

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Nopeat ydinreaktorit

Fast nuclear reactors

Työn tarkastaja: Juhani Hyvärinen

Työn ohjaaja: Vesa Tanskanen

Lappeenranta 3.12.2014

Joel Maunula

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Joel Maunula

Opinnäytteen nimi: Nopeat ydinreaktorit

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2014

39 sivua, 10 kuvaa, 5 taulukkoa

Hakusanat: nopea ydinreaktori, natriumjäähdytys, konversio, hyötö, suljettu polttoainekierto

Nopeat ydinreaktorit ovat toiminnaltaan polttoainetehokkaampia kuin nykyään laajalti käytössä olevat termiset reaktorit. Tehokkuus perustuu siihen, että nopeassa reaktorissa ei tapahdu neutronien hidastumista, jolloin ne pystyvät esimerkiksi muuntamaan luonnonuraania ja muita fertiilejä aineita fissiileiksi aineiksi. Koska reaktorissa ei saa olla hidastinta, nopea reaktori ei voi käyttää jäähdytteenään vettä, vaan on käytettävä jotain raskaampia ytimiä sisältävää jäähdytettä, kuten natriumia.

Natriumin käyttö tuo mukanaan tiettyjä ongelmia, sillä se on erittäin reaktioherkkä ilman ja veden kanssa. Nopeita reaktoreita on tosin käytetty ja tutkittu jo yli 50 vuotta, ja käyttökokemusten perusteella on löydetty toimivia ratkaisuja natriumin ongelmiin.

Nopean reaktorin tehokas käyttö vaatii suljetun polttoainekierron, jossa käytetystä polttoaineesta voidaan valmistaa uutta polttoainetta joko nopealle tai termiselle reaktorille. Suljetun polttoainekierron infrastruktuuri on tosin hyvin kallista, joten sen käyttöönotto on kannattavaa lähinnä infrastruktuurin jo omaavissa maissa, kuten esimerkiksi Venäjällä.

Nopeaa ja kevytvesireaktoria vertaillen tulee esille tiettyjä yhtäläisyyksiä, erityisesti säteilyturvallisuuteen ja ydinturvallisuuteen liittyvissä asioissa. Suurimmat eroavaisuudet reaktoryyppien välillä nähdään polttoainetaloudessa ja jätehuollossa.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---|-----------|
| Symboli- ja lyhenneluettelo | 4 |
| 1 Johdanto | 5 |
| 2 Nopean reaktorin toiminta | 7 |
| 3 Nopeat reaktorit maailmalla | 11 |
| 3.1 Yhteenveto rakennetuista reaktoreista..... | 11 |
| 3.2 Natriumjäähdytteeseen liittyvät ongelmat..... | 12 |
| 3.3 Toimivat ratkaisut..... | 13 |
| 3.4 Natriumin vaihtoehdot..... | 16 |
| 4 Polttoainekierto | 18 |
| 4.1 Avoin polttoainekierto ja jälleenkäsittely..... | 19 |
| 4.2 Suljettu polttoainekierto | 22 |
| 4.3 Toriumkierto..... | 23 |
| 5 Vertailu kevytvesireaktoriin | 24 |
| 5.1 Polttoainetalous ja jätehuolto | 24 |
| 5.2 Säteilyturvallisuus ja onnettomuudet | 26 |
| 5.3 Ydinturvallisuus | 29 |
| 6 Johtopäätökset | 34 |
| 7 Yhteenveto | 35 |
| Lähdeluettelo | 37 |

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Kreikkalaiset aakkoset

σ mikroskooppinen vaikutusala [barn]

Lyhenteet

| | |
|-------|--|
| Cr | Kromi |
| IAEA | International Atomic Energy Agency |
| IPFM | International Panel on Fissile Materials |
| LOCA | Loss of Coolant Accident |
| LWR | Light Water Reactor |
| Mg | Magnesium |
| Mo | Molybdeeni |
| Na | Natrium |
| NRC | Nuclear Regulatory Commission |
| Pu | Plutonium |
| PUREX | Plutonium and Uranium Extraction |
| PWR | Pressurized Water Reactor |
| SFR | Sodium-cooled Fast Reactor |
| Th | Torium |
| U | Uraani |
| ULOF | Unprotected Loss of Flow |
| ULOHS | Unprotected Loss of Heat Sink |
| UTOP | Unprotected Transient Overpower |
| UTUC | Unprotected Transient Under Cooling |

Alaindeksit

a absorptio

f fissio

1 JOHDANTO

Maailmalla vaaditaan yhä enemmän hiilidioksidivapaita ja kestävän kehityksen ideaalien mukaisia energiantuotantomenetelmiä. Lisäksi useat ennusteet arvioivat, että primäärienergian kulutus vähintään kaksinkertaistuu vuoteen 2050 mennessä, joten ydinvoiman kehitysnäkymät ovat erinomaiset. Ydinvoimalla voidaan tuottaa puhdasta, turvallista ja kustannustehokasta energiaa, joka on tulevaisuudessa hyvinkin kilpailukykyinen muiden hiilidioksidittomien tai vähäpäästöisten tuotantomuotojen kanssa. (Bamberger et al. 2011, 1.)

Tällä hetkellä kaupallisessa käytössä olevat ydinreaktorit, kuten painevesi- ja kiehutusvesireaktorit, kuuluvat toisen sukupolven reaktoreihin. Näistä reaktoreista hieman paranneltuja versioita, kuten Olkiluodon kolmosreaktoria, kutsutaan kolmannen sukupolven reaktoreiksi, ja niitä on jo muutamia rakenteilla ympäri maailmaa. Neljännen sukupolven reaktorit ovat täysin eri konsepteihin perustuvia, innovatiivisia reaktoreja, joiden toivotaan ratkaisevan useita sekä turvallisuus- että polttoainekysymyksiä, mihin nykyiset reaktorit eivät välttämättä pysty. Vaikka nopeita reaktoreja on ollut tutkimuskäytössä jo noin 50 vuotta, voidaan niiden pohjalta kehittää tulevaisuudessa neljännen sukupolven nopeita reaktoreja kaupalliseen käyttöön. (Choppin et al. 2013, 3-4.)

Toisen sukupolven reaktorit käyttävät polttoaineenaan pääasiassa rikastettua luonnonuraania ($U-238$), jonka fissiili isotooppi ($U-235$) reagoi helpommin termisiksi hidastettujen neutronien kanssa. Syntyessään neutronit ovat nopeita, jolloin ne voivat absorboitua luonnonuraaniin, muuntaen sen fissiiliksi plutoniumiksi ($Pu-239$). Termisessä reaktorissa noin kolmasosa reaktorin tehosta saadaankin uraanin neutronikaappausten kautta syntyneestä plutoniumista. Käyttöjaksonsa jälkeen polttoaine sisältää kuitenkin vielä paljon hyödyntämätöntä luonnonuraania, plutoniumia, sekä useita muita fission aikana syntyneitä alkuaineita. Nopeassa reaktorissa neutroneja pyritään hidastamaan mahdollisimman vähän, jolloin konversioita tapahtuu enemmän, ja saadaan fissiiliä polttoainetta huomattavasti tehokkaammin luonnonuraanista ja reaktiotuotteista. Lisäksi monet ydinreaktioiden aikana syntyneet alkuaineet voivat myös fissioitua nopeassa neutronivuossa. Toisin sanoen nopea reaktori voi käyttää polttoaineenaan myös sellaisia alkuaineita, jotka termisessä reaktorissa luokitellaan

ydinjätteeksi. Nopean reaktorin voi suunnitella myös tuottamaan omaa tarvetta enemmän polttoaineeksi kelpaavia alkuaineita, joita voidaan käyttää muiden reaktorien polttoaineena. Tätä kutsutaan hyödöksi (breeding). (Kalli 2014a, 55 & 79-82)

Tässä työssä tutustutaan tarkemmin nopeisiin ydinreaktoreihin ja tehdään johtopäätöksiä reaktorityypin mahdollisuuksista yhtenä tulevaisuuden reaktorivaihtoehtona. Vaikkei nopeista reaktoreista ole vielä rakennettu neljännen sukupolven mallia, voidaan kuitenkin oppia paljon viime vuosikymmenten aikana toimineiden koereaktorien käyttökokemuksista. Nopeiden reaktorien kehitystä ja historiaa ovat tutkineet sekä kansainvälinen atomienergiajärjestö (IAEA) (Rineiskii et al. 2006) että kansainvälinen fissionisten materiaalien paneeli (IPFM) (Cochran et al. 2010).

Kappaleessa 2 tarkastellaan nopean reaktorin toimintaperiaatteita, hyötöä, konversioreaktioita sekä sydämen geometriaa.

Kappaleessa 3 esitellään maailmalla käytössä olleet ja olevat nopeat reaktorit, sekä tutkitaan niiden käyttökokemusten perusteella ilmenneitä ongelmia ja ongelmiin esitettyjä ratkaisuja.

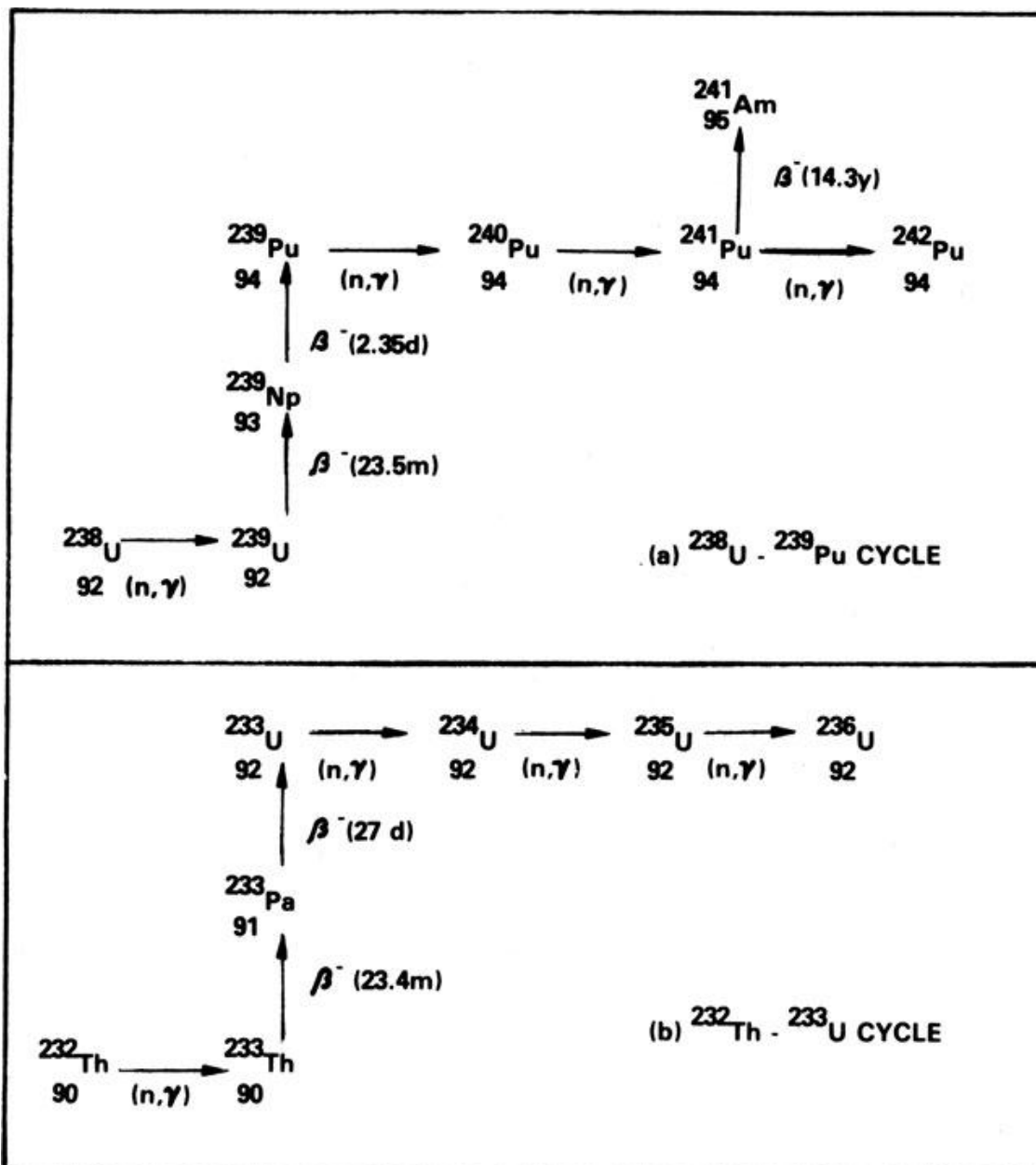
Kappaleessa 4 tarkastellaan avointa polttoainekiertoa, polttoaineen jälleenkäsittelyn roolia sekä suljettua polttoainekiertoa. Pohditaan suljetun polttoainekierron taloudellista kannattavuutta. Lopuksi esitellään Intiassa ehdotettua toriumiin perustuvaa suljettua polttoainekiertoa.

Kappaleessa 5 vertaillaan kevytvesireaktoria ja nopeaa reaktoria. Vertailuun sisältyy muun muassa polttoainetalous, jätehuolto, säteilyturvallisuus ja onnettomuudet sekä ydinturvallisuus.

Lopuksi tehdään johtopäätöksiä raportissa esitetyn materiaalin perusteella nopean reaktorin kannattavuudesta ja tulevaisuuden näkymistä.

