolmasosa markkinatalousmaiden koko tuotannosta. Tuotannosta 85 % menee vientiin lukuisiin eri maihin, muun muassa Suomeen.

Vuonna 1987 Kanadan tunnetut uraanivarat olivat 560 000 tonnia, josta lähes puolet kuului halvimpaan tuotantokategoriaan. Kanadan arvioidut lisävarat ja spekulatiiviset varat ovat 1,5 miljoonaa tonnia. Tästä syystä Kanada on kansainvälisen uraanitutkimuksen pääalue. Noin 60 yritystä osallistui 58 tutkimusprojektiin vuonna 1987. Ulkomaiset yritykset ja hallitukset rahoittivat noin kaksikolmasosaa tutkimuksesta.

Kanadassa on kaksi aluetta, joissa uraanin louhinta tapahtuu. Tärkein on Saskatchewan, josta louhittiin vuonna 1987 8 200 tonnia uraania ja toinen Elliot Lake 4 200 tonnillaan. Vuosituotanto pysyy nykyisellä tasolla ainakin 1990-luvun puoliväliin saakka.

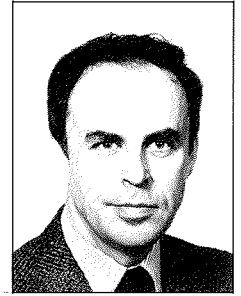
Kanada valvoo uraaninsa käyttöä mahdollisimman tarkasti, jotta kanadalaista uraania ei käytettäisi sotilastarkoituksiin. Kantava periaate koko uraanikaupassa on sen käyttö ainoastaan rauhanomaisiin tarkoituksiin. Ei-ydinasevaltioista uraania kaupataan vain niille, jotka ovat tehneet kansainvälisen sitoumuksen olla kehittämättä ydinaseita ja, jotka suostuvat IAEA:n tekemiin tarkastuksiin ydinlaitoksillaan. Ydinasevaltioilta Kanada vaatii erillisen sitoumuksen siitä, että kanadalaista materiaalia, laitteita tai teknologiaa ei käytetä sotilastarkoituksiin. Lisäksi kaikilta vientimailtaan Kanada vaatii sopimuksen koskien muun muassa uraanin siirtoa kolmannelle osapuolelle, väkevöidyn uraanin ja plutoniumin käyttöä, fysikaalista suojausta ja suojatoimenpiteitä. Suomen ja Kanadan välinen sopimus allekirjoitettiin elokuussa 1976.



Näkymä Key Lake Mining Corporationin uraanin tuotantolaitoksesta Pohjois-Saskatchewanissa. Se on 4600 tonnin vuosituotannollaan maailman suurin uraanintuottaja.

Mr. Richard M. Williams on Kanadan energia- ja luonnonvarojen käyttöä suunnittelevan ja ohjaavan ministeriön "Energy, Mines and Resources Canada" uraani- ja ydinenergiaosastolla neuvonantajana. Lisäksi hän toimii mm. NEA:n uraaniryhmän puheenjohtajana.

DI Pertti Salminen on VTT:n energiaosaston erikoistutkija, p. 90-456 4148.



Fissio 50 vuotta

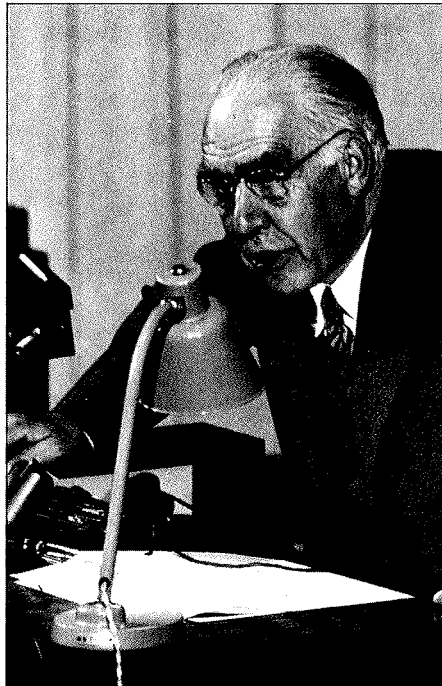
Hahn ja Strassmann havaitsivat ensimmäisinä ytimen halkeamisen 50 vuotta sitten. Ajan Euroopan johtavien tutkimusryhmien työ huipentui tähän löytöön. Sitä seurasi tunnettu innovaatioiden sarja, jonka kautta luotiin ydinenergian tuotannon teolliset puitteet. Maapallon uraanivarat arvioitiin aluksi alakanttiin, mikä vaikutti osaltaan teknologian kehityssuuntaan. Soveltuvuus sukellusveneen voimanlähteeksi oli niinkään varhainen valintakriteeri.

Alussa oli neutroni. Sen olemassaolon välttämättömyyden oli perustellut englantilainen Chadwick 1932 selittäessään Irene Joliot-Curien johtaman ryhmän kokeissaan Pariisissa saamia tuloksia. Uuden uran avasi Fermi johtama roomalaisten fyysikkojen ryhmä, joka ryhtyi 1933–34 selvittämään, voisiko neutronipommitus synnyttää alkuaineista radioaktiivista säteilyä vastaavalla tavoin kuin mitä Irene Curie ja Frédéric Joliot olivat havainneet alfa-hiukkasten saavan aikaan.

Fermi ryhmä säteilytti neutroneilla kaikkiaan yli 60 alkuainetta. Uraani oli tuolloin raskain tunnettu ydin. Sen säteilytys tuotti uusia radioaktiivisia aineita, joiden puoliintumisajat eivät käyneet yksin minäkään jo tunnetun isotoopin kanssa. Tästä Fermi kumppaneineen päätyi esittämään, että säteilytyksessä olisi syntynyt uraania raskaampia alkuaineita uraaniydinten kaapatessa neutroneja.

Polttaa, polttaa

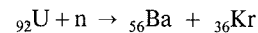
Mieliä askarruttanutta ilmiötä paneutui-
vat selvittämään niin Curien tutkimusryhmä kuin myös Hahnin johtama ryhmä Berliinissä. Curie ja hänen jugoslavalainen apulaisensa Savic löysivät 1938 tunnistamattoman alkuaineen, jolle he käyttivät symbolia $R_{3,5h}$ isotoopin puoliintumisaajan perusteella. Alkuaine muistutti kemiallisilta ominaisuuksiltaan lantaania. Vastaavasti Hahn ja Lise Meitner uskoi-
vat löytäneensä säteilytuotteesta radiumia. Seurasi tieteellinen vuoropuhelu, jonka kiihkeys välittyi kouriintuntuvalla tavalla tekijöiden aikakauslehtiartikkeleista.



Tanskalainen fyysikko Niels Bohr (1885–1962) oli luomassa fission teoreettista mallia. Hänet tunnetaan erityisesti atomimallin kehittäjänä, josta hän sai Nobelin fysiikanpalkinnon vuonna 1922.

Löytö

Lisää kokeita suoritettuaan Hahn ja Strassmann erottivat radiumista uutta puoliintumisaikaa vastaavan radioaktiivisuuden lähteen todeten, että uraanista oli syntynyt bariumia. He kirjoittivat joulukuussa 1938 Die Naturwissenschaften -sarjaan artikkelin, jossa todennetaan reaktion



tapahtuneen. Artikkelista kuultaa vielä lävitse pieni epävarmuus. Loppupuolella kirjoittajat vihjaavat aristellen, että koejärjestelyissä olisi saattanut ehkä ilmetä joukko harvinaisia sattumia, jotka johtavat päätelmän harhaan Hahnin ja Strassmannin seuraavassa, tammikuun 1939 lopussa valmistuneessa artikkelissa palataan asiaan ja esitetään ”sitova näyttö”.

Siirto hyödyntäjille

Näin jälkeinpäin tulee ajatelleksi, että mullistava löytö olisi helposti saattanut jäädä Eurooppaa tuolloin kohdanneen suuremman myllerryksen jalkoihin. Hyödyntäminen olisi varmasti viivästynyt, ellei tietoa ytimen halkeamisesta olisi toimitettu oikopäätä Yhdysvaltoihin.



Italialaisen fyysikon Enrico Fermi (1901–1954) johdolla rakennettiin ensimmäinen ydinreaktori Chicagoon. Se käynnistettiin joulukuussa 1942. Hän sai Nobelin fysiikanpalkinnon vuonna 1938.

Löydöstä lensi tieto osaksi myös kirjeenvaihdon välityksellä. Lise Meitner oli joutunut juutalaisena jättämään Berliiniin ja oli Tukholmassa. Hänen lähisukulaisensa Otto Frisch taas asui Kööpenhaminassa pitäen yhteyttä sekä tätiinsä Meitneriin että Niels Bohriin. Frisch muuten juuri antoi vastalöydetylle reaktiolle nimen fissio.

Bohr oli luonnollisesti seurannut Hahnin ryhmän työtä ja saanut tietoja myös suoraan. Hän saapui New Yorkiin tammi-kuussa 1939 tuoden sanoman fissiona uudelle mantereelle. Sinne oli hieman aikaisemmin siirtynyt myös Fermi suoraan Tukholmasta vuoden 1938 fysiikan Nobelin palkinnon vastaanottaneena.

Hyvän ja pahan tiedon puu tunnettiin. Seurasi eräs innovaatioiden siihenastisen historian hätkähdyttävimmistä kehitysjaksoista, jossa pommin kehittäminen ja fission rauhanomainen hyväksikäyttö olivat osaksi toisiinsa nivoutuneena osaksi erillisinä. USA tuli olemaan pitkään askeleen muita edellä, joskin määrätietoista työtä

tehtiin muuallakin. Esimerkiksi uraani-238:n spontaani fissio havaittiin ensin Neuvostoliitossa 1940.

Plutonium

Meille jälkipolville innovaation syvällisyyttä kuvaa hyvin sekin, että uuden keksinnön hyödyntämiseksi jouduttiin löytämään uusi alkuaine sekä muuttamaan ja jatkamaan alkuaineiden luonnollista järjestelmää kuvaavaa jaksollista taulukkoa. Maaliskuussa 1941 ryhmä Kennedy, Seaborg, Segre ja Wahl onnistui tuottamaan 0,5 μg plutonium-239 ja osoittamaan, että hitaat neutronit aiheuttavat myös plutonium 239:n fissioitumisen. Vuosina 1944–45 Du Pont-yhtiö tuotti jo useita kiloja plutoniumia pommia varten. Seaborg julkaisi 1945 uuden ”oman” versionsa alkuainetaulukosta, minkä jälkeen sen jatkamiseen ei enää ole liittynytään vastaavanlaista dramatiikkaa.

Teknologian sarastus

Tässä yhteydessä on houkuttelevaa vilkaista taaksepäin ja arvioida jälkiviisaasti

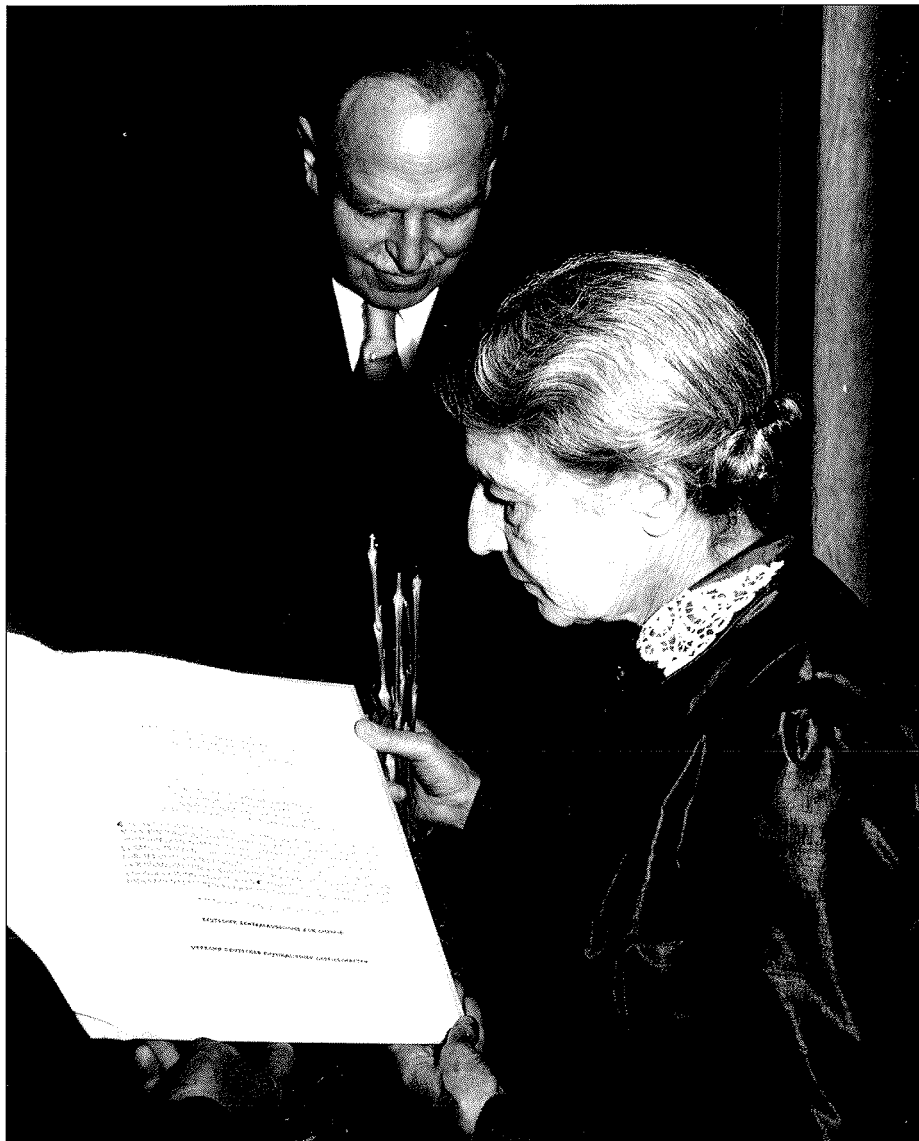
joidenkin esimerkkien avulla, mitä uranuurtajat oivalsivat oikein ja missä mahdollisesti mentiin aluksi vikaan.

Ydinaseiden teho vaikutukset ja valvonnan tarve oivallettiin aivan alusta pitäen. Yhdysvaltain lisäksi asiaan kiinnitettiin vakavaa huomiota myös Englannissa ja ilmeisesti myös Neuvostoliitossa. Venäläisten ajatuksia ja toimia kuvasi muuten yllättävän avoimesti hiljattain I.N. Golovin Washingtonissa pitämässään esitelmässä.

Ydinenergian rauhanomaisen käytön perustana oleva turvallisuusajattelu juontaa välillisesti juurensa ydinräjähteisiin, joissa säteilyn akuuteista vaikutuksista saatiin vavahduttavia kokemuksia. Turvallisuuteen oli siis jo alunpitäen kiinnitettävä paljon huomiota. Sittenkin sinänsä yksinkertaisiin reaktoreihin kytkettiin monia lisäjärjestelmiä, joiden monimutkaisuus yhdessä ihmisen virhetoimintojen kanssa on muodostunut tärkeimmäksi riskitekijäksi.

Kyky pitää yllä ketjureaktiota ja tuottaa vakaasti energiaa uraanista osoitettiin toiseksi vuoden 1942 lopussa. Samalla saatiin todennettua arvio luonnonuraanijärjestelmän kriittisestä koosta. Maapallon hyödynnettävissä olevat uraanivarat arvioitiin kuitenkin aluksi ainakin kertoimella 1000 todellisia pienemmiksi. Tämän seurauksena hyötöreaktorit ja uuden polttoaineen tuottaminen sekä käytetyn polttoaineen jälleenkäsittely nähtiin 1940-luvulla merkittävänä ja välttämättömänä energiantuotannon kannalta. Tältä osin siis ydinvoimatekniikka olisi voitu ottaa käyttöön paljon pienemmin kehityspanoksin.

Polttoaineen (U-233, U-235, Pu-239) ja jäähdyttimen (CO_2 , He, vesi) ohella sydämen käyttäytymiseen voidaan vaikuttaa käyttämällä neutronihidastinta (grafiitti, raskas tai tavallinen vesi, Be). Lisäksi on mahdollisuus varioida hyödettyä ainetta (Th, U) sekä järjestelmän painetta ja lämpötilaa. Alvin Weinbergin mukaan Chicagon yliopiston metallurgian laboratorion ryhmällä oli jo 1945 esitettävään noin 900 eri valintamahdollisuutta. Miksi sittenkin päädyttiin kevytvesireaktoriin (väkevöity uraani alkupolttoaineena ja vesi sekä hidastimena että jäähdytteenä), joka ei fyysikon kannalta suinkaan vaihtanut parhaalta kombinaatiolta? Ratkaisevaksi tekijäksi ei muodostunutkaan pelkkä fyysikaalinen optimointi vaan varmuus ja soveltuvuus sukellusvenekäyttöön, jota kautta voitiin rakentaa ydinvoimatekniikan teollinen pohja 1960-luvun alkuun mennessä. □



Itävaltalainen fyysikko Lise Meitner (1878–1968) ja saksalainen kemisti Otto Hahn (1879–1968) ovat fission keksimisen uranuurtajia. Hahn oli onnekkaampi lopullisessa läpimurrossa, ja sai tästä osoituksena Nobelin kemianpalkinnon vuonna 1944.

Professori Pekka Silvennoinen on VTT:n energiaosaston tutkimusjohtaja, p. 90-456 4140.



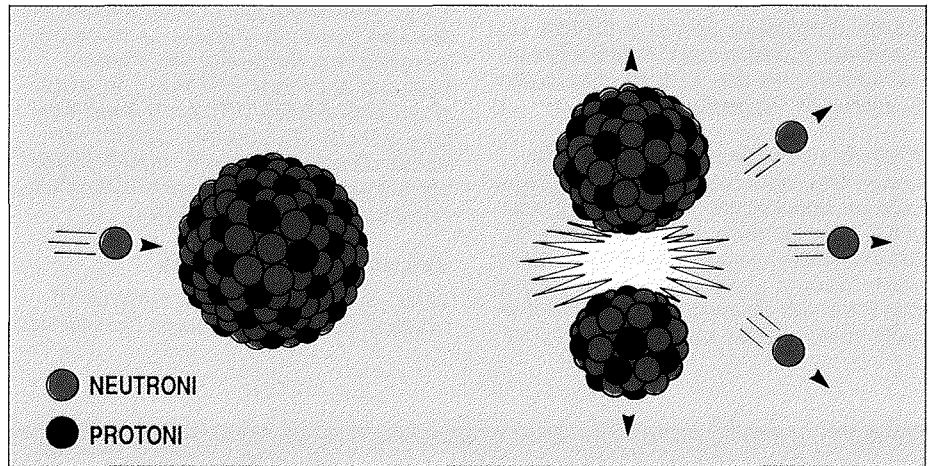
Ydinreaktorin toimintaperiaate

Energiatekniikan kannalta kiinnostavimmat ydinreaktiot ovat fissio ja fuusio; molemmissa vapautuu runsaasti energiaa ja molemmat periaatteessa soveltuvat säädettävään energianmuuntoprosessiin. Fissiolla tarkoitetaan raskaan atomiytimen halkeamisreaktiota, fuusiolla puolestaan keveiden ytimien yhtymistä yhdeksi raskamaksi. Nykyisin käytössä olevat reaktorityypit perustuvat ketjureaktioon, jossa energiaa vapautuu neutronien aiheuttamissa polttoaineydinten fissioissa.

Fuusioenergialla on keskeinen merkitys auringon ja muiden tähtien energiataseissa ja sitä kautta myös elollisen luonnon energialähteenä. Sen sijaan voimalaitosprosessin sammoksi fuusioenergiaa ei vielä ole onnistuttu valjastamaan, vaikkakin laboratoriokokeissa on saavutettu hyvin lupaavia tuloksia.

Fission suhteen tilanne on osin päinvastainen. Luonnon energiavirroissa ei fissioenergialla juuri ole merkitystä. Tosin fissioreaktioita tapahtuu vähäisessä määrin ”spontaanisti” kaikkein raskaimmissa alkuaineissa niin, että maankuoren geotermiinen energia tietyltä osaltaan on peräisin myös näistä ydinreaktioista. Energiatekniikan kannalta kiinnostavampia ovat kuitenkin neutronien aikaansaamat ketjureaktiona jatkuvat fissiot. Ketjureaktion mahdollisuus huomattiin välittömästi fission keksimisen jälkeen noin 50 vuotta sitten ja tällä tavoin fissioenergiaa hyödyntävät ne noin 430 ydinvoimalaitosyksikköä, jotka nykyisin tuottavat sähköä 26 eri maassa.

