

YDINVOIMALAITOSJÄTTEIDEN KÄSITTELYSTÄ JA VARASTOINNISTA

1. JÄTTEEN ALKUPERÄ

Ydinenergian tuoton turvallisuuskysymykseen liittyy oleellisenä osana myös jätehuolto. Radioaktiivisia jätteitä syntyy niin kutsutun polttoainekierron eri vaiheissa, joista tärkeimmät ovat /1/.

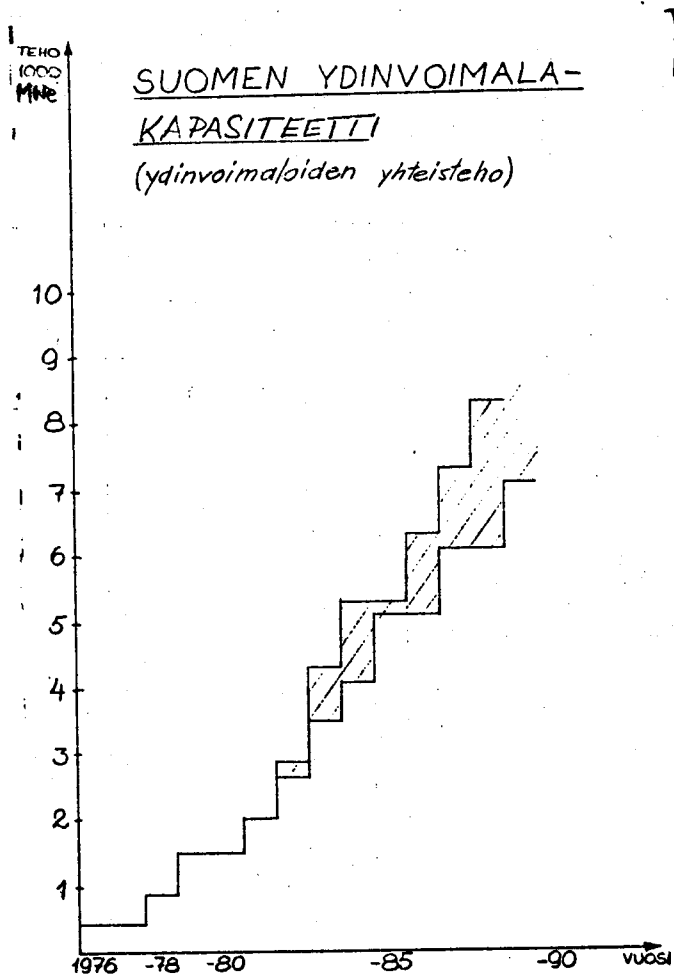
1. Uraanimalmin louhinta kaivoksesta
2. Malmin rikastus
3. Polttoaineen valmistus
4. Polttoaineen käyttö ydinvoimalaitoksella
5. Käytetyn polttoaineen poistaminen reaktorista ja säilytys laitospaikalla
6. Käytetyn polttoaineen jälleenkäsittely

Suomessa tulevat aluksi kysymykseen vain kohdat 4. ja 5. Nämä muodostavat rajatun, joskin merkitsevän osan ydinenergian koko jäteongelmasta. Ydinvoimalaitoksen käytön aikana polttoaineessa syntyvästä jätteestä jää 99,9 % polttoainesauvan sisään ja vapautuu vasta jälleenkäsittelyvaiheessa.

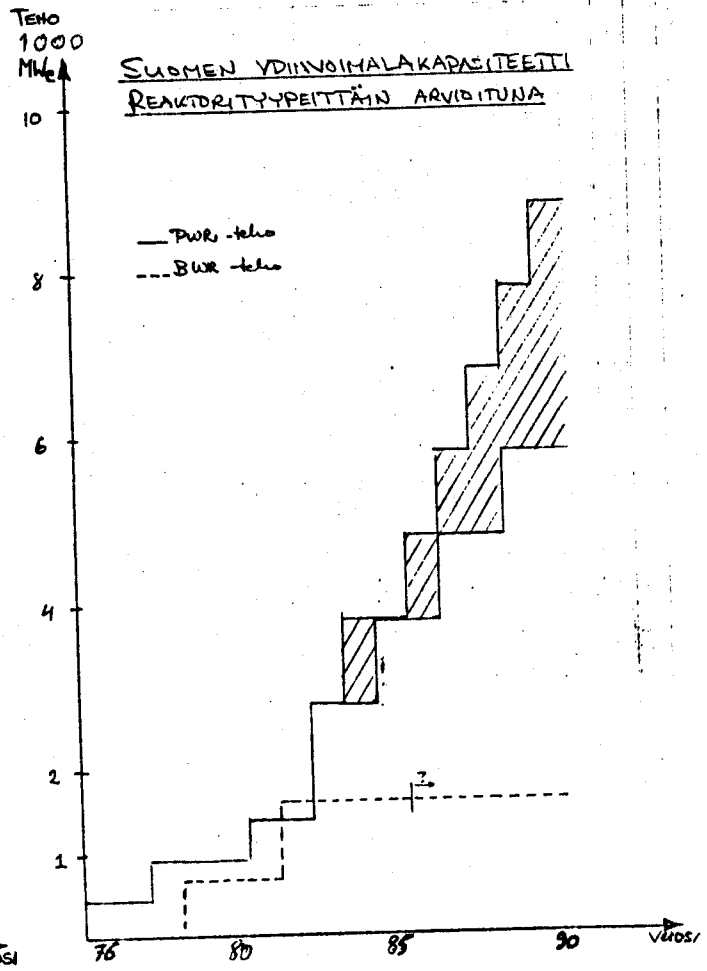
Ydinenergian tuotanto-ohjelma Suomessa:

Voimayhtiöiden (IVO ja TVO) ilmoitusten ja energiapolitiikan neuvottelukunnan mietinnön perusteella on laadittu kuvien 1 ja 2 ennusteet. Niiden tarkkuus vuodesta 1985 eteenpäin ei ole hyvä; todelliset arvot voivat poiketa kuvan 1 kohdalla $n. \pm 30 \%$ ja kuvan 2 kohdalla satoja prosentteja.

Voimalan tyypillä ei kuitenkaan ole niin ratkaisevaa merkitystä jätemäärille, etteikö ennustetta voisi käyttää. /2/



Kuva 1



Kuva 2

Jätteen laadulla ja määrällä on ratkaiseva merkitys suunniteltaessa niitä periaatteita ja käytäntöjä, joiden mukaan jätehuolto hoidetaan. Jätteen laadulla tarkoitetaan tällöin näiden aineiden kemiallisfysikaalista olomuotoa sekä niiden radionuklidikoostumusta. Jätteinä pidettäviä radioaktiivisia aineita syntyy ydinreaktorissa fissiotuotteina sekä neutroniabsorptiosta johtuvina aktivoitumistuotteina. Suurin osa aktivoitumistuotteista on lyhytikäisiä radionuklideja, jotka ovat syntyneet jäähdytteen epäpuhtauksien ja reaktorien rakenne- materiaalien neutroniaktivoitumisesta. Aktivoitumistuotteisiin

kuuluvat myös reaktorissa syntyvät uraania raskaammat nuklidit, transuraanit, jotka normaalikäytössä pysyvät miltei täysin polttoainesauvan sisällä ja vapautuvat vasta polttoaineen jälleenkäsittelyssä. Transuraanit ovat kaikkein ongelmallisimpia jätteitä suuren myrkyllisyytensä ja pitkäikäisyytensä vuoksi, esim. ^{239}Pu ; $T_{1/2} = 24\ 000$ vuotta.

Fissiotuotteiden osalta hallitsevat nuklidit ovat ^{90}Sr , $T_{1/2}$ 28 vuotta ja ^{137}Cs , $T_{1/2}$ 30 vuotta, jotka määräävät fissiotuotteiden teoreettisen vaarallisuusajan: n. 600 vuotta.

Edellä esitettyä kasvavaa ydinvoimakapasiteettia mukailleen kasvaa käytössä syntyvän radioaktiivisen jätteen määrä. VTT:n jäteprojektin taholta on arvioitu Suomessa syntyvän ydinvoimalaitosjätteen määrää.

Ennuste on tehty toisaalta lähinnä USA:n, Länsi-Saksan ja Ruotsin reaktoreiden käyttökokemus- ja suunnitteluarvojen ja toisaalta IVO:n ja TVO:n ilmoittamien tietojen perusteella. Ilmoitetut arvot vaihtelevat erittäin suuresti - useita deka- ja - joten ennustetta on pidettävä keskimääräisenä suuruusluokkaarviona. /2/

Kiinteän jätteen kokomaismäärä:

Ottamalla huomioon "märkä" ja "kuiva" kiinteä jäte saadaan kiinteän jätteen kokonaismäärä.

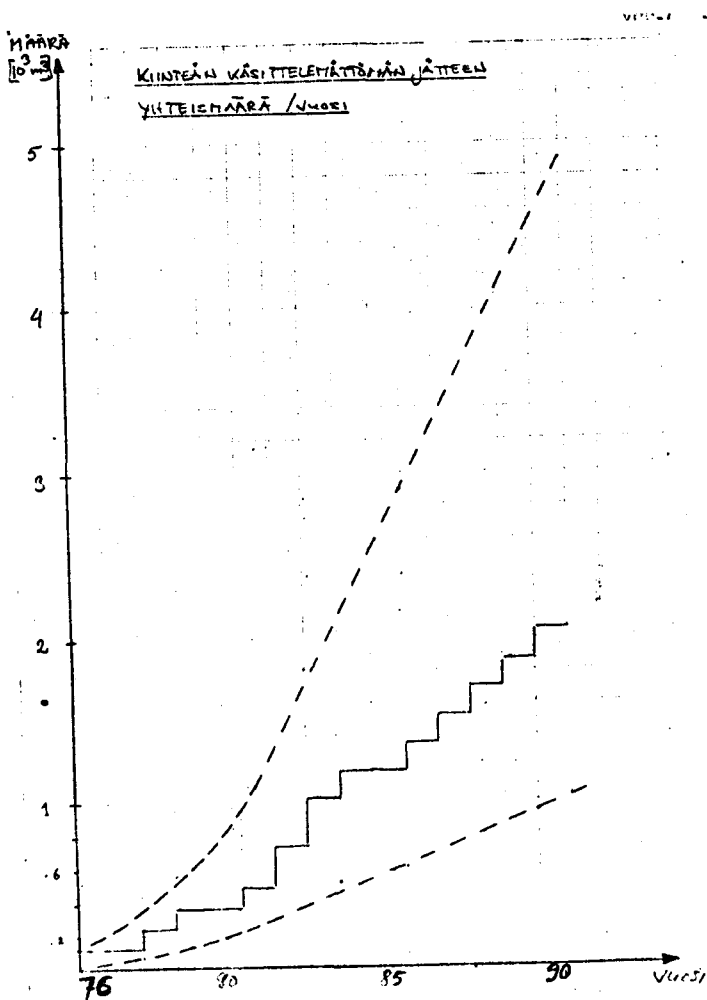
Kuva 3: Porraskäyttö on saatu ottaen huomioon PWR/BWR tehot kuvan 2 mukaan ja käyttäen seuraavia keskimääräisiä arvoja:

Yksikköteho	Jättemäärä m^3	
	Reaktorin	tyyppi
MWe	PWR	BWR
500	100	150
1000	200	300

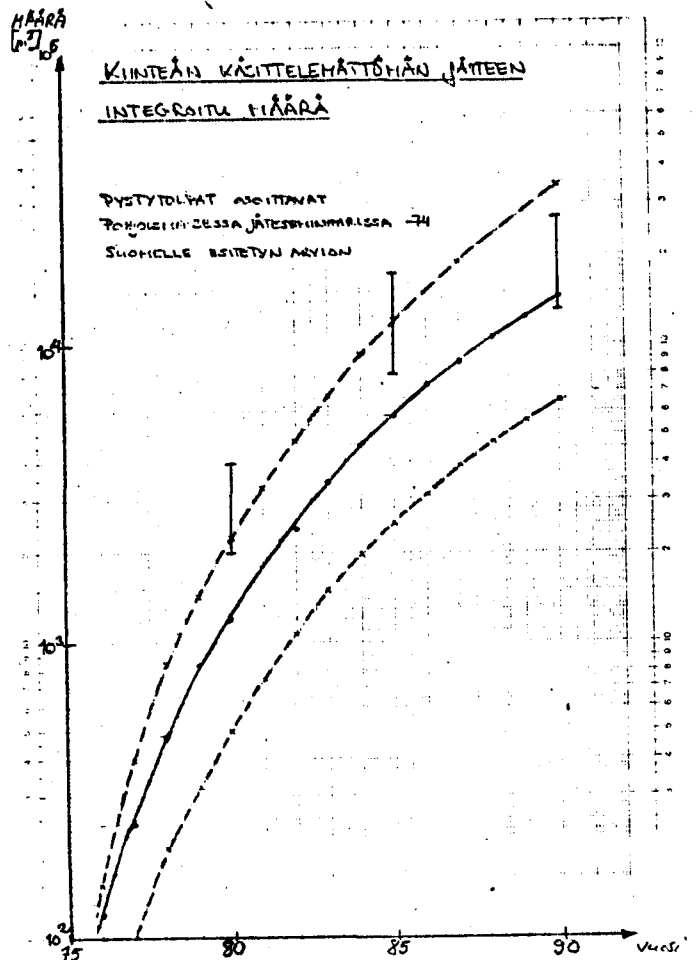
Katkoviivat osoittavat vain todennäköisen määrän rajat. Melko ehdottomana enimmäismääränä voidaan pitää porraskäyrän kymmenkertaista määrää, mikäli vakavia onnettomuuksia ei tapahdu.

Kuva 4: Kiinteän varastointia varten käsittelemättömän jätteen integroitu määrä on saatu käyttäen kuvan 3 arvoja. Katkoviivat vastaavat toisiaan ja esittävät näin tässäkin vain odotettavaa määrää - ei ehdottomia enimmäis- tai vähimmäismääriä. Luotettavana enimmäismääränä voidaan pitää ehjän kuvaajan kymmenkertaista määrää.

Vertauksen vuoksi on kuvassa 4. esitetty myös Pohjoismaisessa jäteseminaarissa Tukholmassa 8.-10.5.1974 esitetty ennuste varastointia varten käsitellyn kiinteän jätteen määräksi Suomessa. /4/



Kuva 3

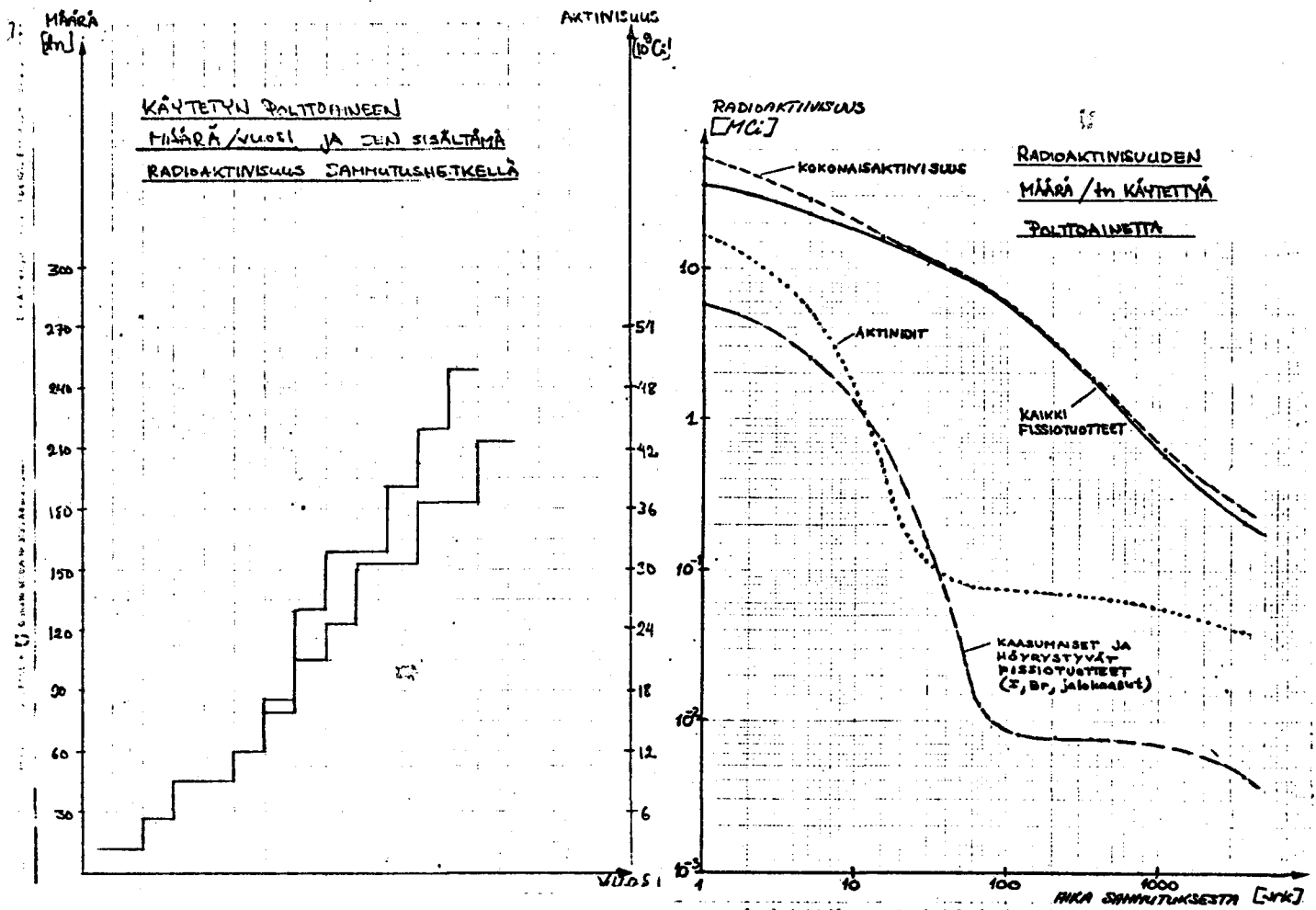


Kuva 4

Käytetty polttoaine:

Polttoainetta uusitaan PWR:ssä ja BWR:ssä n. 30...38 tn 1000 MWe vuotta kohden, mikäli ei ole tapahtunut sellaisia polttoainevaurioita, joiden vuoksi tarvitsisi poistaa normaalia useampia elementtejä.

Käyttäen kuvan 1. ennustetta ydinvoimakapaistestista on laadittu kuvan 5. ennuste käytetyn polttoaineen vuotuisesta määrästä. Tilavuuden sijasta on käytetty painoyksikköjä, koska käytetyn polttoaine-elementin vaatimaa tilaa eivät määrää sen fysikaaliset mitat. /2/



Kuva 5

Kuva 6

2. JÄTEHUOLLON PERIAATTEET

Yleisenä peruseriaatteena jätehuollon alalla kaikkialla maailmassa on varmistua siitä, että jätteet eivät vahingoittaisi ihmistä ja hänen ympäristöään. Tämän tarkoituksen saavuttamiseksi valtiolliset elimet antavat säännökset ja ohjeet jätteen tuottajalle ja valvovat niiden noudattamista.

Englantilaisessa (U.K.) käytännössä on valtiovallan antamien säännösten periaatteena:

- a) On turvattava kustannuksista välittämättä, että koko valtakunnan väestön ja yksityisten henkilöiden saama radioaktiivisen säteilyn annos ei ylitä säädettyjä rajoja. Tätä sääntöä on noudatettava ehdottomasti välittämättä kustannuksista tai muista tekijöistä.
- b) On tehtävä se mikä on kohtuullista ja käytännössä mahdollista, ottaen huomioon kustannukset, soveltuvuudet ja kansallinen etu, jotta saataisiin säteilyannos alennetuksi paljon näiden rajojen alapuolelle. /3/

Kun säädökset ja ohjeet jätehuollon teknisistä perusteista on laadittu, niin sen jälkeen voivat teknillisestä käytöstä vastuussa olevat henkilöt toimia, jotta nämä säädökset täytettäisiin. Säästösten pitäisi olla mahdollisimman tarkoituksenmukaiset ja oikealla tapaa joustavat, ettei menetetä kohtuuttomasti aikaa, työvoimaa ja rahaa.

Jätehuollon tekniseltä kannalta merkitseviä tekijöitä:

1. Jätehuollon suunnittelussa on otettava huomioon ympäristön biologis- kemiallis- fysikaaliset ominaistekijät.
2. Ydinvoimalaitoksen sijoitus riippuu jossain määrin siitä, millä periaatteella jätehuolto aiotaan ratkaista.
3. Kääntäen jätehuoltomenetelmät riippuvat myös laitospaikasta.

4. Ydinvoimalaitoksen käytöstä poisto on ajoissa ennakoitava ja suunniteltava.
5. Jätteen laatu ja määrä vaikuttaa ratkaisevasti jätehuolto-ratkaisuihin.
6. 99,9 % jätteestä; fissiotuotteet ja aktinidit, jäävät poltto-ainesauvan sisään ja vapautuvat vasta jälleenkäsittelyssä. Jos se voidaan välttää, jätekysymys on paljon yksinkertaisempi.

Tämä on tilanne Suomessa ainakin toistaiseksi. Se merkitsee mm. sitä, että vuosituhansien ongelma on meillä toistaiseksi teoreettisestikin vain korkeintaan vuosisatojen ongelma.

7. Kun tehdään päätöksiä arvioitujen riskitekijöiden pohjalla, on otettava huomioon sekä normaalit toimintaolosuhteet että onnettomuustilanteet ja niiden todennäköisyys.

Ydinvoimalaitoksella syntyy jätteitä kolmessa olomuodossa: kaasuina, nesteinä ja kiinteinä. Niiden huollossa sovelletaan kolmea erilaista perusmenetelmää:

1. Laimentaminen ja ympäristöön päästö
2. Konsentroidi ja varastointi
3. Säilyttäminen ja aktiivisuuden vähenemisen jälkeinen ympäristöön päästö /4, 5/

Erityyppisten voimalaitosten jätteiden yleiset käsittelyperiaatteet ovat ruotsalaisen Per Linderin esittämän kaavion mukaiset, joka on esitetty kuvassa 7. /4/

Kaasumaisten ja nestemäisten jätteiden käsittely perustuu toisaalta tilapäiseen säilyttämiseen, jolloin lyhytikäisimmät nuklidit häviävät, toisaalta puhdistukseen, jolloin aktiiviset komponentit pyritään ottamaan talteen ja niistä muodostuu kiinteää jätettä. Kaasujen ja nesteiden lopulliset käsittelytoimenpiteet ovat laimentaminen ja ympäristöön päästö. Puhdistuksen ja viivytyksen on oltava riittävän tehokkaita, jotta annetut päästön rajat alitettaisiin ja täytettäisiin myös periaate päästöissä, niin vähän aktiivisuutta kuin käytännössä mahdollista, "as low as practicable".

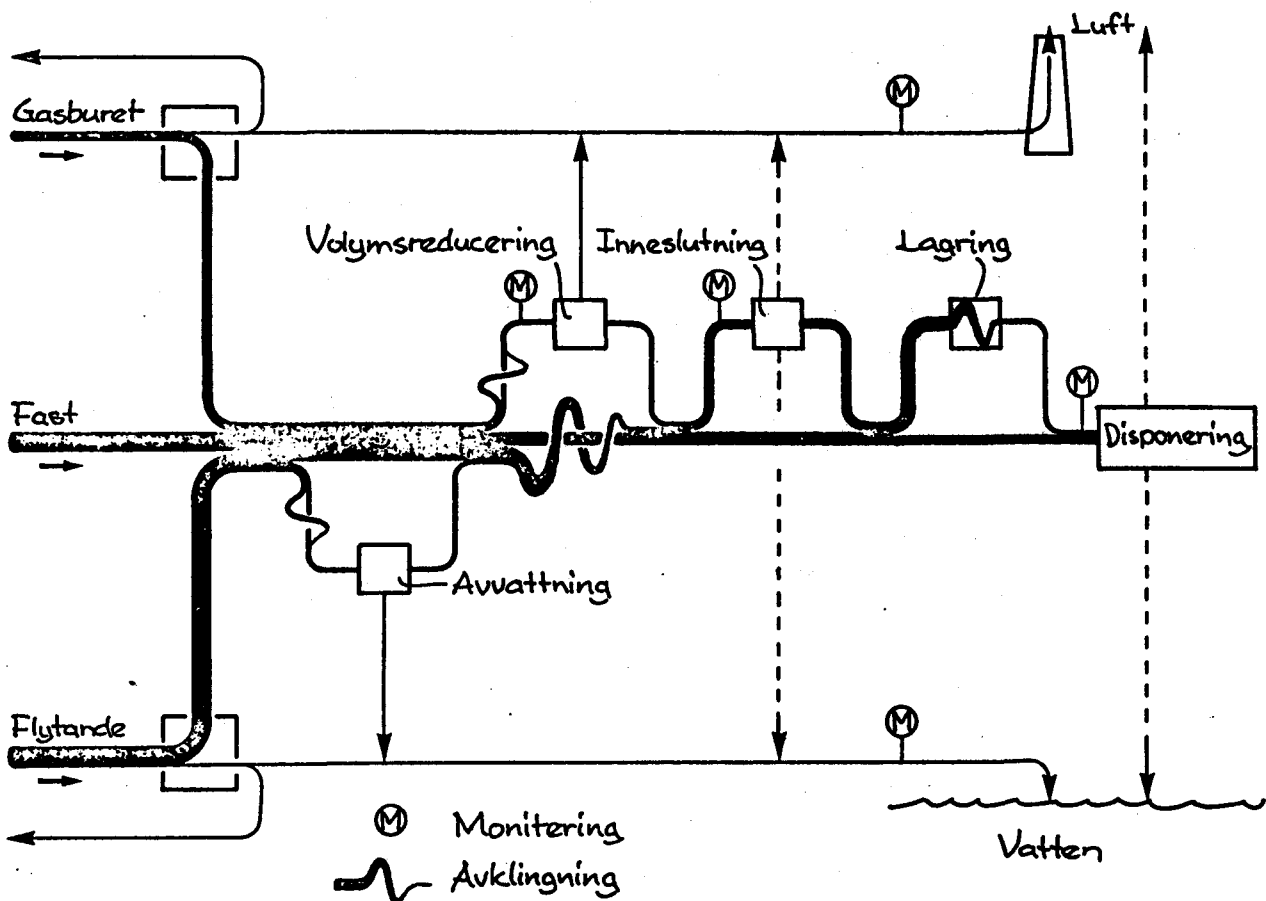
Kiinteän jätteen käsittelyyn sovelletaan ennen kaikkea periaatetta konsentroidi ja varastointi. Kiinteää jätettä ovat kaasun- ja nesteiden puhdistuksesta saatavat suodattimet, ioninvaihtimet, haihdutinlietteet; muusta toiminnasta aiheutuvat mahdollisesti saastutetut kojeet ja rakenneosat. Ne sisältävät sekä fissio- että aktivoitumistuotteita.

