

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Kiihdytinpohjaiset reaktorit

Accelerator-driven reactors

Työn tarkastaja: Heikki Suikkanen

Työn ohjaaja: Heikki Suikkanen

Lappeenrannassa 2019

Ville Pitkänen

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Ville Pitkänen

Opinnäytteen nimi: Kiihdytinpohjaiset reaktorit

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2019

32 sivua, 13 kuvaa

Hakusanat: alikriittinen reaktori, kiihdytinpohjainen reaktori, transmutaatio, suljettu polttoainekierto

Tässä kandidaatintyössä kuvaillaan kiihdytinpohjaisen reaktorin perusrakenne ja sen mahdollisia käyttökohteita osana polttoainekiertoa. Kiihdytinpohjaisella reaktorilla tarkoitetaan alikriittistä ydinreaktoria, joka tuottaa osan ydinreaktioon tarvittavista neutroneista ulkoisen hiukkaskiihdyttimen avulla. Tämä reaktorityyppi voidaan suunnitella turvallisemmaksi, kuin nykyiset markkinoilla olevat reaktoriratkaisut ja lisäksi sille voidaan suunnitella useita hyödyllisiä sovelluksia polttoainetalouden sekä pitkäikäisen ydinjätteen transmutaation osalta.

Reaktorityypin kaupallistamisen haasteena on epävarmuus teknisten ratkaisujen taloudellisuudesta. Hiukkaskiihdyttimen on oltava voimakastehoinen, tarkka ja luotettava eikä kansainvälisellä tiedeyhteisöllä ole vielä tarpeeksi tutkimustietoa voimakastehoisten hiukkaskiihdyttimien soveltuvuudesta pitkäaikaiseen kaupalliseen käyttöön. Myös reaktorityypin lopullinen käyttötarkoitus on vielä avoin, sillä on vielä epävarmaa soveltuvatko kiihdytinpohjaiset reaktorit parhaiten ensisijaisesti sähkön tuotantoon, ydinjätteen transmutaatioon tai näiden kahden yhdistelmään. Viimeaikaiset suurten ydinvoimaprojektien viivästymiset on myös vähentänyt alan toimijoiden halua investoida isoihin voimalaratkaisuihin. Kiihdytinpohjaisten reaktorien tulevaisuus riippuu muutaman isomman projektin onnistumisesta ja näissä parissa toimivien tahojen kyvystä ratkaista kohtaamiaan teknillisiä ja taloudellisia haasteita.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNYSLUETTELO	4
1 JOHDANTO	6
2 KIIHDYTINPOHJAISEN REAKTORINJÄRJESTELMÄN TEKNIikka	8
2.1 Hiukkaskiihdytin	9
2.2 Sirontakohde.....	11
2.3 Reaktori	12
2.4 Ydinturvallisuus	14
3 POLTTOAINEKIERTO	16
3.1 Polttoainekierron strategiat.....	16
3.2 Transmutaatio polttoainekierrossa	17
3.3 Polttoainekierron kustannukset	21
3.4 Jätehuolto.....	23
4 SUUNNITTEILLA OLEVAT KIIHDYTINPOHJAISET REAKTORIJÄRJESTELMÄT	25
4.1 Eurooppa	25
4.2 Intia.....	26
4.3 Kiina	27
4.4 Etelä-Korea.....	28
5 YHTEENVETO	30
LÄHDELUETTELO	31

SYMBOLI- JA LYHENNYSLUETTELO

Roomalaiset aakkoset

e	energia	J
F	reaktorikohtainen kerroin	
i	virta	A
k	reaktorin kasvutekijä	
L	häviöt	
M	kokonaismassa	kg
M	neutronien kertoma	
P	teho	W
R	osuus	
ν	neutronien tuotanto	

Kreikkalaiset aakkoset

δ	fissio-osuus
τ	transuraanisten osuus polttoaineesta

Lyhenteet

ADS	Accelerator-driven system
BM	Bending magnet
CIADS	China initiative accelerator driven system
EEC	Electric extraction channel
EIC	Electric injection channel
FCA	Flat-top cavity
FDM	Focusing doublet
FM	Focusing magnet
HLM	Heavy liquid metal
HYPER	Hybrid power extraction reactor
IADS	Indian accelerator driven system
LBE	Lead-bismuth eutectic
MA	Minor actinides
MCA	Main cavity

MIC	Magnetic injection channel
MYRRHA	Multi-purpose hybrid research reactor for high-tech applications
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
TRU	Transuranium

Alaindeksit

f	fissio
sp	sironta

1 JOHDANTO

Tässä työssä käydään läpi kiihdytinpohjaisen reaktorin perusrakenne ja kuvaillaan mahdollisia käyttökohteita osana polttoainekiertoa. Kiihdytinpohjaiset reaktorit ovat alikriittisiä ydinvoimalan reaktoreita, joiden toiminta perustuu fissioon tarvittavien neutronien tuottamiseen voimakkaan hiukkaskiihdyttimen luoman protonisäteiden avulla. Kiinnostus tällaisen reaktorityypin rakentamiseen heräsi 90-luvulla kun Nobelin voittanut fyysikko Carlo Rubbia alkoi tutkimaan kiihdytinpohjaisten reaktorien rakentamisen mahdollisuuksia. Kiihdytinpohjaisen reaktorin mahdollisina käyttökohteina nähdään joko suora sähköntuotanto nykyistä turvallisemmalla tavalla tai ydinjätteiden pitkäikäisyyden ja radiotoksisen haitallisuuden vähentäminen transmutaation avulla. On myös mahdollista että valmistuneet voimalat onnistuvat saavuttamaan molemmat käyttötarkoitukset samanaikaisesti. (Sandberg. 2004, 77-78)

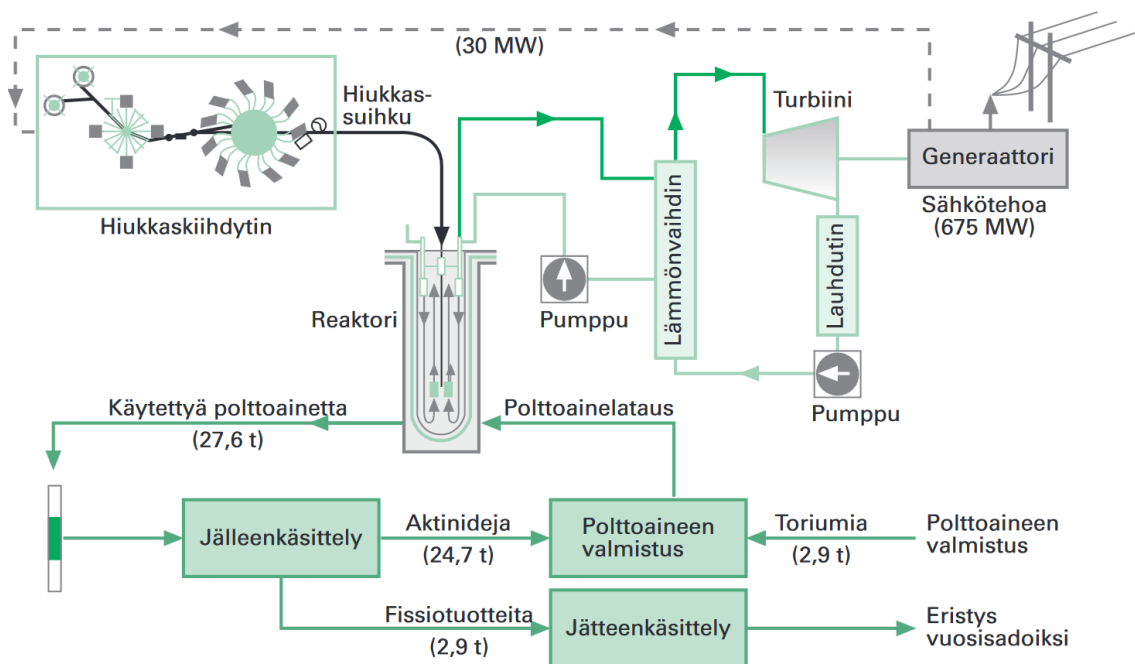
Kiihdytinpohjainen reaktorijärjestelmä sisältää merkittäviä eroja verrattuna nykyisiin käytössä oleviin ydinvoimalaitoksiin. Voimalaitoksen ydinreaktori on alikriittinen eli se tarvitsee ulkoisen neutronilähteen jotta reaktorin teho ei laske. Useimmissa suunnitelmissa ulkoisena neutronilähteenä toimii raskas metalli tai metalliseos, jota ammutaan lineaarisen tai spiraalinmuotoisen hiukkaskiihdyttimen protonisäteellä ylimääräisten neutronien sirpaloittamiseksi kohti fissioituvia torium- tai uraaniytimiä. Hiukkassäde, joka lähes kaikissa ehdotetuissa suunnitelmissa on jatkuvatoiminen protonisäde, vaatii energiaa noin 0,6-1 GeV, mikä vaatii merkittävän osan reaktorin sähkötehosta ja näin heikentää voimalaitoksen energiantuotannon hyötysuhdetta.