2 NOPEAN REAKTORIN TOIMINTA

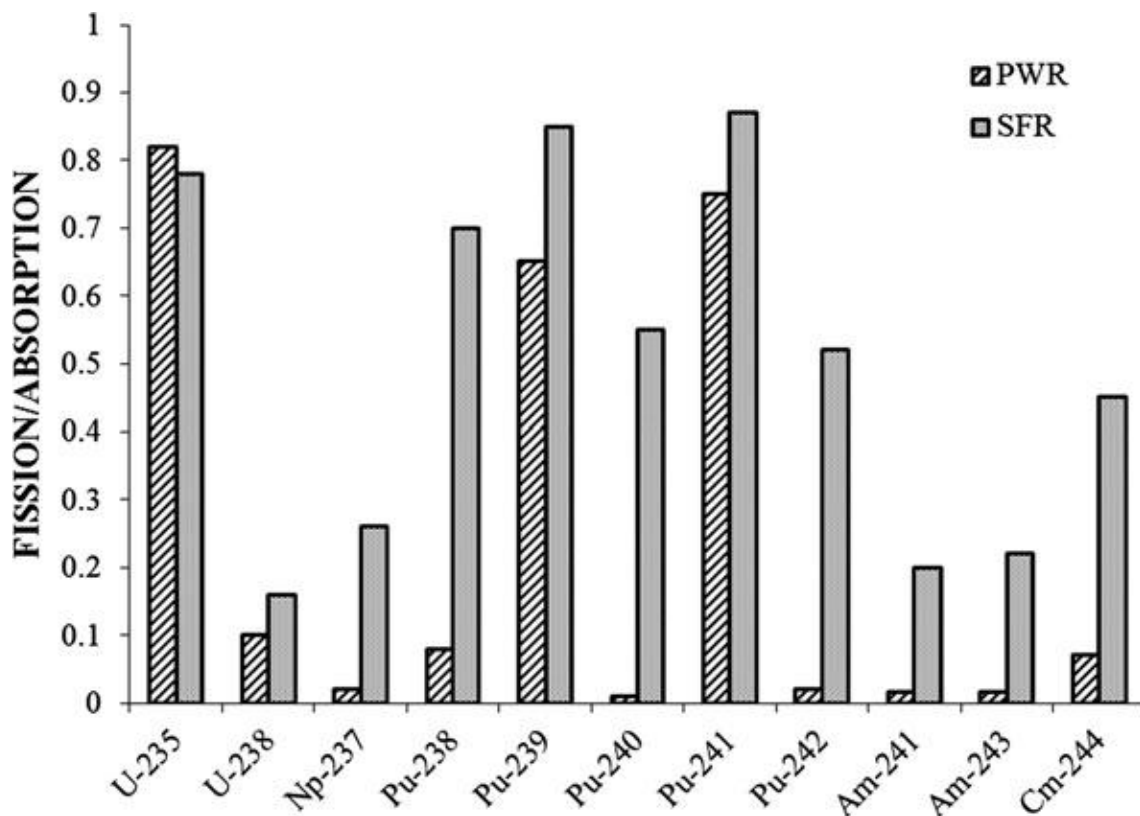
Nopeat reaktorit voidaan jakaa kahteen luokkaan, polttoreaktoreihin (burners) ja hyötöreaktoreihin (breeders). Jos fertiileistä isotoopeista muodostuu enemmän fissiilejä isotooppeja, kuin niitä fissioituu ketjureaktion aikana, puhutaan hyötöreaktorista. Fertiilit isotoopit, kuten U-238 ja Th-232, muodostavat nopean reaktorin kaksi pääasiallista konversioketjua. U-238 muuttuu neutronisieppausten kautta fissiiliksi plutoniumiksi. Th-232 puolestaan muuntuu fissiiliksi U-233-isotoopiksi. Konversioketjut on esitetty tarkemmin kuvassa 1. (Waltar et al. 2012, 8.)



Kuva 1. U-238 ja Th-232 konversioketjut (Waltar et al. 9).

Kuvassa 1 U-238 muuttuu neutronisieppauksen kautta U-239:ksi. U-239 hajoaa ensin neptuniumiksi ja sen jälkeen fissiiliksi plutoniumiksi. Toriumin fertiili isotooppi Th-232 muuttuu neutronisieppauksen kautta Th-233:ksi, joka hajoaa ensin palladiumiksi ja sen jälkeen U-233:ksi, joka on fissiili. (Ibid.)

Vaikka nopean reaktorin käyttö fissiilin polttoaineen tuotantoon on sen pääasiallinen hyöty, tulee myös huomioida nopean spektrin neutronien käyttö korkea-aktiivisen ydinjätteen käsittelyssä. Kevytvesireaktorien käytetty polttoaine sisältää paljon ongelmallisia fissiotuotteita, kuten pieniä aktinideja, joiden puoliintumisaika on pitkä ja aktiivisuus korkea. Pienien aktinidien fissiovaikutusala absorptiovaikutusalaan nähden (σ_f/σ_a) on huomattavasti suurempi nopeassa kuin termisessä neutronispektrissä. Tämä käy hyvin ilmi kuvasta 2. (Ibid. 156.)

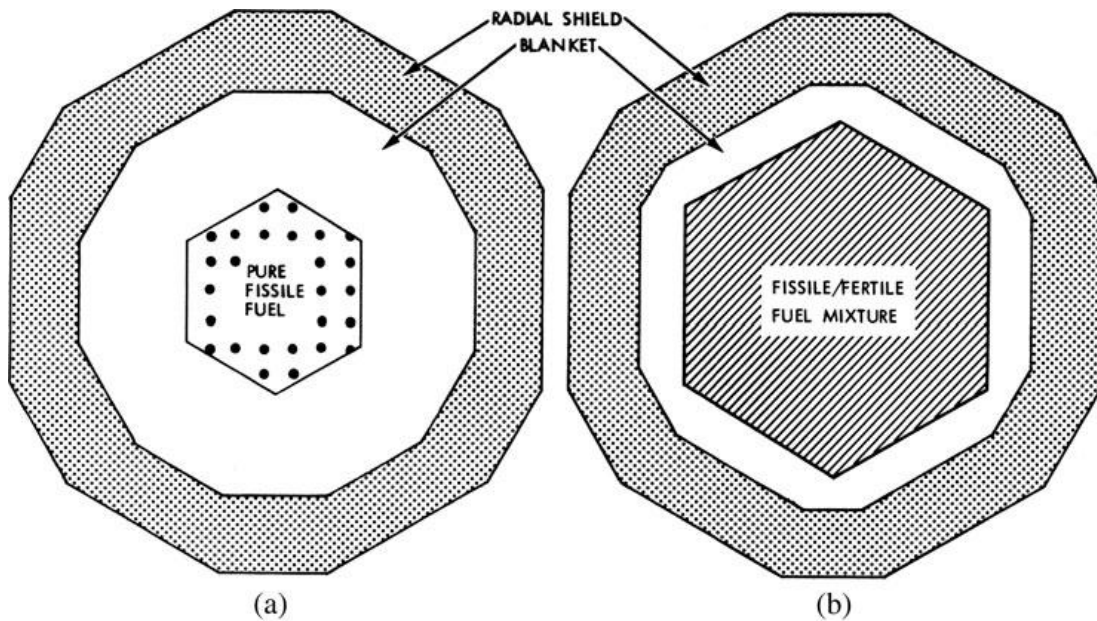


Kuva 2. Uraanin, plutoniumin ja pienien aktinidien fissiovaikutusala absorptiovaikutusalaan nähden. Vertailu termisen painevesireaktorin (PWR) ja nopean natriumjäähdytteisen reaktorin (SFR) välillä. (Waltar et al. 156.)

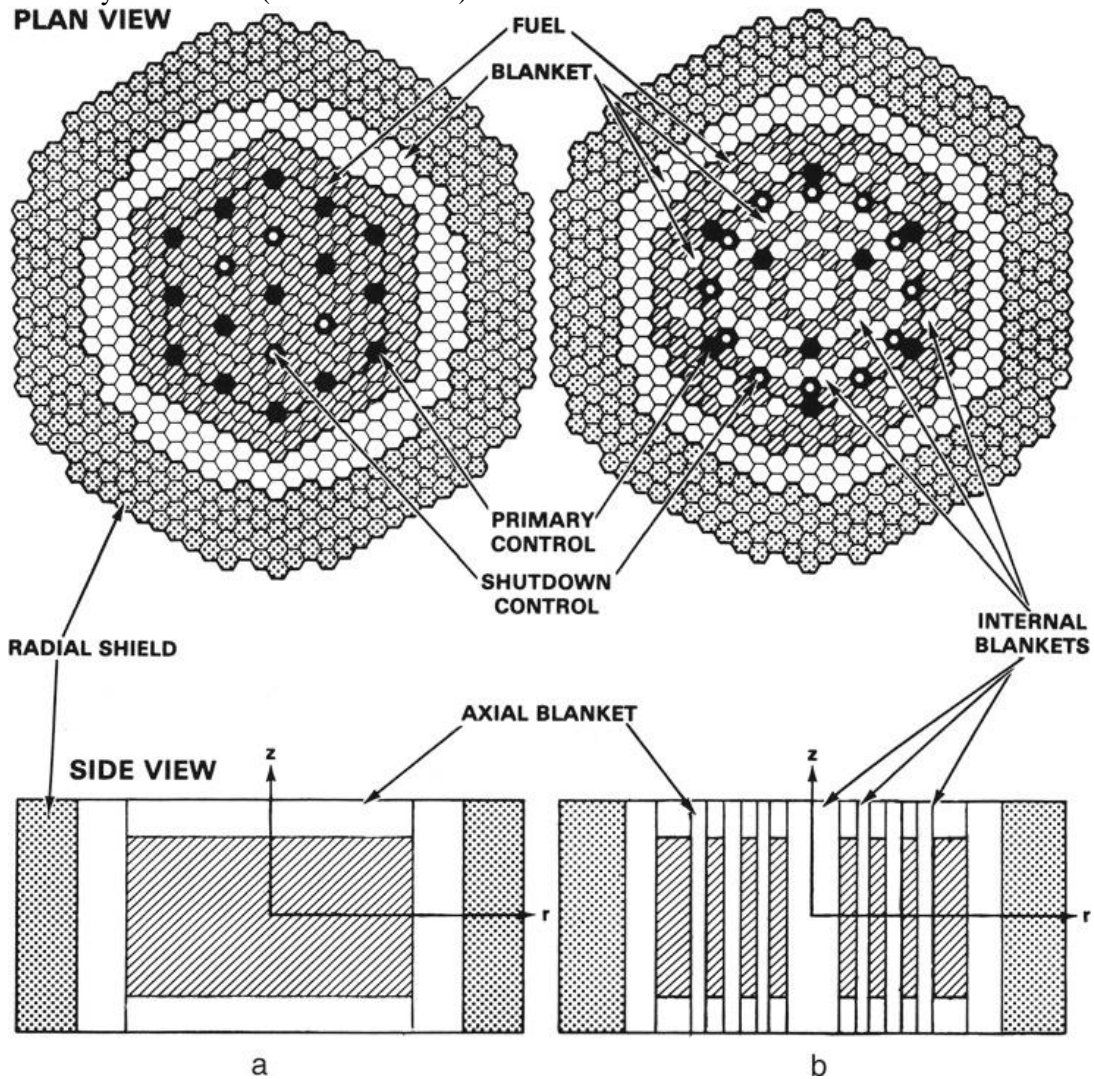
Konversioprosessi saa tarvittavat neutroninsa reaktorin keskellä sijaitsevasta fissiilin polttoaineen sydäimestä. Sydämen ympärillä on fertiilistä luonnonuraanista tai toriumista muodostuva vaippa. Sydämessä tapahtuvasta fissiosta vapautuvat neutronit sieppautuvat vaipassa, aloittaen konversion. Vaipassa muodostuvat fissiilit aineet voivat edelleen siepata neutroneja fissioitumatta, jolloin muodostuu raskaampia alkuaineita, jotka kuuluvat pieniin aktinideihin. Nopean reaktorin voimakkaassa neutronivuossa myös nämä fissioituvat ennen pitkää. Vaipassa muodostuvat ja fissioituvat aineet ylläpitävät myös ketjureaktiota. Tällä tavoin teoriassa kaikki luonnonuraani voitaisiin hyödyntää fissioenergian tuottamiseen, mutta käytännössä noin 70 % luonnonuraanista saadaan hyödyksi. (Choppin et al. 17.)

Reaktorin sydämen geometrialle on erilaisia vaihtoehtoja, joilla on omat hyvät ja huonot puolensa. Ensimmäisissä hyötöreaktoreissa käytettiin usein ulkoista hyötörakennetta (kts. kuva 3 (a)), jossa sydämen keskellä oli puhtaasti fissiilistä polttoaineesta koostuva rakenne, joka oli fertiilin vaipan ympäröimä. Tällä rakenteella saavutettiin kova neutronispektri, hyvä hyötösuhde, sekä matala fissiilin polttoaineen tarve. Rakenteen ongelmaksi todettiin reaktiivisuuden lasku palaman kasvaessa, koska sydämen keskiössä ei tapahtunut konversiota. Lisäksi rakenne vaati korkean rikastusasteen fissiilille polttoaineelle. Nykyään käytetään sisäisen hyödön mahdollistavaa rakennetta (kts. kuva 3 (b)), jossa fertiiliä polttoainetta sijoitetaan fissiilin ympärille sekä ylä- ja alapuolelle vaipoissa, jotka muodostavat homogeeniset polttoaineosiot sydämeen.