Suurin osa jätteestä on erittäin alhaisaktiivista, tiheydeltään pientä ja näin ollen tilaa vievää, joten sen tilavuutta pyritään pienentämään. Detektointimenetelmien epävarmuudesta johtuu, ettei valtaosaa siitä voida käsitellä inaktiivisena esim. yleisessä jätehuollossa. Tämän vuoksi käytäntö on se, että kaiken jätteen oletetaan olevan aktiivista ja sovelletaan sen mukaisia menetelmiä. Alhaisaktiivisen kiinteän jätteen tilavuuden pienentäminen suoritetaan yleisimmin paa- laamalla tai polttamalla.

Lietteet, suotimet ja ioninvaihtimet ovat aktiivisuudeltaan jo merkittäviä. Nykyinen suuntaus on saattaa nämä puoli-kiinteät, märät tuotteet kiinteään muotoon, mikä tehdään kiinteyttämällä ne betoniin tai bitumiin.

Voimalaitosjätteen käsittelyssä tämänhetken keskeiset kysymykset ovat:

- 1) Käytettävissä olevan käsittelytekniikan optimointi. Tällöin jätteen lajittelu ja monitorointi ovat avainasemassa. Erikoista aktiivisuustasoa ja nuklidikoostumusta edustavat jätteet olisi pidettävä erillään. Ihannetapauksessa kullekin jätetyypille sovelletaan yksilöllistä optimaalista käsittelytapaa.
- 2) Käsittelytekniikan kehittäminen lähinnä jalokaasujen ja tritiumin talteenottoa silmällä pitäen. Tällä alueella ^{85}Kr on nuklidi, joka ilmeisesti tulee vaatimaan nykyisen ydinvoimalaitoksilla ja ennenkaikkea jälleenkäsittelylaitoksilla käytetyn tekniikan oleellista parantamista. /4, 6/



Kuva 7

3. JÄTTEEN PITKÄAIKAINEN VARASTOINTI JA LOPULLINEN SIJOITUS

Pitkällä tähtäyksellä jätteenkäsittely päättyy joko pitkäaikaiseen varastointiin tai lopulliseen sijoitukseen. Ydinvoimalaitosjätteen suhteen on seuraavia vaihtoehtoja:

1. Sijoitus yleiseen jätehuoltoon
2. Maahanhautaaminen
3. Meriin upotus
4. Sijoitus tai varastointi geologisiin muodostumiin
5. Varastointi rakennettuihin varastopaikkoihin

1. Sijoitus yleiselle kaatopaikalle voisi olla turvallinen ja tarkoituksenmukainen ratkaisu jätteelle, jonka radioaktiivisuus on riittävän alhainen ja nuklidikoostumus sopiva. Tämä asettaa huomattavat vaatimukset monitorointitekniikalle sekä käytettävän paikan soveltuvuudelle (pohjavesitilanne muun käytön laatu ja tehokkuus jne.).

2. Jätteen hautaamisesta maan pintakerrokseen so. yläpuolelle pohjaveden on melko paljon kokemuksia USA:ssa, Englannissa, Kanadassa, Intiassa ja Neuvostoliitossa. Tällainen toiminta edellyttää geo- ja hydrologisten tekijöiden tarkkaa selvittämistä. Jokainen aiottu hautauspaikka on tutkittava, jotta saadaan varmuus siitä että geokemialliset hydrologiset olosuhteet yhdessä teknisen toiminnan lisäksi aikaansaavat jätteen riittävän tehokkaan ja pitkäaikaisen eristyksen biosfääristä. Hiljattain on esitetty, että merkittävät geohydrologiset perustekijät vaihtelevat aina niin paljon, että ne on perusteellisesti aina tutkittava erikseen kussakin sijoituspaikassa /6/.

3. Meriin upotus ei näillä näkymin tule meillä kysymykseen.

4. Geologiset muodostumat. Toistaiseksi tunnetuimmat käytännössä kokeillut tämän alan ratkaisut ovat suolakaivokset Saksan Liittotasavallassa ja USA:ssa. Nämä ovat monestakin syystä todettu erittäin otollisiksi jätteen varastoinnille.

Suomessa ei ole suolakaivoksia, mutta niistä saatuja kokemuksia voidaan käyttää meillä hyväksi. Mm. amerikkalaiset ja ruotsalaiset tutkimukset ovat todenneet, että myös graniittikallioperä soveltuu jätteen varastoinnille. Muista käytettävistä geologisista muodostumista mainittakoon savi- ja hiekkakivikerrostumat.

5. Rakennetuista varastopaikoista voimalaitoksen ulkopuolelle on myös kokemuksia sekä lukuisia suunnitteluasteella olevia ratkaisumalleja. Näistä mainittakoon sveitsiläisien käytäntö, jossa alhaisaktiiviset jätteet on varastoitu rakennennelman maanpäälliseen ja voimakkaammin aktiiviset maanalaiseen osaan.

/6, 7/

4. YHTEENVETO

Yleisesti jätealalla työskentelevien asiantuntijoiden mukaan ydinenergian jäteongelma on teknisesti hallittavissa. Tyypillinen on amerikkalaisen Frank Pittman'in lausunto: Nykyisellä käytettävissä olevalla ja käytännössä kokeillulla tekniikalla kyetään turvallisesti huoltamaan ydinenergian jätteet lähivuosisikymmeniksi tai vuosisadoiksi. Tuhansien tai kymmenien tuhansien vuosien jatkuvuuden vaativat jätehuollon ongelmat kyetään ratkaisemaan tekniikalla, jota on kehitetty laboratorio- ja kenttäkokeiluilla ja jolta puuttuvat vain pilot-plant kokeilut. Huomattava ongelma Pittman'in mukaan on saada **suuri** yleisö vakuuttuneeksi todellisesta tilanteesta. /6/

Kirjallisuusviitteet

- /1/ The safety of nuclear power reactors and related facilities, 1973, USAEC, Wash-1250
- /2/ Peltonen, E., Radioaktiivisen jätteen laatu ja määrä, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Reaktorilaboratorio, julkaisematon, 1974-08-26.
- /3/ A.W.Kenny and N.T.Mitchell, United Kingdom waste - management policy, Proceedings of a symposium on Management of Low - and Intermediate - Level Radioactive Wastes, IAEA, Vienna 1970, s.69...88.
- /4/ Nordiskt seminarium om radioaktivt avfall, Lidingö 1974.
- /5/ D.J.Rose and G.Tenoylia, Technical and Social Aspects of Nuclear Waste Disposal in Western Europe, Ambio. 1973 vol.2, no 6, s.233-240.
- /6/ Nuclear Technology, December 1974, vol.24 (3).
- /7/ Tuovinen, P., Katsaus radioaktiivisen jätteen varastointimenetelmiin, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Reaktorilaboratorio, julkaisematon 1974-08-20.

IMATRAN VOIMA OSAKEYHTIÖ
Atomivoimaprojektiryhmä
Kemian ja materiaalitöimisto
20.1.1975 DI Ilpo Kallonen

LOVIISAN YDINVOIMALAITOKSEN RADIOAKTIIVISTEN JÄTTEIDEN
KÄSITTELYYN LIITTYVIÄ ERIKOISPIIRTEITÄ

Loviisan voimalaitos tulee käsittämään lopullisessa laajuudessaan kaikkiaan neljä eri yksikköä, joista tässä kirjoituksessa käsitellään lähinnä kahta ensimmäistä (Loviisa 1+2). Lopussa on myös muutamia mainintoja ns. Loviisa 3+4:stä.

Loviisan voimalaitoksessa käytössä syntyviä radioaktiivisia nesteitä, kaasuja ja kiinteitä aineita keräävät ja käsittelevät laitteet ja järjestelmät kuuluvat ns. jätteiden käsittelylaitokseen. Tämä on suunniteltu siten, että voimalaitos pystyy tehokkaasti toimimaan vielä kun 1 %:ssa polttoaine-elementtejä on pieniä ja 0,1 %:ssa suuria vuotoja kuoressa ja fissiotuotteita on näin päässyt primääripiirin veteen eli jäädytteeseen. Virallisemmin sanottuna asia voidaan ilmaista seuraavasti:

"The station is designed to be able to operate with fuel defects not exceeding the following values:

- One percent of the total number of fuel rods having a leakage corresponding to an escape rate coefficient for fission gases of 10^{-8} 1/s
- One tenth of a percent of the total number of fuel rods having a direct escape path from the pellet surface layer to the coolant."

Radioaktiivisten vesien sekä nestemäisten jätteiden käsittelystä
Loviisa 1:ssä (Lo1)

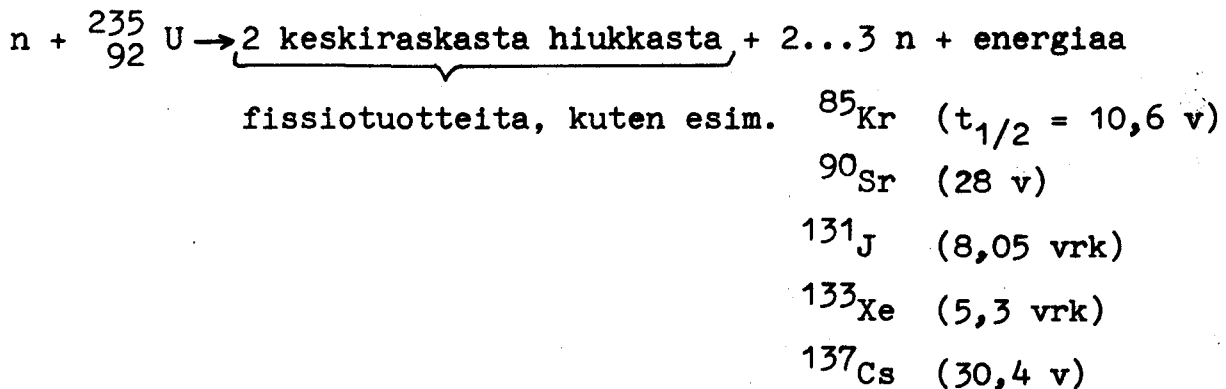
Radioaktiivisten vesien käsittelyä varten on kahdeksan eri laitosta ja toimintaa:

1. Primääripiirin veden jatkuva puhdistus
2. Primääripiiristä poistetun veden varastointi, puhdistus ja boorihapon talteenotto
3. Allasvesien puhdistus

4. Reaktorirakennuksen ja apurakennuksen erikoisviemäreistä tulevien vesien varastointi ja puhdistus
5. Höyrykehittimien ulospuhallusvesien puhdistus
6. Käytettyjen dekontaminointihappoliuosten puhdistus
7. Nestemäisten jätteiden varasto
8. Nestemäisten jätteiden kiinteytys

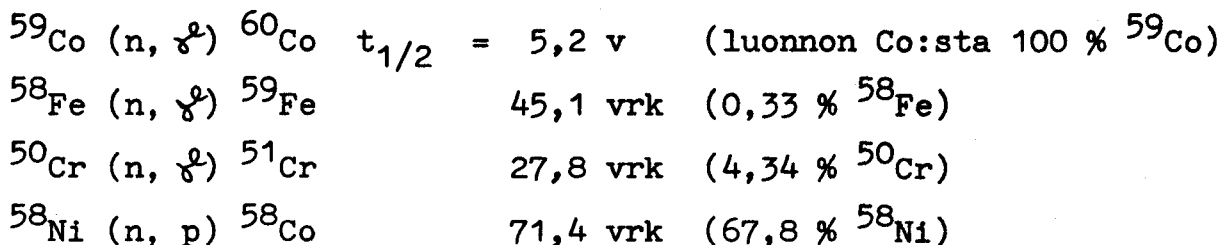
1. Primääripiirin veden jatkuva puhdistus (TC-laitos)

Primääripiirin veteen muodostuu radioaktiivisuutta eri tavoilla. Pääasiallisin tapa on fissiotuotteiden kulkeutuminen polttoaine-elementtien kuoriin muodostuneista vuotokohdista jäädytteeseen.

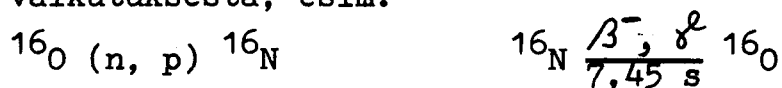


Toissijainen tapa on neutroniaktivointi, jolloin

- metalliset komponentit kuten esim. paineastia tulevat radioaktiivisiksi
- primääripiirin vedessä esiintyvät korroosiotuotteet aktivoituvat, esim.



- itse primääripiirin vesi aktivoituu korkeaenergisten neutronien vaikutuksesta, esim.



Myöskin tritiumaktiivisuutta (tritium, ${}^3\text{H}$, on heikko beettasäteilijä, $t_{1/2} = 12,3 \text{ v}$) esiintyy primääripiirin vedessä eri syistä, esim.

- ternäarisestä fissiosta syntynyt
- ${}^{10}_5\text{B}$ (n, 2α) ${}^3_1\text{H}$

Tritium on ainoa radioaktiivinen fissiotuote, mikä voi kulkeutua ehjän polttoaine-elementin kuoren läpi jäädytteeseen.

Edellä mainittujen radioaktiivisten aineiden poistamiseksi puhdistetaan primääripiirin vettä.

Primääripiirin veden jatkuva puhdistus on esitetty oheisessa yksinkertaistetussa kuvassa 1. Reaktorirakennuksessa suojakuoren sisäpuolella sijaitseva puhdistuslaitos on kaksiosainen ja kumpikin osa toimii normaalisti jatkuvasti teholla 15-20 t/h. Vesi otetaan pääkiertopumppujen painepuolelta ja palautetaan puhdistuksen jälkeen takaisin piiriin. Erikoisesti mainittakoon, että ioninvaihtimien toimintapaine on sama kuin primääripiirin paine ja ioninvaihtimet ovat elvytettäviä (vrt. taulukko 1.). Elvytystä eli regenerointia edeltää aina vedellä suoritettu hartsiin kuohkeutus.

2. Primääripiiristä poistetun veden varastointi, puhdistus ja boorihapon talteenotto (TD-laitos)

Esimerkiksi kerran viikossa voi esiintyä tarvetta muuttaa primääripiirin veden H_3BO_3 -pitoisuutta (boorisäätö). Tämä suoritetaan poistamalla primääripiiristä H_3BO_3 -pitoista vettä ja pumppaamalla sinne ioninvaihdettua vettä tai laimeampaa H_3BO_3 -liuosta.

Piiristä uloslaskettu vesi johdetaan apurakennuksessa sijaitsevaan puhdistuslaitokseen, jonka teho on 65 t/h (kuva 2). Täällä tapahtuu varsinainen kationien poisto primäärivedestä.

Kationinvaihdin TE31N01 poistaa kationien lisäksi myös korroosiotuotteita n. 80 %.

Anioninvaihdin TE31N02 poistaa loputkin korroosiotuotteet sekä radioaktiivisia anioneja.

Anioninvaihdinta TE31N03 käytetään reaktorin seisoessa primääriveden puhdistamiseen. Se pystyy tarvittaessa absorboimaan BO_3^{3-} -ioneja ja H_3BO_3 :ksi laskettuna yli 600 kg.

Suurista aktiivisen veden säiliöistä vesi pumpataan haihduttimeen, jonka teho on n. 7 t/h. Täällä tapahtuu H_3BO_3 -liuoksen konsentroidin n. 4 %:iin. Lisähaihdutin on poiskytkettynä. Tämä boorikonentraattiliuos jäädytetään ennen johtamista ioninvaihtolaitokselle TD63, missä tapahtuu sen puhdistus kationisista ja anionisista epäpuhtauksista. Puhdas H_3BO_3 -liuos välivarastoidaan ja annostellaan taas tarvittaessa primääripiiriin. Periaatteena on pyrkimys minimoida boorihapon vuotuinen kuluminen voimalaitoksella.

Haihduttimesta poistuneesta tisleestä erotetaan liuenneina olleet kaasut (esim. Kr ja Xe) lauhdutinkaasunpoistimessa aktiivisten kaasujen käsittelylaitokselle ja lauhde pumpataan aktiivihiihliuodattimet ohittaen jäähdyttimen kautta ioninvaihtolaitokselle TD32. Tarkastussäiliöistä suoritettuna radioaktiivisuus- yms. mittausten jälkeen puhdistettu vesi käytetään normaalisti laitoksen lisävedeksi ja johdetaan puhtaan lauhteen säiliöihin.

Tätä ylläesitettyä TD-laitosta voidaan tarvittaessa käyttää viemäriveriesien puhdistamiseen eli TR-toimintaan (näin tehdäänkin kun Loviisa 2 on valmis. Loviisa 2:ssa tulee olemaan kaksi ylläesitettyä vain TD-toimintaan sopivaa laitosta Loviisa 1+2:lle).

Kokonaisuutena voidaan todeta, että kaikki puhdistettu boorihappoliuos ja vesi pyritään käyttämään uudelleen. Tarkastussäiliöihin on mahdollista saada erittäin puhdasta vettä, sillä ennen ja jälkeen haihdutuksen on poikkeuksellisen paljon ioninvaihtimia (jotka ovat elvytettäviä).

3. Allasvesien puhdistus (TM-laitos)

Kuvassa 2 on myös esitetty Lo1+Lo2:lle tarkoitettu apurakennuksessa sijaitseva 40 t/h-tehoinen allasvesien puhdistuslaitos, jossa kaikki ioninvaihtimet ovat elvytettäviä. Vesi palautetaan puhdistuksesta takaisin käyttöpaikkaansa.

4. Reaktorirakennuksen ja apurakennuksen erikoisviemäreistä tulevien vesien varastointi ja puhdistus (TR-laitos)

Kuvassa 3 esitetään viemäriveriesien puhdistus. Radioaktiivisista tiloista tulevat pesu- ja viemäriveredet, radioaktiiviset prosessivuotovedet ja käytetyt dekontaminointiliuokset kootaan pohjakaivoihin. Pohjakaivoista on toinen reaktorirakennuksen ja toinen apurakennuksen kellarikerroksessa. Ensin mainittuun johdetaan vedet lähes 40 lattiakaivosta, jälkimmäiseen lähes 140:stä. Lattiakaivot ovat osittain tavallisia ritiläkaivoja ja osittain kauko-ohjatuilla venttiileillä varustettuja. Laboratoriorakennuksen kahta 20 m³:n keräilyssäiliötä ei ole kuvassa esitetty; näistä säiliöistä on yhteys apurakennuksen pohjakaivoon, mikäli vesien laatu edellyttää puhdistustoimenpiteitä.

Viemäriveresille suoritetaan ensin selkeytys ja suurimpien mekaanisten epäpuhtauksien poisto nestemäisten jätteiden varastosäiliöissä (TW), jonka jälkeen ne suodatetaan apurakennuksessa viemäriveresi-suodattimissa TR23.

Välivarastoinnin jälkeen vesi johdetaan haihduttimeen (teho n. 6 t/h), jonka likaantumista estetään annostelemalla tulevaan veteen alkalia (NaOH) niin paljon, että pH on n. 10. Haihduttimen yhteydessä toimivasta lisähaihduttimesta poistuu jaksottain suolapitoisuudeltaan n. 40 p-% lietettä Monte-Jusiin, josta se paineilman avulla siirretään edelleen nestemäisten jätteiden varastoon (kuva 4). Haihduttimesta, jonka dekontaminointikerroin on n. 10^5 , tisle siirtyy lauhdutinkaasunpoistimeen, missä tapahtuu liuenneiden kaasujen poisto aktiivisten kaasujen käsittelylaitokselle. Lauhde johdetaan edelleen aktiivihiiლისuodattimiin TR32 (vedessä olevan öljyn poisto) ja jäähtytyksen jälkeen ioninvaihtimiin.

Tarkastussäiliöissä suoritettujen radioaktiivisuus- yms. mittausten jälkeen puhdas vesi johdetaan puhtaan lauhteen säiliöihin laitoksen lisävedeksi tai jos vesiä on ylimäärin niin mereen. Jos vesi sisältää tritiumin lisäksi muitakin radioaktiivisia aineita, niin se palautetaan viemäriveresisäiliöihin uudelleen puhdistettavaksi.

Erikoispiirteinä voidaan todeta, että erilaista alkuperää olevat vedet sekoitetaan keskenään ennen haihdutusta, kaikki vedet haihdutetaan ja lisäksi on poikkeuksellisen paljon ioninvaihtimia ja suodattimia.

5. Höyrykehittimien ulospuhallusvesien puhdistus (RY-laitos)

Apurakennuksessa sijaitseva Lo1+Lo2:lle tarkoitettu höyrykehittimien ulospuhalluksen puhdistuslaitos puhdistaa jatkuvasti höyrykehittimien ulospuhallusvesiä ja lisäksi jaksottaisesti välipiirin TF vesiä. On siis varauduttu mm. höyrykehittimien vuotoihin, jolloin primääripiirin radioaktiivista vettä pääsisi höyrykehittimen puhtaalle höyrypuolelle.

Laitos on kaksiosainen kummankin osan käsittäessä kolme ioninvaihdinta; laitoksen teho on 2 x 40 t/h.

6. Käytettyjen dekontaminointihappoliuosten puhdistus (TU-laitos)

Erikoisuutena voidaan mainita apurakennuksessa sijaitseva dekon-

taminointihappoliuosten puhdistuslaitos, mikä on tarkoitettu Lo1+Lo2:lle.

Laitoksen teho on 20 t/h ja se koostuu kationinvaihtimesta ja anioninvaihtimesta.

Vain dekontaminointihappo (oksaalihappo) puhdistetaan uudelleenkäyttöä varten, koska se suorittaa varsinaisen dekontaminoinnin (kaliumpermanganaattipitoinen alkaliliuos suorittaa vain esipehennyksen).

7. Nestemäisten jätteiden varasto

Kuvissa 4 ja 6 on esitetty nestemäisten jätteiden varasto. Se on erillinen rakennus, joka on yhdistetty putkitunnelilla apurakennukseen. Se on tarkoitettu Loviisan voimalaitoksen yksiköitä Lo1+Lo2 varten. Ruostumattomasta teräksestä valmistetut 300 m³:n jätesäiliöt sijaitsevat betonilohkoissa, joita ympäröiviin seinin ja lattioihin on asennettu ruostumaton teräsverhous.

Varastosäiliöt on jaettu kolmeen eri luokkaan niihin johdettavien liuosten mukaan: matala-aktiivinen säiliö (tilavuus riittää 17 vuoden laitostoimintaa varten), korkea-aktiiviset säiliöt (10 vuotta) sekä haihdutusjätesäiliöt (5 vuotta).

Käytetyt ioninvaihtohartsit siirretään veden ja paineilman avulla putkilinjoja myöten matala- sekä korkea-aktiivisiin säiliöihin. Myös hartsien kuohkeutukseen käytetyt vedet, elvytyskemikaalit, haihduttimien pesukemikaalit sekä putkistoihin ja laitteisiin käytetyt dekontaminointikemikaalit tulevat tänne. Haihduttimien pesu tapahtuu kolmesti vuodessa käyttäen peräkkäin NaOH + KMnO₄-liuosta sekä H₂C₂O₄ (+ HNO₃)-liuosta lämpötilassa n. 90°C. Dekontaminointiliuokset ovat vastaavanlaisia.

Näissä säiliöissä suoritetaan selkeytysseisotuksen jälkeen kirkastuneen veden poisto ylijuoksusäiliöön, josta se pumpataan edelleen makaanisina suodattimina toimivien ioninvaihtimien läpi viemäri-vesien käsittelylaitoksen varastosäiliöihin edelleen käsiteltäväksi (kuva 3).

Haihdutusjätesäiliöihin johdetaan lisähaihduttimesta (Monte-Jusin kautta, kuva 3) lietettä, jonka suolapitoisuus on n. 40 p-%. Veden poistoa ei näistä säiliöistä suoriteta.

Jokaisesta säiliöstä voidaan, sen mahdollisesti vaurioituessa, siirtää sisältö tyhjiöpumpuilla aikaansaadun imun avulla Monte-Jusiin,

josta se paineilman avulla siirretään toiseen säiliöön. Sama poistomahdollisuus on betonilohkoista, joissa säiliöt sijaitsevat. Säiliöissä on myös tuuletus- ja kaasujenpoistojärjestelmä (typpi-kaasu tai ilmapuhallus), josta on kaasujen käsittelyn jälkeen yhteys voimalaitoksen ilmanvaihtopiippuun.

Säiliöistä voidaan Monte-Jusin sekä kahden ejektorin avulla siirtää haihdutusjätteet ja ioninvaihtohartsit kiinteytyslaitokselle. Yhteenvetona voidaan todeta, että nestemäisten jätteiden varasto on poikkeuksellisen suuri ja antaa mahdollisuuden säilyttää jätteitä nestemäisinä vuosikausia ennen niiden kiinteyttämistä.

8. Nestemäisten jätteiden kiinteytys

Kiinteytyslaitoksen sijainti ilmenee kuvasta 6. Lo1+Lo2:n toimissa on nestemäisiä kiinteytettäviä jätteitä arvioitu muodostuvan seuraavasti (vrt. taulukko 1):

- suodatusaineita, ioninvaihtohartseja ja korroosiotuotteita n. 62,8 m³/v ja
- haihdutusjätteitä eli n. 40 p-% suolaliuoksia n. 250 m³/v.