Kalliin hiukkaskiihdyttimen ja heikomman hyötysuhteen vastineeksi kiihdytinpohjaiset reaktorit tarjoavat korkeamman ydinturvallisuuden reaktiivisuusonnettomuuksissa verrattuna nykyisiin käytössä oleviin kevytvesireaktoreihin, mahdollistavat torium-uraani-233 -syklin käytön polttoaineen tuotannossa sekä sallivat joustavuuden reaktorin päivittäisessä operoinnissa. Lisäksi reaktoria on mahdollista käyttää transmutoimaan ydinjätettä vähentäen sen radiotoksista haitallisuutta. (OECD NEA. 2002, 43-44)

2 KIIHDYNTIPOHJAISEN REAKTORIJÄRJESTELMÄN TEKNIikka

Kiihdytinpohjaiset reaktorit toimivat nykyisen käytössä olevista reaktoreista poiketen alikriittisinä, niin että ketjureaktion ylläpitämiseen tarvittavat neutronit saadaan ulkopuolisen lähteen avulla. Ulkopuolisena lähteenä toimii hiukkaskiihdytin, josta lähtevä korkeaenerginen protonisäde osuu reaktorissa olevaan raskasatomiseen kohteeseen. Tästä kohteesta irtoaa sironnaksi kutsutulla ilmiöllä ketjureaktion jatkumiseen tarvittavat neutronit. Sähköntuotannon lisäksi tämä reaktorikonsepti on herättänyt suurta mielenkiintoa ydinjätteiden jälleenkäsittelyn saralla, sillä kiihdytinpohjaisilla reaktorijärjestelmillä on mahdollista transmutoida ydinjätettä lyhytikäisempään tai vakaampaan olomuotoon. (BARC, 145-146)

Kiihdytinpohjaisen reaktorijärjestelmän (Accelerator-driven system, ADS) yleisrakenne esitellään kuvassa 2.1

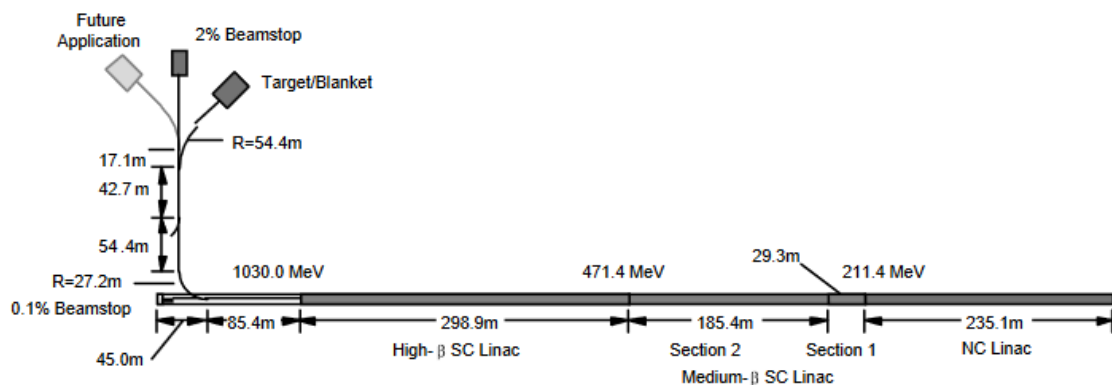


Kuva 2.1. Pitkäikäisten ydinjätteiden hävittämiseen soveltuva toriumpohjainen ADS (Sandberg 2004)

2.1 Hiukkaskiihdytin

Alikriittisen reaktorin tarvitsemien neutronien aikaansaamiseksi täytyy siroutumiskohteeseen kohdistaa 600-1000 MeV protonisäde. Tämä säde saadaan aikaan hiukkaskiihdyttimen avulla. Ehdotettuja kiihdytinratkaisuja on kahdentyypisiä: Lineaarikiihdyttimiä ja syklotroneja. Suurin osa nykyisistä reaktorikonsepteista perustuu lineaarikiihdyttimien käyttöön.

Lineaarikiihdytin on nimensä mukaisesti lineaarinen eli protonisäde kulkee vain kerran kiihdytinrakenteen läpi kuten kuvassa 2.2 nähdään. Se sisältää satoja mikroaaltotaajuudella toimivia sähkömagneettisia kiihdyttimiä, joista jokainen kiihdyttää protonisädettä muutaman MeV verran. Tämän vuoksi lineaarikiihdyttimien koko kasvaa samassa suhteessa tehon kanssa ja niistä tulee helposti epäkäytännöllisen suurikokoisia; 1 GeV lineaarikiihdytin on jo useita satoja metrejä pitkä. Lineaarikiihdytin on kuitenkin pienempikokoista syklotronia yksinkertaisempi rakentaa ja protonisäteen häviöt ovat pienempiä koska säteen suuntaa ei jouduta muuttamaan. Tämän vuoksi se on syklotronia yleisempi valinta kiihdytinpohjaisen reaktorijärjestelmän hiukkaskiihdyttimeksi.

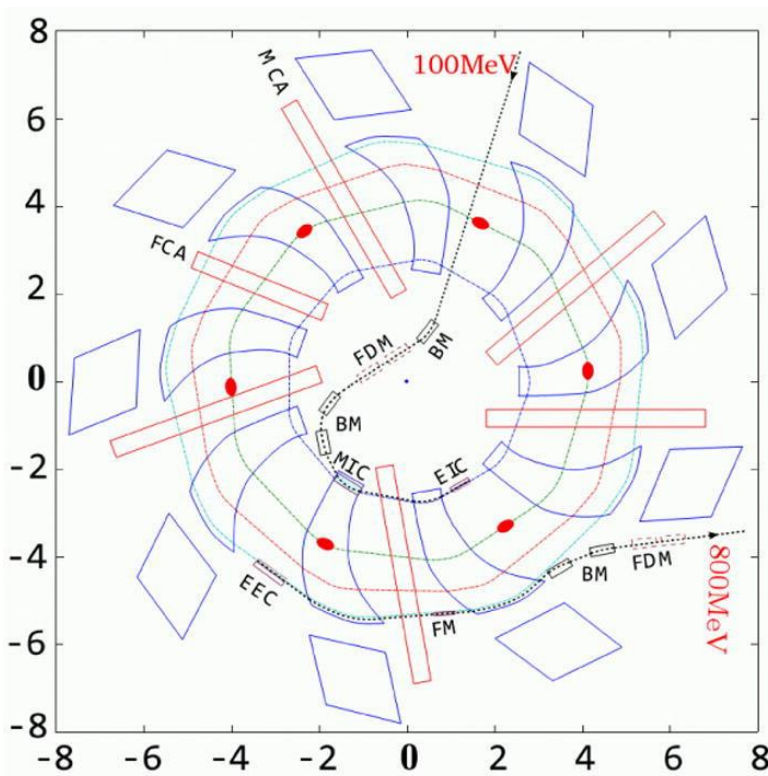


Kuva 2.2. Yhdysvaltalainen APT-lineaarikiihdytin (OECD NEA 2005)

Syklotroni saa nimensä spiraalin muotoisesta radasta, minkä protonisäde kulkee matkallansa syklotronin läpi. Syklotronissa magneetit on sijoitettu niin, että niiden luoma magneettikenttä saa protonisäteen kiihtyvään liikkeeseen kasvattaen protonisäteen energiaa sen kulkiessa magneettikentän läpi. Spiraalimuotonsa vuoksi se voidaan

mahduttaa fyysisesti pienempään tilaan kuin lineaarinen kiihdytin, mutta rakentamisessa on useita teknisiä lisähaasteita lineaarikiihdytimeen verrattuna. Syklotronin muotoilu vaatii hyvin sijoitettuja heijastimia estääkseen liialliset säteen häviöt, mikä vaikeuttaa suunnittelua ja minkä vuoksi pienikokoisia syklotroneja rakennetaan usein sarjana, jotta haluttuun energiatasoon päästään. Nykyisellä teknologialla 1 GeV korkeammat protonisäteen energiatasot ovat epäkäytännöllisiä ja siksi useimmat syklotronit suunnitellaan korkeintaan energiatasolle 1 GeV. (OECD NEA. 2005 9-12)

Syklotroni on havainnoillistettu kuvassa 2.3 Kuvassa näkyy syklotroniin kulkeutuvan 100 MeV protonisäteen reitti. Se ohjataan taittavan magneetin (Bending magnet, BM) ja keskittävän dubletin (Focusing doublet, FDM) avulla magneettiseen- ja sähköiseen syöttökanavaan (Magnetic injection channel, MIC & Electric injection channel, EIC). Tämän jälkeen protonisäde kiihtyy syklotronissa haluttuun 800 MeV energiatasoon, jonka jälkeen se ohjautuu ulos syklotronista sähköisen poistokanavan (Electric extraction channel, EEC) ja keskittävän magneetin (Focusing magnet, FM) kautta. Kuvattuna on myös pääonkalot (Main cavity, MCA) ja tasaisen yläosan onkalot (Flat-top cavity, FCA) (Zhang et al. 2011)



Kuva 2.3. Kiinalaisen 800 MeV syklotronin magneettisijoittelu (Zhang et al. 2011)

2.2 Sirontakohde

Kiihdytinpohjaisen reaktorin ytimessä on raskasatominen sirontakohde, johon kiihdyttimen luoma korkeaenerginen protonisäde ohjataan. Protonisäteen vaikutuksesta sirontakohteesta siroaa neutroneita, jotka osuvat ympärillä olevaan fissiiliin ydinmateriaaliin. Reaktorin polttoaineesta ei vapaudu tarpeeksi neutroneita ketjureaktion ylläpitämiseksi ilman sirontakohteen neutroneita. (Abdalla et al. 2013, 102)

Sironnassa syntyvien neutronien määrä riippuu ensisijaisesti protonisäteen energiamäärästä ja kohteen massasta. Tämän vuoksi parhaimpia sirontakohteita ovat raskaat metallit, erityisesti lyijy, uraani, volframi, elohopea ja tantaali sekä näiden seokset, kuten lyijy-vismutti (lead-bismuth eutectic, LBE). Reaktorin neutronitalouden vaatimusten vuoksi sirontakohde pyritään pitämään tilavuudeltaan mahdollisimman pienenä ja pienen neutronipoikkileikkauksen omaavana, mikä suosii sulien raskasmetallien (heavy liquid metal, HLM) käyttöä. Sulien raskasmetallien käyttö helpottaa myös konvektion tehokasta hyödyntämistä reaktorin lämmönsiirrossa.

