



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Aapo Meriö

Toriumkäyttöinen sulasuolareaktori

Tekniikan ja informaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Kandidaatintutkielma
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja informaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Aapo Meriö		
Tutkielman nimi:	Toriumkäyttöinen sulasuolareaktori		
Tutkinto:	Tekniikan kandidaatti		
Oppiaine:	Sähkö- ja energiatekniikka		
Työn ohjaaja:	Teemu Ovaska		
Valmistumisvuosi:	2025	Sivumäärä:	38

TIIVISTELMÄ:

Kasvava energiankulutus ja paheneva ilmastonmuutos luovat tarpeen uudentyyppisille ja paranneluille energiantuotantomenetelmille. Yksi potentiaalinen vaihtoehto osana kasvavien haasteiden ratkaisua on ydinvoima. Ydinvoima tarjoaa runsasta, hiilivapaata ja vakaata energiantuottoa.

Tämä opinnäytetyö käsittelee toriumkäyttöisiä sulasuolareaktoreita (TMSR, torium molten salt reactor). TMSR on yksi lupaavimmista tulevaisuuden ydinenergian tuotantomenetelmistä. TMSR käyttää nestemäistä sulasuolaseosta, joka toimii fissiilin ydinpolttoaineen kantajana sekä lämpöä kuljettavana jäähdytinaineena. TMSR soveltuu luonnosta saatavan toriumin hyödyntämiseen, mikä ei ole mahdollista perinteisillä kevytvesireaktoreilla.

Opinnäytetyön aihealuetta pohjustetaan selittämällä ydinenergian perusperiaatetta, fissioreaktiota ja sen hyödyntämistä ydinvoimaloissa. Tämän pohjalta siirrytään tarkastelemaan toriumia alkuaineena, sen esiintymistä maankuoressa, sekä sen käyttömahdollisuuksia ja edellytyksiä ydinpolttoaineena. Tämän jälkeen työssä keskitytään sulasuolareaktoriin, sen toimintaperiaatteeseen, rakenteeseen ja sen käyttämän sulasuolaseoksen koostumukseen ja merkitykseen. Tekstissä kerrotaan sulasuolareaktoriteknologian taustasta ja mainitaan historiallisia kuin myös moderneja sulasuolareaktorikonsepteja. Työhön on kerätty lista merkittävimmistä TMSR-teknoologiaan liittyvistä vahvuuksista, heikkouksista, mahdollisuuksista ja uhista. Työn lopussa tarkastellaan toriumin ja sulasuolareaktorien kehityksen nykytilannetta ja tulevaisuuden näkymiä.

Opinnäytetyö on kirjallisuuskatsaus, jonka tarkoituksena on olla kattava selitys toriumin ja sulasuolareaktorien sovelluksista, käyttömahdollisuuksista ja potentiaalista kestävästä, turvallisena ja tehokkaana ydinenergiamenetelmänä tulevaisuudessa.

AVAINSANAT: Ydinvoima, torium, toriumkierto, sulasuolareaktori, sulasuolaseos, uraani

Sisällys

1	Johdanto	7
2	Fissioreaktio energiantuotannossa	8
2.1	Fissio	8
2.2	Ydinvoima	9
3	Torium	10
3.1	Torium-232	10
3.2	Toriumin esiintyminen	10
3.3	Torium-ydinpolttoainekierto	11
4	Sulasuolareaktori	13
4.1	Sulasuolareaktorin toimintaperiaate	13
4.2	Sulasuolareaktorin rakenne	14
4.2.1	Primääripiiri	15
4.2.2	Sekundääripiiri	15
4.2.3	Tertiääripiiri	16
4.3	Sulasuolaseos	16
5	MSR-tekniikan taustaa	18
5.1	Ensimmäiset MSR-reaktorit	18
5.1.1	ARE	18
5.1.2	MSRE	18
5.1.3	MSBR	20
5.2	MSR-kehityksen hidastuminen 1980-luvulla	20
5.3	2000-luku ja uusi kiinnostus	21
6	Moderneja TMSR-konsepteja	22
6.1	MSFR	22
6.2	LFTR	23
6.3	TMSR-LF1	24
6.4	Copenhagen Atomics Waste Burner	25

7	TMSR:n vahvuudet, heikkoudet, mahdollisuudet ja uhat	27
7.1	TMSR:n vahvuudet	27
7.2	TMSR:n heikkoudet	28
7.3	TMSR:n mahdollisuudet	29
7.4	TMSR:n uhat	30
8	Toriumkäyttöisen sulasuolareaktorin tulevaisuudennäkymät	32
9	Yhteenveto	33
	Lähteet	35
	Liite	38
	Taulukko maailman toriumvaroista yhteensä (arviot)	38

Kuviot

Kuva 1. Sulasuolareaktorin rakenne.	14
Kuva 2. MSRE.	19
Kuva 3. LFTR-reaktorin toimintaperiaate.	23
Kuva 4. Waste Burner.	25

Taulukot

Taulukko 1. Arvioitu toriumvarantojen määrä maailmassa.	11
--	----

Lyhenteet

ARE	Aircraft Reactor Experiment, maailman ensimmäinen MSR-reaktori
GIF	Generation IV International Forum
IAEA	International Atomic Energy Agency, kansainvälinen atomienergiajärjestö
LFTR	liquid fluoride thorium reactor, nestemäinen fluoridi-torium -reaktori
MSBR	Molten Salt Breeder Reactor, yhdysvaltalainen reaktorikonsepti
MSFR	Molten Salt Fast Reactor, ranskalainen reaktorikonsepti
MSR	molten salt reactor, sulasuolareaktori
MSRE	Molten Salt Reactor Experiment, 1960-luvun koereaktori
NEA	Nuclear Energy Agency
NEAC	Nuclear Energy Advisory Committee
NSTA	National Science Teaching Association
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
SINAP	Shanghai Institute of Applied Physics
TMSR	thorium molten salt reactor, toriumkäyttöinen sulasuolareaktori

Kemialliset merkinnät

Be	beryllium
F	fluori

Li	litium
Na	natrium
O	happi
Pa	protaktinium
Pu	plutonium
Th	torium
U	uraani
Zr	zirkonium

Yhdisteet

BeF ₂	berylliumfluoridi
BeO	berylliumoksidi
FLiBe	litiumfluoridin ja berylliumfluoridin sekoitus (LiF-BeF ₂)
LiF	litiumfluoridi
NaBF ₄	natriumtetrafluoroboraatti
NaF	natriumfluoridi
PuF ₃	plutoniumtrifluoridi
ThF ₄	toriumtetrafluoridi
UF ₄	uraanitetrafluoridi
ZrF ₄	zirkoniumtetrafluoridi

Muut symbolit

<i>c</i>	valonnopeus
<i>E</i>	energia
<i>m</i>	massa
<i>n</i>	neutroni

1 Johdanto

Kasvava energiankulutus ja samaan aikaan paheneva ilmastonmuutos luovat tarpeen paremmille energiantuotantomenetelmille. Uusiutuvien energiamuotojen, kuten vesi-, tuuli-, ja aurinkovoiman hyödyntäminen ei ole ongelmattonta. Tuuli- ja aurinkovoima ovat riippuvaisia säätilasta, ja vesivoima vaatii oikeanlaisen maantieteellisen ympäristön, mitä ei kaikkialla ole saatavilla. Erilaisia energiamuotoja tulisi tästä syystä tarkastella laajamittaisesti osana vihreää siirtymää.

Ydinvoimalla on suuri potentiaali hiilivapaan energian tuotannossa. Se tarjoaa luotettavaa, tehokasta, kompaktia ja kasvihuonepäästötöntä energiantuotantoa. Kaksi tarkastelun arvoista ydinvoimaan liittyvää konseptia ovat nk. sulasuolareaktorit (MSR, molten salt reactor) ja alkuaine toriumin, jota voidaan hyödyntää ydinpolttoaineena.

Tämä opinnäytetyö on kirjallisuuskatsaus, joka käsittelee toriumkäyttöisen sulasuolareaktorin (TMSR, thorium molten salt reactor) toimintaperiaatetta, konsepteja, hyviä ja huonoja puolia sekä teknologian tulevaisuutta. MSR-reaktorit eroavat merkittävästi perinteisistä ydinreaktoreista muun muassa matalan käyttöpaineen, korkean lämpötilan sekä jatkuvasti kiertävän nestemäisen polttoaineen takia. MSR:t mahdollistavat toriumin tehokkaan hyödyntämisen ja pienemmän määrän pitkäikäistä ydinjätettä.

Työ sisältää selityksen ydinvoiman toiminnasta ja sen mahdollistavasta fissioreaktiosta. Työssä tarkastellaan toriumia, sen luonnonvaroja ja muuntamista fissiokelpoiseksi ydinpolttoaineeksi nk. torium-ydinpolttoainekierron avulla. Työn keskiössä on sulasuolareaktori; työn tarkoituksena on avartaa sulasuolareaktorin toimintaperiaatetta, rakennetta ja sen käyttämien sulasuolaseoksen koostumusta ja merkitystä. Tekstissä kerrotaan MSR-teknologian taustasta ja annetaan esimerkkejä historiallisista kuin myös moderneista MSR-konsepteista. Työhön on kerätty lista merkittävimmistä TMSR-teknologiaan liittyvistä vahvuuksista, heikkouksista, mahdollisuuksista ja uhista. Työn lopussa tarkastellaan toriumin ja MSR-teknologian kehityksen nykytilannetta ja tulevaisuudennäkymiä.

2 Fissioreaktio energiantuotannossa

2.1 Fissio

Fissiolla tarkoitetaan ydinreaktiota, jossa raskas atomiydin hajoaa kahdeksi tai useammaksi kevyemmäksi ytimeksi. Kevyempien atomiytimien lisäksi fissiossa vapautuu ylimääräisiä vapaita neutroneja sekä suuria määriä energiaa gammasäteilynä ja kineettisenä energiana lämmön muodossa. Fissioreaktio tapahtuu, kun fissioituva atomiydin, esimerkiksi uraani-235 (^{235}U) tai plutonium-239 (^{239}Pu), absorboi neutronin altistuessaan neutronisäteilylle. (Schunck & Regnier, 2022)

Fissioreaktion aikana syntyneiden reaktiotuotteiden yhteen summattu massa on hieman pienempi kuin alkuperäisen raskaan ytimen massa. Tämä nk. massavaje vastaa reaktiossa vapautuvaa ytimen sidosenergiaa, jonka suuruus on laskettavissa Einsteinin massan ja energian ekvivalenssiyhtälöllä

$$E = mc^2, \tag{1}$$

missä E on fissiossa vapautunut energia, m massavaje ja c valon nopeus tyhjiössä (NSTA, 2016). Tyypillisesti yhden raskaan atomin fissiossa vapautuva energia on suuruusluokaltaan noin 200 MeV. Esimerkiksi yksi kilo puhdasta ^{235}U :tä voisi teoriassa vapauttaa fissiossa jopa 80 terajoulea energiaa (Schunck & Regnier, 2022).