Tätä rakennetta voidaan vielä kehittää jakamalla fissiili sydän fertiileillä vaipoilla pienempiin osioihin (kts. kuva 4), jolloin sydämen polttoaineseosta voidaan pitää heterogeenisenä. Konversiosuhde kasvaa, natriumin aukkokerroin laskee, mutta fissiilin polttoaineen tarve on suurempi kuin homogeenisellä rakenteella. (Waltar et al. 25.)



Kuva 3. Nopean reaktorin sydämen rakennevaihtoehdot. (a) Ulkoinen hyötörakenne, (b) sisäinen hyötörakenne. (Waltar et al. 25.)



Kuva 4. Tyypillinen homogeeninen (a) ja heterogeeninen (b) sydänrakenne. Molemmat rakenteet mahdollistavat sisäisen hyödyn. (Waltar et al. 26.)

3 NOPEAT REAKTORIT MAAILMALLA

Tässä kappaleessa tutustutaan toimintansa aloittaneisiin reaktoreihin ja niiden käyttökokemuksiin. Reaktorien konsepteja tutkitaan lyhyesti, keskittyen erityisesti havaittuihin ongelmiin ja niiden perusteella kehitettyihin ratkaisuihin.

3.1 Yhteenvedo rakennetuista reaktoreista

Erilaisia koe- ja prototyypireaktoreita on ollut toiminnassa jo 1950-luvulta asti. Taulukkoon 1 on koottu lista toimintansa aloittaneista reaktoreista. Näistä on saatu käyttökokemusta yhteensä yli 400 vuotta.

Taulukko 1. Toimintansa aloittaneita reaktoreita eri puolilta maailmaa. (Rineiskii et al. 2006, 12-15);(Cochran et al. 2010, 2.)

| Maa | Laitos | Terminen teho [MW _{th}] | Sähköteho [MW _e] | Toiminta aloitettu | Toiminta lopetettu |
|---------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|
| Ranska | Rapsodie | 40 | 0 | 1967 | 1983 |
| | Phénix | 563 | 250 | 1973 | 2009 |
| | Superphénix | 2990 | 1240 | 1985 | 1998 |
| Intia | FBTR | 40 | 13 | 1985 | - |
| Japani | Joyo | 140 | 0 | 1977 | - |
| | Monju | 714 | 280 | 1994 | 1995 |
| Venäjä | BR-5 | 5 | 0 | 1959 | 2004 |
| | BOR-60 | 55 | 12 | 1969 | - |
| | BN-600 | 1470 | 600 | 1980 | - |
| | BN-800 | 2100 | 800 | 2014 | - |
| Kazakhstan | BN-350 | 750 | 350 | 1972 | 1999 |
| Saksa | KNK-II | 58 | 20 | 1972 | 1991 |
| Iso-Britannia | DFR | 60 | 15 | 1959 | 1977 |
| | PFR | 650 | 250 | 1974 | 1994 |
| Yhdysvallat | EBR-I | 1,4 | 0,2 | 1951 | 1963 |
| | EBR-II | 62,5 | 20 | 1963 | 1998 |
| | Fermi 1 | 200 | 61 | 1963 | 1975 |
| | SEFOR | 20 | 0 | 1969 | 1972 |
| | FFTF | 400 | 0 | 1980 | 1996 |

Suurin osa taulukossa 1 luetelluista reaktoreista on jo lopettanut toimintansa. Ainoastaan Venäjällä, Intiassa ja Japanissa on edelleen käytössä nopeita reaktoreita. Venäjän BN-800-reaktorin käyttöönottoa suunnitellaan loppuvuodelle 2014 (Russia Today 2014).

Taulukossa 1 mainitut reaktorit ovat kaikki natriumjähdytteisiä. Jäähdytteen valinnassa on huomioitava sen neutroneja hidastava vaikutus, joka riippuu lähinnä sen ytimien massasta. Neutronin törmätessä jäähdyttimeen se luovuttaa osan kineettisestä energiastaan. Jos ytimen massa on pieni, se vastaanottaa neutronilta enemmän kineettistä energiaa, jolloin neutroni hidastuu enemmän kuin törmätessään raskaampaan ytimeen. Nopeiden neutronien hyödyntämiseksi sydämen polttoainerakenteen on myös oltava hyvin tiivis, mikä edellyttää jäähdytteeltä tehokasta lämmönsiirtokykyä. Natriumin on ainakin toistaiseksi todettu olevan paras vaihtoehto toimimaan nopean reaktorin jäähdytteenä. (Cochran et al. 2010, 8.)

3.2 Natriumjähdytteeseen liittyvät ongelmat

Natriumin suurin ongelma on sen reagoitiherkkyys hapen kanssa. Ilman kanssa reagoidessaan natrium syttyy helposti tuleen, ja veden kanssa reagoidessaan se muodostaa vetyä, jonka seurauksena voi tapahtua vetyräjähdys. Sulan natriumin sisältämä lämpö siirretään tyypillisesti veteen höyrystimien avulla, joissa natriumin ja veden erottaa vain ohut metallikerros, jolloin pienikin vuoto höyrystimessä voi aiheuttaa tuhoisan tulipalon (Cochran et al. 8). Näin on käynyt useissa eri maissa, kuten esimerkiksi Kazakstanissa (silloinen Neuvostoliitto) vuonna 1973, kun BN-350-reaktorin höyrystimessä tapahtunut vuoto aiheutti tulipalon, jonka korjaustyöt kestivät neljä kuukautta. (Ibid. 65.)

Natriumpiirin ja vesi/höyrypiirin välisten vuotojen lisäksi natriumin reaktioherkkyys on ongelmana myös säilytyksen ja kuljetuksen aikana. Esimerkiksi Ranskan Rapsodie-laitoksella tapahtui onnettomuus vuonna 1994, kun reaktorirakennuksen ulkopuolella sijainneesta painesäiliöstä yritettiin puhdistaa jäännösnatriumia alkoholiliuoksen avulla. Säiliössä tapahtuneen odottamattoman kemiallisen reaktion takia säiliöön muodostui äkillisesti suuret määrät vetykaasua. Paineen nousu johti säiliön repeämiseen ja kaasujen räjähtämiseen, jonka seurauksena yksi työntekijä kuoli ja neljä loukkaantui. (Ibid. 29.)

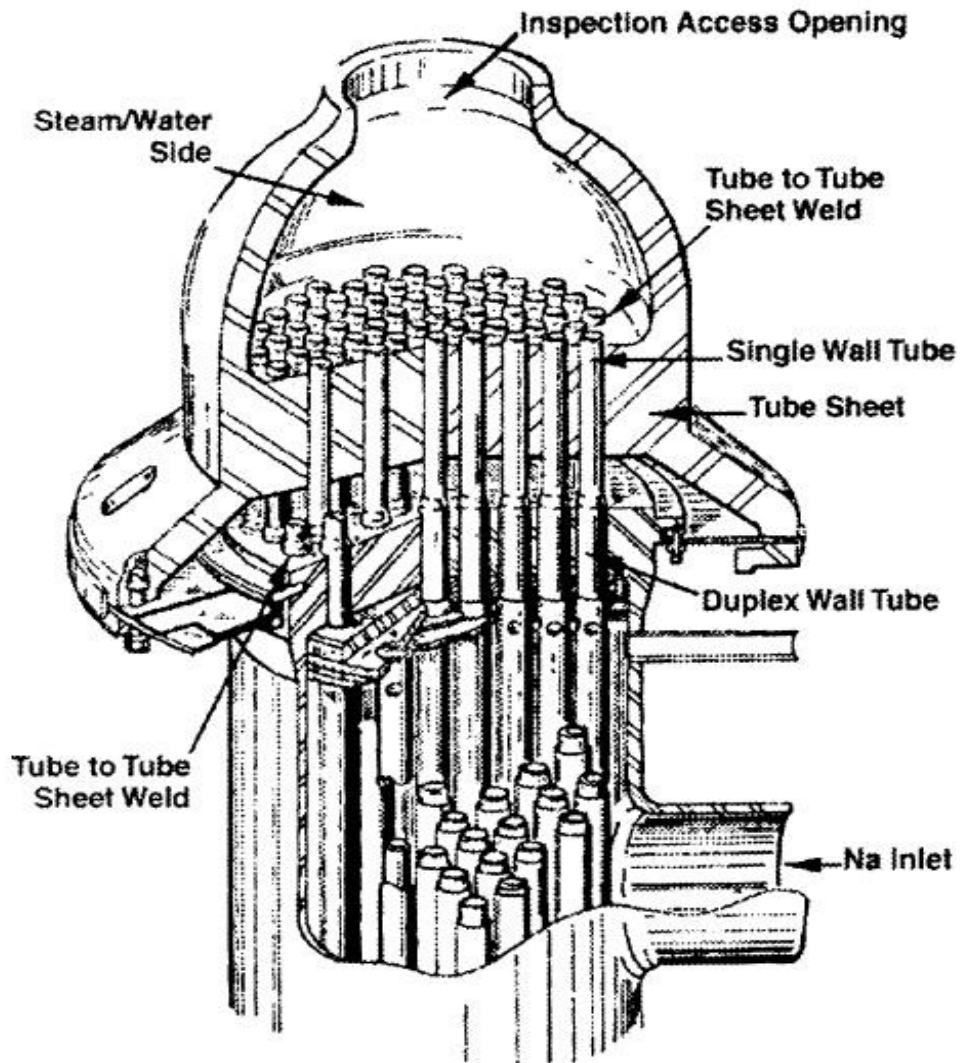
Sydämessä kiertäessään natrium (Na-23) muuttuu radioaktiiviseksi Na-24 -isotoopiksi, joka nostaa säteilytasoja primääripiirissä. Na-24 :n puoliintumisaika on noin 15 tuntia, ja se vapauttaa hajotessaan β - ja γ -säteilyä, muuntuen stabiiliksi magnesiumiksi (Mg-24)

(IAEA 2014). Jäähdytteen aktivoituminen on kuitenkin väistämätön ongelma kaikissa ydinvoimalaitostyypeissä, eikä sen eteen voi tehdä paljon muuta kuin eristää primääripiiri laitoksella säteilysuojien taakse ja huomioida puoliintumisaika primääripiirin huoltotöitä suunniteltaessa.

Reaktiivisuuden hallinta on myös hankalampaa nopeassa reaktorissa kuin termisessä, sillä viivästyneitä neutroneja ei voida hyödyntää samassa mittakaavassa. Viivästyneet neutronit syntyvät pienemmillä energiatasoilla kuin nopeat, jolloin ne todennäköisemmin absorboituvat kuin aiheuttavat fission nopeassa reaktorissa. Natriumin lämpötilan äkillinen kasvu johtaa sen tiheyden vähenemiseen, ja pahimmassa tapauksessa kiehumiseen. Lämpötilan kasvu voi johtua esimerkiksi sekundääripiirin lämmönsiirtokyvyn heikkenemisestä, jolloin primääripiirin jäähdytysteho laskee. Vähentynyt jäähdytteen tiheys polttoainesauvojen välissä johtaa heikompaan neutronien hidastumiseen, joka puolestaan johtaa fissioissa vapautuvien neutronien määrän kasvuun, jolloin reaktiivisuus kasvaa. Toisaalta samalla jäähdytteen heijastusominaisuudet heikkenevät, jolloin enemmän neutroneja pääsee karkaamaan sydäimestä. Tämä puolestaan aiheuttaa reaktiivisuuden alenemista. Käytännössä reaktiivisuuden kasvua havaitaan sydämen keskiosissa ja alenemista reunoilla, mistä neutroneja pääsee karkaamaan sydämen ulkopuolelle. Natriumin kiehumisen vaikutusta reaktiivisuuteen kutsutaan natriumin aukkokertoimeksi, ja sen huomioiminen reaktorisydämen suunnittelussa on tärkeää. (Sumner & Ghiaasiaan 2011, 1560);(Waltar et al. 125.)

3.3 Toimivat ratkaisut

Vaarallisin natriumvuotojen alue on natrium- ja vesi-/höyrypiirien kosketuskohdissa, eli höyrystimissä. Varmistamalla tehokas natriumpiirin eristys vesi-/höyrypiiristä vältetään turhat vaaratilanteet ja ylimääräiset huoltoseisokit. Yhdysvaltojen EBR-II-reaktori toimi onnistuneesti 30 vuoden ajan ilman merkittäviä natriumvuotoja. Laitoksella oli kahdeksan höyrystimä (kts. kuva 5), joiden perään oli kytketty kaksi tulistinta. Höyrystimet ja tulistimet valmistettiin 2-1/4Cr-1Mo-teräksestä. (Walters 1998, 5-6.)

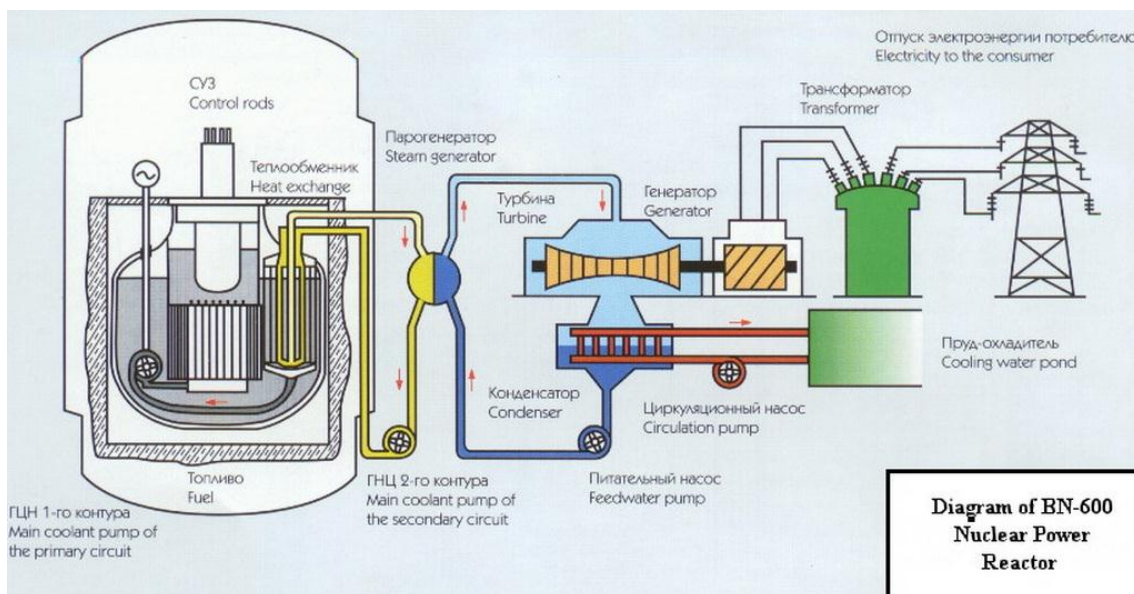


Kuva 5. EBR-II-laitoksen höyrystin. Huomaa duplex-tekniikka natrium- ja vesipiirien erottamiseksi. (Walters, 5.)

