



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Energiatekniikan osasto

BH10A0200 Kandidaatintyö ja seminaari

KAASUJÄÄHDYTTEINEN NOPEA REAKTORI

GAS-COOLED FAST REACTOR

Kandidaatintyö

Lappeenrannassa 5.9.2011

0295649 Janne Grönlund ENTEN

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	2
1 JOHDANTO	3
2 GFR:N TEKNISET PERIAATTEET	4
2.1 Polttoaine	4
2.1.1 Levy-tyyppi	6
2.1.2 Sauva-tyyppi	8
2.2 Jäähdyte.....	9
2.3 Reaktorifysiikka	10
2.4 Termohydrauliikka.....	13
2.5 Turvallisuusominaisuudet	15
3 GFR:N KÄYTTÖKOHTEET	20
3.1 Sähkön tuottaminen.....	20
3.2 Vedyn valmistaminen	21
4 TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT.....	22
5 YHTEENVETO.....	25
LÄHTEET.....	27
LIITTEET	

SYMBOLILUETTELO

Kreikkalaiset

β	beeta-hajoaminen	[-]
η	neutronisaanti/absorptio	[-]
ν	neutronisaanti	[-]
σ	mikroskooppinen vaikutusala	[barn]

Alaindeksit

a	absorptio
f	fissio

1 JOHDANTO

Generation IV International Forum, joka on kansainvälinen ydinvoima-alan toimija, on asettanut tulevaisuuden ydinreaktoreille monia merkittäviä tavoitteita. Niitä ovat parantunut turvallisuus, taloudellisuus, luotettavuus ja olemassa olevien polttoainevarojen tehokas hyödyntäminen. Niiden pohjalta International Forum on nimennyt kuusi reaktorityyppiä, joiden tutkimus- ja kehitystyöhön tulevaisuuden voimavaroja suunnataan. Yksi valituista reaktorityypeistä on kaasujäähdytteinen nopea reaktori GFR (eng. gas-cooled fast reactor).

GFR:ssä käytetään jäähdytteenä heliumia, joka poistuu reaktorista korkeassa lämpötilassa, jos verrataan perinteisiin kevytvesireaktoreihin. Korkea poistumislämpötila mahdollistaa sähkön tuotannon entistä paremmalla hyötysuhteella. Lisäksi lämpöä voidaan hyödyntää monissa sovellutuksissa, kuten vedyn tuotannossa. Heliumin käyttö jäähdytteenä aiheuttaa myös ongelmia, sillä GFR:n heikkoutena pidetään sen huonoa kykyä poistaa jälkilämpöä ilman apujärjestelmiä ja juuri helium on suuri syy tähän.

Perinteisissä kevytvesireaktoreissa neutronit hidastuvat moderaattorin avulla termiselle energiatasolle. Usein moderaattorina käytetään vettä, joka on samalla jäähdyte. GFR:ssä helium ei hidasta neutroneita samalla tavalla, vaan neutronit kulkevat reaktorissa suurella nopeudella. Kova neutronispektri mahdollistaa erilaisten materiaalien, kuten aktinidien syötön reaktoriin (Foley 2009). Laittamalla aktinideja polttoaineen sekaan, saadaan aikaan transmutaatioita, joiden seurauksena ydinjätteen määrä sekä radioaktiivisuus pienenevät. Kova neutronispektri tehostaa lisäksi luonnonuraanin käyttöä, sillä reaktorissa syntyy neutronikaappausten kautta fissiiliä plutoniumia. Tavoitteena on, että GFR tuottaa enemmän polttoainetta, kuin mitä se käyttää.

Tässä työssä kuvataan GFR: tärkeimmät tekniset periaatteet polttoaineesta aina termohydrauliikkaan. Lisäksi tutustutaan demonstraatiolaitos Allegron tavoitteisiin ja teknisiin ratkaisuihin.

2 GFR:N TEKNISET PERIAATTEET

GFR suunnittelussa on hyödynnetty jo olemassa olevista reaktorityypeistä saatuja tietoja ja kokemuksia. Esimerkiksi VHTR (very high temperature reactor) on hyvä malli, kun suunnitellaan reaktorin ulkopuolisia komponentteja. GFR:n tapaan myös VHTR:ssä jäähdyte on kaasumaista ja hyvin kuumaa poistuessaan reaktorista. Yhtäläisyydet näiden kahden reaktorityypin välillä loppuvat kuitenkin, kun tarkastellaan itse sydäntä. VHTR:ssä polttoaine on pieninä partikkeleina grafiittimatriisissa. Tästä seuraa alhainen tehotiheys, mikä ei ole tavoiteltavaa GFR:ssä. Merkittävänä erona on lisäksi neutronien energia, joka on paljon suurempi GFR:ssä. (Brunel et al. 2009) Tässä kappaleessa esittelen GFR:n teknisiä periaatteita.

2.1 Polttoaine

Polttoaine on yksi tärkeimmistä suunniteltavista asioista, kun kehitetään uutta ydinvoimalaitosta. Käytön aikaisen turvallisuuden takaamiseksi, polttoaineen lämpötila ei saa nousta liian korkeaksi. Reaktorissa syntyvä lämpö vapautuu polttoaineessa, joten siellä on myös kuumimmat paikat. Jos lämpötilaa ei saada pidettyä tarpeeksi alhaalla, saatetaan menettää polttoaine-elementtien eheys ja fissiotuotteet vapautuvat sydämeen. Lisäksi sydämen materiaalit voivat alkaa sulamaan, jolloin riittävää jäähdytystä ei välttämättä voida enää turvata. Tällöin seurauksena on vakava ydinonnettomuus.

GFR asettaa tutkijoille erityisen suuren haasteen polttoaineen suunnittelun suhteen, jäähdytteen korkean poistumislämpötilan takia. Se ylittää jopa 800 °C normaalissa käyttötilanteessa. Esimerkiksi kevytvesireaktoreiden polttoainesauvojen suojakuoressa käytetty zirkonium ei sovellu näin korkeisiin lämpötiloihin. Tämän vuoksi tarvitaan keraamisia erikoismateriaaleja, jotka kestävät sydämen vaativat olosuhteet. (Brunel et al. 2009)

Tällä hetkellä todennäköisin polttoainemateriaali on jonkinlainen karbidiyhdiste. Sillä on oksideihin verrattuna paremmat ominaisuudet turvallisuudessa ja neutronitaloudellisuudessa.

sa. Taulukossa 1 on esillä muutamia karbidien, oksidien ja nitridien ominaisuuksia. (Brunel et al, 2009)

Taulukko 1. Polttoaineen ominaisuuksia (Brunel et al, 2009)

	karbidi	nitridi	oksidi
teoreettinen tiheys [g/cm ³]	13.58	14.32	11.5
sulamispiste [°C]	2420	2780	2750
lämmönjohtavuus [W/mK]	16.5	14.3	2.9

Taulukosta 1 huomataan karbidin ja nitridin lämmönjohtavuuden olevan monikertainen oksidiin verrattuna. Tämä on tärkeä ominaisuus, koska se pienentää lämpötilagradienttia polttoaineessa ja fissioissa syntyvä energia saadaan tehokkaammin siirrettyä jäähdytteen. Kaikilla polttoaine ehdokkailla on melko korkea sulamispiste, mikä kasvattaa turvallisuutta. Karbidilla ja nitridillä on ominaisuuksissaan monia yhtäläisyyksiä, mutta nitridillä on eräs heikko puoli. Sen käyttö vaatii ¹⁵N rikastamista, jotta välttyttäisiin radioaktiivisen hiilen isotoopin ¹⁴C muodostumiselta reaktorissa. Sitä syntyy kun ¹⁴N altistuu säteilylle. Karbidin huonona ominaisuutena voidaan pitää sen haihtuvuutta, etenkin jos polttoaineseokseen on lisätty aktinideja. Oksidi-polttoainetta on tarkoitus käyttää demonstraatiolaitos Allegron aloitussydämessä, mutta jatkossa GFR:n todennäköisin polttoaine vaihtoehto on karbidi johon on sekoitettu uraania, plutoniumia ja aktinideja. Plutoniumin osuudeksi on arvioitu noin 15 %, aktinien hieman yli 1 % ja loput polttoaineesta on uraania (Petkevich et al, 2007). Varalla ovat nitridi- ja oksidiyhdisteet. (Brunel et al, 2009)

Yksi Generation 4 tavoitteista on olemassa olevien polttoainevarojen tehokas hyödyntäminen. GFR:n kova neutronispektri mahdollistaa tehokkaan plutoniumin määrän kasvattamisen reaktorissa. Tavoitteena on, että GFR tuottaa ainakin yhtä paljon polttoainetta, kuin mitä se kuluttaa. Plutoniumin määrän kasvussa on myös mahdollinen varjopuoli, jos sitä pyritään ottamaan talteen ydinaseen valmistamiseksi. GFR:ssä ei ole tarkoitus käyttää fer-

tiiliä aluetta (eng. Fertile blanket), mikä tekee plutoniumin talteenotosta vaikeaa ja taloudellisesti kannattamatonta. (Anzieu et al, 2009)

GFR:ssä on tarkoitus käyttää suljettua polttoainekiertoa. Tämä tarkoittaa käytetyn polttoaineen jalostamista ja hyödyntämistä uudessa polttoaineessa. Kovan neutronispektrin ansiosta polttoaineen sekaan voidaan laittaa aktinideja, eli radioaktiivisia raskaita alkuaineita. Reaktorissa niistä saadaan tehtyä muita alkuaineita, jotka eivät ole niin hankalia säteilyn kannalta. Syntyvien uusien alkuaineiden puoliintumisaika on nimittäin huomattavasti lyhyempi, kuin aktinidien. Se tekee ydinjätehuollosta helpompaa. (Generation 4 Roadmap, 2002)