Kiinteyttäminen tullaan tekemään bitumiin tai betoniin laitoksella, jonka suunniteltu aikataulu on:

- | | |
|------------------------------|-------------------|
| 1. tarjouspyynnöt lähetetään | maaliskuussa 1975 |
| 2. tarjoukset saadaan | 1.8.1975 |
| 3. tilaus tehdään | 1.1.1976 |
| 4. laitos valmis | 1.1.1978 |

Kiinteytys suoritetaan mahdollisesti 200 l:n tynnyreihin ja tynnyrivaraston koko voi olla 5 vuoden laitostoimintaa (Lo1+Lo2) varten. Mikäli voimalaitosalueen ulkopuolella sijaitsevaa lopullista varastoa ei ole vielä tällöin valittu, niin joudutaan olemassa olevaa varastoa laajentamaan (laajenemisvara on varattu).

Valittava kiinteytysmenetelmä määrää prosessin lisäksi myöskin syntyvien jätetynnyrien määrän.

Periaatteena on, että kaikki jätteet on oltava poissiirrettävissä laitosalueelta.

Kaasumaisten jätteiden käsittelystä Loviisa 1:ssä

Radioaktiivisten kaasujen käsittelylaitos sijaitsee apurakennuksessa.

Sen tarkoituksena on tehdä prosessista kerättävät kaasut siinä määrin vaarattomiksi, että ne voidaan radioaktiivisuusmittauksen jälkeen päästää n. 110 m korkeaan ilmanvaihtopiippuun, missä tapahtuu niiden nopea laimeneminen ilmaan.

Voimalaitosprosessissa erilaisia radioaktiivisia kaasuja kerätään jatkuvasti reaktorin apulaitteista, radioaktiivisten nesteiden säiliöistä ja käsittelylaitteista. Keruu tapahtuu typpikaasuhuuhtelulla, joka eliminoi vetyräjähdysvaaraa.

Typpikaasun ajamina siirtyneet radioaktiiviset vetyä (esim. H_2O säteily+ kork. lämpötila) $H_2 + 1/2 O_2$ ja $2NH_3$ säteily+ kork. lämpötila) $3H_2 + N_2$) sisältävät jalokaasut kuumennetaan sähkölämmittimillä ennen niiden johtamista katalyyttisiin polttolaitteisiin. Nämä ovat Pt-päällystettyjä Al_2O_3 -katalyyttejä, joissa tapahtuu vedyn täydellinen palaminen ylimäärin lisätyn happimäärän kanssa. Syntyvä vesi poistetaan. Näin eliminoidaan täydellisesti räjähdysvaarallisen vetypitoisuuden muodostuminen jätekaasuissa. Täältä kaasut johdetaan edelleen kaasumaisten jätteiden käsittelylaitokselle.

Käsittelylaitoksella (kuva 5) on kolme samanlaista linjaa. Normaalisti yksi toimii, yksi on regeneroitavana ja yksi on varalla. Kunkin linjan maksimikapasiteetti on $60 m^3/h$ (NTP) ja normaalikäytössä tulee kaasuja $6 m^3/h$ (NTP). Käsittelyssä poistetaan kaasuista kosteus ja likahiukkaset kosteudenerottimilla ja aerosolisuodattimilla. Zeoliittisuodattimien toiminta on tärkeä. Ne poistavat kaasuista erittäin tarkoin kosteuden. Näin saadaan kaasujen läpimeno aktiivihiihliisuodattimissa hyvin hitaaksi ja radioaktiivinen hajoaminen ehtii tapahtua. Zeoliittisuodattimista voi toinen olla käytössä toisen ollessa regeneroitavana. Tämä suoritetaan puhaltamalla (n. $400^{\circ}C$) ilmaa vastavirtaan suodattimen läpi noin vuorokauden ajan, jolloin sitoutunut kosteus poistuu.

Aktiivihiihliisuodattimessa tapahtuu varsinainen deaktivointi viivytämällä jalokaasuja hyvin pitkiä aikoja, esim. Kr n. 100 h ja Xe n. 60 vrk, ennenkuin ne puhalletaan ilmanvaihtopiippuun. Suodatin on koostunut 24 lohkoista, joissa kussakin on aktiivihiihiltä $1,64 m^3$. Ne absorboivat kokonaan radioaktiiviset jodi-isotoopit. Niitä ei regeneroida. Vaihtoväli määräytyy pääasiassa mekaanisen kulutuksen johdosta ja käyttöikä tulee todennäköisesti olemaan n. 10 vuotta.

Kiinteiden jätteiden käsittelystä Loviisa 1+2:ssa

Kiinteillä jätteillä tarkoitetaan esim. radioaktiivisia paperijättei-

tä, muovisuojuksia, konepyyhkeitä, työpukuja, poistoilmatuulettimien käytettyjä suodattimia sekä käytöstä poistettuja aktiivisia laiteosia. Kiinteille jätteille on varattu apurakennuksessa sijaitsevan päivävaraston lisäksi usean vuoden laitostoimintaa (n. 10 vuotta, Lo1+Lo2) varten tarkoitettu varasto (kuva 6), missä jätteet sijoitetaan terästyynnyriin. Kokoonpuristuvat jätteet paalataan puristimen avulla tilavuuden säästämiseksi.

Yhteenvedona kaikesta ylläolevasta Lo1+Lo2:een liittyvästä:

- käytössä runsaasti ioninvaihtimia, joita tullaan elvyttämään
- viemäriveresille ei suoriteta lajittelua ennen haihdutusta
- kaikki viemäriveredet haihdutetaan
- käsiteltyjä vesiä tullaan pääasiallisesti käyttämään uudestaan laitoksen prosessilisävetenä (so. puhdistusaste on korkea)
- käytettävissä tilava nestemäisten jätteiden varasto
- polttolaitosta kiinteille palaville radioaktiivisille jätteille ei ole suunniteltu

Muutamia seikkoja Loviisa 3+4:n radioaktiivisten jätteiden käsittelystä verrattuna Loviisa 1+2:een

Vaikka virallista yksityiskohtaista sopimusta Loviisa 3+4:stä ei ole vielä tehty, voidaan jo nähdä muutamia peruseriaatteita tulevasta jätteidenkäsittelylaitoksesta:

- elvytettävien ioninvaihtimien määrä pienenee. Tilalle voi tulla myös Powdex- ja Funda-suodattimia.
- viemäriveresille tullaan suorittamaan lajittelu ennen haihdutusta. Kaikkia vesiä ei tulla haihduttamaan
- käsiteltyjä vesiä tullaan pääasiallisesti käyttämään uudestaan laitoksen prosessilisävetenä
- nestemäisten jätteiden varastosta pienempi, ehkä n. 1/2 vuoden laitostoimintaa varten
- nestemäisille jätteille oma kiinteytyslaitos
- kaasumaisten jätteiden käsittelyssä ei suuria muutoksia
- kiinteille palaville jätteille mahdollisesti polttolaitos

TAULUKKO 1.

Radioaktiivisten vesien puhdistus ioninvaihtimilla Loviisa 1:ssä (Lo1)

Ionin- vaihdin n:o	Ioninvaihtohartsit							Huom.
	mää- rä m ³	elin- ikä v	toiminta- muoto	toimint. lämpöt. °C	pääasiallisin tehtävä	vesikuoh- keutus kertaa/v	elvytys kertaa /v	
TC10N01	1,2	1	NH ₄ ⁺ ,K ⁺ /BO ₃ ³⁻	65	korroosiotuottei- den poisto = KP	12	(1)	A
TC50N01	1,2	1	NH ₄ ⁺ ,K ⁺	65	NH ₄ ⁺ /K ⁺ -tasapaino,KP	12	1	A
TC50N02	1,2	1	BO ₃ ³⁻	65	esim.J,Cl poisto	12	2	A,B
TE31N01	2,5	2	H ⁺	85	KP,K,Cs,Fe, Co poisto	3	3	A
TE31N02	2,5	2	BO ₃ ³⁻	85	KP,anionien poisto	2	2	A
TE31N03	7,5	4	OH ⁻	60	absorboi BO ₃ ³⁻	1	2	A
TR23N01	0,8	1	H ⁺	30	KP,Co,Zr poisto	6	-	C
TR23N02	0,8	1	H ⁺	30	KP,Co,Zr poisto	6	-	C
TR32N01	1,2	0,5	aktiivihili	100	öljyn poisto	-	-	C
TR32N02	1,2	1	aktiivihili	100	öljyn poisto	-	-	C
TR32N03	1,2	4	H ⁺	40	kationien poisto	3	3	A
TR32N04	1,2	4	OH ⁻	40	anionien poisto	3	3	A
TD32N01	1,2	0,5	aktiivihili	100	öljyn poisto	-	-	C
TD32N02	1,2	1	aktiivihili	100	öljyn poisto	-	-	C
TD32N03	1,2	4	H ⁺	40	kationien poisto	3	3	A
TD32N04	1,2	4	OH ⁻	40	anionien poisto	3	3	A
TD63N01	1,2	3	H ⁺	80	kationien poisto	2	2	A
TD63N02	1,2	3	BO ₃ ³⁻	80	anionien poisto	2	2	A
TM10N01	2,0	2	H ⁺	30	KP,mekaaninen suod.	2	1	C
TM10N02	2,0	2	H ⁺	30	KP,mekaaninen suod.	2	1	C
TM10N03	2,0	2	H ⁺	30	kationien poisto	2	2	C
TM10N04	2,0	2	OH ⁻	30	anionien poisto	2	1	C
TU31N01	1,2	1	H ⁺	50	esim.Co,Cr,Ni poisto	2	2	C
TU31N02	1,2	1	C ₂ O ₄ ²⁻	50	anionien ja Fe ³⁺ :n poisto	2	2	C
RY31N01	1,0	2	H ⁺	40	KP,mekaaninen suod.	15	2	C
RY31N02	1,2	3	H ⁺	40	kationien poisto	4	4	C
RY31N03	1,2	3	OH ⁻	40	anionien poisto	4	4	C
RY32N01	1,0	2	H ⁺	40	KP,mekaaninen suod.	15	2	C
RY32N02	1,2	3	H ⁺	40	kationien poisto	4	4	C
RY32N03	1,2	3	OH ⁻	40	anionien poisto	4	4	C

Huomautuksia:

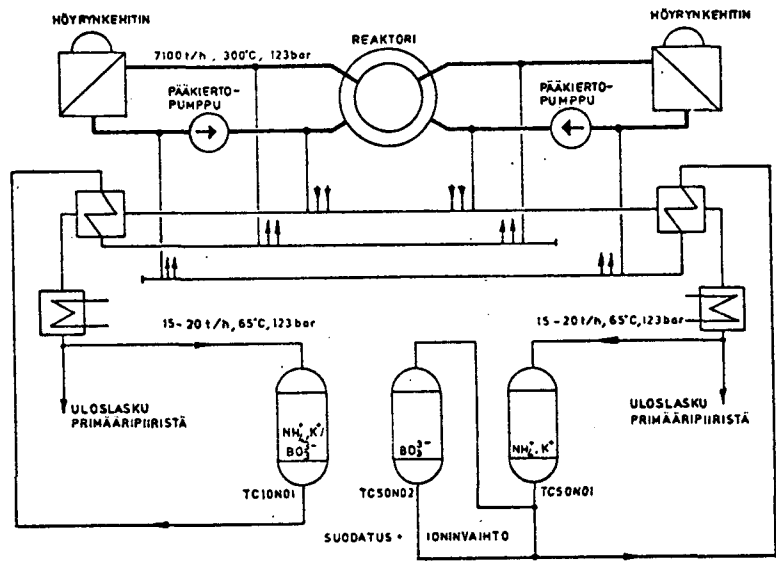
A = Loviisa 2:ssa vastaavat laitteet

B = tälle anioninvaihtimelle elvytys n. 5 % KOH-liuoksella (muille anioninvaihtimille elvytys n. 5 % NaOH-liuoksella, kationinvaihtimille käytetään n. 5 % HNO₃-liuosta)

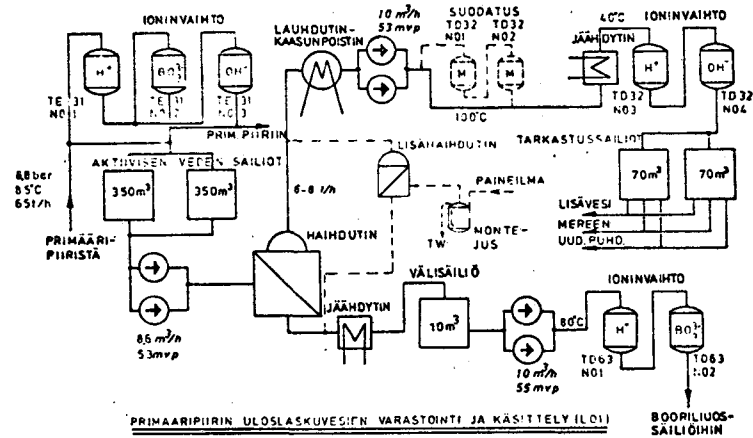
C = laitteet on yhteisiä Loviisa 1+2:lle

Loviisa 1+2:lla vuotuiset jätemäärät ovat:

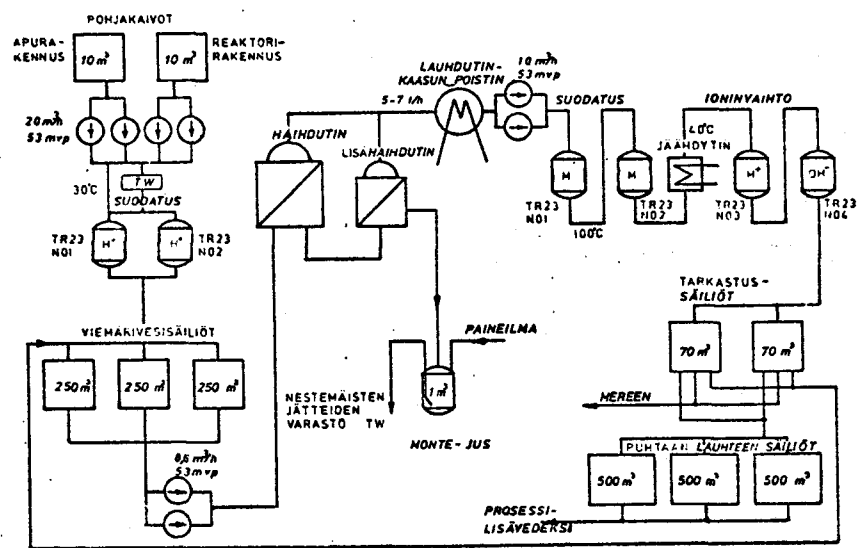
1. Matala-aktiiviseen säiliöön	- kationinvaihtohartseja	3,0 m ³
	- anioninvaihtohartseja	2,0 m ³
	- aktiivihiltä	7,2 m ³
	- korroosiotuotteita	4,0 m ³
		((eli 400 kg)
2. Korkea-aktiivisiin säiliöihin	- kationinvaihtohartseja	13,9 m ³
	- anioninvaihtohartseja	11,7 m ³
	- korroosiotuotteita	21,0 m ³
		((eli 4200 kg)



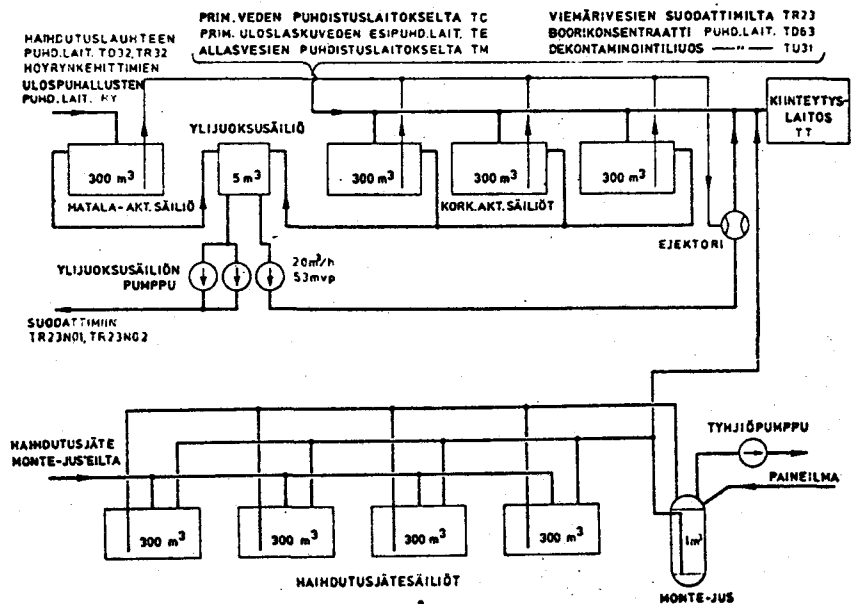
PRIMAÄRIVEDEN PUNNISTUS (LO1)
KUVA 1



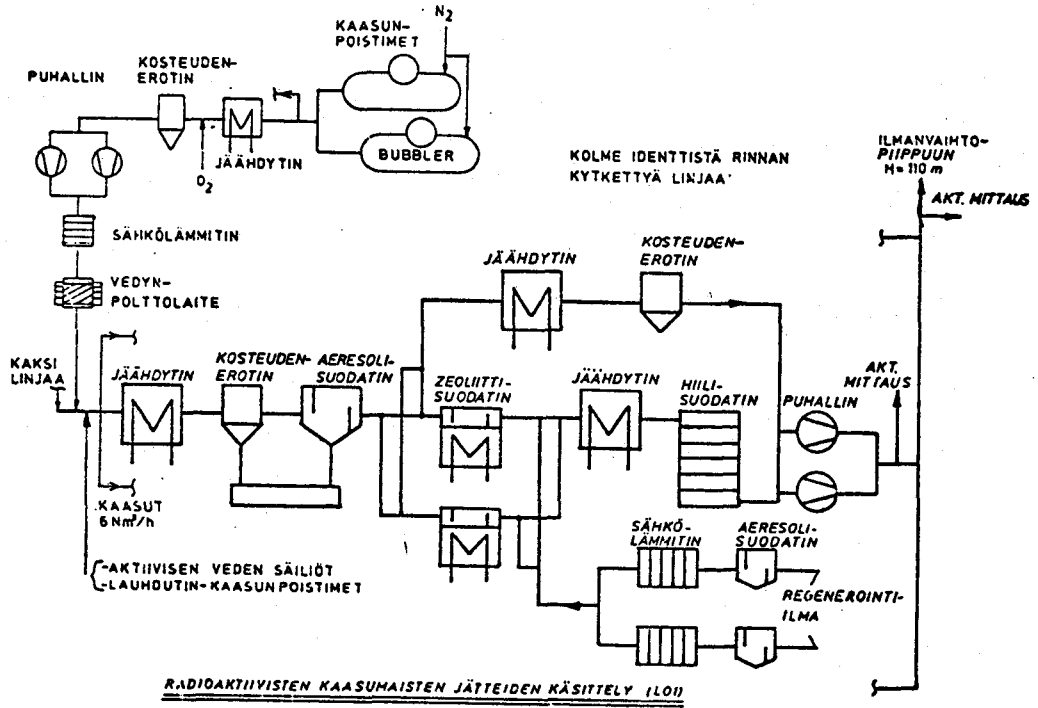
PRIMAÄRIPIIRIN ULOSLASKUVESIN VARASTOINTI JA KÄSITTELY (LO1)
ALLASVESIEN PUNNISTUS (LO1 JA LO2)
KUVA 2



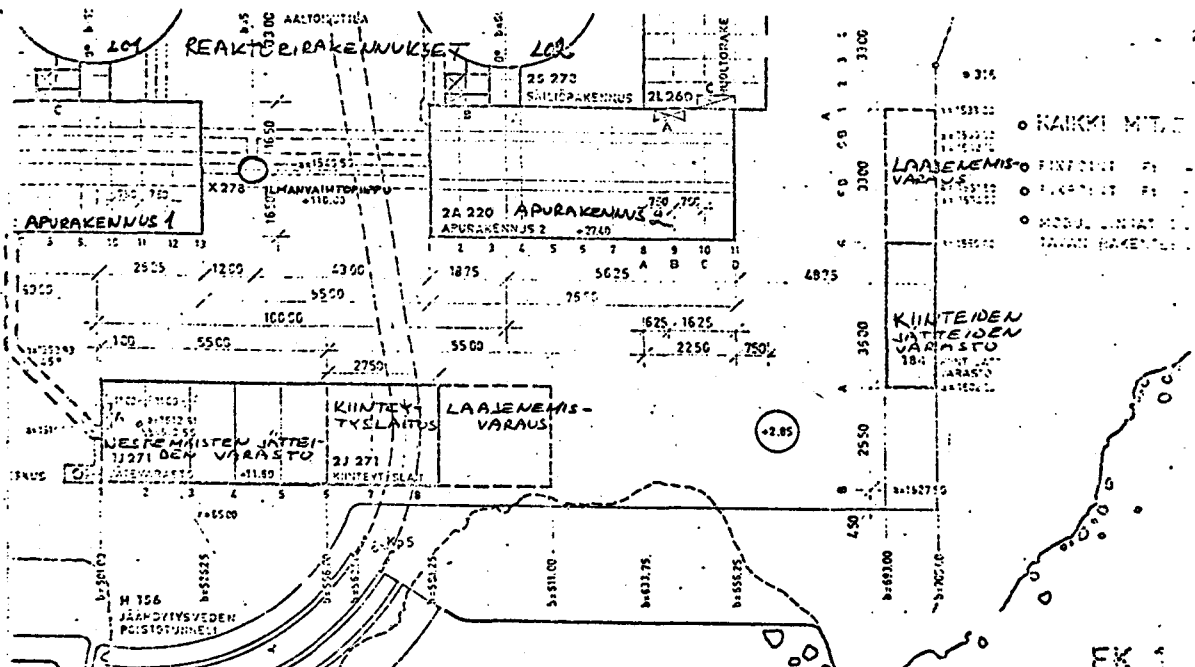
VIEMÄRIVESIEN VARASTOINTI JA KÄSITTELY (LO1)
KUVA 3



NESTEMÄISTEN JÄTTEIDEN VARASTO (LO1 JA LO2)
KUVA 4



KUVA 5



KUVA 6.