Raskaiden atomien fissiossa vapautuu yleensä 2–3 ylimääräistä neutronia, jotka voivat aiheuttaa uuden fission osuessaan toiseen fissiokelpoiseen ytimeen. Tätä kutsutaan ydinketjureaktioksi, jossa fissioreaktiot aiheuttavat aina uusia fissioreaktioita, tehden ketjureaktiosta itseään ylläpitävän. Tällaista ketjureaktiota hyödynnetään energiantuotannossa ydinvoimaloissa. (World Nuclear Association, 2025)

2.2 Ydinvoima

Fissioreaktio on keskeinen asia ydinvoimaloiden energiantuotannossa; lähtökohtaisesti kaikki tämänhetkinen ydinvoima tuotetaan hyödyntäen fissiota. Tavanomaisessa ydinvoimalassa fissioista vapautuvaa lämpöenergiaa käytetään veden höyrystämiseen. Höyry pyörittää turbiinia, joka on kytketty sähköä tuottavaan generaattoriin. Hallittu fissioketju aikaansaadaan ydinreaktorissa, jota kontrolloidaan reaktiivisuutta vähentävillä säätösauvoilla sekä jäähdytysjärjestelmillä. (World Nuclear Association, 2025)

Ydinreaktori käyttää polttoaineenaan fissiiliä materiaalia. Fissiili materiaali koostuu sel-
laisista nuklideista, jotka pystyvät halkeamaan absorboidessaan nk. hitaan neutronin, eli
toisin sanoen riippumatta neutronin nuklidiin tuomasta energiasta. Fissiilit aineet ylläpi-
tävät ketjureaktiota helposti, ja täten soveltuvat polttoaineeksi ydinreaktoreissa
(Schunck & Regnier, 2022). Esimerkiksi uraani-233 (^{233}U), ^{235}U ja ^{239}Pu ovat fissiilejä iso-
tooppeja. Sellaisia fissiokelpoisia aineita, jotka tarvitsevat suurempienergiä neutroneja
eli nk. nopeita neutroneja haljetakseen, kutsutaan fissioituviksi aineiksi. Esimerkiksi
uraanin isotooppi ^{238}U on fissioituvaa, mutta ei fissiiliä, eikä sellaisenaan sovellu ydin-
polttoaineeksi tavallisessa ydinvoimalassa. (Schunck & Regnier, 2022; World Nuclear As-
sociation, 2025)

3 Torium

3.1 Torium-232

Torium on luonnossa esiintyvä radioaktiivinen metalli, jonka järjestysluku on 90. Lähtökohtaisesti kaikki maankuoressa esiintyvä torium on torium-232-isotooppia (^{232}Th), mutta marginaalisia määriä muita isotooppeja on myös havaittu (World Nuclear Association, 2024a). Toriumin tunnisti ensimmäisen kerran ruotsalainen kemisti Jöns Jacob Berzelius vuonna 1828, joka nimesi alkuaineen skandinaavisen mytologian ukkosen jumala Thorin mukaan (IAEA, 2019). Toriumilla on merkittävä potentiaali ydinenergian tuotannossa. Se voisi toimia yleisesti käytetyn luonnonuraanin vaihtoehtona tai sitä täydentävänä polttoaineena tulevaisuuden ydinreaktoreissa.

3.2 Toriumin esiintyminen

Toriumia ei esiinny maankuoressa sellaisenaan. Sitä esiintyy vaihtelevina määrinä monissa eri mineraaleissa, joista tärkein on fosfaattimineraali monatsiitti. Monatsiitin toriumpitoisuus voi saavuttaa jopa 26 % (IAEA, 2019), mutta keskimääräinen pitoisuus on yleensä vain 6–7 % (World Nuclear Association, 2024a). Muita mainittavia toriumia sisältäviä mineraaleja ovat mm. toriitti, torianiitti ja zirkoni, joissa toriumia esiintyy pieninä määrinä joko oksidi- tai silikaattiyhdisteinä (IAEA, 2019).

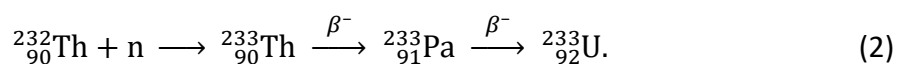
Torium on yleistä, ja esiintymiä on löydetty lähes kaikista valtioista. IAEA:n (2019) tekemän arvion mukaan toriumia on maailmassa yli 6,2 miljoonaa tonnia, tehden siitä 3–4 kertaa uraania yleisempää. Taulukossa 1 on lueteltu arviot suurimmista toriumresurssien määristä maittain. Merkittävimmät toriumesiintymät löytyvät Intiasta, Brasiliasta, Yhdysvalloista ja Australiasta. Taulukossa 1 esitetyt luvut ovat arvioita, sillä monissa maissa toriumvarantoja ei ole tutkittu tarkasti; toriumia voi olla maankuoressa enemmän kuin on arvioitu (IAEA, 2019).

Taulukko 1. Arvioitu toriumvarantojen määrä maailmassa. > tarkoittaa, että arvio on alakanttiin: toriumesiintymiä ei ole tutkittu täysin tai tarkka data ei ole ollut saatavilla. *Prosentuaalinen osuus on laskettu keskiarvoilla. Laajempaa ja tarkempaa taulukkoa varten ks. liite. (mukaillen lähdettä IAEA, 2019, s. 105)

Maa/Alue	Arvioitu toriumin määrä (t)	Osuus (%)*
Intia	846500	13,634
Brasilia	632000	10,179
Yhdysvallat	595000	9,583
Australia	595000	9,583
Egypti	380000	6,120
Turkki	374000	6,024
Venezuela	300000	4,832
Kanada	172000	2,770
Venäjä	>155000	2,496
Etelä-Afrikka	148000	2,384
Kiina	>100000	1,611
Norja	87000	1,401
Grönlanti	86000	1,385
Suomi	60000	0,966
Kazakstan	>50000	0,805
Ruotsi	50000	0,805
Muut maat	1581800	25,477
Koko maailma yhteensä	6205300–6212300	100

3.3 Torium-ydinpolttoainekierto

^{232}Th ei itsessään ole fissiili alkuaine, ja täten sitä ei sellaisenaan voi käyttää polttoaineena ydinvoimaloissa. ^{232}Th on kuitenkin fertiili alkuaine, mikä tarkoittaa sitä, että siitä voidaan valmistaa fissiiliä ainetta, ^{233}U :a. Altistuessaan neutronisäteilylle ^{232}Th absorboi neutronin ja muuttuu ^{233}Th -isotoopiksi. ^{233}Th transmutatoituu luonnollisen beetahajomisen seurauksena kahdesti: ensin protaktinium-233:ksi (^{233}Pa) ja lopulta ^{233}U :ksi (World Nuclear Association, 2024a). Tällaista reaktiosarjaa voidaan havainnollistaa reaktioyhtälöllä



^{233}Th :n puoliintumisaika on noin 22 minuuttia ja ^{233}Pa :n puoliintumisaika noin 27 vuorokautta. ^{233}U on fissiili, eli se pystyy ylläpitämään ydinketjureaktiota. Energiasisällöltään ^{233}U on samassa suuruusluokassa kuin ^{235}U (World Nuclear Association, 2024a). ^{233}U :n fissiota voidaan käyttää uusien ^{232}Th ytimien neutroniaktivointiin ja uusien ^{233}U ytimien tuottamiseen. Tällaista reaktiosarjaa kutsutaan torium-ydinpolttoainekierroksi, tai lyhyemmin toriumkierroksi. ^{233}U :n fissiossa vapautuu keskimäärin enemmän neutroneja kuin ^{235}U :n fissiossa, joka mahdollistaa hyvän neutronitalouden reaktorissa. Ensimmäisen toriumkierron aloittamista varten tarvitaan kuitenkin pieni määrä muualta tullutta fissiiliä materiaalia. Tähän voidaan käyttää esimerkiksi ^{235}U :tä tai ^{239}Pu :ää. Reaktori, joka käyttää polttoaineenaan ^{232}Th :a ja siitä saatavaa ^{233}U :a, voi tuottaa ^{233}U :a enemmän kuin sitä kuluu, jolloin kyseessä olisi nk. hyötöreaktori. (Serp ja muut, 2014; World Nuclear Association, 2024a)

^{232}Th voidaan sijoittaa reaktorin sisälle fissiilin polttoaineen läheisyyteen, jotta se altistuisi neutronisäteilylle ja toriumkierto voisi alkaa. Ongelmaksi tässä tulee kuitenkin se, että neutronin absorboinut toriumisotoppi ^{233}Th (tai ^{233}Pa jos yksi beetahajoaminen on jo tapahtunut) tulisi poistaa reaktorista, jotta transmutaatio uraaniksi voi tapahtua keskeytymättä (World Nuclear Association, 2024a). Mikäli ^{233}Th - tai ^{233}Pa -isotoppi jätetään reaktoriin, voivat reaktorissa tapahtuvat fissiot poikkeuttaa sen halutulta hajoamissarjalta, mikä voi johtaa ei-toivottuihin reaktiotuotteisiin. (IAEA, 2022).

Koska ydinpolttoaineen erottelu reaktorin ollessa käynnissä ei ole tarpeeksi kehittynyttä, tavanomaiset reaktorityypit eivät sovellu toriumin käyttöön. Toriumin käyttöä varten tarvitaan siis uudenlaista reaktoriteknologiaa, jotta uraaniksi muuntuvat isotopit saadaan eroteltua, ja torium-ydinpolttoainekierto saadaan mahdollistettua. Yksi lupaava reaktorityyppi, joka soveltuu toriumin käyttöön ja ydinpolttoaineen erotteluprosesseihin on nk. sulasuolareaktori.

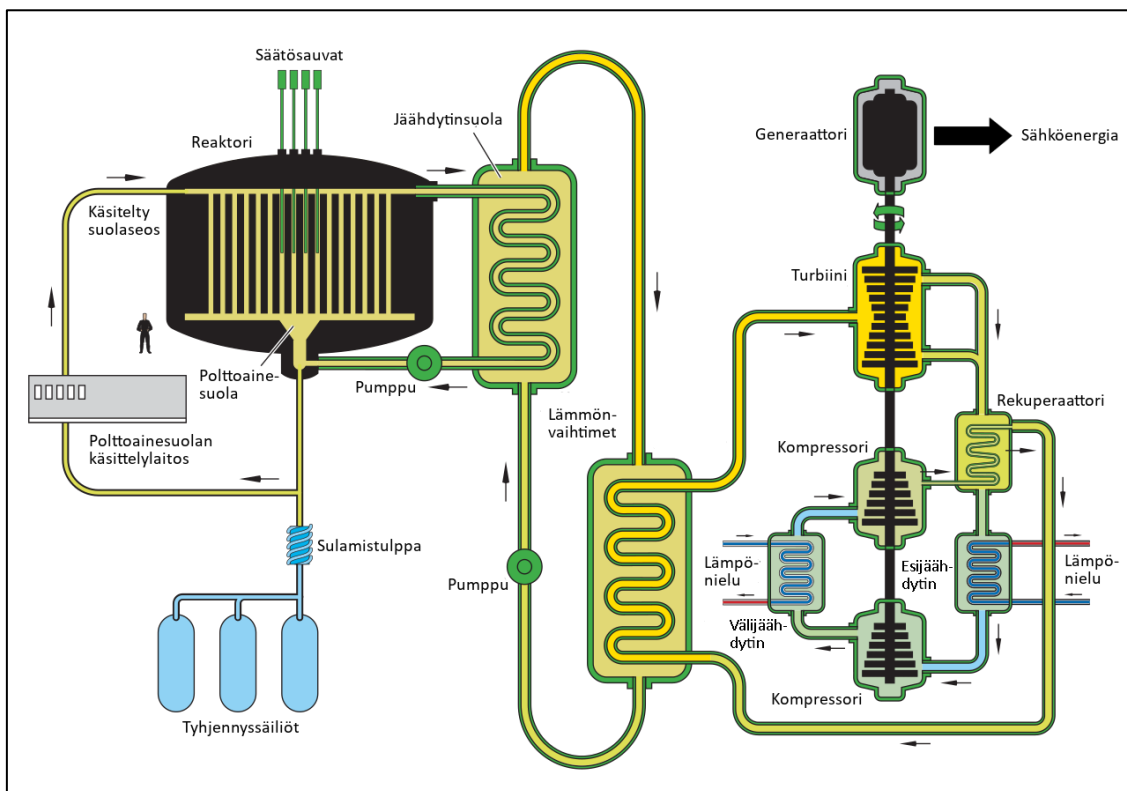
4 Sulasuolareaktori

4.1 Sulasuolareaktorin toimintaperiaate

Sulasuolareaktorit eli MSR:t ovat yksi neljännen sukupolven reaktorityypeistä (World Nuclear Association, 2024b). MSR:llä ei viitata yhteen ainoaan reaktorityyppiin, vaan kyseessä on sateenvarjotermi, joka kattaa useita toisistaan huomattavasti eroavia reaktorikonsepteja.

