

Antti Rouhu

# TORIUMIN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET YDINVOIMAN POLTTOAINEENA

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Seppo Syrjälä  
Huhtikuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Antti Rouhu: Toriumin käyttömahdollisuudet ydinvoiman polttoaineena  
Potential Utilization of Thorium as a Nuclear Fuel  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka  
Huhtikuu 2021

---

Torium on fertiili raskasmetallinen alkuaine. Siitä saatavan fissioenergian hyötykäytöllä olisi mahdollisuuksia vastata nykypäivän moninaiisiin energiantuotannon puhtauden, turvallisuuden ja alati kasvavien tuotantomäärien synnyttämiin haasteisiin sekä tavoitteisiin. Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli perehtyä näihin toriumvoimaan liittyviin mahdollisuuksiin ja selvittää, kuinka merkittäviä etuja se tuo nykypäivänä käytössä olevaan uraanipohjaiseen ydinvoimaan verrattuna. Työssä oli myös tarkoituksena selvittää, minkälaiset reaktoriteknologiat soveltuvat toriumista saatavan energiasisällön jalostamiseen. Lisäksi tilannekuvan kartoitus maailmanlaajuisesta tutkimus- ja kehitystyön kulusta sekä tulevaisuuden näkymistä oli osana työn tavoitetta. Luonteeltaan työ oli kirjallisuuskatsaus saatavilla olevaan englanninkieliseen tutkimusmateriaaliin aiheesta.

Toriumia esiintyy maailmanlaajuisesti maaperässä 3–4-kertaisesti uraaniin verrattuna. Energiasisällöltään torium on hyvin rikasta: työstä saatujen laskelmien perusteella toriumilla pystyttäisiin kattamaan omavaraisesti koko Suomen valtakunnallinen energiankulutusmäärä yli 6500 vuoden ajaksi vuoden 2019 kulutustasolla. Alkuaineominaisuuksien perusteella toriumin hyödyntäminen mahdollistaa nykyistä tehokkaamman sekä kestävämmän ydinvoiman polttoainekäytön. Toriumpolttoaineen käytöllä voidaan minimoida monella eri tapaa fissioreaktioon liittyviä ydinturvallisuusriskejä: Polttoaineen sisäiset ominaisuudet ehkäisevät fissioreaktion hallitsemattoman kiihtymisen ydinreaktorissa. Ydinaseiden valmistus toriumin ydinjätteestä on huomattavasti nykyistä vaikeampaa. Lisäksi syntyvän ydinjätteen määrä sekä sen radioaktiivisuuden taso ovat merkittävästi pienempiä kuin tavanomaisessa uraanikäyttöisessä ydinvoimalassa.

Vaikka toriumin fertiili luonne on ydinturvallisuutta parantava tekijä, fertiiliys tuo myös merkittävän haasteen toriumin käytettävyyteen. Tästä johtuen suurin osa reaktorimalleista vaatii ulkopuolisen fissiilin materian, kuten uraani-235:n tai plutonium-239:n käytön fissioreaktion alulle panijana. Lisäksi haasteita polttoaineen valmistusprosessiin tuovat toriumdioksidin poikkeuksellisen korkea sulamislämpötila ja valmistusprosessissa syntyvän protaktiniumin verrattain pitkä 27 vuorokauden puoliintumisaika. Toriumin kaupallisesta polttoainekäytöstä ei ole vielä kokemusta, joten teknologian valmistumiseksi tarvitaan merkittävästi investointipääomaa. Haasteista huolimatta viime vuosina on käynnistynyt useita eri projekteja lopullisena tavoitteenaan toriumenergiaa hyödyntävän ydinteknologian kaupallinen käyttö.

Toriumin soveltuvuutta moniin erilaisiin ydinreaktoreihin on tutkittu eri puolilla maailmaa. Tutkimustulosten perusteella toriumin polttoainekierto soveltuu hyvin laajasti erilaisille reaktorikonfiguraatioille. Toriumpolttoaineen hyödyntäminen nykyään laajalti käytössä olevissa kevyt- ja raskasvesireaktoreissa olisi mahdollista jo pieniä laitemuunnoksia tekemällä. Kuitenkin erityisesti 4. sukupolven uudet toriumvoimalat, kuten sulasuolareaktori ja kiihdytinreaktori, voisivat saada taakseen laajaa poliittista hyväksyntää nykyisestä ydinvoimaan liitetystä negatiivisesta imagosta huolimatta. Nämä reaktorimallit tarjoaisivat yliverstaista suorituskykyä, turvallisuustasoa ja mukautuvuutta uusien ydinpolttoaineiden käyttöön. Samalla olisi mahdollista saavuttaa jopa aiempaa pienemmät voimalaitoksen rakentamiskustannukset.

Kansainvälisten toimijoiden tekemien arvioiden perusteella ensimmäisiä toriumkäyttöisiä ydinvoimaloita voitaisiin nähdä parhaimmillaan 2030-luvulla. Kuitenkin vasta onnistuneen kaupallisen toriumvoimalan käyttöönoton, tai vaihtoehtoisesti uraanin ja plutoniumin hintojen kohoamisen myötä toriumvoimalla olisi realistia mahdollisuuksia nousta merkittäväksi puhtaan energiantuotannon vaihtoehdoksi. Suomalaiset tahot ovat tietyllä tavalla pysyneet sivussa tutkimus- ja kehityshankkeisiin osallistumisesta. Työssä ehdotettiin kotimaisten tahojen osallistumista esimerkiksi pohjoismaisiin hankkeisiin, jotta maallamme olisi tulevaisuudessa paremmat edellytykset omavaraisen energiantuotannon kehittämiseen uusia teknologioita hyödyntämällä.