VOIMALAITOSRAKENNUKSET
 MODULI - SEKÄ KOORDINAATTOPIIPUSTUS
 TAPIOLA 10.5.1973
 EK 1 L01.200.008C
 1:1000
 Korjaus 18.2.1974

LOVIISAN VOIMALAITOS

Omistaja: Imatran Voima Osakeyhtiö
Päätoimittaja: V/O Atomenergopromexport
Sijainti: Hästholmenin saari, 12 km kaakkoon
Lovisan kaupungista
ja 100 km itään Helsingistä

Rakennusaikataulu:	Lo 1	Lo 2
Rakennustöiden alku	6.1971	8.1972
Reaktori kriittinen	1.1976	10.1977
Kaupallisesti käytössä	6.1976	4.1978

REAKTORITYYPPI: PWR, painevesireaktori

TEHO
sähköteho, netto 420 MW
sähköteho, brutto 440 MW
lämpöteho 1375 MW

REAKTORISYDÄN

korkeus 2,42 m
halkaisija 2,80 m
polttoaineen laatu UO₂
polttoaineen määrä 42 tonnia U
poistopalama 29000 MWd/tU
polttoainenippuja 349 kpl
polttoainesauvoja/nippu 126 kpl
booriteräksisiä säätösauvoja 37 kpl

JÄÄHDYTE

jäähdyte-hidaste paine tislattu vesi ja H₂BO₃
123 bar
lämpötila reaktorin sisäänmenossa 269°C
lämpötila reaktorin ulostulossa 300°C
ensiökierron virtaus 6x7100 l/h

REAKTORIN PAINEASTIA

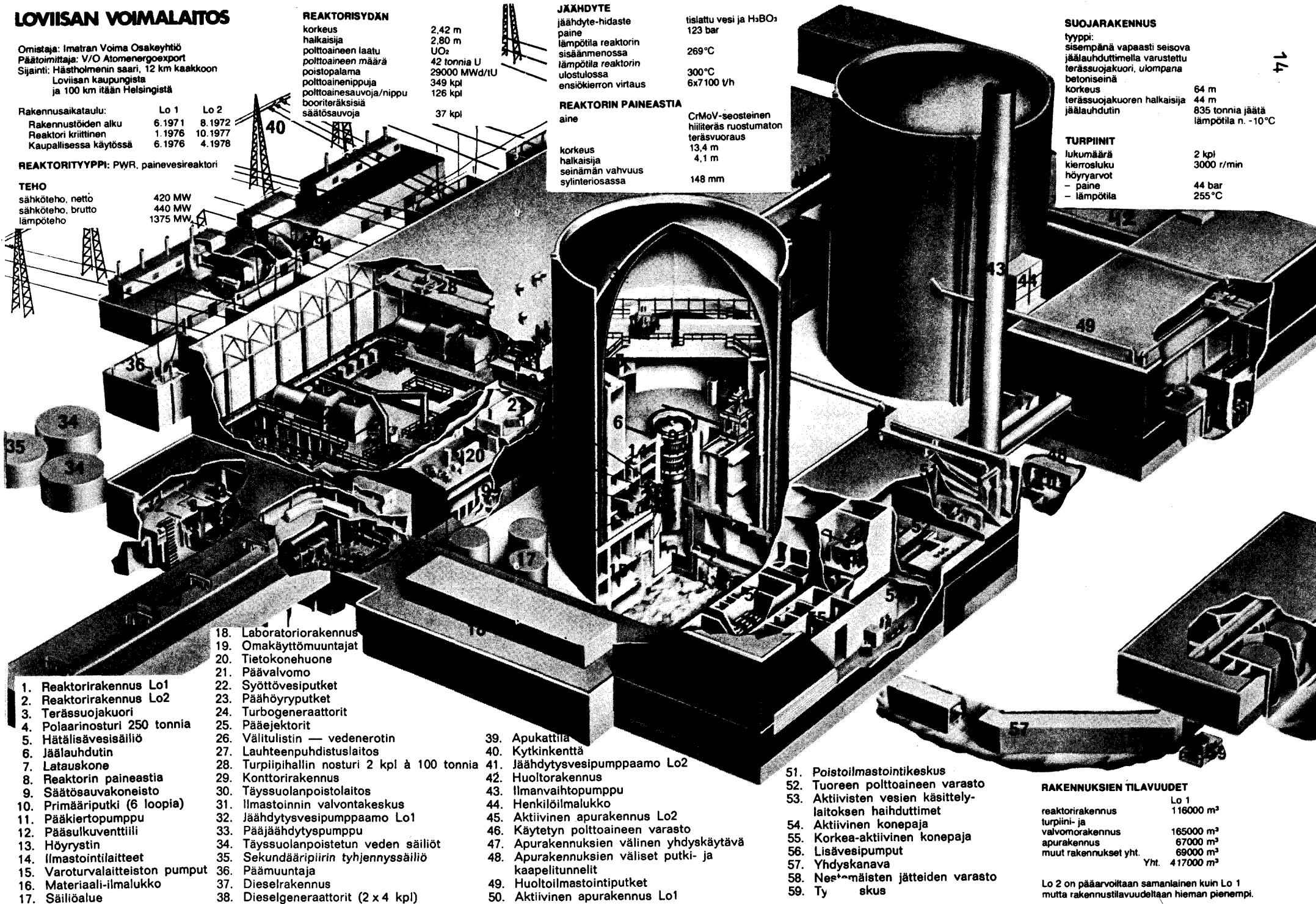
aine CrMoV-seosteinen hiiliiteräs ruostumaton teräsvuoraus
korkeus 13,4 m
halkaisija 4,1 m
seinämän vahvuus 148 mm
sylinteriosassa

SUOJARAKENNUS

tyyppi: sisempänä vapaasti seisova jäälauhduttimella varustettu terässuojakuori, ulompana betoniseinä
korkeus 64 m
terässuojakuoren halkaisija 44 m
835 tonnia jäätä lämpötila n. -10°C
jäälauhdutin

TURPIINIT

lukumäärä 2 kpl
kierrosluku 3000 r/min
höyryarvot
- paine 44 bar
- lämpötila 255°C



1. Reaktorirakennus Lo1
2. Reaktorirakennus Lo2
3. Terässuojakuori
4. Polaarinosturi 250 tonnia
5. Häätäisävesisäiliö
6. Jäälauhdutin
7. Latauskone
8. Reaktorin paineastia
9. Säätösauvakoneisto
10. Primääriputki (6 loopia)
11. Pääkiertopumppu
12. Pääsulkuventtiili
13. Höyrystin
14. Ilmastointilaitteet
15. Varoturvalaitteiston pumput
16. Materiaali-ilmalukko
17. Säiliöalue

18. Laboratoriorakennus
19. Omakäyttömuuntajat
20. Tietokonehuone
21. Päävalvomo
22. Syöttövesiputket
23. Päähöyryputket
24. Turbogeneraattorit
25. Pääejektorit
26. Välitulistin — vedenerotin
27. Lauhteenpuhdistuslaitos
28. Turpiinihallin nosturi 2 kpl à 100 tonnia
29. Konttorirakennus
30. Täyssuolanpoistolaitos
31. Ilmastoinnin valvontakeskus
32. Jäähdytysvesipumppaamo Lo1
33. Pääjäähdytyspumppu
34. Täyssuolanpoistetun veden säiliöt
35. Sekundääripiirin tyhjennyssäiliö
36. Päämuuntaja
37. Dieselrakennus
38. Dieselgeneraattorit (2 x 4 kpl)

39. Apukattila
40. Kytkenkenttä
41. Jäähdytysvesipumppaamo Lo2
42. Huoltorakennus
43. Ilmanvaihtopumppu
44. Henkilöilmalukko
45. Aktiivinen apurakennus Lo2
46. Käytetyn polttoaineen varasto
47. Apurakennuksien välinen yhdyskäytävä
48. Apurakennuksien väliset putki- ja kaapelitunnelit
49. Huoltoilmastointiputket
50. Aktiivinen apurakennus Lo1

51. Poistoilmastointikeskus
52. Tuoreen polttoaineen varasto
53. Aktiivisten vesien käsittelylaitoksen haihduttimet
54. Aktiivinen konepaja
55. Korkea-aktiivinen konepaja
56. Lisävesipumput
57. Yhdyskanava
58. Nestemäisten jätteiden varasto
59. Ty skus

RAKENNUKSIEN TILAVUUDET

	Lo 1
reaktorirakennus	116000 m ³
turpiini- ja valvomarakennus	165000 m ³
apurakennus	67000 m ³
Lisävesipumput	69000 m ³
muut rakennukset yht.	69000 m ³
Yht.	417000 m³

Lo 2 on pääarvoiltaan samanlainen kuin Lo 1 mutta rakennustilavuudeltaan hieman pienempi.

DI Jarmo Söderman
Oy W. Rosenlew Ab

Esitelmä Suomen Atomiteknisen Seuran kokouksessa 1975-01-30

YDINVOIMALOIDEN JÄTTEIDENKÄSITTELYLAITOKSET LAITETOIMITTAJAN KANNALTA

1. Johdanto

Ydinvoimaloissa syntyvät jätteet voidaan luokitella korkea-, keski- ja matala-aktiivisiin jätteisiin. Korkea-aktiivisia jätteitä joudutaan normaalisti käsittelemään vain fissiokelpoisen uraanin ja plutoniumin talteenotossa käytetyistä polttoaine-elementeistä. Sen sijaan voimaloissa käsiteltävistä jätteistä suuri osa on matala-aktiivista, eli aktiivisuudet ovat alle $0,01 \text{ Ci/m}^3$; muut jätteet kuuluvat keskiaktiiviseen ryhmään ($0,01\text{--}1000 \text{ Ci/m}^3$).

Seuraavassa esittelen pelkästään nestemäisten jätteiden käsittelyä ja siinä lähinnä jätevesien haihdutusta, suodatusta ja jätekonsentraattien kiinteytystä.

Kuvassa 1 on esitetty kaavio käsittelylaitoksesta kevytvesireaktorien yhteydessä. Eri puolilta voimalaitosta tulevat jätevedet johdetaan ensin keräilyssäiliöihin, joista edelleen haihdutukseen tai pre-coat-suotimelle. Puhdistettu vesi, lauhteet ja suodos johdetaan sen jälkeen valvontasäiliöihin; aktiivinen tuote, konsentraatit ja suodinkakku jätekonsentraattisäiliöihin.

Tässä kaaviossa joninvaihtosuodin on esitetty varmistavana laitoksena: jos puhdistetun veden aktiivisuus ylittää raja-arvon, voidaan vettä kierättää valvontasäiliöistä joninvaihtolaitoksen läpi. Vesi voidaan myös tarvittaessa johtaa takaisin prosessin alkuun. Hyväksytty vesi päästetään vesistöön tai viedään puhtaan lauhteen keräilyssäiliöihin.

Konsentraattisäiliöihin kerätty liete kiinteytetään lopullista varastointia varten esimerkiksi betonoimalla tai bitumoimalla.

2. Haihdutinlaitos

Kuvassa 2 on esitetty periaatepiirros rad-waste-haihdutuslaitoksesta. Haihdutin on ns. pakkokierto haihdutin, jossa erillinen höyrykupu ja kiertonesteen lämmitin. Höyrykuvusta johdetaan höyry pesukolonnin läpi, ja edelleen lauhduttimelle. Lauhduttimen jälkeen voidaan lauhteesta poistaa kaasut ja jäädyttää se ennen johtamista valvontasäiliöihin.

Haihdutinlaitoksen suunnittelussa voidaan pääosiltaan edetä tavanomaiseen tapaan; lisäseikkoina on luonnollisesti otettava huomioon säteily- suojaus- ja lämpökuormakysymykset ja muut, bunkkeriin sijoittamisesta johtuvat erityisvaatimukset: suuri toimintavarmuus, toiminnan vaaraton keskeytyminen häiriötilanteessa (odottamaan käyttömiehen toimenpiteitä), huollon nopeus, toiminnan kauko-ohjaus jne.

Radioaktiivisten jätevesien haihdutuksessa käytetään yleisesti suurinpiirtein normaalipainetta, 1 ata. Laitoksen kapasiteetti on luokkaa 4--6 t/h. Haihdutettavan jäteveden vuotuinen määrä vaihtelee kuitenkin melkoisesti riippuen voimalaitoksen tyypistä ja sen käytöstä.

Haihdutinlaitoksen ajotapa on seuraava: jätevettä syötetään ja haihdutetaan jatkuvasti, mutta kerääntynyt konsentraatti poistetaan haihduttimesta vasta, kun jätteen kiintoainepitoisuus on haihduttimessa noussut riittävälle tasolle, yleensä n. 20 %. Tällöin laitos pysäytetään ja pestään, minkä jälkeen uusi jakso voi alkaa. Yksi jakso kestää normaalisti n. 2 viikkoa.

Haihdutinlaitoksessa saavutetaan huomattavan korkeita puhtauskertoimia. Ns. dekontaminaatiokerroin (eli konsentraatin ja haihduttimen lauhteen aktiivisuuksien suhde) on n. 20 %:n kiintoainepitoisuudessa 10^5 -- 10^7 .

Korroosion minimoimiseksi käytetään yleisesti jäteveden pH-arvona 10--11. Tästä on kuitenkin seurauksena korkea vaahtoamisalttius. Vaahdon hallitsemiseksi varustetaan höyrykupu vaahdonilmaisimin. Ilmaisimen antama signaali pysäyttää lämmityshöyryn syötön, pysäyttää syöttöpumpun ja laukaisee vesisuihkut höyrykuvun yläosassa ja ne pesevät vaahdon alas. Ennen toiminnan jatkamista annostellaan lisäksi haihduttimeen ns. anti-foaming-kemikaaleja, esim. propeenioksidia ja/tai silikoniöljyä, jotka estävät

uuden vaahdon syntymisen.

Vaahtoamisalttius on suurinta heti toimintajakson alussa, mutta pienenee kiintoainepitoisuuden kasvaessa. Eräissä kokeissa ei kemikaaleja ole tarvittu enää yli 13 p-%:n pitoisuuksissa. Rad-waste-haihduttimessa pyritään kiehumisen saamaan mahdollisimman rauhalliseksi. Tämän vuoksi höyrykupu mitoitetaan melko suureksi ja kiertovirran lämpötilan nousu pieneksi. Kiertovirta on lauhdevirtaan verrattuna 300--500-kertainen. Höyryn mukana nousevien pisaroiden eliminoimiseksi rakennetaan höyrykupu korkeaksi ja varustetaan pisaranerottimin.

Korkeiden dekontaminaatiokertoimien aikaansaamiseksi on pesukolonni varustettu joko täytekappalein tai kellopohjin. N. 10 % lauhteesta palautetaan refluxina kolonnille.

Höyrynkulutuksen pienentämiseksi voidaan käyttää myös ns. termokompressorihaihdutusta, jossa haihdutettu, kylläinen höyry puristetaan kompressorilla korkeampaan paineeseen ja käytetään sitten lämmityshöyrynä haihduttimen lämmittimessä. Energiankulutus pienenee edelleen, kun lauhde johdetaan lämmönvaihtimeen ja syöttövesi esilämmitetään. Periaate on esitetty kuvassa 3.

3. Pre-coat-suodin

Osa jätevesistä voidaan käsitellä ilman haihdutusta. Yksi laajalti käytetty suodintyyppi on esitetty kuvassa 4, ns. Funda-suodin. Suotimessa muodostavat suodinpinnan pyöreät, lievästi kartiomaiset lautaset, jotka on asetettu päällekkäin ja kiinnitetty yhteiseen akseliin. Pre-coat-aineena voidaan käyttää esim. silikageeliä. Suodinpohjana on teräsviira. Onton akselin kautta voidaan suodos johtaa valvontasäiliöihin. Suotimen toiminta voidaan pitkälle automatisoida. Esimerkiksi suodinkakun poisto tapahtuu keskipakovoiman avulla pyörittämällä akselia.

Pre-coat-suotimen käytön yhteydessä voidaan käyttää keräilyssäiliöissä erilaisia sakanmuodostuskemikaaleja ja saada osa vesiliukoisista komponenteista erottumaan suodatuksessa.

4. Sekajoninvaihdin

Sekajoninvaihdinta voidaan käyttää kaavion 1 esittämänä varmistavana laitoksena. Se on normaalitoimintainen: käyttö, back-wash, regenerointi ja sekoitus ilman avulla. Dekontaminaatiokertoimet ovat tavallisesti luokkaa 100--10000.

5. Kiinteytyslaitos

Käsittelen esimerkkinä yhtä kiinteytyslaitosratkaisua: bitumointimenetelmää, jonka keskeinen laite on ns. ruuviextruderin, haluamatta mitenkään puuttua eri menetelmien paljon pohdittuun paremmuusjärjestykseen.

Kuvassa 5 on esitetty bitumiextruderin periaate. Jätekonsentraatti ja lämmitetty bitumi annostellaan yhtäaikaan ruuveille, jotka sekoittavat ja siirtävät massaa eteenpäin. Samalla konsentraatin mukana tullut vesi haihtuu. Lopputuotteen lämpötila on n. 180°C ja kosteus 0,5--1,0 %. Seoksen suola/bitumisuhde voidaan valita melko korkeaksi, esim. 60/40. Seos syötetään 200 l:n terästynnyreihin, minkä jälkeen tynnyrit suljetaan ja siirretään varastoon.

Esimerkkinä tuotemääristä seuraavat luvut: ruuville syötetään n. 150 kg/h konsentraattia (20 p-%) ja 20 kg/h bitumia. Lopputuotetta saadaan 50 kg/h (60/40-suhteella), eli haihdutus on 120 kg/h. Tuotteen ominaispaino on n. 1,5 t/m³ eli tilavuusvirta on n. 33 l/h. 200 l:n tynnyri täyttyy näin 80 %:sti n. 5 tunnissa ja vuorokauden aikana tuotetta tulee 4 tynnyriä.

Veden haihduttamiseen vaadittava lämpövirta saadaan aikaan johtamalla n. 20 atyn höyryä ruuveja ympäröivän rungon vaippaan. Runko on koottu 9--10 osasta; kuhunkin osaan voidaan valita sopiva höyryn syöttö ja lämpötila. "Profiili" on esim.: alkupäässä 60--70°C, nopea nousu n. 140°C:een, tasainen nousu 180°C:een.

Haihdutettu höyry johdetaan höyrykupujen kautta lauhduttimille, joista vesi palautetaan takaisin käsittelyyn.

Tynnyrien käsittely vaatii kiinteytyslaitoksen suunnittelussa erityisen huomion. Kuvassa 6 on esitetty tynnyrintäyttölaitoksen periaate. Keskeinen osa on n. 1 m:n paksuisten betoniseiniä suojassa oleva ns. karuselli. Karuselliin mahtuu 6 tai 8 tynnyriä kerrallaan. Käyttömoottori on sijoitettu huoneen ulkopuolelle. Karuselliä "ajetaan" 45° tai 60° kerrallaan, niin että kukin tynnyri vuorollaan tulee extruderin poistopään alle ja voidaan täyttää.

Karusellin lisäksi tarvitaan joukko apulaitteita, kuten tynnyreiden kuljetus- ja nostolaitteet, kansien asetus- ja kiinnityslaitteet jne. Toiminta tapahtuu osittain automaattisesti, osittain kauko-ohjatusti.

6. Suunnittelu ja valmistus kotimaassa

Luonnollisesti on kysyttävä, onko yleensä mielekästä lähteä suunnittelemaan ja valmistamaan rad-waste-käsittelylaitoksia Suomessa. Oma kyllä-vastauksemme on perustunut ennen muuta prosessiteollisuuden haihdutinsuunnittelusta saatuun pitkään kokemukseen ja edellä mainittuun, rad-waste-laitoksen pääperiaatteessa konventionaaliseen prosessitekniikkaan, ehkä kiinteytystä lukuunottamatta.

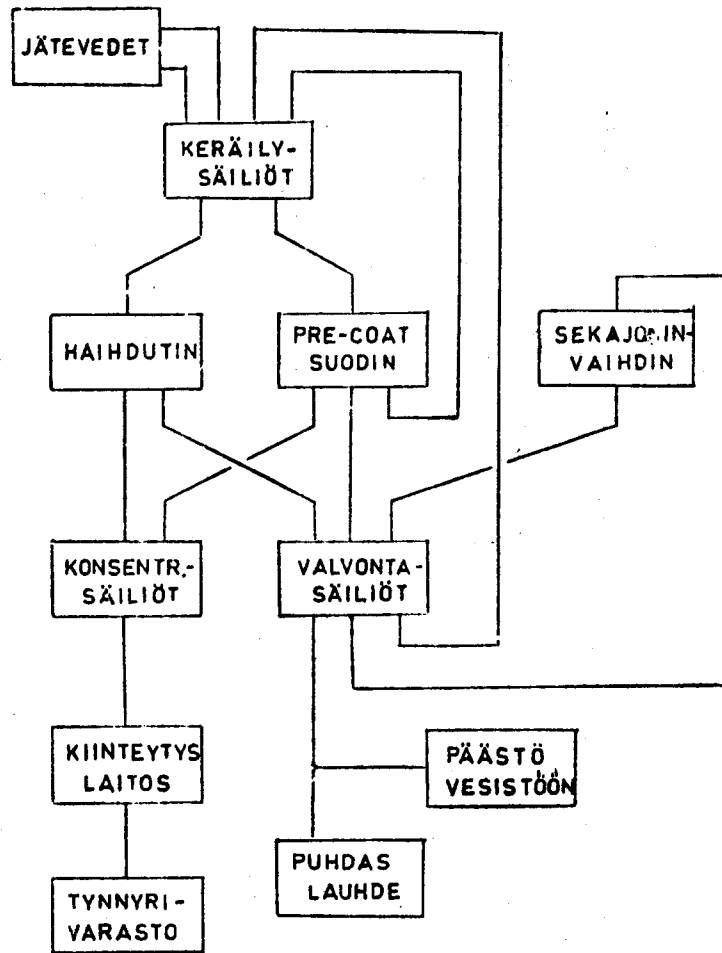
Kaikkea ei tietenkään kannata väkisin tehdä itse. Hyvä työnjako tuntuisi tässä tapauksessa olevan käyttää riittävän voimakasta tukea systeemi- ja ehkä myös instrumentointi- ja automatiikkasuunnittelussa, jolloin omalle osalle tulee prosessin laitekokonaisuudet yksityiskohtineen. Valmistuksen osalta on osa erikoislaitteista ostettava ulkomailta, pääosa kuitenkin voidaan saada aikaan omin voimin.

Taloudellista kannattavuutta on aina harkittava ensimmäiseksi. Riskejä "polttaa kätensä" on olemassa, ja ne on pyrittävä etukäteen arvioimaan ja minimoimaan. Markkinanäkymät ovat tällä hetkellä melko vaikeaselkoiset, ydinvoimaloiden rakentamisen tahtihan on puhuttanut eri piirejä runsaasti.

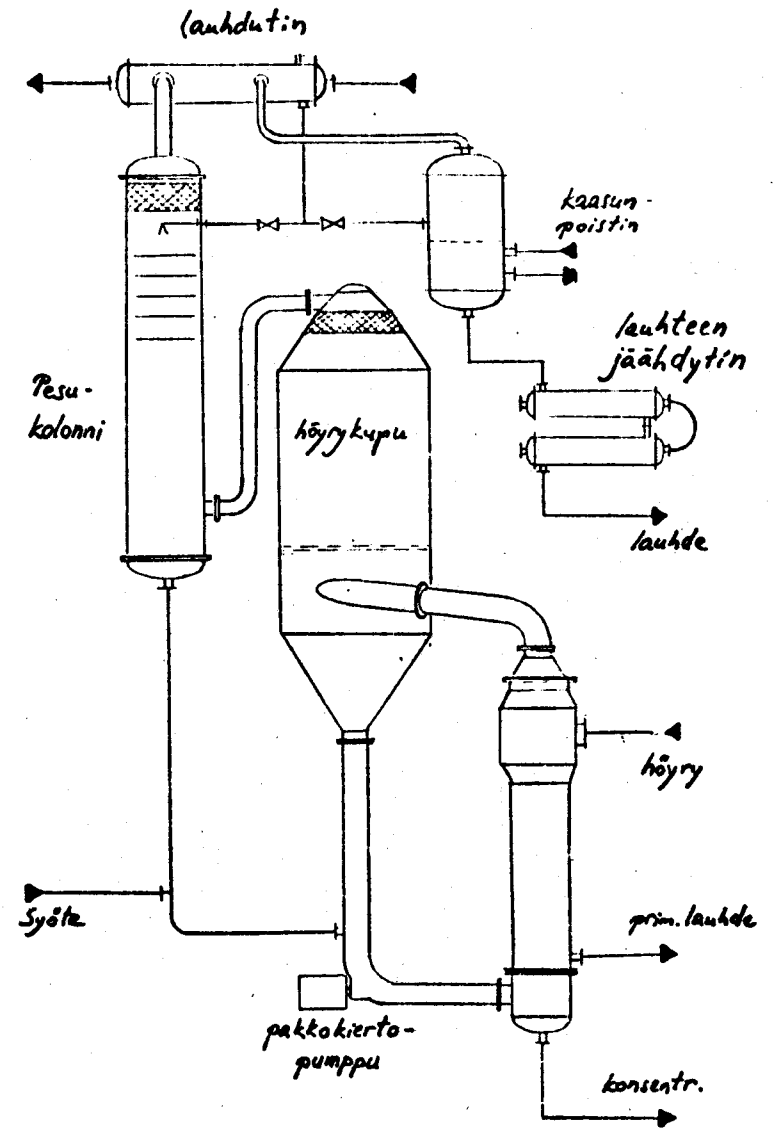
7. Yhteenveto

Nestemäisten jätteen käsittelyprosessi on suurelta osin tavanomaista

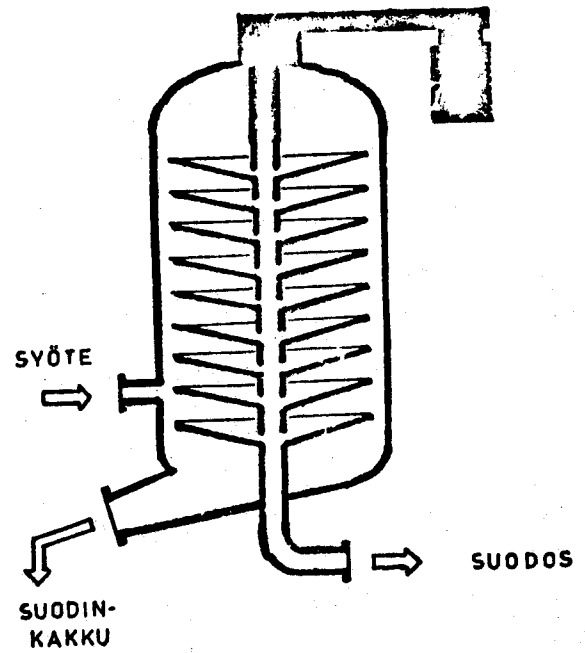
prosessiteollisuuden tekniikkaa, lukuunottamatta ehkä kiinteytyslaitoksen erikoisosia. Radioaktiivisuuden takia tulee laitesuunnitteluun erityispiirteitä, joista muutamaa on valotettu edellä. Kokonaisuutena katsoen on laitteiden suunnittelu ja valmistus hyvinkin pitkälle mahdollista kotimaisin voimin. Päämääränä on liittää rad-waste-laitokset Suomen ydinteollisuuden menestyvien tuotteiden joukkoon.



KUVA 1 Jätevesien käsittely



KUVA 2. Rad-waste-haihdutinlaitos



KUVA 4 Precoat-suodin (Fundament)

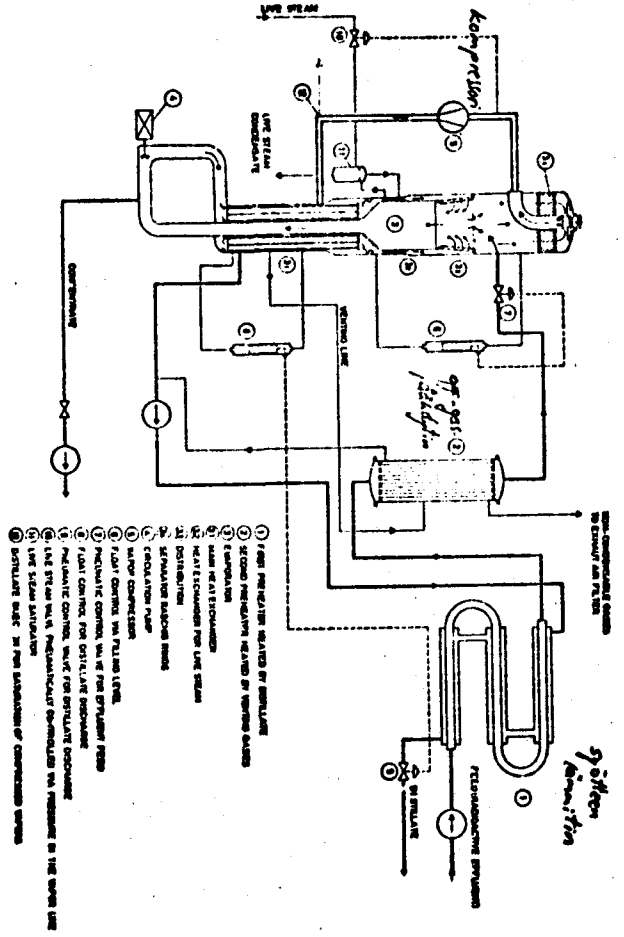


FIG. 5. Flow-sheet of the vapor compression evaporator (4.5 VA).
 Kuva 5. Höyrykompressorin kaikkokuvio.

