

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

LUT School of Energy Systems

Ydintekniikan Laboratorio

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

PIENET MODULAARISET YDINREAKTORIT
SMALL MODULAR REACTORS

Työn tarkastaja: Juhani Hyvärinen

Työn ohjaaja: Vesa Tanskanen

Lappeenrannassa 15.5.2016

Anssi Karjomaa

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Anssi Karjomaa

Opinnäytteen nimi: Pienet modulaariset ydinreaktorit

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2016

Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto

Työn tarkastaja: Juhani Hyvärinen

34 sivua, 9 kuvaa, 4 taulukkoa

Hakusanat: pieni modulaarinen ydinreaktori, SMR, passiivinen turvallisuus, integroitu primääripiiri, tulevaisuuden ydinreaktorityypit

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää millaisia pieniä modulaarisia ydinvoimaloita (SMR engl. small modular reactor) on suunnitteilla ja miten pienet modulaariset kevytvesireaktorit eroavat toisen ja kolmannen sukupolven kevytvesilaitoksista. Työ tehtiin perehtymällä kirjallisuuslähteisiin ja erityisesti IAEA:n julkaisuihin ja raportteihin.

SMR-laitosten suurin eroavaisuus verrattuna perinteisiin kevytvesilaitoksiin on lisääntynyt passiivinen turvallisuus. Ne voidaan suunnitella siten, ettei sähköä tai operaattoria tarvita reaktorin turvallisuuden varmistamiseksi. Lisäksi useissa SMR-reaktoreissa primääripiiri on integroitu painesäiliön sisään, mikä aiheuttaa uudenlaisia vaatimuksia reaktorisydämelle ja höyrystimille.

Pienten modulaaristen voimaloiden etuina on niiden soveltuvuus pieniin sähköverkkoihin ja vaikeasti tavoitettavien alueiden energiantuotantoon. Sähköntuotannon lisäksi niitä voidaan käyttää myös lämmöntuotantoon, mikä parantaa laitosten kokonaisyötysuhdetta merkittävästi. Lisäksi SMR-laitosten erilainen kustannusrakenne tekee niistä houkuttelevan vaihtoehdon suurille ydinvoimalaitoksille, sillä pienemmät investointikustannukset alentavat sijoittajien riskejä. Lyhyemmän rakennusajan johdosta SMR-voimalat alkavat myös tuottaa voittoa suurilla laitoksilla nopeammalla aikataululla.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	4
1 JOHDANTO	5
2 SMR-REAKTOREIDEN KEHITYSTRENDEJÄ	7
2.1 Kevytvesireaktorit	7
2.1.1 CAREM	10
2.1.2 KLT- 40S	12
2.2 Raskasvesireaktorit.....	14
2.3 Kaasujäähdytteiset reaktorit	15
3 SMR-LAITOSTEN TURVALLISUUS	17
3.1 Reaktiivisuuden hallinta.....	17
3.2 Jälkilämmönpoisto reaktorisydästä	18
3.3 Radioaktiivisten aineiden pidättäminen ja suojarakennusvaihtoehdot.....	21
3.4 Eksotermisten reaktioiden välttäminen	24
4 VERTAILU SUURIIN KEVYTVESILAITOKSIIN	25
4.1 Polttoaine ja reaktorisydän	25
4.2 Höyrystimet ja sekundääripiiri	26
4.3 Pääkiertovirtaus	27
4.4 Polttoainehuolto	28
4.5 Taloudellisuus ja kustannusrakenne.....	28
4.6 Tuotannon hajauttaminen.....	30
5 YHTEENVETO	31
LÄHDELUETTELO	33

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

AHWR	Advanced Heavy Water Reactor
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	Canadian Deuterium Uranium Reactor
CNEA	Comision Nacional de Energia Atomica
D ₂ O	Raskas vesi
FPU	Floating Power Unit
H ₂ O	Kevyt vesi
HTGR	High Temperature Gas Cooled Reactor
IAEA	International Atomic Energy Agency
LEU	Low Enriched Uranium
LOCA	Loss of Coolant Accident
MOX	Mixed Oxide fuel
NEA	Nuclear Energy Agency
PHWR	Pressurized Heavy Water Reactor
PWR	Pressurized Water Reactor
RHRS	Residual Heat Removal System
RPV	Reactor Pressure Vessel
SMR	Small Modular Reactor
Th	Thorium
TRISO	Tristructural-isotropic fuel particle
U	Uraani
UO ₂	Uraanioksidi
UC ₂	Uraanikarbidi
UCO	Uraanihappikarbidi
WPu	Weaponized Plutonium

1 JOHDANTO

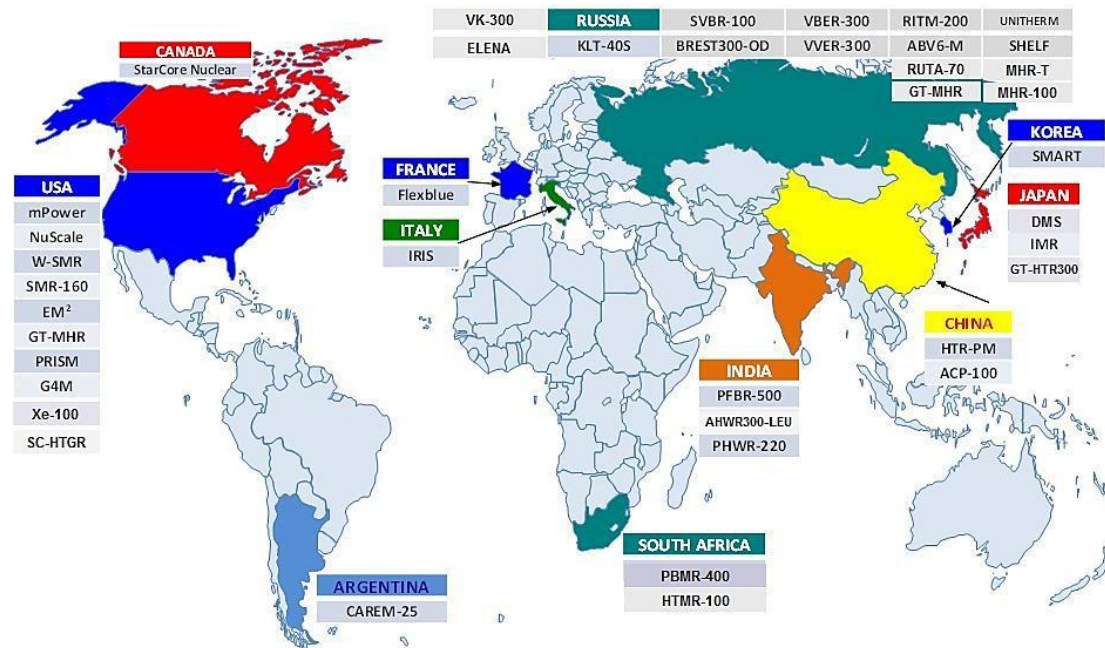
Maailman energiateollisuus on murroksessa. Energiankulutuksen arvioidaan jopa kaksinkertaistuvan seuraavan 25 vuoden kuluessa (National Nuclear Laboratory 2014, 10). Tämä johtuu kehittyvien maiden ja erityisesti Kiinan voimakkaasta teollistumisesta ja talouskasvusta. Näiden valtioiden energiantarve tyydytetään etupäässä fossiilisilla polttoaineilla, joiden käyttäminen voimistaa kasvihuoneilmiötä entisestään. Tämän kehityksen taittaminen on ilmastoa ajatellen erittäin tärkeää ja siksi tarvitaan uusia investointeja hiilidioksidivapaaseen tuotantoon, kuten uusiutuviin energiamuotoihin ja ydinvoimaan.

Japanin Fukushima ydinvoimaonnettomuuden jälkeen vuonna 2011 monet maat ovat ilmoittaneet vähentävänsä ydinvoimalla tuotetun sähkön osuutta. Esimerkiksi Saksa on ilmoittanut luopuvansa kokonaan ydinvoimasta vuoteen 2022 mennessä. Näin syntyvää energiavajetta se on joutunut korvaamaan fossiilisilla polttoaineilla ja erityisesti kivihieillä (Taloussanomat, 2014). Ilmaston kannalta tarkasteltuna tämä on vähintäänkin kyseenalaista.

Energiantarpeen kasvu ja vaatimus hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen on selkeä markkinarako ydinvoimalle. Tässä kandidaatintyössä perehdytään termisiin pieniin modulaarisiin ydinvoimalaitoksiin (SMR engl. small modular reactor), joista toivotaan seuraajaa nykyisille toisen ja kolmannen sukupolven suurille ydinvoimalaitosyksiköille. Tavoitteena on selvittää millaisia reaktorikonsepteja on suunnitteilla ja kuinka ne eroavat nykyisistä suuren kokoluokan kevytvesilaitoksista. Tutkimus on toteutettu perehtymällä erilaisiin kirjallisuuslähteisiin ja erityisesti IAEA:n (International Atomic Energy Agency) julkaisemiin raportteihin.

IAEA:n määritelmän mukaan SMR on uuden sukupolven pienikokoinen ydinreaktori, jonka sähköteho on alle 300 MW. Eroina suuriin laitoksiin mainostetaan SMR-reaktoreiden parempaa turvallisuutta, nopeampaa rakentamista, pienempiä investointikustannuksia ja hajautettua energiantuotantoa. (IAEA 2012, esipuhe.) Lisäksi modulaarinen rakenne mahdollistaa pitkälle viedyn tehdasvalmistuksen ja sitä kautta nopean rakentamisen (IAEA 2014a, 1). Reaktorimalleja on olemassa useita erilaisia, mutta niille kaikille ominaisia piirteitä ovat erilaiset passiiviset

turvallisuusratkaisut, mahdollisuus yhdistää useita samanlaisia reaktoreita suuremmiksi laitosyksiköiksi, ainakin teoriassa pienemmät rakennuskustannukset ja laitoksen käyttöön tarvittavien työntekijöiden pieni määrä. (IAEA 2012.) SMR-kehitystyötä ja tutkimusta tekevät useat yritykset ja valtiot ympäri maailmaa. Nämä valtiot esitetään seuraavassa kartassa (Kuva 1).



Kuva 1. Valtiot joissa kehitetään SMR-tekniikkaa. (IAEA 2014a, 135.)

Kartasta (Kuva 1) nähdään, että suurimmat SMR-tutkimusta tekevät valtiot ovat Venäjä ja USA, joissa molemmissa on useita erilaisia reaktorikonsepteja suunnitteilla. Yhdysvalloissa energiaministeriö on rahoittanut sekä Babcock & Wilcoxin mPower -reaktoria että NuScale Powerin NuScale-reaktoria (Richter 2014, 2).

2 SMR-REAKTOREIDEN KEHITYSTRENDEJÄ

SMR-laitosten kehitys on monipuolista ja niitä kehitetäänkin kevyt- ja raskasvesireaktoreista, sekä kaasujäähdytteisistä reaktoreista. (HTGR engl. high temperature gas cooled reactor). Näiden lisäksi suunnitellaan myös metallijäähdytteisiä nopeita reaktoreita, joita ei ainakaan toistaiseksi käytetä suuressa mittaluokassa energiantuotantoon, vaan rakennetut reaktorit ovat teholtaan pieniä ja palvelevat ensisijaisesti tutkimuskäytössä.