Avainsanat: ydinvoima, torium, uraani, plutonium, fertiili, fissiili, hyötöreaktori

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. TORIUM ALKUAINENA.....	3
2.1 Maaperän varannot.....	3
2.2 Louhinta .....	5
2.3 Torium ydinenergian lähteenä.....	6
2.4 Fissioreaktion eteneminen .....	7
2.5 Alkuainetason ydinturvallisuus .....	10
3. MAHDOLLISET REAKTORITYYPIT .....	12
3.1 Kevytvesireaktori.....	12
3.2 Raskasvesireaktori.....	13
3.3 Korkean lämpötilan kaasujäähdytteinen reaktori .....	15
3.4 Nopea hyötöreaktori.....	16
3.5 Sulasuolareaktori .....	17
3.6 Kiihdytinreaktori .....	20
4. TUTKIMUS JA KEHITYS MAAILMALLA .....	22
4.1 Atomiajan alusta nykyaikaan.....	22
4.2 Intia.....	23
4.3 Muu Aasia.....	24
4.4 Eurooppa .....	25
4.5 Pohjois-Amerikka .....	26
4.6 Muut valtiot .....	27
5. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	29
LÄHTEET .....	32

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

\$	Yhdysvaltain dollari
ACR	Advanced CANDU Reactor
ADS	Accelerator-Driven System, kiihdytinreaktori
AECL	Atomic Energy of Canada Limited
atm	normaali ilmanpaine
barni	$10^{-28} \text{ m}^2$
Be	beryllium
BWR	Boiling Water Reactor, kiehutusvesireaktori
CANDU	Canadian Deuterium Uranium, kanadalainen painevesireaktorimalli
CNNC	China National Nuclear Corporation
D	deuterium
DFR	Dual Fluid Reactor, kaksoisfluidireaktori
Euratom	The European Atomic Energy Community, Euroopan atomienergiayhteisö
F	fluori
FBR	Fast Breeder Reactor, nopea hyötöreaktori
FLiBe	fluori-litium-beryllium -suola
GIF	Generation IV International Forum, kansainvälinen 4. sukupolven foorumi
HTGR	High-Temperature Gas-Cooled Reactor, korkean lämpötilan kaasujäähdytteinen reaktori
HWR	Heavy Water Reactor, raskasvesireaktori
IAEA	International Atomic Energy Agency, kansainvälinen atomienergiajärjestö
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor, kansainvälinen fuusiovoimahanke
ITMSF	International Thorium Molten Salt Forum
LCOE	Levelized Cost Of Energy, energian tuotantokustannusten laskentamenetelmä
Li	litium
LWR	Light Water Reactor, kevytvesireaktori
MARS	Minor Actinide Recycling in Molten Salt, sivuaktinidien kierrätys sulasuolassa
MOX	Mixed Oxide Fuel, sekaoksidipolttoaine

MSR	Molten Salt Reactor, sulasuolareaktori
Mtoe	Million tons of oil equivalent, miljoona öljykvivalenttitonnia
MW	megawatti
MWh	megawattitunti
n	neutroni
Na	natrium
NEA	Nuclear Energy Agency, OECD:n ydinenergiajärjestö
Np	neptunium
O	happi
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development, taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö
p+	protoni
Pa	protaktinium
Pu	plutonium
PWR	Pressurized Water Reactor, painevesireaktori
SAMOFAR	Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactor
SSR	Stable Salt Reactor, vakaa suolareaktori
STL	Steenkampskraal Thorium Limited
Th	torium
THOREX	Thorium Uranium Extraction, toriumin ja uraanin uuttamistekniikka
TTS	Thorium Tech Solution Inc.
U	uraani
WNA	World Nuclear Association, maailman ydinenergiajärjestö
$\beta$	beetahiukkanen (elektroni tai positroni)
$\mu\text{g}$	mikrogramma

# 1. JOHDANTO

Elämme tällä hetkellä energiamurroksen aikaa. Globaali väestönkasvu sekä elintason nousu kehittyvissä maissa edellyttävät energianjalostukselta jatkuvaa kehitystä niin tuotantomuotojen kuin tuotantokapasiteetinkin osalta (Olawuyi 2020). Lisäksi ihmiskunnan kamppailu ilmastonmuutosta vastaan antaa erityisesti energiasektorille paineita siirtyä vähäpäästöisiin tuotantomuotoihin kasvamassa määrin ja mahdollisimman nopeasti. Kasvihuonepäästöjen näkökulmasta energiantuotanto on suurin yksittäinen sektori ilmastonmuutoksen ruokkijana. (Rahman & Miah 2017) Energiantuotannosta puhuttaessa myös turvallisuuskäsitteet ovat nousseet viime vuosien aikana esille, erityisesti onnettomuuksien yhteydessä. Poliittiset päätökset ovat toisinaan nopeinkin liikkeen ohjanneet mittaviin muutoksiin tuotantorakenteen uudistamisessa. Valtakunnallinen ydinvoiman alasajo Saksassa, sekä turpeenkäytöstä luopuminen nopealla aikavälillä Suomessa ovat konkreettisia esimerkkejä. (Murray 2019; Soimakallio et al. 2020)

Edellä mainittuihin seikkoihin perustuen voidaan todeta, että maailmalla tarvitaan energiantuotantoa:

1. joka ei aiheuttaisi merkittävästi kasvihuonepäästöjä tuotettua megawattituntia (MWh) kohden
2. jonka käyttäminen olisi turvallista yhteiskunnan sekä ympäristön kannalta
3. joka voisi tuottaa energiajalosteita suuressa mittakaavassa vastaten alati kasvavaan kysyntään
4. jonka luonnonvarat ovat riittoisat ja vakaasti saatavilla.

Uusia energiantuotantomuotoja tutkitaan ja kehitetään jatkuvasti, ja tämä työ syvenyy käsittelemään niistä toriumin fissiökäyttöön perustuvaa ydinvoimaa. Tarkoituksena on selvittää, tarjoaisiko tämä teknologia teknisiä edellytyksiä täyttää kaikki yllä mainitut neljä kriteeriä tulevaisuuden energianlähteenä. Tätä kautta on tarkoitus saada selville, olisiko toriumvoima kannattava energianlähde lähitulevaisuudessa. Asiaa tarkastellaan myös vertailevasta näkökulmasta nykyisen uraaniin pohjautuvan ydinteknologian kanssa. Lisäksi työssä pyritään saamaan selville, miten tutkimus- ja kehitystyö ovat tähän mennessä edenneet, ja miten ne tulevaisuudessa tulevat etenemään toriumvoiman suhteen.