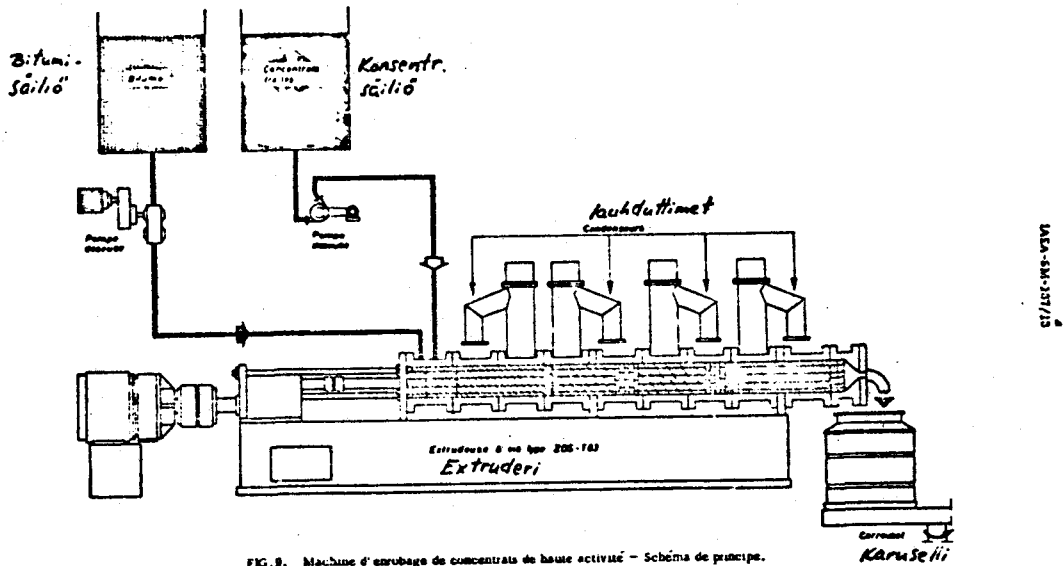
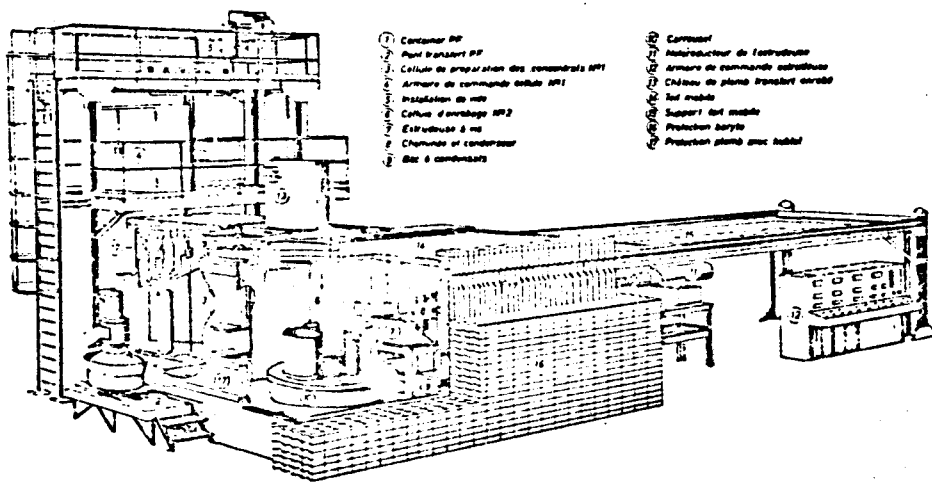


FIG. 9. Machine d'extrusion de concentrats de haute activite - Schéma de principe.
 Kuva 5. Bitumiekstruderi

586-588-217/25
 597



- | | |
|---|---|
| 1) Conteneur PP | 10) Carrousel |
| 2) Pouti transferi PP | 11) Manufactureur de l'extrudeur |
| 3) Cellule de preparation des concentrats SPI | 12) Armure de commande extrudeur |
| 4) Armure de commande cellule SPI | 13) Châssis de planis transferi carrousel |
| 5) Installation de mise | 14) Sol mobile |
| 6) Cellule d'extrusion SPI2 | 15) Support sol mobile |
| 7) Extrudeur à vis | 16) Protection baryte |
| 8) Cheminée et condenseur | 17) Protection plomb avec habitat |
| 9) Bâse à condensats | |

FIG. 8. Installation pilote de Marcoule: extrudeuse à vis.
 Kuva 6. Kinteytyslaitos

586
 L'ÉLÉVAITÉ M. ANDROUOT

SÄTEILYFYYSIIKAN LAITOS
Reaktoriturvallisuusosasto
Jukka Laaksonen

MUISTIO

1975-01-13

PLUTONIUM, LWR-TEOLLISUUDEN PULMALLINEN SIVUTUOTE

- 1 JOHDANTO

- 2 PLUTONIUMIN ESIINTYMINEN JA VALMISTUS
 - 2.1 Luonnon plutonium
 - 2.2 Keinotekoisien plutoniumin historia
 - 2.3 Transuraanien muodostuminen kevytvesireaktoreissa

- 3 PLUTONIUM BIOSFÄÄRISSÄ
 - 3.1 Plutoniumin kiertokulusta
 - 3.2 Plutoniumin vaikutus nisäkkäisiin
 - 3.3 Plutoniumin vaarallisuus muihin aineisiin verrattuna

- 4 PLUTONIUM LWR-TEOLLISUUDESSA
 - 4.1 LWR-teollisuuden komponentit ilman plutoniumkiertoa
 - 4.2 Plutoniumkierron tuomat muutokset LWR-teollisuuteen
 - 4.3 Koko LWR-teollisuuden ympäristövaikutukset

- 5 TRANSURAANIJÄTTEET
 - 5.1 Korkea-aktiiviset jätteet
 - 5.2 Matala-aktiiviset jätteet, alfa-aktiivisuus yli 10 nCi/g
 - 5.3 Tulevaisuudennäkymiä

JOHDANTO

Kevytvesireaktoreiden polttoaine- ja jätehuollon järjestämiseksi tarvitaan joukko teollisuuslaitoksia, jotka yhdessä reaktoreiden kanssa muodostavat LWR-teollisuuden. Näitä muita laitoksia tarvitaan lukumääräisesti paljon vähemmän kuin reaktoreita, ja siksi on mahdollista, että niistä mitään ei tulla koskaan rakentamaan Suomeen. Tästä huolimatta on suomalaisessa julkisessa keskustelussa tuotu usein esille huolestuneisuus niiden ongelmien suhteen, jotka tulevat vastaan muilla laitoksilla. Erityisen paljon on puhuttu plutoniumin ja muiden transuraanien vaarallisuudesta. Tällöin on osoittautunut, että plutoniumiin liittyvät käsitykset ovat varsin omalaatuisia eikä niillä useinkaan ole todellisuuden kanssa mitään tekemistä. Tämän raportin kirjoittaminen on katsottu aiheelliseksi nimenomaan näiden virheellisten käsitysten oikaisemiseksi. Korostettakoon kuitenkin voimakkaasti, että plutonium ei ole suomalaisten ongelma eikä siihen tällä hetkellä ole syytä kiinnittää enempää säteilyturvallisuusviranomaisten rajoitettuja voimavaroja.

Tämä raportti perustuu etupäässä siihen laajaan kokoomatietoon, joka on esitetty USAEC:n elokuussa 1974 julkaisemassa neliosaisessa raporttisarjassa WASH-1327, The generic environmental statement on the use of recycle plutonium in mixed oxide fuel in LWR's. Kyseisen julkaisun päätarkoitus on vertailla toisiinsa LWR-teollisuuden ympäristövaikutuksia ilman plutoniumin uudelleenkiertoa ja uudelleenkierron kanssa. Lisäksi on otettu muutamia isotooppeihin liittyviä lukuarvoja Knolls'in laboratorion nuklidikartasta vuodelta 1972.

2

PLUTONIUMIN ESIINTYMINEN JA VALMISTUS

2.1

Luonnon plutonium

Pitkäikäisin plutoniumin isotooppi on Pu^{244} , jonka puoliintumisaika on 83 miljoonaa vuotta. Jos oletetaan, että alkuaaineet muodostuivat 4,5 miljardia vuotta sitten, voidaan laskea, että Pu^{244} :n määrä on tällä hetkellä vain 10^{-17} -kertainen sen alkuperäiseen määrään verrattuna.

Pu^{244} :n hajoamissarjassa on pitkäikäisin isotooppi Th^{232} , jonka puoliintumisaika on 14 miljardia vuotta ja jota on tapana pitää hajoamissarjan emäaineena. Toriumia on maapallolla likimain sama määrä kuin uraania. Jos siis haluaa löytää plutoniumia luonnosta, on sitä etsittävä toriumesiintymistä, joissa sitä voi olla korkeintaan luokkaa 10^{-11} ppm:n suuruisina pitoisuuksina.

Hiljattain on luonnon plutoniumia todella löydetty.

2.2

Keinotekoisien plutoniumin historia

Ensimmäiset keinotekoiset plutoniumytimet tuotettiin ennen ketjureaktion aikaansaamista. Pu^{238} identifioitiin helmikuussa 1941 ja Pu^{239} muutamia kuukausia myöhemmin. Valmistetut plutoniummäärät olivat niin pieniä, että ne eivät juuri vaikuttaneet uuden aineen ominaisuuksien selvittämiseen.

Plutoniumin synty uraanireaktorissa ja sen edulliset reaktori-fysikaaliset ominaisuudet osattiin kuitenkin ennustaa teoreettisesti. Joulukuussa 1941 käynnistettiin USA:ssa suuri projekti, jonka tarkoitus oli saada aikaan ketjureaktio luonnonuraanigrafiitti -systeemissä ja tuottaa plutoniumia tämän reaktion avulla. Ketjureaktio saatiin aikaan joulukuussa 1942 urheiluhallissa keskellä Chicagoo. Tämän koereaktorin antaman kokeuksen avulla alettiin heti rakentaa Hanfordiin varsinaista plutoniumintuottoreaktoria, joka käynnistyi elokuussa 1944. Ensimmäinen plutoniumia polttoaineena käyttänyt reaktori käynnistyi Los Alamosissa 1946.

Vuonna 1942 oli plutoniumia käytössä mikrogrammoja, 1943 milligrammoja ja 1944 grammoja. Hanfordin ensimmäisen reaktorin vuosituotto oli 200 kg. Myöhemmin on aseluokan plutoniumia tuotettu kaikissa ydinasevaltioissa. Koska eri maiden plutoniumintuottoreaktorit tunnetaan, on mahdollista arvioida nykyisten varastojen suuruudet. Hyvin epäviralliset luvut,

jotka eivät esiinny USAEC:n raportissa, ovat 39 tonnia USA:ssa, 14 tonnia Neuvostoliitossa, 6 tonnia Englannissa, 3 tonnia Kiinassa ja 2 tonnia Ranskassa, yhteensä 64 tonnia.

Kevytvesireaktorissa tuotettua plutoniumia on varastossa toistaiseksi alle yksi tonni. USA:ssa aloitti ensimmäinen kaupallinen jälleenkäsittelylaitos toimintansa vasta vuonna 1966 ja 1973 se suljettiin parannusten ja laajennusten tekemistä varten. Kaksi uutta laitosta valmistuu 1975 ja 1976, jonka jälkeen plutoniumia alkaa kerääntyä nopeasti. Ennusteiden mukaan ylittää erotetun plutoniumin määrä USA:ssa 10 tonnia vuonna 1978, 100 tonnia vuonna 1984, 300 tonnia vuonna 1990 ja 1000 tonnia vuonna 1997.

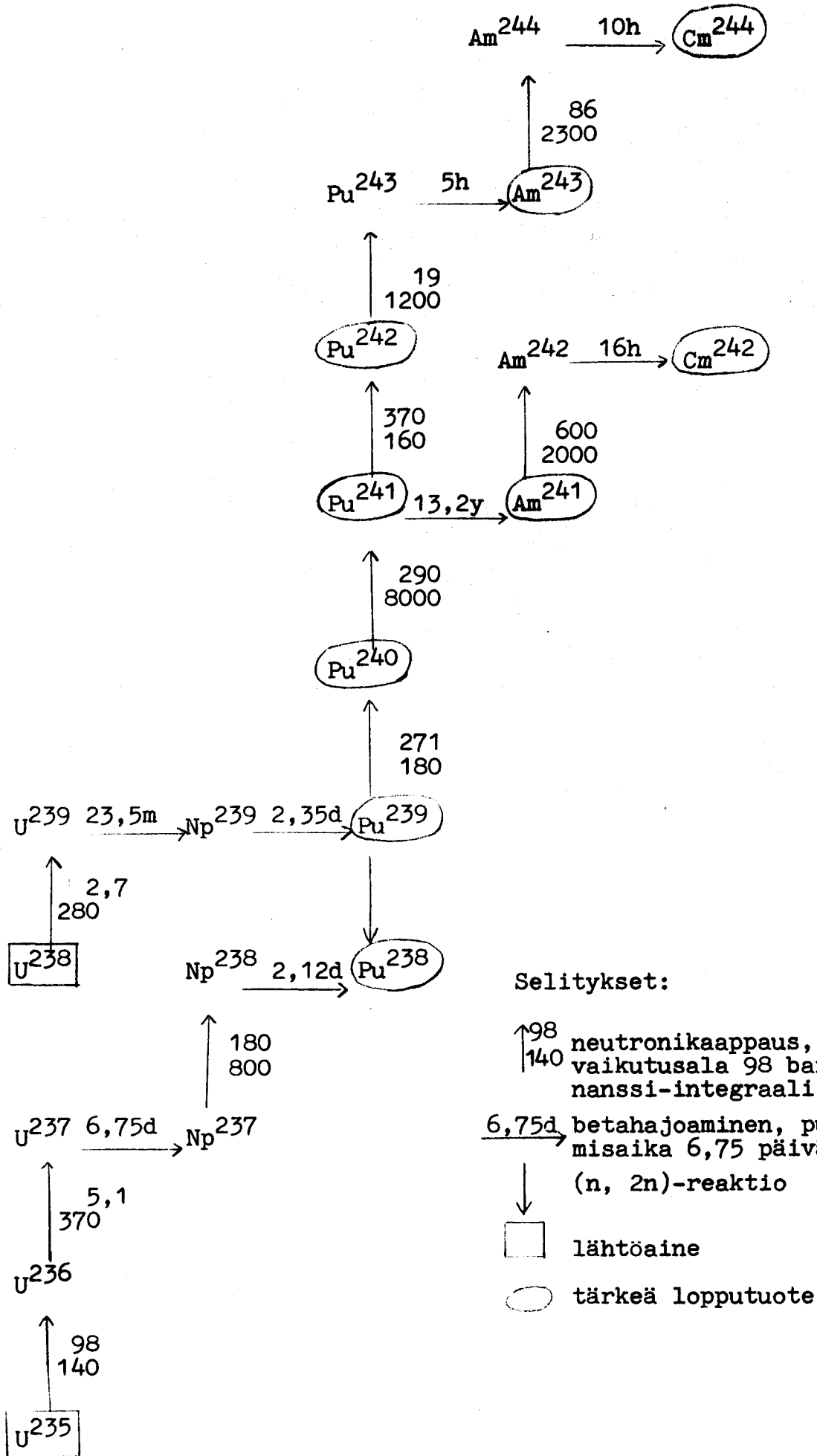
Heti plutoniumin keksimisestä lähtien on tiedostettu sen radiobiologinen vaarallisuus ja sen biologisia vaikutuksia on tutkittu siitä alkaen, kun havaittavia määriä on ollut käytössä.

2.3

Transuraanien muodostuminen kevytvesireaktoreissa

Transuraanien muodostumista voidaan helpoimmin tarkastella kuvan 2.1 tapaisen kaavion avulla. Tähän kuvaan on otettu selvyuden vuoksi vain tavallisimmat reaktioketjut ja tärkeimmät transuraanit. Kuvaan on merkitty neutronikaappausten vaikutusalat termisille neutroneille, neutronikaappauksen resonanssi-integraalit ja betahajoamisten puoliintumisajat. Reaktio ($n, 2n$) voi tapahtua vain nopeilla neutroneilla ja vaikutusala riippuu voimakkaasti neutronin energiasta. Kuvaan 2.1 merkityjä aineita voi syntyä myös muulla tavoin, mutta muiden reaktioketjujen tuotot ovat dekadeja pienemmät kuin kuvaan merkittyjen.

Curiumia raskaampiin aineisiin päästään vasta isotoopin Cm^{249} kautta, ja sitä syntyy reaktorissa hyvin vähän. Cm^{249} hajoaa nopeasti berkeliumiksi ja tämä edelleen kaliforniumiksi. Jos plutoniumin uudelleenkierto toteutetaan USAEC:n suunnitelmien mukaan, muodostuu 1000 MW:n reaktorissa Cf^{249} :ää enintään



Selitykset:

\uparrow_{98}^{140} neutronikaappaus, terminen vaikutusala 98 barn ja resonanssi-integraali 140 barn

$\xrightarrow{6,75d}$ betahajoaminen, puoliintumisaika 6,75 päivää
 \downarrow (n, 2n)-reaktio

\square lähtöaine

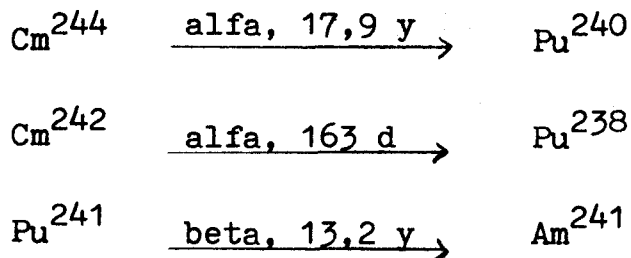
\circ tärkeä lopputuote

Kuva 2.1 Tärkeimmät kevytvesireaktorissa syntyvät transuraanit sekä reaktiot, joiden kautta nämä aineet pääasiassa syntyvät

4 mg vuodessa. Muita curiumia raskaampia alkuaineita syntyy yhteensä vain murto-osa Cf²⁴⁹:n määrästä. Siis curiumia raskaammat aineet ovat fissiotuotteiden seassa täysin merkityksettömiä.

Kaikista kuvaan 2.1 merkityistä aineista osa hajoaa jo reaktorissa. Merkittäväntä tämä hajoaminen on isotoopeilla Pu²³⁹ ja Pu²⁴¹, jotka fissioituvat termisten neutronien vaikutuksesta. Yli puolet näistä isotoopeista kokee fission paikassa, jossa ne ovat syntyneet.

Koska muutamien transuraani-isotooppien puoliintumisaika on lyhyt, on aiheellista täydentää kuvaa 2.1 reaktioilla, jotka tapahtuvat etupäässä vasta reaktorin ulkopuolella. Nämä kuvassa 2.2 esitetyt reaktiot vaikuttavat suhteellisen pian käytetyn polttoaineen transuraanikoostumukseen.



Kuva 2.2 Tärkeimmät transuraanien muuntumisreaktiot käytetyssä polttoaineessa

Kaikille transuraaneille on ominaista, että ne lähettävät joko alfa- tai betasäteilyä. Näin ollen kukin transuraani-isotooppi muuttuu ennemmin tai myöhemmin toisen alkuaineen isotoopiksi.

Transuraanien muodostumiseen kevytvesireaktorissa vaikuttavat mm. polttoaineen rikastusaste, palama ja kunkin reaktorin yksilölliset ominaisuudet. Tästä syystä on mahdotonta esittää yleispätevästi tarkkoja määriä edes silloin, kun tuore polttoaine koostuu pelkästään rikastetusta uraanista. Jos tuoreessa polttoaineessa on mukana plutoniumia, lisääntyy transuraanimäärien vaihtelu vielä huomattavasti plutoniumin käyttötavasta

isotooppi	U ²³⁵ -rikastettu polttoaine			Pu-rikastettu polttoaine			t _{1/2}	tytäraine
	grammaa	curieta	wattia	grammaa	curieta	wattia		
Pu ²³⁸	160	2820	91	1100	18900	610	87,9 y	U ²³⁴
Pu ²³⁹	5300	323	10	12000	735	23	24360 y	U ²³⁵
Pu ²⁴⁰	2200	477	15	8800	1940	60	6580 y	U ²³⁶
Pu ²⁴¹	1000	103000	4,3	6600	608000	25	13,2 y	Am ²⁴¹
Pu ²⁴²	350	1,38	0,041	4200	15,2	0,48	379000 y	U ²³⁸
Am ²⁴¹	46	159	5,3	460	1580	53	433 y	Np ²³⁷
Am ^{242M}	1,3	12,0	0,44	33	300	11	152 y	Pu ²³⁸
Am ²⁴³	95	18,2	0,67	2700	514	19	7370 y	Pu ²³⁹
Cm ²⁴²	5,1	17000	620	72	240000	8800	163 d	Pu ²³⁸
Cm ²⁴³	0,1	5	0,2	0,8	40	1,6	28 y	Pu ²³⁹
Cm ²⁴⁴	30	2400	84	1700	136000	4800	17,9 y	Pu ²⁴⁰
Cm ²⁴⁵	2,0	0,3	0,01	180	30	1	8500 y	Pu ²⁴¹
Cm ²⁴⁶	0,2	0,05	0,002	20	5	0,2	4760 y	Pu ²⁴²
Cm ²⁴⁷	0,003	<10 ⁻⁶	<10 ⁻⁸	0,3	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁶	15400000y	Am ²⁴³
Cm ²⁴⁸	<10 ⁻³	<10 ⁻⁶	<10 ⁻⁸	0,02	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁶	350000 y	Pu ²⁴⁴
<hr/>								
Transuraanit yhteensä	9190	126000	830	37900	1010000	14400		
Sr ⁹⁰ /Y ⁹⁰	530	155000	495	300	87000	280	28,9 y	Zr ⁹⁰
Cs ¹³⁷ /Ba ^{137M}	1180	210000	495	1180	210000	495	30,2 y	Ba ¹³⁷
Muut fissio- tuotteet	27100	3840000	18000	27500	4200000	20200	~ 1 y	
Kaikki yht.	38000	4330000	19800	66900	5510000	35400		

Taulukko 2.1

Kevytvesireaktorissa syntyvät transuraanit polttoainetonna kohti, kun polttoaineen palama on 33000 MWd/tonni.

riippuen. Vaihtelu on sitä suurempaa mitä pitemmälle reaktori-
riketjussa edetään.

Eräitä esimerkkejä siitä, miten paljon transuraaneja voi muodostua, on esitetty taulukossa 2.1. Taulukkoon on otettu mukaan kaikki plutoniumin, amerikiumin ja curiumin isotoopit, joita syntyy havaittava määrä ja joiden puoliintumisaika on yli 163 päivää. Massan lisäksi on ilmoitettu myös aktiivisuus ja lämmitysteho. Luvut ilmoittavat transuraanimäärät käytettyä polttoainetonna kohti 150 päivää reaktorista poistamisen jälkeen. Laskentaperusteena on käytetty konservatiivisesti palamaa 33 000 MWd/tonni, joka on hieman suurempi kuin tavallinen keskimääräinen palama. Pienemmällä palamalla saataisiin luonnollisesti vähemmän reaktiotuotteita.

Taulukossa 2.1 on esitetty kaksi erilaista lukusarjaa. Ensimmäinen liittyy polttoaineeseen, joka ei tuoreena ole sisältänyt lainkaan plutoniumia. Tämän lukusarjan perusteella voidaan suoraviivaisesti arvioida, paljonko nykyiset kevytvesireaktorit tuottavat transuraaneja. Jos esimerkiksi oletetaan, että sähköteholtaan 1000 MW:n reaktori toimii vuodessa 7000 tuntia ja sen hyötysuhde on 33 %, se käyttää vuodessa 27 tonnia polttoainetta. Jos poistopalama on sama kuin taulukkoa 2.1 laadittaessa käytetty, saadaan syntyneet transuraanit taulukkoarvoista kertoimella 27. Palaman vaikutusta ei sen sijaan saada tarkasti selville yksinkertaisilla menetelmillä. Kvalitatiivisesti voidaan kuitenkin sanoa, että suurilla palamilla Pu²³⁹:n määrä pysyy lähes vakiona kun taas reaktioketjun loppupäässä määrät kasvavat eksponentiaalisesti. Esimerkiksi tyypillisellä kiehutusreaktorin palamalla 25 000 MWd/tonni olisi Pu²³⁹:n määrä vain viitisen prosenttia pienempi kuin taulukossa 2.1 ilmoitettu, mutta Am²⁴³:a olisi vain puolet ja Cm²⁴⁴:ää vain kolmannes taulukkoarvosta.

Toinen taulukon 2.1 lukusarja liittyy polttoaineeseen, jossa luonnonuraani on rikastettu uudelleen kierrossa olevaa plutoniumia käyttäen. Ennen kuin tästä lukusarjasta tekee mitään

johtopäätöksiä, on tarkoin selvitettävä itselleen sitä laskettaessa tehdyt olettamukset ja niiden merkitys. Kyseinen polttoaine on tasapainotilan saavuttaneen 1,15 SGR-reaktorin polttoainetta. Reaktorin nimi viittaa tapaan, jolla plutoniumin uudelleenkierto on järjestetty. Pelkkä SGR-reaktori (Self Generating Reactor) käyttäisi ainoastaan sen määrän plutoniumia, jonka se itse tuottaa. Sen sijaan 1,15 SGR-reaktoriin ladataan ensimmäisellä uudelleenkierröksellä 15 % ylimääräistä plutoniumia, jolloin päästään tasapainotilaan nopeammin eli noin 15 vuodessa. 1,15 SGR on saavuttanut tasapainon, kun aina vaihtolatauksen yhteydessä siitä poistetaan likimain sama absoluuttimäärä kutakin plutoniumin isotooppia kuin siihen ladataan tuoreen polttoaineen mukana. Plutoniumin jakautuma käytetyssä ja tuoreessa polttoaineessa on tietenkin erilainen. Viimeksi mainitussa se sisältyy kokonaan plutoniumrikasteisiin sauvoihin, joita on noin 40 % koko määrästä. Reaktorin toimiessa kuluu siis plutoniumrikasteisissa sauvoissa kutakin plutoniumisotooppia yhtä paljon kuin sitä syntyy U^{235} -rikasteisissa sauvoissa. Transuraanien nettolisäys koostuu näin ollen yksinomaan amerikumista ja curiumista. Taulukon 2.1 toinen lukusarja ilmoittaa pelkästään plutoniumrikasteisissa sauvoissa muodostuvat transuraanit, joten koko 1,15 SGR-reaktorin tuottoa arvioitaessa täytyy ottaa painotettu keskiarvo ensimmäisestä (paino 0,6) ja toisesta (paino 0,4) lukusarjasta. Ennen tasapainon saavuttamista tapahtuu vähittäinen siirtyminen tavallisen uraanireaktorin tuotosta 1,15 SGR-reaktoriin. Palaman vaikutus raskaiden isotooppien tuottoon on plutoniumpolttoaineella vielä tuntuvampi kuin U^{235} -rikasteella, joten taulukkoarvot ovat selvästi suurempia kuin useimpien reaktoreiden todelliset tuotot.