Sulasuolareaktoreiden toiminta perustuu nestemäisen sulasuolaseoksen hyödyntämiseen, johon fissioituva ydinpolttoaine liuotetaan. Nestemäinen suolaseos toimii siis fissiiliin ydinpolttoaineen kantajana, mutta tämän lisäksi reaktoria jäähdyttävänä ja lämpöä kuljettavana aineena. Perinteisissä reaktoreissa käytettävä fissiomateriaali on kiinteinä polttoainesauvoina ja jäähdytys on yleensä vesi- tai kaasupohjainen. MSR:issä sen sijaan nestemäistä suolaseosta kierrätetään reaktoriytimen läpi, jossa seoksen sisältämät ydinpolttoaineet vapauttavat lämpöä fissioituessaan. Reaktorissa sulasuolaseos kuumennetaan yleensä 700–750 °C asteiseksi, samaan aikaan kun reaktorin sisäinen paine pysyy lähellä normaalia ilmanpainetta. Tämä eroaa tavanomaisista kevytvesireaktoreista, joissa paine voi olla ilmanpaineeseen nähden jopa satakertainen. Kuumentunut polttoainesuola pumpataan reaktorista lämmönvaihtimeen, jossa siitä johdetaan ylimääräinen lämpö sähkötuotantoon tai prosessilämmöksi (World Nuclear Association, 2024b). Nestemäinen polttoaineseos mahdollistaa jatkuvan polttoaineen kierron, eli ydinjätteen poiston sekä fissioituvan aineen uudelleensyötön reaktorin käytön aikana, mikä ei tyypillisesti ole mahdollista nykyisillä reaktorityypeillä. Tästä syystä sulasuolareaktorit soveltuvat toriumin käyttöön ja mahdollistavat keskeyttämättömän torium-ydinpolttoainekierron. Niistä sulasuolareaktoreista, jotka hyödyntävät toriumia, voidaan käyttää lyhennettä TMSR (thorium molten salt reactor). (IAEA, 2022; 2023; Serp ja muut, 2014)

4.2 Sulasuolareaktorin rakenne



Kuva 1. Esimerkkihavainnollistus mahdollisesta sulasuolareaktorin käytöstä ydinvoimalassa (muokattu lähteestä NEAC, 2002).

Kuvassa 1 on havainnollistettu miltä MSR-voimala näyttää. MSR-tyyppin voimaloita ja konsepteja on tehty ja suunniteltu useita erilaisia, mutta yleensä MSR-voimala koostuu yhdestä tai useammasta sulasuolaa kierrättävästä piiristä (IAEA, 2022; 2023). Primääripiirin eli polttoainepiirin lisäksi MSR:ssä voi olla erillinen lämmönvaihtopiiri sekä tertiääripiiri energian muuntamista varten (IAEA, 2023). Kuvan 1 havainnollituksessa on kaikki nämä kolme. Joissain MSR-tyypeissä, esimerkiksi nestemäisessä fluoridi-torium -reaktorissa (LFTR, liquid fluoride thorium reactor) kiertää kaksi sulasuolapiiriä: yksi fissiomateriaaleille ja toinen fertiileille neutroniaktivoitua tarvitseville materiaaleille.

4.2.1 Primääripiiri

Sulasuolareaktorin primääripiirissä kiertää nestemäistä suolaseosta, johon on liuotettu fissiilit ja fertiilit aineet kuten ^{233}U , ^{235}U ja ^{232}Th . Käsitelty suolaseos pumpataan reaktoriin, jossa ydinketjureaktio käynnistyy. Reaktorissa tapahtuvat fissiot kuumentavat suolaseosta ja neutroniaktivoivat ^{232}Th -isotooppeja. Fissioiden ja vapautuvan energian määrää voidaan säädellä esimerkiksi reaktiivisuutta hillitsevillä säätösauvoilla tai reaktorin rakennemateriaaleilla (IAEA, 2022; 2023). Reaktorissa kuumentuva polttoainesuola johdatetaan lämmönvaihtimeen, joka on osa erillistä sekundääripiiriä (IAEA, 2022). Lämmönvaihtimessa fissioista peräisin oleva lämpöenergia poistuu primääripiiristä seuraavaan vaiheeseen. Jäähdyntynyt mutta edelleen nestemäinen suolaseos voidaan pumpata takaisin reaktoriin mikäli se sisältää tarpeeksi fissiiliä materiaalia, tai se voidaan pumpata kemialliselle käsittelylaitokselle. Käsittelylaitoksella polttoaineseoksesta erotellaan ylimääräiset ja haitalliset reaktiotuotteet sekä transmutaatioprosessin aloittaneet ^{232}Pa -isotoopit. Tämän lisäksi käsittelylaitoksella suolaseokseen lisätään fissiilit polttoainemateriaalit, kuten toriumista muunnettu ^{233}U sekä mahdollisesti ketjureaktion aloittavat ^{235}U tai ^{239}Pu (IAEA, 2022; 2023). Useissa MSR-malleissa osaksi primääripiiriä on suunniteltu eräänlainen aktiivisesti jäähdytetty sulamistulppa (engl. freeze plug), jonka on tarkoitus sulaa tietyssä kriittisessä lämpötilassa pois siten, että reaktorissa kiertävä polttoainesuola valuu itsestään reaktorin alapuolella oleviin tyhjennyssäiliöihin (Serp ja muut, 2014).

4.2.2 Sekundääripiiri

Sulasuolareaktorin sekundääripiiri eli lämmönvaihtopiiri ei sisällä fissiokelpoisia tai fertiilejä materiaaleja; se on tarkoitettu ainoastaan lämmönsiirtoon eikä se osallistu ydinreaktioihin ja lämmön tuottoon mitenkään. Sekundääripiirissä on aina vähintään yksi lämmönvaihdin, ja sen päätehtävänä on poistaa ylimääräinen lämpö reaktorissa kuumentuneesta primääripiirin suolasta puhtaaseen jäähdytinsuolaan. Joissain MSR-malleissa lämmönvaihtopiiri ja lämmön muunnosprosessi sähköksi ovat yhdistetty yksittäiseksi piiriksi, jolloin erillistä kolmatta piiriä ei ole. (IAEA, 2022; 2023)

4.2.3 Tertiäripiiri

Monessa MSR-voimalassa tai -konseptissa on suunniteltu kolmas sulasuolaa kierrättävä piiri yksinomaan sähköntuottoa varten, jolloin sekundäripiiri toimii ainoastaan lämmönsiirtopiirinä. Tertiäripiirissä lämpöenergia muunnetaan sähköksi turbiinin ja generaattorin avulla. Sähköntuottoyksikön ohella on lämmönpoistoyksikkö, jossa ylimääräinen lämpö vapautetaan lämpönieluun, esimerkiksi mereen. Reaktorin tuottamaa lämpöä voitaisiin hyödyntää myös lämmityksessä tai teollisuuden prosessilämpönä. (IAEA, 2022; 2023)

4.3 Sulasuolaseos

Sulasuolareaktoreissa kiertävä suolaseos toimii fissiomateriaalien kuljetinaiseena sekä lämpöä kuljettavana jäähdytinaiseena. Tyypillisesti suolaseos koostuu suurimmaksi osaksi fluorisuoloista kuten litiumfluoridista (LiF) ja berylliumfluoridista (BeF₂). LiF on yleinen pohjayhdiste polttoaineseoksissa, mutta myös LiF:n ja BeF₂:n yhdistelmää eli FLiBe:ä on suunniteltu käytettäväksi (IAEA, 2022; Serp ja muut, 2014). LiF kattaa laajan lämpötila-alueen nestemäisenä, sulaen noin 500 °C:ssa ja kiehuen noin 1200 °C:ssa. Lisäksi se on neutronitalouden kannalta vähäabsorptiivinen, mikä tekee siitä erinomaisen materiaalin reaktorikäyttöön. BeF₂ puolestaan lisää suolan kykyä siirtää lämpöä ja osallistuu neutronien moninkertaistamiseen vapauttamalla ylimääräisiä hitaita neutroneja (World Nuclear Association, 2024b). Primääripiirissä kiertävään fluorisuolaseokseen liuotetaan fissioituvia ja mahdollisesti fertiilejä aineita, jotka yleensä lisätään seokseen fluoridiyhdisteinä. Käytetyimpiä yhdisteitä ovat uraanitetrafluoridi (UF₄) ja toriumtetrafluoridi (ThF₄). Syy tällaisten yhdisteiden käyttöön perustuu niiden liuottamisen helpottamiseen sekä kemiallisesti stabiiliin muotoon korkeissa lämpötiloissa (Serp ja muut, 2014; World Nuclear Association, 2024b).

Vaihtoehtoisesti sulasuolaseos voi koostua myös muista fluori- tai kloridiyhdisteistä, riippuen reaktorin tyypistä ja käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi nopean spektrin reaktoreissa,

kuten Molten Salt Fast Reactorissa eli MSFR:ssä, käytetään usein pelkkää litiumfluoridin ja toriumtetrafluoridin (ThF_4) yhdistelmää ilman berylliumia, koska neutronien hidastumista ei haluta (Heuer ja muut, 2013). Myös zirkoniumin (ZrF_4) ja natriumin (NaF) fluoridiyhdisteitä on joskus käytetty osana suolaseosta. Joissakin konsepteissa taas käytetään plutoniumtrifluoridia (PuF_3) tai uraanin ja toriumin seoksia eri suhteissa, riippuen siitä, onko tavoitteena torium-ydinpolttoainekierron maksimointi vai pelkkä energiantuotanto. Monesti sekundääri- ja tertiääripiireissä kiertävät suolaseokset koostuvat erilaisista yhdisteistä kuin primääripiirin seos, koska niissä ei tarvitse ottaa huomioon fissioaineiden liuottamista ja reaktiivisuutta. Esimerkiksi natriumia käytetään enemmän sekundäärisissä lämmönvaihtopiireissä (Serp ja muut, 2014; World Nuclear Association, 2024b).