Säteen interaktio sulien raskasmetallien kanssa voi useimmissa reaktorikonsepteissa tapahtua kahdella tavalla: Joko niin sanottu ikkunaton kontakti, missä säde on suorassa kontaktissa sirontakohteen kanssa tai ikkunallinen kontakti, missä sula raskasmetalli erotetaan protonisäteestä ohuella säteen läpi päästävällä ikkunalla. Ikkunattomassa kontaktissa suunnittelun haasteena on sulien raskasmetallien kiehuminen, mikä voi vahingoittaa protonisäteen ohjausputkistoa, sekä sulien raskasmetallien lämpötilan vakaus tilanteissa joissa protonisäteen teho vaihtelee. Ikkunallinen kontakti vaatii erillisen jäähdytysratkaisun ikkunalle, sekä ikkunamateriaalilta kykyä kestää lämmönvaihtelua, säteilyvaurioita ja korroosiota. Nykyisillä materiaaliratkaisuilla ikkuna täytyy vaihtaa noin puolen vuoden välein, mikä heikentää ydinvoimalaitoksen käytettävyyttä ja taloudellista kannattavuutta. (OECD NEA. 2005, 65-66)

Sirontakohteen jälkilämmön poistaminen on haasteellista ja näitä haasteita on koitettu ratkaista useilla eri jäähdytysratkaisuilla. Jäähdytys voidaan hoitaa vesijäähdytyksellä, kaasujäähdytyksellä tai metallijäähdytyksellä. Lyijy-vismutti -metallijäähdytys on useimmissa reaktorikonsepteissa havaittu otollisimmaksi jäähdytysratkaisuksi, koska lyijy-vismuttiseosta voidaan samalla myös käyttää neutronilähteenä. Lyijy-vismuttiseos

omaa myös hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet, erityisesti alhainen sulamispiste ja korkea kiehumispiste, eikä sillä ole kemiallisesti haitallisia reaktioita. Näin ollen se antaa lisäsuojaa onnettomuuksissa, joissa paine ja lämpötila kasvavat hallitsemattomasti reaktorissa verrattuna muihin suunniteltuihin jäähdytysratkaisuihin. (Abdalla et al. 2013, 89)

2.3 Reaktori

Alikriittisen reaktorin erikoisuus on reaktorin keskellä oleva sirontakohde ja yläosasta tuleva protonisäde. Muuten kiihdytinpohjaisessa reaktorissa on paljon samoja elementtejä nykyisin käytössä olevien ydinvoimalaitosten reaktoreiden kanssa. Ydinpolttoaine on pakattu polttoainenippuihin sirontakohteen ympärille ja polttoainenippujen sekaan on aseteltu säätösauvoja. Säätösauvojen korkeussuunnan asentoa muuttamalla on reaktorin kriittisyyttä mahdollista hallita muuttamatta protonisäteen tehoa. Neutronitalouden parantamiseksi reaktorin sisäreunoilla on neutroneita heijastava seinämä ja ulkoreunalla suojakerros suojaamassa ulkopuolista ympäristöä reaktorilta ja reaktoria ympäristöltä. (Park et al. 2000)

Alikriittisen reaktorin ominaisuudet riippuvat suuresti reaktorin lämpötehosta, käytetystä jäähdytysratkaisusta ja polttoaineesta. Carlo Rubbian 1995 ehdottaman reaktorikonseptin oli tarkoitus toimia 1500 MW_{th} lämpötehosta, mikä olisi vaatinut 27,3 tonnia sekaoksidipolttoainetta keskimääräisellä tehon tiheydellä 55 W/g. Lisäksi reaktorissa olisi ollut sulaa lyijyä sisältävän sirontakohteen ympärillä torium-232 -sisältäviä sauvoja, josta olisi saatu fissiiliä uraani-233:sta. Sula lyijy olisi toiminut myös Rubbian reaktorikonseptissa jäähdytysratkaisuna siirtäen lämpöä reaktorista lämmönsiirtimiin. (Rubbia et al. 1995, 87-90)

Puhtaasti transmutaatioon erikoistuva pienimuotoinen kiihdytinpohjainen reaktori voi myös toimia ilman uraanipohjaisia energianlähteitä. Erityisesti komposiitti-okdisi - pohjaisten polttoaineiden alustavat tulokset ovat olleet hyvin lupaavia, sillä niitä on edullista tuottaa. Haittapuolena ne vaativat hyvin suuren turvamarginaalin alikriittisyyden varmistamiseksi. Nitridi -pohjaisissa polttoaineissa voidaan saavuttaa parempi

hyötysuhde, mutta niiden valmistamisen hankaluus tarkoittaa ettei niitä ole taloudellista käyttää tulevaisuuden reaktoreissa. (Wallenius et al. 2006, 625)

Alikriittisen reaktorin teho voidaan määrittää reaktorin kasvutekijän ja sironnan tuottamien neutronien avulla, jotka taas ovat riippuvaisia hiukkaskiihdyttimen rakenteesta, sironnakohteen materiaalista ja reaktorin muodoista. Jos oletamme reaktorin kasvutekijän olevan 0,98 ja lämpötehon olevan 1500 MWth, tarvitaan noin 1 GeV energiaa sisältävä jatkuva säde hiukkaskiihdyttimeltä sironnakohteeseen, jotta reaktori säilyisi kriittisenä. (Hashemi-Nezhad et al. 2011, 1)

Alikriittisen reaktorin tehon laskeminen poikkeaa perinteisen reaktoriratkaisun tehon laskelmasta. Tehon laskennassa käytetään yhtälöitä 2.3.1 ja 2.3.2

Neutronien kertoman yhtälö voidaan esittää reaktorin kasvutekijöillä:

$$M - 1 = \frac{k}{1-k} \quad (2.3.1)$$

missä M on neutronien kertoma
 k on reaktorin kasvutekijä

Näin alikriittisen reaktorin tehon yhtälöksi saadaan:

$$P = F \frac{iv_{sp}e_f k}{v(1-k)} = \frac{Fiv_{sp}e_f(M-1)}{v} \quad (2.3.2)$$

missä P on fission teho
 F on reaktorikohtainen kerroin
 i on kiihdyttimen virta
 e_f on energiaa per fissio
 v on neutronien tuotanto fissiossa
 v_{sp} on neutronien tuotanto sironnassa

(Degweker et al. 2007)

2.4 Ydinturvallisuus

Kiihdytinpohjaisen reaktorin tehotason ohjaus ei riipu pelkästään säätösauvojen asennosta vaan tehoa voidaan nostaa tai laskea muuttamalla protonisäteen tehoa. Tämän vuoksi kyky säätää säteen tehoa on ydinturvallisuuden kannalta tärkeää ja turvajärjestelmät on suunniteltava niin että hiukkaskiihdytin voidaan tarvittaessa sammuttaa nopeasti ja turvallisesti. Hiukkaskiihdyttimen sammussa reaktorin alikriittisyys takaa että reaktorin teho laskee, koska protonisäde ei tuota neutroneja osumalla sirontakohteeseen. Häätätilanteissa protonisädettä voidaan myös tarvittaessa ohjata magneeteilla ohi sirontakohteen tai sen pääsy sirontakohteeseen estää laittamalla materiaalia säteen kulkureitille. Ydinturvallisuuden kannalta olisi tärkeää että käyttöön saataisiin useita hiukkaskiihdyttimen ja protonisäteen toimintaa tarkkailevia aktiivisia järjestelmiä, sekä riittävä määrä passiivisia järjestelmiä jotka automaattisesti sammuttaisivat säteen poikkeuksellisissa tai vaarallisissa tilanteissa.

Kiihdytinpohjainen reaktori luo säteilysojelle haasteita, sillä protonisäde aktivoi voimailoksen materiaaleja ja ikkunallisissa reaktoreissa ikkunan vaihto voi aiheuttaa merkittävän annoskertymän. Säteilevää materiaalia voi myös siirtyä ikkunattomissa kohteissa haihtumisen tai ikkunallisissa kohteissa ikkunan vikaantumisen vuoksi säteen kuljetusputkea pitkin, minkä poistamisen on erityisen hankalaa ja synnyttää kontaminaatiovaaran. Säteilysojelman kannalta on myös haastavaa varmistaa että lämmönpoisto reaktorista ja jälkilämmönpoisto sirontakohteesta kyetään varmistamaan onnettomuustilanteissa lämpörasituksen aiheuttamien vaurioiden estämiseksi, erityisesti malleissa missä sirontakohtetta jäähdytetään pumpuilla. (OECD NEA. 2005 85-86)

Toisin kuin nykyisin käytössä olevia ydinreaktoreita kiihdytinpohjaisia reaktoreita on mahdollista operoida reaktorin kasvutekijällä joka on alle yksi. Tämä avaa monenlaisia mahdollisuuksia suunnitella reaktorimalleja, jotka eivät tavallisesti olisi heikon neutronitalouden takia mahdollisia, mutta tuo haasteita ydinturvallisuuteen sillä kokemusta tämänlaisten reaktoreiden ei juuri ole. Kiihdytinpohjaiset reaktorit pystytään suunnittelemaan toimimaan myös transmutoijana, joka lisää erillisten ydinjätteen käsittelylaitosten tarvetta, mutta vähentää haitallisten jätteiden kokonaismäärää. Ydinjätteen kuljettaminen voimalaitokseen luo uusia turvallisuushaasteita ydinmateriaalin kuljetuksiin.

Korkeampi turvallisuus kriittisyyden hallinnan osalta on yksi kiihdytinpohjaisen reaktorin merkittävimpiä etuja. Reaktorin alikriittisyys tarkoittaa, että reaktiivisuusmarginaali siihen, että fissio karkaa käsistä voi olla paljon pienempi ja viivästyneiden neutronien vaikutus eliminoiduu täysin. Lisäksi ylijäämäreaktiivisuus voidaan poistaa kokonaan systeemistä, jonka ansiosta on mahdollista suunnitella ydinvoimalaitoksia, joissa reaktiivisuudesta johtuvien onnettomuuksien riski on minimaalinen.