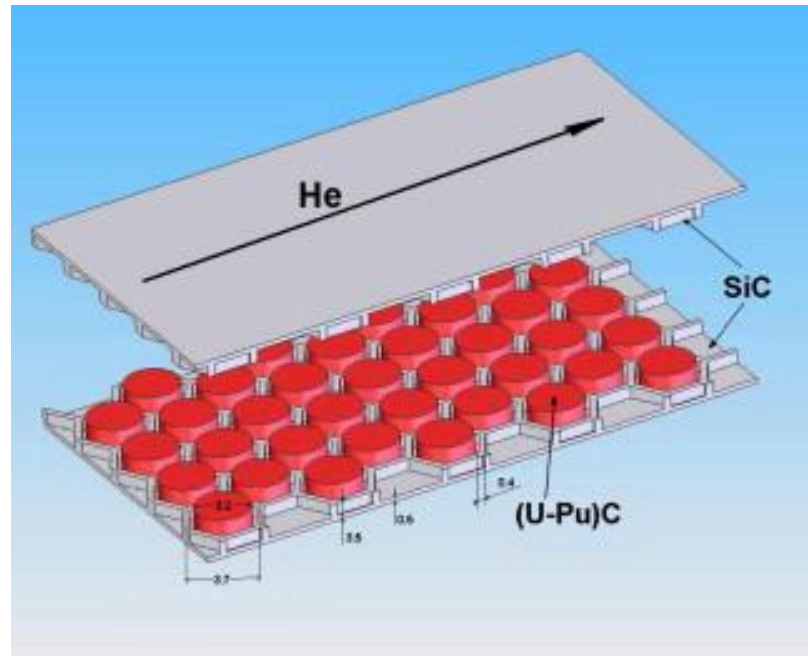
Polttoaineen suunnittelussa materiaalin valinnan lisäksi merkittävää on myös polttoainelementin muoto. Se vaikuttaa mm. aukko-osuuksiin ja sitä kautta myös tehotiheyteen. GFR:ään on ehdolla kaksi erilaista muotoa. Toinen on perinteisesti nopeissa reaktoreissa käytetty sauva-tyyppi (eng. Pin type), ja toinen uudenlainen levy-tyyppi (eng. plate type) (Brunel et al, 2009).

2.1.1 Levy-tyyppi

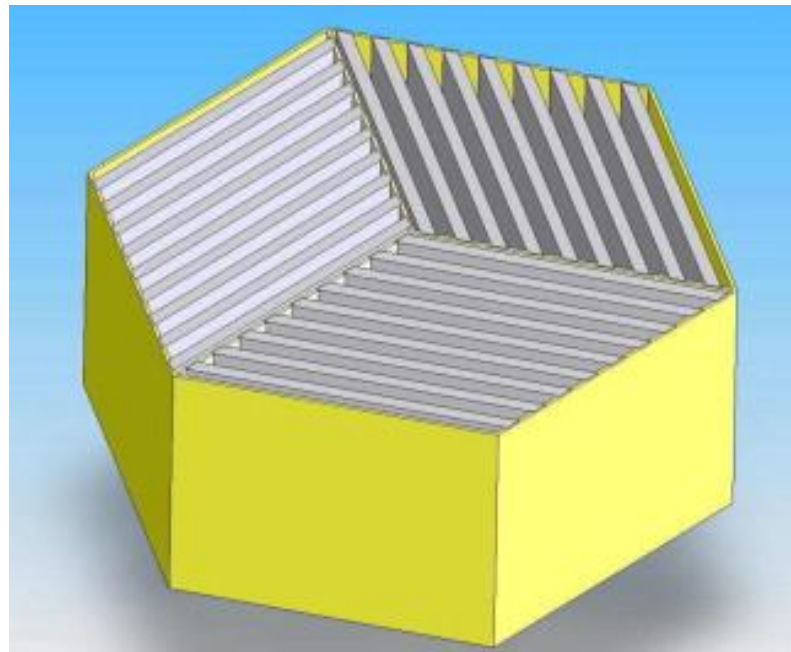
Levy-tyypissä polttoaine-elementit muistuttavat hunajakenkoja. Levyn rakenne on nähtävissä kuvassa 1. Kuten kuvasta 1 nähdään, polttoainenapit ovat omissa rakkuloissaan, ja jokainen rakkula on erikseen suljettu. Tämä vähentää fissiotuotteiden vapautumista, koska vaurion sattuessa ainoastaan rikkoutuneen rakkulan fissiotuotteet pääsevät leviämään. Levy on kuitenkin varsin yksityiskohtainen, varsinkin kun huomioidaan, että jokainen rakkula suljetaan erikseen. Tämä nostaa varmasti valmistuskustannuksia, mikä on yksi levy-tyypin ongelmista (Brunel et al, 2009).

Valmiit polttoainelevyt kasataan kuusikulmaiseen koriin, joka on nähtävissä kuvassa 2. Yhteen koriin mahtuu 21 levyä, vaikka kuvassa niitä näyttäisi olevan enemmän. Korit on valmistettu kestävästä materiaalista, jotta niiden tilavuusosuus reaktorissa voitaisiin pitää mahdollisimman pienenä (F. Carre et al, 2010). Korin on kuitenkin oltava niin vahva, ettei

sen muoto muutu jatkuvan rasituksen seurauksena. Jäähdytteen virtaus levyjen välissä voi vaarantua jos korin tukirakenteet jostain syystä pettävät. Tästä voi seurata vakava onnettomuus.



Kuva 1. Polttoainelevyn rakenne. (Petkevich et al, 2007)



Kuva 2. Polttoaine-elementti. (Petkevich et al, 2007)

Polttoaineen suunnittelussa yksi tärkeimmistä parametreista on polttoaineen ja suojakuoren välinen rako, etenkin aksiaalissuunnassa. Polttoaine turpoaa säteilyn vaikutuksesta ja suojakuoren ja polttoaineen välinen kontakti on estettävä. Karbidipolttoaine turpoaa kaksi kertaa niin paljon kuin oksidi. Toisaalta jos rako jätetään turhan suureksi, heikentää se lämmönsiirtoa polttoaineesta jäähdytteeseen, mikä samalla nostaa polttoaineen lämpötilaa. (Brunel et al, 2009)

Suojakuorimateriaaliksi GFR:ään on valittu kuituvahvistettu piikarbidi-piikarbidi yhdiste SiC-SiCf, joka kestää suurta mekaanista rasitusta. Ongelmana tässä suojakuorimateriaalissa on se, että se reagoi polttoaineen kanssa. Fissiotuotteiden leviämisen estävällä ohuella suojalla on tehtävänä estää nämä materiaalien väliset reaktiot. Suojan paksuudeksi on mainittu 50 μm . ja käytettäväksi materiaaliksi kuumuutta kestävä metalliseos W-14Re. Tällä hetkellä tutkitaan myös erilaisia keraamisia suojakuorimateriaaleja, jotka eivät vaatisi suojakerroksen käyttöä. (Carre et al, 2010)

Toinen suojakuorimateriaalin aiheuttama ongelma on sen heikko lämmönjohtavuus. Lämpötilagradientti suojakuoressa on itse asiassa suurempi kuin polttoaineessa. Suuri lämpötilagradientti aiheuttaa epätasaista lämpölaajenemista suojakuoressa, mikä kasvattaa kuoreen aiheutuvaa jännitystä. (Brunel et al, 2009)

Levy-tyyppi valittiin vuonna 2007 ensisijaiseksi vaihtoehdoksi GFR:ään. Tällä hetkellä levy-tyyppin soveltuvuutta testataan käytännössä ja tutkimus- ja kehittämistyö on keskitetty sauva-tyyppiin, jossa on monikerroksinen komposiittikuori. (Carre et al, 2010)

2.1.2 Sauva-tyyppi

Sauva-tyyppi on samankaltainen kuin aikaisemmissa nopeissa reaktoreissa, esimerkiksi Ranskassa käytössä olleessa Superphénix:ssä. Tästä on varmasti apua, koska suunnittelua ei tarvitse aloittaa alusta. Lisäksi on valmiiksi kokemusta sauvojen valmistuksesta, mikä

nopeuttaa toiminnan aloittamista. Sauva-tyyppi on paljon yksinkertaisempi kuin levytyyppi, mikä tekee niiden valmistamisesta helpompaa ja halvempaa.

Sauva koostuu kahdesta komponentista, joilla on omat kaasutilavuutensa. Näin saadaan rajoitettua hieman fissiotuotteiden vapautumista sauvan rikkoutuessa. Lisäksi kahdesta osasta koostuva sauva on mekaanisesti tasapainoisempi ja lyhyempien osien valmistus on yksinkertaisempaa kuin yhden pitkän. (Brunel et al, 2009)

Myös sauva-tyypillä tapahtuu turpoamista ja elementin mittojen tarkka suunnittelu on tärkeää, jotta vältetään haitalliselta polttoaineen ja suojakuooren vuorovaikutukselta. Polttoaine on huokoista, mikä vähentää turpoamista. (Brunel et al, 2009)

2.2 Jäähdyte

Jäähdytteen päättäminen on yksi merkittävimmistä valinnoista, kun suunnitellaan ydinreaktoria. Se vaikuttaa moniin asioihin, kuten lämmönsiirtoon, reaktorifysiikkaan ja myös turvallisuuteen. Fissioissa syntyvän lämmön poistaminen kaikissa olosuhteissa on elintärkeää, jotta laitosta voidaan käyttää turvallisesti. Tässä kappaleessa kerron GFR:n jäähdytteen, heliumin hyvistä ja huonoista puolista. Lisäksi pohditaan, mitkä muut jäähdytteet sopisivat kyseiseen reaktoriin.