MSR:issä käytettyjen suolaseoksien sekoitussuhteet voivat vaihdella huomattavasti eri reaktorityyppien ja käytettävien seoksien välillä. Esimerkiksi Heuer ja muut (2013) mainitsevat MSFR-reaktorin sulasuolaseoksen optimaalisen sulamispisteen ja neutronitalouden kannalta olevan 77,5 mol-% LiF :iä ja 22,5 mol-% raskaiden atomien (eli U, Th, Pu jne.) fluoridiyhdisteitä, kun taas Molten Salt Reactor Experiment -nimisessä reaktorikoeksessa suolaseos koostui 65 mol-% LiF :stä, 29,1 mol-% BeF_2 :sta, 5 mol-% ZrF_4 :stä ja vain 0,9 mol-% UF_4 :stä (IAEA, 2022).

MSR:issä käytettävä polttoainesuola on käsiteltävä kemiallisesti fissiotuotteiden poistamiseksi ja ^{233}Pa :n erottamiseksi ^{233}U :n transmutaatioprosessia varten. Joidenkin reaktorimallien ytimissä käytetään kahden nesteen systeemiä, jossa toinen, sisempi polttoainepiiri sisältää fissiiliä ydinpolttoainetta, ja toinen ulompi polttoainepiiri (ns. peittosuola, engl. blanket salt) sisältää fertiiliä toriumia; tämä helpottaa ulomassa suolaseoksessa syntyvän ^{233}Pa :n erottamista, koska siihen ei synny ylimääräisiä transuraanisia reaktiotuotteita. LFTR-reaktori on yksi esimerkki tällaisesta menetelmästä. (World Nuclear Association, 2024b)

5 MSR-tekniologian taustaa

5.1 Ensimmäiset MSR-reaktorit

5.1.1 ARE

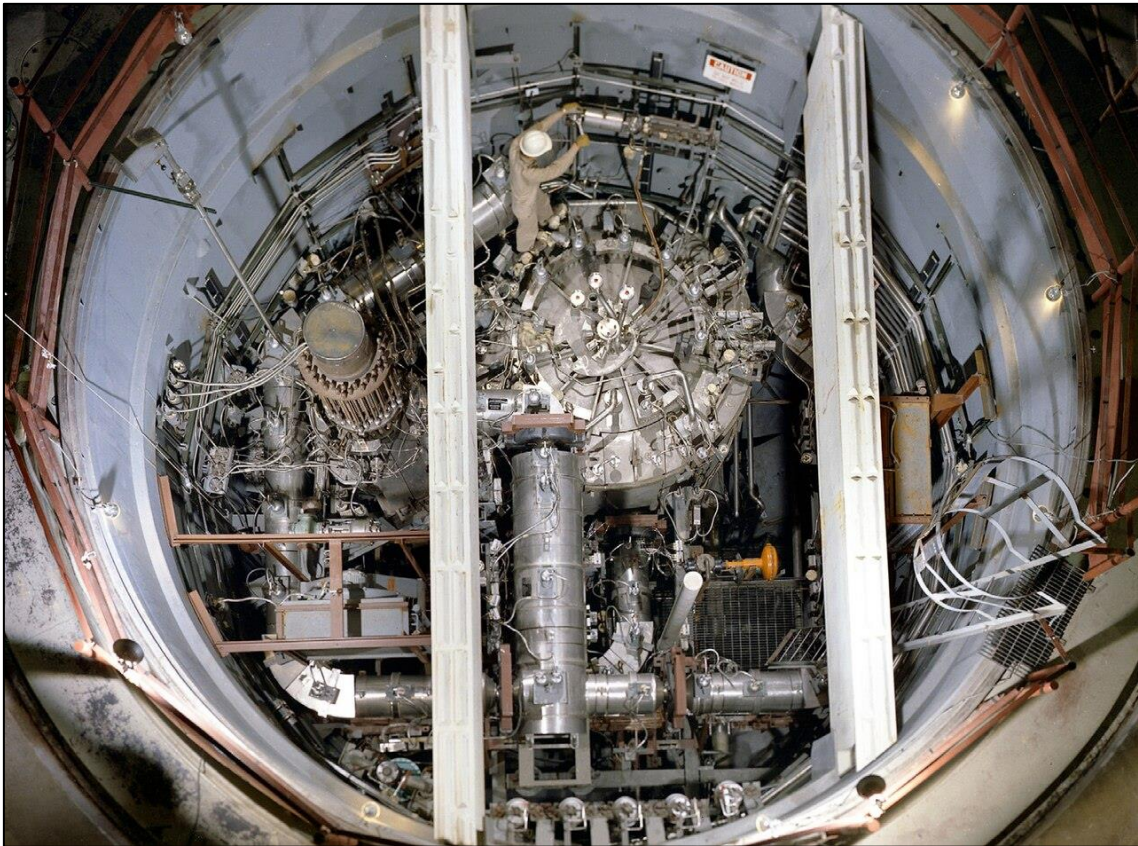
Sulasuolareaktorien tutkiminen alkoi Yhdysvalloissa 1940-luvun lopussa Oak Ridge National Laboratoryssä (ORNL) osana valtion tukemaa Aircraft Nuclear Propulsion -nimistä tutkimusta, jossa tutkittiin ydinvoiman mahdollisuuksia lentokoneiden propulsiojärjestelmissä. Nestemäistä reaktoripolttoainetta käytettiin ensimmäisen kerran marraskuussa 1954 Aircraft Reactor Experiment (ARE) -nimisessä kokeessa, jossa energiaa tuotettiin yhteensä yli 60 MWh noin 2,5 MW:n termisellä teholla (IAEA, 2023; World Nuclear Association, 2024b). ARE-reaktorin suolaseoksena käytettiin NaF-ZrF₄-UF₄-sekoitusta ja berylliumoksidia (BeO) hidastinaineena. Ydinpolttoaineena käytettiin rikastettua uraania, eikä toriumia käytetty. Lämpötila reaktorissa oli noin 860 °C (Serp ja muut, 2014; World Nuclear Association, 2024b)

ARE oli maailman ensimmäinen sulasuolareaktori, ja se osoitti sulasuolareaktorteknologian soveltuvuuden energiantuotantoon korkeilla lämpötiloilla ja passiivisella turvallisuudella. Kokeesta saatiin runsaasti teknistä dataa ja käytännön kokemusta, jotka mahdollistivat sulasuolareaktoreiden laajemman kehityksen. (IAEA, 2023)

5.1.2 MSRE

Vuonna 1960 ORNL aloitti suunnittelun suuremman mittakaavan sulasuolareaktori-koetta varten. Molten Salt Reactor Experimentiksi (MSRE) nimetyn reaktorin rakennus alkoi 1962, ja se käyttöön otettiin 1965. MSRE-kokeen tarkoituksena oli demonstroida MSR-tekniologiaa laajemmin, sekä tutkia toriumista muunnetun ²³³U:n käyttökelpoisuutta tavallisen ²³⁵U:n korvikkeena. Reaktori ei tuottanut sähköä, vaan se oli suunniteltu ainoastaan lämpötehon tuottamiseen ja MSR-tekniologian testaamiseen (IAEA, 2023).

MSRE toimi ilmanpaineessa ja noin 650 °C:n lämpötilassa, ja sen keskimääräinen teho oli 7,34 MWt. Nestemäisenä polttoaineena käytettiin LiF-BeF₂-ZrF₄-UF₄-seosta, jossa oleva rikastettu uraani oli 32 % ²³⁵U:tä. Reaktorin hidastinaineena käytettiin hienorakeista grafiittia. Vuonna 1968 suolaseoksen ²³⁵U-uraani korvattiin 91,5 %:n ²³³U-pitoisella uraanilla. ²³³U oli peräisin muilta laitoksilta, joissa ²³²Th:n neutroniaktivointia ja muuntamista uraaniksi oltiin testattu onnistuneesti. Tämä teki MSRE-reaktorista maailman ensimmäisen ydinreaktorin, joka käytti polttoaineenaan toriumperäistä ²³³U-isotooppia. (IAEA, 2023)



Kuva 2. MSRE: Maailman ensimmäinen ²³³U:a käyttänyt reaktori (Serp ja muut, 2014).

MSRE-reaktorikoe oli monella tavalla onnistunut hanke. Kokeen avulla saatiin laajaa ymmärrystä ja teknistä osaamista sulasuolakäyttöisistä ydinreaktoreista, ja sitä voidaan pitää MSR-kehityksen kannalta todella merkittävänä virstanpylväänä (IAEA, 2023). MSRE lopetti toimintansa joulukuussa 1969, vajaan viiden vuoden ja yli 13000 käyttötunnin jälkeen (ORNL, n.d.).

5.1.3 MSBR

MSRE-kokeesta saadut kokemukset ja informaatio johtivat useampien MSR-konseptien suunnitteluun 1970- ja 80-lukujen välissä Yhdysvalloissa sekä monissa muissa valtioissa ympäri maailmaa. Merkittävin ORNL:ssä suunniteltu MSR-konsepti oli 70-luvun taitteessa kehitelty Molten Salt Breeder Reactor (MSBR). MSBR oli MSRE-reaktorin seuraaja, ja maailman ensimmäinen sulasuolaa käyttävä hyötöreaktorikonsepti. Sen tarkoituksena oli hyödyntää suljettua torium-ydinpolttoainekiertoa ja itse tuotettua ^{233}U :a. MSBR:n ydin olisi toiminut 2225 MW:n lämpöteholla, josta sähköksi olisi muutettu noin 1000 MW. Se olisi käyttänyt $\text{LiF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$ -seosta polttoainesuolana ja NaF-NaBF_4 -seosta sekundäärisenä jäähdytinsuolana. Alkuperäisen suunnitelman mukaan MSBR olisi käyttänyt kahta polttoainesuolaa: yhtä uraanille ja yhtä toriumille, mutta tästä ideasta päädyttiin luopumaan ja MSBR suunniteltiin käyttämään vain yhtä sulasuolaa reaktorissa. Kyseessä olevaa kahden suolan mallia voidaan pitää nykypäivän LFTR-reaktorikonseptien isänä (IAEA, 2023; Serp ja muut, 2014). Yhdysvaltojen rahoittama MSR-ohjelma kuitenkin lakkautettiin, ja ORNL:n MSBR-projekti lopetettiin vuoteen 1976 mennessä, eikä hyötöreaktoria koskaan rakennettu. (Serp ja muut, 2014)

5.2 MSR-kehityksen hidastuminen 1980-luvulla

1980-luvulle tultaessa MSR-teknologian ja toriumin käytön tutkimus vähentyi ympäri maailmaa. Yksi keskeisimmistä syistä oli poliittisen tuen ja rahoituksen väheneminen monissa valtioissa, erityisesti Yhdysvalloissa, jotka olivat tutkimuksen edelläkävijöitä 1950–80-luvuilla.