Kuvan 5 mukaisessa höyrystimessä vesi-/höyryseos virtaa höyrystinputkien sisällä ja natrium virtaa vastavirtaan putkien ulkopuolella. Vettä sisältävät putket ovat kaksikerroksisia ja ulompi putki hitsataan kiinni putkivaippaan. Vaipan yläpuolella on tyhjä tila, joka erottaa vesi-/höyrypuolen natriumista. Täten jos vettä tai höyryä pääsee vuotamaan ulomman putken sisälle, se kulkeutuu natrium- ja vesi-/höyrypiirien väliseen tyhjään tilaan, eikä pääse reagoimaan natriumin kanssa. Samalla tavalla natrium kulkeutuisi välitilaan, jos vuoto tapahtuisi natriumpiirin puolelta. (Ibid.)

Laitokselta poistettiin 17 käyttövuoden jälkeen molemmat tulistimet käytöstä. Tulistimet avattiin ja niitä tutkimalla todettiin, että natriumpuoli oli pysynyt lähes tuliterässä kunnossa. Vesi-/höyrypuolella sen sijaan esiintyi odotettavissa olevia kerrostumia ja korroosiota. (Ibid.)

Myös Venäjällä sijaitseva, edelleen käytössä oleva BN-600-reaktori on toiminut luotettavasti yli 30 vuotta. Laitoksella on erillinen natriumilla täytetty sekundääripiiri, joka toimii lämmön välittäjänä primääripiirin natriumkierron ja tertiääripiirin vesi-/höyrykierron välillä (kts. kuva 6). Tällä vältetään mahdolliset vakavampaan onnettomuuteen johtavat vesivuodot primääripiiriin. Primääripiiri sijaitsee kokonaan reaktorialtaassa, jossa primääripiirin natriumia kierrätetään sekundääripiirin lämmönvaihtimeen. Sekundääri- ja tertiääripiirien välillä on kahdeksaan osioon jaetut höyrystimet, joiden jokainen osio voidaan eristää muista piireistä venttiilien avulla. Laitoksella on sen käytön aikana sattunut 12 vuototapausta, missä natrium on päässyt sekoittumaan veden tai höyryn kanssa. Kaikki vuodot on kuitenkin saatu tukahdutettua ilman, että ne ovat johtaneet onnettomuustilanteisiin. Viimeisin vuoto oli vuonna 1991, jonka jälkeen höyrystimet ovat toimineet yli 20 vuotta ilman vuotoja. (Aoto et al. 2014, 6.)



Kuva 6. BN-600-laitoksen toiminnan yleiskatsaus. (IPPE 2014.)

Natriumin aukkokertoimen aiheuttamia reaktiivisuuden muutoksia voidaan rajoittaa sydämen geometrian avulla. Useat rakenteelliset muutokset ovat keskittyneet neutronien vuodon lisäämiseen kiehumistapauksessa. Heterogeenisella sydämen geometrialla voidaan tasata sydäimestä fertiiliin vaippaan vuotavien neutronien määrää sijoittamalla fertiilejä vaippoja myös sydämen keskiosiin. (Waltar et al. 128.)

3.4 Natriumin vaihtoehdot

Natriumin lisäksi nopean reaktorin jäähdytteeksi on harkittu mm. lyijyä, lyijy-vismuttiseosta, hiilidioksidia tai heliumia. Kaikilla vaihtoehdoilla on omat hyvät ja huonot puolensa (kts. taulukko 2), mutta tähän asti natrium on vienyt muista jäähdytteistä voiton. Teknologian kehittyessä muiden jäähdytevaihtoehtojen käyttöönotosta voi tosin tulla taas ajankohtaista. (Sakamoto et al. 2013, 196.)

Taulukko 2. Nopean reaktorin jäähdytevaihtoehtojen aineominaisuuksia. Vertailun vuoksi myös veden aineominaisuudet painevesireaktorin olosuhteissa. (Sakamoto et al. 196);(Waltar et al. 35);(Engineering toolbox 2014);(Wishnewski 2014);(Petersen 1970, 29.)

Jäähdytteiden ominaisuuksia

| | Natrium | Lyijy | Lyijy-vismutti | Hiilidioksidi | Helium | Vesi ^c |
|--|-------------------|---|---|---|-------------------|-------------------|
| Käyttöfaasi | Neste | Neste | Neste | Kaasu | Kaasu | Neste |
| Käyttöpaine p [bar] | 1 | 1 | 1 | 80 | 80 | 150 |
| Lämmönjohtavuus k [W/mK] | 6,40 ^a | 15,5 ^a | 14,0 ^a | 0,07 | 0,15 | 0,56 |
| Ominaislämpökapasiteetti c_p [J/kgK] | 1270 | 145 | 146 | 1200 ^b | 5200 ^b | 6860 |
| Tiheys ρ [kg/m ³] | 825 ^a | 10415 ^a | 10020 ^a | 26 ^b | 2,6 ^b | 714 |
| Sulamispiste [°C] | 98 | 327 | 125 | -55,6 | -272 | 0 |
| Kiehumispiste [°C] | 883 | 1737 | 1670 | 7 ^b | 268 ^b | 342 |
| Lämmön kuljetuskyky $\rho \cdot c_p$ [kJ/m ³ K] | 1048 | 1510 | 1463 | 31 ^b | 14 ^b | 4898 |
| Yhteensopivuus rakenteiden materiaalin kanssa | Hyvä | Aiheuttaa korroosiota korkeissa lämpötiloissa | Aiheuttaa korroosiota korkeissa lämpötiloissa | Aiheuttaa korroosiota korkeissa lämpötiloissa | Hyvä | Hyvä |
| Kemiallinen reaktiivisuus veden ja ilman kanssa | Voimakas reaktio | Matala | Matala | Matala | Matala | Matala |
| Optinen läpinäkyvyys | Läpinäkymätön | Läpinäkymätön | Läpinäkymätön | Läpinäkyvä | Läpinäkyvä | Läpinäkyvä |

^a Lämpötilassa 530°C ^c Painevesireaktorissa

^b Reaktorin käyttöolosuhteissa

Lyijy ja sen seokset eivät reagoi yhtä herkästi veden ja ilman kanssa kuin natrium. Tämä mahdollistaisi höyrystimien sijoittamisen suoraan reaktoripainesäiliöön, joka parantaisi järjestelmän hyötysuhdetta. Ongelmana on se, että lyijy aiheuttaa korroosiota

putkistossa ja reaktorikomponenteissa. Lyijy-vismuttiseos ei aiheuta yhtä voimakasta korroosiota, mutta sen käytön seurauksena reaktorissa syntyisi myös poloniumia. (Sakamoto et al. 209.)

Hiilidioksidi olisi läpinäkyvyytensä kannalta hyvä vaihtoehto jäähdytteeksi. Kaasumainen jäähdyte ei myöskään voi kiehua, joten aiemmin mainitusta aukkokertoimesta ei ole haittaa. Hiilidioksidi tosin aiheuttaa myös korroosiota korkeissa lämpötiloissa, ja sen lämmönsiirtokyky on huomattavasti heikompi kuin sulametallijäähdytteillä. Lämmönsiirron turvaamiseksi hiilidioksidijäähdytys vaatisi paineistetun primääripiirin, ja mahdolliset primääripiirin vuodot johtaisivat helposti lämmönsiirtokriisiin. (Ibid. 200.)

Helium ei aiheuta korroosiota, mutta se vaatisi hiilidioksidin tavoin paineistetun järjestelmän tarpeellisen lämmönsiirtotehon saavuttamiseksi. Molemmat kaasujäähdytteiset järjestelmät vaatisivat turvakseen mittavat hätäjäähdytysjärjestelmät primääripiirin vuotoja varten sekä varavoiman tuotantolaitokset sähkökatkojen varalta. Sulametallijäähdytteiset järjestelmät sen sijaan tomivat lähes normaali-ilmanpaineessa. (Ibid.)

Natriumin käytöstä aiheutuvat ongelmat ovat ehkäistävissä suunnittelemalla putkistot ja varsinkin höyrystimet natriumin kemialliset ominaisuudet huomioon ottaen. Valitsemalla natriumpiirin putkiston materiaali siten, että se kestää natriumin korkean lämpötilan ja kemialliset vaikutukset, voidaan estää natriumin pääsy kosketuksiin ilman ja veden kanssa. Höyrystimiä suunniteltaessa täytyy lisäksi huomioida vesi-/höyrypuolen aiheuttamat rasitukset ja korroosion vaikutukset putkimateriaaliin. Lisäämällä turvajärjestelyjä voidaan edelleen vähentää mahdollisen vuototapauksen haittoja. Esimerkiksi voidaan käyttää EBR-II-reaktorin höyrystimien kaksikerroksisia duplex-putkia tai BN-600-reaktorin modulaarisia höyrystimiä. Aktiivisen primääripiirin eristäminen reaktoritankkiin poistaa suurten, aktiivisten natriumtäytteisten putkilinjojen tuomat säteilysuojelliset haasteet. Samalla ei-aktiivinen sekundääripiiri estää fissiotuotteiden ja muun kontaminaation kulkeutumista vesi-/höyryjärjestelmään ja turbiinille. Reaktiivisuuteen vaikuttavat tekijät voidaan huomioida reaktorin sydämen suunnittelussa.

4 POLTTOAINEKIERTO

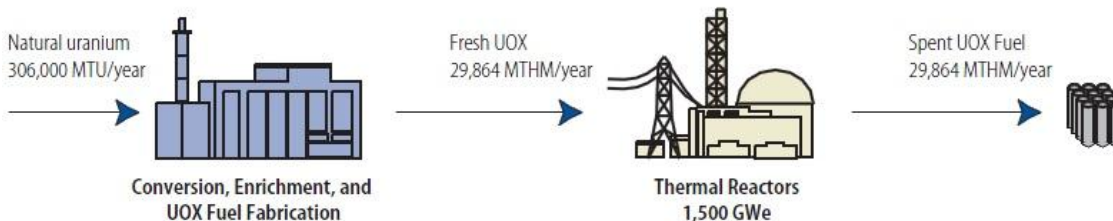
Nykyiset kevytvesireaktorit hyödyntävät vain murto-osan uraanin sisältämästä energiasta. Luonnossa esiintyvistä uraanista vain 0,7 % on fissiiliä U-235-isotooppia. Tällä hetkellä louhitun luonnonuraanin U-235-pitoisuutta lisätään rikastamalla noin 3-5 %:iin, jotta kevytvesireaktori pystyy hyödyntämään sitä polttoaineena. Kevytvesireaktorissa noin kaksi kolmasosaa energiasta tuotetaan U-235:n fissioilla, ja noin kolmasosa reaktorissa syntyvän plutoniumin fissioilla. Suurin osa polttoaineesta ei kuitenkaan fissioidu, ja siirtyy käytetyn polttoainesauvan mukana ydinjätteen loppusijoitukseen. Kevytvesireaktorin polttoainekierron aikana, louhinnasta loppusijoitukseen, uraanin potentiaalisesta energiasta hyödynnetään alle 1 %. (Sakamoto et al. 2.)

Nopea reaktori pystyy hyödyntämään luonnonuraanin lisäksi kevytvesireaktorien uudelleenkäsiteltyä käytettyä polttoainetta, sekä ydinreaktioissa syntyviä plutoniumin isotooppeja ja muita raskaita alkuaineita. Fertiilin vaipan valmistuksessa voidaan käyttää myös uraanin rikastusprosessin sivutuotteena syntyvää köyhdytettyä urania. Tämä johtuu siitä, että nopean spektrin neutronit aiheuttavat fissioita kyseisissä alkuaineissa huomattavasti helpommin kuin termisen spektrin neutronit. Uraanista saadaan tällä tavoin jopa 50-100 kertaa enemmän energiaa kuin termisellä reaktorilla. Lisäksi voidaan vähentää kevytvesireaktorien käytetyn polttoaineen loppusijoituksen aiheuttamia kustannuksia. Nopean reaktorin käytetty polttoaine on myös huomattavasti lyhytikäisempää kuin kevytvesireaktorin, sillä nopeassa reaktorissa voidaan halkaista ongelmallisia, pitkän puoliintumisajan omaavia synteettisiä aktinideja, kuten amerikumia. Nopeiden hyötöreaktorien avulla voidaan myös tuottaa fissiiliä materiaalia kevytvesireaktorien käyttöön, mikä on tärkeää ydinvoiman kestävyden kannalta. Maailman energiantarpeen kasvaessa luonnonuraanin saatavuudesta tulisi väistämättä ongelma, jos siitä hyödynnettäisiin jatkossakin yhtä tehottomasti kuin nykypäivän kevytvesireaktoreissa. (Ibid.)