Heliumin suurin etu on sen alhainen mikroskooppinen vaikutusala. Sen seurauksena jäähdyte ei kaappaa neutroneita niin helposti, jolloin niitä riittää enemmän fissioihin ja fertiileihin kaappauksiin. Fertiileissä kaappauksissa syntyy fissiiliä ainetta, mikä on tavoiteltavaa nopeissa reaktoreissa. Helium ei myöskään moderoi eli hidasta neutroneita kovin tehokkaasti. Tämäkin kasvattaa neutroneiden lukumäärää, koska fissiossa syntyvien uusien neutroneiden lukumäärä on riippuvainen halkeamisen aiheuttaneen neutronin energiasta. Suurempi energia tuottaa keskimäärin enemmän uusia neutroneita. (Waltar, 1981)

Helium on inertti kaasu, joten se ei reagoi muiden materiaalien kanssa. Passiivisuus mahdollistaa korkeamman poistumislämpötilan, joka on GFR:ssä jopa 850 °C. Helium ei

myöskään reagoi veden tai ilman kanssa, mikä on ongelmana natriumia jäähdytteenä käytävällä SFR:llä (Sodium fast reactor). Laitoksen turvallisuutta ja helpompaa käyttöä lisää se, että helium on läpinäkyvää. Helium ei myöskään aktivoidu säteilytyksessä, joten sekundäärispiiriä ei välttämättä tarvita sen takia. (Waltar,1981)

Kiehutusvesireaktorissa jäähdyte muuttaa faasia kulkiessaan sydämen lävitse. Se aiheuttaa lisää haasteita suunnitteluun, koska faasimuutosta on seurattava tarkasti. Helium pysyy kaasumaisena koko ajan, mikä helpottaa sen käyttöä jäähdytteenä.

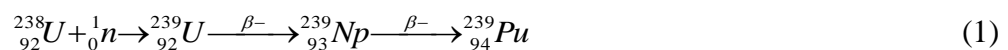
Heliumin suurin heikkous on sen heikko lämmönsiirtokyky. Tämä kasvattaa lämpötilagradienttia polttoaineen suojakuoren ja jäähdytteen välillä, mikä ei ole toivottavaa. Ongelmaa voidaan helpottaa nostamalla heliumin painetta. (Waltar,1981)

Kaasumaisen jäähdytteen käyttöön liittyy muitakin haasteita. Helium on hyvin pieniatominen kaasu ja siitä seuraa, että sen vuotoherkkyys on suuri. Tämä asettaa korkeat vaatimukset eristykselle ja tiiveydelle. (Huynh,IAEA)

GFR:n jäähdytteeksi on esitetty muitakin vaihtoehtoja kuin helium. Yksi mahdollinen ratkaisu olisi käyttää jäähdytteenä ylikriittistä hiilidioksidia (CO₂). Sillä voitaisiin saavuttaa 48% hyötysuhde 650 °C poistumislämpötilalla. Ero heliumin käyttöön olisi merkittävä. Heliumin käyttö on tällä hetkellä etusijalla. MIT (Massachusetts Institute of Technology) tutkii kuitenkin vaihtoehtoista, lämpöteholtaan 2400 MW olevaa GFR:ää, jonka jäähdytteenä toimisi hiilidioksidi. (Pope, 2006)

2.3 Reaktorifysiikka

GFR on kaasujäähdytteinen nopea reaktori, jonka toivotaan tuottavan ainakin yhtä paljon polttoainetta, kuin mitä se käyttää. Se on mahdollista fertiilien kaappausten avulla. Niissä esimerkiksi uraanin isotooppi ²³⁸U absorptoi neutronin, jolloin syntyy halkeava plutonium-239 ydin. Fertiili kaappaus tapahtuu seuraavasti:



Plutoniumin syntyyn johtavat beetahajoamiset tapahtuvat melko nopeasti. Uraani 239 puoliintumisaika on 23,5 minuuttia ja neptuniumin 56,5 tuntia. Näin ollen plutoniumia alkaa syntyään varsin nopeasti, kun reaktori käynnistetään. (Stacey, 2001)

Jotta fertiilejä kaappauksia saataisiin mahdollisimman paljon, pitää niitä aiheuttavia neutroneita olla runsaasti tarjolla. Neutroneita syntyy fission, ja syntyvien neutronien lukumäärä on riippuvainen fission aiheuttaneen neutronin energiasta. Absorptiota kohti syntyvien uusien neutronien lukumäärä saadaan yhtälöllä:

$$\eta = \frac{\nu\sigma_f}{\sigma_a} \quad (2)$$

η = absorptiota kohden syntyvien uusien neutronien lukumäärä

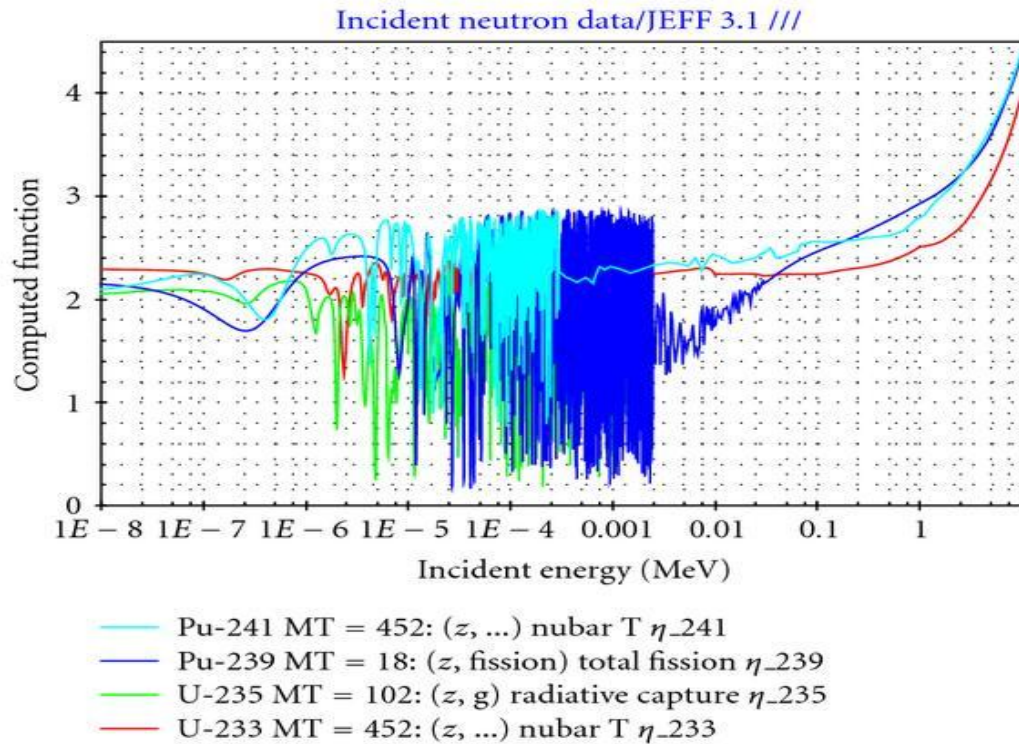
ν = neutronisaanti

σ_f = mikroskooppinen fission vaikutusala

σ_a = mikroskooppinen absorptiovaikutusala

Yhtälössä (2) esiintyvä vaikutusalojen suhde kertoo kuinka suuri osuus absorptioista on fission. Tämä suhde riippuu materiaalista, joten siihen ei voida vaikuttaa suunnittelussa muuten kuin muuttamalla polttoaineen koostumusta. Absorptiot koostuvat fission ja kaappauksista. Näin ollen yhtälössä (2) esiintyvä vaikutusalojen suhde saa arvoja väliltä 0-1. Jotta uusia neutroneita saataisiin mahdollisimman paljon, pitäisi arvon olla lähellä ykköstä. Neutronisaanti kertoo kuinka monta uutta neutronia keskimäärin syntyy yhdessä fission. Se on riippuvainen fission aiheuttavan neutronin energiasta sekä halkeavasta ytimeistä. Kuvassa 3 on esitetty neutronisaannin ja fission neutronin energian välistä suhdetta. Kuvasta nähdään arvon olevan vähän yli kaksi, kun ollaan termisellä alueella. Nopeissa reaktoreissa neutroneilla on kuitenkin suurempi energia. Kuvasta 3 nähdään kuinka neutronisaanti kasvaa voimakkaasti, kun neutronin energia on suurempi kuin 1 MeV. Energia-alueella 0,000001-0,001 MeV huomataan suurta heilahtelua neutronisaannissa. Tämä heilahtelu johtuu resonanssialueesta, jolla kaappauksen todennäköisyys kasvaa paljon. Näin

ollen absorptioista suuri osa onkin kaappauksia eikä fissioita. Samalla neutronisaanti tippuu.