Kiihdytinpohjainen reaktori omaa myös monia nykyisistä reaktoreista puuttuvia huonoja puolia, joihin ei välttämättä voida keksiä helppoja ratkaisuja. Protonisäteen täytyy päästä hiukkaskiihdyttimestä reaktoriin asti, mikä luo kulkuväylän ympäristöön radioktiivisille reaktiotuotteille onnettomuustilanteessa etenkin jos reaktoriratkaisu on ikkunaton. Myös suunniteltujen reaktoreiden jäähdytysratkaisujen monimutkaisuus luo haasteita onnettomuustilanteiden lämmönhallinnassa verrattuna nykyisiin vesijäähdytteisiin reaktoreihin. Kiihdytyspohjainen ydinreaktori on hyvin monimutkainen rakentaa, varsinkin verrattuna yksinkertaiseen kiehutusvesireaktoriin. (OECD NEA. 2002, 44-45)

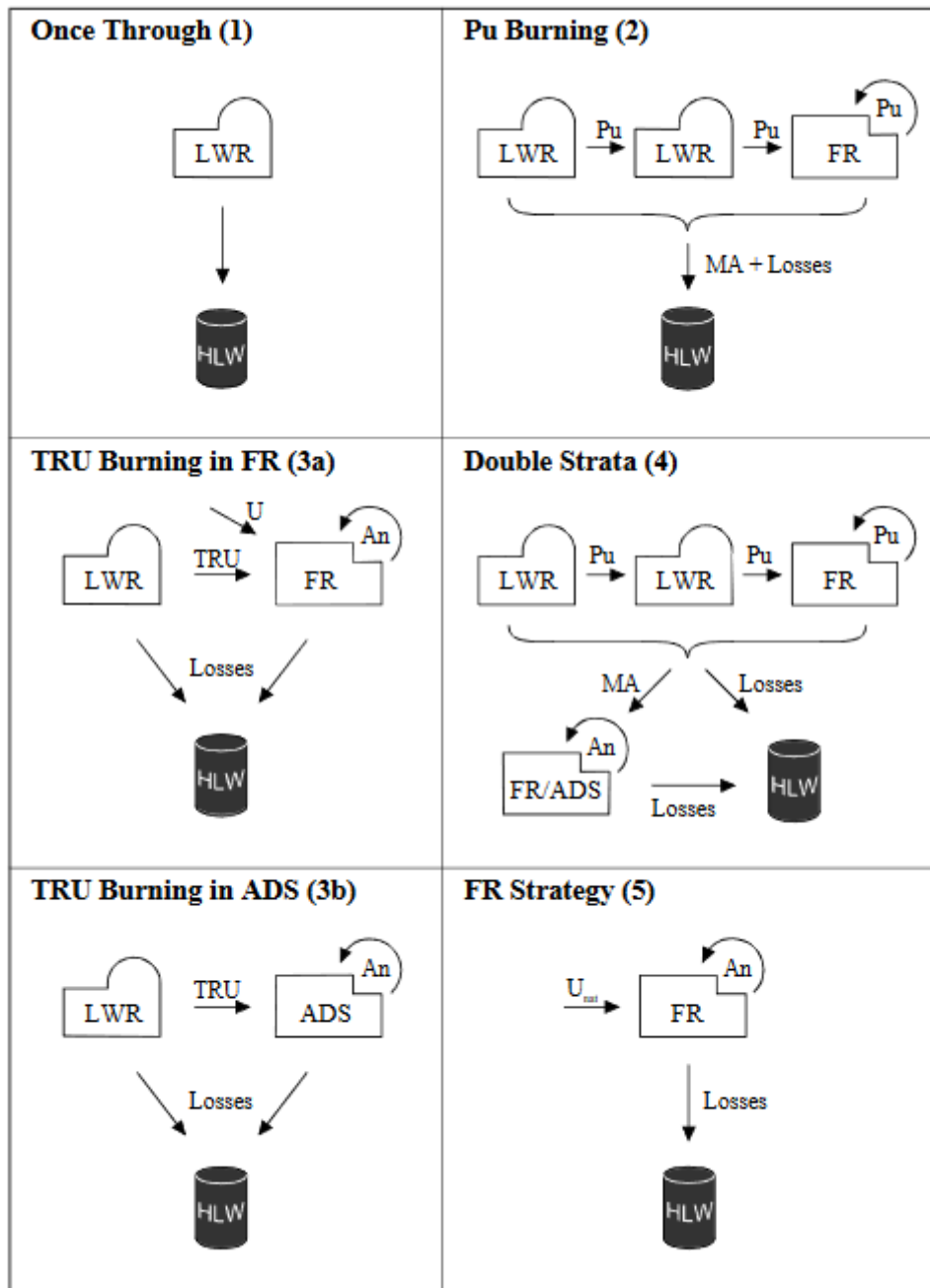
3 POLTTOAINEKIERTO

Käytetyn polttoaineen radiotoksisuuden vuoksi ydinvoimalan polttoainekierto on tärkeä osa reaktorin turvallista toimintaa. Ydinvoimalan polttoainekierron prosessi voidaan jakaa kahteen pääryhmään: avoimeen- ja suljettuun polttoainekiertoon. Avoimessa polttoainekierrossa käytetty polttoaine on ydinjätettä, joka täytyy loppusijoittaa. Suljetussa polttoainekierrossa taas merkittävä osa käytetystä polttoaineesta pyritään palauttamaan jälleenkäsittelyn avulla kierrätettävään muotoon. Kiihdytinpohjaisia reaktoreita voidaan käyttää osana polttoainekiertoa hävittämään transuraaneja (TRU) tai sivuaktinidejä mikäli käytettävissä on kehittyneitä jälleenkäsittelylaitoksia. (Sandberg. 2004, 285-286, 292-293)

3.1 Polttoainekierron strategiat

Kiihdytinpohjaisten reaktorien käyttötarkoitukseen vaikuttaa vahvasti valittu polttoainekierron strategia. Taloudellisista syistä pienien maiden ei kannata rakentaa omaa jälleenkäsittelylaitosta vaan käytetty polttoaine lähetetään ulkomaille kierrätettäväksi tai loppusijoitetaan maan alle. Maissa joissa on jo käytössä kevytvesireaktoreita, voidaan kiihdytinpohjaisia reaktoreita voidaan käyttää osana polttoainekiertoa transuraanien hävittämiseen. Tällöin tavoitteeksi tulee minimoida polttoaineen jälleenkäsittelyn häviöt ja kehittää tekniikoita transmutoitujen aineiden jälleenkäsittelyyn, jotta korkea-aktiivisen jätteen määrä ja sen puoliintumisaika voidaan minimoida.

Jos käytössä on nopeita reaktoreita kevytvesireaktoreiden rinnalla voidaan uraania hyödyntää paremmin suljetussa kierrossa. Tällaisessa suljetussa kierrossa toimivat nopeat reaktorit tuottavat merkittävästi sivuaktinidejä (Minor actinides, MA, jotka voidaan edelleen transmutoida kiihdytinpohjaisessa reaktorissa vähentäen syntyvän ydinjätteen määrää ja radiotoksisuutta. Polttoainekierron strategioita havainnoillistetaan visuaalisesti kuvassa 3.1 joista vaihtoehdot 3b ja 4 käyttävät kiihdytinpohjaista reaktoria osana polttoainekierron strategiaa. (OECD NEA. 2002, 55-57)



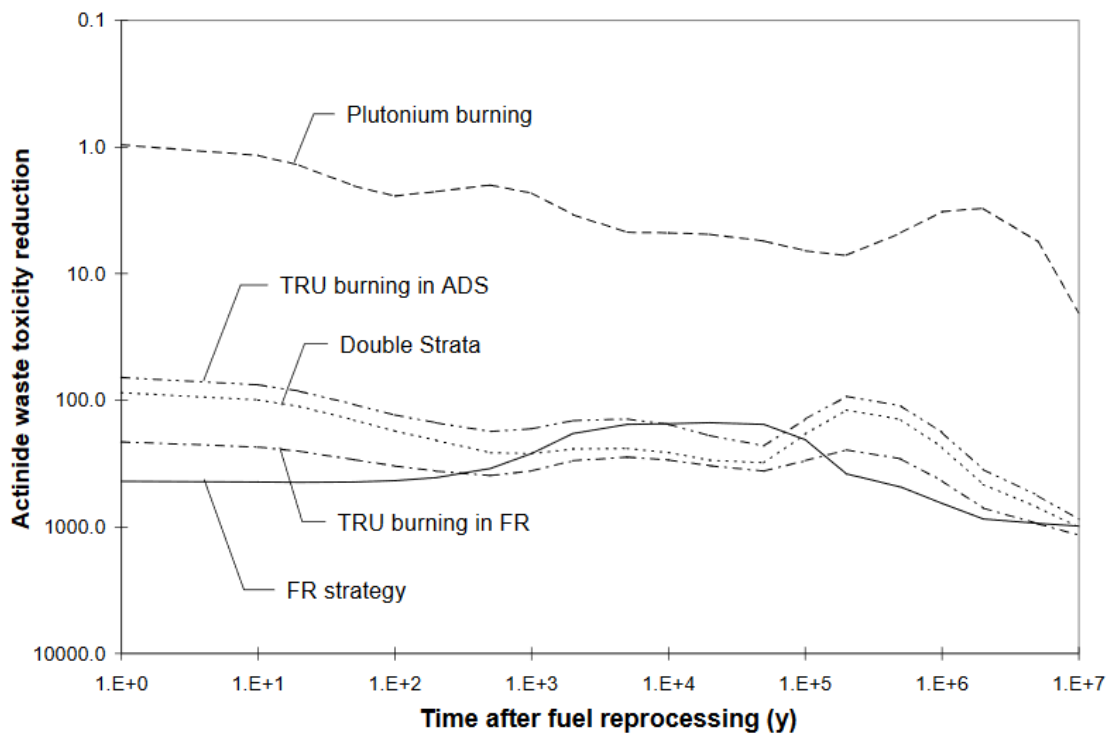
Kuva 3.1. Polttoainekierron strategiat visualisoituna (OECD NEA 2002)