Luvussa 2 tutkitaan toriumia ydinenergian polttoaineena alkuainetarkastelun näkökulmasta käsin. Tarkastelussa käydään läpi keskeiset aihealueet, kuten eri tuotantovaiheet,

fissioreaktioon soveltuvuus sekä ydinturvallisuus. Luku 3 perehtyy käsittelemään erilaisia toriumin ydinteknologian hyödyntämiseen kykenevien voimalaitosten reaktorityyppejä. Luku 4 tekee katsauksen tutkimus- ja kehitystyön etenemiseen maailmalla. Asiaa selvitetään sekä historiaan, nykyhetkeen, että tulevaisuuden näkymiin perehtymällä. Luvussa 5 käsitellään kootusti tämän kirjallisuuskatsauksen tulosten pohjalta saatavat johtopäätökset.

## 2. TORIUM ALKUAINENA

Tämä luku keskittyy kuvaamaan toriumin ominaisuuksia niin geologisesta, kemiallisesta kuin fysikaalisestakin näkökulmasta. Luvussa tulee esille toriumiin liittyvät mahdollisuudet, hyödyt sekä haasteet alkuainetarkastelun näkökulmasta käsin.

### 2.1 Maaperän varannot

Torium on aktinidiryhmään kuuluva raskasmetalli järjestysluvultaan 90 ( ${}_{90}\text{Th}$ ). Alkuaineen löysi ja eristi ensimmäisenä ruotsalainen kemisti Jöns Jacob Berzelius vuonna 1828 (Gad Consulting Services 2014). Maaperässä toriumia esiintyy 3–4-kertaisesti uraaniin verrattuna (Shucheng et al. 2005; Humphrey & Khandaker 2018). Kun otetaan huomioon, että ydinvoimaloissa hyödynnetään nykyisin pääasiassa uraanin isotooppia U-235, jota on vain 0,7 % luonnonuraanista, suhdeluku alkuaineiden resurssimäärien välillä on siten vielä huomattavasti suurempi. Toriumia esiintyy luonnossa lähes 100-prosenttisesti vain yhtenä isotooppina: Th-232 (IAEA 2005). Toriumin pitoisuus maaperässä vaihtelee noin 5–20  $\mu\text{g/g}$  välillä. Merivedessä sitä on puolestaan vain noin  $6 \cdot 10^{-4}$   $\mu\text{g/l}$ , toisin kuin uraania, jota löytyy jopa 3,3  $\mu\text{g/l}$ . (Nagy 2009: 155)

Taloudellisesti hyödynnettävissä olevien toriumvarantojen on laskettu olevan maailmalla useita miljoonia tonneja (Shucheng et al. 2005). Taulukko 1 selventää resurssien jakautumista eri valtioiden välillä. Siitä nähdään, että Intialla on hallussaan enemmän toriumvarantoja kuin millään muulla valtiolla. Tämä yhdistettynä maan pieniin uraanivarantoihin selittää osaltaan sitä, että Intia on maailman johtavia valtioita toriumvoimaloiden tutkimuksessa ja kehittämisessä (Vijayan et al. 2017; Humphrey & Khandaker 2018). On kuitenkin otettava huomioon, että kaupallinen kysyntä toriumille on ollut toistaiseksi alhaista. Tämän takia projektit toriumvarantojen suuruuden selvittämiseksi eivät ole saaneet suurta rahoitusta. Siten arvioiden tarkkuuksissa on vielä epävarmuutta. (Humphrey & Khandaker 2018)



**Taulukko 1** Arvioitu maailman toriumresurssien jakautuminen yksikössä toriumtonnia per valtio (World Nuclear Association 2020), muokattu lähteestä (OECD NEA & IAEA 2016).

Valtio	Toriumtonnia
Intia	846 000
Brasilia	632 000
Australia	595 000
USA	595 000
Egypti	380 000
Turkki	374 000
Venezuela	300 000
Kanada	172 000
Venäjä	155 000
Etelä-Afrikka	148 000
Kiina	100 000
Norja	87 000
Grönlanti	86 000
Suomi	60 000
Ruotsi	50 000
Kazakstan	50 000
Muut valtiot	1 725 000
<b>Maailma yht.</b>	<b>6 355 000</b>

Varantojen riittävyttä kuitenkin havainnollistaa se, että esimerkiksi yhdysvaltalainen organisaatio Thorium Energy Alliance ilmoitti vuonna 2012 Yhdysvaltojen toriumvarantojen riittävän kattamaan maan kaiken energiankulutuksen nykytasolla yli 1000 vuodeksi (Freigh & Goswami 2012). Kyseisenä vuonna Yhdysvaltojen nettoenergiankulutus oli miljoonissa öljykvivalenttonneissa ilmaistuna 2152 Mtoe (Million Tonnes of Oil Equivalent) (Global Energy Statistical Yearbook 2020). Vuonna 2019, eli aikana juuri ennen koronapandemian puhkeamista, Suomen nettoenergiankulutus oli 32,5 Mtoe (Motiva 2020). Kun otetaan taulukosta 1 huomioon, että Suomen toriumvarannot ovat reilu 10 % Yhdysvaltojen vastaavaan arvoon verrattuna, saataisiin vuoden 2019 energiankulutustasolla Suomen toriumvarannoilla katettua siten maamme energiankulutus omavaraisesti yli 6500 vuoden ajaksi. Tämä antaa konkreettista osviittaa siitä, kuinka energiarikkaasta alkuaineesta puhutaan.

Kriittisimmän arvion mukaan maailman uraanivarantojen on puolestaan laskettu kestävän varmasti vain vuoteen 2050 asti, jos ydinvoiman lisäys otetaan keskeiseksi tekijäksi mukaan hiilineutraaliin sähköntuotantoon siirryttäessä (Gabriel et al. 2013). Jos näin laajamittaista ydinvoiman tuotannon lisäystä ei tehdä, uraanivarantojen pitäisi riittää vielä ainakin 2100-luvun alkuvuosille saakka. (Macfarlane & Miller 2007; Gabriel et al. 2013).