Kuva 3. Fission aiheuttavan neutronin energian vaikutus uusien neutronien lukumäärään. (Van Rooijen, 2009)

Nopeissa reaktoreissa, joissa pyritään tuottamaan paljon uutta fissiiliä polttoainetta, tavoitellaan mahdollisimman suurta neutronivuota. Se parantaa laitoksen taloudellisuutta ja tehostaa polttoaineen käyttöä. Suuri neutronivuo kasvattaa samalla fissioiden määrää, joka johtaa suureen tehottiheyteen. Se voi olla kaasujäähdytteisillä nopeilla reaktoreilla luokkaa 300 MW/m^3 . Se on noin 3-4 kertaa suurempi kuin perinteisissä kevytvesireaktoreissa. (Van Rooijen, 2009)

Jäähdytteen valinnalla on suuri merkitys reaktorin neutronitaloudessa. On tavoiteltavaa pitää moderointi mahdollisimman pienenä, jolloin neutroneilla säilyy suuri energia. Muutenkin jäähdytteen toivotaan olevan passiivinen neutronien suhteen, jottei se absorboisi

neutroneita liikaa. Kevyet atomit, kuten helium, moderoivat tehokkaasti. Alhaisen tiheyden takia neutronien hidastuminen ei kuitenkaan ole liian suurta. (Van Rooijen, 2009)

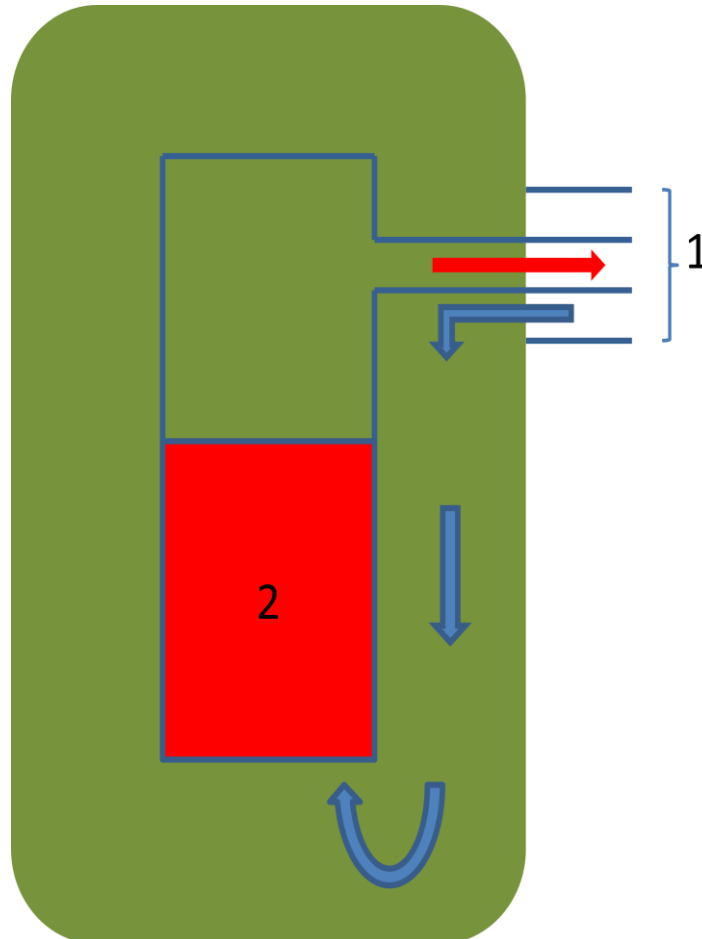
Kovan neutronispektrin seurauksena myös uraanin isotooppi 238 voi haljeta. Liitteenä (Liite 1) on kuva, jossa näkyy uraanin ja plutoniumin mikroskooppiset fissionvaikutusalat neutronien energian funktiona. Uraani-238 fissionvaikutusala saa nollasta poikkeavia arvoja, kun neutronien energia on hieman suurempi kuin 1 MeV. Näin ollen nopeissa reaktoreissa syntyy tehoa myös U-238 halkeamisten seurauksena.

Neutroneita katoaa sydäimestä fission, kaappausten ja vuotojen kautta. Vuotoja voidaan rajata asentamalla reaktorin reunalle heijastin, joka vaikeuttaa neutronien karkaamista. Heijastin voidaan rakentaa eri materiaaleista, kuten teräksestä tai vaikkapa grafiitista. Heijastin ei sisällä fissiiliä ainetta, joten siellä ei tapahdu halkeamisia. Heijastin kuitenkin absorboi osan sinne päätyneistä neutroneista. Loput joko vuotavat reaktorin ulkopuolelle tai palaavat sirontojen kautta takaisin sydämeen. Kuvassa 5, joka on tulevassa kappaleessa, on esitetty sydämen kokoonpano. Siinä näkyy myös heijastin, joka sijaitsee uloimmaisena.

2.4 Termohydrauliikka

Kaasujäähdytteisen nopean reaktorin suunnittelussa on erityisen tärkeää pohtia termohydrauliikkaa. Kaasujäähdytte eroaa muista muutamalla tärkeällä tavalla. Ensimmäinen lämpötilan lasku polttoaineen suojakuoresta jäähdytteeseen on suuri. Tämä johtuu jäähdytteen heikosta lämmönsiirtokyvystä. Suojakuoren pinta saattaa karhentua, mikä aiheuttaa ylimääräistä turbulenssia heliumin virtaukseen. Toisaalta hitaamman virtauksen kohdalla esiintyy rauhallisempaa, laminaarista virtausta. Virtaustyypit taas vaikuttaa lämmönsiirtolisiin arvoihin. Lämmönsiirto voi olla monikertainen alueella, jossa virtauksessa esiintyy turbulenssia. Erilaisten olosuhteiden läsnäolo lisää suunnittelun tarvetta ja vaikeuttaa sydämen termohydraulista laskentaa. (Waltar, 1981)

GFR:ssä käytetään jäähdytteenä siis heliumia, joka siirtää sydämessä syntyvän lämmön pois reaktorista. Kuvassa 4 on esitetty jäähdytteen virtaus painesäiliössä. Painesäiliö on kuvattu vihreänä.



Kuva 4. Jäähdytteen virtaus painesäiliössä.

Lämpöenergiansa lämmönsiirtimessä pois luovuttanut helium virtaa painesäiliöön pääputkiston ulkopintaa pitkin.. Sen jälkeen jäähdyte laskeutuu fissiilin osan alapuolelle. Sieltä helium ohjataan sydämen läpi, jossa se vastaanottaa fissioissa vapautunutta lämpöenergiaa. Sydän on merkitty kuvassa 4 numerolla 2. Kuumentunut helium ohjataan tämän jälkeen ulos reaktorista lämmönvaihtimelle.

Reaktorin suunnittelun ja toiminnan kannalta merkittävin kohta on heliumin virtaus sydämen läpi. Virtaus tapahtuu alhaalta ylöspäin. Näin ollen kuumentuneen heliumin tiheyden

muutos helpottaa kiertoa. Jos virtaus kulkisi ylhäältä alas, jouduttaisiin kasvattamaan pumppaustehoa, mikä kaasumaisen jäähdytteen kohdalla on muutenkin merkittävä.

2.5 Turvallisuusominaisuudet

Ydinvoimalaitoksien suunnittelussa ja käytössä onkin merkittävässä roolissa turvallisuus. Seuraukset voivat olla erittäin tuhoisat, jos onnettomuuden estämiseen ja hallintaan ei ole käytetty riittävää harkintaa. Laitoksien suunnittelussa onnettomuusarvioilla on suuri rooli. Esimerkkinä Suomessa käytettävät painevesireaktorit, joissa jäähdytteen menetyksen taajuus on suunnittelun rajaava tekijä. Onnettomuuden tapahtumatiheys on pidettävä riittävän alhaisena.

Mahdollisia onnettomuustyyppisiä on monia, kuten LOCA (Loss of coolant accident) tai säätösauvojen ulossinkoutuminen. Onnettomuus voi lisäksi johtua erilaisista syistä. Niitä ovat mm. laitevika tai vaikkapa operaattorin virheellinen toiminta. Kaasujäähdytteisten reaktorien kohdalla, on erityisen tärkeää keskittyä jäähdytteen menetyksen seurauksiin. Vaikka ketjureaktio saataisiin päättymään, syntyy sydämessä edelleen lämpöenergiaa fissiotuotteiden halkeamisen seurauksena. Kaasujen alhaisen lämpökapasiteetin vuoksi jäähdyte ei pysty sitomaan tarvittavaa määrää energiaa ja polttoaine alkaa kuumeta. Jos lämpötilaa ei saada pidettyä kurissa, voi sydän sulaa ja seurauksena on vakava ydinonnettomuus. Tämän vuoksi on syytä keksiä muitakin jäähdytyskeinoja.