Ylivoimaisesti suurin osa kehitteillä olevista laitoskonsepteista perustuu perinteisiin kevytvesireaktoreihin. Kuten kuvasta 1 käy ilmi, niitä on suunnitteilla useita sekä Yhdysvalloissa että Venäjällä. Sen sijaan Intia kehittää tällä hetkellä ainoana maailmassa raskasvesihidasteista SMR-reaktoria vanhan CANDU- reaktorin pohjalta.

Kevytvesireaktoreiden lisäksi Yhdysvalloissa ja Venäjällä ollaan kiinnostuneita myös kaasujäähdytteisistä reaktoreista ja kaksi heliumjäähdytteistä reaktoria onkin kehitysasteella Yhdysvalloissa ja kolme Venäjällä. Lisäksi Japani, Kiina ja Etelä-Afrikka kehittävät omia kaasujäähdytteisiä SMR-reaktoreitaan. (IAEA 2014a, 95–129.)

Tässä luvussa esitellään suunnitteilla olevat SMR-konseptit, joista tarkemmin on perehdytty kaikkein valmiimpiin ja nykyisellään toteuttamiskelpoisimpiin ratkaisuihin.

2.1 Kevytvesireaktorit

Kevytvesireaktorit ovat maailman yleisin ydinvoimalaitostyyppi. Ne kuuluvat termisiin ydinreaktoreihin eli fissiossa vapautuvat neutronit hidastetaan moderaattorin avulla termiselle alueelle, jolloin ne aiheuttavat fissioita tehokkaasti. (Kalli 2013a, 55.) Moderaattorina käytetään pääkierron jäähdytysvettä. Kevytvesireaktorit jaetaan vielä kahteen alaluokkaan: paine- ja kiehumusvesireaktoreihin. Kiehumusvesireaktorissa (BWR engl. Boiling Water Reactor) veden annetaan kiehua painesäiliössä ja painevesireaktorissa (PWR engl. Pressurized Water Reactor) vesi pidetään riittävässä paineessa siten, ettei kiehumista tapahdu. Suunnitteilla olevat SMR-kevytvesireaktorit on esitetty taulukossa 1. Taulukossa esitetty integroitu primääripiiri tarkoittaa

primääripiirin rakentamista painesäiliön sisään. Lyhenteellä RPV viitataan reaktorin painesäiliöön (engl. Reactor Pressure Vessel).

Taulukko 1. Kehitteillä olevien kevytvesi-SMR-reaktoreiden tärkeimpiä teknisiä tietoja. (IAEA 2014a.)

	CAREM	ACP-100	Flexblue	IRIS
Valtio	Argentiina	Kiina	Ranska	Kansainv.
Sähköteho [MW]	27	100	160	335
Lämpöteho [MW]	100	310	530	1000
RPV:n Korkeus [m]	11	10	8	21
RPV:n Halkaisija [m]	3	3	4	6
Integroitu prim. piiri	x	x	-	x
Primäärikierto	Luonn.	Pakko	Pakko	Pakko
Polttoaine	UO2	UO2	UO2	UO2
Polttoainekierto [kk]	14	24	40	48
Rikastusaste [%]	3,1	2,4–3,0	4,5	4,95
Rakenteilla	x	-	-	-
	DMS	IMR	SMART	KLT- 40S
Valtio	Japani	Japani	Etelä- Korea	Venäjä
Sähköteho [MW]	300	350	100	35
Lämpöteho [MW]	840	1000	330	150
RPV:n Korkeus [m]	16	17	19	5
RPV:n Halkaisija [m]	6	6	7	2
Integroitu prim. piiri	-	x	x	-
Primäärikierto	Luonn.	Luonn.	Pakko	Pakko
Polttoaine	UO2	UO2	UO2	UO2
Polttoainekierto [kk]	24	26	36	28
Rikastusaste [%]	4,3	4,8	<5	<20
Rakenteilla	-	-	-	x
	ABV- 6M	RITM- 200	VVER- 300	UNITHERM
Valtio	Venäjä	Venäjä	Venäjä	Venäjä
Sähköteho [MW]	6	50	300	6,6
Lämpöteho [MW]	38	175	850	30
RPV:n Korkeus [m]	6	9	11	10
RPV:n Halkaisija [m]	2	3	3	3
Integroitu prim. piiri	-	x	-	-
Primäärikierto	Luonn.	Pakko	Pakko	Luonn.
Polttoaine	UO2	UO2	UO2	UO2
Polttoainekierto [kk]	120–144	54/84	18–24	200
Rikastusaste [%]	19,7	<20	3,3- 4,79	19,75
Rakenteilla	-	x	-	-

	SHELF	ELENA	VK- 300	mPower
Valtio	Venäjä	Venäjä	Venäjä	USA
Sähköteho [MW]	6	0,068	250	180
Lämpöteho [MW]	28	3,3	750	530
RPV:n Korkeus [m]			13	27
RPV:n Halkaisija [m]			5	4
Integroitu prim. piiri	-	-	x	x
Primäärikierto	Molemmat	Luonn.	Luonn.	Pakko
Polttoaine	UO2	UO2	UO2	UO2
Polttoainekierto [kk]	56	300	72	48
Rikastusaste [%]	<20	15,2	4	<5
Rakenteilla	-	-	-	-

	NuScale	SMR- 160	Westighouse SMR	RUTA- 70	VBER- 300
Valtio	USA	USA	USA	Venäjä	Venäjä
Sähköteho [MW]	45	160	225	-	325
Lämpöteho [MW]	160	525	800	70	917
RPV:n Korkeus [m]	17	15	28	Ei paineastiaa	9
RPV:n Halkaisija [m]	3	3	4		4
Integroitu prim. piiri	x	-	x	-	-
Primäärikierto	Luonn.	Luonn.	Pakko	Molemmat	Pakko
Polttoaine	UO2	UO2	UO2	UO2	UO2
Polttoainekierto [kk]	24	36- 48	24	36	72
Rikastusaste [%]	<4,95	4,95	<5	3	4,95
Rakenteilla	-	-	-	-	-

Taulukosta huomataan, että Venäjä on panostanut voimakkaasti erittäin pienikokoisten reaktoreiden kehittämiseen. IAEA:n julkaisun mukaan KLT-40S ja ABV-6M ovat molemmat kelluvia laitoksia ja RITM-200 on mahdollista sijoittaa maalle tai vaihtoehtoisesti rakentaa se kelluvaksi yksiköksi. SHELF on puolestaan suunniteltu vedenalaiseksi voimanlähteeksi. (IAEA 2014a.) Lisäksi havaitaan, että pienitehoisten laitosten latausväliä on kasvatettu rikastamalla polttoaine väkevämmäksi kuin nykyään käytössä olevissa kevytvesireaktoreissa. Venäjä hakeekin SMR-laitoksista energiantuotantoratkaisua vaikeasti saavutettaviin, syrjäisiin kohteisiin esimerkiksi Pohjois-Siperiassa (IAEA 2004, 733). Tällöin tärkeäksi tekijäksi nousee nimenomaan pitkä toiminta-aika ilman laitoksen huolto- ja lataustarvetta.

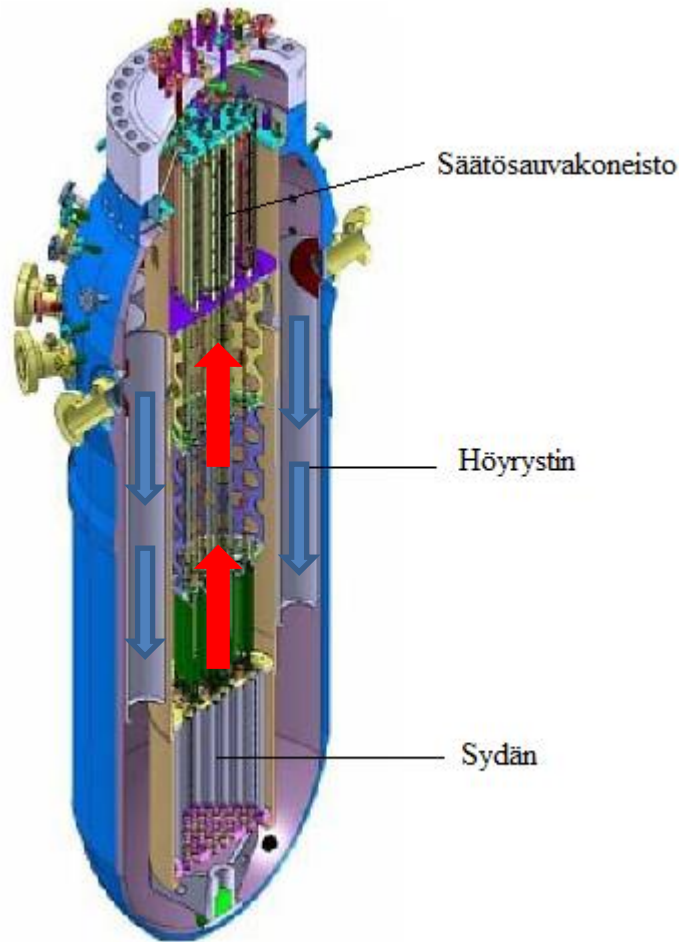
Yhdysvallat ja Japani puolestaan pyrkivät käyttämään SMR-laitoksia vanhempien ydinvoimaloidensa tapaan kantaverkon sähköntuotantoon. Tällöin etuna perinteiseen ydinvoimalaitokseen verrattuna on mahdollisuus kasvattaa tuotantoa nopeasti kysynnän kasvaessa, rakentamalla uusia reaktoreita vanhojen rinnalle. Lisäksi SMR-reaktorit on usein suunniteltu sähköntuotannon ohella myös lämmöntuotantoon.

Lisäksi on huomionarvoista todeta, että japanilainen DMS ja venäläinen VK-300 ovat ainoat kehitteillä oleva kiehutusvesi-SMR:t kaikkien muiden laitosten perustuessa painevesikonseptiin (IAEA 2014a). Seuraavissa alaluvuissa perehdytään tarkemmin kahteen SMR-laitokseen jotka ovat edenneet rakennusvaiheeseen, ja edustavat kahta hyvin erilaista kehityslinjaa.

2.1.1 CAREM

CAREM on Argentiinan ydinenergiajärjestön (CNEA) suunnittelema modulaarinen SMR-reaktori. Nyt Atuchan voimalaitosalueelle rakennettavan prototyypin sähköteho on 27 MW ja saman mallin mukaan on tulevaisuudessa tarkoitus rakentaa suurempia 100–200 MW yksiköitä (World Nuclear News 2013). Tämän hetkisten arvioiden mukaan laitos on tarkoitus ladata ensimmäisen kerran vuonna 2018 (IAEA 2014a, 7).

Konseptin suurin rakenteellinen ero verrattuna perinteisiin kevytvesireaktoreihin on painesäiliö (Kuva 2). Laitoksen primääripiiri on rakennettu painesäiliön sisään, josta löytyvät sydämen lisäksi paineistin, koko säätösauvakoneisto ja 12 kappaletta läpivirtaushöyrystimiä (Ibid, 9). Koska koko primääripiiri on painesäiliössä samassa painetasossa eikä säiliön ulkopuolella ole primääriputkia, on suuren koko luokan jäähdytteenmenetyssonnettomuus (LOCA engl. Loss of Coolant Accident) erittäin epätodennäköinen, sillä se vaatisi paineastian puhkeamisen. Pienempiä primäärivuotoja voi sen sijaan esiintyä höyrystimissä putkirikkojen tapauksessa. Tällöin ensisijaisena ongelmana on kuitenkin sekundääripiirin kontaminoituminen, sillä höyrystinputket ovat kooltaan pieniä eivätkä yksittäiset putkivuodot vaaranna sydämen jäähdytystä.