Kaikista luonnossa esiintyvistä aineista vain uraanin isotooppi uraani-235 eli ^{235}U soveltuu ketjureaktion ylläpitäjäksi. Uraani-235:n pitoisuus luonnonuraanissa on vähäinen, noin 0,71 %. Tästä johtuen luonnossa esiintyvään ketjureaktiona jatkuvaan fissioenergian vapautumiseen ei aikaisemmin juuri uskottu. Kuitenkin vuonna 1972 Oklost Gabonista löydettiin uraanimalmia, joka uraani-235:n suhteen oli vielä normaaliakin köyhempää. Tutkimukset osoittivat, että Oklon uraaniesiintymässä oli toiminut luonnollinen



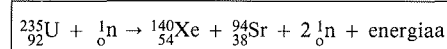
Kuva 1. Uraani-235:n fissio.

fissioreaktori noin 1,8 miljardia vuotta sitten, jolloin uraani-235:n väkevyyss luonnonuraanissa oli nykyistä suurempi, 3 %:n tienoilla. Merkkejä tällaisista luonnon fissioreaktoreista on myöhemmin löydetty muualtakin, esimerkiksi New Mexicosta Yhdysvalloista.

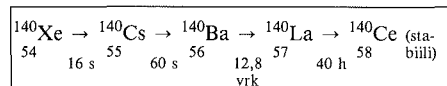
Fission periaate

Neutronin aiheuttamassa fissiossa ^{235}U -ydin halkeaa kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi, halkeamismahdollisuuksia on kymmeniä. Lisäksi reaktiossa syntyy keskimäärin 2,4 uutta nopeaa neutronia ja energiaa. Reaktiossa syntyneet neutronit voivat aiheuttaa uusia fissioita ja näin ylläpitää ketjureaktiota.

Alla on reaktiokaavan muodossa annettu eräs uraani-235:n mahdollinen fissio: esimerkin neutronitörmäyksessä ^{235}U -ydin halkeaa ^{140}Xe - ja ^{94}Sr -ytimiksi. Samalla vapautuu kaksi uutta nopeaa neutronia ja energiaa.



Fission reaktiotuotteina syntyvät kaksi keskiraskasta ydintä ovat radioaktiivisia. Stabiiliin tilaan tällainen ydin päättyy pitkien hajoamisketjua, esimerkiksi ksenon-140 hajoaa seuraavan kaavion mukaisesti (nuolien alla puoliintumisaajat):



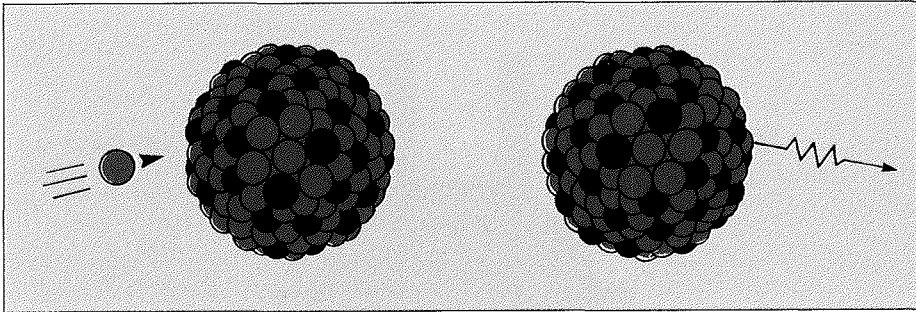
Fissioissa syntyy suoraan yli 60 erilaista halkeamistuotetta. Kun tähän lisätään

vielä hajoamisketjujen nuklidit, niin kaikkiaan fissioreaktorin toimiessa polttoaineeseen kertyy yli kahtasataa erilaista fissiotuotetta. Radioaktiivisina nämä fissiotuotteet ovat riskitekijä voimalaitokselle ja sen ympäristölle.

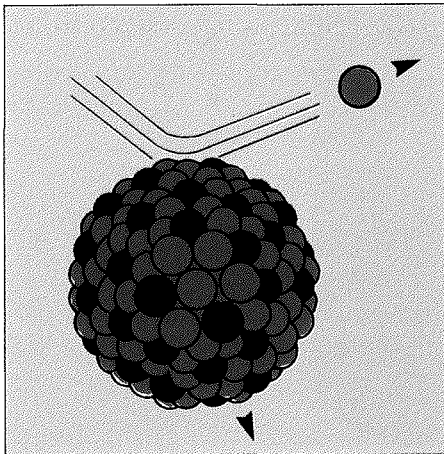
Ytimen ja neutronin väliset muut reaktiot

Ydinreaktorin toiminnan ymmärtämiseksi on fission lisäksi välttämättä tunnettava myös muut ydinreaktiot, joita neutronit voivat aikaansaada. Tärkeä fission kanssa kilpaileva ydinreaktio on **kaappaus**. Tässä reaktiossa ydin ”siappaa” tulevan neutronin, jolloin ytimen massaluku siis kasvaa yhdellä. Tuloksena on alkuperäisen ytimen raskaampi isotooppi. Syntyvä ydin jää viritettyyn tilaan, joka usein purkautuu gammasäteilyä. Kaappauksessa aina menetetään neutroni. Näin kaappauksilla on ketjureaktiota pysäyttävä tai heikentävä vaikutus.

Sironta on tapahtuma, jossa ytimeen törmäävä neutroni muuttaa alkuperäistä suuntaansa ja menettää ytimelle energiaansa, neutroni **hidastuu**. Hidastuminen on sitä tehokkaampaa mitä kevyempi on sirottava ydin. Ääritapauksessa neutroni voi vety-ytimeestä sirotessaan menettää kaiken energiansa. Tilanne vastaa biljardipallon keskeistä törmäystä toiseen liikukumattomaan palloon; tuleva pallo pysähtyy ja paikallaan ollut pallo saa kaiken energian. Ketjureaktion jatkumiseen ei sironnalla näyttäisi olevan vaikutusta, koska neutronien määrä ei sironnoissa muutu. Kuten seuraavassa näemme, sironnoilla voidaan kuitenkin vaikuttaa ydinreaktorin toimintaan.



Kuva 2. Neutronin kaappaus.



Kuva 3. Neutronin sironta.

Kriittinen reaktori

Energian hallittu tuottaminen ydinreakti-
ossa edellyttää tasaisena jatkuvaa ketjureak-
tiota. Esimerkiksi jokaista tuhatta fis-
siota kohden syntyvien nopeiden neutro-
nien tulee aina aiheuttaa tuhat uutta fis-
siota seuraavassa "sukupolvessa" oheisen
kaavion tapaan:

1000	→	2400	→	1000	fissiota	→	2400	→	jne.
fis-		neutro-					neut-		
siota		nia		1400	kaap-		ronia		
					pausta	(ja			
					vuotoa)				

Kun fissioiden määrä pysyy "sukupolvel-
ta" toiseen vakiona, reaktori toimii va-
kioteholla; se on **kriittinen**.

Reaktorissa valtaosa kaappauksista ta-
pahtuu ^{238}U -ytimissä. Kriittisyyden kan-
nalta kaappaukset ja fissiot ovat kilpaile-
via prosesseja. Esimerkiksi kaappausten
osuuden lisääntyessä fissioiden osuus vas-
taavasti pienenee, tällöin ketjureaktio al-
kaa heiketä ja reaktorin teho laskea. Ku-
ten ylläolevasta kaaviosta näkyy, kriitti-
sessä reaktorissa fissioita ja kaappauksia
tapahtuu suunnilleen yhtä paljon: aina
tuhatta fissiota kohden tapahtuu vajaat
1400 kaappausta ja nämä kaappaukset
siiis pääosin ^{238}U -ytimissä.

Tarkastellaan nyt niitä edellytyksiä, joilla
reaktori saadaan kriittiseksi. Valitaan

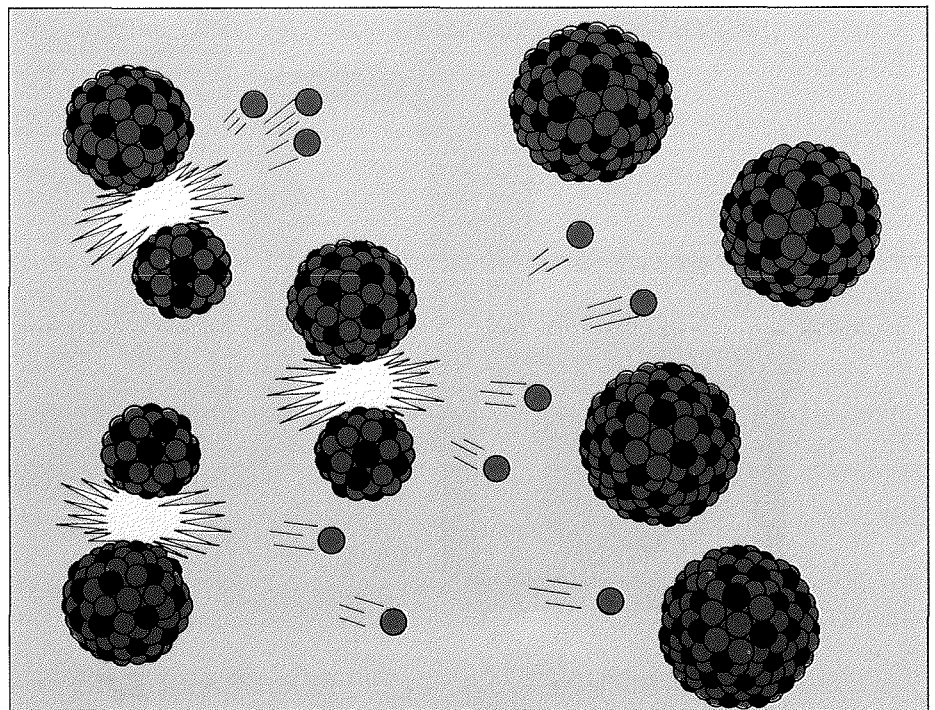
reaktorin polttoaineeksi luonnonuraani,
jossa on 0,71 % fissiiliä isotooppia ^{235}U
ja valtaosa eli loput yli 99 % isotooppia
 ^{238}U . Kokeiden perusteella tiedetään, että
 ^{235}U -ytimien törmäävän nopean neutro-
nin aiheuttama fissio on noin viisi kertaa
todennäköisempi kuin ^{238}U -ytimien osu-
van neutronin kaappaus. Kun luonnon-
uraanissa jokaista ^{235}U -ydintä kohti kui-
tenkin on noin 140 ^{238}U -ydintä, kaappaus
on fissioon nähden ylivoimaisesti hallitse-
va reaktio. Tuloksena todetaan siis, että
kriittistä reaktoria on mahdotonta raken-
taa pelkästä luonnonuraanista.

Kriittiseen reaktoriin on kaksi tietä. En-
simmäinen mahdollisuus on käyttää polt-
toaineena luonnonuraanin sijasta uraa-
ni-235:n suhteen väkevätyä uraania. Kun
 ^{235}U -ydinten osuus polttoaineessa noste-
taan noin 15 prosenttiin, fissio ja kaap-
paus ovat suunnilleen tasaväkisiä ja rea-
ktori saadaan kriittiseksi. Väkevöintiä vas-
taavaan tilanteeseen päästään myös lisää-
mällä luonnonuraaniin fissioituvaa pluto-
niumia. Tällaisessa reaktorissa neutronit
ovat nopeita, siitä nimi **nopea reaktori**.

Kriittiseen reaktoriin on toinenkin tie.
Fissioissa syntyvät nopeat neutronit voi-
daan hidastaa peräkkäisissä sironnoissa
energialtaan alle miljoonasosaan alkupe-
räsistä, ns. termiselle alueelle. Nämä hi-
taat **termiset** neutronit aiheuttavat fissioi-
ta erityisen tehokkaasti: ^{235}U -ytimien tör-
määvän neutronin aiheuttama fissio on
noin 200 kertaa todennäköisempi kuin
 ^{238}U -ytimien osuvan neutronin kaappaus.
Nyt luonnonuraanikin soveltuu polttoai-
neeksi: vaikka ^{235}U -ytimiä onkin luon-
nonuraanissa vähän (siis vain noin yksi
aina 140:stä), fissio ja kaappaus ovat ter-
misellä alueella tasaväkisiä ja ketjureak-
tio voi jatkua. Näin on, mikäli neutrone-
ja ei menetetä liikaa hidastumisen kulues-
sa. Tällä periaatteella toimivaa reaktoria
kutsutaan **termiseksi reaktoriksi**.

Nopeiden neutronien hidastaminen termi-
sille energioille toteutetaan lisäämällä
polttoaineen joukkoon hidasteainetta,
moderaattoria. Hyvän hidasteen ytimet
ovat kevyitä, hyvin sirottavia ja vähän
neutroneja kaappaavia. Erinomaisia hi-
dasteita ovat raskasvesi D_2O ja grafiitti,
joilla luonnonuraania polttoaineena käyt-
tävä reaktori voidaan saada kriittiseksi.

Kohtalainen hidaste on myös tavallinen
(kevyt) vesi H_2O . Veden sisältämä vety
kaappaa kuitenkin sen verran neutroneja,
ettei kevytvesihidasteinen luonnonuraani-
reaktori ole mahdollinen. Niinpä termisis-
sä kevytvesireaktoreissa polttoaine on lie-
västi (noin kolmiprozenttiseksi) uraa-
ni-235:n suhteen väkevätyä, mikä riittää
kompensimaan vedyssä tapahtuvat
kaappaukset. Sama väkevyys oli myös
1,8 miljardia vuotta sitten luonnonuraa-
nissa. Oklossa toimineen luonnollisen fis-
sioreaktorin hidasteena oli pohjavesi.



Ketjureaktio on mahdollinen, kun polttoaineessa uraani-235:n osuus on riittävän suuri.

Ydinreaktorin rakenne

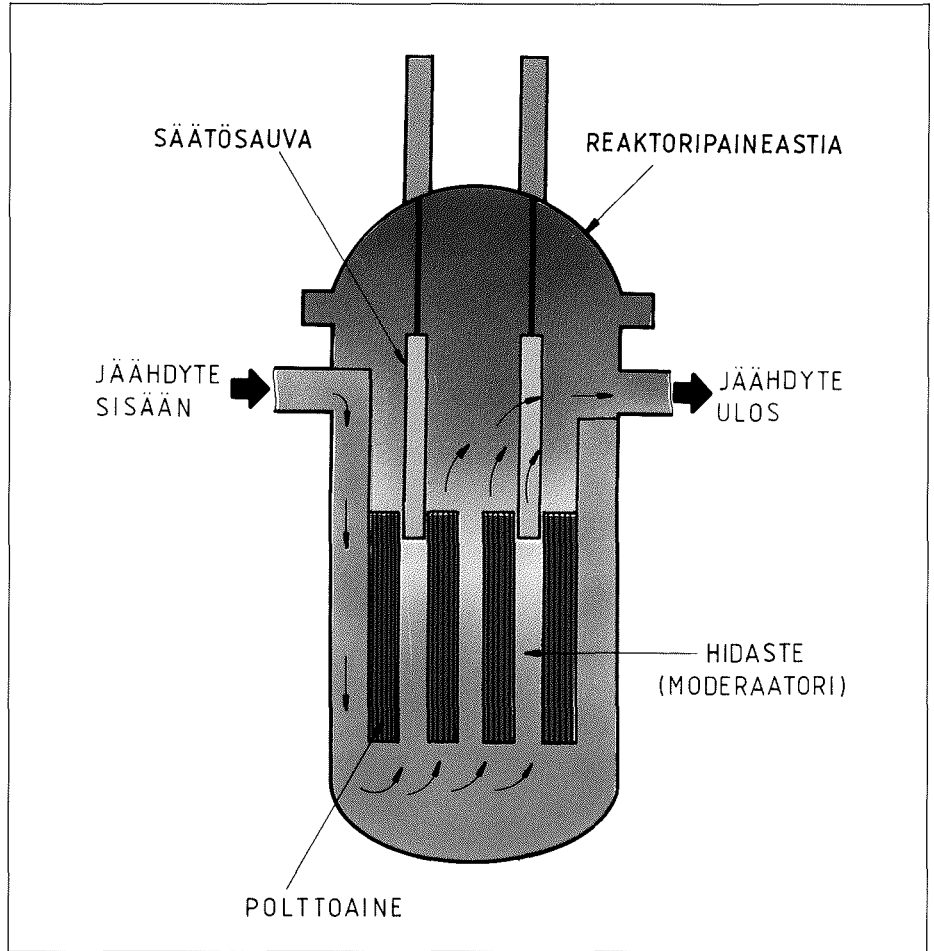
Fisioenergian vapautuminen tapahtuu ydinreaktorin **sydämessä**. Reaktorisydämen olennaiset osat ovat:

- polttoaine
- hidaste eli moderaattori
- jäähdyte
- säätösauvat.

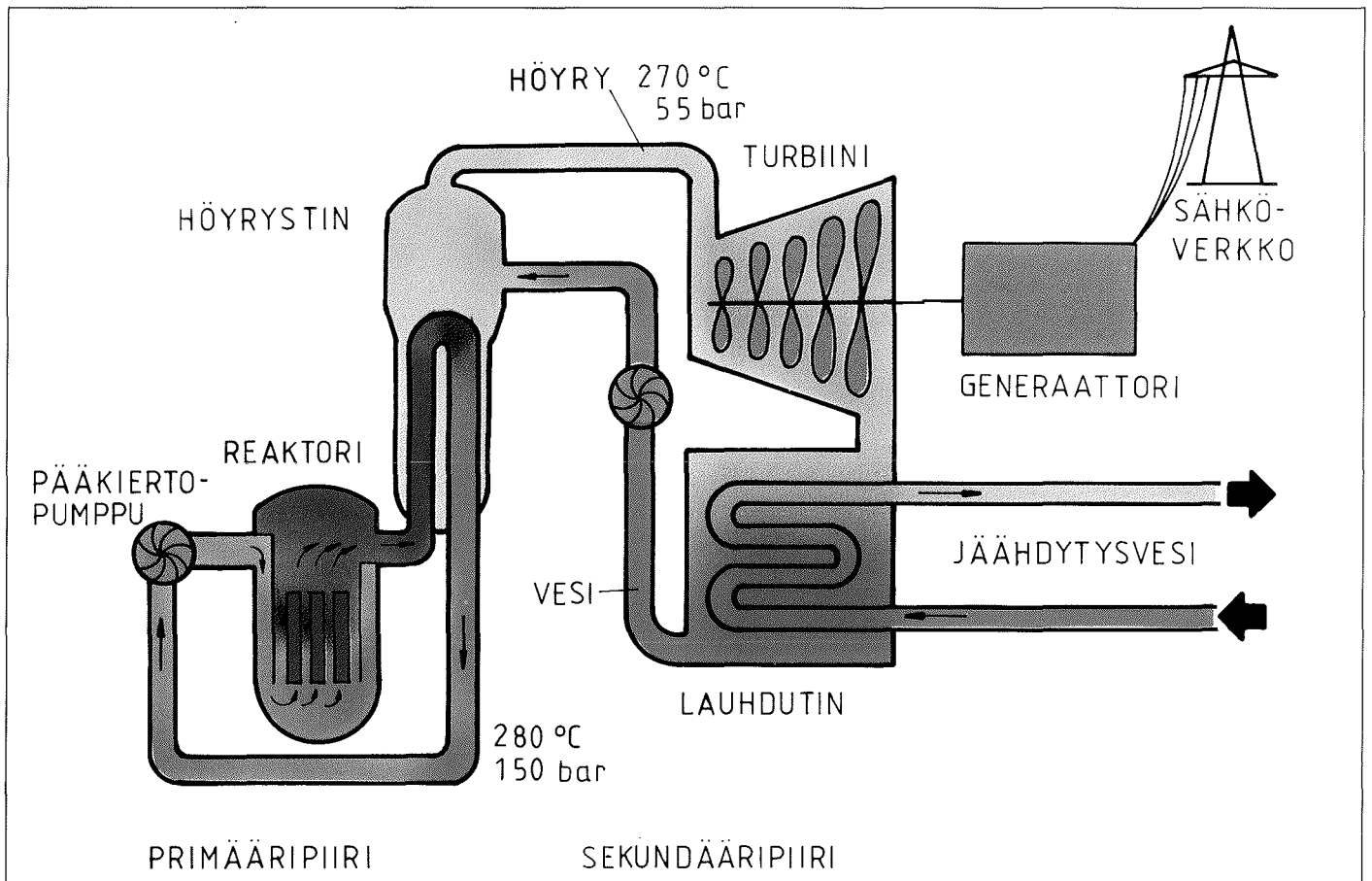
Yleisimmin käytetty **polttoaine** on uraani-dioksidi UO_2 . Polttoaineen perusyksikkö on ohut polttoainesauva, jonka tiivis metallinen suojakuori estää fissiotuotteiden leviämistä. Sauvoista kootaan polttoainetehtaalla sauvanippuja; tällainen polttoainenippu on pienin yksikkö, jossa polttoainetta käsitellään voimalaitoksella. Reaktorisydän muodostuu vierekkäin asetuista polttoainenipuista.