Yhdysvaltojen laajamittainen tutkimus pysähtyi vuonna 1976, kun valtion antama rahoitus ORNL:n MSR-ohjelmaan lakkautettiin. Rahoitus lakkautettiin monista poliittisista ja strategisista syistä, joista merkittävin oli Serpin ja muiden (2014) mukaan Yhdysvaltojen hallinnon keskittyminen rahoittamaan nestemäisellä metallilla jäähdytettyjen reaktorien tutkimusta, joka oli tuossa vaiheessa MSR-tutkimusta pidemmällä. Muita syitä rahoituksen lopettamiseen olivat tarpeettomuus tutkia toriumia runsaiden uraanivarantojen

vuoksi, sekä toriumin huonompi soveltuvuus ydinaseteollisuudessa. (Serp ja muut, 2014; World Nuclear Association, 2024b)

Muulla maailmassa tapahtui vastaavanlainen kehityskulku kuin Yhdysvalloissa. 1980- ja 1990-luvuilla toriumista ja MSR:istä keskusteltiin lähinnä tieteellisissä konferensseissa tai yksittäisten tutkijoiden julkaisuissa, eikä teknologian tutkimus ollut osa valtavirtaa. Joi-tain yksittäisiä ja pienimuotoisempia konsepteja ja piirustuksia liittyen MSR-teknologi-aan tehtiin, mutta laajamittaiset ja etenkin kansainväliset tutkimukset ja demonstraatiot olivat 1980–2000-vuosien välissä olemattomia. Kansainväliset ydinenergiayhteisöt, ku-ten IAEA ja NEA keskittyivät pääosin olemassa olevien kevytvesireaktorien turvallisuus-teen ja jätteenhallintakysymyksiin. (IAEA, 2022; 2023)

5.3 2000-luku ja uusi kiinnostus

Kiinnostus toriumia ja MSR-teknologiaa kohtaan on tehnyt paluun 2000-luvulla. Moder-nin reaktoriteknologian kehitystä koordinoiva Generation IV International Forum (GIF) valitsi MSR:t yhdeksi kuudesta neljännen sukupolven reaktorityypeistä vuonna 2000. Tämä antoi MSR-teknologialle uskottavuutta ja toi tutkimusrahoitusta. Lisäksi globaalit huolenaiheet ilmastonmuutoksesta, tarpeesta vähentää fossiilisia polttoaineita sekä ky-symykset ydinjätteiden käsittelystä ja loppusijoituksesta toivat vaihtoehtoisen reaktori-teknologian uudestaan ajankohtaiseksi (IAEA, 2023; Serp ja muut, 2014). Kiina alkoi ke-hittää nestemäisiä reaktorikonsepteja Shanghai Institute of Applied Physics (SINAP) -tut-kimusalalla jo 1970-luvulla, ja se on tällä hetkellä maailman johtava valtio MSR-tut-kimuksessa ja käytännönprojektien toteutuksessa (IAEA, 2023). Intiassa, jossa on paljon toriumia mutta vähän uraania, on keskitytty mahdollisuuksiin hyödyntää laajoja mona-tsiittihiekkavarantoja energiantuotannossa. Sen kolmivaiheiseen ydinvoimastrategiaan kuuluu laajamittainen toriumkiertoa hyödyntävien reaktorien käyttöönotto (Humphrey & Khandaker, 2018). Myös Euroopan unioni, etenkin Ranska, Tšekki ja Sveitsi ovat osal-listuneet useisiin yhteisiin projekteihin, joissa on kehitetty Molten Salt Fast Reactor -kon-septeja ja sulasuolan kierrätysmenetelmiä. (IAEA, 2023)

6 Moderneja TMSR-konsepteja

Tässä luvussa kerrotaan tarkemmin neljästä nykypäivän toriumkäyttöisestä sulasuolareaktorikonseptista. Käsiteltävät konseptit ovat valikoituja esimerkkejä, joiden avulla syvennetään ja havainnollistetaan TMSR-teknologiaa ja sen sovelluksia.

6.1 MSFR

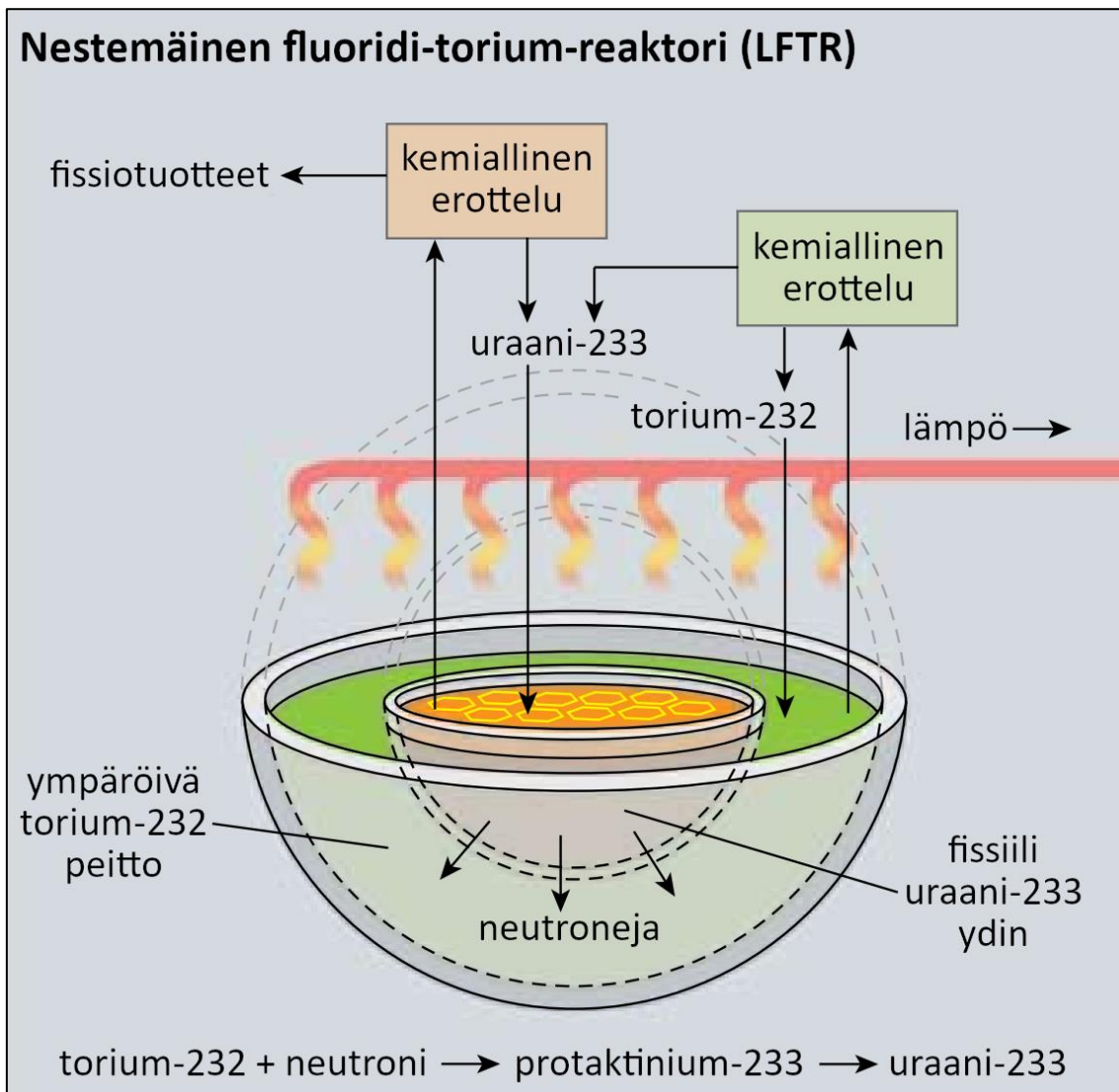
MSFR (Molten Salt Fast Reactor) on ranskalainen MSR-konsepti. Se toimii ilman erillisiä neutronien hidastinaineita, mikä johtaa reaktorissa olevien neutronien pysymiseen nopeassa spektrissä. GIF valitsi MSFR:n yhdeksi laajemmin tutkittavista reaktorikonsep-teista vuonna 2008 sen ainutlaatuisen potentiaalin vuoksi. MSFR soveltuu sekä to-riumpohjaiseen energiantuottoon että käytetyn ydinpolttoaineen uudelleenhyödyntä-miseen. (Heuer ja muut, 2013)

Heuer ja muut (2013) mainitsevat MSFR:n tehoksi 3000 MWt, sulasuolan kokonaismää-räksi 18 m³ ja keskimääräiseksi lämpötilaksi 750 °C. MSFR:ssä käytettävä sulasuolaseos koostuu 77,5 mol-% LiF-yhdisteestä ja 22,5 mol-% raskaiden ytimien fluoridiyhdisteistä. Seoksen litium on 99,995 % ⁷Li-isotooppia, koska ⁶Li aiheuttaa haitallista neutronien ab-sorptiota. MSFR:ä voidaan käyttää käytetyn ydinpolttoaineen jälleenpoltoon, jolloin käytetty sulasuolaseos sisältää myös natrium- ja kaliumfluoridia. (Heuer ja muut, 2013)

MSFR on erittäin turvallinen, mikä johtuu yksinkertaistetusta mutta nopeasti kiertävästä polttoainekierrosta, voimakkaasta suolaseoksen reaktiivisuuden vähentymisestä sekä reaktoriin suunnitelluista hätätilan tyhjennys säiliöistä ja sulamistulpasta. Polttoaine kier-tää koko primääripiirin 3–4 sekunnissa, jonka aikana noin puolet suolasta on ytimessä ja puolet lämmönvaihtimessa. Tämä mahdollistaa tehokkaan ytimen jäähdyttämisen sekä runsaan toriumin neutroniaktiivoinnin. MSFR on esimerkki sellaisesta hyötöreaktorista, joka voi muuntaa toriumia uraaniksi nopeammin kuin se kuluttaa sitä: tavallisella to-riumia sisältävällä polttoaineseoksella MSFR voi tuottaa 95 kg ylimääräistä ²³³U:a vuo-nessa. (Heuer ja muut, 2013)

6.2 LFTR

Nestemäinen fluoridi-torium -reaktori eli LFTR (liquid fluoride thorium reactor) on MSR-reaktorien alalaji, joka kattaa useita toisistaan poikkeavia reaktorityyppejä. LFTR-termillä voidaan myös viitata yksittäisiin samannimisiin reaktorimalleihin tai -konsepteihin. Tyyppillinen LFTR-reaktori koostuu kahdesta sisäkkäisestä fluorisulaseosta kierrättävästä säiliöstä. Sisemmässä säiliössä on fissiiliä materiaalia, kun taas ulommassa säiliössä on fertiiliä materiaalia (Hargraves & Moir, 2010; World Nuclear Association, 2024b). Kuvassa 3 on havainnollistettu LFTR:n toimintaperiaatetta.



Kuva 3. LFTR-reaktorin toimintaperiaate (muokattu lähteestä Hargraves & Moir, 2010).