## 2.2 Louhinta

Toriumia esiintyy maaperässä useissa eri kiviaineksissa, kuten toriitissa, torianiitissa, uranotoriitissa sekä monatsiitissa. Suurimmat tunnetut toriumvarannot keskittyvät monatsiittiin, ja eri teollisuuden aloihin liittyvää toriumin keruuta tehdään nykyään pääasiassa louhimalla kyseistä mineraalia. Monatsiittia louhitaan tällä hetkellä paljolti sen sisältämien harvinaisten maametallien vuoksi. (IAEA 2005) Toriumia saadaan kerättyä talteen kyseisten metallien louhinnan sivutuotteena, ja tämän on arveltu olevan toistaiseksi toimivin tapa toriumin keruulle maaperästä (OECD NEA & IAEA 2016). Ydinenergian tuotannossa keskeinen hyödynnettävä muoto toriumista on toriumdioksidi  $\text{ThO}_2$ , jota saadaan eristetyksi monatsiitista. Kyseistä metallien erotteluprosessia on tehty 1950-luvulta lähtien eri puolilla maailmaa, kuten Brasiliassa, Intiassa, Yhdysvalloissa, Etelä-Afrikassa ja Australiassa. (IAEA 2005; OECD NEA & IAEA 2016) Maailman ydinjärjestö WNA:n (World Nuclear Association) tuoreimman arvion mukaan monatsiittivarannot maailmalla olisivat noin 16 miljoonaa tonnia, joista 12 miljoonaa tonnia sijaitisi Intian itäisellä rannikolla (World Nuclear Association 2020).

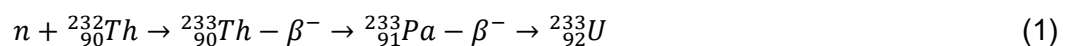
Kun verrataan uraanin kaivamista sille ominaisista malmeista, toriumin kaivuu monatsiitista osoittautuu prosessina monilta osin helpommaksi. Kaivuutavat ovat keskenään toisistaan poikkeavat jo siinä, että uraania kaivetaan umpilouhoksista maan alta. Monatsiittia pystytään puolestaan kaivamaan suoraan maan pinnalta avolouhosten muodossa, jolloin esimerkiksi radonin vapautumiseen liittyvää merkittävää vaaratekijää ei ole, ja siltä suojaavaa ilmastointijärjestelmää kaivokselle ei tarvita. Yleisesti ottaen monatsiitin kaivuusta syntyvää radioaktiivista jätettä syntyy noin kaksi magnitudia eli suuruusluokkaa vähemmän kuin uraanimalmin kaivuusta. Myös ympäristön kuormittuvuus jää selkeästi pienemmälle tasolle. Toriumperäisten kaasujen sisään hengittäminen on kuitenkin merkittävä terveysriski toriumia kaivettaessa, ja sitä vastaan on syytä suojautua. (IAEA 2005)

## 2.3 Torium ydinenergian lähteenä

Kun tarkastellaan toriumin ominaisuuksia atomitasolla, eräs merkittävä seikka nousee heti esille. Tämä on alkuaineesta hyödynnettävissä oleva energiasisältö fissioreaktion avulla. Nobel-palkittu fyysikko Carlo Rubbia on tuonut esille, että vain yksi tonni luonnon toriumia riittää tuottamaan vastaavan määrän sähköä kuin U-235 rikaste 200 tonnista luonnonuraania. Vertailukohtana mainittakoon, että vastaavaa tuotantomäärää varten tarvittaisiin noin 3 miljoonaa tonnia kivihiiltä. (Rubbia 2016) Tämän tasoinen energiatiheys luonnon toriumilla yhdistettynä sen runsaaseen esiintymiseen maaperässä selittää sitä, miksi resurssien riittävyyttä voidaan laskea jopa tuhansissa vuosissa.

Toriumdioksidilla  $\text{ThO}_2$  on yksi kaikkien oksidien korkeimmista sulamislämpötiloista: 3300 °C. Tämä on selvästi korkeampi kuin uranidioksidilla  $\text{UO}_2$ : 2700–2800 °C. Kyseinen ominaisuus parantaa toiminnan stabiiliutta toriumreaktoreissa, mutta myös vaatii huomattavasti korkeampaa sintrauslämpötilaa:  $\text{ThO}_2$ :lla yli 2000 °C dioksidin tuottamiseksi. (IAEA 2005; Humphrey & Khandaker 2018; World Nuclear Association 2020) Toriumdioksidi on hyvin inertti aines, eikä voi hapettua tästä pidemmälle, toisin kuin uranidioksidi, joka hapettuu helposti yhdisteiksi  $\text{U}_3\text{O}_8$  ja  $\text{UO}_3$ . Siten toriumdioksidiin pohjautuvaa polttoainetta on yksinkertaisempaa varastoida pitkiä aikoja ilman pelkoa hapettumisesta ja polttoaineen pilaantumisesta. Toriumdioksidi omaa näistä kahdesta oksidista myös korkeamman lämmönjohtavuuden, pienemmän lämpölaajenemiskertoimen, ja sen käytöstä vapautuu vähemmän fissiokaasuja. Siten toriumdioksidipohjaisella polttoaineella oletetaan olevan myös parempi suorituskyky ydinreaktorissa. (IAEA 2005; World Nuclear Association 2020) Toriumpolttoaine ei myöskään vaadi ollenkaan kallista rikastusprosessia sen valmistusvaiheessa johtuen vain yhden isotoopin esiintymisestä luonnonvaraisena. (Zheng et al. 2018)

Eräs perustavanlaatuinen ero toriumin ja uraanin välillä on se, että toriumilla ei ole fissiilejä isotooppeja (IAEA 2005; Humphrey & Khandaker 2018). Fissiilin aineen ydin halkeaa kahtia neutronipommituksen osuessa siihen, ja tällöin vapautuu energiaa. Uraani on ainoa alkuaine, jolla ilmenee fissiiliä isotooppia luonnossa: U-235. Torium on alkuaineena puolestaan fertiili. Tämä tarkoittaa sitä, että neutronipommituksen osuessa toriumatomiin tämä fertiloituu eli muuntautuu fissiiliksi, luonnossa esiintymättömäksi uraanin U-233 isotoopiksi. Muuntautuminen tapahtuu kokonaisuudessaan kahden välivaiheen ja kahden elektronin vapauttavan beetahajoamisen kautta noin 27 vuorokauden puoliintumisaikassa. (Schaffer 2013; Sorensen 2016) Kyseinen reaktio etenee seuraavasti (Schaffer 2013):