Polttoainesauvojen väliin jäävä tila täyttyy neutronien **hidasteesta** ja ketjureaktorin tuottamaa lämpöä poiskuljettavasta **jäähdytteestä**. Esimerkiksi kevytvesireaktoreissa tavallinen vesi hoitaa sekä hidasteen että jäähdytteen tehtävät. Nopeissa reaktoreissa ei määritelmän mukaan ole hidastetta, jäähdytteenä käytetään yleensä sulaa natriummetallia.

Säätösauvat sisältävät neutroneja voimakkaasti kaappaavaa ainetta, esimerkiksi booria. Työntämällä säätösauvoja reaktorin sydämeen voidaan kaappausten osuutta suhteessa fissioihin lisätä, jolloin reaktorin teho alkaa laskea. Vetämällä säätösauvoja takaisin ulospäin sydäimestä reaktori palautetaan kriittiseksi, jolloin



Kuva 4. Ydinreaktorin periaatekaavio.



Kuva 5. Painevesireaktoria käyttävän ydinvoimalaitoksen periaatekaavio.

Taulukko. Reaktorityypit

Tyyppi	UNGG Magnox	HWR	PWR	BWR	RBMK	AGR	HTR	LMFBR
Neutronit	termisiä	termisiä	termisiä	termisiä	termisiä	termisiä	termisiä	nopeita
Polttoaine — väkevyys — luonne	luonnon U metalli	luonnon U UO ₂	3 % UO ₂	3 % UO ₂	2—3 % UO ₂	2—3 % UO ₂	5—90 % UC, ThC	15—20 % UO ₂ -PuO ₂
Hidaste Jäähdyte	grafiitti CO ₂ -kaasu	raskasvesi raskasvesi	paineis- tettu vesi	kiehuva vesi	grafiitti kiehuva vesi	grafiitti CO ₂ -kaasu	grafiitti He-kaasu	— sula Na
Tärkeimmät kehittäjä- maat	Englanti Ranska	Kanada	USA N-liitto Ranska Saksan Lt	USA Ruotsi Saksan Lt	N-liitto	Englanti	USA Saksan Lt	Ranska N-liitto USA

UNGG

Magnox luonnonuraania käyttävä kaasujäähdytetty grafiittireaktori

HWR Heavy Water Reactor — raskasvesireaktori

PWR Pressurized Water Reactor — painevesireaktori

BWR Boiling Water Reactor — kiehutusvesireaktori

RBMK

venäläinen grafiittimoderoitu kiehutusvesireaktori

AGR Advanced Gas Cooled Reactor — englantilainen kaasujäähdytetyn reaktorin kehittyneempi malli

HTR High Temperature Reactor — korkealämpötilareaktori

LMFBR Liquid Metal Fast Breeder Reactor — nopea Na-jäähdytetty hyötöreaktori

teho vakioituu. Vastaavasti vetämällä säätösauvoja edelleen ulospäin kaappaukset vähenevät ja fissioiden osuus kasvaa, jolloin reaktorin teho alkaa nousta. Näin reaktorin tehoa voidaan säätää. Häiriötilanteissa reaktori pikasuljetaan pudottamalla säätösauvat kokonaan sydämen sisään.

Reaktorityypit

Kuten edellä todettiin, fissioreaktorit voidaan neutronien energian perusteella jakaa termisiin ja nopeisiin reaktoreihin. Termiset reaktorit luokitellaan edelleen niissä käytetyn polttoaineen, hidasteen ja jäähdytteen avulla eri reaktorityypeiksi. Tämä luokittelu on tärkeimpien tyyppien osalta esitetty taulukossa.

Suomessa Loviisan voimalaitoksen reaktorit ovat painevesityyppejä, Olkiluodon taas kiehutusvesityyppejä. Painevesireaktorissa reaktori ja siihen liittyvä primääripiiri pidetään niin kovassa paineessa, ettei jäähdytysvesi kiehu. Reaktorissa vapautunut lämpö siirtyy jäähdytysveden mukana höyrytimeen, jossa se höyrystää sekundääripiiriin vettä. Syntynyt höyry johdetaan turbiiniin, joka pyörittää sähköä tuottavaa generaattoria. Höyry tiivistyy lauhduttimessa vedeksi, joka pumpataan takaisin höyrytimeen.

Tällä hetkellä eri maissa toiminnassa, rakenteilla ja suunnitteilla olevista reaktoreista ylivoimainen enemmistö on kevytvesireaktoreita, erityisesti painevesireaktoreita. Tällaisena tilanne jatkuu pitkälti

tulevaisuudessaakin, vaikkakin eräissä muissa reaktorityypeissä voidaan osoittaa kiistattomia etuja. Lähivuosien suunta näyttäisi olevan ns. kehittyneet kevytvesireaktorit (ALWR), joiden käyttövarmuutta ja hyväksyttävyyttä on lisätty toisaalta laitosta yksinkertaistamalla, toisaalta vahvistamalla laitoksen sisäistä käyttöhenkilökunnasta riippumatonta turvallisuutta

TkT Heikki Kalli on Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun energiatekniikan osaston apulaisprofessori, p. 953-5711.



Ydinvoimala ei ole pommi



Ranskan ydinräjäytyskokeen saastepilvi Mururoan saaren taivaalla.

Mikä on atomipommin ja ydinreaktorin oleellisin ero? Pommissa yritetään halkaista suuri osa sen sisältämistä halkeavista ytimestä hetkessä, jotta syntyisi voimakas räjähdys. Reaktorissa pyritään taas tasaiseen ja vakaaseen tehonkehitykseen. Fysikaaliset perusasiat vaikuttavat pommin ja reaktorin energian vapautumisnopeuteen. Näiden ansiosta reaktori ei voi räjähtää pommin tavoin.

Sekä atomipommissa että ydinreaktorissa energia vapautuu neutronien halkaistessa

uraani- tai plutoniumatomien ytimiä. Raskaan ytimen haljetessa vapautuu energian lisäksi uusia neutroneja, keskimäärin noin 2,5 kpl, jotka vuorostaan voivat halkaista uusia ytimiä pitäen täten yllä ketjureaktiota. Uusista neutroneista suurin osa vapautuu heti ytimen haljetessa. Näitä neutroneja kutsutaan **kerkeiksi**. Pieni osa vapautuu kuitenkin vasta sekuntien kuluttua halkeamisesta. Näiden **viivästyneiden** neutronien osuutta kaikista neutroneista merkitään symbolilla β . Sen arvo vaihtelee eri halkeaville aineille ollen reaktorissa tyypillisesti noin 0,005.

Fysikaaliset perusasiat määräävät energian vapautumisnopeuden

Teho eli energian vapautumisnopeus riippuu neutronivuosta eli siitä, kuinka pal-

jon neutroneja pommissa tai reaktorissa lentelee. Tarkastelkaamme siis miten neutronivuo muuttuu ajan mukaan.

Keskeinen suure on **kasvutekijä** k . Se voidaan määrittellä esimerkiksi niiden halkeamisten eli **fissioiden** lukumääränä, jonka yhdessä fissiossa syntyneet neutronit keskimäärin saavat aikaan. Kuten edellä todettiin, näitä neutroneja on yleensä keskimäärin noin 2,5 kpl, mutta suuri osa niistä absorboituu muihin aineisiin tai lentää ulos tarkasteltavasta systeemistä (pommista tai reaktorista), joten vain osa johtaa uusiin fissioihin.

Jos k on 1 eli reaktori on **kriittinen**, niin jokaisessa neutronisukupolvessa on yhtä monta neutronia kuin edellisessä. Ketjureaktio ei tuolloin laannu eikä kiihdy, vaan teho pysyy vakiona. Jos k on ykköistä pienempi eli reaktori on **alikirittinen**,

nen, neutronivuo vaimenee ja ketjureaktio sammuu vähitellen. Jos k taas on suurempi kuin 1 eli reaktori on **ylıkriittinen**, vuo ja sen mukaan teho kasvavat.

Ketjureaktion aikariippuvuuden kannalta on tärkeää, onko k niin suuri, että pelkästään kerkeät neutronit riittävät ketjureaktion ylläpitämiseen. Reaktori on tällöin **kerkeästi kriittinen**. Matemaattisesti ehtona tälle on $k = 1 + \beta$.

Niin kauan kuin k jää kerkeän rajan alle, teho kasvaa suhteellisen hitaasti viivästyneiden neutronien määräämässä tahdissa. Ajettaessa reaktoria ylös eli tehoa nostettaessa pyritään pysymään tällä alueella. Ottaen huomioon kuinka pieni luku β on, saattaisi vaikuttaa siltä että kasvutekijän pitäminen 1:n ja $1 + \beta$:n välissä voisi olla vaikeaa. Näin ei todellisuudessa kuitenkaan ole asian laita.

Toisaalta jos reaktori on **kerkeästi ylikriittinen**, $k > 1 + \beta$, viivästyneillä neutroneilla ei enää ole vaikutusta sen käyttäytymiseen. Tällöin teho kasvaa hyvin nopeasti, sen sanotaan **karkaavan**. Tehon kasvunopeus riippuu kasvutekijästä ja **neutronien eliniästä** eli neutronisukupolvien välisestä ajasta. Lisäksi teho vaikuttaa myös kasvutekijään ns. **takaisinkytkentäkertoimien** kautta.

Reaktoreissa neutronien elinikää eivät suinkaan säteile ainoastaan viivästyneiden neutronien syntyyn liittyvät välivaiheet. Useimmissa nykyisissä reaktoreissa, ns. **termisissä reaktoreissa**, neutronit hidastetaan. Vedessä tai muissa hidastainneissa (raskas vesi, grafiitti) tapahtuvien sirontojen (törmäysten) kautta neutronien nopeus laskee jyrkästi. Uraaniatomien haljetessa vapautuneen neutronin nopeus on noin 20 000 km/s. Kun neutroni on kulkenut hidastainneen läpi, sen nopeus on enää noin 3 km/s. Vakaan jatkuvan tehotuoton kannalta neutronin hidastaminen kannattaa koska nämä ns. **termiset neutronit** aiheuttavat helpommin fissioita kuin nopeat.

Pommi

Atomipommin suunnittelussa pyritään siihen, että suuri osa halkeavista ytimistä ehtisi haljeta ennen kuin räjähdys on hajottanut pommin niin että ketjureaktio sammuu. Muuten räjähdys jäisi heikoksi. Tämä edellyttää sekä suurta kasvutekijää että lyhyttä neutronien elinikää, johon yletään vain kerkeillä nopeilla neutroneilla.

Neutronien elinikä atomipommissa on joitakin nanosekunteja (sekunnin miljardisosia). Näin lyhyt neutronien elinikä johtaa siihen, että vaikka pommi olisikin jo alkanut hajota vapautuneen energian johdosta, ehtii vielä syntyä monta neutronisukupolvea, jotka halkaisevat lisää halkeavia ytimiä.

Korkea kasvutekijä taas merkitsee suurta neutronivuon kasvua neutronisukupolven kohti ja yhdessä lyhyen eliniän kanssa suuren energiamäärän vapautumista. Räjähdys hetkellä atomipommin kasvutekijä lienee vähintään 1,1. Näin suurilla kasvutekijän arvoilla takaisinkytkentäkertoimilla ei ole suurta merkitystä. Vasta pommin hajoaminen tekee sen alikriittiseksi ja pysäyttää ketjureaktion.

Käytännössä lyhyt neutronien elinikä saadaan aikaan käyttämällä pommissa melkein puhdasta halkeavaa materiaalia. Käytettiinä uraania tai plutoniumia, kummassakin tapauksessa halkeavien isotooppien osuus on yli 90 %. Ennen kaikkea siinä ei saa olla vettä tai muita neutroneja hidastavia aineita.

Reaktori

Ydinreaktorit eroavat atomipommeista jo siinä suhteessa, että reaktoreissa halkeavien atomien osuus on huomattavasti pienempi. Useimmissa reaktorityypeissä halkeavien isotooppien osuus uraanipolttoaineesta on noin kolme prosenttia, ja polttoaineen lisäksi on reaktorissa muitakin aineita, usein sellaisia, jotka tehokkaasti hidastavat neutroneja.

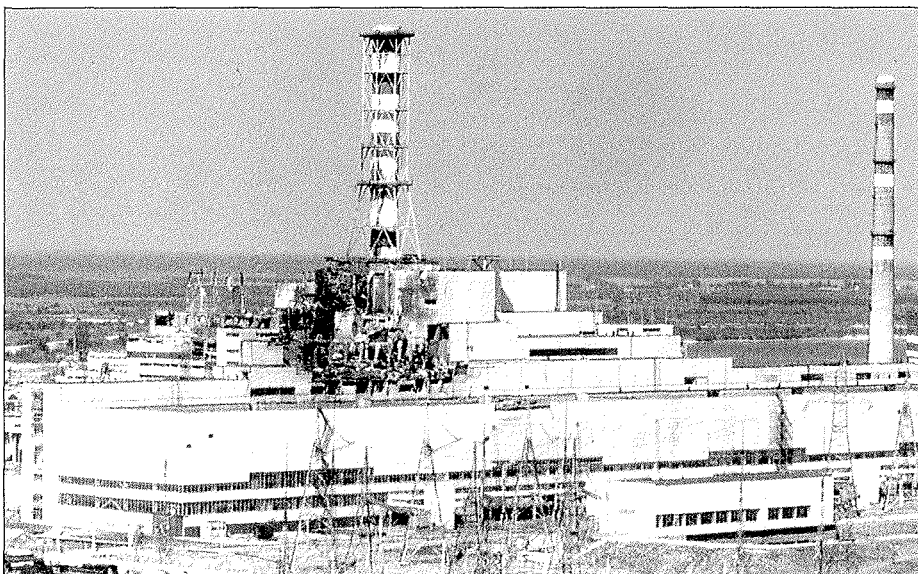
Tästä johtuen reaktorit eroavat selvästi pommeista sekä neutronien eliniän että kasvutekijän suhteen. Neutronien elinikä tosin vaihtelee huomattavasti reaktorityypistä toiseen. Kevyvesireaktoreissa, sellaisissa joita käytetään Loviisassa ja Olkiluodossa, se on joitakin kymmeniä mikrosekunteja eli tuhansia kertoja pitempi kuin pommissa. Tämä jo sinänsä estäisi todella voimakkaan räjähdysen syntymisen, mutta se ei vielä takaa ettei reaktori voisi vaurioitua tehon kerkeän karcaamisen johdosta, kuten Tshernobylissa tapahtui.

Tärkeämpää onkin kasvutekijän rajoittaminen. Siinä noudatetaan kahta periaatetta: Ensinnäkin varmistetaan, ettei mikään ilmiö voi aiheuttaa suurta ja äkillistä kasvutekijän nousua. Toiseksi reaktori pitää suunnitella ja rakentaa sellaiseksi, että tärkeimmät takaisinkytkentäkertoimet ovat negatiivisia, eli että tehon nousu alentaa kasvutekijää.

Takaisinkytkentäkertoimien merkitystä voidaan valaista parilla esimerkillä. Tshernobylin voimalaitoksen nelosreaktori tuhoutui alunperin pienen kasvutekijän lisäyksen johdosta sen takia, että eräs tärkeimmistä takaisinkytkentäkertoimista, ns. aukkokero, oli positiivinen. Kun siellä tehon noustessa jäädytteen kiehuminen kiihtyi, kasvutekijä suureni, jonka johdosta teho edelleen nousi entisestään. Kierre jatkui edelleen.

Toisaalta on olemassa reaktoreita, esimerkiksi TRIGA-tutkimusreaktorit, joissa kaikki tärkeät takaisinkytkentäkertoimet ovat niin voimakkaasti negatiivisia että reaktori voidaan jopa turvallisesti tehdä kerkeästi ylikriittiseksi. Aiheutuva äkillinen tehonnousu alentaa kasvutekijän taas kriittisyyden alapuolelle, niin että syntyy vain lyhyt tehopulssi, joka ei riitä reaktorin vahingoittamiseen. Tällä tavalla saadaan aikaan valtoimia äkillisiä neutroniryöppyjä, joilla on käyttöä tutkimuksessa. Suomen ainoa tutkimusreaktori, Otaniemessä sijaitseva FiR-1, on juuri tätä tyyppiä. Sillä onkin joskus ”ammuttu” tehopulssuja.

Suurin osa maailman energiantuotantoon käytetyistä reaktoreista on kevytvesireaktoreita, myös ne joita Suomessa käytetään. Niissä vaaditaan yhtenä tärkeimpänä suunnittelulähtökohtana, että kaikkien tärkeiden takaisinkytkentäkertoimien täytyy olla negatiivisia. Takaisinkytkentäkertoimien riittävät hyvin hallitsemaan useimmat kuviteltavissa olevat häiriötilanteet, esimerkiksi säätösauvan ohjauskoneiston paineputken mahdollisesta rikkoutumisesta ja säätösauvan ulossinkoutumisesta aiheutuvan reaktiivisuuslisäyksen. □



Tshernobyl-4:n räjähdyksessä ei edes viereinen reaktori tuhoutunut.

TkL Frej Wasastjerna on VTT:n ydinvoimatekniikan laboratorion erikoistutkija, p. 90-648 931.

Professori Pekka Silvennoinen on VTT:n energiaosaston tutkimusjohtaja, p. 90-456 4140.



Ydinvoima ja ympäristö

Teollisuuslaitosten ja lämpövoimalaitosten perinteellinen tapa päästä eroon ei-toivotuista sivutuotteistaan on aina ollut LL-menetelmä eli Laimenna-Levitä. Laimentamalla sivutuotteet alhaisiin pitoisuuksiin ja levittämällä ne laajalle alueelle pyritään välttämään paikallisia ja välittömiä haittavaiikutuksia. Ydinvoimateollisuus on tuonut tullessaan uuden konseptin, TT eli Tiivistä-Talenna. Sivutuotteet pyritään saamaan mahdollisimman tiiviiseen kompaktiin muotoon keräämällä ne suodattimiin, haihduttamalla, puristamalla jne. Lopulta ne paketoitetaan tiiviiseen pakkaukseen loppusijoitusta varten. Tällöin päästöt ympäristöön jäävät hyvin pieniksi.

Se, että ydinpolttoaineen ei ”palaakseen” tarvitse olla yhteydessä ulkoilmaan ja että ”palamistuotteiden” volyyymi on pieni mahdollistaa ympäristöstä lähes kokonaan eristetyn energiatuotannon. Ydinpolttoaineeseen kerääntyvien radioaktiivisten aineiden leviäminen ympäristöön estetään useilla sisäkkäisillä suojakerroksilla. Näiden suojakerrosten eheyden varmistamisesta riippuu, kuinka turvallista ydinvoima on ympäristön kannalta.

Ydinvoimalaitosten lämpöpäästö

Suomalaisten ydinvoimalaitosten näkyvin ympäristövaikutus on jääolosuhteiden huononeminen talvella jäähdytysveden seurauksena. Ydinvoimalaitokset käyttävät merivettä siinä missä muutkin lämpövoimalaitokset, eli höyryn lauhduttamiseen, kun se on mennyt turpiinin läpi. Veden tarve on Loviisassa 20 m³/s ja Olkiluodossa 28 m³/s laitosyksikköä kohti. Lämpötilan nousu on noin kymmenen astetta, joten purkuaukon kohdalle muodostuu talvella sula-alue. Sulan ulkopuolella esiintyy heikentyntä jäätä. Vahinkoa kalakannalle ei ole osoitettu. Kala tuntuu itse asiassa viihtyvän varsin hyvin, etenkin talvella, purkupaikan lähistöllä.