Sisemmälle ja ulommalle säiliölle on omat sulasuolaa kierrättävät putkistot. Ulomman putkiston avulla peittoon lisätään uutta toriumia, sekä kuljetetaan neutroniaktivoitu torium hajoamissäiliöön, jossa sen annetaan muuntua ^{233}U :ksi. Kemiallisesti peittosuolasta erotettu ^{233}U voidaan sen jälkeen lisätä ytimeen polttoaineeksi. Toinen putkisto on tarkoitettu sydämessä olevan polttoainesuolan kierrättämiseen. Sen avulla fissiossa kuumentunut sulasuola johdatetaan lämmönvaihtimeen energiantuotantoa varten, sekä kemialliselle käsittelylaitokselle, jossa ylimääräiset fissiotuotteet voidaan poistaa ja uusi ^{233}U voidaan lisätä. LFTR:n tuottaman uraanin määrä on yhtä suuri kuin sen kuluttama toriumin määrä. Teoriassa LFTR voi ylläpitää ketjureaktiota loputtomiin, kunhan toriumia lisätään reaktoriin samalla nopeudella kuin se tuottaa ja fissioi uraania. LFTR mahdollistaa siis suljetun polttoainekierron, jossa polttoaine tuotetaan, kulutetaan ja kierrätetään reaktorin sisällä nestemäisessä muodossa. (Hargraves & Moir, 2010; IAEA, 2023; World Nuclear Association, 2024b)

6.3 TMSR-LF1

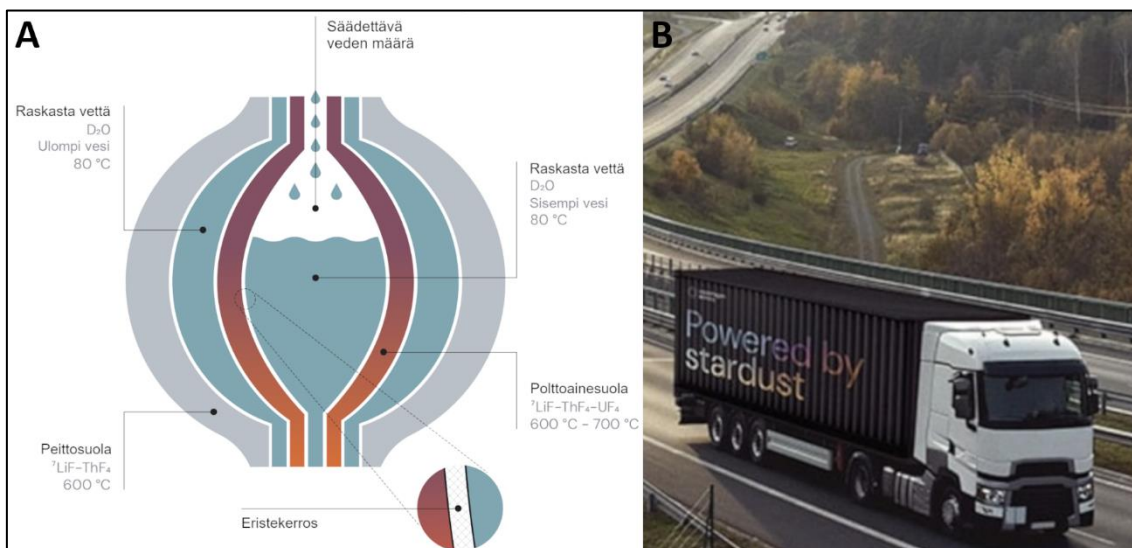
Yleensä TMSR-lyhenteellä tarkoitetaan toriumkäyttöistä sulasuolareaktoria yleisesti. Lyhenteellä voidaan myös viitata samannimiseen Kiinan toriumkäyttöisten sulasuolareaktorien tutkimus- ja kehitysprojektiin. TMSR-projekti aloitettiin vuonna 2011 Shanghai Institute of Applied Physics -tutkimuslaitoksen toimesta, ja sen tuloksena on ollut useampi reaktorikonsepti ja -prototyyppi. Yksi merkittävimmistä TMSR-projektin saavutuksista on pilottireaktori TMSR-LF1. Se on maailman ensimmäinen ydinvoimalassa kunnolla käyttöönotettu toriumia ja sulasuolapolttoainetta hyödyntävä reaktori sitten Yhdysvaltojen MSRE-kokeen 1960-luvulla. (Liu ja muut, 2020)

TMSR-LF1 sijaitsee Gobin aavikolla Luoteis-Kiinassa osana suurempaa teollisuusaluetta. Sen rakentaminen aloitettiin 2019 ja se käyttöönotettiin 2022. TMSR-LF1:n maksimiteho on 2 MWt, ja se käyttää poltto- ja jäähdytinaineena FLiBe-pohjaista sulasuolaseosta, johon on liuotettu uraania ja toriumia. (SINAP, 2022)

SINAP:n (2022) mukaan TMSR-LF1:n tarkoitus on toimia testialustana toriumkäyttöisen MSR-konseptin jatkokehitykselle ja sulasuolateknologian toimintatapojen, turvallisuuden ja jätteenkäsittelyn validoinnille. Osana TMSR-projektin seuraavaa vaihetta, samalle voimalaitokselle aiotaan rakentaa 10 MWe:n modulaarinen TMSR-pienreaktori sekä torium-sulasuolaseoksen tutkimus- ja käsittelylaitoksia (SINAP, 2022).

6.4 Copenhagen Atomics Waste Burner

Tanskalainen Copenhagen Atomics suunnittelee kaupallistettavaa ja massatuotettavaa TMSR-pienreaktoria. Waste Burneriksi nimetyn reaktorin on tarkoitus olla tehtaalla tuotettava, toriumkäyttöinen ja pitkän rahtikontin kokoinen MSR-reaktori. Copenhagen Atomics on yritys, joka lupaa rakentaa, omistaa, operoida ja huoltaa myymiään reaktoreita, sekä käytöstäpoistaa ja kierrättää ne eliniän lopussa (Copenhagen Atomics, 2023). Yritys on kehittänyt Onion Core[®] -nimisen reaktoriytimen (Kuva 4), josta on valmistettu kaksi prototyyppiä. Suunnitelman mukaan ensimmäinen testireaktori on valmis vuonna 2027, ja ensimmäiset kaupalliset reaktorit vuonna 2030 (Copenhagen Atomics, n.d.).



Kuva 4. Waste Burner -reaktorissa käytetään Copenhagen Atomicsin kehittämää Onion Core[®] -ydintä. Ytimen poikkileikkaus (A), ja kuvituskuva (B), jossa valmista Waste Burner -yksikköä (musta kontti) kuljetetaan rekalla. (Copenhagen Atomics, n.d.).

Waste Burner on eräänlainen versio LFTR-reaktorista. Se sisältää ytimen läpi kulkevan fissiilin sulasuolapiirin ja ulomman fertiiliä toriumia sisältävän peittosuolan. Kuvassa 4 on havainnollistettu Waste Burnerin ydintä sekä reaktorin pienen koon mahdollistamaa joustavuutta: tehdasvalmis Waste Burner -yksikkö voidaan kuljettaa päämäärään esimerkiksi rekalla.

Waste Burnerin neutronien hidastinaineena toimii paineistamaton raskas vesi (D_2O), joka on erillisissä säiliökerroksissa reaktoriytimen sisällä. Peittosuola ja polttoainesuola koostuvat rikastetusta 7Li :stä ja raskaiden atomien fluorideista. Reaktori ei sisällä sähköntuottoyksikköä, ja sen on tarkoitus tuottaa lämpöä 100 MW:n teholla. Reaktori käyttää 5 % rikastettua ^{235}U :tä alustavana polttoaineena, ja toriumista muuntuva ^{233}U :a lisäpolttoaineena. Reaktorit voivat hyödyntää myös käytettyä ydinpolttoainetta, ja vähentää samalla sen vaatimaa säilöntäaikää jopa 100000 vuodesta vain 300 vuoteen. (Copenhagen Atomics, 2023; n.d.)

Copenhagen Atomicsin (2023) mukaan optimoidun toriumenergian hinta on paljon halvempaa kuin fossiili-, tuuli-, aurinko-, tai uraanienergian hinta. Waste Burnerin hinnan oletetaan olevan yksi neljäsosa tavanomaisen saman kokoluokan ydinvoimalan hinnasta.

7 TMSR:n vahvuudet, heikkoudet, mahdollisuudet ja uhat

Tässä luvussa tarkastellaan toriumkäyttöiseen sulasuolareaktoriin liittyviä hyviä ja huonoja puolia SWOT-analyysin avulla. Alle on listattu TMSR-tekniikan merkittävimmät vahvuudet, heikkoudet, mahdollisuudet ja uhat.

7.1 TMSR:n vahvuudet

- Torium on yleistä. Sitä arvellaan olevan maankuoressa noin 6,2 miljoonaa tonnia eli 3–4 kertaa niin paljon kuin uraania. (IAEA, 2019)
- Jatkuva polttoainekierto mahdollistaa sulasuolaseoksen jatkuvan käsittelyn, kuten reaktiotuotteiden poiston ja uuden fissiomateriaalin lisäyksen ilman tarvetta sammuttaa reaktoria. (Serp ja muut, 2014)
- Korkean lämpötilan ja lämpöä hyvin kuljettavien suolaseoksien vuoksi MSR:n hyötysuhde on lähtökohtaisesti parempi (jopa 45–50 %) kuin perinteisillä kevytvesireaktoreilla (noin 33 %). (Serp ja muut, 2014)
- ^{233}U vapauttaa keskimäärin enemmän neutroneja, tehden ydinreaktorin neutronitaloudesta paremman kuin ^{235}U :llä tai ^{239}Pu :llä. (IAEA, 2022)
- Suljettu Th-U-kierto ja nestemäisen polttoaineen käyttö mahdollistavat toriumin koko energiasisällön hyödyntämisen; luonnonuraanista vain 0,7 % on käytettävää ^{235}U -isotooppia ilman rikastusta, eikä TMSR-voimalassa muunnettavaa toriumia tarvitse erikseen rikastaa. (Serp ja muut, 2014)
- Toiminta matalassa paineessa ilman vesikiertoon perustuvaa jäähdytystä. Sulasuolareaktorit voivat toimia lähes ilmakehän paineessa ilman vesijäähdytystä, tehden höyryjäähdyksen riskin olemattomaksi. Matala paine vähentää myös reaktorimateriaaleihin kohdistuvaa mekaanista rasitusta. (IAEA, 2023)
- Negatiivinen lämpöreaktiivisuus: nestemäisen polttoaineen reaktiivisuus pienenee, kun se kuumenee. Nestemäisen suolaseoksen ominaisuuksiin kuuluu suuri lämpölaajenemiskerroin. Koska reaktiivisuus on verrannollinen fissioituvan aineen tiheyteen, reaktiivisuudesta johtuvan lämpötilan ja tilavuuden kasvaessa polttoaineseoksen reaktiivisuus alkaa itsestään vähentyä. Käytännössä kyseessä on siis

passiivinen turvallisuusominaisuus, mikä tekee sulasuolareaktorista itseään säätelevän, joka puolestaan vähentää riskiä ylikuumenemisille huomattavasti. (IAEA, 2023; Serp ja muut, 2014)