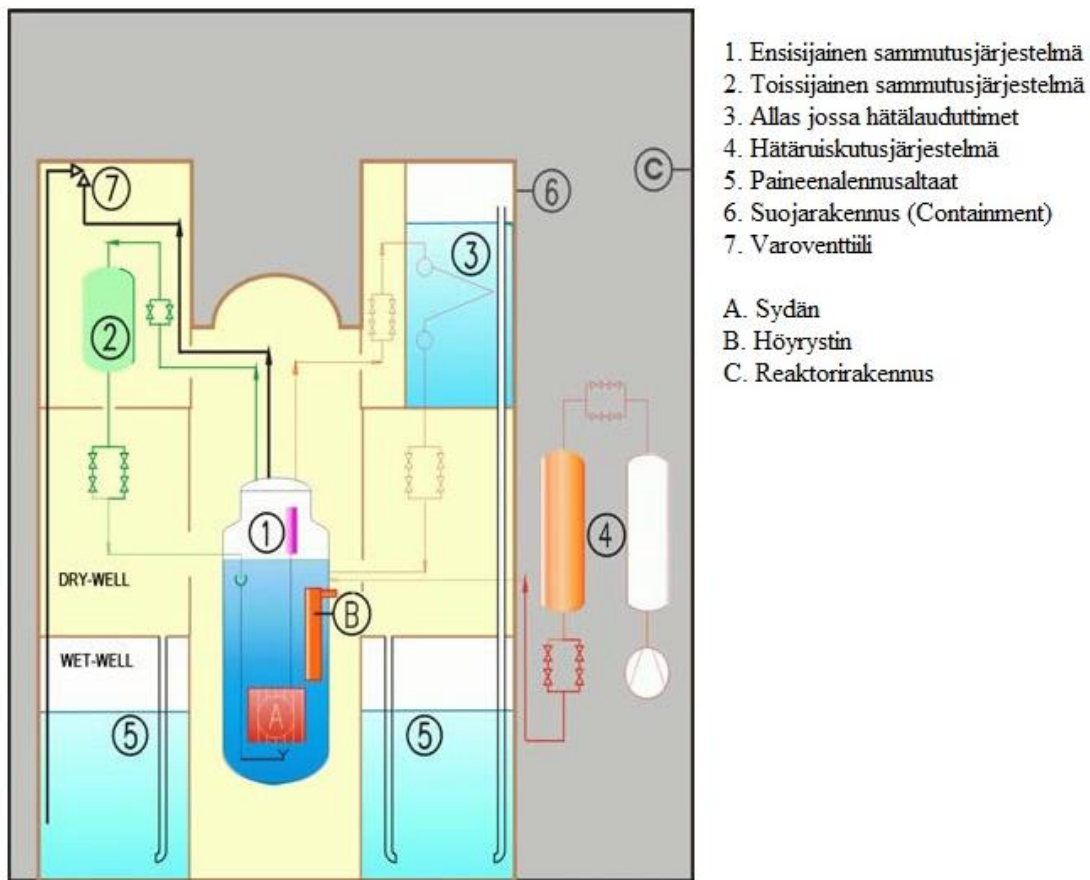


Kuva 2. Poikkileikkauskuvaa CAREM:n painesäiliöstä (IAEA 2014a, 7). Kuvasta nähdään höyrystimien sijoittuminen painesäiliön reunoille sydämen ympärille. Sydämessä lämmennyt vesi nousee painesäiliön keskellä ylöspäin ja menee sisään höyrystimeen sen yläosasta. Höyrystimessä vesi luovuttaa lämpöä, jolloin sen tiheys suurenee ja se poistuu höyrystimen alaosasta, josta se johdetaan takaisin sydämeen. Vesi kiertää siis primääripiirissä luonnonkierrolla kuvan nuolien osoittamalla tavalla.

CAREM-reaktorin turvallisuusjärjestelmät perustuvat kokonaan passiivisiin ratkaisuihin. Rinnakkaisperiaatteen mukaisesti sekä reaktorin pysäytysjärjestelmä että jälkilämmönpoistojärjestelmä (RHRS engl. Residual Heat Removal System) on kahdennettu (IAEA 2014a, 9).

Jälkilämmönpoistojärjestelmän toiminta nähdään kuvasta 3. Liian korkean lämpötilan vuoksi höyrystynyt primäärivesi johdetaan jäähdytysaltaissa sijaitseviin hätälauhduttimiin. Lauhduttimina käytetään teholtaan 2 MW U-putkilämmönsiirtimiä, jotka on sijoitettu vesialtainten suojarakennuksen sisälle. Lauhduttimissa höyry

lauhtuu vedeksi ja se ohjataan takaisin painesäiliöön. Näin saadaan alennettua primääripiirin painetta ja lämpötilaa. (IAEA 2014b, 191.)



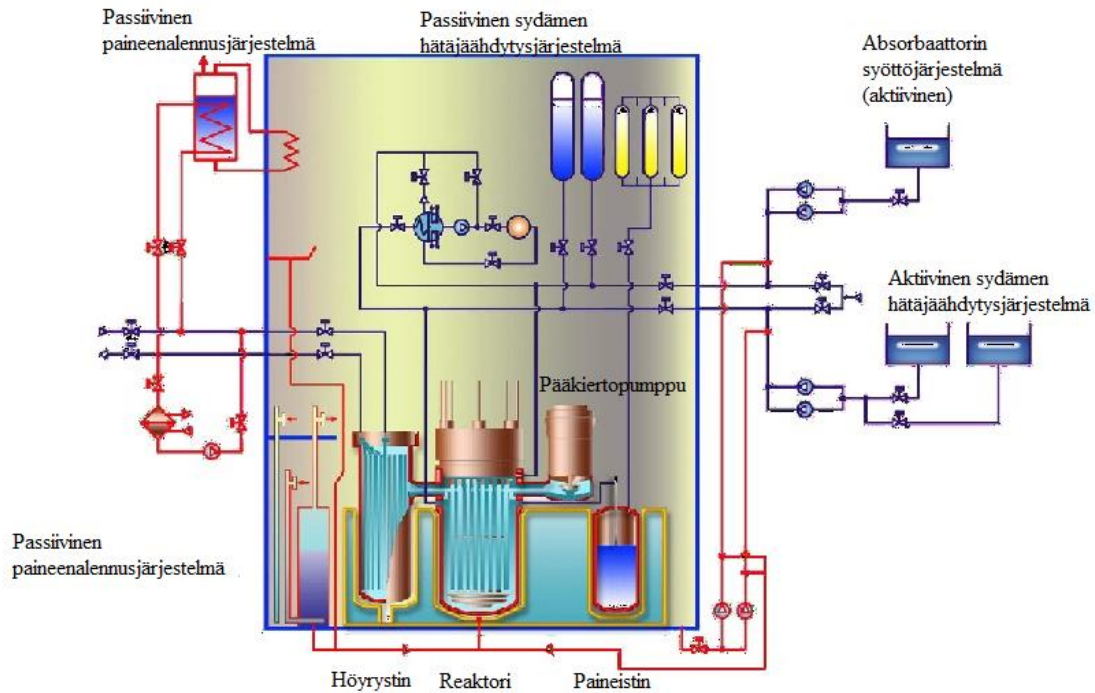
Kuva 3. CAREM-reaktorin reaktorirakennuksen komponentit. (IAEA 2014b, 192.)

2.1.2 KLT- 40S

KLT-40S on venäläisen OKBM Afrikantovin suunnittelema kelluva ydinvoimalaitos (FPU engl. Floating Power Unit), joka perustuu jo käytössä olevaan KLT-40-reaktoriin. Koko laitos rakennetaan telakalla ja se kuljetetaan tuotantopaikalle käyttövalmiina. Tällä hetkellä rakenteilla on yksi FPU, johon sijoitetaan kaksi reaktoriyksikköä. Niiden on tarkoitus olla kaupallisessa käytössä viimeistään 2017. (IAEA 2014a, 38.)

Kelluvan laitoksen etuna on siirrettävyys. Projektin tarkoituksena onkin kehittää sähkön- ja lämmöntuotantoa rannikon haja-asutusalueilla, tai käyttää laitosta tukemaan merellä toimivia öljyn- tai kaasunporauslauttoja (Ibid, 38). Näissä kohteissa laitoksen uudelleen lataaminen on usein vaikeaa, jolloin polttoainekierron pituutta on

edullista kasvattaa rikastusastetta nostamalla. Kuten taulukosta 1 nähdään, latausväli on noin kaksi kertaa pidempi kuin CAREM:ssa tai nykyisissä ydinvoimalaitoksissa, joissa polttoainekierron pituus on noin 12 kuukautta. Laitoksesta löytyvät sekä tuoreen että käytetyn polttoaineen varastot, eli se on omavarainen latausväliä selvästi pidemmän ajanjakson (IAEA 2004, 749). Laitoksen rakenne on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. KLT-40S reaktorin tärkeimmät komponentit ja turvallisuusjärjestelmät. (IAEA 2014a, 41.)

Kuvasta huomataan että reaktorin rakenne poikkeaa oleellisesti CAREM:sta, jonka rakenne oli esitetty kuvissa 2 ja 3. KLT-40S-reaktorissa ei ole integroitua primääripiiriä vaan höyrystin ja paineistin on sijoitettu painesäiliön ulkopuolelle. Lisäksi jäähdytekierto vaatii pääkiertopumpun toimiakseen. Eroja on myös laitosten turvallisuusjärjestelmissä. CAREM:ssa ne perustuivat passiivisiin ratkaisuihin, mutta kuten kuvasta 4 käy ilmi, KLT-40S-reaktorissa on käytetty sekä aktiivisia että passiivisia turvallisuusjärjestelmiä.

2.2 Raskasvesireaktorit

Kevytvesireaktorin tavoin myös raskasvesireaktorit ovat termisiä ydinreaktoreita, mutta nyt moderaattorina käytetään raskasta vettä (D₂O) normaalin veden sijasta. Ydintekniikan kannalta tärkein eroavaisuus on siinä, että raskaan veden vaikutusala, eli kyky kaapata fissiossa vapautuvia neutroneita, on oleellisesti pienempi kuin kevyt vesi. Tällöin tarvitaan vähemmän neutroneja ketjureaktion pitämiseen kriittisenä, koska suurempi osa neutroneista pääsee kosketuksiin fissioituvan ydinpolttoaineen kanssa. Vaikutusalojen ero on sen verran suuri että raskasvesireaktori kykenee käyttämään polttoaineenaan rikastamatonta luonnonuraania. (Kalli 2013a, 56.)