Sen sijaan talvikalastus on tullut eräillä alueilla hankalaksi epäluotettavien jäiden takia.

On syytä korostaa, että merivesi ei muutu radioaktiiviseksi kierrossaan. Vaikka lauhduttimessa esiintyisikin vuotoja, vesi säilyy puhtaana. Lauhduttimessa on alipaine, joten mahdollisesta vuotokohdasta ei vuoda mitään ulos. Päinvastoin merivettä imeytyy sisään prosessiin. Tämä on haitaksi voimalaitokselle, joten lauhduttinvuotoja pyritään kaikin keinoin ennalta ehkäisemään.

Halkeamistuotteet ja aktivointituotteet

Vaikka normaalitilanteessa suurin merkitys ympäristön kannalta onkin lämpöpäästöllä, niin paljon enemmän huomiota saavat osakseen radioaktiivisuuspäästöt. Suuronnettomuudessa radioaktiivisuuspäästö voi muodostua merkitykselliseksi.

Reaktorin käydessä radioaktiivisia aineita muodostuu pääasiallisesti seuraavilla tavoilla:

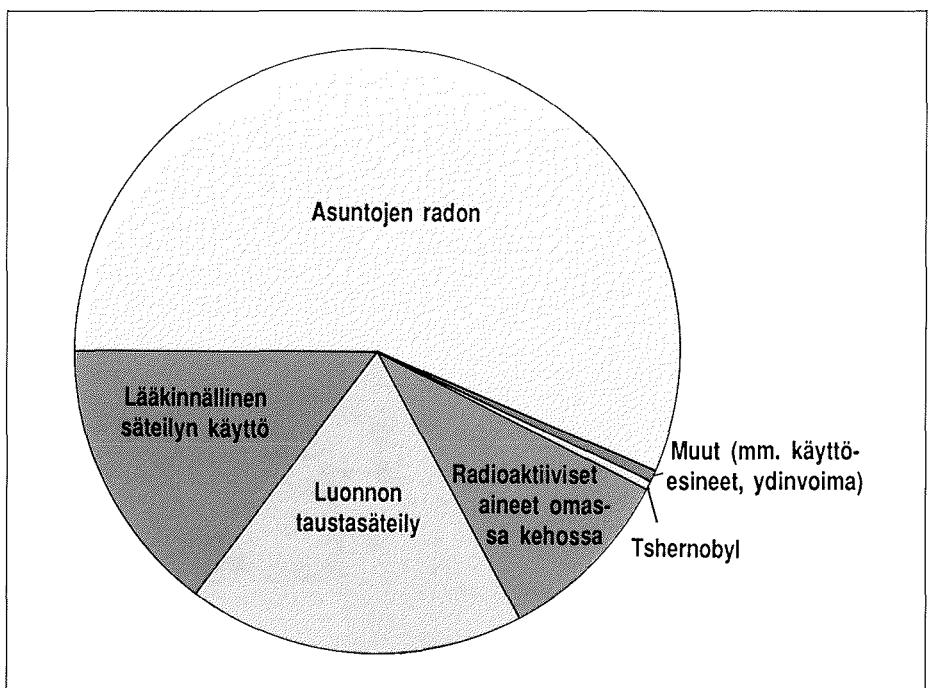
- Jokaisesta uraaniytimestä muodostuu haljetessaan kaksi uutta, kevyempää

ydintä nk. halkeamistuotetta. Nämä ovat usein radioaktiivisia.

- Kun reaktoripiirin vedessä olevat aineet esim. metallioksidit, kemikaalit ja veden osaset kulkevat reaktorissa valitsevan neutronivuon läpi, osa aineista ”aktivoituu”. Tämä tarkoittaa sitä, että atomin ytimeen tunkeutuu neutroni muuttaen aineen aktiiviseksi. Samalla tavalla mm. myös reaktorirakenteet aktivoituvat.

Monet halkeamistuotteet ovat vailla mielenkiintoa ympäristön kannalta sen takia, että ne ovat lyhytikäisiä tai koska fyysikaalisten tai kemiallisten ominaisuuksiensa vuoksi niiden tuskin voidaan odottaa pääsevän ympäristöön. Tärkeitä aineita ovat sen sijaan kaasumaiset aineet kuten jalokaasut ja jodi sekä pitkäikäiset nuklidit, esim. cesium-137 ja strontium-90.

Jos polttoaine säilyy tiiviinä, halkeamistuotteita esiintyy reaktorivedessä vain sen verran kun niitä muodostuu, kun polttoainetehtaan jäljiltä polttoainepölyn ulkopinnassa olevaan pölyyn sisältyviä uraaniytimiä hajoaa. Varsinaisissa uraanipolttoainetableteissa syntyvät halkeamistuotteet jäävät polttoaineeseen. Ura-



Eri säteilylähteiden osuus suomalaisten koko elinaikanaan saamasta säteilyannoksesta.

YDINENERGIAN TUOTANNON TURVALLISUUSPERIAATTEET

Peruseriaate

Peruseriaate, jolla estetään ydinpoltoaineeseen kertyvien radioaktiivisten aineiden leviämisen ympäristöön, on polttoaineen ympäröiminen usealla sisäkkäisellä suojakerroksella. Sisän näistä on polttoainesauvojen metallikuori. Seuraavan suojakerroksen muodostaa reaktorin paineastia, jonka sisällä polttoainesauvoista koostuva reaktorisydän sijaitsee. Uloimpana on reaktoria ympäröivä suojarakennus. Kaikkien näiden sisäkkäisten suojakerrosten tulisi rikkoutua yhtäaikaaisesti, jotta merkittävä radioaktiivisten aineiden vapautuminen ympäristöön voisi tapahtua.

Keskeinen tavoite

Suojakerrosten eheyden säilyttäminen on keskeinen tavoite turvallisuuden varmistamisessa. Siihen pyritään useilla eri tavoilla, eräänlaisen ”syvän puolustuksen” periaatteella. Syvä puolustus jakautuu kolmeen vaiheeseen: onnettomuuden syntymistä ennakolta ehkäisevät toimenpiteet, häiriötilanteen havaitsemiseksi tarvittavat laitteet ja onnettomuutta rajoittavat laitteet.

Ennakolta ehkäisy

Ennakolta ehkäiseviä turvallisuustoimenpiteitä ovat monet laitoksen suunnittelussa ja käytössä noudatettavat periaatteet. Esimerkiksi reaktorin tulee olla ”luontaisesti turvallinen” ts. sen teho ei missään olosuhteissa saa joutua hallitsemattomaan kasvuun. Laitteet ja järjestelmät rakennetaan materiaaleista, joiden ominaisuudet tunnetaan hyvin ja mitoitukset tehdään riittävin turvallisuusmarginaalein. Laitoksen ohjaus suunnitellaan mahdollisimman käyttäjäystävälliseksi inhimillisten virheiden välttämiseksi. Suunnittelutyössä samoin kuin laitoksen käytössäkin noudatetaan toiminnasta riippumattoman organisaation suorittamaa laadunvarmistusta korkean laatutason takaimiseksi.

Häiriötilanteiden hallinta

Huolimatta laitteiden huolellisesta suunnittelusta ja valmistuksesta varaudutaan siihen, että vaurioita voi esiintyä. Instrumentointijärjestelmät valvovat laitoksen toiminnan kannalta tärkeitä prosessiarvoja. Jonkun niistä poi-

ketessa normaaliarvostaan instrumentointi antaa hälytyksen ja käynnistää tarvittavat suojaustoimenpiteet. Reaktorin toiminnan nopea pysäyttäminen on yksi tärkeimmistä suojaustoiminnoista. Pikasulun tapahtuessa reaktorin toiminta pysähtyy muutama sekunnissa. Instrumentoinnin laukaisut ja lukitukset suojaavat laitosta myös mahdollisilta käyttövirheiltiltä.

Varautuminen onnettomuuteen

Tärkein keino rajoittaa onnettomuuden seurauksia on estää reaktorisydämen ylikuumentuminen. Tätä tehtävää hoitavat hätäjäähdytysjärjestelmät, jotka pystyvät pitämään polttoaineen riittävästi jäähdytettynä, vaikka reaktorijärjestelmään tulisi suuri vuoto. Esteenä radioaktiivisten aineiden ympäristöön leviämistä vastaan on vielä koko reaktorijärjestelmää ympäröivä kaasutiivis ja onnettomuusolosuhteissa syntyvän paineen kestävä suojarakennus.

Ahti Toivola, TVO

nihan on polttoainepussissa tiiveissä metalliputkissa. Suurin osa halkeamistuotteista häviää aikanaan luonnollisen hajoamisen seurauksena. Jäljellejääneet aineet muodostavat ns. korkea-aktiivisen jätteen, jonka loppukäsittely ja loppusijoitus on esitetty muualla tässä lehdessä.

Pienten polttoainevuotojen esiintyessä käytön aikana reaktoriveteen voi vuotaa kaasumaisia halkeamistuotteita ja suurten polttoainevuotojen yhteydessä myös kiinteitä. Nämä joutuvat silloin aikaisemmin mainittujen aktivoitumistuotteiden joukkoon.

Ympäristön kannalta tärkeitä aktivoitumistuotteita ovat esim. koboltti-60, mangaani-54 ja hopea-110m sekä vety-3 eli ”tritium”. Viimeksi mainittu on sinänsä suhteellisen harmiton, neutraalisuutensa vuoksi luonnossa esiintyvä ns. beetasäteily, joka ei voi rikastua ekologisissa järjestelmissä. Tärkeäksi sen tekee lähinnä pitkä puoliintumisaika, 12 vuotta. Koboltti-60:n puoliintumisaika on 5 vuotta.

Radioaktiivisuuspäästöt

Reaktoriveden ja muidenkin prosessivesien laatu on voimallisuuden turvallisesta ja häiriöttömän käytön kannalta tärkeä seikka. Sen takia laitoksella on puhdistus- ja kaasunpoistojärjestelmät. Vedestä poistetut kaasut käsitellään tarpeen mukaan kaasunpuhdistusjärjestelmissä. Jodi voidaan poistaa ilmasta aktiivihiihiisiodatimilla ja jalokaasuja, jotka eivät jää hiihiisiodatimiin, voidaan viivyttaa puhdistusjärjestelmissä, kunnes suurin osa aktii-

viisuudesta on poistunut. Tämän jälkeen ilma päästetään ulos ilmastointipiipusta, josta muuten virtaa vain voimallisuuden eri tilojen huoneilmaa. Piipusta poistuva ilma on siis yleensä täysin hengityskelpoista. Ilman mukana kulkee mahdollisesti jonkin verran tritiumia, hiili-14:ää tai pölyn kuljettamia aktivoitumistuotteita. Näiden pitoisuudet eivät kuitenkaan ole sen suurempia kuin laitoksen hengitysilmassakaan. Sellaisia piippuja, joiden sisällä (itse kanavassa) voidaan laitoksen käytön aikana asioida, löytyy Suomessa vain kahdesta paikasta — Loviisasta ja Olkiluodosta.

Puhdistettua prosessivettä, jota ei enää tarvita, voidaan tarkistusmittausten jälkeen laskea kontrollisäiliöstä mereen. Vesi voi olla puhdasta laitosperäisistä radioaktiivisista aineista tai se voi sisältää pieniä määriä niitä. Vastoin yleistä luuloa päästövesi täyttää kuitenkin useimmiten aktiivisuuspitoisuutensa puolesta jopa juomavedelle asetetut puhtausvaatimukset.

Päästörajat ja todelliset päästöt

Suomalaisille ydinvoimalaitoksille päästöarvoja määrättäessä Säteilyturvakeskuksen lähtökohtana on ollut, että päästöistä ei saa aiheutua enitenkään altistuneelle henkilölle enempää kuin 0,1 millisievertin (mSv) suuruinen säteilyannos vuodessa. Tämä arvo on viideskymmenesosa siitä mitä laki sallisi, ja se on parin prosentin luokkaa suomalaisten muista syistä saamasta keskimääräisestä säteilyannoksesta.

Käyttäen tätä arvoa lähtökohtana on voitu ”laskea taaksepäin” paljonko laitokset saisivat enintään päästää eri radioaktiivisia aineita ilmaan ja mereen. Näihin laskuihin tarvitaan myös tietoja paikallisista sääolosuhteista, eri aineiden kulkeutumismalleista, asukkaiden ruokailutottumuksista yms. Laskut tehdään konservatiivisesti eli ”varman päälle” lioittelemalla tarkoituksella eri reittien kautta aiheutuvat altistukset. Näin varmistetaan, että suurin todellinen altistus, jos laitoksen päästöt ovat päästörajan suuruiset, on pienempi kuin laskussa käytetty 0,1 mSv.

Kaikkien Suomen ydinvoimalaitosten aktiivisuuspäästöt ovat kuitenkin joka vuosi olleet huomattavasti alle päästörajojen. Ilmaan on yleensä päästetty alle tuhannesosa päästöarvoista ja mereen eri aineita tyypillisesti yhdestä kymmeneen prosenttiin. Näistä päästöistä lasketut säteilyannokset ovat paljon pienemmät kuin esim. sääolosuhteiden aiheuttamat muutokset luonnollisissa säteilyannoksessa. Päästöistä laskettu säteilyannos ”eniten altistetulle henkilölle” on ollut n. 0,002 mSv vuodessa. Tämä arvo on paljon pienempi kuin meistä jokainen (!) saa päivittäin (!) luonnon omasta säteilystä. Ympäristössämme on n. 70 luonnollista radioaktiivista nuklidia, jotka ovat olemassa täysin riippumatta ihmisten tekemisistä. Kerrottakoon vertailun vuoksi, että asunnoissa esiintyvä luonnollinen radioaktiivinen jalokaasu radon-222 aiheuttaa suomalaisille keskimäärin n. 3 mSv-yksikköä vuodessa.

Luonto ja normaalit päästöt

Pääsääntönä voidaan pitää, että olio on sitä herkempi säteilylle mitä kehittyneempi se on (esim. ihminen) ja kestää säteilyä sen paremmin mitä yksinkertaisempi se on (esim. puu). Koska hyvin toimivien ydinvoimalaitosten radioaktiivisuuspäästöt ovat niin pieniä kuin edellä on kuvattu, on itsestään selvää etteivät ne aiheuta metsävahinkoja sen enempää kuin perhoskatoa tai kissoissa geenimutaatioitaakaan. Tällaisia tuulesta temmattuja väitteitä kuulee kuitenkin silloin tällöin. — Jos 0,002 mSv vahingoittaisi metsää alueella, jonka luonnollinen säteilytaso on 1 mSv vuodessa, niin miten metsä jaksaisi alueella, jossa luonnon säteilytaso on esim. 2 mSv vuodessa?

Erään uskomuksen mukaan päästöjen aiheuttama ”keinotekoinen säteily on paljon vaarallisempaa” kuin luonnollinen säteily. Fysikaalisesti on kuitenkin kysymys samanlaisesta ilmiöstä. Molekyyli, johon säteilykvantti osuu, ei voi mitenkään tietää oliko säteen lähettänyt ydin luonnollinen vai ”keinotekoinen”.

Tässä yhteydessä voi olla mielenkiintoista tietää, että pienet radioaktiivisuuspäästöt eivät ole mitenkään ydinvoimalaitoksille ominaisia. Myös fossiilista polttoainetta käyttävät voimalaitokset päästävät vaihtelevia määriä radioaktiivisia aineita piipustaan.

Suuret onnettomuuden aikaiset päästöt

Nykyään useimmat ihmiset tietävät, että hyvin toimivien ydinvoimalaitosten käytön aikaisista päästöistä ei tarvitse tuntea huolta. Pelko suuntautuukin nykyään suuriin onnettomuuksiin ja korkea-aktiivisten jätteiden loppusijoitukseen. Pelkoa lisäsi melkoisesti keväällä 1986 tapahtunut Tshernobylin tuhoisa grafiittireaktorin palo. Kymmenen vuorokauden aikana valkoinen liekki puhalluslampun tavoin puhalsi kilometrin korkeuteen tuhoutuneen polttoaineen sisältöä tavalla, joka on mahdollista vain grafiittihidasteisilla reaktorilaitoksilla.

Tuulet kuljettivat radioaktiiviset savuhiukkaset maan rajojen yli, samoin kuin tuuli kuljettaa muitakin päästöjä. Kun merkittävät radioaktiivisuuspäästöt ovat harvinaisia, ei ollut mitään epäilystä mistä aineet olivat peräisin. Kun lisäksi säteilyn mittaaminen on helppoa ja tarkkaa Tshernobylistä peräisin olevia radioaktiivisia aineita löytyi hyvin monista maista.

Suomi kuului niihin maihin, joissa radioaktiivinen laskeuma oli voimakkainta. Edelleen ympärillämme ja kehossamme on Tshernobylin reaktorissa olleita cesiumatomeja. Näistä on laskettu aiheutuvan kaiken kaikkiaan 1—3 mSv:n suuruinen säteilyannos. Arvo on n. 1 % elämämme aikana aiheutuvasta kokonaissäteilyannoksesta ja vastaa sitä annosta, jonka asuntomme radon aiheuttaa meille vuosittain. Toisella tavalla sanottuna: asuntomme radonkaasu vastaa yhtä Tshernobylnonnettomuutta joka vuosi.



Ydinvoimaloissa toteutettava usean sisäkkäisen suojakerroksen periaate muistuttaa venäläistä Matrushka-nukkea.

Onnettomuuslaitoksen lähistöllä ”metsä palo” säteilystä. Se on kuitenkin nyt alkanut toipua ja vihertää uudelleen. Kauempana laitoksesta luonto ei ole kärsinyt.

Maailman toiseksi vakavimmassa ydinvoimalaonnettomudessa, Harrisburgissa yli kymmenen vuotta sitten, polttoainesydän vaurioitui täydellisesti, mutta mitään vahinkoa ympäristölle tai ihmisille ei säteilystä tai päästöistä aiheutunut. Three Mile Island -niminen laitos oli kevytvesireaktori, eli se edusti maailman yleisintä reaktorityyppiä.

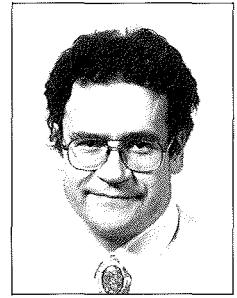
Matrushka-nukke

Valtaosa ydinvoimalaitoksen kaikista radioaktiivisista aineista sisältyy käytettyyn polttoaineeseen. Polttoaineen halkeamistuotteiden ja luonnon välillä on monta sisäkkäistä suojaseinämää. Rakenne muistuttaa venäläistä Matrushka-nukkea. Vasta kaikkien näiden esteiden peittäessä suuria määriä radioaktiivisia aineita voi joutua ympäristöön. Ensimmäinen este on itse uraanitabletti, joka on keraamisen kova, eikä mielellään päästä muita kuin kaasumaisia aineita poistumaan. Seuraavan esteen muodostaa kaasutiivis polttoainesauva. Uraanin ja polttoainesauvan rikkouduttua vastassa on itse reaktorin paineastia putkistoineen. Tämä on tiivis, paineenkestävä, paksusta teräksestä rakennettu järjestelmä. Reaktoripiirin ympärille on lisäksi useimmissa maissa ra-

kennettu tiivis, onnettomuuspaineen kestävä suojarakennus. Teräksinen suojarakennus sulkee termospullon tavoin koko reaktorijärjestelmän sisäänsä. Teräsrakennuksen ulkopuolella on vielä betoniseinä.

Jos maailma olisi alkanut toisin, eli siten että luolamiehet olisivat grillanneet pyydystämänsä peuran ydinsähköllä ja kehittyvä ihmiskunta olisi siitä lähtien tottunut ajatukseen, että syntyvät ei-toivotut sivutuotteet on aina kerättävä talteen, kompaktoitava ja tallennettava eristettynä luonnosta, niin miltä olisi ympäristökeskustelu näyttänyt silloin, kun uraanivarat olisivat alkaneet ehtyä ja teknologit olisivat ruvenneet puhumaan fossiilisten polttoaineiden käyttöönotosta ja jätteiden hävittämisestä LL-menetelmällä? □

FL Björn Wahlström on Loviisan voimalaitoksen säteilysuojelupäällikkö, p. 915-550 420.