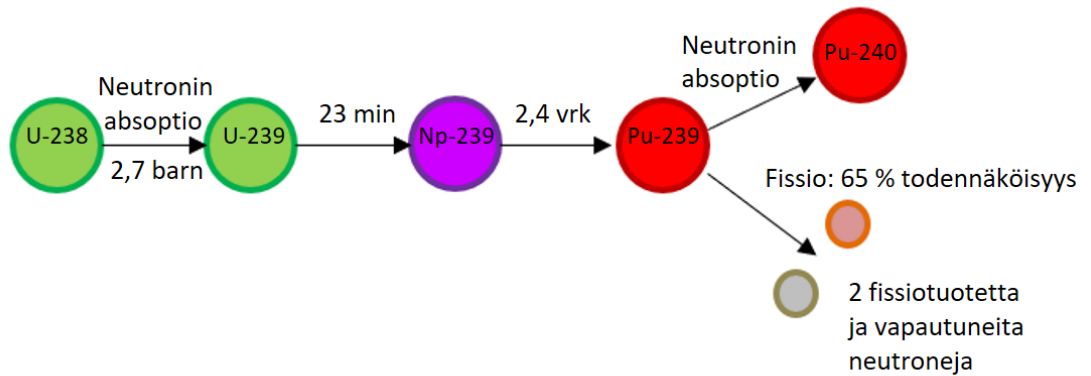
Toriumin isotooppia Th-232 pidetään parempana fertiilinä ydinmateriaalina kuin nykyisin käytettävää U-238:aa, josta yli 99 % luonnonuraanista koostuu (OECD NEA & IAEA 2016). Th-232:lla on lähes kolminkertainen termisen neutronin absorptio poikkileikkauksen pinta-ala (7,4 barnia) kuin U-238:lla (2,7 barnia). Tämä tarkoittaa sitä, että Th-232 muuntautuu lähes kolminkertaisella todennäköisyydellä fissiiliksi U-233:ksi, kuin U-238 muuntautuu fissiiliksi plutoniumiksi Pu-239, neutronin osuessa fertiiliin hiukkaseen. U-233 lisäksi vapauttaa keskimäärin yli kaksi neutronia fissioituessaan neutronin vaikutuksesta. Tämä on huomattavasti enemmän kuin fissiileillä U-235 ja Pu-239 isotoopeilla. (IAEA 2005) Ydinteknologian asiantuntija Kirk Sorensen kutsuukin isotooppia U-233 ”ydinkatalyytiksi”, joka mahdollistaa neutronipommitusten ketjureaktion avulla jopa kaiken Th-232 muuntautumisen U-233:ksi oikein suunnitellussa ydinreaktorissa. Reaktorin olisi siten pohjimmiltaan mahdollista vapauttaa jopa kaikki toriumista saatava energia hyödynnettäväksi. Tätä pidetään yhtenä toriumreaktorin merkittävänä etuna. (Sorensen 2016)

## 2.4 Fissioreaktion eteneminen

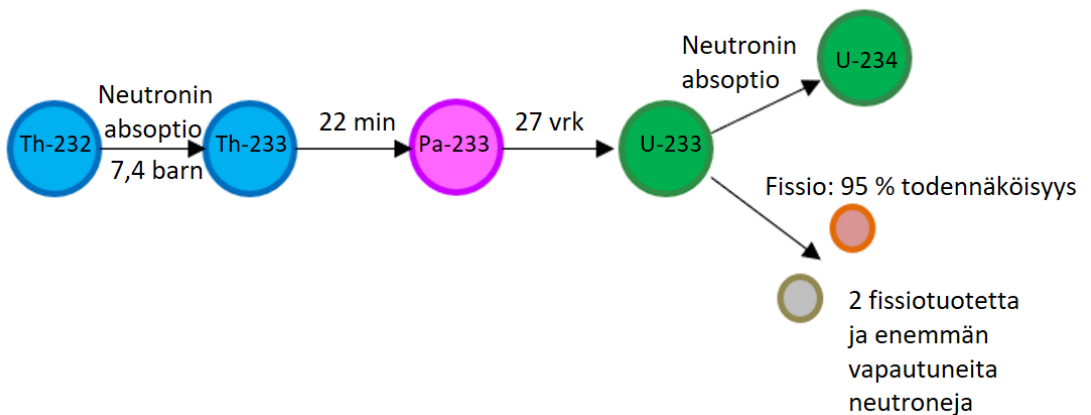
Nykyään käytettävä U-235:n ydinpolttoaine on vahvasti rikastettua verrattuna luonnonuraanipitoisuuteen 0,7 %. Tästä huolimatta polttoaine sisältää rikastuksen määrästä riippuen noin 20–30-kertaisen määrän fertiiliä U-238:a fissiiliin U-235:en nähden. Siten U-235:n fissioituessa U-238 absorboi suurimman osan fission synnyttämistä neutroneista. U-238 fertiloituu tällöin kuvan 1 mukaisesti Pu-239:ksi, joka on fissiili ja kykenee siten teoriassa fissioitumaan reaktorissa energiaa vapauttaen. Plutoniumissa on kuitenkin ongelmana, että se fissioituu vain noin 65 % todennäköisyydellä reaktoriaineksen hidastaman neutronin osuessa siihen. Siten noin kolmannes U-238:n synnyttämästä plutoniumista jää pysyvästi vaaralliseksi ydinjätteeksi, joka täytyy poistaa reaktorista aika ajoin ajamalla alas koko voimalaitos. (Sorensen 2016)