Tästä on hyötyä etenkin valtioille, joilla on tarpeeksi suuret uraaniesiintymät ydinvoimalaitostensa tarpeisiin, mutta joilla ei ole omaa rikastustekniikkaa. Tämän vuoksi esimerkiksi Kanadan ydinenergiantuotanto pohjautuu raskasvesireaktoreihin. (Kyrki-Rajamäki 2014, 143.) Tällä hetkellä on kehitteillä vain yksi uuden sukupolven raskasvesi-SMR. Intialainen AHWR300-LEU, jonka reaktorirakenne perustuu kanadalaiseen CANDU-reaktoriin. Projektin tarkoituksena on tutkia Thoriumin käyttöä reaktorin polttoaineena yhdessä matalan rikastusasteen uraanin (LEU engl. Low Enriched Uranium) kanssa (IAEA 2014a, 18). Reaktorin tärkeimmät ominaisuudet on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. AHWR300-LEU- reaktorin teknisiä tietoja (IAEA 2014a.) Calandria on reaktorin raskasvesisäiliö, jonka sisään polttoaine on sijoitettu paineputkissa.

	AHWR300- LEU
Valtio	Intia
Reaktorityyppi	Paineputkireaktori
Sähköteho [MW]	304
Lämpöteho [MV]	920
Calandrian korkeus [m]	5
Calandrian halkaisija [m]	6,9
Primäärikierto	Luonnonkierto
Moderaattori	D ₂ O
Jäähdyte	H ₂ O
Polttoaine	Th, LEU
Rikastusaste [%]	4,3
Palama [MWd/tu]	60 000
Turvallisuus	Aktiivinen+ Passiivinen

Taulukosta 2 nähdään, että reaktorin palama on huomattavan suuri verrattuna nykyisin käytössä oleviin raskasvesireaktoreihin, sillä CANDU:ssa palama on vain 7500 MWd/t_U (Kyrki-Rajamäki 2014, 146). Toisaalta nyt polttoaineena käytetäänkin rikastettua uraania, mikä on epätavallista perinteisille raskasvesireaktoreille.

2.3 Kaasujäähdytteiset reaktorit

Vaikka kaasujäähdytteiset reaktorit eivät tällä hetkellä kykene kilpailemaan vesijäähdytteisten reaktorien kanssa, uusilla HTGR reaktoreilla on useita ominaisuuksia, jotka voivat parantaa kaasujäähdytteisten reaktoreiden asemaa tulevaisuudessa. Näistä tärkeimpiä ovat korkea terminen hyötysuhde (jopa 45 %), korkean lämpötilan hyödyntämismahdollisuudet erilaisissa sovelluksissa kuten vedyn tuotannossa ja osaltaan kevytvesireaktoreita paremmat turvallisuuslähtökohdat. Näistä tärkeimmät ovat jäähdytteenä käytettävän heliumin kemiallinen stabiilius ja uudenlainen polttoainekonsepti, jonka on todettu tehokkaasti estävän fissiotuotteiden leviämistä jäähdytteeseen. (IAEA 2010, 11.)

Vesijäähdytteisistä reaktoreista poiketen kaasujäähdytteisten reaktorien moderaattorina käytetään grafiittia. Myös tämä parantaa osaltaan laitosten turvallisuutta, sillä polttoainetta ympäröivän grafiitin suuri massa tasoittaa reaktorin lämpötilaa suuren lämpökapasiteettinsa ansiosta (Ibid, 12). Toinen merkittävä ero on polttoaineessa. Vesijäähdytteisissä reaktoreissa uraani on sidottu keraamisiin uraanioksidipelletteihin, jotka ovat zirkonium-teräksestä valmistettujen polttoainesauvojen sisällä. Nämä sauvat kootaan yhteen polttoainenipuiksi ja asetellaan reaktoriin. HTGR reaktoreissa polttoaine on pellettien sijaan pieninä kuulina (TRISO engl. Tristructural-isotropic fuel particle). Polttoainekuulan keskusta on sijoitettu fissiomateriaali ja se on ympäröity kerroksittain erilaisilla suoja-aineilla. Nämä pienet kuulat puolestaan on koottu suurempien kuulien tai grafiittiblokkien sisään polttoaineelementeiksi. Tutkimusten perusteella TRISO-partikkelit kestävät korkeitakin lämpötiloja ilman, että keskusta syntyvät fissiotuotteet pääsevät leviämään (Ibid, 22).

Uuden sukupolven HTGR-reaktoreita on suunnitteilla Kiinassa, Japanissa, Venäjällä, Yhdysvalloissa ja Etelä- Afrikassa. Nämä kaasujäähdytteiset SMR reaktorit on koottu seuraavaan taulukkoon 3.

Taulukko 3. Kehitteillä olevien kaasujäähdytteisten SMR-reaktorien tärkeimpiä ominaisuuksia (IAEA 2014a)

	HTR-PM	GT-HTR300	GT-MHR	MHR-T	MHR-100
Valtio	Kiina	Japani	Venäjä	Venäjä	Venäjä
Sähköteho [MW]	210	100-300	285	205,5	25- 87
Lämpöteho [MW]	500	<600	600	600	215
Korkeus [m]	25	23	31	33	17
Halkaisija [m]	6	8	10	7	5
Moderaattori	Grafiitti	Grafiitti	Grafiitti	Grafiitti	Grafiitti
Jäähdyte	Helium	Helium	Helium	Helium	Helium
Polttoaine	UO ₂ , UC ₂ , UCO	UO ₂	LEU, Wpu	UO ₂	UO ₂
Rikastusaste [%]	8,5	14		20	<20
Voimaprosessi	Rankine	Brayton	Brayton/Rankine	Brayton	Brayton

	PBMR-400	HTMR-100	SC-HTGR	Xe-100
Valtio	Etelä Afrikka	Etelä Afrikka	USA	USA
Sähköteho [MW]	165	35	272	35
Lämpöteho [MW]	400	100	625	100
Korkeus [m]	30	16		15
Halkaisija [m]	6	5		5
Moderaattori	Grafiitti	Grafiitti	Grafiitti	Grafiitti
Jäähdyte	Helium	Helium	Helium, vesi	Helium
Polttoaine	UO ₂	LEU,Th,HEU,Pu	UCO	UCO
Rikastusaste [%]	9,6		<20	10
Voimaprosessi	Brayton	Rankine	Rankine	Rankine

Taulukosta 3 havaitaan, että helium on vakiinnuttanut asemansa kaasureaktoreiden jäähdytteenä. Heliumin etuja ovat sen kemiallinen stabiilius korkeissakin lämpötiloissa sekä hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet. Haittapuolia ovat kaasun korkea hinta yhdistettynä vuotoherkkyyteen. (Kyrki-Rajamäki 2014, 17.) Lisäksi nähdään että voimantuottoon voidaan käyttää sekä höyry- (Rankine) että kaasuturbiiniprosessia (Brayton).

Taulukossa esitetyistä konsepteista PBMR on ainakin toistaiseksi lopetettu Etelä-Afrikan luovuttua hankkeen rahoittamisesta. Sen sijaan kiinalainen HTR-PM on jo rakennusasteella ja on täten kypsä HTGR-reaktorikonsepti. (Kyrki-Rajamäki 2014, 174.)

3 SMR-LAITOSTEN TURVALLISUUS

Tässä luvussa tutustutaan SMR-reaktoreiden turvallisuusjärjestelmiin ja passiivisiin turvallisuusratkaisuihin. Reaktiivisuuden hallinta, jälkilämmönpoisto, suojarakennusvaihtoehdot sekä eksotermisten reaktioiden välttäminen käsitellään jokainen omassa alaluvussaan.

3.1 Reaktiivisuuden hallinta

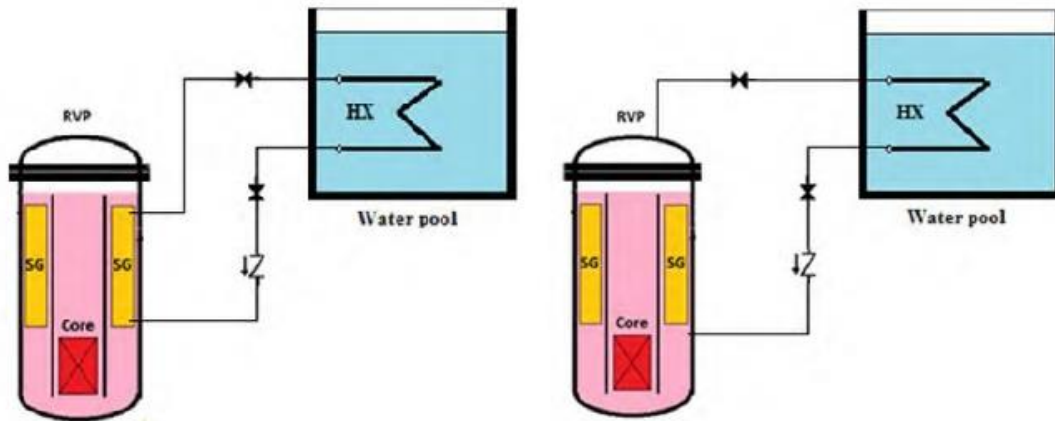
Reaktiivisuuden hallinnalla vaikutetaan suoraan sydämen tuottamaan lämpötehoon. Turvallisuuden parantamiseksi reaktori on jo suunnitteluvaiheessa mitoitettu alimoderoiduksi, jolloin saadaan aikaan reaktorin negatiivinen takaisinkytkentä. Tällöin reaktorin lämpötehon noustessa moderaattorin tiheys pienenee ja sen kyky hidastaa neutroneita huononee. Tästä seuraa reaktiivisuuden pieneneminen ja reaktorin tehon laskeminen. (Kalli 2013b, 86.)

Varsinaisia reaktiivisuuden hallintajärjestelmiä ovat säätösauvat ja boorihapon syöttö jäähdytteeseen. Yleensä kiehutusvesireaktoreissa tehonsäätö toteutetaan säätösauvoilla ja painevesilaitoksissa voidaan käyttää molempia edellä mainituista järjestelmistä. Boorihapposäädön etuna on tasaisempi palama sydämessä, sillä reaktiivisuus pysyy tasaisena reaktorin eri osissa. Pikasulkutilanteessa käytetään usein molempia järjestelmiä. Myös uudet SMR-laitokset käyttävät näitä menetelmiä tehon säädössä. Kehitys on kuitenkin johtanut siihen, että säätösauvojen käyttökoneisto on useissa SMR-konsepteissa sijoitettu painesäiliön sisään eikä ulkopuolelle, kuten vanhoissa laitostyypeissä. Tällä estetään säätösauvan sinkoutuminen reaktorista paine-eron seurauksena ja sen aiheuttamat vaaratilanteet kuten pienet jäähdytteen menetysonnettomuudet painesäiliön puhkeamisen seurauksena. Lisäksi boorihapon syöttöjärjestelmiksi ovat vakiintuneet passiiviset ratkaisut kuten typpiakut tai painovoimainen syöttö. Osittain koska näitä ratkaisuja on käytössä myös vanhemmissa reaktoreissa. (IAEA 2016, 13.)