Koska eri voimalaitosten tuottamaa plutoniumia ei käsitellä erikseen, ei plutoniumin isotooppikoostumus käytännössä saavuta teoreettista tasapainotilaa niin kauan kuin laitosten määrä lisääntyy. Uuden plutoniumin osuus pysyy tällöin suhteellisesti suurempana, ja siitä syystä on raskaitten isotooppien tuotto pienempää kuin teoreettisessa tasapainossa.

Taulukon 2.1 luvuista lähtien voidaan suorittaa vielä eräs ajatuskoe. Oletetaan, että Suomen sähkönkulutus pysähtyisi aikanaan tasolle, jolla pohjalauhdutusvoimaa tarvittaisiin 20 000 MW. Tarve tyydytettäisiin kevytvesireaktoreilla, joiden yhteisteho pidettäisiin jatkuvasti mainitussa vakioarvossa. Taulukossa 2.2 on verrattu keskenään vuotuista transuraanituottoa siinä tapauksessa, että plutonium ei kiertäisi lainkaan ja siinä tapauksessa, että se olisi saavuttanut tasapainotilan. Jälkimmäiseen tapaukseen liittyvä kiertävä plutoniumvarasto olisi noin 75 tonnia, jos oletetaan että siitä olisi kolmannes prosessoitavana ja kaksi kolmannesta reaktoreissa. Taulukkoon on otettu vain isotoopit, joiden puoliintumisaika on yli 18 vuotta. Tätä lyhytikäisempien isotooppien määrät on lisätty suoraan tytäraineitten määriin. Huomautettakoon, että taulukon oikeanpuoleisessa sarakkeessa esiintyvä plutonium

	ilman plutoniumkiertoa	plutoniumkierrolla		
	kg	kW	kg	kW
Pu ²³⁸	90	50	-	-
Pu ²³⁹ +Pu ²⁴⁰ +Pu ²⁴²	4000	10	400	3
Am ²⁴¹	600	60	500	50
Am ^{242M} +Am ²⁴³	50	0,6	600	8
Cm ²⁴⁵ +Cm ²⁴⁶	1	~0	40	0,2
Yhteensä	4741	120,6	1540	61,2

Taulukko 2.2 Vuosittainen transuraanien lisääntyminen hypoteettisessa kevytvesireaktorijärjestelmässä, jonka yhteisteho on 20 000 MW.

on jälleenkäsittelyn aikana ollut Cm²⁴⁴:ää ja täten joutunut pois plutoniumkierrosta.

Taulukko 2.2 osoittaa, että pelkkä plutoniumin uudelleenkierto kevytvesireaktoreissa ei tuo ratkaisevaa apua transuraanien muodostamaan jäteongelmaan. Jätteen säteilytehon vuotuinen lisäys pienentyy vain kertoimella kaksi.

Jos transuraanijätteen kumuloituminen halutaan estää, pitää myös amerikium ja curium erottaa uudelleenkiertoon. Koska niillä on melko pienet fissiovaikutusalat, ei niiden konvertointi kevytvesireaktorissa ole kannattavaa. Muita konvertointimahdollisuuksia käsitellään kappaleessa 5.3.

3

PLUTONIUM BIOSFÄÄRISSÄ

3.1

Plutoniumin kiertokulusta

Plutoniumin globaalista kiertokulkua on voitu seurata ilmakehässä suoritetettujen ydinasekokeiden ansiosta. Kun plutoniumpommi räjäytetään, palaa siinä olevasta plutoniumista tyypillisesti noin 10 % ja loppu leviää hienojakoisena ilmaan. Tarkka palaman määrä riippuu pommin koosta ja rakenteesta. Arviot ilmakehään joutuneesta plutoniumista vaihtelevat, mutta yleisimmin esitetään luku 320 kCi. Tämä on miltei yksinomaan Pu²³⁹:ää ja vastaa massaltaan viittä tonnia.

Plutonium laskeutuu ilmakehästä maahan melko nopeasti. Niinä vuosina, jolloin uusia ydinasekokeita ei ole tehty, on pinta-ilman aktiivisuus pienentynyt noin kolmasosaan. Vuonna 1972 oli aktiivisuus alle 2 % vuoden 1963 huippuarvosta.

Maahan laskeutuneesta plutoniumista vain hyvin pieni osa nousee uudelleen ilmaan tuulen vaikutuksesta. Tätä plutoniumin kohoamista maasta kuvataan ns. resuspensiokertoimella, joka ilmoittaa pintailman aktiivisuuden suhteen maan pinta-aktiivisuuteen. Konservatiivisena kertoimena USA:n maaperälle pidetään $10^{-9}/m$. Tämä merkitsee esim. sitä, että pintalasseuma $2 \text{ kCi}/\text{km}^2$ ($31 \text{ kg}/\text{km}^2$ Pu²³⁹:ää) aiheuttaisi ilmaan konsentraation $2 \cdot 10^{-12} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ eli plutoniumvaarallisessa työssä sallittuun konsentraatioon.

Maan pintaan joutunut plutonium alkaa kulkeutua syvemmälle maahan. Useimmissa paikoissa on mitattavia konsentraatioita 20 cm:n syvyydessä ja yli puolet laskeumasta oli jo v. 1970 syvemmällä kuin 5 cm.

Plutoniumin kulkeutuminen ja kumuloituminen kasveihin ja eläimiin on vähäistä, koska se ei vastaa kemiallisilta ominaisuuksiltaan mitään biologisesti tärkeää alkuainetta. Muista vaarallisista jätteaineistahan esim. strontium voi toimia kalsiumin ja kesium kaliumin paikalla. Laboratoriokokeet ovat osoittaneet, että kasvien kuiva-aineessa on plutoniumkonsentraatio aina alle tuhannesosa kasvualustan konsentraatiosta ja alle kymmenestuhannesosa maan konsentraatiosta. Kun eläimet syövät kontaminoitua rehua, imeytyy niiden vereen alle kymmenestuhannesosa nautitusta plutoniumista ja siirrossa verestä maitoon tapahtuu vielä reduktiota ainakin kertoimella kymmenen. Eläinten kohdalla täytyy ottaa toki huomioon myös hengitysilmasta saatava plutonium, jonka määrä on selvästi suurempi kuin ravinnosta saatu.

Ihmiseen voisi plutonium tulla periaatteessa suoraan ihon läpi, ravinnon mukana tai hengityksessä. Iholla oleva plutonium ei ole haitallista, koska alfasäteily pysähtyy kuolleisiin pintasoluihin. Ihon läpi imeytyy plutoniumia niin vähän, että se voidaan kokonaan unohtaa. Plutoniumin kanssa työskennellessä on todettu, että haavat ja naarmut eivät lisää imeytymistä juuri lainkaan. Jos plutoniumia joutuu syvään pistohaavaan huomattava määrä, se voidaan poistaa leikkaamalla ennen kuin se ehtii levitä vereen.

Plutoniumin siirtymistä ravinnosta vereen on tutkittu paljon eri koe-eläimillä. Syödyistä plutoniumista imeytyy vereen 0,003 %, eikä tämä osuus näytä riippuvan nautitusta kokonaisuudesta. Vastasyntyneillä osuus on ehkä suurempi, mutta toisaalta heidän ravinnokseen käytetty maito sisältää plutoniumia paljon vähemmän kuin useimmataikuisten ruoka-aineet. Korostetakaan tässä, että imeytymättä jäävällä plutoniumilla ei ole käytännöllistä merkitystä edes suoliston saamassa säteilyannoksessa.

Ylivoimaisesti tärkein tie plutoniumin kulkeutumisessa ihmiseen on hengitys. Jos tarkastellaan pommikokeista peräisin olevaa plutoniumia, on siitä 0,06 % saatu ravinnosta ja loput hengityksen kautta.

Sisäänhengitetystä plutoniumista noin 15 % joutuu keuhkoissa paikkaan, josta se poistuu hitaasti. Tästä määrästä osa poistuu n. 50 päivän puoliintumisajalla, osa siirtyy vereen samalla nopeudella ja osa siirtyy imusolmukkeisiin. Vereen siirtyvä osa on n. 6 % koko sisäänhengitetystä määrästä. Kaikki keuhkoissa oleva plutonium on terveydelle vaarallista, kuten kappaleessa 3.2 kerrotaan.

Vereen joutunut plutonium siirtyy noin kuukauden kuluessa miltei kokonaan maksaan ja luiden pintakerrokseen. Plutoniumin jakautuminen näiden elinten välillä riippuu sen kemiallisesta muodosta, mutta karkea sääntö on se, että 2/3 menee maksaan ja 1/3 luustoon. Luustosta ei plutonium poistu käytännöllisesti katsoen lainkaan. Maksasta se poistuu koiralla 5...10 vuoden puoliintumisajalla ja erittyä virtsassa. Ihmisellä ei tätä puoliintumisaikaa tunneta.

Kuriositeettina mainittakoon, että radiokemian laitoksen tekemien määritysten mukaan saavat Suomen lappalaiset ravinnossa, lähinnä poron maksassa ja veressä 70 pCi plutoniumia vuodessa. Kun tästä imeytyy 0,003 %, on ravinnon kautta saatu lisäannos merkityksetön hengityksestä saadun annoksen rinnalla. Siis kriittisissä ravintoketjuissa ei plutoniumin merkitys nouse suureksi.

Esimerkkinä suuresta laskeumasta on Espanjassa tapahtunut onnettomuus, jossa ydinaseita kuljettanut lentokone putosi maahan ja pommit tuhoutuivat niiden sytyttimien räjähtäessä. Palomaresin alueella esiintynyt Pu²³⁹-pintakontaminaatio oli paikoitellen 30 $\mu\text{Ci}/\text{m}^2$ eli runsaat neljä dekadia suurempi kuin pommikokeiden aiheuttama kontaminaatio. Alueella ei ole todettu mitään plutoniumin haittavaikutuksia eikä ihmisten sen enempää kuin maataloustuotteidenkaan plutoniumkonsentraatio ole poikkeuksellisen suuri. Syynä on se, että plutonium ei viipynyt pitkää ilmassa vaan laskeutui nopeasti maahan.

3.2

Plutoniumin vaikutus nisäkkäisiin

Käsittelen vaikutuksia aluksi kvalitatiivisesti ja sen jälkeen esitän kvantitatiivista kokeisiin perustuvaa tietoa.

Suurempina annoksina saadun plutoniumin vaikutus riippuu siitä, saadaanko se hengitysilman mukana vai muulla tavoin.

Jos hengitysilman plutoniumpitoisuus on suuri, aiheutuu akuutti kuolema keuhkojen turpoamisesta, verenvuodosta ja niitä seuraavasta täydellisestä kuoliosta. Mikäli annos riittää tuhoamaan välittömästi vain osan keuhkoista, alkaa kehittyä sidekudosta ja yksilö kuolee vuoden, parin sisällä hengityselinten sairautteen. Edelleen annosta pienennettäessä tullaan tilanteeseen, jossa ei selviä keuhkovaurioita voida havaita, mutta keuhkosyöpään sairastuminen on lähes varmaa. Sairauden puhkeamista edeltävä oireeton vaihe kestää kuitenkin tietyn vähimmäisajan, joka ihmisellä lienee useita vuosia. Annoksen pienentyessä alkaa oireettoman vaiheen kesto pidentyä ja lopulta saavutetaan raja, jolla keuhkosyövän puhkeamiseen kuluva todennäköinen aika on pitempi kuin yksilön luonnollinen elinaika. Tämän rajan tuntumassa ja sen alapuolella keuhkosyöpään sairastumisen todennäköisyys laskee annoksen pienentyessä. Pienillä annoksilla on olemassa myös sellainen mahdollisuus, että plutonium ei aiheuta keuhkosyöpää vaan luu- tai maksasyövän.

Jos suuri plutoniummäärä saadaan elimistöön haavasta tai ruoansulatuselimistön kautta, aiheutuu akuutti kuolema luuytimessä olevan vertamuodostavan systeemin tuhoutumisesta. Ellei tämä systeemi kokonaan tuhoudu, on yksilöllä elinaikaa muutama vuosi, jonka jälkeen luusyöpä on kehittynyt ja aiheuttaa kuoleman melko nopeasti. Luusyövän puhkeamisaika ja todennäköisyys käyttäytyvät annoksen funktiona vastaavalla tavalla kuin keuhkosyövän keuhkoannoksen yhteydessä. Pienillä annoksilla tulee mukaan myös maksasyövän mahdollisuus. Maksasyöpään liittyvä oireeton kausi on kuitenkin selvästi pitempi kuin keuhko- tai luusyöpään liittyvä ja siksi sen esiintyminen koe-eläimillä on hyvin harvinaista. Toisaalta ihmisen elinaika on pitempi kuin koe-eläiminä käytettyjen rottien ja koirien, ja tällöin on mahdollista, että maksasyöpä ehtii ihmisellä kehittyä useammin ennen luonnollista kuolemaa.

Vaikka akuutin kuoleman yhteydessä plutoniumin vaikutus verta-
muodostavaan systeemiin tulee selvästi esille, on leukemian
esiintyminen plutoniumannoksen seurauksena hyvin harvinaista.
Tämä johtuu siitä, että plutonium kerääntyy etupäässä luun
pintaan ja tällöin sen aiheuttamasta säteilystä vain pieni osa
ulottuu luuytimeen asti.

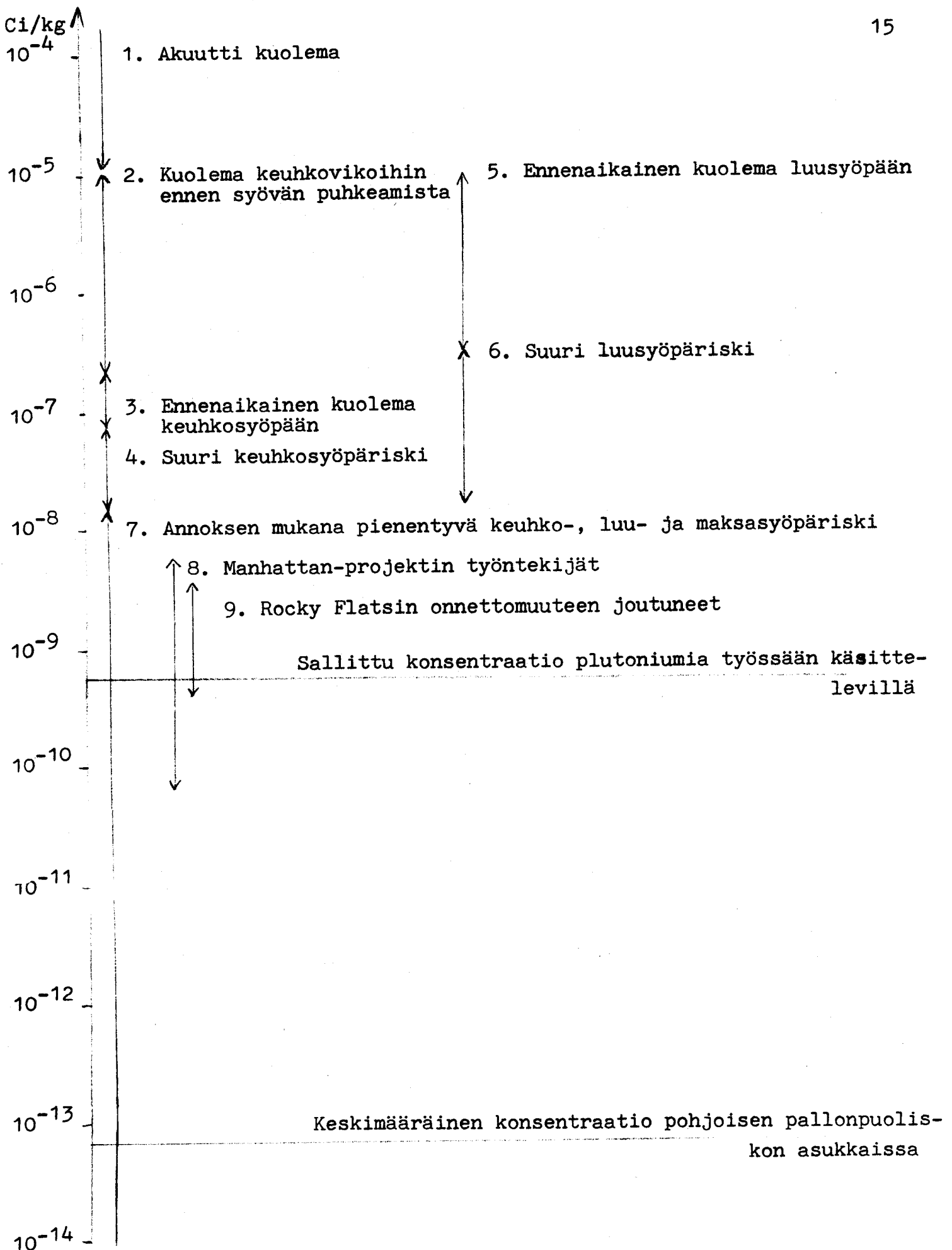
Plutoniumin vaikutus sukurauhasiin ja näin ollen sen geneetti-
set vaikutukset näyttävät hyvin vähäisiltä. Sukuelimissä on
todettu vaikutuksia vasta sellaisilla annoksilla, jotka ovat
aiheuttaneet huomattavia muita seurauksia.

Tutkimuksissa ei ole havaittu merkkejä siitä, että vastasynty-
neet olisivat selvästi herkempiä plutoniumin vaikutuksille
kuin täysikasvuiset yksilöt.

Jotta plutoniumkokeista saatu kvantitatiivinen tieto olisi hel-
pompaa mieltää, olen laatinut kuvassa 3.1 näkyvän asteikon ja
esitän tuloksia sen avulla. Asteikossa käytetty yksikkö tar-
koittaa kehonsisäisen plutoniumin kokonaisaktiivisuutta jaet-
tuna yksilön kokonaismassalla. Tämän asteikon avulla voidaan
melko hyvin rinnastaa toisiinsa sekä keuhkojen kautta että
suoraan vereen saadun plutoniumin vaikutus. Kuvassa on käy-
tetty viitenumerointia ja alla on esitetty tämän numeroinnin
mukaisesti hieman lisätietoja eri tapauksista.

- 1 Akuutti kuolema tarkoittaa sitä, että puolet koe-
eläimistä kuolee kuukauden kuluessa. Rotilla keski-
määrin tarvittava annos on $7 \cdot 10^{-5}$ Ci/kg ja koirilla
 $2 \cdot 10^{-5}$ Ci/kg. Ihmisillä on annokseksi arvioitu vä-
hintään 10^{-5} Ci/kg. Annos on samaa luokkaa, annet-
tiinpa se keuhkojen kautta tai ruiskeena.

- 2 Jos koirat ovat saaneet hengitysilmaasta vaihteluvälin
ylärajalta olevan annoksen, ne elävät keskimäärin pari
kuukautta ja alarajalla olevan annoksen saatuaan
2...3 vuotta.



Kuva 3.1 Kehon keskimääräisten plutoniumpitoisuuksien suuruusluokkaa ja vaikutusta havainnollistava kaavio

- 3 Koirat ovat saaneet keuhkosyövän 3...4 vuotta plutoniumin hengittämisen jälkeen ja kuolleet siihen nopeasti, sairastumisprosentti n. 95.
- 4 Keuhkosyöpää edeltävä oireeton kausi kasvaa annoksen pienentyessä. Vaihteluvälin alarajalla ei koirien keskimääräinen elinikä jää sanottavasti terveen vertailuryhmän eliniän alle.
- 5 Koirat ovat saaneet luussyövän 3...4 vuotta plutoniumruiskeen jälkeen ja kuolleet siihen nopeasti, sairastumisprosentti n. 95.
- 6 Luussyöpää edeltävä oireeton kausi kasvaa annoksen pienentyessä. Vaihteluvälin alarajalla ei koirien keskimääräinen elinikä jää sanottavasti terveen vertailuryhmän eliniän alle, vaikka vielä miltei kolmasosa saa syövän.
- 7 Syöpäriskin oletetaan pienentyvän lineaarisesti annoksen pienentyessä, vaikka tätä ei voida kokeellisesti todeta hyvin pienillä annoksilla. Sallittu konsentraatio plutoniumia työssään käsittelevien kehossa on valittu niin, että sairastumisriski on luokkaa 10^{-4} /vuosi.
- 8 Manhattan-projektiin osallistui vuosina 1943...45 työntekijöitä, jotka hengittivät plutoniumpitoista ilmaa. Tätä 25 henkilön ryhmää, jonka keski-ikä on nyt n. 50 vuotta, on tutkittu säännöllisesti. Kenelläkään ei ole havaittu mitään plutoniumista johtuvia vaivoja.
- 9 Rocky Flatsin sotilaallisella laitoksella sattui 1965 tulipalo, jossa vapautui plutoniumia. Työntekijöistä 25 suurimman annoksen saanutta käy säännöllisissä tarkastuksissa, mutta ainakaan vielä ei kenelläkään ole havaittu mitään plutoniumista johtuvia vaivoja.

Kuvaan 3.1 liittyen voidaan vielä tehdä pieni ajatuskoe. Vuoteen 1990 mennessä on USA:ssa kerääntynyt plutoniumia 310 tonnia, ellei sitä ole lainkaan poltettu reaktoreissa. Oletetaan, että muualla maailmassa on kerääntynyt toinen 310 tonnia. Laskemalla yhteen eri isotooppien α -aktiivisuudet nähdään, että plutoniumin kokonaisaktiivisuus on 268 MCi. Jos oletetaan, että tämä määrä levitetään tasaisesti hienona pölynä ilmakehään ja että se kulkeutuu ihmisiin samalla tavalla kuin pommiplutonium, saadaan lopputulokseksi, että pohjoisen pallonpuoliskon ihmisissä on plutoniumkonsentraatio $6 \cdot 10^{-11}$ Ci/kg. Kuvasta 3.1 saa hyvän käsityksen tämän konsentraation suuruudesta ja vaarallisuudesta.

Toisena ajatuskokeena voidaan laskea, että 50 kg:n painoisen henkilön pitäisi syödä Pu^{239} :ää 30 mg, jotta hän saisi plutoniumvaarallisessa työssä sallitun kehonsisäisen konsentraation. Akuuttiin kuolemaan tarvittaisiin vastaavasti 1 kg.

Tässä yhteydessä on myös paikallaan muutama sana ns. "kuumista hiukkasista", joihin vedoten USA:ssa on vaadittu sallitun plutoniumkonsentraation alentamista yli viidellä dekadilla. Perusajatuksena on se, että rajoitettuun kudoksen osaan absorboitunut tietyn rajan ylittävä säteilyannos aiheuttaa tässä kohdassa syöpäriskin vakiotodennäköisyydellä riippumatta annoksen tarkasta suuruudesta. Riittävän annoksen voisi aiheuttaa jokainen tietyn koon ylittävä "kuuma hiukkanen" omassa ympäristössään. Näin ollen olisi tärkempää, miten monta "kuumaa hiukkasta" on esim. yksilön keuhkoissa, kuin miten suuren keskimääräisen annoksen hiukkaset aiheuttavat koko keuhkoon. Tämän "säännön" kehittäjät ovat valinneet syöpäriskiksi hiukkasta kohti 1/2000 ilman mitään kunnollisia perusteita. Kokeilla on osoitettu lähinnä se, että koe-eläimet sairastuvat syöpään, kun ne saavat tarpeeksi säteilyä. Sama sairastuminen olisi yhtä hyvin voitu ennustaa yleisimmin hyväksytyllä teoriolla. Vaikka "kuumien hiukkasten" vaarallisuutta ei vielä haluta kokonaan unohtaa, viittaavat eläinkokeet kuitenkin siihen suuntaan, että eläimet päinvastoin kestävät paljon suurempia kokonaisannoksia "kuumista

hiukkasista" kuin tasaisesti jakautuneesta säteilylähteestä. Tämä johtuu siitä, että kuuman hiukkasen lähiympäristöstä kuolevat kaikki solut. Kuollut kudoks toimii säteilysuojana terveille soluille. Esim. eräessä rottakokeessa annettiin eläinten reisivaltimoon plutoniumia todella suurina hiukkasina, jolloin ne juutuivat keuhkojen kapillaarisuonistoon. Eläimiä tapettiin ja tutkittiin tasaisin välein, viimeinen ryhmä lähes kaksi vuotta ruiskeen jälkeen. Millään eläimellä ei havaittu syöpää eikä mitään muitakaan häiritseviä vaivoja, vaikka pitkäikäisimmät yksilöt saivat keskimäärin 2 milj. radin keuhkoannoksen. Tasaisesti jakautuneesta säteilylähteestä jo paljon pienemmät annokset aiheuttavat akuutin kuoleman. Ihmisten osalta rajoittuvat kokemukset "kuumista hiukkasista" Rocky Flatsin "uhreihin". Heillä on ollut yhteensä yli 600 000 hiukasta keuhkoissaan 9 vuoden ajan eikä syöpää ole esiintynyt.