Ydinjätteen huolto ja turvallisuus

Ydinvoiman tuotannossa syntyvien radioaktiivisten jätteiden huolto on toteutettava oikea-aikaisesti ja riittävän turvallisesti. Erityisen tärkeää on syvälle kallioperään loppusijoitettujen ydinjätteen sisältämien radioaktiivisten aineiden pääsyn estäminen elolliseen luontoon niin, että päästöistä aiheutuvat haitat pysyvät mahdollisimman pieninä. Suomessa on esitetty ratkaisumalleja, joissa teknisin ja luonnollisin vapautumisesteen turvallisuuksavoitteen toteutuminen. Turvallisuuden arviointi suoritetaan monivaiheisten matemaattisten mallien avulla ottaen monipuolisesti huomioon useiden eri tieteenalojen näkemykset.

Ydinjätteiksi kutsutaan ydinenergian tuotannossa syntyviä jätteenä, jotka sisältävät ionisoivaa säteilyä lähettäviä radioaktiivisia aineita. Ydinenergian tuotannon lisäksi radioaktiivisia jätteitä syntyy mm. sairaaloissa, radioisotooppeja hyväksikäyttävässä tutkimuksessa sekä tutkimusreaktoreissa.

Ydinenergiaa tuotettaessa radioaktiivisia jätteitä syntyy ydinpolttoainekierron kaikissa vaiheissa. Malmin louhinnassa ja rikastuksessa, uraanin väkevöinnissä sekä polttoaineen valmistuksessa ei synny uusia, keinotekoisia radioaktiivisia aineita, vaan kyse on ainoastaan luonnollisia radioaktiivisia aineita sisältävien materiaalien hankinnasta ja käsittelystä. Keinotekoiset radioaktiiviset aineet syntyvät itse energiantuotantovaiheessa reaktoreissa joko fissioiden tai rakennemateriaalien aktivoitumisen kautta.

Suomessa jätehuolto nykyisillä näkyvillä kattaa pelkästään polttoaineketjun jälkipään eli reaktorien käytöstä aiheutuvien keski- ja matala-aktiivisten laitosjätteiden, käytetyn polttoaineen sekä käytöstäpoistojätteiden edellyttämät käsittely-, varastointi- ja loppusijoitustoimenpiteet.

Suomen ydinvoimalaitokset tuottavat alustavien, turvallisuusselosteiden pohja-

na olevien arvioiden mukaan keskimäärin vuosittain seuraavat määrät ydinjätteitä:
— käytettyä polttoainetta 70 tonnia,
— keskiaktiivisia voimalaitosjätteitä 140 m³ ja
— matala-aktiivisia jätteitä 310 m³.

Vertailun vuoksi voidaan todeta saman vuosittaisen energiamäärän (18 TWh) tuottamisen kivihiililaitoksilla aiheuttavan 750 000 tonnia tuhka-jätettä, 3 500 tonnia lentotuhkaa, 400 000 tonnia rikinpoistosta syntyvää kipsijätettä sekä 20 miljoonaa tonnia hiilidioksidia.

Ydinjätteen määrät paino- tai tilavuusyksiköissä mitattuina ovat siten varsin vähäisiä lukuunottamatta uraanimalmin louhinnasta aiheutuvia jätteitä, jotka nekin malmin uraanipitoisuudesta riippuen materiaalmäärältään jäävät tyypillisesti alle 3 % vastaavan kokoisien kivihiililaitoksen tarvitseman kivihiilen määrästä.

Erityisesti käytetty polttoaine on kuitenkin alkuvaiheessa voimakkaasti radioaktiivista. Huolimatta erityisesti alkuvaiheessa varsin nopeasti tapahtuvasta aktiivisuuden vähenemisestä radioaktiivisen hajoamisen kautta käytetty polttoaine säilyy varsin pitkään niin vaarallisena, että se on eristettävä tehokkaasti ympäristöstä. Energiayksikköä kohden syntyvän jätemäärän pienuudesta johtuen on mahdollista huolehtia jätteiden pitkäaikaisesta eristämisestä hyvin huolellisesti. Tuhannen vuoden kuluttua yksi tonni käytettyä polttoainetta sisältää saman määrän aktiivisuutta kuin normaalin graniittikallion 200 m särmältään olevassa kuutiomaisessa lohossa keskimäärin oleva aktiivisuus (uraani tytärnuklideineen ja kalium-40). Miljoonan vuoden kuluttua polttoainetonnin aktiivisuus on laskenut tasolle, joka vastaa alle 50 m särmältään olevan graniittikuution sisältämää aktiivisuutta.

Ydinjätehuollon turvallisuus

Seuraavassa tarkastellaan lähemmin käytetyn polttoaineen huollon turvallisuutta, mutta myös muun tyyppisille jätteille sovelletaan vastaavanlaisia periaatteita ottaen kuitenkin huomioon niiden vähäisempi vaarallisuus.

Koko ydinjätehuollon ja erityisesti ydinjätteen loppusijoituksen päätavoitteena on estää tai rajoittaa jätteen sisältämien radioaktiivisten aineiden pääsy elolliseen luontoon ja edelleen ihmisen vaikutuspiiriin niin, että päästöistä aiheutuvat haitat pysyvät mahdollisimman pieninä.

YDINVOIMALAITOSTEN TUOTTAMAT JÄTTEET

Korkea-aktiivinen jäte (käytetty polttoaine)

Reaktoria käytettäessä lähes kaikki syntyvät fissiotuotteet jäävät polttoainesauvojen sisälle, joten käytöstä poistetun polttoaineen aktiivisuustaso on hyvin korkea.

Reaktorista poistettu käytetty polttoaine voidaan välivarastoinnin jälkeen toimittaa joko sellaisenaan kapselointilaitokseen ja edelleen loppusijoitettavaksi tai jälleenkäsittelylaitokselle.

Loviisan voimalaitoksen käytetty polttoaine palautetaan 5 vuoden väli-varastoinnin jälkeen takaisin polttoaineen toimittajalle Neuvostoliittoon. Olkiluodon voimalaitoksen käytetty polttoaine varaudutaan loppusijoittamaan Suomen kallioperään.

Voimalaitosjätteet

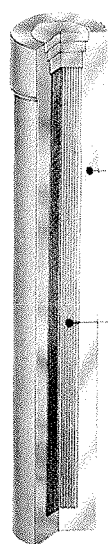
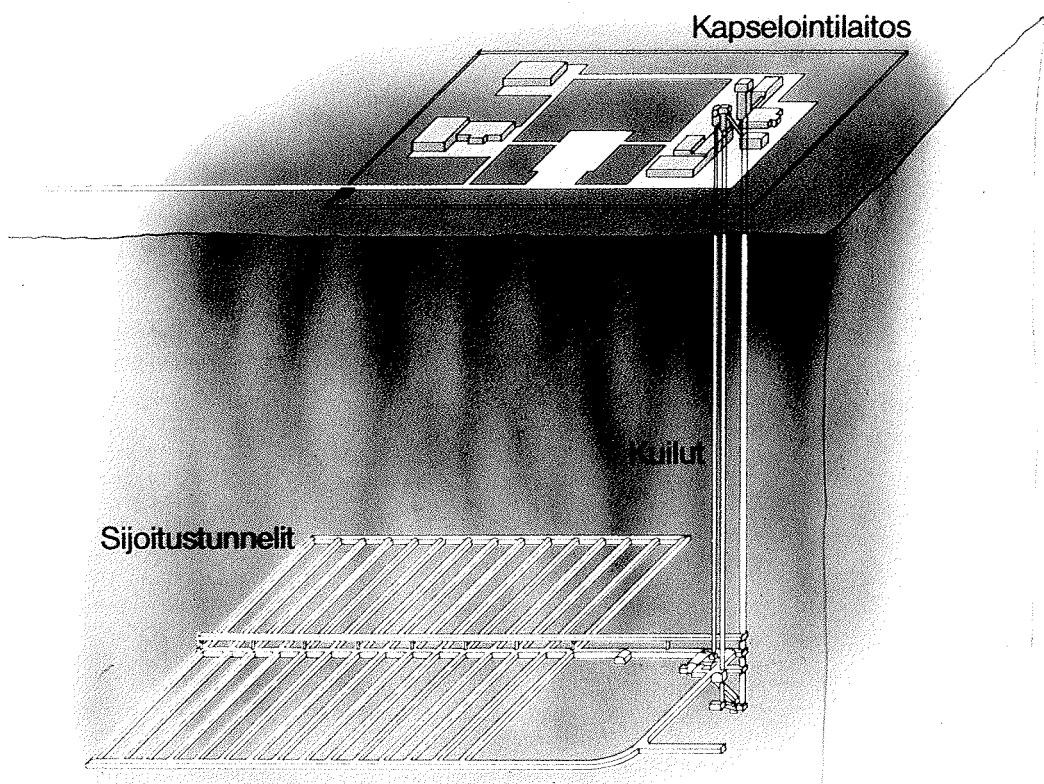
Voimalaitosten käytön ja huoltotoimenpiteiden aikana syntyy kaasumaisia, nestemäisiä ja kiinteitä jätteitä. Voimalaitosten käytön ja huoltotoimenpiteiden yhteydessä syntyvät voimalaitosjätteet käsittävät prosessivesien puhdistuksessa syntyviä ioninvaihtohartseja, haihdutuslietteitä, suodattimia ja niiden osia, kontaminoitunutta metalliromua, aktivoituneita metallijätteitä ja erilaisia lievästi saastuneita työvälineitä, suojavaatteita sekä puhdistusmateriaaleja.

Käytöstäpoistojätteet

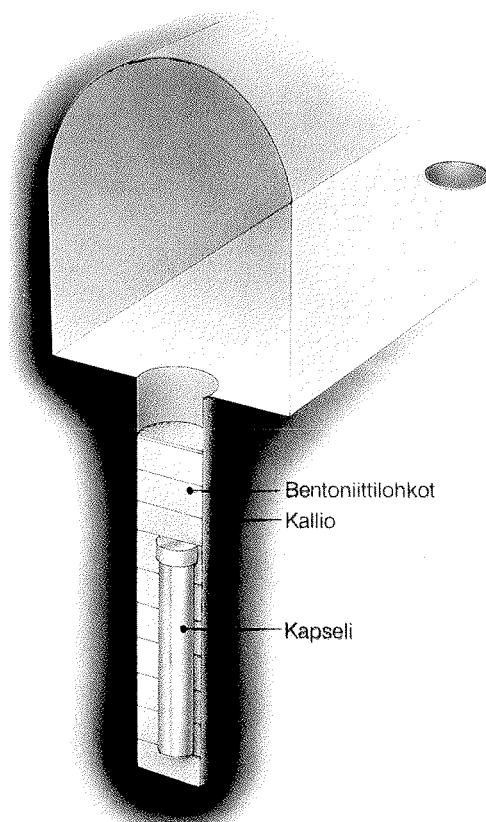
Käytöstäpoistojätteisiin puolestaan kuuluvat erilaiset aktivoituneet metallikomponentit (erityisesti reaktori-paineastia ja sen sisärakenteet) sekä kontaminoituneet ja aktivoituneet rakenteet ja laitteet (betonia tai metallia).

Tärkein mekanismi, jolla haitalliset aineet voivat joutua kallioperään tehdystä loppusijoitustilasta elolliseen luontoon, on niiden hidas liukeneminen jätteestä pohjaveteen ja kulkeutuminen sen mukana pintavesistöihin sekä edelleen lähinnä ravinnon ja juomaveden kautta ihmiseen.

KÄYTETYN POLTTOAINEEN LOPPUSIJOITUSTILAT



LOPPUSIJOITETTU KAPSELI



Esteet radionuklidien vapautumiselle peruskallioon louhitussa loppusijoitustilassa.

Loppusijoituksen ratkaisumallit

Oheisessa kuvassa on esitetty periaatteellisesti Teollisuuden Voiman nykyisten suunnitelmien mukainen käytetyn polttoaineen loppusijoitusratkaisu. Loppusijoitusta varten käytetty polttoaine suljetaan kapseleihin, jotka estävät pohjaveden pääsyn kosketuksiin radioaktiivisten aineiden kanssa. Kapselit sijoitetaan syväälle peruskallioon rakennettuihin tiloihin. Kapselit ympäröidään pohjaveden ja radioaktiivisten aineiden liikkumista estävällä täyteaineella. Tunnelit ja maanpinnalle johtavat kulut täytetään ja suljetaan. Radioaktiivisten aineiden on läpäistävä useita peräkkäisiä, toisiaan varmentavia vapautumisesteitä, ennen kuin ne voivat päästä kalliopohjaveden mukana loppusijoitustilasta elollisen luonnon piiriin.

Loppusijoituksen turvallisuuden perustana ovat sekä luonnolliset esteet että moninkertaiset, toisiaan varmistavat tekniset esteet. Vapautumisesteitä on tarkasteltava kokonaisuutena, jolloin yksittäisten esteiden pettäminen ei vielä sanottavasti muuta esteiden yhteisvaikutusta.

Yleisperiaatteena on, että tekniset esteet ovat tarpeellisia erityisesti alkuvaiheessa, jolloin aktiivisuus ja lämmönkehitys ovat suurimmillaan. Pitkällä aikavälillä turvallisuus perustuu lisääntyvässä määrin luonnollisiin esteisiin (nuklidien vähäinen liukoisuus, pohjaveden hidaskvirtaus, nuklidien pidättyminen, laimentuminen).

Tekniset esteet vaikuttavat radionuklidien vapautumiseen loppusijoitustilasta seuraavilla tavoilla:

1. Radionuklidit ovat pääosin sitoutuneet uraanioksiidiin, joka itsessään on heikosti veteen liukenevaa. Lisäksi jäteksen kanssa kosketuksiin joutuvan pohjaveden määrä ja vaihtumisnopeus ovat pieniä.
2. Itse kapselimateriaali ja sen seinämävahvuus on valittu viivästämaan erittäin pitkään kapselin syöpymistä puhki ja
3. Jätekapselien ja kallion välitila täytetään puristetulla bentoniittisavella. Sitteeseen vettä bentoniittikerros paisuu ja täyttää tiiviisti jätekapselin ja kallioerän välisen tilan ja varmistaa jätekapselin kanssa kosketuksiin joutuvan veden määrän ja liikkumisnopeuden pysymisen vähäisinä.

Kallioerän sekä pohjaveden ominaisuudet sekä pohjaveden liikkumisnopeus vaikuttavat merkittävästi turvallisuuteen. Pohjaveden liike kallioerässä on hidasta ja siinä olevien syövyttävien aineiden pitoisuudet ovat alhaisia. Siten sekä kapselin syöpymisen puhki että radionuklidien liukeneminen polttoaineesta sen jälkeen ovat erittäin hitaita. Luenneet radionuklidit reagoivat kemiallisesti kalliohalkeamien pinnoilla olevien aineiden kanssa. Tällöin muodostuu tasapainotilanne, jossa tarkasteltavat nuklidit ovat tietyn osan ajasta vedessä ja osan aikaa sitoutuneena kemiallisesti halkeamien pinnoille. Tämän seurauksena on nuklidien liikkeen hidastuminen pohjaveden liikkumisnopeuteen

nähdessä. Vastaavantapaisesti vaikuttavat myös eräät fysikaaliset ilmiöt.

Kallioerässä tapahtuvan kulkeutumisen jälkeen osa radionuklideista voi joutua joko pintavesistöihin, pintamaakerroksiin tai kaivoihin. **Biosfäärin** eri vesialtaissa veteen liunneet aineet laimentuvat edelleen tai voivat sitoutua pohjasedimentteihin. Laimenemiselle vastakkainen ilmiö on radionuklidien rikastuminen luonnon ravintoketjuissa.

Loppusijoituksen turvallisuuden arviointi

Loppusijoitusta koskevien turvallisuusanalyysien tavoitteena on arvioida luonnollisista ja teknisistä esteistä koostuvan loppusijoitusjärjestelmän toimintaa hyvin pitkien ajanjaksojen kuluessa. Turvallisuusarviointi edellyttää varsin monien eri tieteenalojen tietämyksen hyväksikäyttöä. Loppusijoituksen turvallisuuteen vaikuttavia tekijöitä voidaan kokeellisesti varmentaa osailmiöittäin, mutta loppusijoitusjärjestelmän kokonaisturvallisuustason arviointi on mahdollista suorittaa ainoastaan matemaattisia ennustemalleja hyväksikäyttäen.

Loppusijoituksen turvallisuuden arviointi voidaan jakaa keskenään vuorovaikutuksessa oleviin osakokonaisuuksiin. Turvallisuusanalyysin ensimmäisenä vaiheena selvitetään pohjaveden virtausmäärät ja -suunnat loppusijoitustilan ympäristön kallioerässä. Vesivirtausmääriä käytetään lähtötietoina seuraavassa vaiheessa analysoitaessa radionuklidien vapautumista kallioerään. Lisäksi on tunnettava pohjaveden ja kallioerän geokemialliset olosuhteet loppusijoitustilassa ja sen välittömässä ympäristössä. Loppusijoitustilan ilmiöiden analysoinnin tuloksena saadaan arvio radionuklidien vapautumisnopeudesta loppusijoitustilasta ympäröivässä kallioerässä virtaavaan pohjaveteen.

Arvioitaessa nuklidien kulkeutumista kallioerässä käytetään pohjavesivirtausanalyysin antamia tuloksia pohjaveden virtausajoista loppusijoitustilasta biosfääriin. Johtuen pohjavedessä liikkuvien radionuklidien fysikaalisista ja kemiallisista vuorovaikutuksista kallioerän ja rakominaalien kanssa radionuklidien kulkeutuminen on hitaampaa kuin pohjaveden liike.

Turvallisuusanalyysin viimeisenä vaiheena arvioidaan radioaktiivisten aineiden kulkeutumista biosfäärissä ja ihmisen altistumista radioaktiivisten aineiden aiheuttamalle säteilylle eri reittien kautta.

Turvallisuusanalyysin keskeisimpiä tuloksia on loppusijoituksesta eniten altistuvalla henkilöllä aiheutuva säteilyannos ja sitä vastaava terveysriski. Maksimiannos Olkiluodon laitosten koko käytetyn polttoainemäärän (n. 1300 tU) loppusijoittamisesta jäisi pieneen murto-osaan verrattuna luonnollisen taustasäteilyn keskimääräiseen tasoon Suomessa. Odotettavimmassa tapauksessa suurimmat säteilyannokset aiheutuvat luonnollisista radio-

nuklideista, jotka kuuluvat U-238 hajomisketjuun.

Turvallisuusanalyysissä on tarkasteltu myös tilanteita, joissa yksi tai useampi vapautumisestestä ei toimikaan odotetulla tavalla. Tällainen tilanne on oletettu syntyvän esimerkiksi siten, että kemialliset olosuhteet syvällä kallioerässä olisivatkin vastoin nykyisiä kokeellisia havaintoja hapettavia, mikä nopeuttaisi radionuklidien vapautumista ja kulkeutumista. Sellaistakin tilannetta on tarkasteltu, jossa jääkauden jälkeen loppusijoitustilan kohdalla oletetaan tapahtuvan kymmenien metrien suuruinen siirrosliikunto. Näissäkin tilanteissa arvioidut säteilyannokset jäävät selvästi luonnollisen taustasäteilyn tason alapuolelle. Jääkausien aiheuttaman eroosion arvioidaan Suomessa olleen viimeisen 600 miljoonan vuoden aikana joitakin kymmeniä metrejä, joten ei ole vaaraa eroosion vaikutusten ulottumisesta suunnitellulle loppusijoitusvyöhykelle 500 m asti.

Myöskin väestön kokonaisannoksen kertymisnopeutta on arvioitu turvallisuusanalyysissä. Itämeren rannikkoalueella säteilylle alttiiksi joutuvalla väestömäärällä (noin 20 milj.) vuosittain luonnollisesta taustasäteilystä aiheutuvan väestöannoksen kertymä on suuruusluokkaa 50 000 manSv/a ja Olkiluodon laitoksen koko käytetyn polttoainemäärän vaikutus olisi arvioiden mukaan enimmillään noin 0,0001 manSv/a samalle väestöryhmälle. Näin ollen väestöä kokonaisuutena tarkasteltaessa loppusijoituksen aiheuttama lisäys säteilykuormitukseen jää häviävän pieneksi. □

TkT Seppo Vuori on Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen ydinvoimatekniikan laboratorion erikoistutkija, p. 90-648 931.