3.2 Jälkilämmönpoisto reaktorisydäimestä

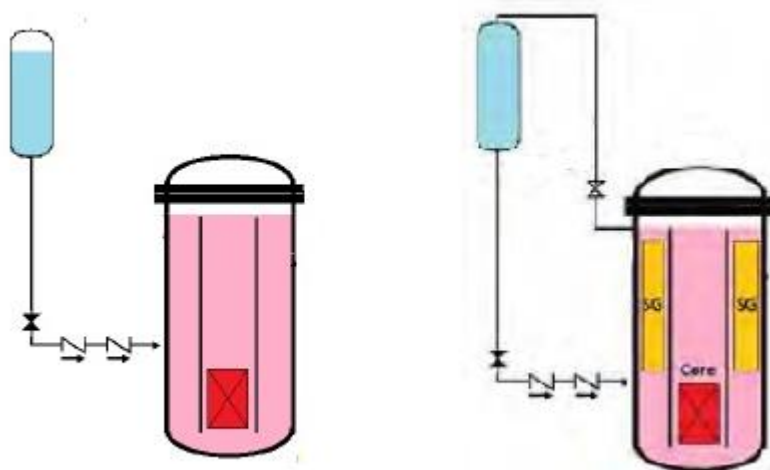
Vaikka ketjureaktio saadaankin edellä mainituilla järjestelmillä pysäytettyä, se ei kokonaan pysäytä reaktorin lämmöntuottoa. Polttoaineessa tapahtuvan spontaanin fission seurauksena sydämen jälkilämpöteho on reaktorin pikasulun jälkeenkin useita megawatteja. Tämän jälkilämmön poistaminen reaktorista on edellytys primääripiirin ja polttoaineen eheyden säilyttämiseksi. Tavallisesti painevesilaitoksissa jälkilämpö poistetaan höyrystimien kautta sekundääripiiriin ja sieltä edelleen mahdollisten välijäähdytyspiirien kautta lopulta jäähdytyspiiriin ja esimerkiksi meriveteen. Tarvittavien pumppujen virransyöttö varmistetaan esimerkiksi hätädieselgeneraattoreilla. Jäähdytteenmenetysonnettomuuden varalta on lisäksi mahdollisuus syöttää lisävetä reaktoriin. Syöttö toteutetaan aktiivisesti jäähdytyspumpuilla tai passiivisesti esimerkiksi typpiakuilla, jotka kaasun paineen avulla työntävät lisävetä reaktoriin.

Useissa SMR-reaktoreissa jälkilämmönpoistoon on kehitetty kokonaan passiivisia järjestelmiä. Tämä on mahdollista varmistamalla suojarakennuksen sisään riittävän suuri määrä jäähdytysvettä erillisiin altaisiin. Kokonaan luonnonkiertoon pohjautuva järjestelmä toimii siten, että höyrystimen sekundääripuolelle tuodaan jäähdytysaltaasta viileää vettä. Kun primääripiiristä nyt siirtyy lämpöä jäähdytysveteen, se lämpenee ja luonnonkierron tuloksena syntyy jäähdytysveden kierto altaan ja höyrystimen välille. Menetelmää hyödynnetään IRIS-, SMART- ja NuScale-reaktoreissa. Lisäksi on mahdollista poistaa lämpöä suoraan altaaseen ilman höyrystintä. Kun jäähdytteen lämpötila nousee onnettomuustilanteessa liian suureksi, se alkaa kiehua myös painevesireaktorissa. Syntyvä höyry ohjataan putkea pitkin altaassa olevaan lauhduttimeen, josta vedeksi lauhtunut höyry valuu putkea pitkin takaisin reaktorin alaosaan. Tämänkaltaisen järjestelmän on käytössä esimerkiksi CAREM:ssa sekä myös jo edellä mainitussa NuScale-reaktorissa. (IAEA 2016, 13–14.) Seuraavassa kuvassa (Kuva 5) on esitetty molempien jälkilämmönpoistojärjestelmien toimintaperiaate.



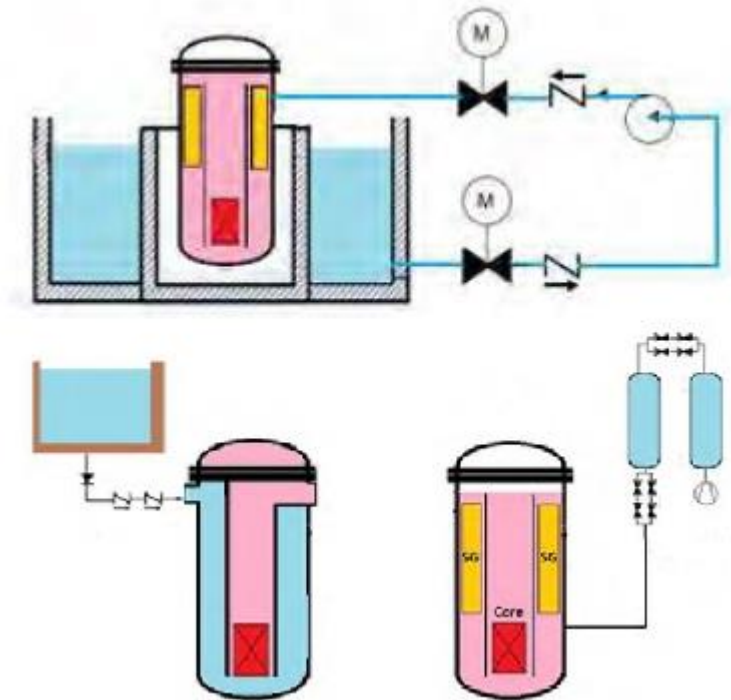
Kuva 5. Vasemmanpuoleisessa kuvassa jälkilämpö poistetaan höyrytimen kautta jäähdytysaltaaseen. Oikealla on esitetty ratkaisu, jossa höyrytän ohitetaan ja painesäiliön höyry ohjataan suoraan jäähdytysaltaaseen ilman välipiiriä. (IAEA 2016, 14–15.)

Näiden järjestelmien rinnalle tarvitaan vielä luonnollisesti lisävedensyöttöjärjestelmät, joilla turvataan riittävä vesimäärä primääripiirissä jäähdytteenmenetysonnettomuuksissa. Kuten perinteisissäkin kevytvesireaktoreissa, lisävesijärjestelmät on jaettu korkea- ja matalapaineisiin ruiskutusjärjestelmiin. Korkeapaineisia järjestelmiä (Kuva 6) käytetään pienten vuotojen tapauksessa, mutta suurissa jäähdytteenmenetysonnettomuuksissa ne tarvitsevat rinnalleen matalapaineiset järjestelmät (Kuva 7). SMR-laitoksissa on edellä mainittujen typpiakkutoimisten ruiskutusjärjestelmien lisäksi käytössä painovoimaisia ruiskutusjärjestelmiä esimerkiksi IRIS ja Westinghouse SMR -reaktoreissa. Näiden passiivisten järjestelmien lisäksi ruiskutus voidaan toteuttaa aktiivisilla pumppujärjestelmillä. Näin on tehty korealaisessa SMART-reaktorissa. (IAEA 2016, 15–16.)



Kuva 6. Vasemmalla typpiakkutoiminen ja oikealla painovoimainen korkeapaineinen lisävedensyöttöjärjestelmä. Normaalikäytössä painovoimaisen järjestelmän ylempi venttiili on avoin ja alempi suljettu. Häätötilanteessa myös alempi venttiili avataan, jolloin booripitoinen vesi työntyy reaktoriin. (IAEA 2016, 15–16.)

Matalapaineisissa järjestelmissä (Kuva 7) käytetään usein pumppua lisäveden syöttämiseen painesäiliöön. Jäähdytysvesi pumpataan reaktorin yläosasta sisään painesäiliöön ja vuodon seurauksena se päätyy lopulta suojarakennuksen lattiakaivoon. Lämmennyt jäähdytysvesi pumpataan kaivosta lämmönsiirtimen kautta takaisin reaktoriin. Käytössä on myös passiivisia matalapaineisia ruiskutusjärjestelmiä. Niillä on sama toimintaperiaate kuin korkeapaineisissakin järjestelmissä, mutta vesimäärä on suurempi ja se vapautetaan painesäiliön paineen pudottua alhaisemmaksi. Näiden järjestelmien ongelmiksi muodostuu rajallinen vesimäärä, jolloin reaktorin pidempiaikainen jäähdyttäminen vaatii aktiivisia järjestelmiä lisäveden saamiseksi reaktoriin. Näiden järjestelmien lisäksi sellaisissa reaktorikonsepteissa joissa suojarakennus on upotettu veteen, voidaan painesäiliöstä päästää höyryä suojarakennukseen. Tiivistyttyään suojarakennuksen pohjalle vedeksi, voidaan se syöttää takaisin reaktorin painesäiliöön. Menetelmää hyödynnetään ainakin NuScale-reaktorissa. (IAEA 2016,17–19.)



Kuva 7. Kuvassa ylhäällä on aktiivinen lisäveden syöttöjärjestelmä ja alhaalla painovoimainen ja paineistettu lisävedensyöttöjärjestelmä. Paineistetussa lisävedensyötössä boorihappoa sisältävät tankit on paineistettu kuvassa näkyvällä pumpulla. (IAEA 2016, 17–18.)

3.3 Radioaktiivisten aineiden pidättäminen ja suojarakennusvaihtoehdot

Radioaktiivisten aineiden pidättäminen on kevytvesilaitoksissa toteutettu useilla peräkkäisillä leviämisesteillä. Ensimmäinen leviämiseste on polttoainepelletti, jonne muodostuu ydinreaktioiden seurauksena erilaisia voimakkaasti radioaktiivisia fission tuotteita. Toisen leviämisesteen muodostaa polttoainesauvan suojakuori, jonka tehtävänä on pidättää erityisesti polttoaineesta helposti vapautuvat fissionkaasut sisällään. Kolmannen leviämisesteen muodostavat reaktorin painesäiliö ja primääripiiri, jotka estävät reaktorisydämessä kiertävän aktivoituneen jäädytysveden leviämisen. Neljäs leviämiseste on suojarakennus.

Suojarakennus on yleensä betonista valmistettu rakennus, joka suojelee voimalaitoksen reaktoria ja primääripiiriä. Se toimii osana syvyyspuolustusta estämällä radioaktiivisten aineiden leviämisen ympäristöön tilanteissa, joissa polttoainesauvat ja primääripiiri vuotavat. Tämän lisäksi se suojaa reaktoria ja

voimalaitoksen muita kriittisiä järjestelmiä ulkoisilta uhilta, kuten luonnonilmiöiltä tai vihamieliseltä toiminnalta. Tällä hetkellä esimerkiksi Suomessa käytössä olevat suojarakennukset on suunniteltu kestävämmän pienkoneen törmäys rakennukseen. Uusia reaktoreita rakennettaessa vaatimuksena on nykyisin valtiosta riippuen usein joko suuren matkustajakoneen tai hävittäjäkoneen törmäyksen kestäminen. (Kyrki-Rajamäki 2014, 80.) Useissa SMR-malleissa suojarakennus sijoitetaan joko kokonaan tai osittain maan alle, jolloin se on paremmin suojattu ulkoisia uhkia vastaan (IAEA 2014a).