Kuten kuva 1 havainnollistaa, toriumin reaktiotuotteena syntyvä U-233 fissioituu puolestaan noin 95 % todennäköisyydellä. Tämä mahdollistaa U-233:n toimimisen ”ydinkatalyyttina”, jolloin fissioreaktio toistaa kehämäisesti itseään tuottaen toriumista yhtä paljon uutta U-233:a kuin mitä reaktio kuluttaa. Kun siis reaktio on saatu käynnistettyä kriittiselle tasolle, se ei vaadi enää muuta polttoaine- tai hiukkassyöttöä toriumin lisäksi. Toriumin tehokas polttoainekierto perustuukin verrattain suureen neutroniabsorption poikkileikkauksen alaan, loistavaan fissiilin aineen fissioitumistodennäköisyyteen sekä fissioreaktiosta keskimäärin vapautuvaan hyvään neutronilukumäärään. (IAEA 2005; Sorensen 2016)

## Fertiilin uraanin fissioituminen:

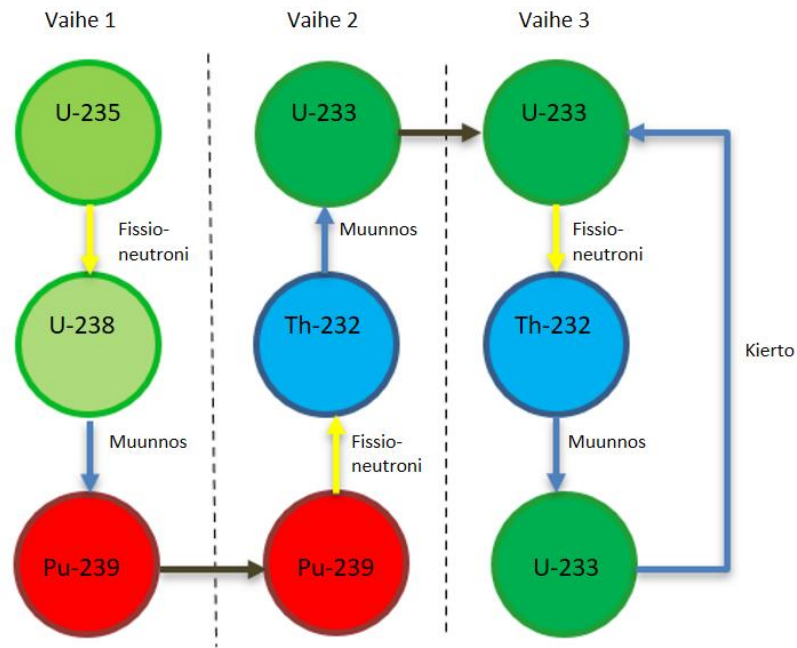


## Fertiilin toriumin fissioituminen:



**Kuva 1** Torium mahdollistaa fissioreaktioiden paremman jatkuvuuden, muokattu lähteestä (Sorensen 2016).

Olisi myös mahdollista hyödyntää nykyisin käytettävän uraanin ja siitä syntyvän plutoniumin, sekä toriumin ja siitä syntyvän uraanin yhteiskäyttöön pohjautuvaa kolmivaiheista ydinreaktioiden sarjaa. Näin U-238:sta syntyvää plutoniumia saataisiin hyödynnettyä ja sen määrää vähennettyä käyttämällä sitä Th-232-U-233-reaktion alkuunpanijana. Kuva 2 havainnollistaa, kuinka nämä 3 vaihetta etenevät. Ensimmäisessä vaiheessa, johon nykyinen ydinvoima perustuu, U-235 fissioituu reaktorissa ja aktivoi U-238:n synnyttäen sivutuotteena Pu-239:ää. Toista vaihetta varten plutonium kerätään talteen ja siirretään eri reaktoriin. Sen jälkeen toisessa vaiheessa plutoniumin osittaisesta fissioitumisesta syntyvät neutronit aktivoivat toriumin, joka muuntautuu U-233:ksi. Kolmannessa vaiheessa U-233:n fissio käynnistää kestävän ja polttoainetehokkaan Th-232-U-233-polttoainekierron. (Sorensen 2016)



**Kuva 2** Kolmivaiheisen toriumreaktorin reaktiosarja, muokattu lähteestä (Sorensen 2016).

Nykyisin kaupallisessa käytössä oleva ydintekniikka perustuu pelkästään kuvan 2 esittämän ensimmäisen vaiheen hyödyntämiseen. Idea tähän niin kutsuttuun kolmivaiheiseen ydinreaktioon syntyi kuitenkin jo 1940-luvulla Yhdysvalloissa, ja sitä on testattu onnistuneesti usean vuoden ajan koereaktoreissa. (Sorensen 2016; Humphrey & Khandaker 2018) Tämä kolmivaiheinen reaktorimalli tuo esille erään toriumin käyttöön liittyvän haasteen: sitä ei aina voida suoraan siirtää uraanin tilalle, vaan toriumin fertiloimiseksi ja reaktion alkuun saamiseksi tarvitaan radioaktiivisesta fissiilistä aineesta lähtevä tai muulla tavalla tuotettu neutronipommitus. Tätä pidetään toriumin yhtenä keskeisimmistä haittapuolista. (Humphrey & Khandaker 2018)

Haasteellista toriumin ydinvoimakäytössä on myös kaavassa (1) fertiloitusreaktion viimeinen vaihe, jossa välituotteena syntynyt protaktinium Pa-233 muuntautuu U-233:ksi. Tämä vaihe kuluttaa lähes koko osuuden 27 vuorokauden reaktioajasta. Aika on hyvin pitkä verrattuna uraanin polttoainesyklin vastaavaan vaiheeseen, jossa U-238:n fertiloitusreaktiossa neptunium Np-239 muuntautuu vain 2,4 vuorokaudessa Pu-239:ksi kuvan 1 mukaisesti. Protaktiniumin pitkän muuntautumisaikojen seurauksena polttoaine vaatisi kolmivaiheisen reaktiosarjan vaiheeseen 2 ainakin 12 kuukauden odotusajan ennen uudelleenkäsittelyä, jotta polttoaineen kaikki reaktioetajat olisivat varmasti edenneet loppuun ja fissiilin U-233 materiaalin menettämiseltä välttyttäisiin. (IAEA 2005)