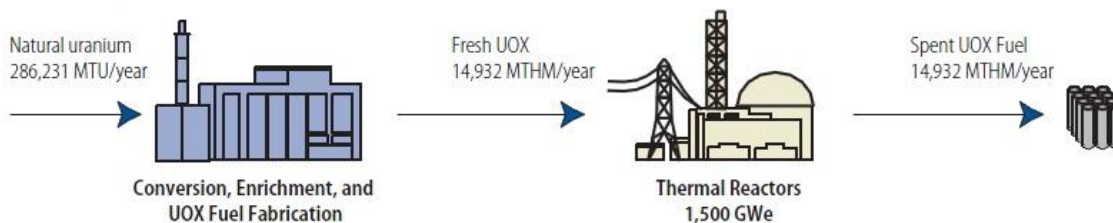
4.1 Avoin polttoainekierto ja jälleenkäsittely

Nykyiset, toisen ja kolmannen sukupolven kevytvesireaktorit käyttävät avointa polttoainekiertoa (kts. kuva 7). Avoinessa polttoainekierrossa reaktorista poistuvaa polttoainetta kohdellaan jätteenä, jolloin se päättyy loppusijoitukseen. Avointeen polttoainekiertoon voidaan lisätä polttoaineen jälleenkäsittelylaitos (kts. kuva 8), jolla loppusijoitukseen menevästä jätteestä saadaan otettua talteen reaktorissa syntynyt plutonium sekä jäljelle jäänyt U-235, joista voidaan valmistaa uutta polttoainetta. Jälleenkäsittelyllä varustettu polttoainekierto kuluttaa jopa 30 % vähemmän luonnonuraania polttoaineen valmistukseen kuin täysin avoin polttoainekierto. Nykyään suosittu jälleenkäsittelymenetelmä on niin kutsuttu PUREX-prosessi. (World Nuclear Association 2014a.)

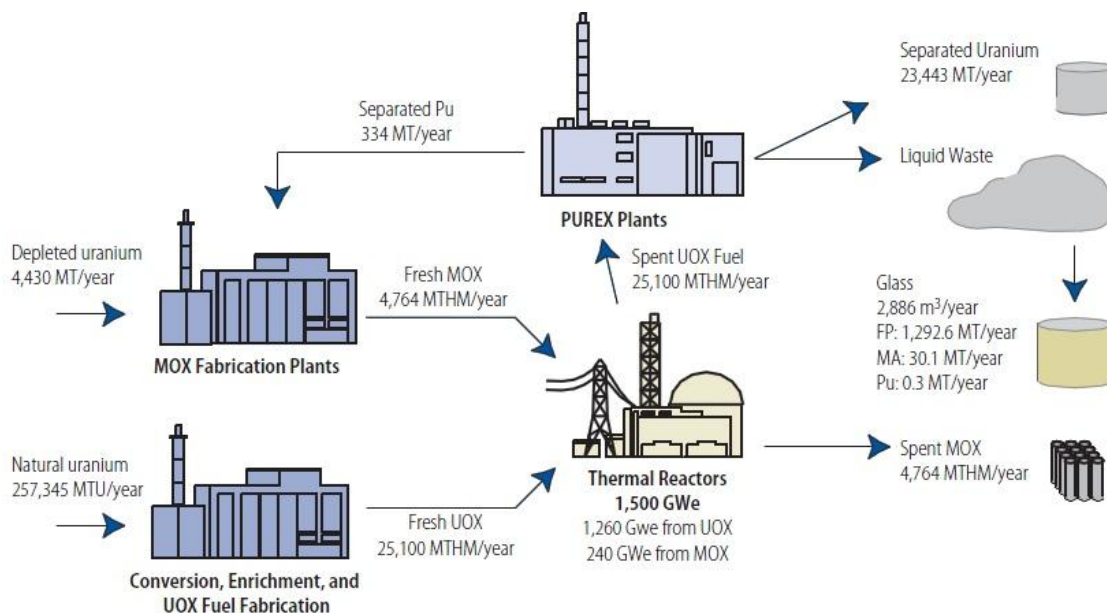
Current Burnup: 50 GWD/MTIHM:



High Burnup: 100 GWD/MTIHM:



Kuva 7. Avoin polttoainekierto (Ansolabhere et al. 2003, 40).



Kuva 8. Jälleenkäsittelylaitoksella varustettu avoin polttoainekierto (Ansolabhere et al. 40).

PUREX-prosessissa polttoaine-elementit liuotetaan ensin kuumaan typpihappoon. Seuraavaksi uraani ja plutonium erotetaan muista fissiotuotteista ja pienistä aktinideistä kerosiiniin liuotetun tributyylifosfaatin avulla. Uraani ja plutonium siirretään syntyvän orgaanisen liuoksen mukana eri säiliöön, kun taas muut fissiotuotteet ja aktinidit pysyvät nestemäisessä liuoksessa. Tämän jälkeen uraani erotetaan plutoniumista pelkistämällä. Uraani voidaan nyt erottaa orgaanisesta liuoksesta laimean typpihapon avulla. Uraani- ja plutoniumnitraatit tiivistetään haihduttamalla, jonka jälkeen niistä valmistetaan UO_2 - ja PuO_2 -jauhetta. Erotettuja uraani- ja plutoniumoksidgeja voidaan hyödyntää tuoreen polttoaineen valmistuksessa. (World Nuclear Association 2014a.)

Käytännössä polttoaineen jälleenkäsittelyprosessi vaatii mittavan infrastruktuurin. Käytetyt kemialliset prosessit ovat monimutkaisia, ja asettavat haasteita prosessiteknikalle. Käytetyn polttoaineen sisältämät pienet aktinidit sekä uraanin isotooppi U-232 ovat lisäksi hyvin vahvoja gammasäteilyn lähteitä. Työntekijöiden altistuksen minimoimiseksi prosessien pitää olla automatisoituja aina kun mahdollista. Jos johonkin vaiheeseen tarvitaan henkilökuntaa radioaktiivisten aineiden tai säteilevien prosessin osien lähelle, on myös huolehdittava riittävästä säteilysuojellisuudesta toimenpiteistä, kuten säteilysuojien rakentamisesta työpisteen läheisyyteen. Koska jälleenkäsittelylaitoksella erotellaan plutoniumia, joudutaan myös huomiomaan

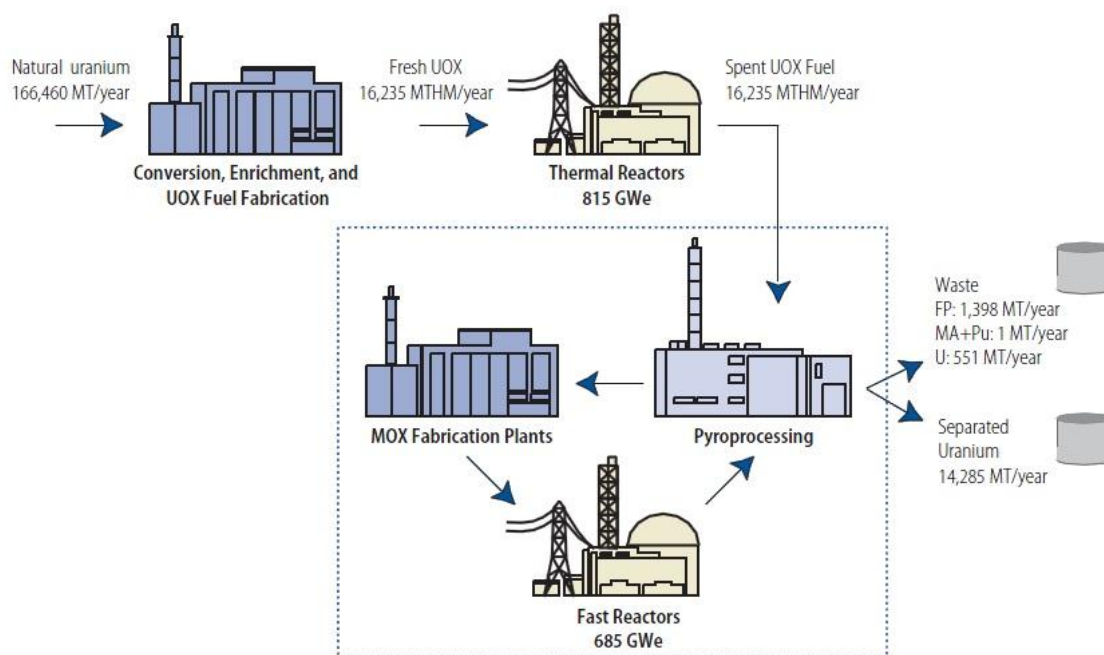
ydinaseiden leviämisen esto (non-proliferaatio). Laitoksella on oltava tehokas ja vakuuttava turvallisuuspalvelu, sekä käsiteltävän materiaalin seurantajärjestelmä, joilla varmistetaan ettei ydinpommin tai likaisen pommin rakentamisessa hyödyllistä materiaalia pääse katoamaan laitokselta. Kokonaisuudessaan jälleenkäsittelylaitos ja sen apurakennukset sekä niihin liittyvä infrastruktuuri on mittava ja kallis rakennusprojekti (kts. kuva 9). Tästä syystä jälleenkäsittelylaitoksia on rakennettu lähinnä niihin maihin, joissa käytetään paljon ydinvoimaa, kuten Ranskaan, Isoon-Britanniaan, Venäjälle ja Japaniin. (Ibid.)



Kuva 9. Sellafieldin jälleenkäsittelylaitos Iso-Britanniassa (World Nuclear Association 2014).

4.2 Suljettu polttoainekierto

Suljetussa polttoainekierrossa (kts. kuva 10) kevytvesireaktorien rinnalla käytetään nopeita reaktoreja, joiden tehtävänä on polttaa kevytvesireaktoreissa syntyvät fissiotuotteet, pienet aktinidit. Nopeiden reaktorien polttoaine jälleenkäsitellään tarpeen mukaan. Vaihtoehtoisesti polttoainekierrossa voidaan käyttää myös hyötöreaktoreja, joiden tuottama ylimääräinen plutonium voidaan käyttää kevytvesireaktorien polttoaineen valmistuksessa. Suljetulla polttoainekierrolla saadaan lisättyä energiantuotantokapasiteettia sen lisäksi että vähennetään loppusijoitukseen menevän ydinjätteen määrää ja aktiivisuutta. (Ansolabhere et al. 43.)



Kuva 10. Suljettu polttoainekierto. (Ansolabhere et al. 41.)

Suljetun polttoainekierron hyvistä puolista huolimatta sitä ei tällä hetkellä koeta taloudellisesti kannattavaksi. Aiemmin mainitut jälleenkäsittelylaitokset sekä polttoaineen valmistuslaitokset ovat kalliita rakentaa ja ylläpitää. Lisäksi tulee huomioida käytetyn polttoaineen ja jälleenkäsiteltujen aineiden kuljetukset eri laitosten välillä. Kuljetuksien aikana on myös huolehdittava tarpeellisesta säteilysuojelusta ja

materiaalin katoamisen estämisestä, sillä kuljetuksen aikana ydinasemateriaalin varastaminen on helpompaa kuin jälleenkäsittelylaitokselta. Uraanin hinta tulee olemaan merkittävin tekijä suljetun polttoainekierron tulevaisuuden kannalta. Maailman uraanivarat ovat vielä niin suuret, että avoimen polttoainekierron käyttö tulee suljettua halvemmaksi, vaikka uraanin potentiaalista hyödynnetään siinä vain murto-osa. Suljettua polttoainekiertoa kannattaa suunnitella ensimmäiseksi niihin maihin, joissa on paljon ydinvoimaa jo käytössä, sekä joilla on ennestään omat polttoaineen valmistus- ja jälleenkäsittelylaitokset. Nämä maat ovat myös jälleenkäsittelynsä myötä kerrytäneet plutoniumvarastojaan, joita voidaan hyödyntää nopeiden reaktorien polttoaineen valmistuksessa. Suljetun polttoainekierron pioneerimaita voisivat olla esimerkiksi Yhdysvallat, Venäjä, Intia, Iso-Britannia ja Ranska.

4.3 Toriumkierto

Eräs intialainen tutkimus (Gangotra et al. 2013) esittää toriumiin perustuvan suljetun polttoainekierron käyttöä tulevaisuudessa Intian ydinenergiaohjelman osana. Perusteluina ovat mm. Intian suuret toriumvarannot sekä toriumin hyvät puolet uraaniin verrattuna, kuten paremmat termofysikaaliset ominaisuudet, pienemmät plutoniumin ja pienien aktinidien tuotannot fissiossa sekä proliferaation vastustuskyky. Kyseisessä polttoainekierrossa toriumia polttavat reaktorit olisivat kehittyneitä raskasvesireaktoreita, kun taas nopeiden reaktorien tehtävänä olisi toimia lähinnä polttoainetutkimuksessa neutronisäteilytystä tutkittaessa, sekä plutoniumin poltto- ja valmistusreaktoreina. Polttoainekierrolle on ehdotettu kahta eri vaihtoehtoa. Ensimmäisessä mallissa käytetään pientä polttoaineen valmistus- ja jälleenkäsittelylaitosta jokaiselle reaktoripuistolle, joita on eri puolilla maata. Toisen vaihtoehdon mukaan käytettäisiin suurta, keskeistä polttoainekompleksia, joka toimisi koko maan reaktorien yhteisenä polttoaineen valmistus- ja jälleenkäsittelylaitoksena. Käytännössä ensimmäinen vaihtoehto kuvaa tarkemmin täysin suljettua ja itsenäistä polttoainekiertoa, kun jokaisella reaktoripuistolla on mahdollisuus itse tuottaa polttoaineensa, jälleenkäsittää ydinjätteensä ja suorittaa polttoainekiertoon liittyvää tutkimusta. (Ibid. 536.)