Luonnon uraaniesiintymät mallina loppusijoitukselle

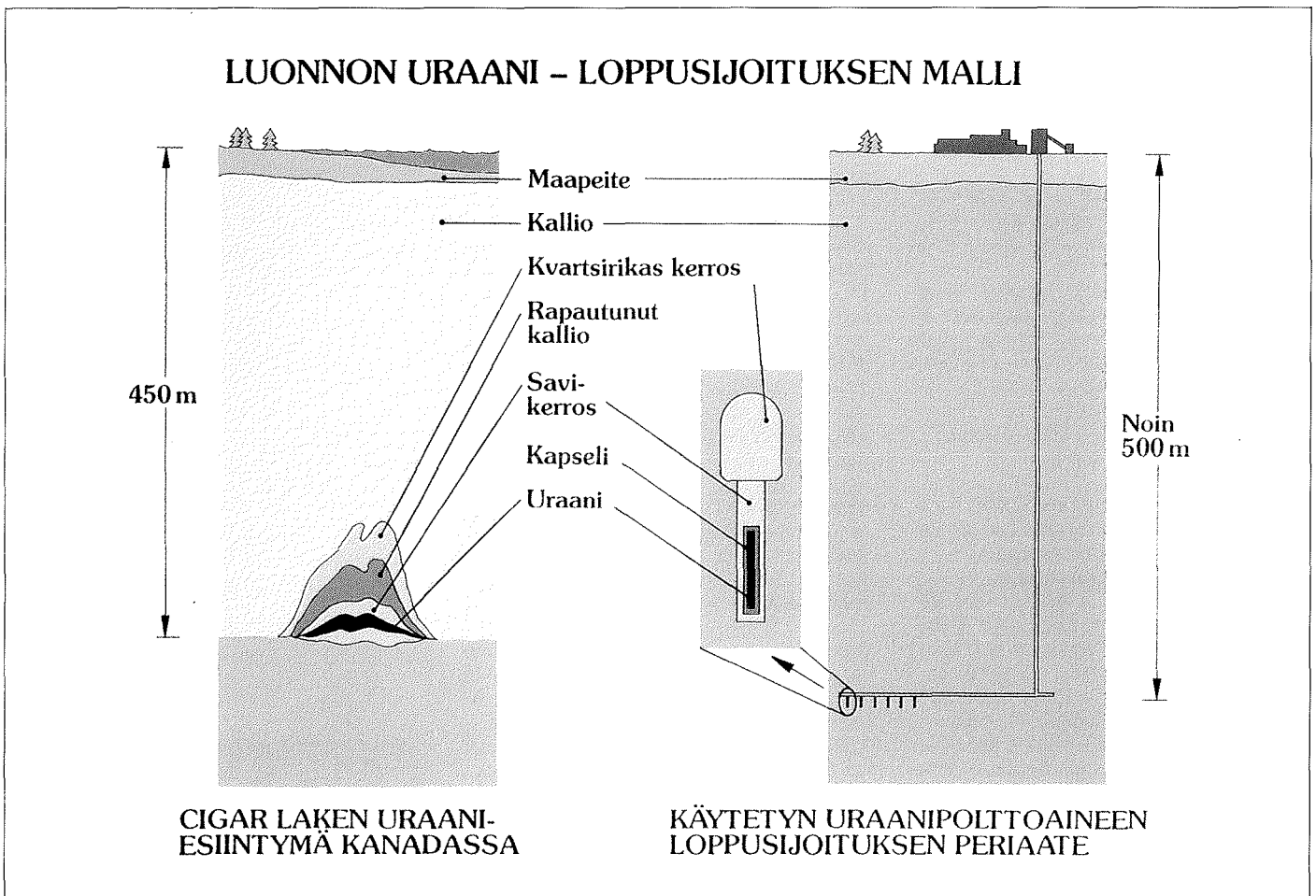
Maankuoren pintakerroksissa on esiintymiä, joissa uraanipitoisuus on jopa 60 %. Tämä on yli 100 000 kertaa enemmän kuin suomalaisessa kallioperässä keskimäärin. Uraani ja muut aineet ovat pysyneet esiintymissä paikoillaan miljoonia, jopa miljardeja vuosia. Nämä luonnon tekemät "loppusijoituskokeet" antavat arvokasta vahvistusta asiantuntijoiden käsitykselle, että suunniteltu käytetyn uraanipolttoaineen loppusijoitus kallioperään täyttää tiukimmatkin turvallisuus- ja ympäristönsuojeluvaatimukset.

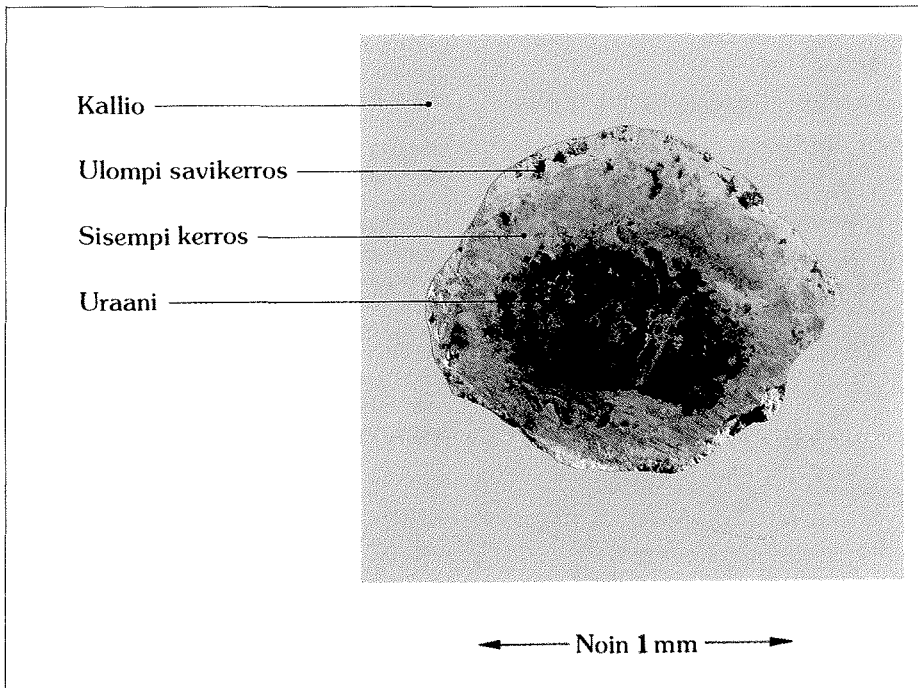
Kanadan Cigar Lakessa on uraaniesiintymä, joka on muodostunut 1 300 miljoonaa vuotta sitten. Tässä luonnon loppusijoitusmallissa ovat samat moninkertaiset esteet uraanin ja muiden radioaktiivisten aineiden eristämiseksi elollisesta luonnosta kuin suunnitellussa käytetyn polttoaineen loppusijoituksessa. Esiintymän uraani on kiinteässä muodossa kuten polttoainesauvoissa eli uraanioksidina (UO_2). Uraanikerros sijaitsee 450 metrin syvyydessä, ja loppusijoitusta suunnitellaan noin 500 metrin syvyyteen. Kerroksen uraanipitoisuus on jopa 60 %, joka on lähes samaa luokkaa kuin polttoainesauvoissa. Uraanin ympärillä on savikerros ja yläpuolella kvartsirikas kiviaineskerros, kuten suunnitellussa loppusijoitustilassa.

Tärkein ero on, että luonnon loppusijoitusmallissa uraani ei ole kestävässä metallikapselissa. Pienempi ero on lisäksi se, että luonnon mallin savi (illiitti ja kaoliiniitti) ei ole yhtä tehokasta kuin suunnitellun loppusijoituksen savi (bentoniitti),

joka sekin on luonnon tuote. Myös uraanin yläpuolella oleva hiekkakivikallio on luonnon mallissa epäedullisempaa kuin suomalainen kiteinen kallioperä: pohjaveden liikkuvuus siinä on vähintään kymmeniä, ehkä tuhansia kertoja voimakkaampaa. Lisäksi esiintymässä on uraania runsaat 150 000 tonnia eli noin 100 kertaa se määrä, jonka loppusijoitusta suunnitellaan Suomessa.

"Puutteistaan" huolimatta Cigar Laken luonnon "loppusijoituskokeilu" on toiminut erinomaisesti. Maan pinnalle ei ole kulkeutunut radioaktiivisia aineita. Paikalla on kairattu reikiä ja tehty tutkimuksia usean vuoden ajan. Tulokset osoittavat, että esiintymä on kiinni alapuolella olevassa kiteisessä kalliiossa ja että raja ympäröivään hiekkakivikalliioon on terävä. Uraani on pysynyt paikallaan jo 1 300 miljoonaa vuotta eli 1 000–1 000 000 kertaa sen ajan, joka on tarpeen turvallisuuden varmistamiseksi käytetyn polttoaineen loppusijoituksessa.





Luonnon uraaniesiintymissä eristää kaksikerroksinen savimainen kuori pienet uraanioksidikiteet kalliion pohjavedestä.

veteen liuenneet aineet pidättyvät ja tunkeutuvat ympäröivään kiveen. Tämän seurauksena niiden liikkuminen on paljon hitaampaa kuin pohjaveden, jopa pysähtyy kokonaan.

Luonto kokeillut ydinreaktoriakin

Afrikan Gabonista löydettiin vuonna 1972 Oklon luonnon ydinreaktori, joka "sammui" lähes kaksi miljardia vuotta sitten. Uraania ehti kuluu halkeamisreaktioissa (fissiossa) sama määrä, mitä tarvitaan 20 vuodessa valmista uraanipolttoainetta Olkiluodon ydinvoimalaitoksella: noin 800 tonnia. Energiaakin esiintymässä vapautui noin 15 000 MWa (130 miljardia kilowattituntia), parhaimmillaan yli 25 MWd uraanitonnia kohden, joka on lähes samaa luokkaa kuin ihmisen rakentamissa laitoksissa.

Luonnonreaktori sijaitsee Oklon uraani-kaivoksen alueella. Rikkain uraanikerros on muutamien kymmenien metrien syvyydessä hiekkakivikalliolla ja sen paksuus on vain muutamia metrejä. Luonnonreaktorin "sydämen" paksuus oli ja on

Syvyys ratkaisevaa

Toisin kuin Cigar Lakessa, uraaniesiintymiä on myös lähellä maanpintaa, mm. Australian Alligator Riversin ja Brasilian Pocos de Caldasin alueilla.

Australian esiintymä sijaitsee varsinkin pintaosastaan voimakkaasti rikkoontuneessa liuskekivessä 5—100 metrin syvyydessä. Ylimmässä 25 metrissä olosuhteet ovat loppusijoituksen kannalta erittäin epäedulliset: pohjavesi on hapettavaa ja sitä liikkuu suuria määriä. Tästä huolimatta uraani ja sen hajoamistuotteet ovat siirtyneet kuluneen 100 000 vuoden aikana vain alle 100 metriä. Syvemmällä pohjaveden liike on edelleen huomattavaa, mutta vesi on pelkistävää, kuten suomalaisessa kallioperässä. Uraani on tällöin pysynyt UO_2 :na (pikivälkkeenä), eikä ole liikkunut metrejäkään. Uusimmat tutkimukset ovat osoittaneet, että myös muut hajoamis- ja halkeamistuotteet ovat pysyneet syntysijoillaan.

Brasilian uraaniesiintymä on muodostunut noin 100 miljoonaa vuotta sitten ja sijaitsee tulivuoriperäisessä, voimakkaasti rikkoontuneessa kallioperässä (breksiasa). Avokaivoksen malmi ulottuu nykyisin noin 200 metrin syvyyteen. Lämpötila on ollut alunperin yli 600 astetta. Kallioperän vedenjohtavuus on 10—1 000 kertainen suomalaisen hyvään kallioon verrattuna.

Myös Brasilian kenttätutkimukset ovat vahvistaneet ydinjätteen loppusijoituksen turvallisuustutkimuksista tehtyjä johtopäätöksiä. Hapettavat olosuhteet eivät leviä etäälle kallioon. Lisäksi raja pelkistäviin olosuhteisiin on varsin terävä. Eri aineiden liukenevuus hapettavaankin veteen on vähäistä ja pienenee lähes olemattomaksi pelkistävässä vedessä. Kallioraon



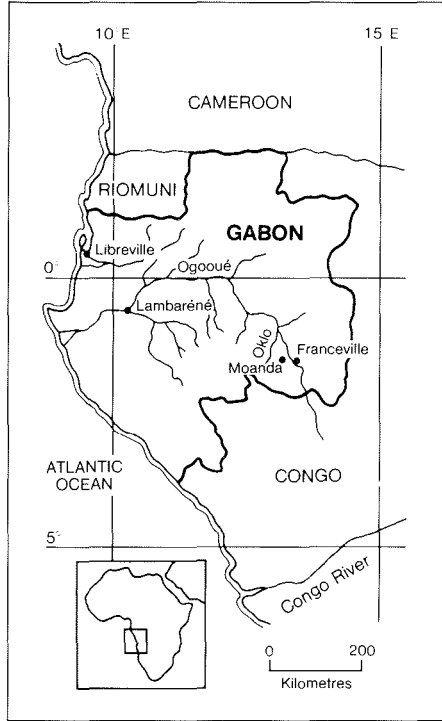
Luonnon ydinreaktorin sijainti Oklon kallioperässä. Reaktori toimi 1800 miljoonaa vuotta sitten.

yhäkin runsas metri. Esiintymää on tutkittu kairaamalla yli 150 reikää ja analysoimalla kivi- ja vesinäytteiden koostumusta, erityisesti isotooppisuhteita. Tulokset osoittavat, että raskaat alkuaineet kuten myös kevyemmät halkeamistuotteet ovat pysyneet käytännöllisesti katsoen paikallaan.

Uraaniesiintymiä myös Suomessa

Suomen kallioperässä ei ole sellaisia muodostumia, että uraania voisi olla yhtä suurina esiintyminä kuin varsinaisissa uraanimalmioissa. Meillä on kuitenkin joitain alueita, joissa uraanipitoisuus on pienellä alueella jopa 1 000 kertainen kallioperämme keskimääräiseen pitoisuuteen verrattuna. Yksi tutkittu alue on Nummi-Pusulän Palmottu-järvellä. Esiintymä on muodostunut noin 1 800 miljoonaa vuotta sitten ja se sijaitsee 50–200 metrin syvyydessä migmatiittikallioiden pohjaveden kemia on 100 metriä syvemmällä samalaista kuin suunnitellussa loppusijoituksessa eli pelkistävää ja happamuus noin 9.

Pohjavedestä mitatut uraanipitoisuudet vastaavat teoreettisilla laskelmilla saatuja



Oklo-joki sijaitsee Gabonissa Länsi-Afrikassa.

arvoja. Uraani on oksidina, kuten käytettyssä polttoaineessakin eli UO_2 :na, mutta pieninä uraniniittiteinä, halkaisijaltaan alle 1 millimetriä. Näitä rakeita ympäröi usein ohut savimainen kerros. Tutkimustulokset ovat paljastaneet, että torium ei ole liuennot uraania herkemmin, aivan kuten turvallisuuslaskelmissa on ennustettu. Lisäksi jopa uraanin radioaktiivisen hajoamisketjun viimeistä alkuainetta, lyijyä, on uraania ympäröivässä ohuessa savikerroksessa jäljellä merkittäviä määriä. Luonnon järjestämä moniesteriaate toimii siten millimetriskaalassakin. Suunnitellussa käytetyn polttoaineen loppusijoituksessa savikerroksen paksuus on lähes puoli metriä. □

TkT Esko Peltonen on TVO:n ydinjätetoimiston projektipäällikkö, p. 90-605 022.

Seppo Karttunen, VTT

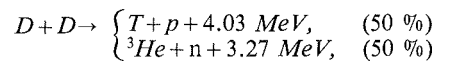
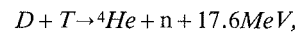
Kylmäfuusio ei tuo ratkaisua

Fuusioenergian suora valjastaminen ihmiskunnan käyttöön on unelma, jota on suurin ponnistuksin yritetty toteuttaa aina 1950-luvulta lähtien, jolloin rauhanomaiseen käyttöön tähtäävä osa suurvaltojen fuusiotutkimuksista julkistettiin. Tutkimustyö on ollut intensiivistä ja johtanut merkittäviin edistysaskeliin vuosien varrella. Tällä hetkellä ollaan perinteisessä fuusiotutkimuksessa aivan fuusioenergian teknis-tieteellisen toteutettavuuden kynnyksellä. Seuraavassa tarkastellaan tavanomaisen lämpöydinfuusion lisäksi kylmäfuusiota ja käydään läpi sensaatiouutisiin johtaneet Fleischmann & Ponsin ja Jonesin ryhmän koheet sähkökemiallisesta "fuusiosta". Parhaimmassakin ta-

pauksessa kyse on häviävän vähäisistä fuusioreaktioista, joilla ei ole merkitystä energiantuotantoa ajatellen.

Kevyiden atomiytimien yhtymis- eli fuusioreaktiossa vapautuva sidosenergia huolehtii auringon ja muiden tähtien lämmöntuotannosta. Samalla lähes kaikki alkuaineet aina rautaan saakka muodostuvat tähtien sisuksissa fuusioreaktioiden kautta. Siten fuusiolla on myös keskeinen rooli maailmankaikkeuden alkuaineiden tuotannossa. Auringon fuusioenergia ylläpitää elämää maan päällä ja suurin osa ihmisen käyttämistä energiamuodoista on epäsuorasti auringosta peräisin (vesivoima ja tuuli). Fossiiliset polttoaineet ja biomassa puolestaan edustavat kemiallisesti varastoitua auringon fuusioenergiaa. Poikkeuksena on fissioenergia, jossa vapautetaan supernovaräjähdyksissä muodostuneeseen uraaniin sitoutunutta energiaa.

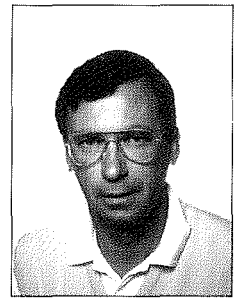
Energiantuotannon kannalta kiinnostavimmat fuusioreaktiot ovat vedyn raskaiden isotooppien deuteriumin (D) ja tritiumin (T) väliset reaktiot:

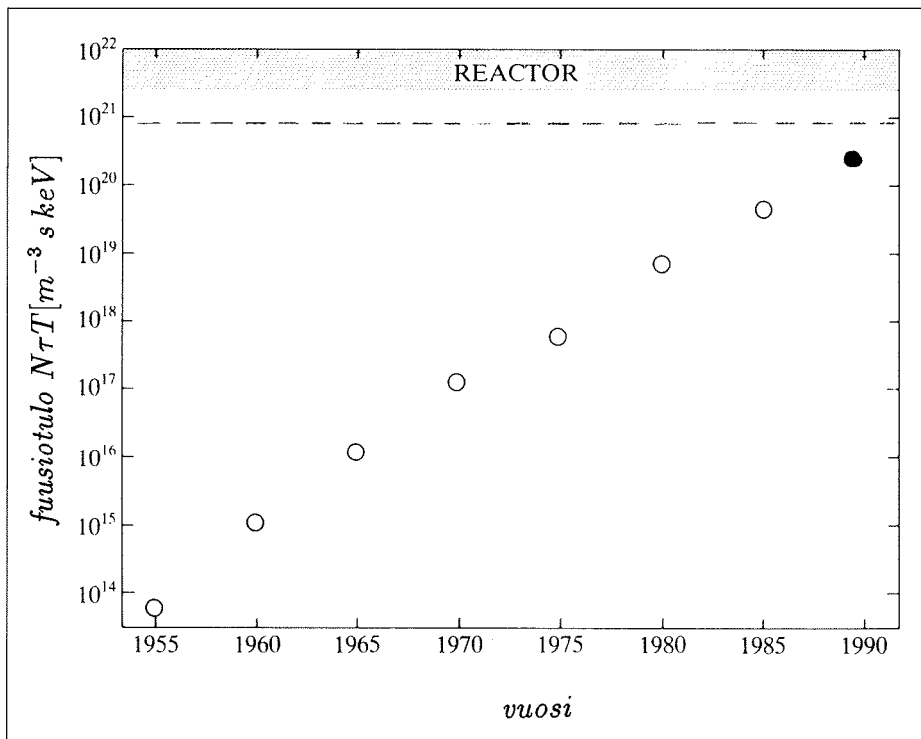


missä n ja p tarkoittavat ytimien rakenneosia neutronia ja protonia. Vapautuvat energiamäärät ovat valtavia — esimerkiksi DT -fuusiosta 95 000 kWh grammaa polttoainetta kohden. Yllä esitetyt reaktiot paljastavat myös, että fuusioenergia ei ole täysin puhdasta, sillä DT - ja DD -reaktioista vapautuvat neutronit aiheuttavat reaktorimateriaalien aktivoitumista ja tritium itsessään on radioaktiivinen — onneksi radiomyrkkynä lievä. Fuusioon liittyviä radioaktiivisuuskysymyksiä voidaan kuitenkin pitää merkittävästi helpompina fissioon verrattuna.