3.3

Plutoniumin vaarallisuus muihin aineisiin verrattuna

Plutoniumilla on yleisesti hyvin vaarallisen myrkyksen maine. Epäilemättä se onkin kemiallisesti toksinen aine, mutta tätä ei saada kokeellisesti esille, koska radiotoksisuus on niin suuri, että se peittää alleen mahdollisen kemiallisen toksisuuden. Esimerkiksi Pu^{238} :n ja Pu^{239} :n vaikutukset koe-eläimiin ovat likimain samat, jos niitä annetaan samat määrät aktiivisuuksissa mitattuna. Grammoissa ilmoitettuna tarvitaan Pu^{239} :ää tällöin 250-kertainen määrä verrattuna Pu^{238} :aan. Voidaan siis sanoa, että plutoniumin tekee vaaralliseksi nimenomaan sen lähettämä alfa-säteily.

Useimpien alfasäteilijöiden emittoima säteily on energialtaan 5 MeV:n luokkaa, joten säteilyn vaikutusta voidaan kuvata melko hyvin kehonsisäisellä aktiivisuudella. Tällöin riippuu eri aineiden vaarallisuus siitä, miten hyvin ne imeytyvät elimistöön, mihin kudoksiin ne kulkevat ja miten kauan ne kehossa viipyvät.

Verrattuna radiumiin on eläinkokeilla osoitettu, että pieninä annoksina imeytynyt plutonium on luusyövän kannalta 5...10 kertaa vaarallisempaa tiettyä säteilyannosta kohti. Tämä johtuu

siitä, että radium jakautuu tasaisesti luuhun, jolloin suurin osa sen lähettämästä säteilystä "menee hukkaan" eli absorboituu inaktiiviseen kudokseen. Toisaalta radium imeytyy ruoansulatuselimistöä 10 000 kertaa tehokkaammin kuin plutonium, joten suullisesti nautittu radium on merkittävästi vaarallisempaa tiettyä aktiivisuusmäärää kohti. Hengitysilma imeytyvät Ra ja Pu likimain yhtä hyvin vereen, joten ilmassa on sallittu Ra-konsentraatio 15-kertainen plutoniumiin verrattuna. Luonnollisen radiumin määrä ihmisissä on keskimäärin $1,5 \cdot 10^{-12}$ Ci/kg. Näin ollen sen aiheuttama syöpäriski on 2...4 kertaa suurempi kuin pommikokeiden seurauksena saadun plutoniumin aiheuttama riski.

Muut merkittävät luonnon alfasäteilijät ovat radon ja polonium, jotka kumpikin aiheuttavat luuytimeen 5 kertaa suuremman vuosinannoksen kuin radium. Lisäksi ne aiheuttavat samansuuruisen annoksen sukurauhasiin. Jos näitä aineita ruiskutetaan rottien vereen annoksina, jotka aiheuttavat suuren syöpäriskin, ovat ne tiettyä aktiivisuutta kohti yhtä vaarallisia kuin plutonium. Toisaalta aineiden puoliintumisajat ovat lyhyet (alle 139 vrk), joten ne eivät kumuloidu kehoon loppuiäksi. Tästä syystä niille sallitaan hengitysilmassa merkittävästi suurempi aktiivisuuspitoisuus, poloniumille 250-kertainen ja radonille 15 000-kertainen plutoniumiin verrattuna.

Luonnon alfasäteilijöiden lisäksi on paikallaan verrata plutoniumia muihin atomivoimalaitoksessa syntyviin alfasäteilijöihin. Amerikiumia voidaan pitää hieman vaarattomampana sen jälkeen, kun se on joutunut kehoon. Ruoansulatuselimistöä se imeytyy n. kolme kertaa tehokkaammin ja hengitysilma n. neljä kertaa heikommin kuin plutonium. Eräät amerikiumia käsitelleet henkilöt ovat USA:ssa saaneet sitä kehoonsa samansuuruisina aktiivisuuspitoisuuksina kuin Manhattan-projektin työntekijät plutoniumia. Näissä henkilöissä ei ole havaittu mitään terveydellisiä haittavaikutuksia.

Curium on vaarallisuudeltaan hyvin lähellä amerikiumia, samoin neptunium.

Verrattuna moniin gamma- ja betasäteilijöihin ei plutoniumia suinkaan voida yleisesti väittää vaarallisemmaksi. Esimerkiksi nautittua grammamäärää kohti löytyy hyvinkin paljon aineita, jotka ovat plutoniumia vaarallisempia.

Kemiallisella ja biologisella puolella voidaan edelleen osoittaa monia plutoniumia vaarallisempia aineita riippuen siitä, mitä pidetään vertailuperusteena.

Allekirjoittaneen henkilökohtaisen käsityksen mukaan ne syyt, joiden perusteella plutonium on saanut maailman pahimman myrkyksen maineen, ovat ensinnäkin se, että plutoniumia prosessoidaan teollisesti päinvastoin kuin monia muita myrkyjä ja toiseksi se, että plutoniumin kanssa työskenneltäessä noudatetaan paljon ankarampaa turvallisuusfilosofiaa kuin kemiallisten myrkkujen kanssa työskenneltäessä.

4 PLUTONIUM LWR-TEOLLISUUDESSA

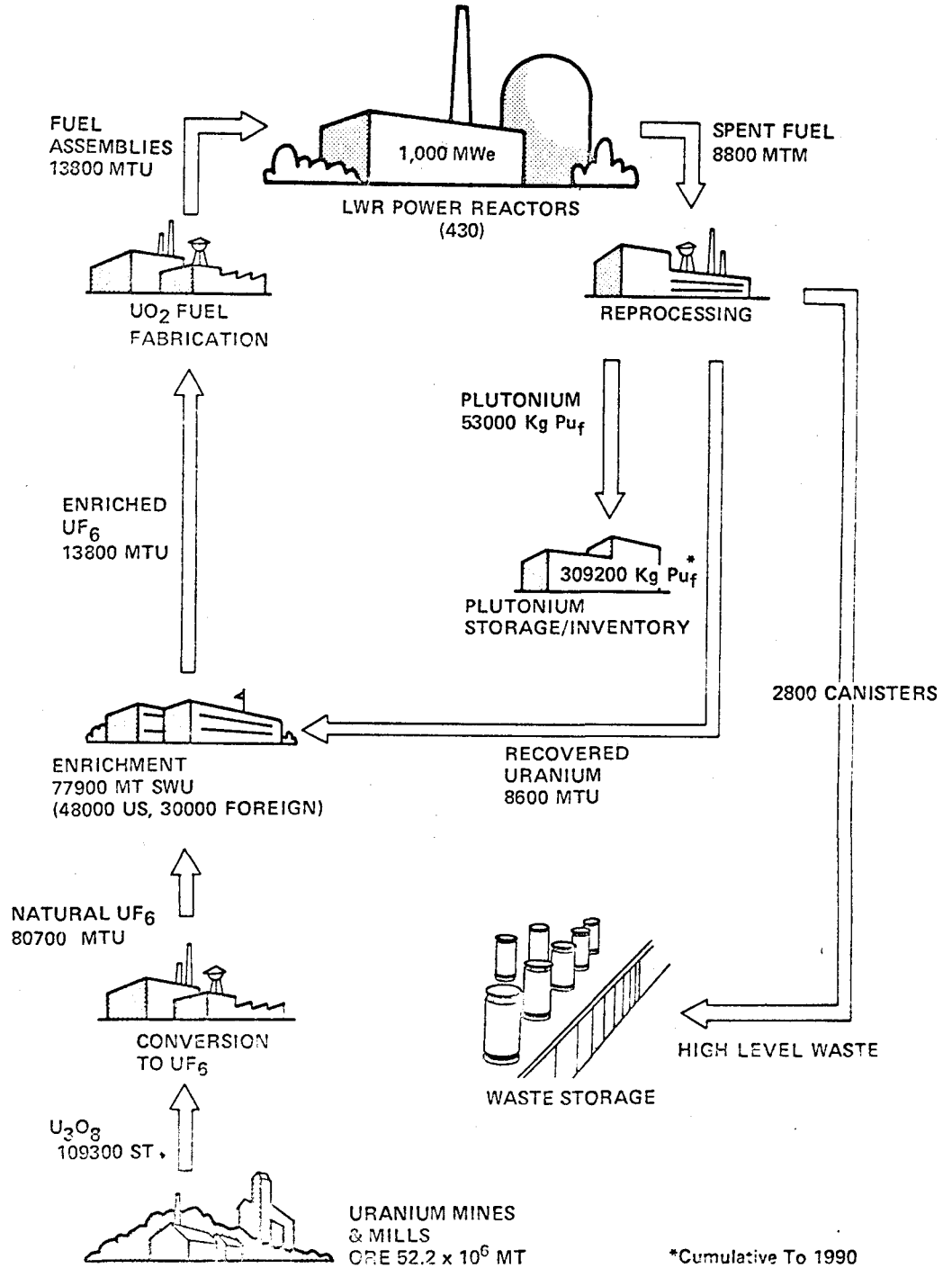
4.1 LWR-teollisuuden komponentit ilman plutoniumkiertoa

LWR-teollisuuden komponentit on esitetty kuvassa 4.1. Kuvaan merkityt luvut tarkoittavat USA:ssa vuosittain liikkuvia ainesmääriä vuonna 1990, jolloin toiminnassa on 430 kappaletta 1000 MW:n laitoksia.

Uraanikaivoksia on tällä hetkellä USA:ssa lähes 200 kpl ja 15 vuoden kuluttua kymmenkertainen määrä. Malmin uraanipitoisuus on keskimäärin vajaa prosentti. Louhinnan yhteydessä vapautuu pieni osa uraanin kaasumaisista tytäraineista, mutta määrä on niin vähäinen, että kaivosalueen ympäristössä ei säteilytason kasvua voi havaita. Kaivostoiminnan ympäristövaikutukset eivät siis poikkea muun kaivostoiminnan vaikutuksista. Kun malmin päältä kuorittu maa on siirretty takaisin, palautuu kaivosalue toiminnan loputtua käytännöllisesti katsoen alkuperäiseen tilaansa.

Selitykset

MT = 1000 kg = metric ton
 MTU = metric tons of uranium
 MTM = metric tons of metal
 ST = 907 kg = short ton



Kuva 4.1 LWR-teollisuuden komponentit ilman plutoniumin uudelleenkiertoa

Malmin jalostamoissa uraani erotetaan kivennäisaineesta ja muutetaan U_3O_8 :ksi, josta on tapana käyttää nimitystä "yellow-cake". Näitä laitoksia on USA:ssa tällä hetkellä 14 kpl ja 15 vuoden kuluttua viisinkertainen määrä. Jalostamoissa jää uraanimalmin alunperin sisältämästä radioaktiivisuudesta 85 % kivennäisjätteen sekaan. Tämä aktiivisuus muodostaa varteen-otettavan ongelman, vaikka kivennäisaineet peitetäänkin maa-kerroksella. Jätteen ottama maa-alue menetetään hyödyllisestä käytöstä, sillä jätekasan yläpuolella vallitseva säteilytaso ei salli jatkuvaa oleskelua kasan päällä. Näin menetetty maa edustaa 95 prosenttia koko polttoainekierron vaatimasta maa-alueesta. Säteily aiheutuu pääosin kaasumaisesta Rn^{222} :sta, jota syntyy jatkuvasti pitkäikäisestä radiumista ja joka tiheä maanpintaan. Rn^{222} :n puoliintumisaika on alle 4 päivää, joten se hajoaa nopeasti emäaineesta erilleen jouduttuaan eikä ehdi vaikuttaa kuin lähietäisyyksillä. Vuosittain syntyvä jätekaasa peittäisi USA:ssa vuonna 1990 kolmenkymmenen metrin korkuisena alueen 500 x 500 m. Tämän määrän kokonaisaktiivisuus on 350 kCi ja efektiivinen puoliintumisaika yli 1000 vuotta. Tämä merkitsee sitä, että uraanimalmin alkuaan sisältämä pitkäikäinen alfa-aktiivisuus on n. 3 % vastaavasta uraanimäärästä reaktorissa syntyvien pitkäikäisten transuraanien alfa-aktiivisuudesta.

UF_6 -konversiolaitoksissa uraani saatetaan rikastusprosessia varten sopivaan muotoon. Uraaniheksafluoridi muuttuu nimittäin kaasuksi, kun sitä lämmitetään sata-asteisen vesihöyryn avulla. Tällä hetkellä on USA:ssa kaksi konversiolaitosta ja 15 vuoden kuluessa niitä tarvitaan 3...4 kappaletta lisää. Laitokset eivät omaa mitään mainittavia piirteitä, jotka tekisivät ne poikkeukselliseksi muuhun prosessiteollisuuteen verrattuna.

Uraanirikastamoissa U^{235} -isotoopin osuutta lisätään 0,7 prosentista kevytvesireaktoreissa tarvittavaan 2...4 prosenttiin. Köyhdytetyssä jäteuraanissa on U^{235} -pitoisuus n. 0,3 %. Rikastamoita on USA:ssa tällä hetkellä 3 kpl ja ne ovat kaikki kaasudifфуusiolaitoksia. Uusia laitoksia tarvitaan 15 vuoden

kuluessa 6 kpl, ja niillä tyydytetään myös suuri osa ulkomaisesta rikastustyön tarpeesta. Merkittävin kaasudiffuusiolaitosten erikoispiirre on suuri sähköenergian tarve. Ne kuluttavat 98 % koko polttoainekierron vaatimasta sähköstä. Jos vuonna 1990 on kevytvesireaktoreita 430 000 MW tarvitaan niiden polttoaineen rikastamiseen sähkötehoa 12 900 MW eli 3 % reaktoreiden sähkötehosta. Käytännössä näyttää kuitenkin siltä, että osa rikastustyöstä tullaan tekemään kaasusentrifugimenetelmällä, joka vaatii sähköä vain kymmenesosan kaasudiffuusiomenetelmän sähköntarpeesta. Suuren sähkötarpeen lisäksi ei rikastuslaitoksilla ole muita erityisiä ympäristövaikutuksia.

Rikastettu UF_6 muutetaan polttoainetehtaassa UO_2 :ksi, joka puristetaan polttoainenapeiksi ja pakataan zirkoniumsauvoiksi. Sauvoista kootaan polttoainenippuja. Polttoainetehdas vastaa pientä kemiallista tehdasta ja sen kylkeen liitettyä hienomekaanista konepajaa eikä tehtaalla ole sanottavia vaikutuksia ympäristöön.

Itse LWR-reaktoria ei tässä yhteydessä käsitellä.

Jälleenkäsittelylaitoksella polttoaineniput katkaistaan mekaanisesti pieniksi palasiksi ja sen jälkeen käytetty polttoaine liuotetaan erilleen zirkoniumista. Zirkoniumhylsyet puristetaan tiiviiksi metallimassaksi ja ne luokitellaan matala-aktiivisiksi jätteiksi. Liuotuksen yhteydessä kaasumaiset fissiotuotteet vapautuvat sataprosenttisesti ja ne päästetään kokonaan poistopiipusta ilmaan. Kaasuista ovat radioaktiivisia ainoastaan tritium ja Kr^{85} , sillä kaikki aktiivinen jodi ehtii hajota ennen jälleenkäsittelyä. Liuonnut polttoaine johdetaan prosessiin, jossa erotetaan toisistaan uraani, plutonium ja muut reaktiotuotteet. Uraani muutetaan UF_6 :ksi ja lähetetään uudelleen rikastettavaksi, sillä sen U^{235} -pitoisuus on suurempi kuin luonnonuraanin, tyypillisesti 1,2 %. Plutonium varastoidaan myöhempää käyttöä varten. Muut reaktiotuotteet sisältävät konservatiivisen arvion mukaan vielä 0,5 % uraanista ja plutoniumista, mutta koelaitoksilla saadut kokemukset osoittavat, että määrä voidaan helposti pienentää 0,1 prosenttiin.

Tämä muiden reaktiotuotteiden muodostama jäte on korkea-aktiivista jätettä, johon palataan kappaleessa 5.1.

Jälleenkäsittelylaitoksia ei USA:ssa toimi tällä hetkellä yhtään, sillä vuosina 1966...73 toiminut laitos on sammutettu laajennus- ja muutostöiden ajaksi. Yksi laitos on käynnistysvaiheessa ja yksi valmistuu ensi vuoden lopulla. Vuonna 1990 on suunnitelmien mukaan toiminnassa 7 laitosta. USAEC on arvioinut jälleenkäsittelylaitokselta vapautuvien aineiden aiheuttamia maksimaalisia henkilökohtaisia säteilyannoksia käyttäen mallina laitosta, joka käsittelee 73 kevytvesireaktorin (á 1000 MWe) jätteet. Esimerkkihenkilö asuu laitokselta 2500 metrin päässä ja syö ainoastaan asuinpaikallaan tuotettua ravintoa. Laitoksen vuosittainen päästö aiheuttaa henkilölle seuraavien 50 vuoden kuluessa n. 30 mrem suuruisen annoksen. Annos on peräisin miltei yksinomaan tritiumista ja on sama niin koko keholle kuin useimmille sisäelimille. Ihoannos on kaksinkertainen Kr^{85} :n vuoksi. Transuraaneista aiheutuu luuhun 0,2 mrem ja keuhkoihin 0,01 mrem, muihin elimiin ei juuri mitään.

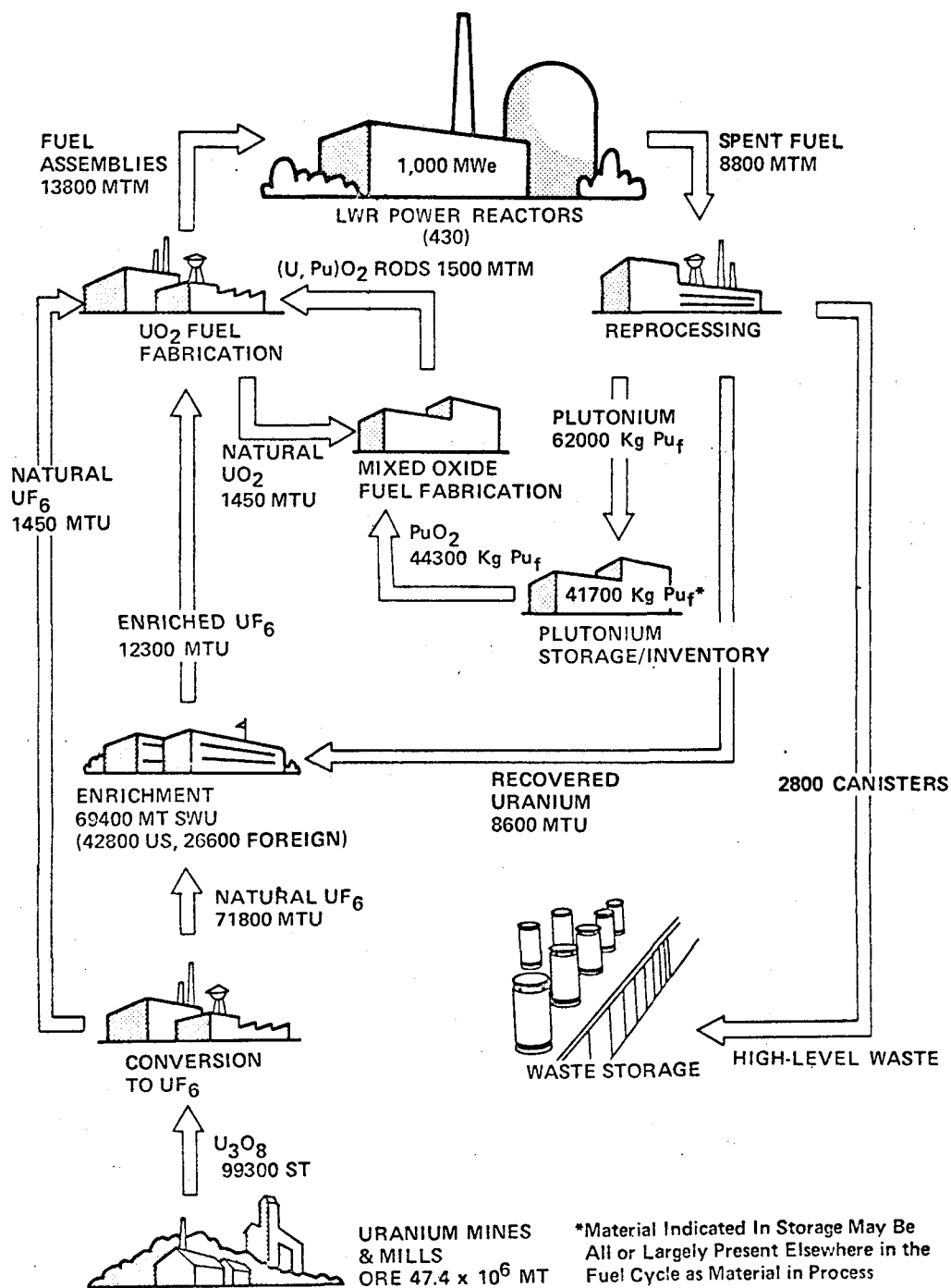
Jätevarastoihin palataan myöhemmin.

4.2

Plutoniumkierron tuomat muutokset LWR-teollisuuteen

Kuva 4.2 esittää LWR-teollisuuden komponentteja siinä tapauksessa, että plutoniumkierto toteutetaan. Samoin kuin kuvassa 4.1 viittaavat luvut USA:n tilanteeseen vuonna 1990. Lähtökohdaksi on otettu, että plutoniumrikasteisen polttoaineen osuus on 11 % koko polttoainemäärästä.

Plutoniumkierron vuoksi raakauraanin tarve vähenee 9 %. Vähennys ei ole suoraan 11 %, koska oletetaan, että plutonium sekoitetaan luonnonuraaniin eikä esim. rikastamoilta jääneeseen köyhdytettyyn uraanifraktioon. Pienemmän raakauraanin tarpeen vuoksi tarvitaan vuonna 1990 vähemmän kaivoksia, malminjalostamoita ja UF_6 -konversiolaitoksia. Lukumääräiset vähennykset ovat samassa järjestyksessä 188, 7 ja 1.



Kuva 4.2 LWR-teollisuuden komponentit plutoniumkierron kanssa

Rikastustyön tarve pienenee 11 %, joten yksi uusi rikastamo voidaan jättää rakentamatta.

UO₂-polttoainetehtaan toimintaan ei plutoniumkierto sanottavasti vaikuta. Siellä joudutaan joka tapauksessa muuntamaan kaikki uraaniheksafluoridi uraanioksidiksi sekä suorittamaan polttoainenippujen kokoonpano. Vähennys koskee näin ollen vain polttoainenappien puristusta ja pakkausta zirkoniumsauvoihin.

Kokonaan uutena teollisuuslaitoksena tarvitaan plutoniumia käsitteleviä polttoainetehtaita. Uutena siinä mielessä, että niitä ei tarvittaisi ilman plutoniumkiertoa. Käytännössä on USA:ssa jo tällä hetkellä 5 koetehdasta, jotka pystyvät tuotannolliseen toimintaan. Yhteinen tuotantokapasiteetti on 50 tonnia plutoniumrikasteista polttoainetta vuodessa. Myöhemmät kaupalliset tehtaat tuottaisivat kukin n. 300 tonnia vuodessa ja niitä olisi vuonna 1990 suunnitelmien mukaan 8 kpl. Plutoniumpolttoaineen valmistus on oleellisesti hankalampaa kuin uraanipolttoaineen, sillä plutoniumia täytyy käsitellä suljetuissa, alipaineisteisissä tiloissa. Tämän vuoksi plutonium kannattaa pitää omana jakeenaan mahdollisimman pitkään. Plutoniumoksidi ja uraanioksidi sekoitetaan vasta kuivajauheena juuri ennen polttoainenapin puristamista. Kokemus on osoittanut, että näin saadaan riittävän homogeeninen seos ja että sekoitettu polttoaine on materiaaliominaisuuksiltaan täysin vertailukelpoista uraanipolttoaineen kanssa. Kokemusta on kerätty useissa kevytvesireaktoreissa vuodesta 1966 alkaen. Kun polttoainenapit on pakattu zirkoniumsauvoihin ja sauvat on hitsattu kiinni, ei plutonium enää vaadi mitään suurempia erikoisjärjestelyjä. Sauvat kuljetetaan tavalliselle polttoainetehtaalle, jossa ne yhdistetään sopivassa järjestyksessä samoihin nippuihin uraanisauvojen kanssa. Plutoniumpolttoainetehtas ei poikkea tavallisesta teollisuuslaitoksesta muussa suhteessa kuin pienten radioaktiivisuuspäästöjen suhteen. Päästöjen suuruudesta saa havainnollisen kuvan vertaamalla tehtaan aiheuttamaa transuraanilaskeumaa pommikokeiden keskimääräiseen globaaliseen laskeumaan. Jos 300 tonnia vuodessa tuottava

esimerkkitehdas toimii 30 vuotta, on sen lähiympäristöönsä aiheuttama maksimaalinen transuraanilaskeuma 50 prosenttia pommi-kokeiden laskeumasta. Vertailuperusteena on tällöin käytetty laskeuman alfa-aktiivisuuksia.