- MSR:t ovat käytännössä immuuneja ytimen sulamisonnettomuuksille. Nestemäisen olomuotonsa ansiosta polttoaineseos voidaan hätätilanteessa valuttaa reaktorista pois sen alapuolella oleviin tyhjennyssäiliöihin. Lisäksi monissa MSR-malleissa on sulamistulppa, joka sulaa tietyssä kriittisessä lämpöpisteessä pois, päästäten sulasulaseoksen valumaan automaattisesti reaktorista säiliöihin. (Serp ja muut, 2014)
- Toriumkäyttöinen MSR voi tuottaa vähemmän ydinjätettä, joka on myös lyhytikäisempää. MSR:t vähentävät pitkäikäisten transuraanien, kuten plutoniumin ja amerikumiumin, muodostumista ydinjätteeseen, koska nestemäisen polttoaineen jatkuva kierto mahdollistaa sen jatkuvan prosessoinnin sekä fissiilin sisällön kokonaisvaltaisen hyödyntämisen. Syntynyt jäte ei ole "käytettyä polttoainetta" kuten kiinteää polttoainetta käyttävissä reaktoreissa, vaan jätteitä syntyy pienissä määrissä jatkuvasti ja ne voidaan erottaa polttoaineseoksesta ja käsitellä reaktorin toiminnan aikana. Vaikka toriumkierrosta syntyvä ^{233}U -peräinen ydinjäte säteileekin erittäin voimakkaasti, sen reaktiivisuus vähenee merkittävästi jo noin 500 vuodessa, kun taas perinteinen kiinteäpohjainen ydinjäte voi säilyä korkea-aktiivisena useita tuhansia vuosia. (Humphrey & Khandaker, 2018; IAEA, 2022; 2023; Serp ja muut, 2014)
- Torium on halvempaa kuin uraani, koska se on paljon yleisempää, sitä on helposti saatavilla ja sitä voidaan saada sivutuotteena jo olemassa olevasta kaivostoiminnasta. (Humphrey & Khandaker, 2018)

7.2 TMSR:n heikkoudet

- Torium ei ole fissiili vaan fertiili. Sen käyttö on monimutkaisempaa kuin tavallisen ^{235}U :n käyttö. Jotta toriumia voidaan hyödyntää ydinvoimalassa, tulee se ensin muuntaa ^{233}U :ksi. Tämä vaatii kehittyneitä erottelujärjestelmiä ja reaktorisuunnittelua. (World Nuclear Association, 2024b)
- Materiaalien kestävyysongelmat. Sulasulaseoksien yhdisteet ovat syövyttäviä korkeissa lämpötiloissa. Yli $700\text{ }^{\circ}\text{C}$:n fluoridiympäristössä pitkään kestävien materiaalien

kehitys ei ole vielä täysin ratkaistu. Korroosio voi johtaa vuotoihin tai reaktorisydämen vaurioihin. (IAEA, 2023; Serp ja muut, 2014)

- Jatkuva nestemäisen polttoaineen kierto sekä kemiallinen erotus ja prosessointi reaktorin ollessa käynnissä on haastavaa ja teknisesti monimutkaista, eikä siihen ole vielä täysin toimivia kaupallisia ratkaisuja. (IAEA, 2022)
- ^{233}U :n tuotannossa muodostuu väistämättä pieniä määriä ^{232}U -isotooppia, jonka hajoamisketjussa syntyy voimakasta gammasäteilyä. Voimakas säteily vaatii hyvää säteilysuojausta ja hankaloittaa polttoaineen käyttöä ja jälleenkäsittelyä, vaikka se samalla tarkoittakin lyhyempää korkea-aktiivisuuden kestoa. (Humphrey & Khandaker, 2018; IAEA, 2022)
- MSR-tekniikan kehitys on varhaisessa vaiheessa ja edelleen keskeneräistä. Etenkin toriumia käyttävät MSR:t ovat teknisesti epäkypsiä eikä niitä ole kaupallisesti hyödynnetty. Suurinta osaa reaktoreista ei ole vielä demonstroitu käytännössä eikä edes prototyyppeinä. (IAEA, 2022; 2023)

7.3 TMSR:n mahdollisuudet

- Toriumin yleisyys ja runsaus voi lisätä valtioiden energiaomavaraisuutta ja tarjota vaihtoehdon uraanin käytölle erityisesti pitkällä aikavälillä. Monet maat, esim. Intia, omaavat massiivisia toriumvarantoja, joita voitaisiin käyttää energialähteenä TMSR:ssä. Lisäksi ne valtiot, joilla ei ole omia uraanivarantoja, mutta on toriumia, voisivat hyödyntää TMSR-tekniikkaa ja parantaa omavaraista energiainfrastruktuuria. (Humphrey & Khandaker, 2018; Serp ja muut, 2014)
- MSR-tekniikka on monipuolisesti soveltuvaa moniin eri käyttötarkoituksiin. Sähkön tuotannon lisäksi MSR:n korkeita lämpötiloja voidaan käyttää teollisuuden prosessilämpönä tai esimerkiksi vedyntuotannossa termolyysillä. (IAEA, 2023)
- Parantuneen turvallisuuden, tehokkuuden ja vähemmän jätettä tuottavan tekniikan vuoksi MSR:t voivat parantaa ydinvoiman yleistä hyväksyttävyyttä yhteiskunnassa. (Serp ja muut, 2014)

- Torium voi pienentää ydinaseiden proliferaatoriskiä. Toriumin käyttö ei tuota suuria määriä ydinaseissa käytettävää ^{239}Pu -isotooppia. Lisäksi toriumkierrossa ^{233}U :n ohelle syntyy aina jonkin verran ^{232}U :a. ^{232}U :n hajoamistuotteiden voimakas gamma säteily tekee ^{233}U :n käytöstä ydinaseissa erittäin vaikeaa, koska sen käsittely vaatii erityistä suojausta ja isotooppien erottaminen toisistaan on erittäin monimutkaista. (Humphrey & Khandaker, 2018; IAEA, 2023)
- Mikäli toriumia hyödyntävää reaktoriteknologiaa, etenkin MSR-teknologiaa, saadaan kehitettyä tarpeeksi pitkälle ja sen ymmärrys ja osaaminen kasvaa, putoaa voimaloiden kustannukset huomattavasti alemmas (Humphrey & Khandaker, 2018). Copenhagen Atomicsin (2023) mukaan toriumkäyttöisellä MSR:llä on suuri potentiaali olla yksi halvimmista energiantuotantomenetelmistä tulevaisuudessa.

7.4 TMSR:n uhat

- TMSR-teknologia on vielä kallista. Varhainen kehitys ja osaamisen puute tekevät tutkimuksen ja kehityksen vaatimista kustannuksista suuria. (IAEA, 2022; 2023)
- Kilpailevien teknologioiden vahva asema vaikeuttaa MSR-teknologian kaupallistamista. Vanhat kevytvesireaktorit ja kehittyneet kolmannen sukupolven reaktorit ovat jo vakiintuneita, ja toisin kuin MSR-voimaloille, niille on jo olemassa infrastruktuuri sekä käytännön osaaminen. Tämä hidastaa MSR-teknologian lisääntymistä markkinoilla. (IAEA, 2023)
- Toriumteknologiat voivat jäädä marginaaliin, koska nykyinen ydinvoimainfrastruktuuri perustuu pelkästään uraaniin. Toriumilla ei ole kunnollista omaa infrastruktuuria, joten ydinvoimateollisuuden, lainsäätäjien ja rahoittajien haluttomuus investoida uusiin ja epävarmisiin teknologioihin voi hidastaa toriumin käyttöönottoa. (IAEA, 2022)
- Vaikka toriumperäisen uraanin hyödyntäminen ydinaseiden valmistuksessa onkin teknisesti vaikeaa, on ^{233}U :a silti teoriassa täysin mahdollista käyttää ydinaseissa, ja sitä on historiallisesti myös testattu. (IAEA, 2022)

- MSR-teknologia on sen verran uutta ja poikkeavaa perinteisistä ydinreaktoreista, ettei sille ole olemassa standardoitua sääntelyä suurimassa osassa maita. Tämä aiheuttaa riskejä aikataulujen ja investointien kannalta. Puutteellinen poliittinen ja sääntelyyn liittyvä ympäristö lisäävät myös epävarmuutta. Kansalliset regulaatiot ja vanhat poliittiset päätökset voivat estää uusien reaktorikonseptien kehityksen, erityisesti jos turvallisuus- ja ympäristönäkökohdat eivät ole vielä täysin selviä tai yhteisesti hyväksytyjä. Uudenlaisen ydinvoimatekniikan poliittinen ja julkinen hyväksyntä onkin todella hidasta. Yleensä yleinen tietoisuus ja luottamus uudentyypisiin reaktoreihin on alhainen, mikä voi johtaa poliittisiin viivästyksiin ja investointien puutteeseen. (Humphrey & Khandaker, 2018; IAEA, 2022; 2023; Serp ja muut, 2014)

8 Toriumkäyttöisen sulasuolareaktorin tulevaisuudennäkymät

Ilmastonmuutoksen, kasvavan energiankulutuksen, teknologisen kehityksen ja monien muiden syiden takia kiinnostus uusien energiantuotantomenetelmiä kohtaan on kasvanut viime vuosien aikana huomattavasti. Kiinnostus uusien ja parempien ydinenergian tuotantomenetelmiä kohtaan johtuu erityisesti kasvavasta energian tarpeesta, ja tarpeesta löytää kestävämpiä, vakaampia, turvallisempia, puhtaampia ja taloudellisempia vaihtoehtoja nykyisille energiamenetelmille. (IAEA, 2022; 2023)

Toriumkäyttöiset sulasuolareaktorit nähdään kansainvälisesti yhtenä lupaavimmista tulevaisuuden ydinenergiateknologioista (IAEA, 2023). TMSR:iin liittyy monia hyviä puolia, kuten toriumin runsas määrä, polttoaineen energiasisällön kokonaisvaltainen hyödyntäminen, ainutlaatuiset turvallisuusominaisuudet ja pienemmät ydinjäteongelmat.

Vaikka teknologian tulevaisuus näyttää lupaavalta, edessä on kuitenkin vielä merkittäviä haasteita. Näitä ovat erityisesti materiaalien korroosionhallinta, sulasuolanesteiden kiertoprosesseihin liittyvät erottelu- ja käsittelyongelmat ja ennen kaikkea laaja lupaprosessien sekä kansainvälisten standardien kehittäminen. TMSR-teknologia on edelleen todella nuorta, mikä tekee sen kehityksestä ja parantamisesta kallista ja aikaavievää. Tällä hetkellä kansainvälinen yhteistyö on vähäistä, ja kehitys on harvojen valtioiden tai yksittäisten investoijien varassa. Kiina ja Intia ovat esimerkkejä maista, joissa MSR:iä ja toriumia on tutkittu viime vuosina aktiivisesti. (IAEA, 2023)

Humphrey ja Khandaker (2018) arvioivat toriumkäyttöisen MSR-teknologian olevan selkeästi pitkän aikavälin energiantuotantomuoto. Myös IAEA (2023) arvioi sulasuolareaktorit tulevaisuuden teknologiaksi, eikä niinkään lyhyen tai edes keskipitkän ajan vaihtoehdoksi. MSR:t, erityisesti toriumia käyttävät sellaiset, ovat tutkimus- ja kehitysvaiheen alussa, eikä niiden odoteta siirtyvän kaupallistettavaan vaiheeseen vielä pitkään aikaan. TMSR:ien kehitys tulee olemaan tutkimusvaiheessa vielä useita vuosia, ellei vuosikymmeniä (World Nuclear Association, 2024b).