3.2 Transmutaatio polttoainekierrossa

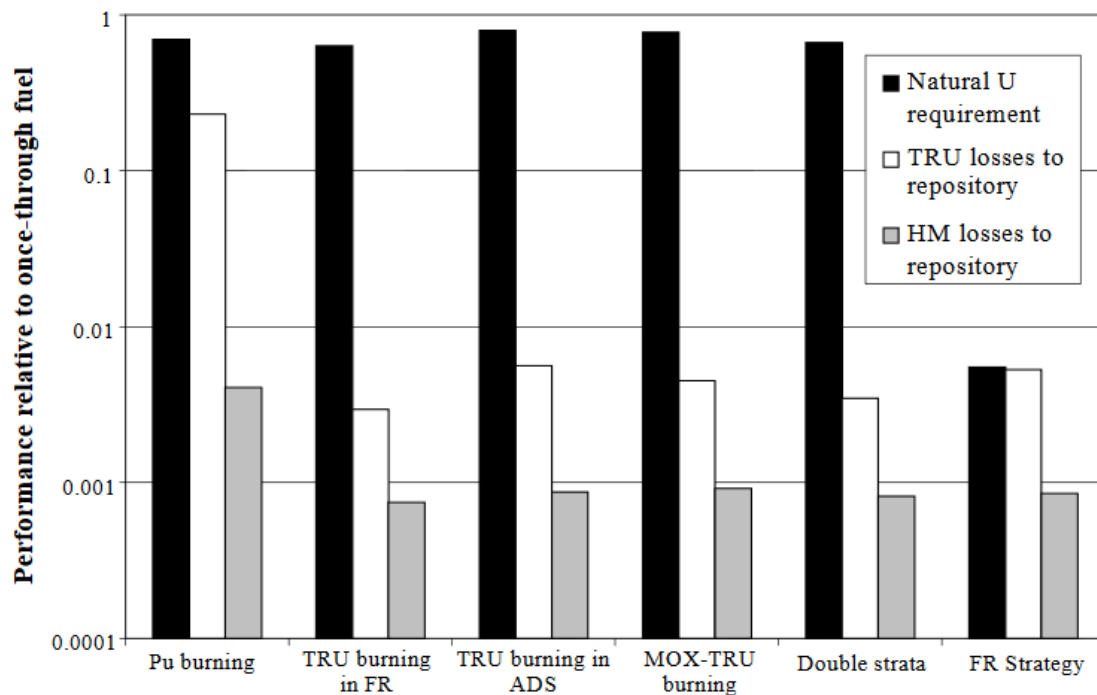
Transmutaation tarkoituksena on vähentää ydinjätteen pitkäikäisten aktinidien ja fissiotuotteiden määrää sekä pienentää jätteen radiotoksisuutta muuttamalla alkuaine toiseksi. Transmutaatio vaatii tarpeeksi tehokkaan nopeiden neutronien lähteen, jonka vuoksi nopea ydinreaktori tai kiihdytinpohjainen reaktori sopii hyvin tähän tehtävään.

Kiihdytinpohjaisessa reaktorissa sirontakohteesta siroaa transmutaatioon soveltuvia neutroneita termisestä energiatasosta aina 20 MeV asti.

Nopein keino vähentää nykyisen korkea-aktiivisen pitkäikäisen ydinjätteen määrää on aloittaa plutoniumin kierrätys. Siirtyminen kiihdytyspohjaisten reaktoreiden avulla toteutettaviin kehittyneempiin polttoainekierron strategioihin on seuraava vaihe korkea-aktiivisen ja pitkäikäisen ydinjätteen vähentämisessä. Korkea-aktiivisen jätteen aktinoidien vähentymistä eri streategioiden suhteen on esitelty kuvassa 3.2 polttoainekierron tehokkuutta suhteessa avoimeen kiertoon kuvassa 3.3 (OECD NEA, 2002, 58-61)



Kuva 3.2. Aktinoidijätteen radiotoksisuuden vähennys suhteessa avoimeen polttoainekierron. (OECD NEA 2002)



Kuva 3.3. Aktinoidijätteen radiotoksisuuden vähennys suhteessa avoimeen polttoainekierton. (OECD NEA 2002)

Haitallisten aktinidien transmutaatiossa fissioreaktio edistää alkuaineen etenemistä hajoamisketjussa, mikä muuttaa pitkäikäiset korkea-aktiiviset aktinoidit lyhytikäisemmiksi matala-aktiivisiksi alkuaineiksi. Neutronikaappaus ja $(n,2n)$ reaktiot sen sijaan eivät vaikuta merkittävästi aktinoidin aktiivisuuteen. Näiden reaktioiden hyötynä on lähinnä heikosti fissioituvien aktinoidien muutos helpommin fissioituviksi aineiksi.

Sivuaktinidien laajamittainen fissioiminen vaatii nopeiden tai alikriittisten reaktoreiden käyttöä, sillä termisissä reaktoreissa vastaavan yrittäminen aiheuttaisi suuria ongelmia neutronitalouden kanssa. Alikriittisessä reaktorissa lisää neutroneita saadaan ulkoisesta neutronilähteestä, joten ne soveltuvat tähän tehtävään erinomaisesti. (OECD NEA. 2002, 39-41)

Koska aktinidien transmutaatio vaatii fissioreaktioita on transmutaatioiden määrä suoraan riippuvainen reaktorissa olevien neutronien määrästä. Tämän vuoksi ydinreaktori voi transmutoida vain rajallisen määrän aktinideja. Parhaassakin tapauksessa nopeassa

reaktorissa jätteen massan tiputtaminen sadasosaan vaatisi sata vuotta. Tämä asettaa paineita laitosten kestävyydelle, käyttöasteelle ja kustannustehokkuudelle.

Nykytilanteessa kilpailu kevytvesireaktoreiden kanssa ei ole taloudellista, joten polttoainekierron tehokkuuden kannalta olisi järkevää rakentaa pieni määrä aktinidien transmutointilaitoksia. Sivuaktinidit pitäisi eritellä kevytvesireaktorin polttoaineesta ja kierrättää eri reaktorityypeissä tai kevytvesireaktorin polttoaineen transuraanit pitäisi jälleenkäsittelyllä kerätä talteen ja viedä transmutoitavaksi. Plutoniumin ja sivuaktinidien erottelu on näistä kahdesta selvästi edullisempi ja teknisesti helpommin toteutettavissa. (OECD NEA. 2002, 39-41)

Aktinideja ei voida käytännössä ottaa kokonaan talteen käytetystä polttoaineesta, joten osa niistä päätyy aina jätteeksi. Suljetussa systeemissä on jätteeksi menevien aktinidien kokonaismassan selvittämiseksi voidaan soveltaa yhtälöä:

$$M^W = \delta L M^F \quad (3.2.1)$$

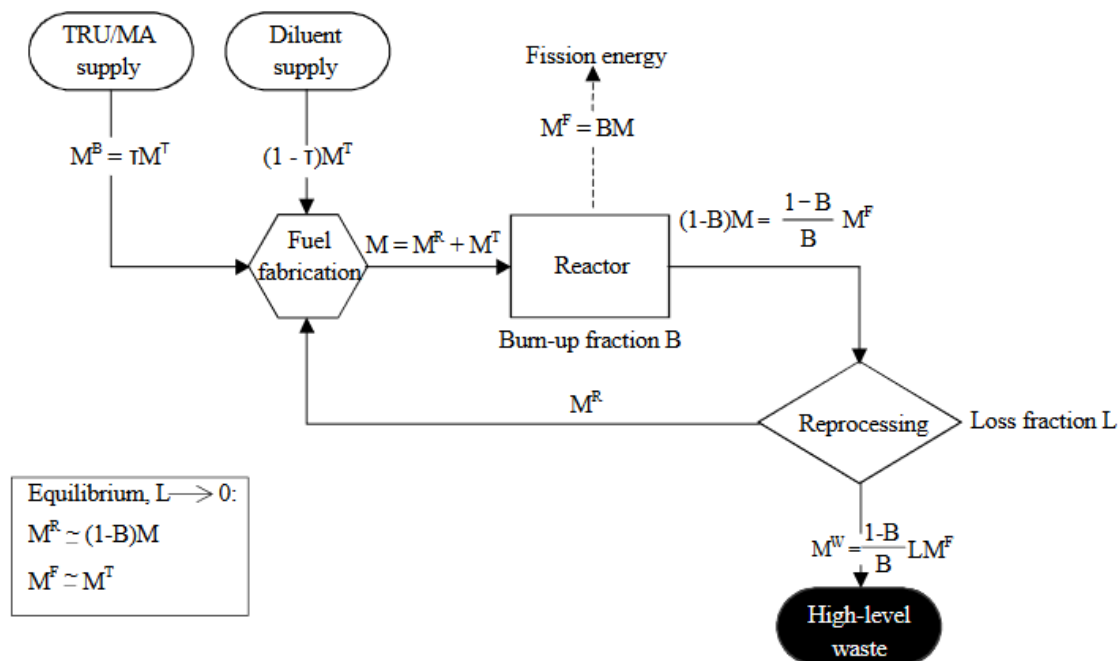
missä M^W on jätteeksi menevien aktinidien kokonaismassa
 δ on raskaiden metallien fissio-osuus
 L on aktinidien häviöt jälleenkäsittelyssä ja polttoaineiden tuotannossa
 M^F on polttoaineen fissioituvien aktinidien kokonaismassa

Tasapainotilassa polttoaineen fissioituvien aktinidien kokonaismassa on yhtä suuri kuin lisättävän polttoaineen massa. Näin yhtälö voidaan esittää muodossa:

$$L = \tau / (\delta R^M) \quad (3.2.2)$$

missä L on aktinidien häviöt jälleenkäsittelyssä ja polttoaineiden tuotannossa
 τ on transuraanisten tai sivuaktinidien osuus lisättävästä polttoaineesta
 δ on raskaiden metallien fissio-osuus
 R^M on transuraanisten tai sivuaktinidien osuus jätteeksi menevistä aktinideista

Jos oletetaan polttoaineen käyttöasteen olevan 15% ja otetaan tavoitteeksi aktinoidien vähennys sadasosaan, saadaan hyväksyttäviksi häviöiksi uudelleenkäsittelyn ja polttoaineiden tuotannossa 0,18%. Kuvassa 3.4 nähdään aktinidien massavirran laskennan prosessikaavio tasapainotilassa. (OECD NEA. 2002, 49-51)