## 2.5 Alkuainetason ydinturvallisuus

Eräs ydinenergian käyttöön liittyvä yleinen huolenaihe on siitä syntyvä vaarallinen ja radioaktiivinen jäte. Nykyisissä uraanireaktoreissa ydinjäte koostuu pääasiassa plutoniumista sekä muista sivutuotteina syntyvistä aktinideista. (IAEA 2005) Radioaktiivinen plutonium Pu-239 pysyy säteilytasoltaan vaarallisena 24 100 vuoden ajan, ja toiseksi merkittävin ydinjätteen aktinidi neptunium Np-237 noin 2 000 000 vuotta (Ewing 2007). Toriumperäisen ydinjätteen säteily määrä puolestaan pystyttäisiin laskemaan vastaavalle tasolle normaalin kivihillen palamistuhkan kanssa. Kansainvälisen atomienergiajärjestö IAEA:n (International Atomic Energy Agency) mukaan toriumin käytöstä syntyvät aktinidit pystytään kierrättämään täysin. Loput matalamman atomipainon omaavat jätteet hajoavat radioaktiivisuudeltaan huomaamattomalle tasolle jo muutamassa vuosisadassa. (Schaffer 2013) Tämän ohella IAEA:n arvion mukaan toriumdioksidin stabiilius saattaa jarruttaa aktinidien ei-toivottua vaeltamista säilössä ollessaan (IAEA 2005).

Transuraanisten alkuaineiden syntymissuhde on fertiilillä Th-232:lla merkittävästi pienempi kuin fertiilillä U-238:lla. Toriumin tapauksessa tarvitaan 4 peräkkäin toteutunutta reaktiovaihetta transuraanisen jäteaineen syntymiseen, kun taas uraanin tapauksessa jo 1 reaktiovaihe riittää. Lisäksi jo fissioreaktiomekanismien eroavaisuudesta johtuen toriumiin pohjautuva polttoainesykli synnyttää lähtökohtaisesti vähemmän aktinideja kuin uraaniin tai plutoniumiin pohjautuva polttoainesykli. Siten sekä syntyvän jätteen määrässä, että sen radioaktiivisessa eliniässä on merkittävästi eroa toriumin ja uraanin käytön välillä. Toriumin stabiiliudesta johtuen sitä sisältävien komponenttien kemiallinen erottaminen käytetystä polttoaineesta on kuitenkin haastavampaa perinteiseen uraani-voimalaan verrattuna. (Humphrey & Khandaker 2018)

Ydinjätteen ohella erityisesti ydinräjähdysten vaara on ollut aihe, joka on saanut paljon mediahuomiota muun muassa Fukushiman ydinonnettomuuden seurauksena. Tämä on herättänyt maailmalla tarvetta saada entistä ydinturvallisempaa energiantuotantoa nykyisten uraanivoimaloiden tilalle. Tietyillä toriumin käyttöön pohjautuvilla, erityisesti 4. sukupolven reaktorityypeillä voidaan minimoida ydinonnettomuuksien riski lähes totaalisesti. (Humphrey & Khandaker 2018) Luku 3 käsittelee toriumvoimaloiden ydinräjähdysten vaaraa ja reaktoriytimien sulamista tarkemmin eri reaktorityyppien näkökulmasta käsin.

Kolmas tärkeä ydinturvallisuuteen liittyvä tekijä on mahdollisuus kaupallisen ydinteknologian yhdistämiseen ydinaseiden valmistuksen kanssa (IAEA 2005). Th-232-U-233-polttoainekierto kontaminoituu tyypillisesti luonnossa esiintymättömällä U-232:lla. Tästä uraanin isotoopista ei ole ongelmaa vielä reaktorissa, sillä myös se fissioituu. Kuitenkin,

jos U-233:a alettaisiin kerätä ydinaseiden valmistusta varten, U-232:sta emittoituva korkeaenerginen gammasäteily vahingoittaisi käytettävää elektroniikkaa. Toriumista saatava U-233 on siten hyvin resistentti polttoaine ydinaseiden kehittämisyrittäjiä vastaan. Resistivisyys ei ole täysin absoluuttista, mutta ydinaseiden jalostaminen tästä on merkittävästi haastavampaa kuin U-235:stä tai Pu-239:stä. Tämän ohella lisäämällä U-238-isotooppia toriumin sekaan U-233 voidaan saada denaturoitua vaarattomaksi. Denaturointi olisi mahdollista erityisesti toriumia hyödyntävissä sulasuolareaktoreissa. (Schaffer 2013)



## 3. MAHDOLLISET REAKTORITYYPIT

Fertiiliä toriumia tai toriumdioksidia on mahdollista käyttää fissiilin reaktion alulle panijan kanssa tai ilman, reaktorityypin ja konfiguraation mukaan. Toriumiin pohjautuva ydinpolttoaine on osoittanut paljon potentiaalia käyttömahdollisuuksistaan sekä hyvästä suorituskyvystään monissa eri ydinreaktorityypeissä. Tämä luku keskittyy käsittelemään näitä reaktorityyppejä tarkemmin. Tutkimusten perusteella toriumia voisi käyttää tavanomaisissa ydinvoimaloissa uraanin rinnalla hyvin pienin modifikaatioin. Lisäksi myös erityisesti toriumin käyttöön pohjautuvia 4. sukupolven reaktorityyppejä on suunniteltu ja rakennettu. (Humphrey & Khandaker 2018)

### 3.1 Kevytvesireaktori

Tässä reaktorityypissä (LWR, Light Water Reactor) jäähdytysaineena toimii normaali puhdistusprosessin läpi käynyt vesi. Kevytvesireaktori on maailmalla ylivoimaisesti käytetyin ydinvoimalan reaktorityyppi: noin 82 % kaikista kaupallisista ydinreaktoreista (Supko 2016). Suurin osa kevytvesireaktoreista on malliltaan painevesireaktoreita (PWR, Pressurized Water Reactor), joissa jäähdytysvesi on paineistettu noin 150 atm paineeseen, ettei vesi kiehu vielä 325 celsiusasteen käyttölämpötilassa. Kiehutusvesireaktorissa (BWR, Boiling Water Reactor) jäähdytysveden painetaso 75 atm on puolestaan alhaisempi mahdollistaen sen höyrystymisen reaktorissa 285 celsiusasteessa. Tämä lämpöä kerännyt höyry voidaan johtaa suoraan turbiiniin ilman painevesireaktorille tyypillistä erillistä höyrykiertoa. (Breeze 2019)