9 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin toriumkäyttöistä sulasuolareaktoria (TMSR), yhtä potentiaalista ydinenergian tuotantomenetelmää. Työssä syvennyttiin TMSR:n toimintaan alustamalla ydinvoimalassa hyödynnettävää fissioreaktiota, kertomalla toriumin esiintymisestä ja toriumkierrosta, selittämällä MSR:n toimintaa, rakennetta ja sulasuolaseosta, sekä kertomalla erilaisista historiallisista kuin myös moderneista MSR-konsepteista. Työssä lueteltiin merkittävimmät TMSR:ä koskevat vahvuudet, heikkoudet, mahdollisuudet ja uhat. Lopuksi työssä pohdittiin toriumia hyödyntävän MSR-tekniikan kehitysvaihetta ja tulevaisuudennäkymiä.

TMSR:ssä yhdistyy kaksi konseptia: sulasuolareaktori ja toriumin käyttö energiantuotannossa. Torium on radioaktiivinen metalli, jota voidaan käyttää luonnonuraanin sijasta ydinvoiman tuotannossa. Toriumia ei sellaisenaan voida käyttää ydinvoimalassa koska se ei ole fissiili, mutta se voidaan muuntaa fissiiliksi ^{233}U :ksi nk. torium-ydinpolttoainekierron avulla. Torium-ydinpolttoainekiertoa on hankala soveltaa tavallisissa ydinreakteireissa, siksi sitä on tarkasteltu MSR-kontekstissa.

Sulasuolareaktoreihin liittyy ainutlaatuisia ominaisuuksia, mitkä tekevät niistä varteenotettavan tutkimuksen kohteen tulevaisuuden energiantuotannossa. MSR:t hyödyntävät nestemäistä sulasuolaseosta, johon fissiilit materiaalit liuotetaan. Suolaseos toimii reaktorista lämpöä poistavana jäähdytysaineena sekä ydinpolttoaineen kantajana. MSR:t toimivat korkeissa lämpötiloissa ja matalassa paineessa, ja niiden avulla fissiomateriaalia voidaan kierrättää ja käsitellä jatkuvasti ilman reaktorin sammuttamista. Nestemäinen polttoaineseos mahdollistaa toriumkierron, fissiotuotteiden jatkuvan poiston ja polttoaineen energiasisällön paremman hyödyntämisen, sekä luo ainutlaatuisia turvallisuusominaisuuksia.

Toriumkäyttöiset sulasuolareaktorit ovat nousseet uudestaan merkittäväksi tutkimuskohteeksi osana uuden sukupolven ydinreaktoritekniikoita. Viime vuosina tekniikan

tutkimus ja kehitys on kokenut voimakasta elpymistä 1980–2000-lukujen vähäisen tutkimusvaiheen jälkeen. Kiinnostus uudenlaista teknologiaa kohtaan johtuu kasvavasta energian tarpeesta ja tarpeesta löytää kestävämpiä, vakaampia, turvallisempia, puhtaampia ja taloudellisempia vaihtoehtoja. Etenkin toriumiin kohdistuva kiinnostus on kasvanut uraanin resurssirajoitteista ja käytettyyn polttoaineeseen ja ydinjätteeseen liittyvistä kysymyksistä johtuen.

TMSR-teknologian kehitys on kuitenkin tällä hetkellä alkuvaiheessa, eikä TMSR:ien odoteta siirtyvän kaupalliseen vaiheeseen vielä moneen vuoteen. TMSR:iin liittyy monia teknisiä ongelmia, jotka tekevät teknologian kehityksestä monimutkaista ja kallista. Näitä ovat mm. materiaalien korroosio-ongelmat ja monimutkaiset polttoaineen kiertomekanismit. Myös uudenlaisen teknologian tuoma epävarmuus ja vanhojen ydinvoimatekniikoiden vahva ja tunnustettu asema voivat hidastaa TMSR-teknologian investointeja ja kehitystä. TMSR:ien kehitys- ja tutkimustyö on tällä hetkellä keskittynyt yksittäisten investoijien tai harvojen valtioiden varaan, ja kansainvälinen yhteistyö TMSR-teknologian saralla on vielä melko olematonta. Toriumkäyttöiset sulasuolareaktorit voivat kuitenkin tulevaisuudessa nousta merkittäväksi energiantuottomenetelmäksi ja isoksi osaksi ydinvoima-alaa.

Lähteet

- Copenhagen Atomics. (2023, 11. kesäkuuta). *Energy Future Unveiled! THORIUM Molten Salt Reactors* [video]. YouTube. Noudettu 26.5.2025 osoitteesta <https://www.youtube.com/watch?v=27IntvWo4mo>.
- Copenhagen Atomics. (n.d.). *Technology*. Copenhagen Atomics. Noudettu 26.5.2025 osoitteesta <https://www.copenhagenatomics.com/technology>.
- Hargraves, R., & Moir, R. (2010). Liquid Fluoride Thorium Reactors. *American Scientist*, 98(4), 304. Noudettu 19.5.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1511/2010.85.304>.
- Heuer, D., Merle-Lucotte, E., Allibert, M., Brovchenko, M., Ghetta, V., & Rubiolo, P. (2013). Towards the thorium fuel cycle with molten salt fast reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 64, 421–429. Noudettu 9.5.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.08.002>.
- Humphrey, U. E., & Khandaker, M. U. (2018). Viability of thorium-based nuclear fuel cycle for the next generation nuclear reactor: Issues and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 259–275. Noudettu 10.5.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.019>.
- IAEA. (2019). *World Thorium Occurrences, Deposits and Resources*. International Atomic Energy Agency. Noudettu 9.5.2025 osoitteesta <https://www.iaea.org/publications/13550/world-thorium-occurrences-deposits-and-resources>.

- IAEA. (2022). *Near Term and Promising Long Term Options for the Deployment of Thorium Based Nuclear Energy: Final Report of a Coordinated Research Project*. International Atomic Energy Agency. Noudettu 10.5.2025 osoitteesta <https://www.iaea.org/publications/15215/near-term-and-promising-long-term-options-for-the-deployment-of-thorium-based-nuclear-energy>.
- IAEA. (2023). *Status of Molten Salt Reactor Technology*. International Atomic Energy Agency. Noudettu 10.5.2025 osoitteesta <https://www.iaea.org/publications/14998/status-of-molten-salt-reactor-technology>.
- Liu, Y., Yan, R., Zou, Y., Yu, S., Zhou, B., Kang, X., Hu, J., & Cai, X. (2020). Sensitivity/uncertainty comparison and similarity analysis between TMSR-LF1 and MSR models. *Progress in Nuclear Energy*, 122, 103289. Noudettu 26.5.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103289>.
- NEAC. (2002). *Molten Salt Reactor.svg*. Generation IV roadmap. Department of Energy Nuclear Energy Research Advisory Committee. Noudettu 11.5.2025 osoitteesta https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Molten_Salt_Reactor.svg.
- NSTA. (2016, 21. joulukuuta). *Focus on Physics: How $E = mc^2$ Helps Us Understand Nuclear Fission and Fusion*. National Science Teaching Association. Noudettu 13.5.2025 osoitteesta <https://www.nsta.org/blog/focus-physics-how-e-mc2-helps-us-understand-nuclear-fission-and-fusion>.
- ORNL. (n.d.). *History | Molten Salt Reactor*. Oak Ridge National Laboratory. Noudettu 17.5.2025 osoitteesta <https://www.ornl.gov/molten-salt-reactor/history>.

- Schunck, N., & Regnier, D. (2022). Theory of nuclear fission. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 125, 103963. Noudettu 12.5.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2022.103963>.
- Serp, J., Allibert, M., Beneš, O., Delpech, S., Feynberg, O., Ghetta, V., Heuer, D., Holcomb, D., Ignatiev, V., Kloosterman, J. L., Luzzi, L., Merle-Lucotte, E., Uhlíř, J., Yoshioka, R., & Zhimin, D. (2014). The molten salt reactor (MSR) in generation IV: Overview and perspectives. *Progress in Nuclear Energy*, 77, 308–319. Noudettu 5.5.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.02.014>.
- SINAP. (2022). *小型模块化钍基熔盐堆研究设施项目环境影响报告书（选址阶段）*. Shanghai Institute of Applied Physics. Noudettu 26.5.2025 osoitteesta <https://web.archive.org/web/20221211175036/https://www.sinap.cas.cn/xwzx/tzgg/202212/P020221207808949039651.pdf>.
- World Nuclear Association. (2024a, 2. toukokuuta). *Thorium*. Noudettu 9.5.2025 osoitteesta <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium>.
- World Nuclear Association. (2024b, 10. syyskuuta). *Molten Salt Reactors*. Noudettu 7.5.2025 osoitteesta <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/molten-salt-reactors>.
- World Nuclear Association. (2025, 16. toukokuuta). *Physics of Uranium and Nuclear Energy*. Noudettu 12.5.2025 osoitteesta <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/physics-of-nuclear-energy>.

Liite

Taulukko maailman toriumvaroista yhteensä (arviot)

Maa/Alue	Toriumresurssien määrä, pyörästetty (t)	Osuus (%)**
Eurooppa		
Turkki*	374000	6,024
Norja	87000	1,401
Grönlanti (Tanska)	86000–93000	1,442
Suomi*	60000	0,966
Venäjä, (Euroopan osa)*	55000	0,886
Ruotsi*	50000	0,805
Ranska	1000	0,016
Eurooppa yhteensä	713000–720000	11,540
Amerikka		
Yhdysvallat	595000	9,583
Brasilia	632000	10,179
Venezuela*	300000	4,832
Kanada	172000	2,770
Peru	20000	0,322
Uruguay*	3000	0,048
Argentiina	1300	0,021
Amerikka yhteensä	1723300	27,756
Afrikka		
Egypti*	380000	6,120
Etelä-Afrikka	148000	2,384
Marokko*	30000	0,483
Nigeria*	29000	0,467
Madagaskar*	22000	0,354
Angola*	10000	0,161
Mosambik	10000	0,161
Malawi*	9000	0,145
Kenia*	8000	0,129
Kongon demokraattinen tasavalta*	2500	0,040
Muut*	1000	0,016
Afrikka yhteensä	649500	10,461
Aasia		
IVY* (pl. Venäjän Euroopan osa)	1500000	24,159
Intia	846500	13,634
Kiina*	>100000	1,611
Iran*	30000	0,483
Malesia	18000	0,290
Thaimaa*	10000	0,161
Vietnam*	5000–10000	0,121
Etelä-Korea*	6000	0,097
Sri Lanka*	4000	0,064
Aasia yhteensä	>2519500–2524500	40,620
Australia	595000	9,583
Koko maailma yhteensä	6205300–6212300	100,0

*data ei ole päivitetty **prosentuaalinen osuus laskettu keskiarvoilla

IVY = Itsenäisten valtioiden yhteisö (taulukko mukailen lähdettä IAEA, 2019, s. 105)