5 VERTAILU KEVYTVESIREAKTORIIN

Tässä kappaleessa tarkastellaan nopean reaktorin ja kevytvesireaktorin eroja ja yhtäläisyyksiä. Keskeisimmät tarkastelukohteet ovat polttoainetalous, jätehuolto, onnettomuuksien hallinta sekä ydinturvallisuus.

5.1 Polttoainetalous ja jätehuolto

Nopea reaktori pystyy hyödyntämään kevytvesireaktoria suuremman osuuden luonnonuraanin energiasisällöstä, korkeamman konversiosuhteensa avulla. Toisaalta nopea reaktori vaatii väkevemmän fissiilin polttoaineen osuuden. Vuonna 2013 tehdyssä arviossa maailman uraanivarat olisivat 5 902 500 tonnia (World Nuclear Association 2014b). Avointa polttoainekiertoa käyttävä kevytvesireaktori pystyy hyödyntämään tehokkaasti tästä määrästä noin 1 %, eli 59 025 tonnia. Loput uraanista menisi käytännössä hukkaan, ydinjätteenä tai rikastusprosessin kautta köyhdyttynä uraanina. Nopea reaktori pystyy hyödyntämään tehokkaasti jopa 60 % uraanivaroista, eli 3 541 500 tonnia. Uraanin lisäksi nopean reaktorin fissiilisen polttoaineen valmistuksessa voidaan käyttää myös plutoniumia, jota on kertynyt vuoteen 2012 mennessä noin 495 tonnia kevytvesireaktoriin polttoaineen jälleenkäsittelystä sekä ydinaseplutoniumin tuotantoreaktoreista (Feiveson et al. 2013, 18). Nopean reaktorin palama on huomattavasti suurempi kuin kevytvesireaktorilla. Tämä johtuu nopean reaktorin vaatimasta korkeammasta rikastusasteesta. Tyypillisen kevytvesireaktorin palama on luokkaa 45-55 MWd/kg, kun taas nopean reaktorin palama on usein 100 MWd/kg tai korkeampi (Waltar et al. 34-35). (Kyrki-Rajamäki 2014a, 21-26.)

Kuvassa 10 on esimerkki termisen ja nopean reaktorin ydinjätteen tuotannosta. Tässä tapauksessa kevytvesireaktoreita on yhteensä 815 GW_e, sekä nopeita reaktoreita 685 GW_e. Tuotetut ydinjättemäärät ovat tästä syystä huomattavat, kevytvesireaktorit tuottavat yhteensä 16 235 tonnia jätettä vuodessa. Jos kokoluokkaa pienennetään ja oletetaan jättemäärän laskevan lineaarisesti sähkötehon myötä, voidaan arvioida 400 MW_e kevytvesireaktorin vuosittaisen jätetuotannon olevan noin 8 tonnia. Vastaavan kokoisen nopean reaktorin jätetuotanto olisi vain noin 1 tonni vuodessa. Kyseinen skenaario perustuu Yhdysvaltojen Massachusettsin teknillisen instituutin tutkimukseen (Ansolabhere et al.), joten se eroaa huomattavasti esimerkiksi Loviisan voimalaitoksista

vuosittain tuotetusta käytetystä polttoaineesta, joka on arvioitu olevan noin 40 tonnia vuodessa. (Fortum 2008, 163). Tutkimuksen avulla voidaan kuitenkin hyvin vertailla jätteen tuotannon suhdetta reaktorityyppien ja polttoainekiertojen välillä. Avoimella polttoainekierrolla voidaan olettaa kevytvesireaktorin käytetyn polttoaineen menevän suoraan loppusijoitukseen. Nopean reaktorin käytetty polttoaine puolestaan jälleenkäsitellään ja sitä käytetään uudestaan saman reaktorin tuoreena polttoaineena. Jälleenkäsittelyprosessissa poistetaan käyttökelttomat aineet, jotka päätyvät ydinjätteeksi. Prosessista jäisi yli myös jätteestä erotettua uraania, jonka U-235-pitoisuus on alhainen. Tätä uraania voidaan hyödyntää uuden polttoaineen valmistuksessa, mutta sitä kuluisi luonnonuraania suurempia määriä toivotun rikastusasteen saavuttamiseen. Polttoainetalouden sekä jätetuotannon vertailulukuja on esitetty taulukossa 3. (Ansolabhere et al. 40-41.)

Taulukko 3. Kevytvesireaktorin (LWR) ja nopean reaktorin (SFR) polttoainetalouden ja jätteen tuotannon vertailu. Jätteeseen luetaan tässä tapauksessa vain korkea-aktiivinen jäte, käytetty polttoaine. (Kyrki-Rajamäki 2014a, 26);(World Nuclear Association 2014b);(Ansolabhere et al. 40-41.)

| | LWR | SFR |
|---|----------------|----------------------------------|
| Konversiosuhde | 0,5 - 0,65 | Sydän: 0,8 Koko reaktori: 1,2 |
| Väkevyys [%] | 3,5 | 15 |
| Hyödynnettävissä olevat uraanivarat [t] | 59 025 | 3 541 500 |
| Palama [MWd/kg] | 45 - 55 | > 100 |
| Jätteen tuotanto [t/a] | 8 ^a | 1,1 ^b |

^a Avoin polttoainekierto

^b Suljettu polttoainekierto

5.2 Säteilyturvallisuus ja onnettomuudet

Säteilyturvallisuuden tavoitteiden kannalta toiminta nopean reaktorin laitoksella ja kevytvesireaktorilaitoksella on hyvin samankaltaista. Säteilyturvallisuuden perustavoitteet ovat:

- 1) Kansanterveyden turvaaminen radioaktiivisilta päästöiltä pitämällä päästöt sallittujen rajojen alapuolella.
- 2) Laitosten työntekijöiden terveyden ja turvallisuuden ylläpito tarjoamalla turvallinen työympäristö ja seuraamalla työturvallisuussäädöksiä.
- 3) Laitosten rakentaminen, käyttäminen ja purkaminen siten, että ympäristön laatu ei kärsi. (Waltar et al. 415.)

Käytön aikana tämä ei ole erityisen ongelmallista, mutta erilaiset onnettomuustilanteet on myös huomioitava ja säteilyturvallisuuden tavoitteita on noudatettava mahdollisimman hyvin myös onnettomuuden sattuessa.

Kevytvesireaktorin ja nopean reaktorin onnettomuudet voidaan luokitella taulukon 4 mukaisella asteikolla. Asteikon on laatinut Yhdysvaltojen ydinvoimaa säännöstelevä komissio, NRC.

Taulukko 4. Kevytvesireaktorin (LWR) ja nopean reaktorin (SFR) onnettomuustilanteiden vertailua (Waltar et al. 418).

| Kuvaus | LWR esimerkki | SFR esimerkki |
|--|--|--|
| 1) Vähäpätöinen tapahtuma | Pienet vuodot suojarakennuksen ulkopuolella. | Pienet natriumvuodot. |
| 2) Pienet vuodot | Putkirikkoon liittyvät vuodot. | Sekundääripiirin venttiilien tai tiivisteiden vuodot, turbiinin trippi. |
| 3) Ydinjätejärjestelmän vikatilanne | Laiteviat: jätesäiliön sisällön vuotaminen. | Argonjärjestelmän venttiilivuodot, paisuntasäiliön toimintahäiriö. |
| 4) Radioaktiivisten aineiden vapautuminen primääripiiriin | Käytön aikaiset polttoainevuodot. | Käytön aikaiset polttoainevuodot. |
| 5) Radioaktiivisten aineiden vapautuminen sekundääripiiriin | Luokka 4 + lämmönvaihdin/höyrystinvuoto. | Luokka 4 + lämmönvaihdinvuoto. |
| 6) Polttoaineen latauksen aikaiset onnettomuudet suojarakennuksen sisäpuolella | Polttoaine-elementin putoaminen, raskaan esineen putoaminen polttoaineen päälle, siirtolaitteen mekaaninen vika tai elementin jäähdytyksen vikaantuminen | Polttoaine-elementin putoaminen, lattiaventtiilin tahaton aukeaminen, polttoaineensiirtokammion vuoto. |
| 7) Käytetyn polttoaineen vahingot suojarakennuksen ulkopuolella | Polttoaine-elementin putoaminen, raskaan esineen putoaminen polttoaineen päälle, kuljetusastian putoaminen, kuljetusastian jäähdytyksen pettäminen. | Kuljetusastian putoaminen, astian vuodot, astian jäähdytyksen pettäminen. |
| 8) Turvallisuusselvityksessä ja suunnittelussa huomioitujen onnettomuuteen johtavat tapahtumat | Reaktiivisuuden äkillinen ja odottamaton muutos: putkirikko primääripiirissä, virtauksen väheneminen. Höyrylinjan putkirikko. | Höyrystinvuodot. Natrium-vesireaktio, primääripiirin putkirikko. Pumpun pettäminen tai reaktiivisuuden äkillinen muutos. |
| 9) Hypoteettiset järjestelmien vikaantumiset, jotka ovat luokkaa 8 vakavampia | Useiden, normaalisti huollettujen ja toimivien turvajärjestelmien peräkkäiset vikaantumiset. | Useiden, normaalisti huollettujen ja toimivien turvajärjestelmien peräkkäiset vikaantumiset. |

Onnettomuusluokittelussa luokat 1-3 ovat pääasiassa pieniä vuotoja, nesteiden läikkymisiä ja muita laitevikoja, jotka eivät suoranaisesti vaikuta reaktorin toimintaan.

Onnettomuudet ovat kuitenkin kiusallisia ja aiheuttavat siivoustyötä ja mahdollisesti palontorjuntaa (natriumin tapauksessa).

Luokat 4-5 ovat lämmönvaihdin- ja höyrystinvuotoihin liittyviä onnettomuustapauksia, missä radioaktiivista ainetta pääsee vapautumaan järjestelmiin, missä sitä ei saisi olla. Polttoainesauvan suojakuoren rikkoontuminen voidaan laskea luokkaan 4, jolloin polttoainetta pääsee sauvasta ympäröivään jäähdytteeseen. Sekundääripiirin lämmönvaihtimen vuoto lasketaan luokkaan 5, jolloin oletetaan luokan 4 onnettomuuden jo tapahtuneen ja radioaktiiviset aineet pääsevät primääripiiristä sekundääripiiriin. Painevesireaktorin tapauksessa kyseinen onnettomuus olisi höyrystimen primääripuolen vuoto.

Luokkaan 6 kuuluvat polttoaineen latauksen aikana tapahtuvat onnettomuudet, kuten reaktorista poistetun polttoainesauvan vahingoittuminen siirron aikana.

Luokkaan 7 lasketaan suojarakennuksen ulkopuolella tapahtuvat luokkaan 6 muuten lasketut onnettomuudet. Vakavuusluokitus on korkeampi, sillä nyt ympärillä ei ole suojarakennusta estämässä mahdollisesti vapautuvien radioaktiivisten aineiden leviämistä, vaan onnettomuus voi tapahtua esimerkiksi käytetyn polttoaineen varastossa tai kuljetuksen aikana.

Taulukkoa 4 tarkasteltaessa on huomioitava, että vaikka onnettomuusluokat vaikuttavat usein samanlaisilta kevytvesireaktorin ja nopeaa reaktorin vertailtaessa, on niissä kuitenkin käytännössä tiettyjä eroja. Pääasiassa onnettomuuteen johtavat tapahtumat eroavat reaktorityyppien välillä. Otetaan esimerkiksi kevytvesireaktorin jäähdytteen menetysonnettomuus (LOCA, Loss of Coolant Accident), joka sijoittuisi onnettomuusluokkaan 8. LOCA:n syynä voisi olla primääripiirin paineen äkillinen ja voimakas lasku, jonka seurauksena jäähdytysvesi kiehuisi reaktorissa. Kiehumisvesireaktorissa liiallista kiehumista voisi myös tapahtua esimerkiksi pääkiertopumppujen vikaantuessa. Vakavat putkirikot voivat myös vähentää jäähdytysveden määrää reaktoritankissa. Tärkeimpänä tekijänä voidaan kuitenkin pitää jäähdytysveden kiehumisalttiutta paineen laskiessa. Painevesireaktorin toimintapaine on noin 15 MPa ja kiehumisvesireaktorin noin 7 MPa. Nopeassa natriumjäähdytteisessä reaktorissa primääripiirin jäähdyte on jatkuvasti nestefaasissa, ja se toimii normaali-

ilmanpaineessa. Allastyypistä luonnonkiertoreaktoria käyttämällä voidaan myös välttää putkirikkojen ja -vuotojen suorat vaikutukset sydämen jäähdytyskykyyn. (Waltar et al. 421, 451.)