Kevytvesireaktoreissa ei plutoniumin käyttö näy juuri millään tavalla ulospäin. Tämä edellyttää kuitenkin sitä, että enemistö polttoainesauvoista on uraanirikasteisia ja että plutoniumsautavat sijoitellaan sydämeen sopivalla tavalla. Perustavin ero uraanin ja plutoniumin välillä on se, että plutoniumin fissionvaikutusala on kaksinkertainen uraaniin verrattuna. Tämä merkitsee puolta pienempää neutronivuota, mistä taas on määrättyjä etuja reaktorin stabiilisuuden ja neutronitalouden kannalta. Toisaalta säätölaitteissa käytettävien absorbaattoreiden tehokkuus on pienempi pienemmässä neutronivuossa. Jotta säätölaitteiden määrää ei tarvitsisi lisätä, on huolehdittava siitä, että säätösauvojen ympärillä on pelkästään uraanisauvoja. Verrattaessa keskenään tavallisen kevytvesireaktorin ja plutoniumia käyttävän reaktorin aktiivisuuspäästöjä nähdään, että viimeksi mainitussa ne ovat hieman pienemmät. Tämä johtuu siitä, että plutoniumfissiossa syntyy vähemmän Kr^{85} :tä, joka on päästön tärkein komponentti. Onnettomuusanalyysit puolestaan osoittavat, että plutoniumia käyttävä reaktori ei ole missään onnettomuustilanteessa sanottavasti vaarallisempi. Useimmissa hypoteettisissa onnettomuuksissa se on päinvastoin vähemmän vaarallinen. Vertailuja tehdessä on syytä muistaa, että varsinkin latausjakson loppupuolella on myös uraanireaktorissa paljon plutoniumia. Koko latausjakson aikana kehittyvästä energiasta on 35 % peräisin plutoniumfissiosta ja jakson loppupuolella tapahtuu plutoniumfissioita jo enemmän kuin uraanifissioita.

Jälleenkäsittelylaitoksessa käsiteltävän materiaalin kokonaismäärä ei plutoniumkierron vaikutuksesta muutu. Sen sijaan plutoniummäärä olisi vuonna 1990 20 prosenttia suurempi. Tämä vaatisi ilmeisesti laajennuksia plutoniumin käsittelyssä tarvittaviin laitteisiin, mutta ei vaikuttaisi kovinkaan paljon

prosesseihin. Jälleenkäsittelylaitoksen päästöistä aiheutuvat koko väestön säteilyannokset pienentyisivät kolmisen prosenttia plutoniumkierron ansiosta vuonna 1990. Vähennys johtuu pienentyneestä Kr^{85} -määrästä.

4.3

Koko LWR-teollisuuden ympäristövaikutukset

Tässä kappaleessa käsitellään ainoastaan radioaktiivisuuden liittyviä ympäristövaikutuksia. Muista vaikutuksista, kuten maan ja vesien käytöstä sekä kemiallisista päästöistä riittänee todeta, että plutoniumkierto ei huononna tilannetta missään suhteessa, vaan vaikuttaa yleensä edulliseen suuntaan.

Ympäristövaikutukset esitetään kootusti taulukossa 4.3. Ilmoitetut päästöt ja jätemäärät tarkoittavat vuonna 1990 tapahtuvia lisäyksiä. Samoin ilmoitetut säteilyannokset tarkoittavat vuoden 1990 toiminnasta seuraavien 50 vuoden kuluessa aiheutuvia annoksia.

Päästöjen osalta on syytä panna merkille, että malminjalostuksen yhteydessä vapautuvien pitkäikäisten luonnon alfasäteilijöiden määrä on monta dekadia suurempi kuin muista laitoksista vapautuvien keinotekkoisten alfasäteilijöiden määrä.

Väestöannosten terveydellisistä vaikutuksista saa parhaan käsityksen, kun todetaan, että USA:n vuoden 1990 LWR-teollisuus aiheuttaa seuraavien 50 vuoden kuluessa todennäköisesti 42 syöpätapausta ja 28 näkyvää geneettistä muutosta. Plutoniumkierto pienentäisi näitä lukuja määrillä 0,27 ja 0,18.

AKTIIVISUUSPÄÄSTÖT (Ci)	Ilman plutonium- kiertoa	Plutoniumkierron aiheuttama muutos
Kaasut		
Rn ²²²	59500	-5500
Ra ²²⁶	11	-1
Th ²³⁰	11	-1
U _{nat}	17,3	-1,1
Tritium	6200000	200000
Kr ⁸⁵	99000000	-4500000
I ¹²⁹	0,60	0,02
I ¹³¹	49,5	3,4
Pu, alfa-akt.	0,0057	0,0052
Pu, beta-akt.	0,133	0,138
Am	0,0003	0,00057
Cm	0,034	0,081
Nesteet		
U+tytäraineet	1144	-104
Ra ²²⁶	1,51	-0,17
Th ²³⁰	0,65	-0,07
Th ²³⁴	4,0	0
Tritium	52900	8000
Plutonium	<0,0014	0,078
JÄTTEET (kCi)		
Korkea-aktiiviset, 10 vuoden ikäisenä		
Transuraanit, alfa-akt.	17000	91000
Transuraanit, beta-akt.	3100	2200
Fissiotuotteet	2700000	-43000
Muut jätteet, 10 vuoden ikäisenä	2350	-30
PLUTONIUMVARASTO (kg fissiiliä Pu)		
Vuosituotto 1990	53000	9000
Kumuloitunut 1990	309200	-267500
KOKOKEHOANNOS (manrem 50 vuodessa)		
Työntekijät	99600	1400
Muu väestö (koko maailma)	57400	-2400

Taulukko 4.3

USA:n vuoden 1990 LWR-teollisuuden ympäristövaikutuksia

TRANSURAANIJÄTTEIDEN KÄSITTELY

5.1

Korkea-aktiiviset jätteet

Korkea-aktiivinen jäte syntyy kokonaan jälleenkäsittelylaitoksessa. Se sisältää käytetystä polttoaineesta osan, joka jää jäljelle, kun uraani ja plutonium on erotettu. Jätettä koskevissa suunnitelmissa oletetaan, että viimeainituista saadaan erotettua 99,5 % ja loput 0,5 % pysyy jätteen seassa. Tämä on konservatiivinen olettamus jo nykyiselläkin tekniikalla.

Toistaiseksi ei mikään valmiina, rakenteilla tai suunnitteluvaiheessa oleva jälleenkäsittelylaitos sisällä prosessia, jossa erotettaisiin amerikiium ja curium fissiotuotteista. Erotusmenetelmät ovat tosin kehitteillä, mutta ennen niiden teollista käyttöönottoa on korkea-aktiivista jätettä pidettävä transuraanipitoisena. Tähän lähtökohtaan perustuvat mm. kaikki jätteen käsittelyä ja varastointia koskevat suunnitelmat.

Valtaosa tähän mennessä syntyneistä korkea-aktiivisista jätteistä on vielä nestemäisessä muodossa. Kiinteyttämismenetelmiä on kuitenkin kehitetty siten, että neljä erilaista menetelmää olisi valmiina teolliseen käyttöön. Toistaiseksi ei näiden välillä ole tehty lopullista valintaa. Valinta tulee pian ajankohtaiseksi, sillä USA:n laki vaatii, että jäte on kiinteytettävä 5 vuoden kuluttua jälleenkäsittelystä ja siirrettävä hallituksen varastoon viimeistään 5 vuotta myöhemmin.

Kaikissa neljässä kiinteyttämismenetelmässä jäte muuttuu sellaiseen muotoon, että se liukenee vähitellen veteen. Näin ollen se on pakattava vesitiiviiseen terässäiliöön. Jätevaraston suunnittelussa otetaan siis toistaiseksi huomioon, että säiliö saattaa puhjeta ja sisältö vuotaa ulos. Tilannetta voidaan kuitenkin oleellisesti parantaa, jos jäte kiinteyttämisen yhteydessä valetaan lasimassaan. Tämä toimenpide ei lisää jätteen tilavuutta, mutta parantaa lämmönjohtumista kerrotoimella 2-3 ja vähentää liukenemista ratkaisevasti. Paljaasta

lasitetusta jätteestä liukenisi veteen 100 vuodessa noin 0,01 %. Lasitus on tällä hetkellä kyetty liittämään jo kahteen kiinteytysmenetelmään. Lasin haittapuolena on se, että jätteessä kehittyvä helium aiheuttaa siinä sisäisen paineen kasvun ja johtaa lopulta murtumiseen. Nykyisellä tekniikalla lasi kestää runsaat sata vuotta. Lasin huokoisuutta ja näin ollen kestoaikaa voidaan kuitenkin lisätä eräillä menetelmillä, joiden kehitys on käynnissä.

USA:n hallituksen varasto korkea-aktiivisille jätteille on vasta luonnosasteella. Sitä tarvitaan runsaan kymmenen vuoden kuluttua eikä lopullisilla päätöksillä ole vielä kiirettä. Muutamia periaatteellisia ratkaisuja on kuitenkin tehty. Varasto on yhteinen koko USA:lle ja tullaan sijoittamaan autio- maahan Hanfordin alueelle. Jäte pakataan teräslieriöihin, joiden läpimitta on 30 cm ja pituus 3 m. Yksi 1000 MWe:n voimala tuottaa näitä säiliöitä 6...7 kpl vuodessa. Lieriöt sijoitetaan siten, että ne voidaan helposti ottaa uudelleen käsiteltäväksi, kun niiden lopullinen hävitysmenetelmä on ratkaistu. Kyseessä olevassa varastossa niitä suunnitellaan pidettäväksi 100 vuotta, minkä ajan ne hyvin kestävät.

Jäte on siis tarkoitus tuoda varastoon 10 vuoden kuluttua siitä, kun se on poistettu reaktorista. Taulukossa 5.1 on esitetty, miten suuri on tällöin eri isotooppien lämmitysteho yhdessä jäteliieriossa. Taulukossa on erotettu toisistaan uraanirikasteisen ja plutoniumrikasteisen polttoaineen lämmitystehot, vaikka käytännössä nämä polttoaineet sekoittuvat jälleenkäsittelyssä. Plutoniumista on oletettu 0,5 prosenttia jääneeksi jätteeseen ja tritium ja Kr^{85} on oletettu vapautuneeksi kokonaan jälleenkäsittelyssä.

Jätevaraston suunnittelu perustuu siihen, että yhden lieriön lämmitysteho on 5 kW. Ellei lieriöön sekoiteta ylimääräistä täyteainetta, saa siinä tällöin olla enintään 17 % plutonium-polttoaineesta syntyneitä jätettä. Tätä pitoisuutta ei ylitetä vielä kuluvalle vuosisadalle.

Menetelmää, jolla jätelieriöt jäähdytetään, ei ole vielä päätetty. Kolme erilaista ratkaisua on tutkittu ja alustavat varastosuunnitelmat on laadittu kutakin ratkaisua varten. Yhdessä varastomallissa on jäähdytysaineena vesi ja kahdessa ilma.

Vesijäähdytyksestä on eniten kokemuksia, koska sitä sovelletaan käytetyn polttoaineen varastointiin. Vesijäähdytetyn

isotooppi	uraanipolttoaine	plutonumpolttoaine
	wattia	wattia
Pu ²³⁸	9,4	124
Pu ²³⁹	0,16	0,37
Pu ²⁴⁰	0,44	12
Pu ²⁴¹	0,04	0,24
Pu ²⁴²	0,0006	0,007
Am ²⁴¹	17,0	164
Am ²⁴³	2,1	59
Cm ²⁴²	0,82	20
Cm ²⁴⁴	179	9900
Fissionituotteet	3180	2650
Yhteensä	3400	13000
Yht. 100 vuotta myöhemmin	340	940

Taulukko 5.1 Eri isotooppien lämmitysteho USA:ssa suunnitellussa jätelieriössä, joka sisältää 3,14 tonnia 10 vuoden ikäistä jätettä.

varaston suunnitelma sisältää altaita, joiden jäähdytykseen tarvitaan pumppuja ja lämmönvaihtimia. Tällä on haluttu varautua siihen, että jätelieriö rikkoontuu ja sisältö liukenee veteen. Jäähdytys varmistetaan luonnollisesti moninkertaisilla järjestelmillä, mutta riippuvuus teknisistä järjestelmistä on silti hieman arveluttavaa. Jos jäähdytys loppuisi, alkaisi allasvesi kiehua 12...16 tunnin kuluttua. Viikon kuluttua jätelieriöt olisivat kuivilla ja tämän jälkeen jäte sulaisi muutamassa päivässä. Sulamisen jälkeen jäte joko painuisi maan sisään tai jähmettyisi uudelleen muotoon, jossa ilmajäähdytys olisi riittävä pitämään sen lämpötilan sulamispisteen alapuolella. Saastevaikutus ei välttämättä näkyisi kovin laajalla

alueella, mutta jäte pääsisi kuitenkin hallitsemattomaan tilaan. Tämä ei ole suotavaa ainakaan silloin, jos tilannetta tarkastellaan satojen vuosien tähtäimellä.

Ilmajäähdytteisistä ratkaisuista yksinkertaisempi olisi sellainen, jossa kukin jätelieriö sijoitettaisiin erillisen teräs-betonitynnyrin sisään. Tynnyri olisi riittävä säteilysuoja ja se olisi muotoiltu niin, että sen sisällä syntyisi riittävä ilmavirtaus. Mitään jäähdytyslaitteita ei tarvittaisi. Tynnyrit asetettaisiin autiomaahan riveihin maan pinnalle. Rivien välit olisivat 6 m, joten esim. vuoden 1990 jäte vaatisi 10 ha:n suuruisen alueen.

Toinen ilmajäähdytteinen ratkaisu perustuisi myös luonnolliseen jäähdytyskiertoon. Siinä jätelieriöt varastoitaisiin 500 kappaleen erinä betonibunkkereissa ja maapinta-alaa tarvittaisiin paljon vähemmän kuin edellä mainitussa ratkaisussa.

5.2

Matala-aktiiviset jätteet, alfa-aktiivisuus yli 10 nCi/g

Matala-aktiivisia jätteitä, joiden alfa-aktiivisuus ylittää 10 nCi/g, syntyy jälleenkäsittelylaitoksilla ja plutoniumpolttolaitosten jätteet ylittävät mainitun konsentraation ja ne on USA:ssa lain mukaan kuljetettava hallituksen valvomaan varastoon.

Matala-aktiivisen jätteen keskimääräinen lämmitysteho painoyksikköä kohti on vain miljardisosa korkea-aktiivisesta jätteestä, joten se ei käytännöllisesti katsoen lämpiä lainkaan.

Jäte pakataan 250 litran tynnyreihin. Näitä tynnyreitä keräntyisi USA:ssa vuonna 1990 noin 30 000 kpl, ellei mitään tilavuuden pienennysmenetelmää käytettäisi. Jos jäte poltettaisiin, vähenisi sen tilavuus tekijällä 5-10. Polttolaitos tul-laan ilmeisesti rakentamaan. Koko vuoden 1990 matala-aktiivinen jäte sisältää plutoniumia 200...300 kg, joten sitä on kuskakin tynnyrissä 10...100 g tilavuuden pienennysmenetelmästä riippuen.

Plutoniumjätteiden varastoimiseksi on USA:ssa valmis menetelmä, jota on käytetty useita vuosia. Tähän mennessä kerääntyneet jätteet ovat peräisin sotilaallisista ohjelmista. Varastopaikka sijaitsee korkealla ja kuivalla ylätasangolla, josta vesi pääsee pois ainoastaan haihtumalla tai maahan imeytymällä. Pohjavesi on 150 metrin syvyydellä. Itse varasto valmistetaan kaivamalla maahan hehtaarin laajuinen ja muutaman metrin syvin kuoppa. Kuopan pohja tehdään viistoksi toista päätyä ja keskustaa kohti. Kun pohja peitetään asfaltilla, valuu kuoppaan joutunut vesi pois yhdestä ainoasta kohdasta ja veden laatua voidaan tarkkailla. Asfalttipohjan päälle ladotaan jätetynnyreitä tiiviiksi pakkaukseksi kymmeneen kerrokseen. Kerrosten väliin ja koko pakkauksen päälle asetetaan tulenkestävää vaneria ja nailonvahvisteista muovia. Täyteen tullut varasto peitetään metrin paksuisella maakerroksella. Maan läpi ei tunkeudu säteilyä, joten varaston päällä voi oleskella.

Hehtaarin laajuisia varastomoduleja on USA:ssa vuonna 1990 täynnä yksi kappale ja toisesta kaksi kolmannesta. Vuoden 1990 tarve on yksi neljännes modulista.

Varastomodulien ympäristöä valvotaan jatkuvasti ottamalla ilmanäytteitä sekä vesinäytteitä pohjaviemäristä. Tulevaisuudessa on mahdollista purkaa varastot, jos siihen ilmaantuu tarvetta tai jos keksitään jokin ratkaiseva parannus jätteiden hävitykseen.

5.3

Tulevaisuudennäkymiä

Korkea-aktiivisten jätteiden lopullinen hävittäminen on vielä täysin avoin kysymys. Aluksi toteutettava tilapäinen varastointi on tosin turvallinen, mutta sen heikkoutena on jatkuvan kontrollin tarve, ja tästä tarpeesta pyritään eroon.

USAEC:n laaja tutkimusohjelma, jonka päämääränä on lopullisen hävittämisen ratkaiseminen, käynnistyi vasta vuonna 1972 ja on siis aivan alkuvaiheessaan.

Ratkaisumallit, joiden konkreettinen selvittäminen on käynnissä, etenevät kahdella päälinjalla. Ensinnäkin tehdään kemiallista tutkimusta, jonka tarkoituksena on kehittää transuraanien erotusmenetelmä. Päämääränä on, että transuraaneista jäisi vain promille fissiotuotteiden sekaan. Tämän suuruisella erotuksella olisi transuraanien ja fissiotuotteiden aktiivisuus jätteessä 600 vuoden kuluttua samaa suuruusluokkaa. 600 vuotta on aika, jolloin fissiotuotteiden yleensä katsotaan hajonneen harmittomalle aktiivisuustasolle. Jos tämä jäte sekoitetaan painosuhteessa 1:100 kivennäisaineeseen, on sen aktiivisuus painoyksikköä kohti sama kuin uraanimalmin. Erona on se, että uraanimalmista erittyy jatkuvasti alfa-aktiivista radonkaasua, mutta fissiojäte ei eritä mitään. Näin ollen kivennäiseen sekoitettua fissiojätettä voidaan 600 vuoden kuluttua sanoa vaarattommaksi kuin uraanimalmia.

Taulukossa 5.2 on esitetty, miten suuria ovat eri isotooppien aktiivisuudet korkea-aktiivisessa jätteessä, kun transuraanista on jäänyt siihen yksi promille ja jätteen ikä on joko 100 tai 600 vuotta. Kyseinen jäte on sellaista, joka syntyy USA:ssa vuonna 1990, kun plutonium on uudelleenkierrossa.

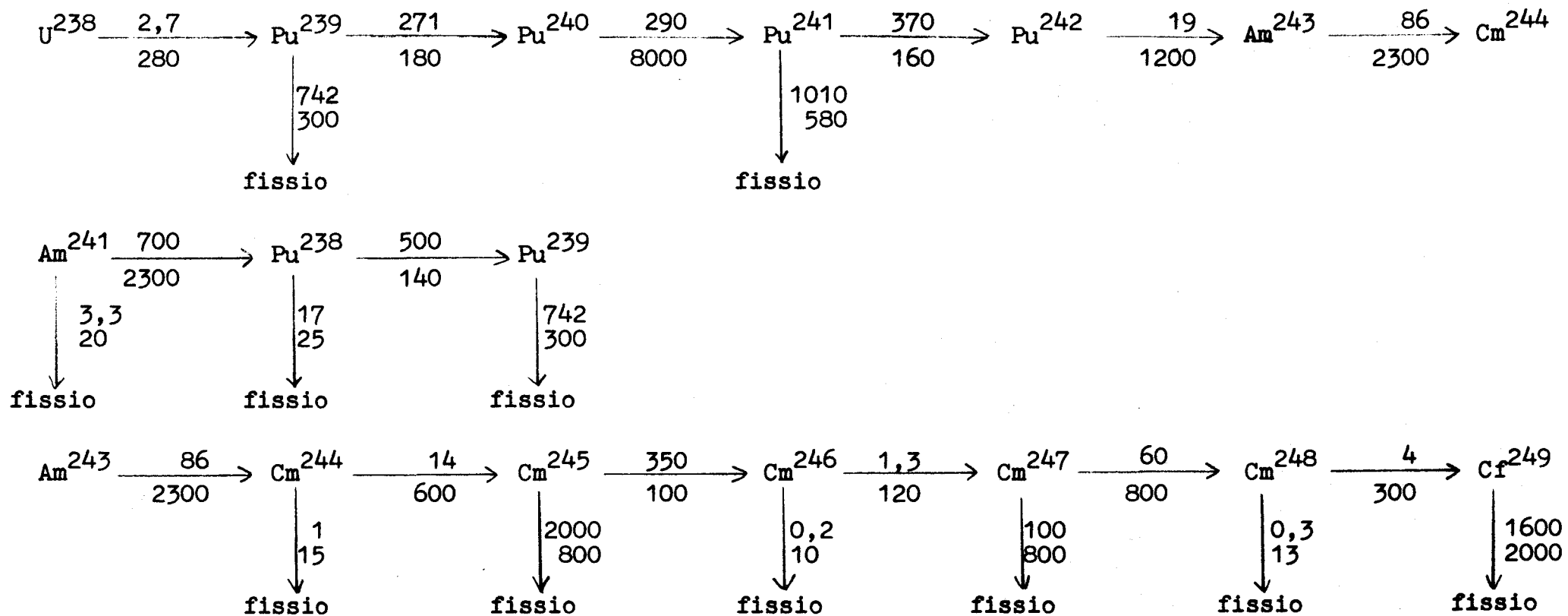
isotooppi	100 vuotta	600 vuotta
Pu ²³⁸	62	1,2
Pu ²³⁹	11	11
Pu ²⁴⁰	19	18
Pu ²⁴¹	37	0,001
Pu ²⁴²	0,08	0,08
Am ²⁴¹	1600	700
Am ²⁴³	440	400
Cm ²⁴²	0	0
Cm ²⁴⁴	2100	0
Sr ⁹⁰	31000	190
Cs ¹³⁷	50000	520

Taulukko 5.2

Eräiden isotooppien aktiivisuudet ($\mu\text{Ci/g}$) vanhentuneessa korkea-aktiivisessa jätteessä, kun transuraanit on erotettu kertoimella 1000.

Toinen tutkimuksen päälinja liittyy pitkäikäisten transuraanien kohtaloon. Geologian keinoin pyritään löytämään paikkoja, joissa jätteet pysyisivät miljoonia vuosia poissa ihmisen ulottuvilta. Tutkimuskohteena ovat suolamuodostelmat, mannerjäätiköt ja liikkuvat mannerjalustat, joiden mukana jätteet liukuisivat syvälle maan sisään. Ellei riittävän varmoja geologisia muodostelmia löydetä, on transuraanijätteet otettava kokonaisuudessaan kiertoon. Toisaalta transuraanien kierto tuntuu niin houkuttelevalta mahdollisuudelta, että se kannattanee toteuttaa jo taloudellisistakin syistä siinä vaiheessa, kun jätettä on kertynyt riittävästi eli parinkymmenen vuoden kuluttua. Tämä on niin etäinen ajankohta, että konkreettisia suunnitelmia ei vielä ole laadittu. Nukliditaulukkoa tarkastelemalla voidaan kuitenkin tehdä ratkaisevia päätelmiä.

Transuraaneista ikävimpiä ovat nimenomaan Am^{241} , Am^{243} ja Cm^{244} , joita syntyy kevytvesireaktorissa huomattavia määriä. Jos näitä aineita pidetään edelleen termisessä neutronivuossa, ne muuttuvat uudelleen fissiileiksi isotoopeiksi, joita voidaan käyttää reaktorin polttoaineena. Mitään uusia harmillisia isotooppeja ei reaktioketjuissa voi kumuloitua. Amerikiumin ja curiumin konvertointi kevytvesireaktoreissa ei kuitenkaan kannata, vaan tarkoitukseen pitää suunnitella erityisiä konvertteri-reaktoreita. Mallina voidaan käyttää plutoniumintuotto-reaktoreita, joilla on valmistettu aseluokan plutonium. Kun verrataan esimerkiksi Hanfordin laitosten tuotantokapasiteettia vuosittain syntyviin transuraanimääriin, voidaan otaksua, että transuraaneiden konvertoimiseksi takaisin fissiiliin muotoon ei maailmassa tarvita kovinkaan montaa laitosta. Tarkempien tutkimusten puutteessa on kuitenkin mahdotonta esittää mitään kvantitatiivista. Ainoa, mistä voidaan yksinkertaisesti tehdä jonkinlaisia päätelmiä, on erilaisten neutroniaktivointiketjujen tarkastelu. Kuvassa 5.1 on esitetty tavallinen transuraanien syntyyn johtava ketju sekä kaksi muuta ketjua, jotka tulisivat kyseeseen transuraanien muuntamisessa. Ketjuista on jätetty pois välivaiheina esiintyvät radioaktiiviset hajoamiset, joilla kaikilla on suhteellisen lyhyt puoliintumisaika. Kuvaan on



Kuva 5.1 Eräitä reaktioketjua, joita käyttäen voidaan tuottaa fissiilejä isotooppeja.

merkitty kullekin reaktiolle termisten neutronien kaappaus- vaikutusala sekä sen alle neutronikaappauksen resonanssi-integraali. Fissiilien aineiden kohdalle on merkitty vastavat luvut fissioreaktiolle. Kuvasta nähdään, että Am^{241} muuttuu uudelleen Pu^{239} :ksi. Am^{243} ja Cm^{244} puolestaan muuttuvat fissiileiksi curiumin ja kaliforniumin isotoopeiksi. Vaikutusalojen perusteella voidaan olettaa, että transuraanikonvertterin toiminta on huomattavasti tehokkaampaa kuin plutoniumin tuottoreaktorin toiminta. Mitään varmaa ei kuitenkaan voi sanoa ilman perusteellista reaktorisuunnittelua ja -analyysia.

Lopuksi vielä pari sanaa matala-aktiivisista transuraanipitoisista jätteistä. Niiden kohdalla kiinnitetään tällä hetkellä päähuomio prosesseihin, joissa jätteitä syntyy. Tavoitteena on kehittää prosesseja siten, että transuraaneista saataisiin suurempi osa talteen ja jätteeseen niitä jäisi entistä vähemmän. Nykyinen tilanne on se, että plutoniumpitoisen matala-aktiivisen jätteen keskimääräinen alfa-aktiivisuus on n. 500 kertaa suurempi kuin uraanimalmin.