Lämpöydinfuusio miljoonissa asteissa

Fuusioenergian esteenä on positiivisesti varattujen ytimien välinen sähköinen poistovoima nk . Coulombin valli, jonka ylittäminen vaatii hiukkasilta hyvin suuren liike-energian. Koska ytimien törmäystilanteesta sironta on fuusioitumista huomattavasti todennäköisempi, on tilan-



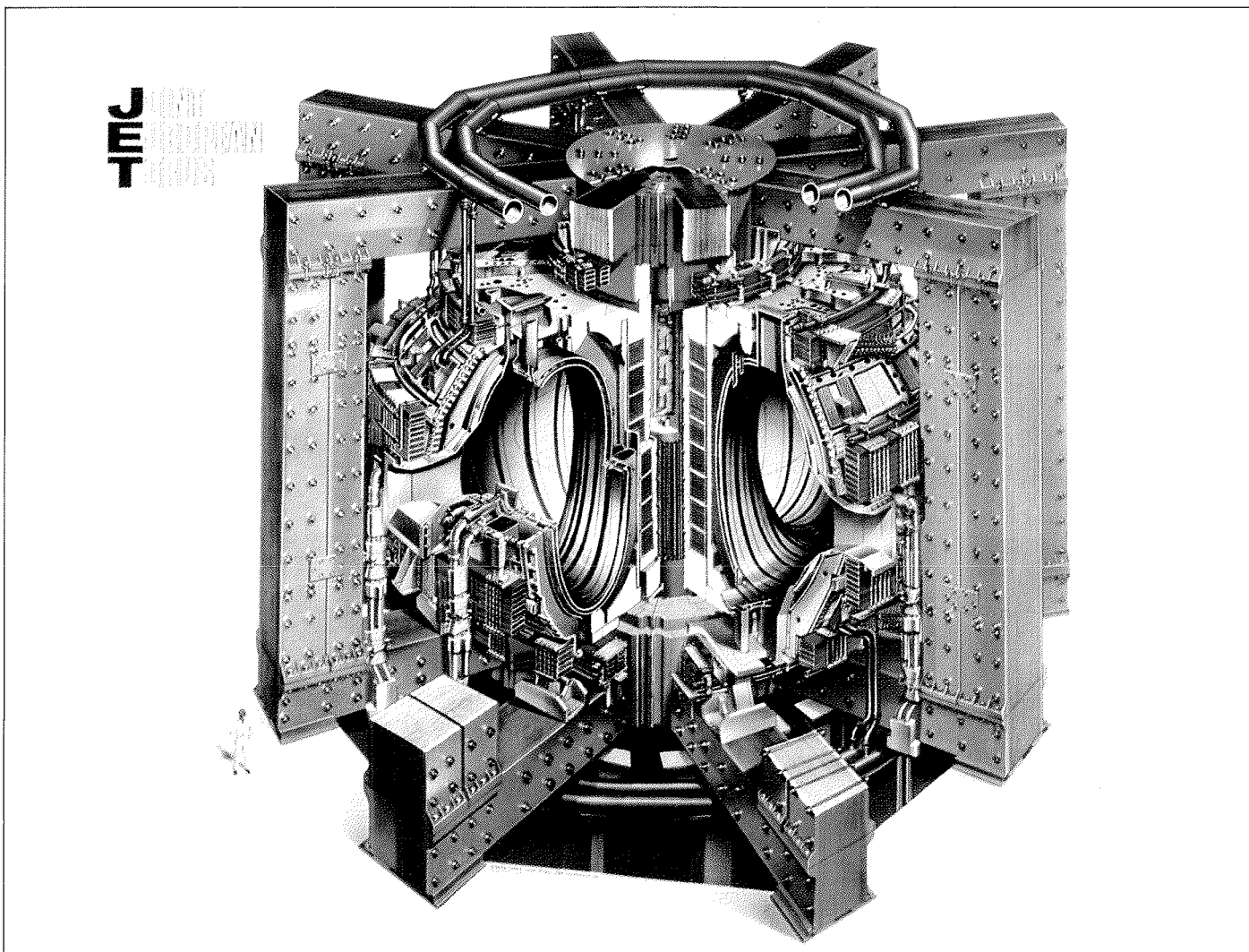


Fuusiotulon kehittyminen 1950-luvun puolivälistä lähtien. Fuusiovahvistuksen arvo 1 saavutetaan katkoviivan kohdalla.

ne järjestettävä siten, että törmäyksiä voi tapahtua toistuvasti. Suoraviivaisesti tämä voidaan tehdä kuumentamalla polttoaine niin korkeaan lämpötilaan, että hiukkasten lämpöliike riittää Coulombin vallin ylittämiseen. Lämpötilana tämä merkitsee DT-reaktiolle noin 100 miljoonaa astetta ($10 keV$). Tällöin polttoaine on täysin ionisoituneena nk. *plasmatilassa*, jota voidaan pitää aineen neljäntenä olomuotona kiinteän, nesteen ja kaasun jälkeen.

Korkean lämpötilan lisäksi nettoenergian tuottaminen edellyttää polttoaineen pitämistä koossa niin kauan että fuusioenergiaa ehtii vapautua enemmän kuin kuumentamiseen ja koossapitoon on käytetty. Koossapitoehdon nettoenergian saamiseksi lausuu nk. Lawsonin kriteeri: polttoaineen hiukkastiheyden N ja koossapitoajan τ tulo tulee ylittää tietty lämpötilasta riippuva minimiarvo. Tässä mielessä helpoin on deuteriumin ja tritiumin välinen reaktio, jolle $N\tau > 10^{20} m^{-3} s$. Tyypillinen polttoaineen tiheys magneettisesti koossapidetyissä plasmoidissa on $N = 10^{20} m^{-3}$, joten koossapitoajan tulee olla joitakin sekunteja.

Fuusiolaitteen hyvyttä voidaan kuvata fuusiotulolla $N\tau T$, missä T on polttoai-



Eurooppalainen JET tokamak (Joint European Torus), joka sijaitsee Englannissa. Laitteen korkeus on 12 m.

neen lämpötila. Edistysvauhtia fuusiotutkimuksessa kuvaa se, että kyseinen fuusiotulo on parantunut 1950-luvun puolivälistä noin tekijällä kymmenen aina viiden vuoden välein, kuten kuvasta 1 voidaan havaita. Tällä hetkellä fuusiotulon ennätysarvo on vain tekijän 3 päässä nettoenergiarajasta. Tulokset on saatu suurilla tokamak-laitteilla JET (Joint European Torus Englannissa) ja TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor Yhdysvalloissa). Tokamakeissa munkkirinkilän muotoinen kuuma polttoaineplasma pidetään koossa ja hallitaan voimakkailla magneettikentillä.

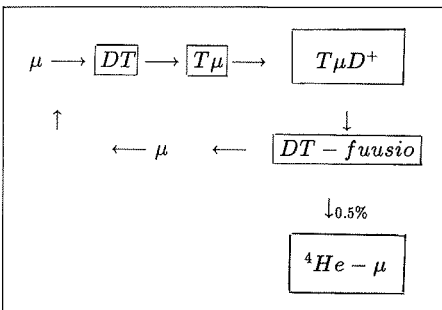
Kylmäfuusiolla ei läpimurtoa

A. Myonikatalysoitu fuusio

Kevyiden ytimien fuusioiminen ei välttämättä edellytä miljoonien asteiden lämpötilaa, mikä on kiistatta osoitettu myonikatalysoidussa fuusiossa. Teoreettisesti myonikatalysoidun fuusion ennustivat F.C. Frank ja A.D. Saharov jo 1940-luvun lopulla ja kokeellisesti sen havaitsi L.W. Alvarezin ryhmä noin kymmenen vuotta myöhemmin.

Perusideana on korvata osa deuterium-tritium polttoaineen elektroneista negatiivisesti varatuilla mutta n. 200 kertaa elektroneja raskaammilla alkeishiukkasilla μ -mesoneilla eli myoneilla. Näitä lyhytikäisiä hiukkasia voidaan valmistaa hiukkaskiihdyttimillä kohdistamalla kiihdytetty protonisuihku esimerkiksi berylliumkohtioon.

DT-pottoaineeseen ohjatut myonit muodostavat deuterium- ja tritiumydinten kanssa mesoatomeja $D\mu$ ja $T\mu$ sekä edelleen mesomolekyylejä $T\mu D^+$. Koska vetyatomien säde riippuu kääntäen elektronin massasta, mesoatomista tulee merkittävästi tavallista vetyatomia pienempi. Tästä johtuen deuterium- ja tritiumytimet joutuvat mesomolekyylin muodostuessa hyvin lähelle toisiaan ja fuusioituminen seuraa välittömästi tunneloitumalla Coulombin vallin ”läpi” (kvanttimekaaninen ilmiö). Tämän jälkeen myoni on vapaa katalysoimaan seuraavan fuusioreaktion ja niin edelleen. Sopivissa olosuhteissa mesomolekyylin muodostus voi tapahtua hyvin nopeassa 1 ns:n aikaskaalassa (miljardiososa sekunti). Siten ihannetapauksessa yksi myoni voi katalysoida yli tuhat fuusioreaktiota, koska myonin elinikä on 2.2 miljoonasosa sekuntia. Myonin valmistaminen vaatii pyöreästi 500 DT-reaktion energian (10 GeV), mikä merkitsee,



Myonikatalysoidun DT-fuusion eri vaiheet.



B. Stanley Pons (vasemmalla) ja Martin Fleischman esittelevät kylmäfuusiotutkimukseen käytettävää ”koereaktoria”.

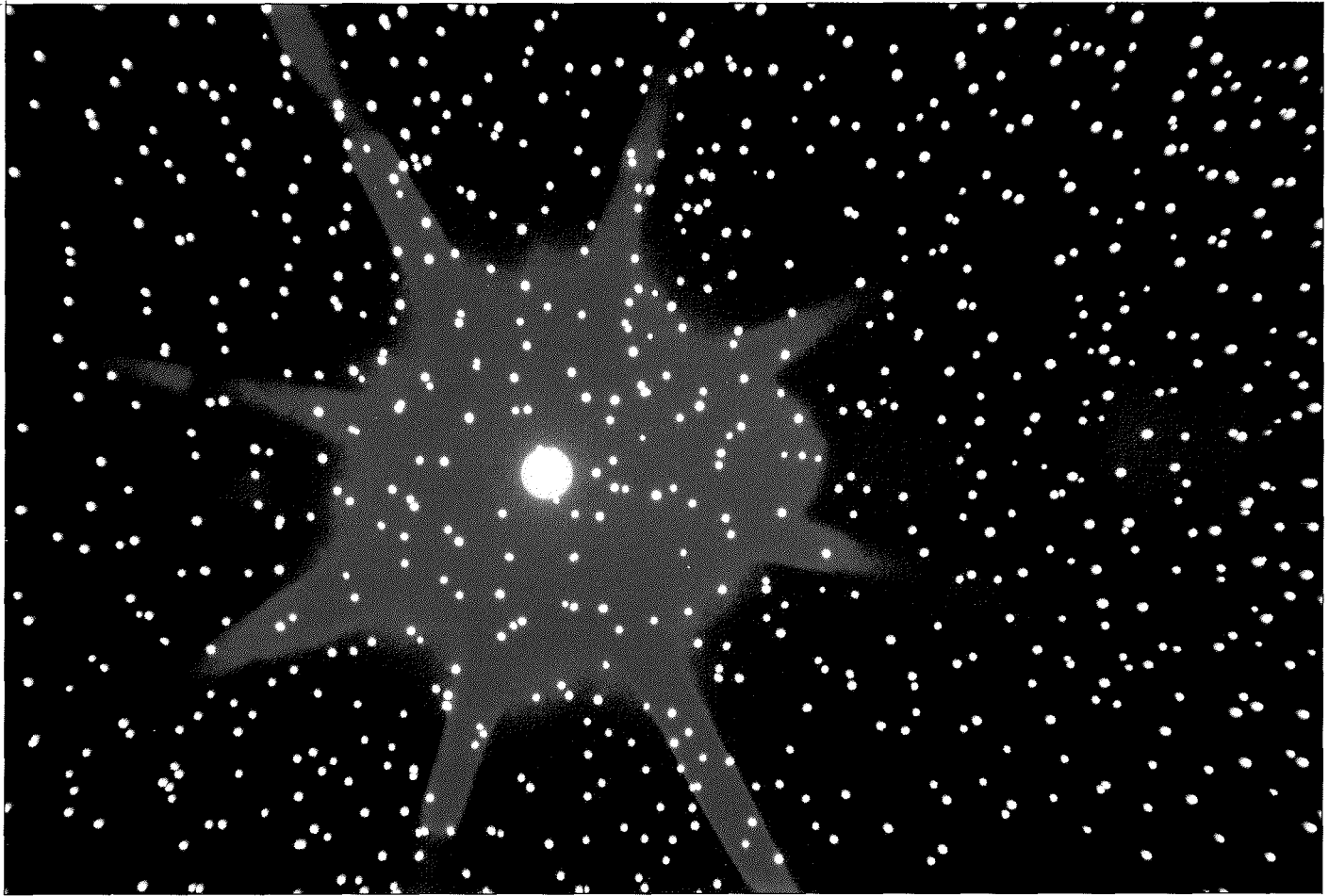
että nettoenergian tuottaminen myonikatalyysilla on ainakin periaatteessa mahdollista.

Vaikein fyysikaalinen ongelma myonikatalyysissa on myonin takertuminen fuusiossa syntyvän ^4He -ytimen seuralaiseksi. Loppuelinäkanaan myonin vapautuminen heliumista on epätodennäköistä ja siten kyseinen myoni ei voi katalysoida lisää fuusioita. He-takertumisen todennäköisyydeksi on saatu kokeellisesti 0.5 %. Tämä merkitsee keskimäärin vain 200 fuusiota myonia kohden, mikä ei riitä kattamaan myonin valmistukseen kuluvaa energiaa. Siten myonikatalysoitu fuusio voi tulevaisuudessa soveltua energian tuottamiseen vain, mikäli myonin tekemiseen tarvittavaa energiaa ja He-takertumisen todennäköisyyttä voidaan merkittävästi alentaa.

B. Sähkökemiallisesti indusoitu fuusio?
Martin Fleischmann ja Stanley Pons Uta-

hin yliopistosta hätkähdyttivät maailmaa maaliskuun lopulla 1989 ilmoittamalla onnistuneensa fuusioimaan deuteriumia hyvin yksinkertaisella koelaitteistolla [1]. Mikäli kyse olisi todellakin fuusiosta, koe jäisi historiaan. Valitettavasti Fleischmann ja Pons unohtivat tiedemiehen tärkeimmän hyveen — kriittisyyden — paljastaessaan spekulatiionsa tiedotusvälineille. Seuraavassa esitetään lyhyt yhteenveto Fleischmannin ja Ponsin kokeesta ja heidän väitteistään.

Kokeen elektrolyysilaitteisto muodostui palladium-katodista ja sen ympäri kierretystä platina-anodista. Liuoksena oli raskas vesi D_2O ja litiumhydroksidi LiOD, jossa vety oli korvattu deuteriumilla. Palladium on tunnetusti metalli, joka imee itseensä hanakasti vetyä (tai deuteriumia). Toisaalta elektrolyysi on paljon käytetty menetelmä pyrittäessä suuriin vetypitöisyyksiin metalleissa.



Elämämme pitää yllä auringossa tapahtuva fuusioreaktio.

Kokeessa havaittu lämmöntuotto palladium-katodissa riippui Pd-katodin geometriasta. Parhaat mittaustulokset saatiin sauvakatodista. Mitatut tehoiheydet olivat parhaimmillaan $10W/cm^3$ ja lämmöntuotto kesti yli 100 tuntia, josta energiantuotoksi saadaan noin $4MJ/cm^3$. Tekijät väittivät tuottavansa enemmän energiaa kuin elektrolyysin ylläpitämiseen kuluu.

Fleischmann ja Pons ehdottivat lämmöntuottomekanismiksi DD-fuusioreaktiota. He arvioivat gammamittaustensa perusteella neutronituotoksi Pd-katodissa noin 40 000 n/s olettaen gammasäteilyn olevan peräisin vedyn neutronikaappauksesta. Tritiumin määrä mitattuna elektrolyysiliuoksesta ei ollut heidän mukaansa ristiriidassa neutronien kanssa, kun oletetaan sama todennäköisyys molemmille DD-reaktion haaroille. Fuusiotuotemittaukset oli suoritettu erittäin puutteellisesti, eikä niistä tehtyjä johtopäätöksiä voida katsoa tieteellisesti kestäviksi. Sekä gammasäteilyn että tritiumin havainnoille löytyy fuusiota paljon yksinkertaisempi selitys taustasäteilyn eri osatekijöistä.

Vaikka lähtökohdaksi otetaan Fleischmannin ja Ponsin edellä mainittu yliopistiminen arvio fuusioneutronien tuotolle, jäisi fuusiotehoiheys DD-reaktiosta miljardikertaisesti alhaisemmaksi suoraan lämmöntuotomittaukseen verrattuna. Sitten DD-fuusio ei voi missään tapauksessa selittää havaittua lämmöntuottoa. Toden-

näköisin selitys lämmöntuotolle on jokin huomaamatta jäänyt tai uusi sähkökemiallinen ilmiö tai suoranainen mittausvirhe.

Välittömästi Fleischmannin ja Ponsin kokeen julkistamisen jälkeen tiedotti Steven Jonesin ryhmä Brigham Young yliopistosta, myös Utahista, omasta samantyyppisestä kokeestaan [2]. Jonesin ryhmä on tehnyt aiemmin korkeatasoisia töitä myonikatalysoidun fuusion alueella [3]. Myös tämä koe perustui elektrolyysiin, jossa katodina käytettiin joko palladiumia tai titaania.

Jonesin ryhmä mittaa neutronien energiaksi 2–3 MeV, mikä puoltaa DD-fuusion mahdollisuutta. He eivät mittaa tritiumia eikä lämmöntuottoa. Neutronituoton suuruusluokka mittausten mukaan olisi 0.1–1 n/s, mikä on yli neljä kertalukua alhaisempi kuin Fleischmannin ja Ponsin ”havainto”. Jonesin kokeen fuusiolämmön tehoiheydeksi saadaan hyvin vaatimaton arvo 10^{-13} – $10^{-12}W/cm^3$. Kyseinen fuusiotuotto on energiantuotto-sovellutusten kannalta toivottoman alhainen, mutta olisi fysikaalisesti mielenkiintoinen.