CEA on tehnyt todennäköisyyksiin perustuvan turvallisuusanalyysin GFR reaktorista, jonka lämpöteho on 2400 MW. GFR on neljännen sukupolven reaktori, joten sen turvallisuuden oletetaan olevan ainakin niin hyvä kuin edeltäjiensä, esimerkiksi EPR:n (European pressurized water reactor). Tämä tarkoittaa että sydämen vaurioitumisen taajuus tulisi olla pienempi kuin 10^{-6} /vuosi. Turvallisuusanalyysiä on tarkoitus hyödyntää jatkossa GFR:n suunnittelussa. (Bassi et al, 2010)

Onnettomuuden sattuessa on aluksi tärkeää saada käynnissä oleva ketjureaktio loppumaan. Se onnistuu sauvoilla, jotka työnnetään reaktoriin. Ne absorboivat neutroneita tehokkaasti

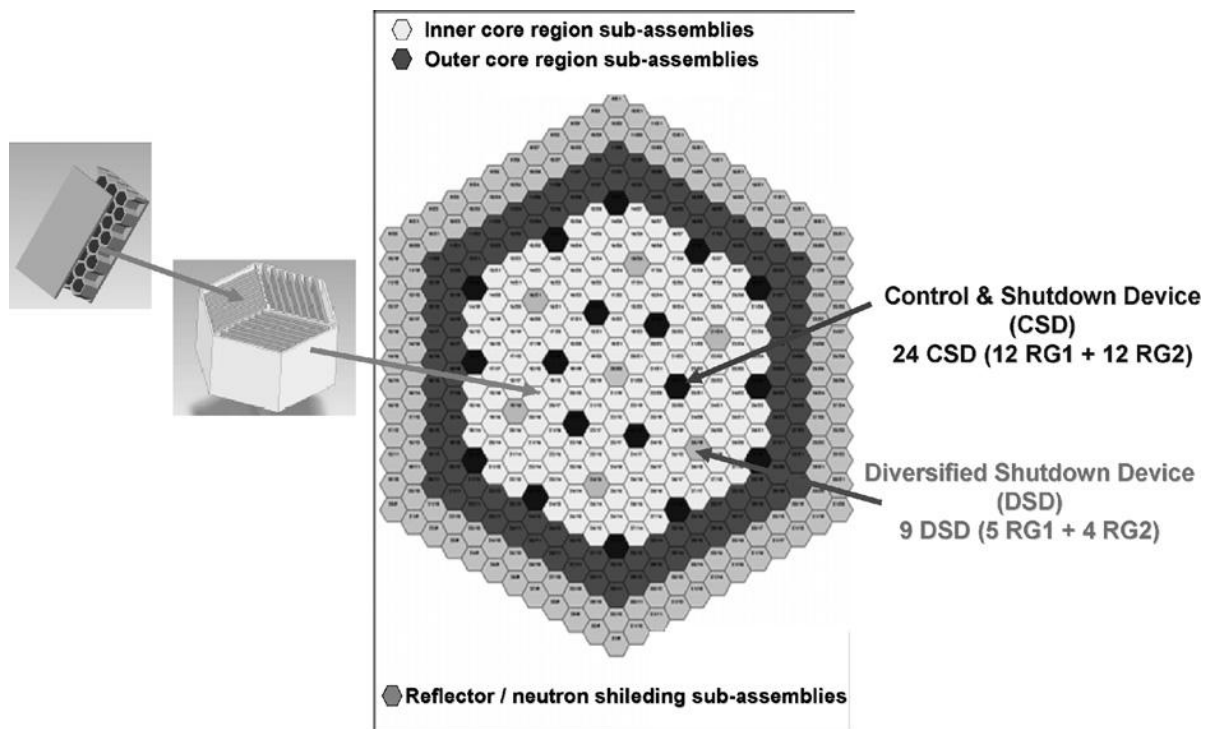
ja tekevät sydäimestä alikriittisen. GFR:ssä on kaksi erillistä sammutusjärjestelmää, jotka ovat mahdollisimman riippumattomia toisistaan. Järjestelmän pääpiirteet on omaksuttu EPR:stä (Bassi et al, 2010).

Kuvassa 5 on esitetty poikkileikkaus reaktorin sydäimestä. Siihen on merkitty kohdat, joissa sulkemisjärjestelmän sauvat sijaitsevat. Kuvasta nähdään, että sauvat on jaettu kahteen ryhmään: ensimmäinen on säätö- ja sammutusjärjestelmä. Se koostuu kahdesta osajärjestelmästä, joissa kummassakin on 12 sauvaa. Toinen on ensimmäisestä poikkeava varajärjestelmä, joka sisältää yhteensä 9 sauvaa. Säätö- ja sammutusjärjestelmä on sijoitettu reaktorin alapuolelle, kun taas varajärjestelmä sijaitsee painesäiliön yläpuolella. Säätösauvat on valmistettu boorikarbidista, jonka mikroskooppinen absorptiovaikutusala on suuri. Näin ollen se kaappaa neutroneita tehokkaasti. (Bassi et al, 2010)

Ydinvoimalaitosten suunnittelussa käytetään kolmea pääperiaatetta. Ensimmäinen on rinnakkaisperiaate (redundanssi). Sillä tarkoitetaan sitä, että laitokseen asennetaan useampi samaa tehtävää hoitava järjestelmä, joista jokainen pystyy yksinäänkin hoitamaan tarvittavan asian. Toinen tärkeä asia on erotteluperiaate. Sen perusteella järjestelmät sijoitetaan eri puolille laitosta. Näin esimerkiksi paikallinen tulipalo ei kaada koko toimintaa, vaan osa laitteista pystyy edelleen toimimaan. Kolmas periaate on erilaisuusperiaate (diversiteetti). Sen mukaan eri järjestelmillä on erilaiset käyttövoimat. Säätösauvoilla se tarkoittaa esimerkiksi sitä, että osa sauvoista saadaan reaktoriin sähkömoottorilla, osa painovoiman avulla ja osa vaikkapa paineistetun kaasun työntämänä. Tällaisella suunnittelulla voidaan kasvattaa laitoksen turvallisuutta huomattavasti. Kuvassa 5 on huomioitavaa kuinka säätö- ja sammutussauvat on sijoitettu sydämeen. Ne ovat siellä mahdollisimman tasaisesti. Lisäksi huomataan uloimmaisena oleva heijastin, jonka tehtävänä on mm. parantaa reaktorin neutronitaloutta.

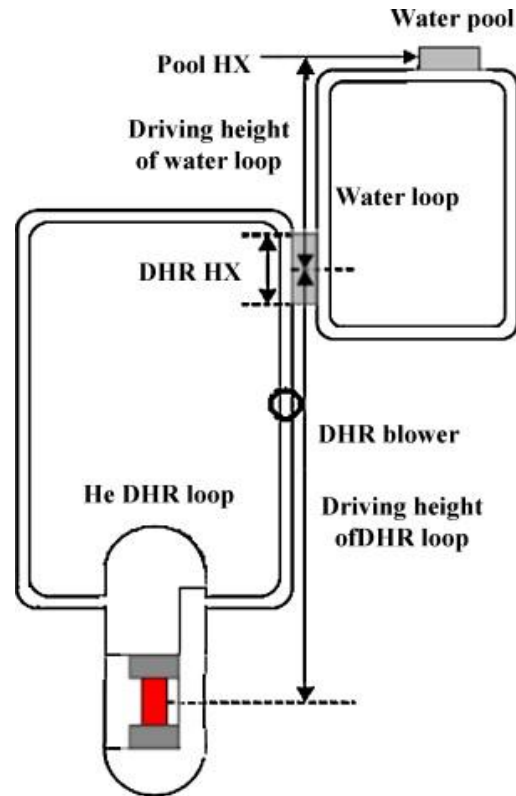
Kuten edellä todettiin, ei pelkkä ketjureaktion lopettaminen riitä turvaamaan laitoksen turvallisuutta. Halkeamistuotteet jatkavat spontaania halkeilemistään, ja tuottavat samalla jälkilämpöä. Tämä lämpöenergia on siirrettävä pois sydäimestä, jottei polttoaine vaurioidu. Jälkilämmön poistojärjestelmällä (DHR, decay heat removal) onkin suuri merkitys GFR:n

suunnittelussa. Perinteisissä painevesireaktoreissa on jäähdytteenä vesi, joka on kaasumaisia jäähdytteitä paljon tehokkaampi lämmönsiirtäjä. Vastaavasti PBMR:n (Pebble Bed Modular Reactor) sydän sisältää paljon grafiittia, jolla on suuri inertia. Kun vielä muistetaan GFR:n melko suuri tehotiheys (100 MW/m^3), ymmärretään ettei reaktori ole turvallinen ilman DHR-järjestelmää.



Kuva 5. Sydämen kokoonpano (Bassi et al, 2010)

GFR:n jälkilämmönpoistojärjestelmä koostuu kolmesta samanlaisesta korkeapaineluupista, joista jokainen pystyy yksistään poistamaan kaiken jälkilämmön. Kiertoaineena näissä piireissä on heliumi. Piiriin kuuluu myös toinen lämmönsiirrin, jonka toisella puolella on vettä. Veden kiertopiiriin kuuluu lopullinen lämpönielu, johon syntyvä energia vietään. Kuva 6 on esitetty yhden tällaisen kiertopiirin kuva. (Bassi et al, 2010)



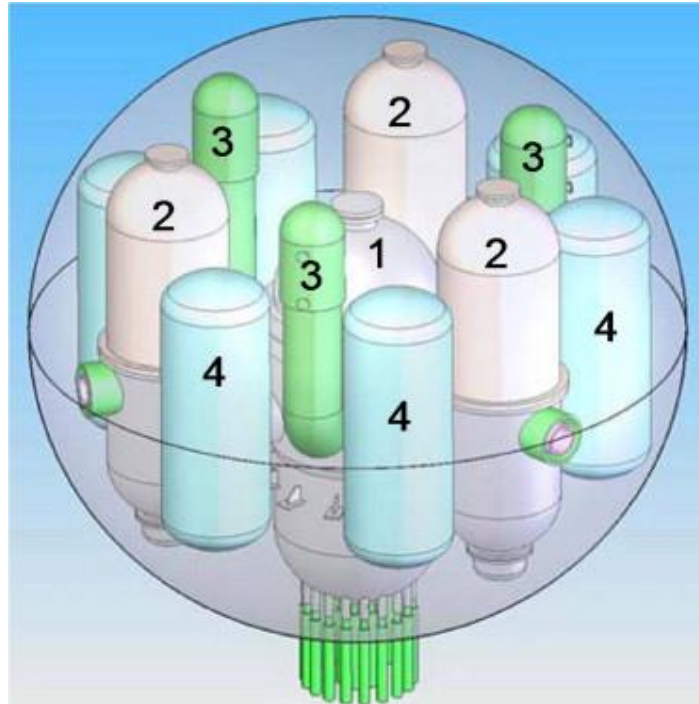
Kuva 6. Yhden DHR-luopin periaatekuva.(Epiney et al,2010)

Kuvaan on myös merkitty luonnonkiertoa helpottavat korkeuserot piireissä. DHR-piirin lämmönvaihtimen ja reaktorin välinen korkeusero on 15 metriä, kun taas DHR-lämmönvaihtimen ja lämpönielun välillä eroa on 10 metriä. Vesipiirin on suunniteltu toimivan luonnonkierrolla kaikissa olosuhteissa, joten sinne ei ole tarvetta asentaa pumppua. (Epiney et al, 2010)

Koko jälkilämmönpoistojärjestelmä ja painesäiliö ovat suuremman suljetun säiliön sisällä. Tämän säiliön painetta tarkkaillaan ja jos se nousee, tiedetään primääripiirin hajooneen. Kuvassa 7 on esillä koko järjestelmä. Kuvassa on painesäiliö numeroitu ykköseksi, päälämmönvaihtimet kakkoseksi, korkeapaine jälkilämmönsiirtäjät (RHP, reactor high pressure) kolmoseksi ja kaasuväriöt neloseksi. Kaasuväriöitä on kuusi kappaletta, kunkin tilavuus on 1000 m³ ja helium on niissä 75 bar:n paineessa (Epiney et al, 2010).