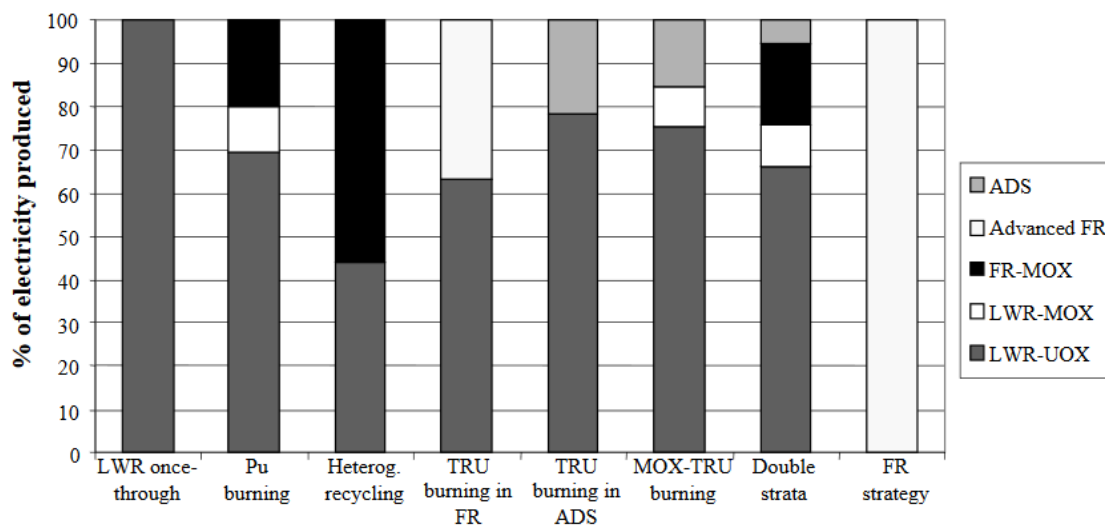


Kuva 3.4. Aktinidien massavirran tasapainotilan prosessikaavio suljetussa polttoainekierrossa (OECD NEA 2002)

3.3 Polttoainekierron kustannukset

Kiihdytinpohjaisten reaktorien käytön kustannuksista osana polttoainekiertoa on mahdotonta laskea tarkkoja lukuja, koska aktiiviseen transmutaattikäyttöön ei vielä ole rakennettu yhtään reaktoria. Nykyiset arviot kustannuksista perustuvat karkeisiin materiaalin hintojen yhdistämisiin ja suuren epätarkkuuden arvioihin eri osa-alueiden kustannuksista. Kevytvesireaktorien kustannuksista on lähes 70 vuoden kokemus, jota voidaan osittain hyödyntää kiihdytinpohjaisten reaktorien kustannuksien laskennassa. Kiihdytinpohjaisen reaktorin sähköntuotannolla on merkittävä vaikutus reaktorin käytön kannattavuuteen. Kuva 3.5 esittää eri reaktorityyppien sähköntuotannon osuuden arvion.

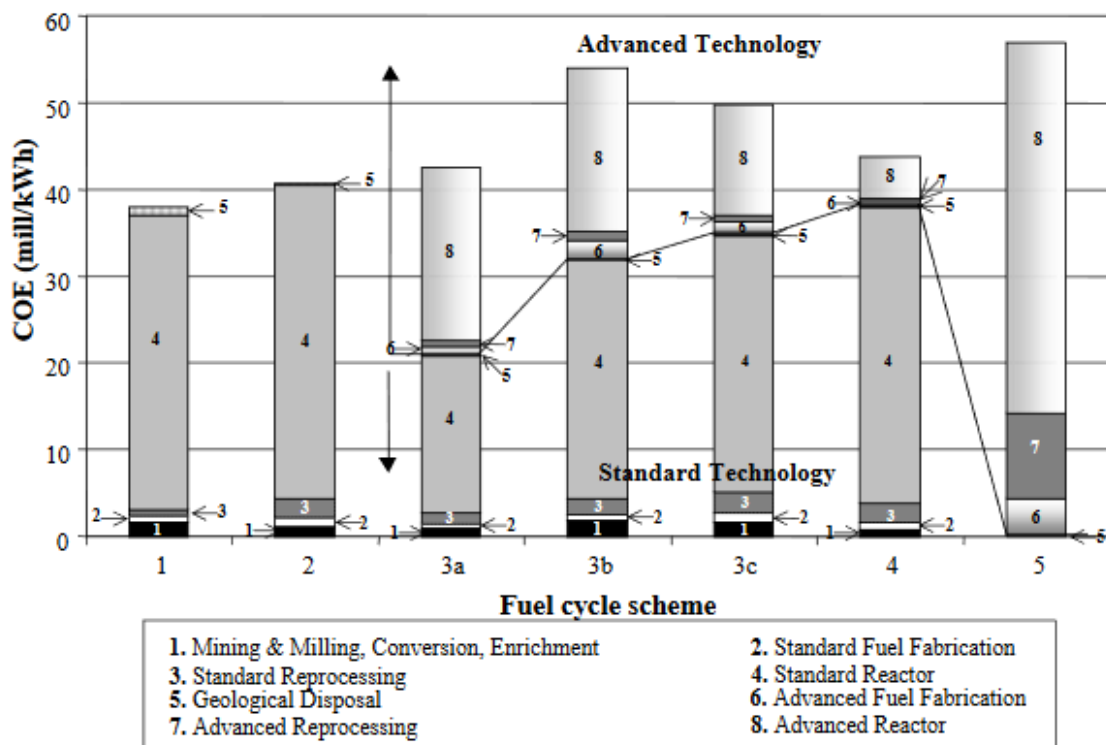
Osaamisen karttuessa kiihdytinpohjaisten reaktorien kustannusten voidaan olettaa laskevan samaan tahtiin kuin kevytvesireaktoreilla. (OECD NEA. 2002, 215-218)



Kuva 3.5. Reaktorien sähköntuotannon osuus eri strategioilla (OECD NEA 2002)

Kiihdytinpohjaisen reaktorin pääomakustannukset voidaan jakaa kahteen osaan. Hiukkaskiihdyttimen kustannukset ja reaktorin kustannukset. Reaktorin kustannuksen voidaan olettaa olevan samaa luokkaa kuin tavanomaisissa nopeissa reaktoreissa. Kiihdytinpohjaisen reaktorin hinnan arvioidaan olevan 1850-2600 dollaria per kilowatti tehoa reaktorin. Kiihdyttimen hinnaksi arvioidaan 5-20 dollaria per watti säteen tehoa, mikä on keskimäärin 30% kiihdytinpohjaisen reaktorilaitoksen kokonaiskustannuksesta. Hiukkaskiihdyttimen hinnalla on siis merkittävä vaikutus koko ydinvoimalaitoksen kannattavuuteen minkä vuoksi nykyiset suunnitelmat nojaavat yksinkertaisempiin lineaarisiin hiukkaskiihdyttimiin.

Näiden laskelmien perusteella kiihdytinpohjaisten reaktorien käyttö osana ydinpolttoainekiertoa nostaa sähkön hintaa, mikä esitetään kuvassa 3.6 Kiihdytyspohjaista reaktoria käyttävien polttoainekierron strategioiden kannattavuus kuitenkin paranee selvästi maissa, joissa loppusijoittaminen on kallista ja hankalaa. (OECD NEA. 2002, 218-228)



Kuva 3.6. Sähköntuotannon hinta eri strategioilla. (OECD NEA, 2005)

3.4 Jätehuolto

Pitkäikäisen ydinjätteen haittojen vähentäminen on ollut vuosikymmenien ajan tutkimuksen kohteena ja monenlaisia ratkaisuvaihtoehtoja on ehdotettu erityisesti jätteen määrän vähentämiseksi. Hankkeiden toteutumista on kuitenkin leimannut epävarmuus. Pelkästään ydinaseiden tuotannon seurauksena ydinjätettä on kertynyt erilaisiin varastoihin peräti 1 000 000 kuutiometriä ja ydinvoimalaitosten energian tuotannosta jääneen käytetyn polttoaineen määrä on ylittänyt 200 000 tonnia uraania. Asiantuntijat OECD:ssä (Organisation for Economic Cooperation and Development) ja Suomessa ovat vahvasti ajaneet ratkaisua ongelmaan ehdottamalla ydinjätteen sijoittamista peruskallioon rakennettaviin syviin onkaloihin. Tästä poiketen useimmat muut toimijat ovat ottaneet käyttöönsä passiivisemmän strategian ja odottavat teknologian kehityksen tuovan uusia, parempia ratkaisuja ydinjätteongelman hoitamiseksi. (Sandberg, 2004, 290-291)

Yksi tulevaisuuden ratkaisu ydinjätteongelmaan on transmutoinnin laajamittainen käyttö. Kiihdytinperäiset reaktorit voidaan suunnitella pääasialliseen transmutointikäyttöön sähköntuotannon kustannuksella, jolloin ne toimivat osana aktiivista jätehuoltoa.