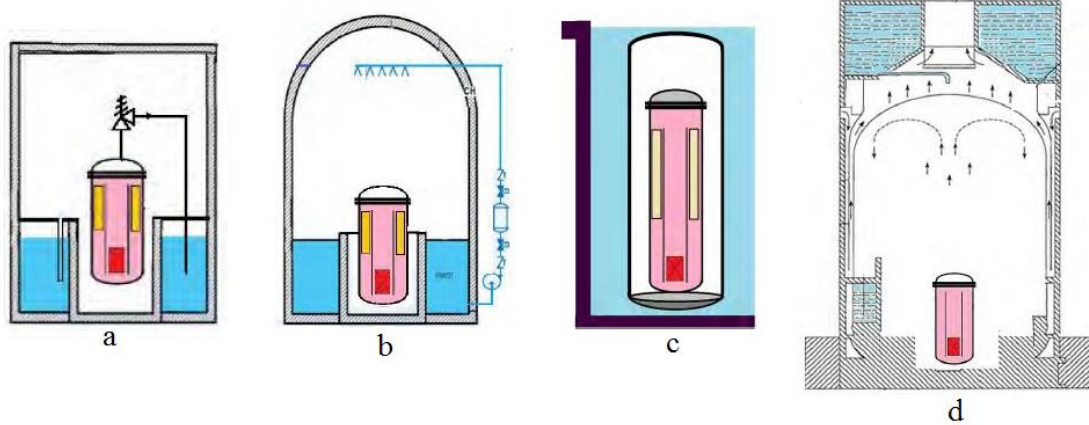
Säteilyturvallisuuden kannalta tarkasteltuna suojarakennus on suunniteltava siten, että oletetussa jäädytteenmenetyssonnettomuudessa, se kestävä primääripiiristä vuotavan höyryn aiheuttaman paineen nousun rakennuksessa. Tällöin puhutaan täyspainesuojarakennuksesta. Kuitenkin nykyisin on otettu käyttöön useita turvallisuusjärjestelmiä, joiden tarkoituksena on alentaa höyryn painetta suojarakennuksen sisällä. Näiden ansiosta suojarakennusta ei tarvitse mitoittaa niin korkealle paine-erolle ja sen rakentaminen tulee halvemmaksi. (Kyrki-Rajamäki 2014, 80.) Erilaiset suojarakennusratkaisut on esitetty kuvassa 8.

Ensimmäinen keino paineen alentamiseksi on vapauttaa painesäiliöstä vuotava höyry suojarakennuksen sisältämiin vesialtaisiin. Tällöin höyry tiivistyy nesteeksi jolloin sen tilavuus pienenee ja rakennuksen paine laskee. Menetelmää on käytetty vanhoissa kiehutusvesireaktoreissa ja uusista SMR-konsepteista se on käytössä esimerkiksi CAREM:ssa ja IRIS:ssä. (Kyrki-Rajamäki 2014, 80; IAEA 2016, 19.)

Toinen lähinnä painevesireaktoreissa käytetty keino on ruiskuttaa suojarakennuksen yläosassa sijaitsevista suuttimista nestemäistä vettä suojarakennukseen. Näin primääripiiristä vuotava höyry tiivistyy ja sataa rakennuksen lattialle, josta se kerätään lattiakaivoihin. Lisää vettä suuttimiin voidaan pumpata sekä lattiakaivoista että suojarakennuksen ulkopuolelta. (IAEA 2016, 20.) Suurin heikkous ensimmäisenä esitettyyn allasjärjestelmään verrattuna on pumppujärjestelmä, jota tarvitaan veden nostamiseksi suuttimille. Järjestelmä on siis aktiivinen eli se tarvitsee sähköä toimiakseen. Pumppujen virransyöttö voidaan varmistaa esimerkiksi hätädieselgeneraattoreilla. Ruiskutusjärjestelmiä on käytössä esimerkiksi Loviisan voimalaitoksen VVER-440-reaktorien suojarakennuksissa, ja uusista SMR-reaktoreista sitä suunnitellaan käytettäväksi myös korealaisessa SMART-reaktorissa.

Kolmantena vaihtoehtona on korvata betoninen suojarakennus metallisella ja upottaa se kokonaisuudessaan veteen. Tällöin painesäiliöstä suojarakennukseen vuotava höyry luovuttaa lämpöä teräskuoren lävitse konvektion ja johtumisen seurauksena. Tämä johtaa höyryn tiivistymiseen ja sitä kautta suojarakennuksen paineen alenemiseen. (Ibid, 20.) Konseptin etuina ovat passiivinen luonne ja suuri vesimassa, jotka tekevät siitä erittäin luotettavan. Haittapuolena on vesialtaan suuri tilavuus, joka asettaa vaatimuksia reaktorin fyysiselle koolle. Lisäksi haasteena on riittävän lämmönsiirron varmistaminen, sillä reaktorin koon kasvaessa sen teho kasvaa pinta-alaa nopeammin. Tämä rajoittaa reaktorin tehoa passiivisesti seinämän läpi lämpöä siirrettäessä. Näiden seikkojen vuoksi menetelmä soveltuu vain pienikokoisille ja -tehoisille reaktoreille. Metallista suojarakennusta on tarkoitus käyttää amerikkalaisessa NuScale-reaktorissa (IAEA 2014a, 82). Tämän lisäksi ranskalainen Flexblue soveltaa samaa ideaa, sillä reaktori sijoitetaan merenpohjaan (Ibid, 14). Tällöin ympäröivä meri takaa äärettömän lämpönielun ja riittävän lämmönsiirron varmistamisella taataan suojarakennuksen eheys tehokkaasti.

Hieman samaa ajatusta edellä esitetyn kanssa on hyödynnetty kaksiosaisessa suojarakennuksessa, jossa reaktori ja primääripiiri on ympäröity ensin metallisella rakenteella ja sen jälkeen vielä toisella betonirakennuksella. Näiden väliin on jätetty tyhjää tilaa siten että metallikuorta on mahdollista jäähdyttää puhaltamalla ilmaa tai ruiskuttamalla vettä sen ulkopinnalle. Näin saadaan siirrettyä lämpöä suojarakennuksen metallikuoren lävitse ja sisäpuolella oleva kuuma höyry jäähtyy ja lauhtuu. (IAEA 2016, 21.) Edelliseen konseptiin verrattuna etuna on menetelmän soveltuvuus myös suurempikokoisille reaktoreille. Toisaalta järjestelmä vaatii ulkoista tehoa jäähdytyksen ylläpitämiseksi. Järjestelmää käytetään jo nyt AP-1000 reaktorissa ja se on tarkoitus implementoida myös uuteen SMR tyyppiseen mPower-reaktoriin (Ibid, 21).



Kuva 8. Erilaiset suojarakennusvaihtoehdot. a) Paineenalennus johtamalla höyryä altaisiin b) Betoninen suojarakennus ruiskutusjärjestelmällä c) Upotettu metallinen suojarakennus d) Kaksiosainen suojarakennus (IAEA 2016, 19–21.)

Radioaktiivisten aineiden pidättämisestä tarkasteltaessa on myös varauduttava vakavissa onnettomuustilanteissa mahdolliseen sydämen sulamisonnettomuuteen. Tällöin on jollain keinolla jälkilämmönpoistojärjestelmien pettäessä, pystyttävä estämään sydämen sulaminen tai estettävä sulan sydänmateriaalin karkaaminen suojarakennuksesta. Esimerkiksi SMART, IRIS ja mPower -reaktoreissa tämä on toteutettu painesäiliön osittaisella upottamisella, jolloin lämpöä saadaan siirtymään painesäiliöstä ympäröivään veteen niin paljon, ettei sydämen sulamislämpötila ylitä (IAEA 2016, 22).

3.4 Eksotermisten reaktioiden välttäminen

Kevytvesireaktoreissa yleisin eksoterminen reaktio on korrosio, joka voi haurastuttaa primääripiirin komponentteja. Tämä voidaan ehkäistä oikeanlaisilla materiaalivalinnoilla sekä seuraamalla jatkuvasti vesikemiaa primääripiirissä.

Huomattavasti vaarallisempaa on onnettomuustilanteissa syntyvä vety kaasu, jota muodostuu ylikuumentuneen polttoainesauvan ja jäähdytysveden reagoidessa (Kyrki-Rajamäki 2014, 87). Koska vety on erittäin räjähdysherkkää sekoittuessaan ilman hapen kanssa, aiheuttaa se huomattavaa vaaraa suojarakennuksen ja primääripiirin eheydelle. SMR-laitoksissa syntynyt vety ohjataan katalysaattoreihin, joissa se ilman hapen kanssa reagoidessaan muuttuu jälleen vedeksi (IAEA 2016, 23).

4 VERTAILU SUURIIN KEVYTVESILAITOKSIIN

Tässä luvussa perehdytään SMR-reaktoreiden tärkeimpiin eroavaisuuksiin verrattuna nykyisiin 2. ja 3. sukupolven ydinvoimalaitoksiin. Vertailussa keskitytään kevytvesireaktoreihin, koska ne ovat maailmalla yleisin ydinreaktorityyppi, ja myös valtaosa uusista SMR-reaktoreista pohjautuu kevytvesiratkaisuun. Ennen kaikkea tarkastellaan eroavaisuuksia polttoaineessa ja reaktorisydämessä, höyrystimissä ja sekundääripiirissä, pääkiertovirtauksessa, polttoaine- ja jätehuollossa sekä reaktorien kustannusrakenteessa. Lisäksi pohditaan millaisia etuja ja haittoja hajautetulla ydinenergiantuotannolla on verrattuna nykyiseen keskitettyyn tuotantoon.

4.1 Polttoaine ja reaktorisydän

Kuten taulukosta 1 voidaan todeta, niin vanhempien kevytvesireaktoreiden tavoin myös SMR-reaktorit käyttävät pääsääntöisesti polttoaineena uraanioksidia, joka on ladattu pelletteinä polttoainesauvoihin. Polttoainesauvat kootaan yhteen polttoainenipuiksi ja sijoitetaan reaktoriin. Puhtaan uraanioksidipolttoaineen rinnalla osassa laitoksista on mahdollista käyttää myös MOX-polttoainetta. (MOX engl. Mixed Oxide fuel)

MOX-polttoaineessa köyhdytettyyn uraaniin on lisätty plutoniumioksidia (PuO_2). Sekoitussuhde kevytvesireaktoreissa on yleensä 5:1. (Kyrki-Rajamäki 2014, 8.) MOX-polttoainetta käyttämällä saadaan osa alkuperäisen UO_2 -polttoaineen vielä jäljellä olevasta fissiomateriaalista hyödynnettyä, jolloin pienennetään polttoainehävikkiä ja parannetaan uraanivarojen riittävyttä. Polttoaineen sisältämä plutonium saadaan joko käytetystä polttoaineesta johon sitä on muodostunut konversioprosessissa, tai esimerkiksi käytöstä poistetuista ydinaseista.

Tarkastellaan seuraavaksi polttoaineen rikastusastetta. Toisen ja kolmannen sukupolven kevytvesireaktoreissa polttoaineen rikastusaste on tavallisesti 3–4 %. Kun tarkastellaan taulukkoa 1, huomataan, että rikastusaste on monissa suunnitelluissa SMR-laitoksissa huomattavasti korkeampi. Tämän vuoksi voidaan polttoainesauvoja lyhentää ja polttoainenuippujen määrää vähentää. Tämä pienentää oleellisesti reaktorisydämen kokoa, mikä on SMR-reaktoreissa edullista, sillä usein painesäiliöön on reaktorisydämen lisäksi sijoitettu myös höyrystimet sekä säätösauvojen

käyttökoneisto ja paineistin. Polttoainetta rikastamalla ja sydäntä pienentämällä saadaan siis painesäiliön koko pysymään pienempänä, mikä alentaa sen kustannuksia ja helpottaa säiliön toimittamista sijoituspaikalle.