Neutronimittausten osalta Brigham Young yliopiston tulokset vaikuttavat luotettavammilta kuin Fleischmann-Ponsin kokeessa. Nyt liikutaan kuitenkin tilastollisen merkittävyyden rajamailla eikä

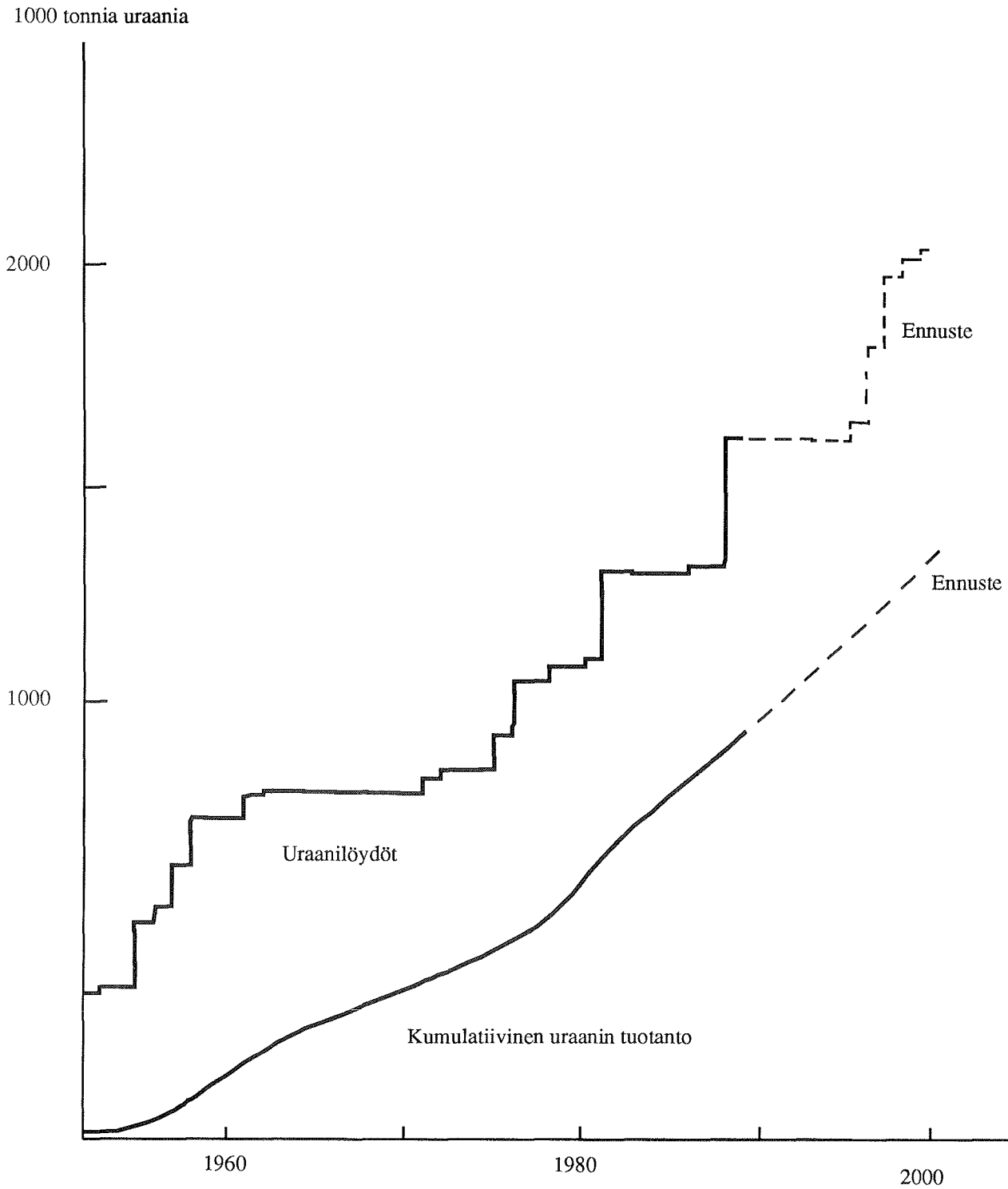
esimerkiksi kosmisen säteilyn synnyttämien neutronien mahdollista osuutta mitauksessa voida täysin poissulkea [4]. Koe on hyvin yksinkertainen toistaa ja lähitulevaisuudessa saataneen varmistus onko Jonesin ryhmän havaitsema häviävän pieni fuusiotodennäköisyys totta vai oliko se vain taustasäteilyn aiheuttama tilastollinen harha. □

Lähdekirjallisuutta

1. M. Fleischmann and S. Pons, *Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium*, J. Electroanal. Chem. 261 (1989) 301.
2. S.E. Jones, E.P. Palmer, J.B. Czirr, D.L. Decker, G.L. Jensen, J.M. Thorne, S.F. Taylor and J. Rafelski, *Observations of cold nuclear fusion in condensed matter*, Nature 338 (1989) 737.
3. J. Rafelski and S.E. Jones, *Cold nuclear fusion*, Scientific American, July 1987, p. 66.
4. J.M. Carpenter, *Cold fusion: what's going on?*, Nature 338 (1989) 711.

TkT Seppo Karttunen on VTT:n ydinvoimatekniikan laboratorion erikoistutkija, p. 90-451 3196.

Länsimaiden huomattavat uraanilöydöt ja uraanin kumulatiivinen tuotanto



Lähde: The Uranium Institute, 1989 14th International Symposium

TERVEELLISTÄ SÄTEILYÄ?

■ Radon tunnetaan vaarallisen kaasuna, johon on syytä suhtautua kunnioitukseksi ja pelolla. Se lisää riskiä sairastua keuhkosyöpään, sanovat asiantuntijat. Kaikki eivät kuitenkaan varo radonia.

Jotkut uskovat, että radonkaasu on terveellistä. Sen väitetään parantavan mitä tahansa hilseestä niveltreumaan. Ihmiset pääsevät nauttimaan kaasun parantavasta vaikutuksesta esimerkiksi Montanan osavaltiossa Yhdysvaltojen luoteisosassa. Parhaita paikkoja ovat toimintansa lopettaneet uraanikaivokset.

Parantava radonannos on sekin selvillä: kaksi tunnin

mittaista visiittä päivittäin yhdentoista päivän ajan. Innokkaat hoidokit laskeutuvat kaivoskuiluihin, istuvat pehmustetuilla penkeillä ja hengittävät voimakkaasti ilmaa, jossa on radonia.

Kroonisesti sairaita on hakeutunut kaivoksiin jo vuosikymmenten ajan — vanhin Montanassa toimiva "terveyskaivos" aloitti 1952. Iloinen leski-kaivoksen johtaja väittää, että 90 % kävijöistä hyötyy radonista. Kivet häviävät, turvotus vähenee, nivelet liikkuvat norjemmin ja haavauumat paranevat.

Montanan terveysviranomaisien mielestä kohtuullisena pysyvä radonhoito ei



juuri vaarana terveyttä. Viranomaiset eivät kuitenkaan pysty ymmärtämään, mitä hyötyä hoidosta voisi olla.

Kaivoskäytävän pehmustetuilla penkeillä istuvat hoidokit uskovat vaivojensa paranevan tai lievenevän radonin avulla.

Tiede 2000 lehdessä numerossa 4/1989 kerrotaan, että Yhdysvalloissa myös pelätty radonkaasulla tehdään bisnestä.

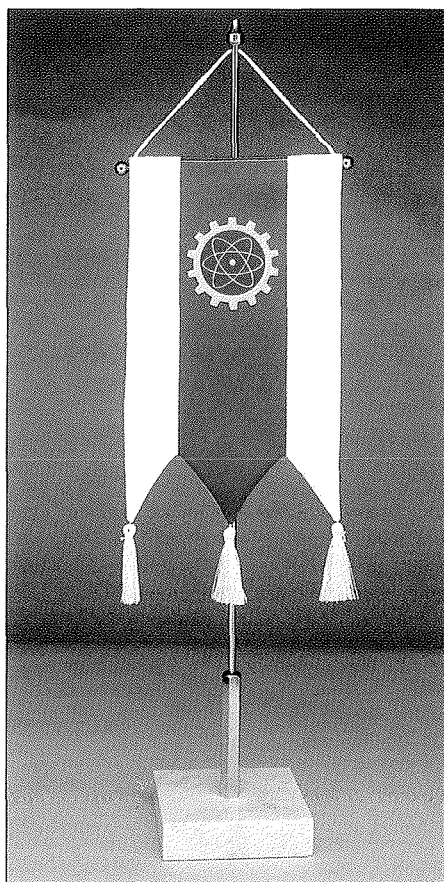
Suomen Atomiteknillinen Seura

Helsingin Sanomissa oli toukokuun 26. päivänä 1966 kirjoitus, jonka otsikko oli "Atomiteknillinen seura perustettu". Seuraavassa joitakin otteita artikkelista: "Helsingissä on perustettu Suomen Atomiteknillinen Seura tieteellisteknillisen yhteistoiminnan aikaansaamiseksi ja organisoimiseksi atomiteknikan alalla.

Seuran tarkoituksena on toimia yhdyssiteenä jäsentensä kesken kokemusten vaihtamiseksi ja ammattitaidon syventämiseksi... Sen tarkoituksena on myös seurata alan kehitystä olemalla yhteydessä ulkomaisiin vastaaviin seuroihin ja kansainvälisiin järjestöihin, millä taataan nopeasti tapahtuva teknillisen tiedon leviäminen maahamme."

Edelliseen ei ole Seuran tarkoituksien kohdalta 23 toimintavuoden jälkeen paljoakaan lisäämistä. Tehostunut tiedotus Seurasta ulospäin on kuitenkin tällainen, hieman uudempi toimintamuoto. Neljästi vuodessa ilmestyvä ATS Ydintekniikka on tiedotuksen lippulaiva, mutta myös erillisiä tiedotteita, lausuntoja, kirjoja, esitteitä ja jopa filmejä on Seura tuottanut.

Seuran jäsenmäärä on noin 550 henkilöä ja kannatusjäseniä eli eri yrityksiä on 26 kappaletta. Jäsenistö työskentelee pääasiassa korkeakouluissa, tutkimuslaitoksissa, Säteilyturvakeskuksesta ja muualla



valtionhallinnossa, voimayhtiöissä ja teollisuudessa. Yleensä heidän taustansa on tekninen. Mutta ajan merkit ovat selvät: viime vuoden aikana on mukaan tullut ensimmäinen humanisti myös koulutukseltaan ja Seuran viime kokouksessa hyväksyttiin jäseneksi myös aito lehtimies.

Seuran toiminnan rungon muodostavat 6–8 kuukausikokousta, joissa kuullaan alan parhaita asiantuntijoita. Vuosittain tutustutaan ydintekniikkaan koti- ja ulkomailla ekskursioiden merkeissä.

Kansainvälisiä asioita hoidetaan lähinnä tiiviissä yhteistoiminnassa Euroopan Ydinteknillisen Seuran (ENS, European Nuclear Society) kanssa. Suomella on tällä hetkellä kaksi edustajaa ENS:n johtavissa elimissä: Klaus Kilpi on ENS:n hallituksessa ja Juhani Santaholma johtaa ENS:n informaatio-komiteaa. ATS:n nykyinen johtokunta ja muut toimihenkilöt ovat luettavissa tämän lehden etukannesta.

Suomen Atomiteknillinen Seura — Atomtekniska Sällskapet i Finland r.y. tulee jatkossakin toimimaan aktiivisesti ja siten hoitamaan leiviskänsä ydintekniikan alalla jäsentensä ja kaikkien suomalaisten hyväksi!

*Jorma Aurela,
ATS:n sihteeri*

English Abstracts

Special issue: 200 Years of Uranium and 50 Years of Fission

Editorial: Electricity from Stone

Ilkka Mikkola (page 1)

The German scientist Martin Klaproth first reduced uranium dioxide from coal some 200 years ago. Uranium's enormous energy content was not, however, discovered until 50 years ago, and its potential for electricity generation was not tapped until as recently as the mid-sixties. The Finnish Nuclear Society is commemorating these notable events with the publication of this special feature edition on the latest developments in the uranium field. Also included are articles on the fascinating history of this age-old element and the early days of its utilization as a source of energy.

The Exploitation of Nuclear Energy in Finland — High Points and Memorable Events

Pekka Jauho (pages 2—3)

Compared to many other countries, Finland has adopted a systematic and carefully considered approach to the use of nuclear energy. This new form of energy has, from the very earliest days, been viewed as an integral part of general energy production, and the measures adopted have focused on bringing it into use safely, economically and at the right time. But one should not be misled into thinking that the path taken by Finland has been a straightforward decision-making process; quite the reverse, in fact, it has been a winding trail of many consecutive and sometimes illogical decisions. Despite the missed turnings and backtracking, Finland's chosen road has brought her finally to end-result of considerable merit.

Creation of Uranium

Rainer Salomaa (pages 4—6)

The basic processes occurring in astrophysical nucleosynthesis are described. According to the present view, uranium is created in rapid neutron captures from iron group elements. The most probable sites of uranium generation are supernova explosions. The Supernova 1987A offers an excellent test-bed for checking the present models of nucleosynthesis.

Geological History of Uranium

Heikki Niini (pages 7—10)

Uranium is widely distributed in continental geological environments. The order of magnitude of uranium abundance in felsitic igneous rocks is 2—15 ppm, whereas it is less than 1 ppm in mafic rocks. Sedimentary rocks show a large range: from less than 0.1 ppm U in certain evaporites to over 100 ppm in phosphate rocks and organogenic matter. The content of U in seawater varies from 0.0005 to 0.005 ppm. The isotopic ratio U-238/U-235 is presently 137.5 ± 0.5 , having gradually increased during geological time. The third natural isotope is U-234.

On the basis of three fundamental economic criteria for ore reserves assessment (geological assurance, technical feasibility, and the grade and quantity of the deposits), the author finally comes to the following conclusions: Although the global uranium ores are not geologically renewable but continuously mined, they still, due to exploration and technical development, will tend to progressively increase for centuries to come.

Uranium Exploration in Finland

Olli Äikäs (pages 11—13)

Wiikite, a REE-bearing niobate was the only uranium mineral known in Finland until the 1950s. Exploration for uranium ore deposits started in 1955. The first discoveries of 1955—57 triggered off a uranium rush that resulted in a number of claimed prospects. In 1958—61 a private company, Atomenergia Oy, developed its property to a stage of mining and ore dressing on a pilot-plant scale. During this time a total of 40 000 tonnes of ore was hoisted, grading 0.1—0.2 % U. The end of these operations also marked the end of the rush. Up to the mid-1980s, however, uranium exploration was carried on in Finland. Several uranium deposits were found but the evaluation tests showed them to be too small or of too low a grade to be exploitable. At present there is no uranium exploration going on in Finland.

In terms of the OECD/IAEA classification scheme, Finland has Reasonably Assured Resources of 1 500 tonnes U in the cost category 80—130 US\$/kg U, and 2 900 tonnes in the category 130—260 US\$/kg U.

History of the Use of Uranium

Jorma K. Miettinen (pages 14—17)

Uranium was found 200 years ago, though the first use for it — in colouring glass yellow, orange or green — was only found 40 years later. When its radioactivity was discovered in 1896, interest in research into uranium increased and for a brief period it was used for improving the ductility of steel. The isolation of radium from uranium ore in 1904 caused a boom for uranium mining for radium. It found use in healing skin cancer, for various "health" preparations like radon-containing water, and for making self-luminous paints.

The discovery of fission 50 years ago increased the use of uranium into large industrial-scale applications. For fission weapons highly enriched U-235 and Pu-239 were needed. Today the main use is for uranium enriched to about 3 per cent U-235 for light water power reactors. Other important uses are for submarines, icebreakers and satellites.

Uranium — Production Process and World Trade

Ilkka Mikkola (pages 18—19)

The price of uranium at the beginning of 1989 was less than FIM 200 per kilo. The long-term average price is higher, however, and based on this the West's annual trade in uranium is valued at about FIM 10 billion. When uranium enrichment and fuel production are included, the worth of the uranium industry's trade is about FIM 30 billion. Fluctuations in the price of uranium do not, however, have any essential effect on the competitiveness of electricity generated by means of uranium. The reason for this is that uranium ore contributes less than 1 penny to the cost of generating 1 kilowatt hour by means of nuclear fission. Total production costs — for example, at the Olkiluoto nuclear power station — amount to about 12 pennies per kilowatt hour.

Uranium's Transformation from Mineral to Fuel Bundles

Anneli Nikula (pages 20—21)

Uranium undergoes chemical transformation phases before it can be used in the nuclear power plant. In first phase uranium is transformed from mineral to yellow cake, in which uranium is in the

form of U_3O_8 . After that comes conversion ($U_3O_8 \rightarrow UF_6$) and enrichment (0.7 % \rightarrow 3 % U-235). Finally, uranium is converted in fuel fabrication to uranium dioxide, UO_2 , and fuel pellets are made.

International Control of Nuclear Materials

Hannu Koponen (page 22)

Nuclear materials are subject to both national and international safeguards control. The International Atomic Energy Agency (IAEA) takes care of the international safeguards control. The control activities, which are discussed in this article, are carried out according to the agreements between various countries and the IAEA.

World Uranium Supply — Will There be Enough?

Richard M. Williams (pages 23—25)

The adequacy of the uranium supply over the long term is of critical concern to nuclear power decision-makers in all countries. Current uranium production levels in the western world are about 40 000 tonnes of uranium a year, which is roughly in balance with requirements. How long will the world's known uranium resources last, and what is the potential for additional supplies? Will supplies be forthcoming if Finland or some other countries were to double or triple their requirements? These are indeed legitimate and reasonable questions, and Mr. Williams addresses them in a way which clearly demonstrates that uranium availability will not be a constraint on the growth of nuclear power over the next few decades. The article has been shortened and translated into Finnish from the presentation held in the monthly meeting of ATS on March 16, 1989.

Fifty years of Fission

Pekka Silvennoinen (pages 26—27)

Fifty years ago the German scientists Hahn and Strassmann first observed nuclear fission; a find that was to be the pinnacle of achievement for the leading European research team of that era. This was followed by a series of wellknown innovations, leading to the introduction of nuclear power generation on an industrial scale. The whole history of nuclear fission from its discovery to the atomic bomb and eventual utilization for peaceful purposes is briefly described.

The Principle of Nuclear Reactors

Heikki Kalli (pages 28—31)

The basic principles of nuclear reactor are introduced. Criticality is defined; the balance between fissions and captures in the reactor core as well as the role of the moderator are described. The reactor types are given in a table.

The Nuclear Power Plant is not a Bomb

Frej Wasastjerna, Pekka Silvennoinen (pages 32—33)

To get a powerful nuclear explosion in a bomb, both a high multiplication factor and a short mean generation time for neutrons are needed. This is achieved by using nearly pure fissile material (uranium-235 or plutonium-239). In a nuclear reactor, the admixture of large amounts of other materials in the core limits the amount of energy that can be released in a power excursion. In addition, most reactors are designed so that various feedback effects make them inherently stable, unlike the RBMK reactors at Chernobyl.

Nuclear Energy and the Environment

Björn Wahlström (pages 34—36)

Nuclear energy is free from environmental effects associated with the burning of fossil fuels. However, to eliminate the effect of the nuclear power on the environment the isolation of radioactive materials concentrated in nuclear fuel must be very effective. This is accomplished with multiple barriers surrounding the fuel. Principles of defence-in-depth are applied to assure the integrity of these barriers.

Nuclear Waste Management and Safety

Seppo Vuori (pages 37—39)

The management of wastes arising from the production of nuclear power should be performed in good time and in a sufficiently safe manner. Especially important is ensuring that a high safety level can be achieved in the final disposal of nuclear wastes. The feasibility for meeting the strict objectives is assessed with a system of computerized mathematical models.

Natural Uranium Deposits Serve as a Model for Final Disposal

Esko Peltonen (pages 40—42)

In the crust of the earth there are several deposits where the content of uranium is very high, in some places up to 60 %. This is over 100 000 times more than in the Finnish bedrock on average. The most relevant natural analogue is the 1 300-million-years-old Cigar Lake uranium deposit in Canada. It involves the same multiple barriers as the planned Finnish disposal system for spent nuclear fuel: solid UO_2 , clay buffer around the uranium, quartzrich cap and half a kilometer of rock above the uranium. The most important difference is that in nature there is no long-lasting metallic canister around the uranium. Nature has even tested an underground natural fission reactor, 1 800 million years ago in Oklo, Africa.

The careful investigations carried out at these natural analogue sites have indicated that uranium and other elements have been preserved in the deposits for millions or even billions of years. During the isolation from the biosphere, the radiation of the hazardous radionuclides has been reduced to harmless levels as a result of to the natural decay. These "disposal experiments" done by the nature serve as a valuable confirmation of the experts' view that the disposal plans presented will meet the most strict requirements for safety and environmental protection.

No Solution with Cold Fusion

Seppo Karttunen (pages 42—45)

The current progress in fusion energy research is briefly reviewed. Besides conventional thermonuclear fusion, muon catalyzed fusion and recent astounding news about electrochemically induced cold fusion in condensed matter are also considered. Even under the best possible conditions, the cold fusion rates remain at negligible levels and do not give any hopes for applications in energy production.