Korkeapaineiset DHR-piirit on suunniteltu toimimaan 4-70 bar:n paineessa. Jos sekä primääripiiri, että suuri säiliö hajoavat, paine putoaa alle 4 bar:n. Tämän takia on suunniteltu

matalapaine luuppi (RLP, reactor low pressure), jota ei ole kuvassa 7. Kyseisen luupin toimintapaine on 1-4 bar: a Siinä käytetään pakotettua kiertoa, jonka aiheuttaa sähkömoottorin pyörittämä puhallin. Varalle on tarkoitus asentaa kaasukäyttöinen puhallin. (Bassi et al, 2010)



Kuva 7. DHR-järjestelmän kokoonpano. (Epiney et al,2010).

Normaalin käytön aikana DHR-järjestelmät on eristetty reaktorista venttiileillä. Pikasulun tapahtuessa puhaltimet käynnistyvät. Muutaman sekunnin kuluttua päälämmönvaihtimet eristetään painesäiliöstä. Seuraavaksi DHR-järjestelmien venttiilit avautuvat ja kaasu alkaa kiertää niitä pitkin. Pienen hetken päästä puhaltimet siirtyvät kuormalle ja lämmönsiirto sydäimestä lopulliseen nieluun tehostuu. (Epiney et al, 2010)

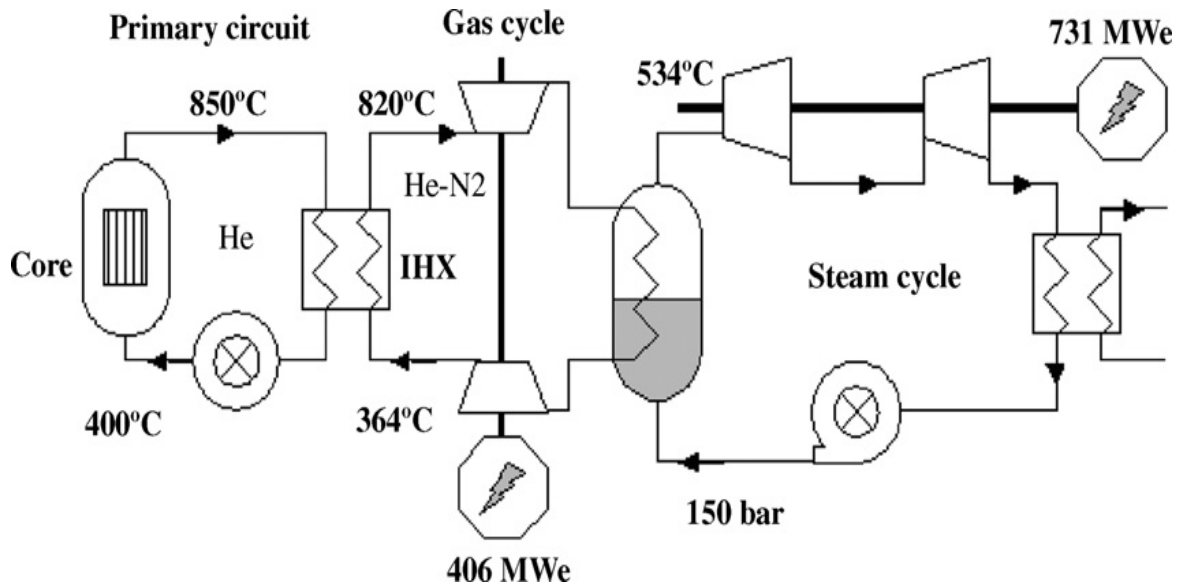
Suunnittelijat ovat pohtineet mahdollisuutta korvata helium lämmönpoistojärjestelmien kiertoaineena. Mahdollisia vaihtoehtoja ovat mm. typpi, hiilidioksidi, argon ja typen ja heliumin sekoitus. Näistä hiilidioksidilla on parhaat termohydrauliset ominaisuudet, mutta se saattaa reagoida muiden materiaalien kanssa, mikä ei ole toivottavaa. Seuraavaksi paras kandidaatti on typpi, joka on inertti kaasu. Näin ollen se ei reagoi ollenkaan. (Epiney et al, 2010)

3 GFR:N KÄYTTÖKOHTEET

Jäähdytteen korkean poistumislämpötilan ansiosta sähköntuotanto GFR:llä on vesijäähdytteisiä reaktoreita tehokkaampaa. Hyötysuhteissa voidaan päästä jopa lähellä 50%. Korkea lämpötila mahdollistaa myös muita käyttötapoja, kuten vedyn tuotannon. Vetyä kutsutaan energiankantajaksi, koska sitä tuottamalla energiaa voidaan varastoida ja käyttää, kun siitä on tarvetta. Tällä hetkellä sähkön kulutuksen ja tuotannon on oltava samalla tasolla. Erityisesti vety sopii hyvin kulkuneuvojen käyttövoimaksi. Uskonkin vedyn olevan tulevaisuudessa energia-alan kuuma puheenaihe, vaikka onhan se sitä jo nyt.

3.1 Sähkön tuottaminen

GFR:llä on mahdollista tuottaa sähköä nykyisiä ydinvoimalaitoksia paremmalla hyötysuhteella. Hyötysuhteen uskotaan olevan noin 45 % ja sitä on mahdollista vielä parantaa tehostamalla komponenttien toimintaa ja pienentämällä paineen pudotuksia (F. Carre, et al, 2010). Tarkoituksena on käyttää kolmea eri kiertopiiriä, jotka näkyvät kuvassa 8. Kuvasta x nähdään, että ensimmäisenä piirinä on heliumin kiertopiiri, jossa jäähdyte kiertää reaktorin läpi ja kuumenee samalla. Sen jälkeen se luovuttaa lämpönsä välipiiriin, jonka kiertoaineena on heliumin ja typen seos. Seos kulkee kahden turbiinin läpi ja luovuttaa lisäksi lämpöä kolmanteen piiriin. Siellä virtaa vesi, joka höyrystyy ja pyörittää höyryturbiinia. Turbiinit pyörittävät generaattoreita, jotka tuottavat sähköenergiaa.



Kuva 8. Epäsuorakierto (Dumaz et al 2007)

Sähkön tuottaminen hyvällä hyötysuhteella käyttäen heliumia jäähdytteenä vaatii korkean jäähdytteen poistumislämpötilan. Kuten edellä on huomattu suuret lämpötilat vaativat rakenteilta ja polttoaineelta kestävyyttä. (Pope, 2006)

3.2 Vedyn valmistaminen

Sähköä on vaikeaa varastoida suuria määriä tämän päivän tekniikoilla. Akuilla se onnistuu, mutta niiden kapasiteetti on rajallinen. Niinpä sähkönkulutuksen ja – tuottamisen pitää olla tasapainossa. Tästä tasapainottelusta päästään eroon tuottamalla energiankantajia, kuten vetyä. Vety voidaan varastoida ja käyttää myöhemmin, kun se on tarpeen. Vedyn tuottaminen fossiilisilla polttoaineilla ei ole suuressa mittakaavassa kannattavaa syntyvien hiilidioksidipäästöjen vuoksi. Tämän jälkeen vaihtoehdoiksi jää uusiutuva energia ja ydinvoima. Uusiutuvan energian käyttöä hidastaa korkea hinta. Lisäksi niistä saatava energiateho ei ole kovin suuri. Neljännen sukupolven ydinvoimalaitostyypeille, kuten GFR onkin kaavailtu roolia vedyn tuotannossa. Vetyä pystytään valmistamaan monella eri tavalla hyödyntämällä joko suoraan reaktorista saatavaa lämpöä tai sillä tuotettua sähköä.