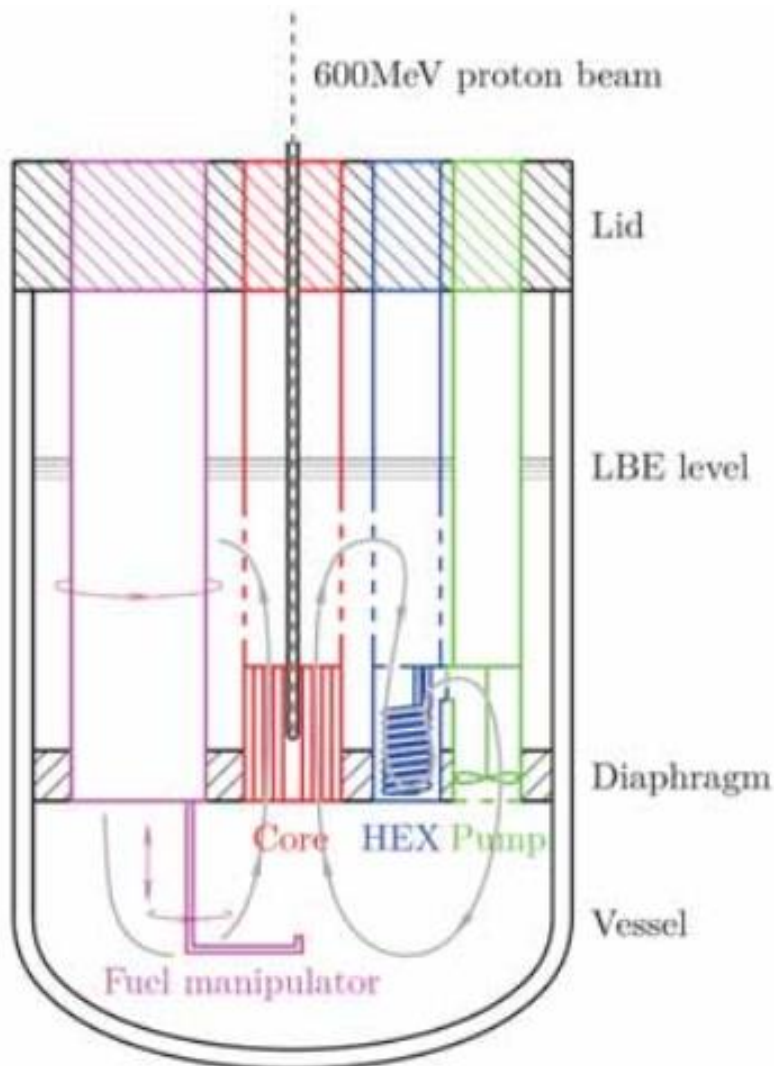
Ydinjätettä ei sellaisenaan ole kannattavaa transmutoida, sillä koko jätteen pommittaminen neutroneilla saisi aikaan enemmän haitallisempia alkuaineita, joten ennen transmutointia jätteestä on tarkasti eroteltava alkuaineet toisistaan. Valitettavasti nykyisin käytössä oleva erottelutekniikka ei ole tarpeeksi laadukasta, vähähäviöistä ja edullista transmutaation laajamittaiseen käyttöön, joten kiihdytinpohjaisten reaktorien hyöty puhtaasti transmutaatiotarkoituksessa jää mahdollista potentiaalia pienemmäksi. Kaikkea pitkäaikaisjätettä ei voida tulevaisuuden teknologiallakaan transmutoida, joten loppusijoitus on joka tapauksessa välttämätön ratkaisu vaikka kiihdytinpohjaiset reaktorit olisivat laajamittaisessa käytössä. (Ibid. 292-294)

4 SUUNNITTEILLA OLEVAT KIIHDYTIMPOHJAISET REAKTORIJÄRJESTELMÄT

Neljännän sukupolven reaktoreiden prototyypin rakentaminen on ollut suunnitteilla jo pidemmän aikaa, mutta projektien maaliinviemiseksi tarpeellisen rahoituksen hankinta on ollut haastavaa. Kaupallisilla toimijoilla on hyvin vähän haluja miljardiluokan prototyypin rahoittamiselle ja osa alan toimijoista näkee ydinvoima-alan tulevaisuuden olevan pienemmissä, modulaarisissa reaktoreissa. Kiihdytinpohjaisia reaktoriprojekteja on kuitenkin käynnissä useammassa maassa ja voidaan olettaa että osa niistä tulee etenemään ainakin testivaiheeseen. Näistä projekteista saadut kokemukset tulevat olemaan ratkaisevassa osassa kun päätetään tullaanko kiihdytinpohjaisia reaktoreita rakentamaan isommassa mittakaavassa tulevaisudessa.

4.1 Eurooppa

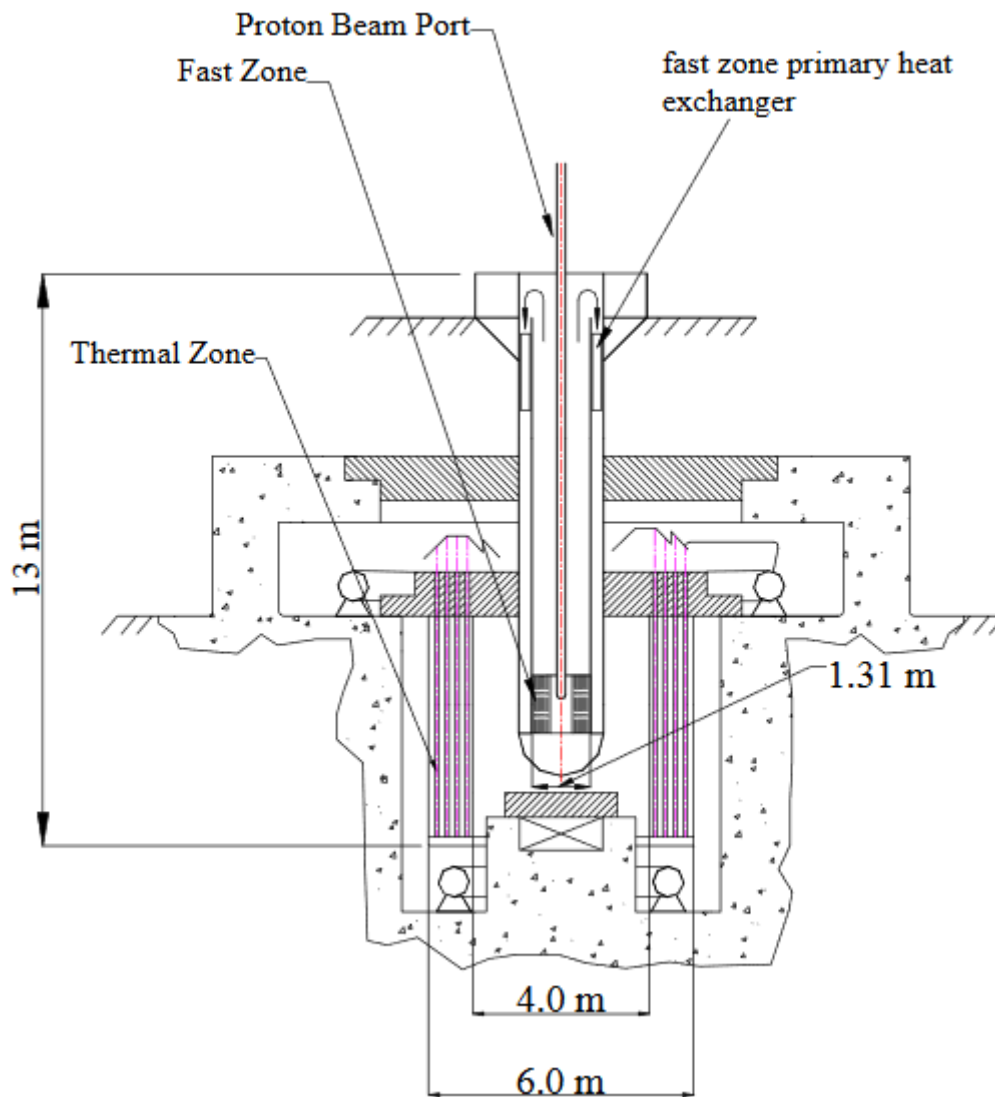
Euroopassa on aloitettu MYRRHA -tutkimusreaktorin rakentamista, jonka tarkoitus on olla ensimmäinen käytössä oleva teollisen mittaluokan kiihdytinpohjainen reaktori. 100 MeV kiihdyttimen rakentaminen on alkanut 2016 ja sen on tarkoitus olla valmis 2024, jonka jälkeen hiukkaskiihdyttimen protonisäteen ulostuloenergia nostetaan pikkuhiljaa kohti 600 MeV. Tämän jälkeen reaktorin rakennus voidaan aloittaa 2030-luvulla. MYRRHA:n hiukkaskiihdytin tulee olemaan kustannussyistä lineaarinen. Itse reaktori on lyijy-vismuttijähdytteinen nopea reaktori, joka tuottaa n. 100 MW_{th} tehon. Reaktori, joka on kuvattu kuvassa 4.1, on suunniteltu niin että sitä voidaan käyttää sekä kriittisenä reaktorina, että alikriittisenä reaktorina. (SCK CEN 2016)



Kuva 4.1. MYRRHA -reaktori (SCK CEN 2016)

4.2 Intia

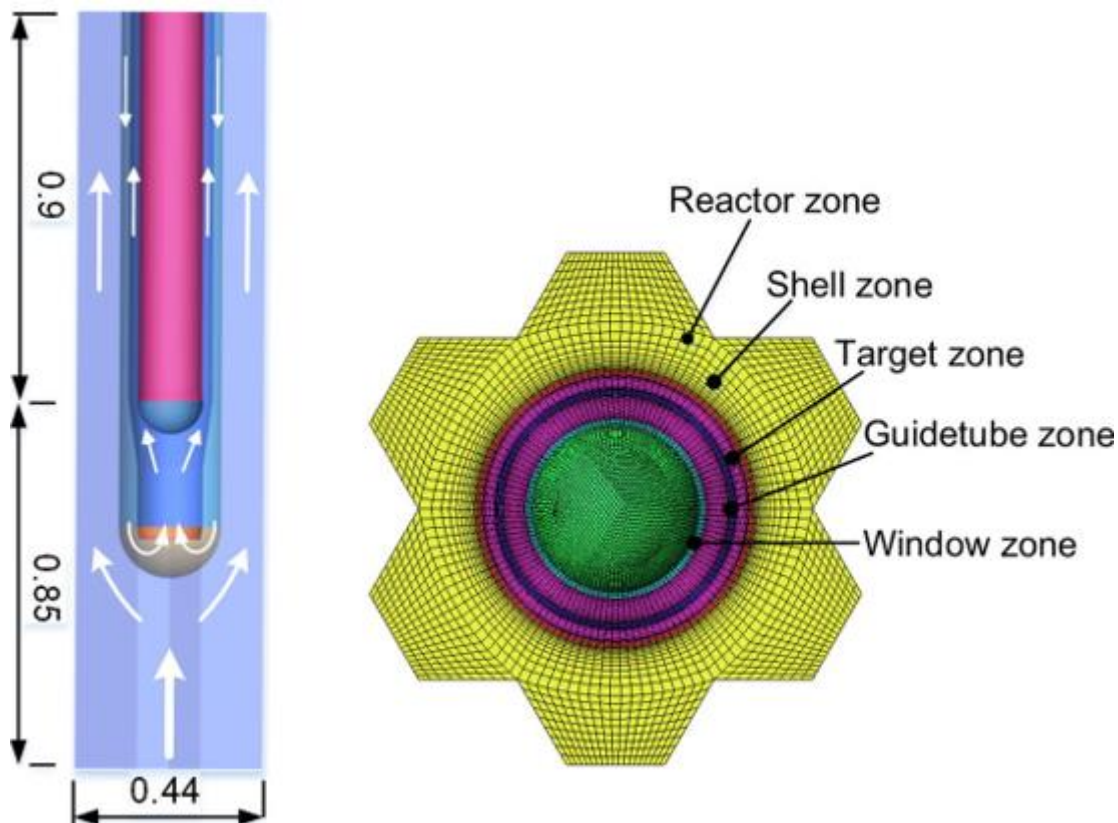
Intia on jo vuodesta 1999 suunnitellut kiihdytinpohjaisen reaktorin rakentamista hyödyntämään maan mittavia Torium -varantoja. Heidän tarkoituksenaan on kehittää lineaarinen hiukkaskiihdytin useassa osassa, jossa protonisäteen energia nostetaan 120 MeV:sta aina 1200 MeV:in saakka. Samaan aikaan tulisi rakentaa alikriittinen reaktori jonka lämpöteho olisi 1500 MWth. Reaktorin sarjatuotanto olisi tämän jälkeen tarkoitus aloittaa n. 50 vuoden päästä. Reaktorin jäähdytyksenä toimii lyijy-vismutti metalliseos ja ehdotettu malli nähdään kuvasta 4.2. (Degweker et al.)