Toisaalta natriumin aukkoefektin johdosta muodostuvat kuplat voivat vaikuttaa huomattavasti reaktiivisuuteen. Tarpeeksi suuri kupla voisi vähentää polttoaineen jäähdytystä sekä nostaa reaktiivisuutta tarpeeksi siten, että osa polttoaineesta sulaisi. Sydämen rakenteen ansiosta reaktiivisuus saattaisi tällöin nousta vielä entisestään. Tämä on toinen suuri ero kevytvesireaktoriin, jossa sydämen rakenne on suunniteltu kasvutekijän maksimoimiseksi. Kevytvesireaktorissa muutokset sydämen rakenteeseen, kuten polttoaineen sulaminen, vaikuttaisi negatiivisesti reaktiivisuuteen. Häiriötilanne jossa suojajärjestelmät eivät toimi ja tapahtuu reaktiivisuuden äkillinen nousu, on nopealla reaktorilla onnettomuusluokkaan 8 sijoittuva onnettomuus. Onnettomuutta kutsutaan yleisesti suojaamattoman häiriön aiheuttamaksi tehon kasvuksi (UTOP, Unprotected Transient Overpower). Suojaamaton häiriötilanne voi myös johtaa jäähdytyskyvyn heikkenemiseen tai menetykseen (UTUC, Unprotected Transient Under Cooling), joka voi olla joko jäähdytevirtauksen heikkeneminen (ULOC, Unprotected Loss of Flow) tai lämpönielun menetys (ULOHS, Unprotected Loss of Heat Sink). (Ibid. 452-453.)

5.3 Ydinturvallisuus

Seuraavaksi tarkastellaan kevytvesireaktorin ja nopean reaktorin ydinturvallisuuteen liittyviä toimintoja. Jaetaan tarkastelu neljään osa-alueeseen: Reaktiivisuuden hallintaan, polttoaineen jäähdytettävyyteen, radioaktiivisten aineiden leviämisen estoon ja eksotermisten reaktioiden hallintaan. Turvallisuustoimintoverailu on koottu taulukkoon 5.

Nopean reaktorin reaktiivisuutta käsiteltiin alustavasti kappaleessa 3.2. Reaktiivisuuteen vaikuttavat tekijät liittyvät pääasiassa natriumin ominaisuuksiin sekä sydämen rakenteeseen. Kevytvesireaktorissa vesi-polttoainesuhde valitaan siten, että reaktori jää hieman alimoderoiduksi. Tällöin saavutetaan reaktiivisuuden negatiivinen takaisinkytkentä veden lämpötilan noustessa. Tämä tarkoittaa sitä, että jos hidasteena toimiva vesi syystä tai toisesta kuumenee tai jopa kiehuu ja sitä kautta harvenee, niin se

hidastaa neutroneja entistä vähemmän. Tämän seurauksena U-235:n fissiot vähenevät, jolloin reaktiivisuus laskee. (Kalli 2014b, 86.)

Säätösauvat ja liukenevat reaktiivisuusmyrkyt ovat myös reaktiivisuuden hallinnassa käytettyjä menetelmiä. Säätösauvojen tehtävänä on toimia sydämen tehotason ja neutronivuon tasoittajina ja tarvittaessa reaktorin pysäyttäjinä. Liukenevia reaktiivisuusmyrkyjä käytetään painevesireaktoreissa kompensoimaan palaman aiheuttamaa reaktiivisuuden alenemista ajan myötä. Primääripiirin veden sekaan liuotetaan absorbaattoriainetta, kuten boorihappoa. Palamajakson alussa, kun polttoaine on väkevämpää, boorihappoa on paljon. Palamajakson aikana boorihappopitoisuutta vähennetään sitä mukaa kun polttoaineen väkevyys laskee. (Kyrki-Rajamäki 2014b, 17-18.)

Nopeassa reaktorissa natriumin lämpölaajeneminen tai kiehuminen saattaa vaikuttaa joko negatiivisesti tai positiivisesti reaktiivisuuteen riippuen kiehumisen sijainnista. Pääasiassa reaktiivisuus kasvaa, jos natriumkuplia muodostuu sydämen keskialueelle. Natriumin hidastamisen ja absorption heiketessä neutronispektri kovenee, jolloin fissioiden määrä lisääntyy. Reaktiivisuuden alenemista havaitaan reaktorin ulkoreunoilla, jossa neutronien vuoto lisääntyy natriumin tiheyden pienentyessä. Myös sydämen rakenteiden lämpölaajeneminen aiheuttaa neutronien vuodon lisääntymistä, kun sydämen kokonaispinta-ala kasvaa. Kyseisten ilmiöiden vaikutusta reaktiivisuuteen ja neutronivuohon pyritään tasoittamaan säätösauvojen sijoittelun avulla. (Kyrki-Rajamäki 2014a, 61-62.)

Doppler-ilmiö vaikuttaa sekä kevytvesireaktorin että nopean reaktorin reaktiivisuuteen. Doppler-ilmiö tarkoittaa U-238:n resonanssiabsorptioiden vaikutusalojen laajenemista lämpötilan noustessa. Tämä aiheuttaa myös lämpötilasta riippuvan negatiivisen takaisinkytkennän. (Ibid.)

Polttoaineen jäähdytettävyyden takaamiseksi on muutamia eri menetelmiä sekä kevytvesireaktoreille että nopeille reaktoreille. Kevytvesireaktorissa polttoaineen jäähdytettävyyden kannalta tärkeää on polttoainesauvan halkaisija. Ensinnäkin polttoainepinnan keskustan lämpötila halutaan pitää sulamislämpötilan alapuolella. Tätä helpottaa ohuempi sauva. Ohuemman sauvan tilavuuden suhde lämpöä siirtävään pinta-

alaan on parempi kuin paksumman sauvan. Ohueen sauvaan siis varastoituu myös vähemmän lämpöä kuin paksumpaan, mikä on eduksi mahdollisessa jäädytyksen tai jäädytteen menetystilanteessa. Pääasiallisesta jäädytteen kierrättämisestä reaktorisydämen läpi vastaavat pääkiertopumput. Lisäksi monet painevesilaitokset on suunniteltu siten, että primääripiirissä toteutuu luonnonkierto myös pumppujen pettäessä. Jäädytevirtaus höyrystimiltä reaktoriin saadaan aikaan sijoittamalla höyrystimet hieman reaktorisydämen tason yläpuolelle. (Kalli 2014b, 88.)

Nopeassa reaktorissa natriumin suuri lämpökapasiteetti ja korkea kiehumispiste takaa polttoaineen jäädytettävyyden. Jäädytyksen ylläpidosta vastaavat reaktorin pääkiertopumput, joilla on omat varavoima-dieselgeneraattorit sähkökatkosten varalta. Allastyypisessä luonnonkiertoreaktorissa voidaan lämpötilan negatiivisen takaisinkytkennän avulla ylläpitää polttoaineen jäädytettävyyttä myös sellaisissa tapauksissa, jossa koko laitoksen sähköjärjestelmät syystä tai toisesta pettävät. (Kyрки-Rajamäki 2014a, 62.)

Sekä nopeat että kevytvesireaktorit ovat varustettuja hätäjäädytysjärjestelmillä onnettomuustilanteiden varalta. Aiemmin mainittujen varavoimadieseleiden lisäksi on erilaisia ratkaisuja reaktoriastian hätäjäädytykseen, joilla pyritään pitämään primääripiirin jäädytteen lämpötila kiehumispisteen alapuolella.

Radioaktiivisten aineiden leviämiseesteet ovat pääasiassa samat sekä nopeilla että kevytvesireaktoreilla. Leviämisesteenä toimii ensisijaisesti polttoaineen suojakuori, joka estää polttoaineen sekoittumista primääripiirin jäädytteeseen. Itse primääripiiri ja reaktoriastia toimivat toisena leviämisesteenä. Sydämessä aktivoitunut jäädyte ja mahdolliset polttoainevuodot pidetään primääripiirin sisällä, erossa muista järjestelmistä. Kolmantena leviämisesteenä toimii suojarakennus. Suojarakennuksen tarkoituksena on estää mahdollisten primääripiiristä vuotaneiden radioaktiivisten aineiden pääsy laitoksen muihin tiloihin tai ulkoilmaan. Nopealla reaktorilla voi olla lisäksi ylimääräinen suoja-astia reaktoriastian ympärillä. Suoja-astia toimii leviämisesteenä ja takaa myös sen, että reaktoriastian vuotaessa natriumin pinta ei pääse liikaa laskemaan, ja turvaa siten myös jäädytyksen. (Ibid. 58.)

Varsinaisten leviämissesteiden lisäksi voidaan laskea itse reaktorirakennus eräänlaiseksi suojajärjestelmän osaksi. Reaktorirakennus toimii suojana ulkoisia uhkia vastaan, jotka voisivat reaktorirakennuksen puuttuessa läpäistä suojarakennuksen ja aiheuttaa radioaktiivisten aineiden päästöjä. Nykyään reaktorirakennukset suunnitellaan kestämaan erilaisia luonnonmullistuksia sekä jopa lentokoneen törmäyksiä ja ohjusiskuja. (United States Nuclear Regulatory Commission 2009.)

Eksotermiset reaktiot ovat kemiallisia reaktioita, joissa vapautuu lämpöä. Ydinturvallisuuden kannalta reaktorissa ei olennaisesti haluta lämpöä vapautuvan muualta kuin fissioreaktioista, joten muiden eksotermisten reaktioiden hallinta on tärkeää. Nopeassa reaktorissa merkittävin eksotermisen reaktion on natriumin reagointi ilman ja veden kanssa. Nopeat reaktorit käyttävät argonjärjestelmiä, joilla täytetään esimerkiksi reaktoriastian natriumpinnan yläpuolinen tyhjä tila argonkaasulla. Argon on jalokaasuna täysin inertti, eli se ei reagoi minkään muun aineen kanssa. Argonia käytetään myös muualla, kuten polttoaineen käsittelyjärjestelmissä. Itse reaktoriastian ja sitä ympäröivän suoja-astian välinen tila täytetään typpellä. Natriumtäytteen sekundääripiiri varmistaa primääripiirin erotuksen vesijärjestelmistä. Natriumpalojen riski itse höyrytimissä on sen sijaan minimoitavissa höyrytinsuunnittelun avulla, kuten todettiin kappaleessa 3.3. (Kyrki-Rajamäki 2014a, 50-63)

Kevytvesireaktorissa ei ole normaaleissa käyttöolosuhteissa voimakkaiden eksotermisten reaktioiden riskiä. Pääasiallinen eksotermisen reaktion on korroosio, joka on erittäin hidaskäyttöprosessi eikä tuota merkittävästi lämpöä. Korroosio on toisaalta ongelmallinen, sillä se voi haurastuttaa polttoaineen suojakuorta tai muita primääripiirin osia. Hyvä vesikemia ja sopivan materiaalin valinta sekä polttoaineen suojakuorelle että primääripiirille ehkäisee korroosion vaikutuksia.

Onnettomuustilanteissa, kuten jäähdytteen menetysonnettomuudessa, on vakavamman eksotermisen reaktion riski. Kevytvesireaktorin polttoainesauvojen suojakuoret ovat tyypillisesti zirkoniumia sisältäviä seoksia. Jäähdytteen menetyksessä osa polttoainesauvoista voivat paljastua, jos onnettomuus etenee kiehumiskriisiin. Suojakuoren lämpötila kasvaa huomattavasti, ja se oksidoiduu voimakkaasti vesihöyryn vaikutuksesta. Suojakuoren pinnalle muodostuu zirkoniumoksidia, jonka kautta materiaaliin pääsee tunkeutumaan vetyä. Vedyn kanssa reagoiessaan zirkonium

muodostaa zirkoniumhydriidiä, joka on erittäin haurasta. Suojakuori voi siten murtua hauraasti, kun hätäjähdytysjärjestelmät ruiskuttavat sydämeen kylmää vettä. Parantamalla suojakuorimateriaaleja, kuten esimerkiksi lisäämällä seokseen niobiumia, voidaan vähentää vedyn imeytymistä ja siten parantaa suojakuoren kestävyyttä onnettomuustilanteissa. (Zielinski & Sobieszczyk 2011, 8619-8622.)

Taulukko 5. Ydinturvallisuuteen liittyvien tekijöiden vertailu kevytvesireaktorin (LWR) ja nopean reaktorin (SFR) välillä.

| Reaktiivisuus | |
|--|--|
| LWR | SFR |
| Säätösauvat | Säätösauvat |
| Liukenevat absorbaattorit (PWR) | Takaisinkytkentä (+/-): |
| Takaisinkytkentä (+/-): | - Tukirakenteiden lämpölaajeneminen |
| - Moderaattorin tiheysmuutokset | + Natriumin tiheysmuutokset |
| - Doppler-ilmiö | - Doppler-ilmiö |
| Polttoaineen jäähdytettävyyys | |
| LWR | SFR |
| Pääkiertopumput + varavoima | Pääkiertopumput + varavoima |
| Luonnonkierto-rakenne | Luonnonkierto-rakenne |
| Hätäjähdytysjärjestelmät | Hätäjähdytysjärjestelmät |
| Polttoainesauvojen mitat | Jäähdytteen suuri lämpökapasiteetti |
| Radioaktiivisten materiaalien leviämisen esto | |
| LWR | SFR |
| Polttoaineen suojakuori | Polttoaineen suojakuori |
| Primääripiiri | Primääripiiri |
| Suojarakennus (Reaktorirakennus) | Suoja-astia Suojarakennus (Reaktorirakennus) |
| Eksotermiset reaktiot ja niiden ehkäisytavat | |
| LWR | SFR |
| Korroosio: | Natriumreaktiot: |
| Materiaalien valinta | Argonjärjestelmät |
| Vesikemia | Natrium-sekundääripiiri |
| Ylikuumentuneen metallin oksidoituminen: | Materiaalien valinta |
| Suojakuoren seoksen valinta | |

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Nopean reaktorin käyttö olisi uraanin hyödyntämisen kannalta tehokkaampi ja ydinvoiman kestävä kehitystä tukeva vaihtoehto. Kovemman neutronispektrin omaava nopea reaktori voisi polttaa kevytvesireaktorien ydinjätteeksi luokiteltua käytettyä polttoainetta ja sen sisältämiä loppusijoituksen kannalta ongelmallisia pieniä aktinideja. Hyötörakenteella varustettu nopea reaktori voisi myös tuottaa fissiiliä materiaalia kevytvesireaktorien polttoaineen valmistukseen. Yhä enemmän energiaomavaraisuuteen ja kestäväan kehitykseen pyrkivät pienemmät valtiot voisivat välttää polttoaineriippuvuuden suuriin ydinvoimavaltioihin ja pienentää huomattavasti ydinjätteensä loppusijoitusaikaa.