Metaanin höyryreformointi on tällä hetkellä eniten käytetty vedyn tuotantotapa. Siinä metaani reagoi veden kanssa ja saa aikaan vetyä ja hiilidioksidia. Prosessin haittapuolena on syntyvä hiilidioksidi, joka on kasvihuonekaasu. Reformointi saadaan käyntiin 500-800 °C lämpötilassa, jos reaktion katalyyttinä käytetään nikkeliä. Nikkeli nopeuttaa vedyn syntymistä merkittävästi. (Kugeler, 2004)

Elektrolyysi on toinen mahdollinen ja käytetty vedyn valmistustapa. Höyryreformointiin verrattuna elektrolyysin ehdoton etu on sen saasteettomuus. Elektrolyysissä veteen johdetaan sähkövirta, mikä saa vedyn ja hapen erkaantumaan toisistaan. Prosessin hyötysuhdetta voidaan parantaa käyttämällä suurempaa lämpötilaa. Tästä on esimerkkinä höyryelektrolyysi, joka saadaan aikaan 800-1000 °C lämpötilassa. Elektrolyysillä tuotettu vety on erittäin puhdasta. Taloudellisuudessa se kuitenkin häviää metaanin höyryreformoinnille. Elektrolyysiä kannattaa käyttää mikäli tarvittavan vedyn määrä ei ole kovin suuri. (Vetyteknologiat, 2004)

Erilaisia termokemiallisia syklejä vedyn valmistamiseksi tunnetaan nykyään satoja. Niistä yhteensopivin ydinvoiman kanssa käytettäväksi on ehkä jodi-rikki sykli. Siinä käytetään useita peräkkäisiä reaktioita ja päädytään lopulta puhtaaseen vetyyn ja jodiin. Suurin syklissä tarvittava lämpötila on noin 800-900 °C. Tätä menetelmää on testattu Japanissa korkean lämpötilan kooreaktorilla vuonna 1999. Normaaliolosuhteiden hanketta on myös suunniteltu. (Kugeler, 2004)

4 TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Uudentyyppisen ydinvoimalaitoksen suunnittelu ja lopulta rakentaminen vaatii valtavia määriä erilaisia resursseja. Aluksi tarvitaan paljon suunnittelua ja tutkimustyötä. Tässä kohtaa voi toki käyttää hyödyksi jo olemassa olevien reaktorityyppien samankaltaisuuksia, kuten GFR:ssä hyödynnettiin VHTR:ää. Kun laitoksen käyttäytymistä on tutkittu riittävästi laskelmien avulla, voidaan rakentaa testilaitteistoja, joilla pyritään saamaan lisää tärkeää tietoa. Myöhemmin rakennetaan mahdollisesti demonstraatiolaitos, joka muistuttaa jo enemmän valmista laitosta. Viimeistään tässä vaiheessa tarvitaan uskoa ja luottamusta re-

aktorityypin tulevaisuuteen, koska demonstraatiolaitoksen rakentaminen vaatii huomattavan taloudellisen panostuksen.

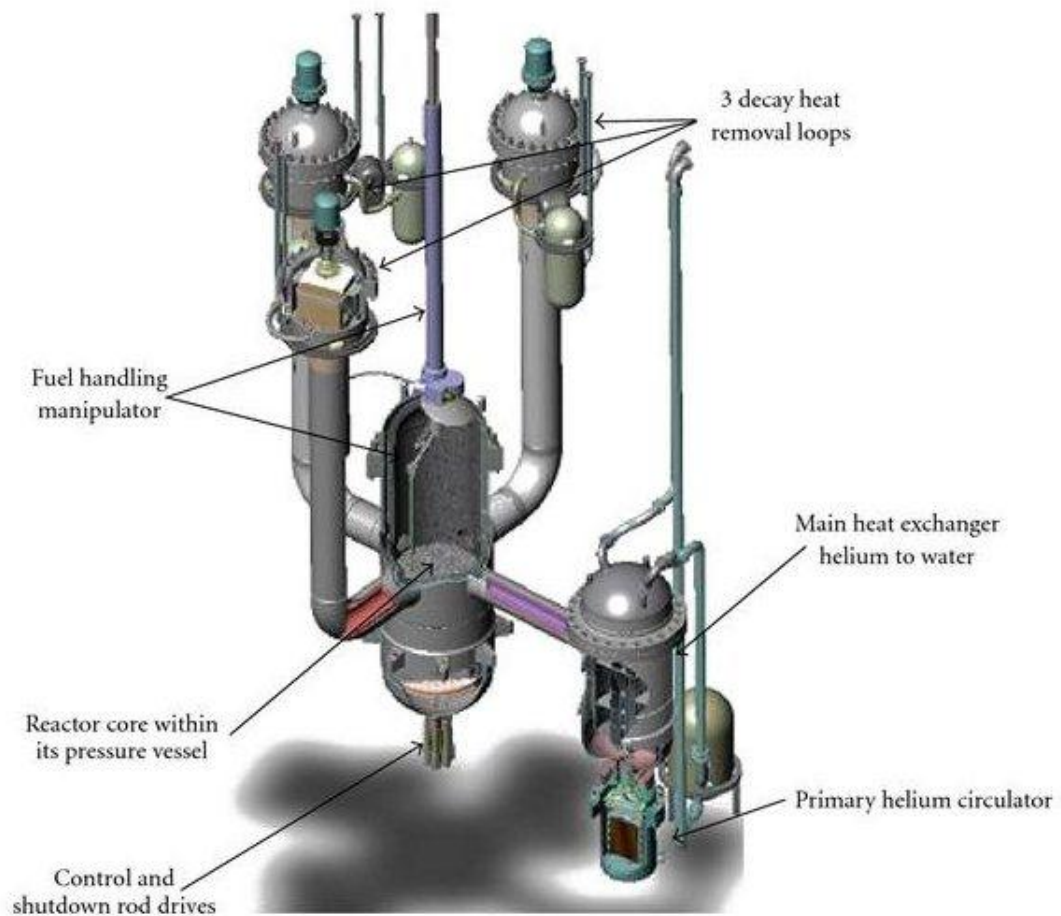
GFR:n kehitys alkoi Euroopassa todenteolla vuonna 2000, kun Euroopan Komissio pani alulle kaasujäähdytteisen nopean reaktorin projektin. Tämän seurauksena Euroopan maiden aikaisempi tietämys reaktorityypistä jaettiin muiden maiden kesken. Näin saatiin kaasaan valtava määrä tutkimus- ja käyttötietoa erilaisista reaktoreista. (Stainsby et al, 2009)

GFR:n termohydraulisten ominaisuuksien selvittämiseksi CEA rakensi testilaitteiston. Testilaitteistolle oli tarvetta, koska olemassa oleviin korrelaatioihin ei voitu luottaa tarpeeksi ja oli saatava jonkinlainen numeerinen laskumalli, esimerkiksi paineen pudotukselle sydämessä sekä lämmönsiirtokertoimille. Laitteiston oli tarkoituksenaan olla tuottamaan tietoa, jotta demonstraatiolaitos Allegro voitaisiin myöhemmin rakentaa. (Berthoux, 2010)

Testilaitteisto oli pienempi kuin suunniteltu Allegro, mutta tämä huomioitiin tuloksissa. Lisäksi kokeet tehtiin ilmalla, eikä heliumilla. Laitteistolla testattiin mm. erilaisten polttoainetyyppien vaikutusta paineen pudotukseen, kun virtaus käy laitteiston läpi. Tavoitteena tietysti oli saada pudotus mahdollisimman pieneksi. Näiden testituloksien pohjalta arveltiin, että suurempien GFR-reaktorien ongelma saattaa olla epästabiilius transientti tilanteissa. Tuloksein pohjalta rakennettiin numeerinen laskentamalli, josta on hyötyä jatkossa. (Berthoux, 2010)

Demonstraatiolaitos Allegron rakentaminen tapahtuu näillä näkymin vuosien 2014 ja 2022 välisenä aikana Rahoitus hankkeelle tulee GEN 4 kansainvälisen forumin kautta. Siihen kuuluvat Ranska, Japani, Sveitsi ja EU. (World Nuclear News, 2010)

Tšekin tasavalta, Unkari ja Slovakia ovat sopineet yhteistyöstä Allegron valmistelu projektissa. Valmistelu vie kahdesta kolmeen vuoteen ja siihen kuuluu mm. Allegron sijoituspaikan ja projektin organisaation valinta. (World Nuclear News, 2010)



Kuva 9. Allegro (World Nuclear News, 2010)

Allegron suunnittelun pääpiirteet valmistuivat vuonna 2005. Laitoksen lämpötehoksi on valittu 80 MW. Prosessiin ei liitetä turbiinia, joten sähköä ei tuoteta ollenkaan (Anzieu et al, 2009). Kuvassa 9 on esillä Allegron pääkomponentit. Kuvasta nähdään, että reaktorissa syntyvä lämpö siirretään yhden pystylämmönvaihtimen avulla ulos sydäimestä. Heliumia kierrättävä primääripiirin puhallin on sijoitettu lämmönvaihtimen alapuolelle. Reaktorin kyljestä lähtee kolme muutakin yhdettä, ne ovat jälkilämmön poistoon liittyviä looppeja. Lisäksi kuvasta huomataan säätösauvat jotka sijaitsevat reaktorin alapuolella.

5 YHTEENVETO

Ydinvoima on merkittävässä roolissa monen maan energiahuollossa. Sillä saadaan tuotettua hinnaltaan kilpailukykyistä sähköä. Menneiden vuosien onnettomuudet ovat joissain maissa saattaneet ydinvoiman käytön kyseenalaiseksi, mutta esimerkiksi Suomessa tulevaisuuden energiasta yhä suurempi osa tullaan tuottamaan fissioilla. Siitä kertovat tuoreet periaatepäätökset uusille voimaloille. Ydinenergian puolesta puhuu sen päästöttömyys verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. EU kiristää jäsenmaidensa päästökiintiöitä, mikä pakottaa miettimään vaihtoehtoisia ratkaisuja. Monen maan, kuten Suomenkin oloissa aurinko- ja tuulivoimalla ei kateta sähköntarvetta. Uskonkin ydinvoiman olevan tulevaisuudessa yhä merkittävämmässä roolissa.