4.2 Höyrystimet ja sekundääripiiri

Useissa SMR-reaktoreissa höyrystimet on sijoitettu painesäiliön sisään toisin kuin nykyisissä voimalaitoksissa (Taulukko 1). Tällöin asennettavalta höyrystimeltä vaaditaan mahdollisimman pientä kokoa verrattuna höyrystystehoon, jotta painesäiliön mitat pysyvät maltillisen kokoisina, ja se on mahdollista kuljettaa rakennuspaikalle valmiina yksikkönä. Näiden seikkojen vuoksi useissa SMR-konsepteissa on päädytty läpivirtaushöyrystimeen (Once-through), jonka teho-kokosuhte on U-putkilämmönsiirtimiä parempi (Kyrki-Rajamäki 2014, 61). Seuraavaan taulukkoon (Taulukko 4) on koottu vertailua varten sekä SMR-reaktoreiden että vanhempien ydinvoimalaitosten tuorehöyryn paineita ja lämpötiloja. Tulistussäiliö on saatu veden ja vesihöyryn h,s-piirroksista vähentämällä tuorehöyryn lämpötilasta höyrynpainetta vastaava kylläisen höyryn lämpötila.

Taulukko 4. Eräiden SMR-laitosten sekä vanhempien 2. ja 3. sukupolven kevytvesivoimaloiden sekundääripiiritietoja. (IAEA 2004, 676, 739, 694; Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3, 24, 32; Kyrki- Rajamäki 2014, 59, 140.)

	CAREM-25	KLT-40S	SMART	EPR Olkiluoto 3	Westinghouse 900
Höyrystimien lukumäärä	12	4	12	4	3
Höyrystimen lämpöteho [MW]	8,4	≈37,5	27,5	≈1075	≈900
Höyrystimen tyyppi	Läpivirtaus	Läpivirtaus	Läpivirtaus	U-putki	U-putki
Syöttöveden lämpötila [°C]	200	170	180	230	224
Tuorehöyryn lämpötila [°C]	290	290	≤ 274	293	270
Tulistussäiliön lämpötila [°C]	≈50	≈70	≈80	≈0	≈0
Höyrynpaine [MPa]	4,7	3,72	≤ 3	7,8	5,6–7

Taulukon perusteella havaitaan että U-putkihöyrystimistä poiketen, SMR-reaktoreiden läpivirtaushöyrystimillä kyetään tuorehöyryn tulistamiseen. Tämä parantaa SMR-laitosten hyötysuhdetta. Lisäksi nähdään että ainakin tämän pienen otannan perusteella, SMR-laitoksissa lämpökuorma on jaettu useamman, suhteessa pienikokoisemman, höyrystimen kesken. Sekundääripiirin painetasot ovat suurikokoisissa reaktoreissa selvästi korkeammat.

4.3 Pääkiertovirtaus

Pääkiertovirtauksella tarkoitetaan ydinvoimalaitoksen primääripiirissä olevan veden kiertoa, jonka avulla siirretään sydämen tuottamaa lämpöä pois painesäiliöstä. Painevesilaitoksissa on erillinen turbiinipiiri johon reaktorin lämpöteho siirretään höyrystimien avulla, kun taas kiehutusvesilaitoksissa turbiinit on kytketty suoraan primääripiiriin. Pääkiertovirtaus voidaan toteuttaa joko käyttämällä pääkiertopumppuja, tai vaihtoehtoisesti luonnonkierrolla, jolloin kierto syntyy itsestään veden tiheyserojen vaikutuksesta.

Kaikissa suurissa ydinvoimalaitoksissa pääkiertovirtaus saadaan aikaan käyttämällä pääkiertopumppuja. Tällöin puhutaan pakkokierrosta. Pakkokierron suosiminen johtuu konventionaalisten ydinvoimalaitosten suuresta termisestä tehosta, jolloin luonnonkierrolla ei pystytä tuottamaan tarpeeksi suurta lämmönsiirtoa reaktorisydämen jäähdyttämiseksi. Pakkokierrolla saadaan aikaan suuremmat jäähdytteenvirtausnopeudet, jolloin konvektiolämmönsiirto sydämessä tehostuu ja polttoaineen lämpötila saadaan pysymään turvallisella tasolla.

Luonnonkierto syntyy veden tiheyserojen seurauksena. Veden lämmitessä reaktorin sydämessä sen tiheys pienenee ja lämmennyt vesi nousee painesäiliön yläosaan. Täältä se johdetaan sydämen yläpuolelle sijoitettuun höyrystimeen (Kuva 2). Höyrystimessä se luovuttaa lämpöä sekundääripiiriin, jolloin lämpötilan laskiessa sen tiheys suurenee. Tämän seurauksena se poistuu höyrystimen alaosaan painesäiliön alaosaan ja uudestaan sydämeen lämmitettäväksi.

Koska SMR-laitokset ovat teholtaan selvästi nykyisiä toisen ja kolmannen sukupolven laitoksia pienempiä, voidaan joissain tapauksissa hyödyntää myös luonnonkiertoa. Taulukkoa 1 tarkastelemalla huomataan, että noin puolet suunnitteilla olevista SMR-voimaloista hyödyntää luonnonkiertoa primäärivirtauksen aikaansaamiseksi. Luonnonkierron etuina ovat laitoksen oman tehontarpeen pienentyminen pääkiertopumppujen puuttuessa sekä parantunut turvallisuus, koska luonnonkierrolla estetään mahdollisuus virtauksenmenetysonnettomuuteen. Toisaalta luonnonkierron toteuttaminen lisää vaatimuksia komponenttien sijoittelulle, kuten edellä mainittu höyrystimen sijoittaminen sydämeen nähden.

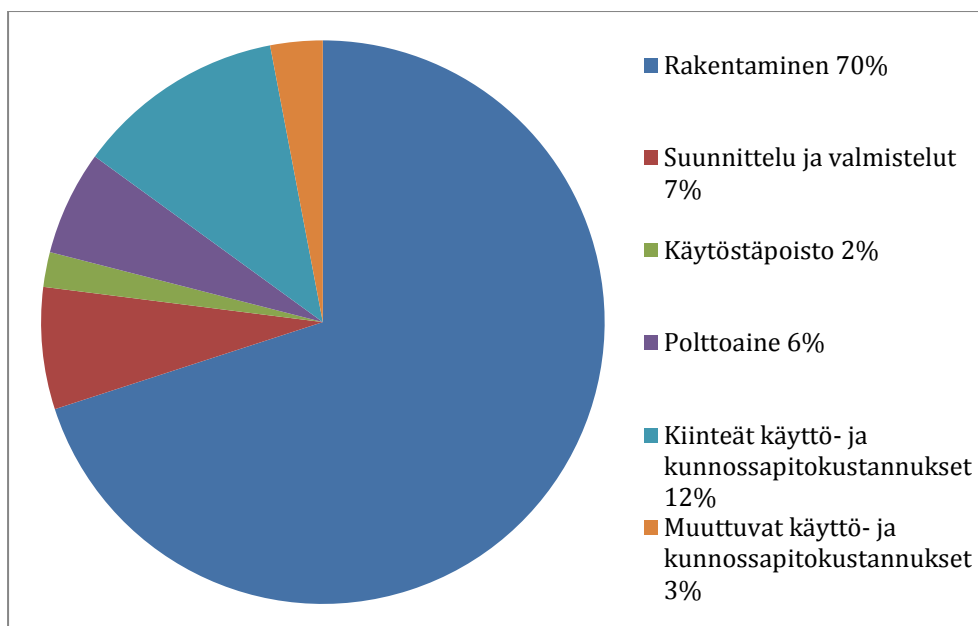
4.4 Polttoainehuolto

Tarkastelemalla taulukkoa 1 huomataan, että polttoaineen vaihtoväli on SMR-reaktoreissa huomattavasti pidempi kuin nykyisissä ydinvoimaloissa. Pitkä polttoainekierto on edullista etenkin laitoksille, jotka sijoitetaan syrjäisiin tai vaikeasti päästäviin kohteisiin. Tällaista konseptia edustavat useat venäläiset SMR-laitokset kuten KLT-40S, ABV-6M ja SHELF. Näiden lisäksi myös laitoksissa joita on tarkoitus sijoittaa perinteisten voimaloiden tilalle, on aiempaa pidemmät polttoainekierrat. Myös polttoaineen lataustapa eroaa joidenkin SMR-laitosten kohdalla perinteisestä. Ainakin SMR-160 ja KLT-40S reaktoreissa vaihdetaan kaikki polttoaine-elementit yhdellä kertaa polttoaineen vaihtovälin pidentämiseksi (IAEA 2014a, 41 ja 91).

SMR-laitokset, jotka sijoitetaan perinteisten voimaloiden tilalle, voidaan ladata kuten vanhemmatkin reaktorit. Polttoaine tuodaan laitokselle, painesäiliö avataan ja polttoaine tai osa siitä vaihdetaan uuteen. Vaihtoehto perinteiselle lataukselle on reaktorin siirtäminen erilliselle latauspaikalle. Tätä menetelmää käytetään reaktoreille, joiden sijoituspaikka ei mahdollista lataamista paikan päällä. Tällaisia reaktoreita ovat esimerkiksi merenpohjaan sijoitettava Flexblue ,sekä venäläiset ABV-6M ja SHELF -reaktorit. Lisäksi on reaktoreita kuten ELENA, jotka toimivat koko käyttöikänsä yhdellä latauksella.

4.5 Taloudellisuus ja kustannusrakenne

Perinteisten ydinvoimalaitosten ongelmana ovat korkeat investointikustannukset, jotka muodostavat jopa 70 % kokonaiskustannuksista (JRC 2014a, 63). Esimerkiksi yhdysvalloissa kahden reaktoriyksikön muodostama laitos maksaa noin 11 miljardia dollaria (National Nuclear Laboratory 2014, 44). Suuren kevytvesilaitoksen kustannusten jakautuminen on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Suuren kevytvesilaitoksen kustannusten jakautuminen. (National Nuclear Laboratory 2014, 44)

SMR-reaktoreiden kustannusrakenne eroaa edellisestä kuvasta ennen kaikkea rakentamiskustannuksiltaan, jotka ovat sekä absoluuttisesti että suhteellisesti pienemmät. Tämän lisäksi myös käytöstäpoiston arvioidaan olevan SMR-reaktoreiden kohdalla halvempaa, koska tehdasrakenteiset reaktorit on mahdollista kuljettaa käytön loputtua tehtaille tai vastaaviin laitoksiin purettaviksi. SMR-reaktoreiden käyttö- ja kunnossapitokustannuksista ei ole toistaiseksi olemassa varmaa tietoa, mutta niiden oletetaan olevan samaa suuruusluokkaa suurten reaktoreiden kanssa ja vaihtelevan huomattavasti reaktorikonseptista riippuen. Sen sijaan suunnittelukustannukset tulevat alkuvaiheessa olemaan SMR-reaktoreissa suhteellisesti suuremmat, koska reaktoreissa on paljon uudenlaisia teknisiä ratkaisuja. Lisäksi polttoaineen kulutus on suhteellisesti suurempaa, koska pienen reaktorisydämen neutronitalous on suurta sydäntä heikompi. (Nuclear Energy Agency 2011, 65–88.)