Kuva 4.2. 750 MWt IADS -reaktori (Degweker et al.)

4.3 Kiina

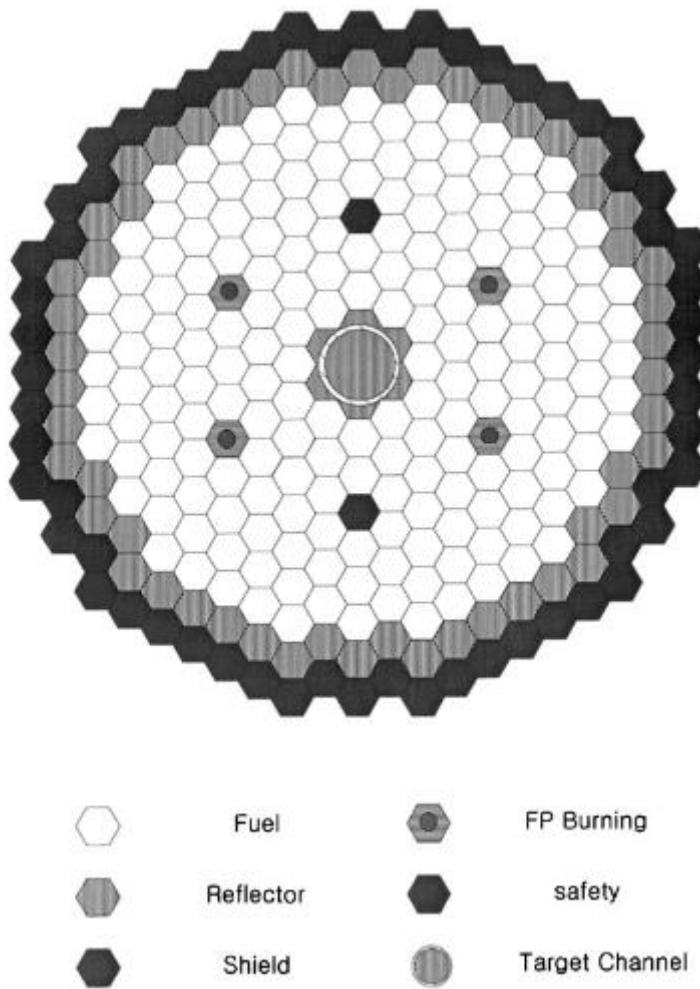
Kiinalla on CIADS -projekti, jonka tavoitteena on luoda 1500 MeV lineaarikiihdytteisellä protonisäteellä toimiva kiihdytinpohjainen reaktori. Reaktorin sirontakohteena on tungsteni ja jäähdytyksenä toimii lyijy-vismuttiseos. Sirontakohteen 3D-malli esitellään kuvassa 4.3. Reaktorin tarkoitus on ratkaista Kiinan kasvava ydinjäteongelma ja toimia ensisijaisesti ydinjätteen transmutaatiossa. Testireaktorin tavoiteaikataulu on valmistua vuonna 2032. (Liu et al. 2017)



Kuva 4.3. 3D-malli kiinalaisesta sirontakohteesta (Chen et al. 2016)

4.4 Etelä-Korea

Etelä-Koreassa on kehitteillä HYPER -reaktori, jossa 1000 MeV lineaarisella hiukkaskiihdyttimellä saadaan aikaiseksi 1000 MWt lämpöteho. Reaktori on terässeosikkunan omaava, lyijy-vismuttijäähdytteinen ja sen pääasiallinen tarkoitus on kevytvesireaktorin jätteiden transmutaatio. HYPER -reaktorin rakenne havainnoillistetaan kuvassa 4.4. HYPER:n tavoitteena on transmutoida noin 380 kg transuraania vuodessa ja suunnitteilla on rakentaa niitä yksi kappale per viisi kevytvesireaktoria. HYPER -reaktorissa ei ole minkäänlaisia säätösauvoja vaan reaktorin tehoa hallitaan puhtaasti hiukkaskiihdyttimen virtaa säätämällä. Reaktorille on suunnitteilla kustannussyistä samanlainen polttoaineen lataustapa käytön aikana kuin Kanadalaisissa CANDU -reaktoreissa. (Park et al. 2000)



Kuva 4.4. HYPHER -reaktorin rakenne (Park et al. 2000)

5 YHTEENVETO

Kiihdytinpohjaiset reaktorit ovat tulevaisuuden reaktorityyppi, jonka avulla on mahdollista ratkaista osa ydinvoimaloiden turvallisuus- ja jätehaasteista. Niiden avulla voidaan transmutoimalla lyhentää ydinjätteen säilytysaikaa, määrää ja radiotoksisuutta. Kiihdytinpohjainen reaktori mahdollistaa myös oikein suunniteltuna ydinturvallisuuden parantamisen ja monimuotoisemman polttoainestrategian käytön liiallista kustannusten nousua. Useat ydinvoimaa käyttävät maat suunnittelevat kiihdytinpohjaisen reaktorin rakentamista ja sellaisetkin maat joilla ei ole rakennussuunnitelmia panostavat hiukkaskiihdyttimien kehitykseen ja tutkimukseen. Tämän vuoksi on todennäköistä että kiihdytinpohjaisten reaktorien perustutkimus jatkuu pitkälle tulevaisuuteen vaikka yksittäiset rakennusprojektit epäonnistuisivat tai viivästyisivät. Osa teknisistä ja taloudellisista haasteista on vielä ratkaisematta, mutta alati lisääntyvä ydinjätteen määrä antaa selkeän kannusteen jatkaa voimalaitoskonseptin kehitystä. Tällä hetkellä ei ole vielä varmuutta minkä tyyppinen hiukkaskiihdytin, sirontakohde, reaktorityyppi ja polttoainestrategia tulee lopulta saamaan suurimman suosion ydinvoiman rakentajien keskuudessa; selvyys tästä saadaan aikaisintaan 2030 -luvulla kun ensimmäiset teollisen mittaluokan kiihdytinpohjaiset reaktorit valmistuvat käyttöön.

LÄHDELUETTELO

Abdalla et al. 2013. Thermal-hydraulic analysis of LBE spallation target for accelerator-driven systems *Pramana - Journal of Physics*, January 2013, Volume 80, Issue 1, 89-103

BARC. *Reactor Technology and Engineering*. [Viitattu 22.12.2018]. Saatavissa: <http://www.barc.gov.in/publications/eb/golden/reactor/reactor.pdf>

Chen et al. 2016. Thermal hydraulic studies of lead–bismuth eutectic spallation target of CIADS. *Nuclear Engineering and Design* Volume 305, 672-677

Degweker et al. Program for Development of Accelerator Driven Systems in India. [Viitattu 04.05.2017]. Saatavissa:

<https://pdfs.semanticscholar.org/1f88/01a4a972d5a1ba437586e69e33904f051836.pdf>

Degweker et al. 2007. The physics of accelerator driven sub-critical reactors. *Pramana - Journal of Physics*, vol. 68, No. 2, 161-171

Hashemi-Nezhad et al. 2011. Optimal ion beam, target type and size for accelerator driven systems: Implications to the associated accelerator power. *Annals of Nuclear Energy* Volume 38, Issue 5, 1144-1155

Liu et al. 2017. Physics design of the CIADS 25 MeV demo facility. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* Volume 843, 11-17

OECD NEA. 2002. Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles. [Viitattu 12.03.2017]. Saatavissa: <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2002/3109/nea3109ch1-2.pdf>

OECD NEA. 2005. Accelerator and Spallation Target Technologies for ADS Applications. [Viitattu 02.08.2017]. Saatavissa: <https://www.oecd-neo.org/science/docs/pubs/nea5421-accelerator.pdf>

Park et al. 2000. HYPER (Hybrid Power Extraction Reactor): A system for clean nuclear energy. Nuclear Engineering and Design Volume 199, Issues 1–2, 155-165

Rubbia et al. 1995. Conceptual design of a fast neutron operated high energy amplifier. [Viitattu 20.12.2018]. Saatavissa: <https://www.oecd-neo.org/trw/docs/rubbia/concept.pdf>

Sandberg, Jorma. 2004. Ydinturvallisuus. Hämeenlinna. ISBN 951-712-500-3

SCK CEN. MYRRHA technical brochure. [Viitattu 04.02.2018] Saatavissa: http://sckcen.be/-/media/Files/Myrrha/20161114-Technical-Brochure-MYRRHA_WEB.pdf?la=en&hash=3FD2FEFF1DB5787066C2974FED146522E2D8D245

Wallenius et al. 2006. Fuels for accelerator-driven systems. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment Volume 562, Issue 2, 625-629

Zhang et al. 2011. Conceptual design of an 800 MeV high power proton driver. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms Volume 269, Issue 24, 2964-2967