Uraanin hinnan kehitys ja nopean reaktorin polttoainekiertoon liittyvä mittava ja kallis infrastruktuuri jarruttaa kuitenkin nopeiden reaktorien kysyntää maailmalla. Uraanin hinnan noustessa ennen kannattamattomat uraanesiintymät muuttuvat kannattaviksi louhia. On todennäköistä, että uraanin hinta saa nousta huomattavasti ennen kuin nopeiden reaktorien käytöstä pienissä ydinvoimavaltioissa tulisi edullisempaa kuin polttoaineen ostamisesta. Suuret ydinvoimavaltiot, joilta löytyy jo jonkin verran infrastruktuuria kuten polttoaineen valmistus- ja jälleenkäsittelylaitokset, ovat ensimmäinen potentiaalinen ryhmä nopeiden reaktorien kehitykselle ja laajamittaiselle käyttöön otolle. Lisäksi poliittisen ilmapiirin on oltava myönteinen ydinvoimaa kohtaan. Näistä syistä nopeiden ydinreaktorien parhaat kehitysmahdollisuudet löytynevät Venäjältä ja Intiasta.

Nopeiden reaktorien käyttökokemusten hyödyntäminen uusien laitosten suunnittelussa on tärkeää. Vuosien mittaan erilaiset natriumiin liittyvät ongelmat, kuten reaktiivisuuden säätö ja natriumpalot, ovat vainonneet nopeita reaktoreja. Toimivien ratkaisujen hyödyntäminen ja kehittäminen lisää laitosturvallisuutta ja käyttöastetta. Negatiivisen yleiskuvan antavat ongelmat ovat ratkaistavissa ja yleinen mielipide nopeita reaktoreja kohtaan parannettavissa. Nopean reaktorin kaupallistumisen aikakausi ei kuitenkaan ole vielä, mutta se ovat selvästi vahva kilpailija neljännen sukupolven reaktorien keskuudessa.

7 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin nopean ydinreaktorin mahdollisuuksia sekä nyky maailmassa että tulevaisuuden kannalta. Nykyiset termiset ydinreaktorit eivät hyödynnä uraanin energiapotentiaalia kovin tehokkaasti, vaan suurin osa uraanista päätyy loppusijoitukseen ydinjätteenä. Nopeaa reaktoria käyttämällä uraanista voidaan saada huomattavasti suurempi osuus energiasta hyödyksi, ja lisäksi vähentää syntyvän ydinjätteen puoliintumisaikaa merkittävästi.

Nopean reaktorin toiminta perustuu nopean energiaspektrin neutronien hyödyntämiseen. Käytännössä tämä toteutetaan siten, että nopean reaktorin sydämeen sijoitetaan fissiilin materiaalin ympärille fertiilistä materiaalista muodostuvia vaippoja. Fertiilit aineet sieppaavat fissioista syntyviä neutroneja ja muuntuvat ajan myötä uusiksi fissiileiksi aineiksi. Nopea neutronivuo mahdollistaa myös ydinreaktorissa syntyvien ongelmallisten pienien aktinidien konvertoimisen ja fission.

Toisin kuin termisessä reaktorissa, nopeassa reaktorissa ei ole hidastinta. Tämä vaikuttaa jäähdytteen valintaan, sillä jäähdytteen atomien on oltava tarpeeksi raskaita, etteivät ne hidasta neutroneja merkittävästi. Eri jäähdytevaihtoehtojen vertailujen jälkeen suosituimmaksi on valikoitunut sula natrium, jota onkin käytetty kaikissa toiminnassa olleissa nopeissa reaktoreissa. Natriumin käytön haittoihin sisältyy tosin muun muassa natriumin reagoitiherkkyys ilman ja veden kanssa, joka on johtanut ongelmallisiin natriumpaloihin ja vetyräjähdyksiin. Suurin riskitekijä on laitoksen höyrystimet, jossa natriumkierron ja vesi-/höyrykierron erottaa vain ohuet höyrystinputkien seinämät. Suurin osa natriumpaloista onkin sattunut juuri höyrystimissä. Tähän on kehitetty erilaisia ratkaisuja, kuten esimerkiksi duplex-höyrystinputket ja modulaariset höyrystimet.

Nopean reaktorin käyttöön liittyy olennaisesti polttoainekierron sulkeminen. Nykyiset termiset reaktorit käyttävät pääasiassa avointa polttoainekiertoa, jossa käytetty polttoaine päätyy käyttöjaksonsa jälkeen loppusijoitukseen ydinjätteenä. Suljetussa polttoainekierrossa termisen reaktorin rinnalla toimisi nopea reaktori, jonka polttoaine valmistettaisiin termisen reaktorin jälleenkäsittelystä käytetystä polttoaineesta. Tällöin ydinjätehuollon rasitteet helpottuisivat, ja uraanin energiasisällöstä saataisiin hyödyksi

huomattavasti enemmän kuin termisillä reaktoreilla saadaan nykypäivänä. Suljettuun polttoainekiertoon vaaditaan tosin kallista infrastruktuuria, kuten polttoaineen valmistus- ja jälleenkäsittelylaitokset, joten investointi niihin ei yleisesti ottaen kannata niin kauan kun uraanin hinta ei nouse merkittävästi. Potentiaaliset suljetun polttoainekierron aloittajat voivat olla ne maat, joista jo löytyy polttoaineen valmistus- ja jälleenkäsittelyinfrastruktuuria.

Kevytvesireaktoria ja nopeaa reaktoria vertaillessa huomataan tiettyjä eroja ja yhtäläisyyksiä. Erityisesti polttoainetalouden kannalta jo aiemmin mainitut seikat uraanin tehokkaammasta hyödyntämisestä tulevat esiin. Säteilyturvallisuuden kannalta reaktorityypeillä ei ole merkittävää eroa. Onnettomuustilanteiden luokittelu on myös hyvin samanlaista reaktorityyppien kesken, tosin erilaiset jäähdytteet vaikuttavat eri tavoin onnettomuustilanteisiin johtavien tapahtumien syntyyn. Ydinturvallisuuden kannalta merkittävimmät erot löytyvät reaktiivisuuden ja eksotermisten reaktioiden hallinnasta, ja merkittävimmät yhtäläisyydet radioaktiivisten aineiden leviämisen estojärjestelyistä.

Vaikka nopean reaktorin ja suljetun polttoainekierron hyödyntäminen olisi kestävä kehityksen ja uraanin hyötykäytön kannalta mielekäs ratkaisu, on kuitenkin epätodennäköistä, että reaktorityyppi yleistyy lähitulevaisuudessa. Suurin este on suljetun polttoainekierron vaatimat mittavat investoinnit infrastruktuuriin, joiden takia uraanin hinnan olisi noustava merkittävästi ennen kuin suljetun polttoainekierron käytöstä tulisi kannattavaa pienille ydinvoimavaltioille. Potentiaaliset nopeiden reaktori- ja suljetun polttoainekierron valjastajat ovat ne valtiot, joista löytyy jo polttoaineen valmistus- ja jälleenkäsittelylaitokset, kuten esimerkiksi Yhdysvallat tai Venäjä.

LÄHDELUETTELO

Ansola et al. 2003. The Future of Nuclear Power – An Interdisciplinary MIT Study. Massachusetts Institute of Technology. 180 s. ISBN 0-615-12420-8.

Aoto et al. 2014. A summary of sodium-cooled fast reactor development. Progress in Nuclear Energy, vol 77. Sivut 1-19. ISSN 0149-1970.

Bamberger, Hutin, Delbecq. 2011. Meeting EU's energy needs through nuclear fission: Synergy of public and private research in an international context. Nuclear Engineering and Design, vol. 241. Sivut 3445–3450. ISSN 0029-5493.

Choppin et al. 2013. Nuclear power reactors. Teoksessa: Radiochemistry and Nuclear Chemistry. Neljäs painos. Elsevier. Kappale 20, sivut 655-684. ISBN 978-0-12-405897-2.

Cochran et al. 2010. Fast Breeder Reactor Programs: History and Status. International Panel on Fissile Materials. 128 s. ISBN 978-0-9819275-6-5.

Energiateollisuus. 2007. Hyvä tietää säteilystä. Energiateollisuus ry. Helsinki. 24 s. ISBN 978-952-5615-15-9

Engineering Toolbox. 2014. Tools and Basic Information for Design, Engineering and Construction of Technical Applications. [engineeringtoolbox.com – verkkosivut]. Viitattu 11.11.2014. Saatavissa: <http://www.engineeringtoolbox.com/>

Feiveson et al. 2013. Global Fissile Material Report 2013: Increasing Transparency of Nuclear Warhead and Fissile Material Stocks as a Step toward Disarmament. International Panel on Fissile Materials. 130 s.

Fortum Power and Heat Oy. 2008. Ympäristövaikutusten arviointiselostus: Loviisan ydinvoimalaitoksen laajentaminen kolmannella voimalaitosyksiköllä. Työ- ja elinkeinoministeriö. 214 s.

Gangotra et al. 2013. Comparison for thorium fuel cycle facilities of two different capacities for implementation of safeguards. Nuclear Engineering and Design, vol 262. Sivut 535-543. ISSN 0029-5493.

Institute of Physics and Power Engineering (IPPE). Fast Reactor BN-600. [ippe.ru – verkkosivut]. Viitattu 13.8.2014. Saatavissa: <http://www.ippe.ru/podr/ippe1/rpr/3-7rpr.php>

International Atomic Energy Agency Nuclear Data Services. Live Chart of Nuclides. [nds.iaea.org – verkkosivut]. Päivitetty 14.8.2014. Viitattu 15.8.2014. Saatavissa: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>

Kalli, Heikki. 2014a. Ydinreaktorien fysiikka, osa 1. Kurssimoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Kalli, Heikki. 2014b. Ydinreaktorien fysiikka, osa 2. Kurssimoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Kyrki-Rajamäki, Riitta. 2014a. Kevytvesireaktoreiden säätö, nopeat reaktorit ja grafiittihidasteinen kanavareaktori. Kurssimoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Kyrki-Rajamäki, Riitta. 2014b. Reaktorimateriaalit ja yleisimmät reaktorityypit. Kurssimoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Petersen, Helge. 1970. The Properties of Helium: Density, Specific Heats, Viscosity and Thermal Conductivity at pressures from 1 to 100 bar and from room temperature to about 1800 K. Danish Atomic Energy Commission. Kööpenhamina. 42 s.

Rineiskii et al. 2006. Fast Reactor Database 2006 Update. Wien: International Atomic Energy Agency. 450 s. ISSN 1011–4289.

Russia Today. 2014. Fast reactor starts clean nuclear energy era in Russia. [rt.com – verkkosivut] Julkaistu 27.6.2014. Viitattu 8.11.2014. Saatavissa: <http://rt.com/news/168768-russian-fast-breeder-reactor/>

Sakamoto et al. 2013. Selection of sodium coolant for fast reactors in the US, France and Japan. Nuclear Engineering and Design, vol. 254. Sivut 194-217. ISSN 0029-5493.

Sumner T, Ghiaasiaan S.M. 2011. Effects of fuel type on the safety characteristics of a sodium-cooled fast reactor, Part 1: Background, modeling tools and pre-transient calculations. Annals of Nuclear Energy, vol 38. Sivut 1559-1568. ISSN 0306-4549.

United States Nuclear Regulatory Commission. 2009. Aircraft Impact Assessment. [nrc.gov – verkkosivut] Päivitetty 10.7.2014. Viitattu 8.11.2014. Saatavissa: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/part050-0150.html>

Universe review. Applications of Nuclear Fission. [universe-review.ca – verkkosivut]. Viitattu 15.8.2014. Saatavissa: <http://universe-review.ca/F14-nucleus05.htm>

Waltar et al. 2012. Fast Spectrum Reactors. Springer. 717 s. ISBN 978-1-4419-9571-1.

Walters L.C. 1998. Thirty years of fuels and materials information from EBR-II. Nuclear Engineering and Design, vol 270. Sivut 39-48. ISSN 0029-5493.

Wischnevski, Berndt. 2014. Some scientific and engineering data online. [peacesoftware.de – verkkosivut]. Viitattu 11.11.2014. Saatavissa: http://www.peacesoftware.de/einigewerte/einigewerte_e.html

World Nuclear Association (2014a). Processing of Used Nuclear Fuel. [world-nuclear.org – verkkosivut]. Päivitetty syyskuussa 2014. Viitattu 28.9.2014. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Fuel-Recycling/Processing-of-Used-Nuclear-Fuel/>

World Nuclear Association (2014b). Supply of Uranium. [world-nuclear.org – verkkosivut]. Päivitetty 8.10.2014. Viitattu 13.10.2014. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Uranium-Resources/Supply-of-Uranium/>

Zielinski, Sobieszczyk. 2011. Hydrogen-enhanced degradation and oxide effects in zirconium alloys for nuclear applications. International Journal of Hydrogen Energy, vol 36. Sivut 8619-8629. ISSN: 0360-3199.