Jos tarkastellaan laitoksen kustannuksia tuotettua tehoa kohti, niin tällä hetkellä rakenteilla olevien kolmannen sukupolven EPR-laitosten kuten Olkiluoto 3 hinta on noin 5000€/kW. Se tulee kuitenkin laskemaan noin 3500–4000 euroon/kW, jos laitoksia rakennetaan tulevaisuudessa lisää. (JRC 2014a, 63.) SMR-reaktoreiden hinta tulee olemaan vuonna 2020 noin 6300 €/kW ja sen arvioidaan laskevan arvoon 5300 €/kW vuoteen 2050 mennessä (JRC 2014b, 59). Hintoja pudottaa erityisesti

rakentaessa saatava kokemus, jos reaktoreita rakennetaan useampia. Arvioiden mukaan hinta voi pudota viidennen reaktoriyksikön kohdalla jopa 30 % alkuperäisestä (Nuclear Energy Agency 2011, 80). Lukuihin täytyy kuitenkin suhtautua varauksella, sillä jopa samassa tutkimuksessa on eri skenaarioissa annettu hyvinkin paljon toisistaan poikkeavia lukuarvoja. Lisäksi erilaisten SMR-konseptien tekniset ratkaisut ja käyttökohteet poikkeavat toisistaan niin paljon, että yhtenäistä hintaa on mahdotonta muodostaa.

Kokonaisuudessaan SMR-laitosten taloudellisina kilpailuvaltteina voidaan pitää pienempiä investointikustannuksia, jotka alentavat sijoittajien riskejä. Lyhyempien rakennusaikojen johdosta laitokset saadaan myös tuotantoon nopeammin. Lisäksi modulaarisuuden ansiosta valmiit reaktorit on mahdollista käynnistää, vaikka kaikki laitoksen reaktorit eivät olisikaan vielä käyttövalmiina. Tuotanto saadaan siis käynnistettyä osittain jo laitoksen rakennusvaiheessa, mikä ei ole mahdollista suurilla yksittäisillä reaktoreilla.

4.6 Tuotannon hajauttaminen

Kuten aikaisemmin jo todettiin, SMR-reaktorit mahdollistavat energiantuotannon hajauttamisen useampiin pieniin paikallisiin yksiköihin. Suuriin keskitettyihin voimalaitosalueisiin verrattuna, tämä tuo tullessaan sekä haasteita että mahdollisuuksia. Rakentamalla tuotantoa lähelle kulutusta saadaan sähkönsiirtoverkosta rakennettua halvempi, koska verkkoa ei tarvitse mitoittaa niin suurelle siirtokapasiteetille. Lisäksi sähkönsiirtohäviöt pienenevät, jos siirtomatkat lyhenevät. Voimalan sijoittaminen lähelle kuluttajia mahdollistaa myös kaukolämmöntuotannon, joka parantaa merkittävästi laitoksen kokonaishyötysuhdetta.

Haasteeksi muodostuu ydinmateriaalin suojaaminen syrjäisissä voimalaitoksissa sekä polttoaineen ja ydinjätteen kuljetuksissa. Toisaalta, pitkän latausajan johdosta kuljetuksia tarvitaan harvoin. Lisäksi voimalaitosten sijoittaminen maan alle tai merenpohjaan tekee niihin tunkeutumisen vaikeaksi.

5 YHTEENVETO

Tässä työssä tutustuttiin termisten SMR-reaktoreiden eroavaisuuksiin verrattuna suuriin ydinvoimalaitosyksiköihin. Tavoitteena oli saada käsitys siitä, millaisia etuja uusilla pienen koko luokan ydinvoimaloilla on verrattuna nykyisin käytössä oleviin voimalaitosyksiköihin. Vertailussa keskityttiin kevytvesireaktoreihin, koska ne ovat maailmalla yleisin reaktorityyppi, ja myös suurin osa kehitteillä olevista SMR-reaktoreista edustaa tätä laitostyyppiä. Lisäksi työssä on koottu taulukoihin tällä hetkellä kehitteillä olevat termiset SMR-reaktorit.

Pienten modulaaristen reaktoreiden etuina perinteisiin ydinvoimalaitoksiin verrattuna ovat passiiviset turvallisuusratkaisut, jotka eivät tarvitse sähköä tai operaattoria toimiakseen. Passiiviset ratkaisut liittyvät reaktiivisuuden hallintaan, jälkilämmön poistoon ja suojarakennuksen paineen alentamiseen. Näillä menetelmillä saadaan laitoksen turvallisuus taattua, ja estettyä radioaktiivisten aineiden leviämisen kaikissa tilanteissa.

Suurimmat rakenteelliset erot liittyvät laitosten primääripiireihin. Useissa SMR-laitoksissa koko primääripiiri on rakennettu painesäiliön sisään. Tämä parantaa laitoksen turvallisuutta ja nopeuttaa rakentamista, koska primääripiiri voidaan tuoda sijoituspaikalle valmiina tehdasvalmisteisena yksikkönä. Lisäksi primäärikierto on useissa SMR-laitoksissa toteutettu luonnonkierrolla, eikä pumpuilla kuten vanhoissa suurissa ydinvoimalaitoksissa. Höyrystintyyppiksi on SMR-reaktoreissa vakiintunut läpivirtaushöyrystin sen U-putkihöyrystintä paremman teho-koko-suhteen vuoksi.

Polttoaineen osalta pienet modulaariset ydinreaktorit eroavat vanhemmista kevytvesireaktoreista lähinnä rikastusasteen osalta, joka on SMR-konsepteissa usein korkeampi. Tällä mahdollistetaan SMR-laitosten pidempi toiminta-aika, mikä on tärkeää etenkin kohteissa, jotka on sijoitettu syrjäseuduille vaikeasti huollettaviin paikkoihin. Lisäksi polttoaineen korkeammalla rikastusasteella saadaan reaktorisydämen kokoa pienennettyä, sillä polttoaineen määrää reaktorissa voidaan vähentää tehon pysyessä samana. Polttoainehuolto ja reaktorin uudelleen lataaminen voidaan tehdä kuten suurissakin laitoksissa, tai vaihtoehtoisesti siirtämällä koko reaktori uudelleen ladattavaksi erilliseen huoltopaikkaan. Tätä vaihtoehtoa käytetään reaktoreille, joiden sijoituspaikka ei mahdollista polttoaineen latausta tai, jos reaktorin

sijoituspaikalle ei rakenneta polttoaineen vaihtoon ja jätehuoltoon tarvittavia laitoksia ja rakenteita.

Kustannusrakenteeltaan SMR-reaktorit eroavat olennaisesti suurista ydinvoimalaitoksista. SMR-laitosten suurimpina etuina ovat pienemmät investointikustannukset. Toisaalta ominaiskustannukset nousevat suuria laitosyksiköitä korkeammiksi. Lisäksi pienikokoisten reaktoreiden huonompi neutronitalous johtaa suurempaan polttoaineen kulutukseen.

SMR-reaktorit tarjoavat suurista ydinvoimalaitoksista poiketen mahdollisuuden myös hajautettuun energiantuotantoon. Tämä alentaa energiansiirtoverkon kustannuksia ja pienentää siirtohäviöitä. Toisaalta hajautettu tuotanto aiheuttaa lisää haasteita ydinmateriaalin suojaamiseen syrjäisissä kohteissa.

Oman arvioni mukaan SMR-reaktoreita tullaan tulevaisuudessa rakentamaan ainakin vaikeasti saavutettavien kohteiden energiantuotantoon. Pitkä omavaraisuusaika ja vähäinen polttoaineentarve tekevät laitoksista ylivoimaisia verrattuna esimerkiksi öljynpolttolaitoksiin. Sen sijaan Euroopassa sekä muilla alueilla joissa on jo vahvat yhtenäiset sähköverkot, ei SMR-laitoksiin sijoittaminen välttämättä ole kannattavaa niiden perinteisiä ydinvoimalaitoksia korkeamman ominaishinnan vuoksi. SMR-reaktoreiden yleistymisen näillä alueilla tuleekin riippumaan voimakkaasti sekä laitosten hintojen että energian hinnan kehityksestä, sekä myös voimaloiden todellisista rakennusajoista verrattuna suuriin ydinvoimalaitosyksiköihin. Tämän lisäksi ydinvoiman roolia tulevaisuudessa tulee määrittämään voimakkaasti energianvarastointiteknologian ja älykkäiden sähköverkkojen kehittyminen. Vielä tällä hetkellä sähköverkon vakauden säilyttämiselle on tärkeää riittävän suuren tasaisen peruskuorman tuottaminen, johon ydinvoima soveltuu erinomaisesti. Älykkäitä sähköverkkoja ja energianvarastointiteknologioita kehittämällä perusvoiman tarvetta voidaan kuitenkin vähentää ja uusiutuvien tuuli- ja aurinkovoiman osuutta sähköntuotannossa kasvattaa. Mielenkiintoista onkin nähdä millä aikataululla tätä kehitystä tapahtuu, ja miten SMR-reaktorit kerkeävät tähän kehitykseen mukaan.

LÄHDELUETTELO

IAEA. 2004. TECDOC-1391, Status of advanced light water reactor designs 2004. [raportti] Vienna, Austria. ISSN 1011–4289

IAEA. 2010. TECDOC-1645. High Temperature Gas Cooled Reactor Fuels and Materials. [raportti] Vienna, Austria. ISSN 1684–2073

IAEA. 2012. Status of Small And Medium Sized Reactor Designs. [raportti]

IAEA. 2014a. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. [raportti] Vienna, Austria

IAEA. 2014b. Progress in Methodologies for the Assessment of Passive Safety System Reliability in Advanced Reactors. [raportti] Vienna, Austria ISSN 1011–4289

IAEA. 2016. TECDOC-1785. Design Safety Considerations For Water Cooled Small Modular Reactors Incorporating Lessons Learned From Fukushima Daiichi Accident. [raportti] Vienna, Austria. ISSN 1011–4289

Joint Research Centre of European Union (JRC). 2014a. 2013 Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan).[energiasuunnitelma] Netherlands. ISSN 1831–9424

Joint Research Centre of European Union (JRC). 2014b. Energy Technology Reference Indicator projections for 2010–2050. [tutkimus] Luxemburg. ISSN 1831–9424

Kalli, Heikki. 2013a. Ydinreaktoreiden Fysiikka osa 1. Kurssimoniste. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto

Kalli, Heikki. 2013b. Ydinreaktoreiden Fysiikka osa 2. Kurssimoniste. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto

Kyrki-Rajamäki, Riitta. 2014. Reaktorimateriaalit ja yleisimmät reaktortyyppit. Kurssimoniste. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto

Nuclear Energy Agency. 2011. Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors. [raportti]

National Nuclear Laboratory. 2014. Small Modular Reactors (SMR) Feasibility Study. [raportti]

Richter, Jennifer. 2014. Small Modular Reactors: The Future of Nuclear Energy? Arizona State University [artikkeli]

Taloussanomat. 2014. Saksa antoi pakit ydinvoimalle- nyt käryää hiili. [artikkeli] Julkaistu 22.9.2014. Viitattu 30.3.2016. Saatavissa: <http://www.taloussanomat.fi/energia/2014/09/22/saksa-antoi-pakit-ydinvoimalle-nyt-karyaa-hiili/201413134/12>

Teollisuuden Voima Oyj. 2013. Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3. [esite]

World Nuclear News. 2013. Contract Awarded for Carem vessel. [artikkeli] Julkaistu 4.12.2013 Viitattu 2.4.2016, Saatavissa: <http://www.world-nuclear-news.org/NN-Contract-awarded-for-CAREM-vessel-0412137.html>