Maapallon uraanivarat eivät ole loppumattomat. Sen takia on tärkeää ottaa varoista kaikki mahdollinen hyöty irti. Nopeilla reaktoreilla, kuten GFR, on mahdollista tuottaa uutta polttoainetta fertiilien kaappausten avulla. Tavoiteltavaa on, että uutta polttoainetta syntyy enemmän kuin mitä kulutetaan. GFR:ssä syntyy kevytvesireaktoreihin verrattuna paljon energiaa ^{238}U halkeamisista. Tämäkin kasvattaa uraanivarojen tehokasta käyttöä.

Ydinjäte on välttämätön paha, kun tuotetaan energiaa fissioilla. Fissiotuotteet jatkavat spontaania hajoamistaan vielä pitkään reaktorista poistamisen jälkeen. Monet ydinvoiman vastustajat perustelevatkin kantaansa ydinjätteen pitkäikäisyydellä. GFR:n avulla on mahdollista lyhentää käytetyn polttoaineen säteilyaikaa. Säteilytyksessä aktinidit muuttuvat muiksi alkuaineiksi, joilla on lyhyemmät puoliintumisajat.

Kuluu kuitenkin varmasti vielä pitkä aika ennen kuin rakennetaan kaupallisen kokoluokan kaasujäähdytteinen nopea reaktori. Tällä hetkellä ollaan vaiheessa, jossa suunnitellaan demonstraatiolaitos Allegroa. Sen käytöllä pyritään saamaan käytännön kokemuksia reaktori-tyyppin käyttäytymisestä. Ongelmana ovat etenkin jäähdytteenmenetyksen seuraukset, jotka ovat rankemmat, koska kyseessä on kaasumainen jäähdyte. Syntyvän jälkilämmön poistaminen sydäimestä on oltava turvattu joka tilanteessa, jotta laitosta olisi turvallista käyttää.

Uskon todella, että GFR on tulevaisuudessa merkittävässä roolissa maailman energian tuotannossa. Ensin sen on kuitenkin vakuutettava investoijat ja poliitikot. GFR:n laajat käyttömahdollisuudet toimivat varmasti kiinnostuksen kasvattajana, kun etsitään rahoitusta laitokselle. Sähköntuotanto on GFR:llä painevesireaktoreita tehokkaampaa ja samalla myös taloudellisesti kannattavampaa. Päättäjät voidaan saada asian puolestapuhujiksi, kunhan vakuutetaan GFR:n olevan turvallinen käyttää.

LÄHTEET

A. Epiney, K. Mikityuk, R. Chawla, Heavy-gas injection in the Generation IV gas-cooled fast reactor for improved decay heat removal under depressurized conditions, 2010, [viitattu 16.1.2011]

A. E. Waltar, A. B. Reynolds, Fast breeder reactors, 1981, [viitattu 26.1.2011]

C. Bassi, Ph Azria ja M. Balmain, Level 1 probabilistic safety assessment to support the design of the CEA 2400 MWth gas-cooled fast reactor, 2010, [viitattu 15.1.2011]

F. Carre, P. Yvon, P. Anzieu, N. Chauvin ja J. Malo, Update of the French R&D strategy on gas-cooled reactors, 2010, [viitattu 13.1.2011]

K. Kugeler, Alternative Energietechniken, Vorlesungsskript SS 2004, [viitattu 10.1.2011]

L. Brunel, N. Chauvin, T. Mizuno, M.A. Pouchon ja J. Somers, "The Generation IV Project" GFR fuel and other core materials", 2009 [viitattu 15.1.2011]

M.A. Pope, P. Hejzlar ja M.J. Driscoll, Thermal Hydraulics of a 2400 MWth Supercritical CO₂-Direct Cycle GFR, 2006, [viitattu 15.1.2011]

M. Berthoux, T. Cadiou, The thermal hydraulics in a rod bundle representative of the start-up core of the ALLEGRO Gas cooled Fast Reactor—Experimental and numerical approaches, 2010, [viitattu 15.1.2011]

N. Huynh, IAEA INPRO:HTGR-reaktorihankkeet, 2005 [vitattu 13.1.2011]

Nuclear Production of Hydrogen Second Information Exchange Meeting, Argonne Illinois, USA, 2003, [viitattu 13.1.2011]

P. Anzieu, R. Stainsby ja K. Mikityuk, Gas-cooled fast reactor(GFR): overview and perspectives, 2009, [viitattu 16.1.2011]

P. Dumaz, P. Allegre, C. Bassi, T. Cadiou, A. Conti, J.C. Garnier, J.Y. Malo ja A. Tosello, Gas-cooled fast reactors- Status of CEA preliminary design studies, 2007, [viitattu 14.1.2011]

P. Petkevich, K. Mikityuk, P. Coddington ja R. Chawla, Development and benchmarking of a 2D transient thermal model for GFR plate-type fuel, 2007, [viitattu 15.1.2011]

R. Stainsby, K. Peers, C. Mitchell, C. Poette, K. Mikityuk ja J. Somers, Gas cooled fast reactor research and development in the European union, 2009, [viitattu 14.1.2011]

Trevor Q. Foley, Travis W. Knight, Fuel cycle analysis of GFR using advanced fuels, 2009, [viitattu 16.1.2011]

VetyteknologiaTfy-56.170 Ydin ja energiatekniikan seminaari, kevät 2003Raportti TKK-F-B195 [viitattu 13.1.2011]

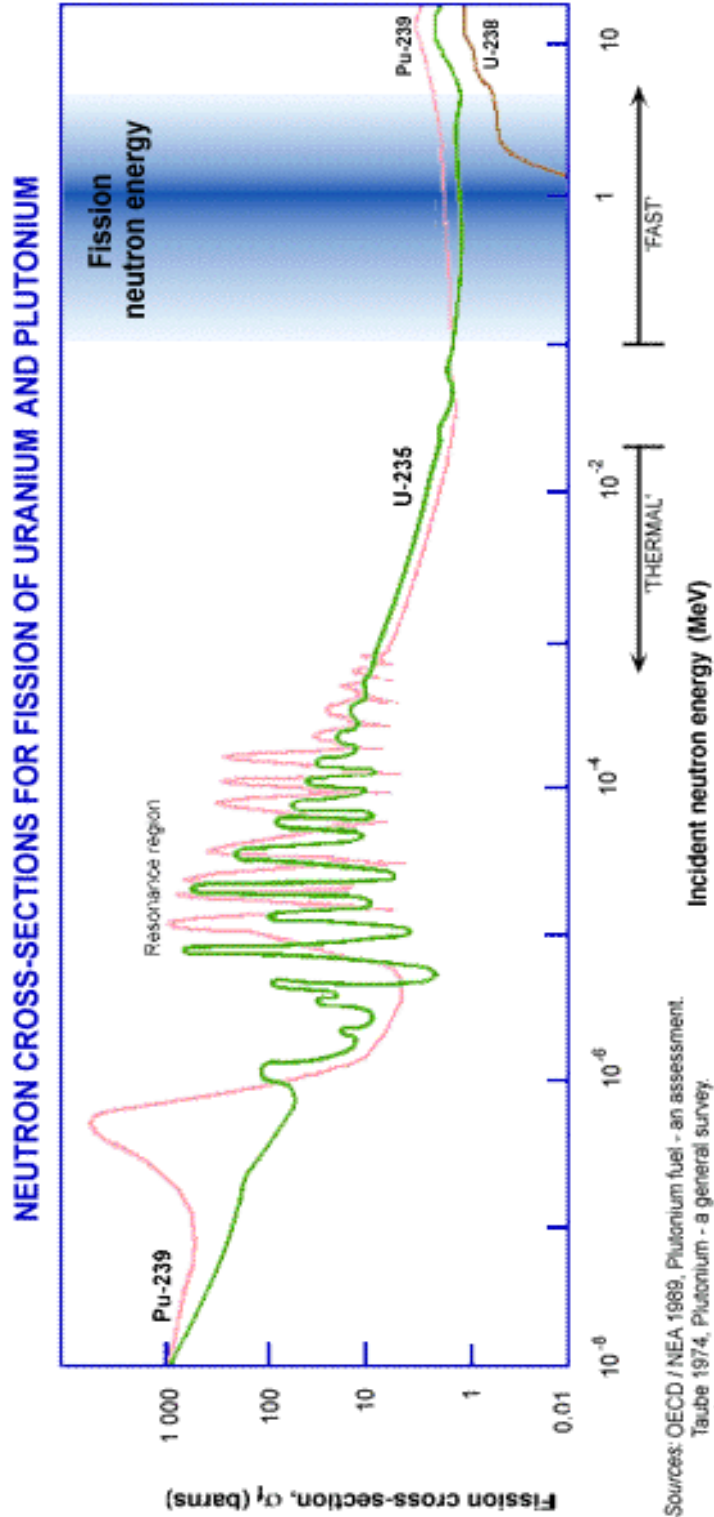
W. M. Stacey: Nuclear Reactor Physics, Wiley, 2001, [viitattu 15.1.2011]

W. F. G. Van Rooijen, Gas-cooled fast reactor: A historical overview and future outlook, 2009, [viitattu 26.1.2011]

World Nuclear News, Countries move to host Allegro reactor, 2010, [viitattu 25.12.2010]

Saatavissa:http://www.world-nuclear-news.org/NN_countries_move_to_host_Allegro_reactor_2805101.html

Liite 1. MIKROSKOOPPINEN FISSIOVAIKUTUSALA NEUTRONIN ENERGIAN FUNKTIONA (lähde: <http://www.uic.com.au/uicphys.htm>)



Sources: OECD / NEA 1989, Plutonium fuel - an assessment.
 Taube 1974, Plutonium - a general survey.
 1 barn = 10^{-28} m², 1 MeV = 1.6×10^{-13} J