Tutkimukset ovat osoittaneet, että toriumin polttoainesykli pystyisi korvaamaan nykyisen uraanin polttoainesyklin kokonaan ilman merkittäviä teknisiä uudelleenasetuksia kevytvesireaktorin laitteistoissa. Tätä on testattu muun muassa Yhdysvalloissa Shippingportin kolmivaiheista ydinreaktiosarjaa hyödyntävässä painevesireaktorissa, sekä Indian pointin koereaktorissa Hudson-joen varrella. (Sorensen 2016; Humphrey & Khandaker 2018) Polttoainekustannukset ovat olleet toriumin ja uraanin suhteen samoissa luokissa. Toriumia käyttävän painevesireaktorin on todettu tuottavan vain 12,5–20 % plutoniumia perinteiseen painevesireaktoriin nähden. Tämän ohella syntynyt plutonium sisältää toriumia käyttävässä painevesireaktorissa merkittävän määrän isotooppeja Pl-238, Pl-240 ja Pl-242, jotka tekevät ydinaseisiin tarkoitettun plutoniumin käytön ongelmal-

liseksi. Luvussa 2 esitetyt toriumpolttoaineen korkea polttoaste yhdistettynä U-233:n ylivoimaiseen neutroniseen suorituskykyyn mahdollistavat reaktorin paremman käytettävyyden, päästö määrrien vähennyksen sekä vähäisemmän fissiotuotteiden jälkilämmön ja radioaktiivisuustason. (IAEA 2005)

Painevesireaktorien ohella toriumpolttoaineen käyttöönotto myös kiehutusvesireaktoreissa on todistetusti tapahtunut onnistuneesti. Onnistuneita testiajoja on tehty ainakin Yhdysvalloissa sekä Saksassa. Saksan 60 MW:n koereaktori todisti reaktorityypin kyvyn joustavuuteen polttoaineen optimoinnin suhteen. (Humphrey & Khandaker 2018) Yhdysvalloissa osana DOE NERI (Department of Energy, Nuclear Energy Research Initiative) -projektia tehdyt Purduen yliopiston tutkimukset toivat esille vastaavanlaisia etuja toriumpolttoaineen suhteen, kuin mitä painevesireaktoreidenkin kanssa on saatu: polttoaineen korkeampi konversioaste, parempi resistiivisyys ydinaseiden kehittämistä vastaan ja pienempi määrä syntyvää pitkäikäistä radioaktiivista jätettä käytettyä polttoainekilogrammaa kohden. Kyseinen tutkimus toi myös esille, että toriumin käyttö mahdollistaa negatiivisemmän tyhjiökertoimen (Void Coefficient of Reactivity) ydinreaktiolle. (IAEA 2005) Negatiivinen tyhjiökerroin on tärkeä osa ydinturvallisuutta ydinreaktion hallittavuuden kannalta. Negatiivinen arvo tässä suureessa tarkoittaa, että jos jäähdytysaine alkaisi muodostamaan reaktorissa kuplia eli niin kutsuttuja tyhjiöitä reaktorin lämpenemisen seurauksena, reaktionopeus hidastuisi luonnostaan. Tshernobylin ydinonnettomuudessa reaktion korkea positiivinen tyhjiökerroin mahdollisti vian sattuesssa reaktionopeuden kiihtymisen hallitsemattomaksi. (Tsuchihashi & Akino 1987) Ylipäätään negatiivisen tyhjiökertoimen saavuttaminen on ollut merkittävänä ongelmana uraania hyödyntävissä korkeamman konversioasteen kiehutusvesireaktoreissa. (IAEA 2005)

### 3.2 Raskasvesireaktori

Raskasvesireaktorissa (HWR, Heavy Water Reactor) jäähdyttävänä väliaineena toimii niin kutsuttu raskas vesi eli dideuteriumoksidi  $D_2O$ . Tässä veden molemmat vetyatomit ovat sen harvinaisempaa isotooppia H-2, jota kutsutaan deuteriumiksi (D). Myös raskasvesireaktoreista suurin osa on malliltaan painevesireaktoreita: noin 11 % kaikista kaupallisista ydinreaktoreista (Supko 2016). Raskaan veden käytön edut normaaliin veteen nähden ovat selvät. Raskaalla vedellä on noin 80-kertainen neutronien absorptiota hillitsevä vaikutus kuin kevyellä vedellä. Tämä aikaansaa huomattavasti paremmat olosuhteet neutroneille fissioreaktion laukaisijana, sillä väliaineen absorboima neutroni tarkoittaa fission epäonnistumista. (IAEA 2005; Sorensen 2016) Tässä reaktorityypissä polttoaineen tankkaus on mahdollista suorittaa suoraan prosessin käydessä ilman laitoksen

alajasjoa (Humphrey & Khandaker 2018). Raskasvesireaktori kykenee lisäksi hyödyntämään polttoaineenaan rikastamatonta luonnonuraa, joka sisältää yli 99 % fertiiliä isotooppia U-238 (Alameri & Alkaabi 2020). Raskaan veden käyttö lisää kuitenkin merkittävästi laitoksen pääomakustannuksia, sillä deuteriumin keruu merivedestä on prosessina hyvin kallis: noin 1000 \$/kg (Bolonkin & Newman 2016). Tämä on raskasvesireaktorin käyttöön liittyvä hinta, joka on maksettava halvemman polttoaineen käyttömahdollisuudesta.

Tutkimusten perusteella uraanilla ja toriumilla on molemmilla samankaltaiset ominaisuudet raskasvesireaktorin polttoaineena (Humphrey & Khandaker 2018). Siten fertiiliin U-238:n korvaaminen fertiilillä toriumilla ei muuta merkittävästi polttoaineen käytettävyyttä reaktorissa. Jotta uraanin korvaaminen tapahtuisi mahdollisimman yksinkertaisesti, polttoainesauvojen tulisi olla esisekoitettuja alkuaineiden suhteen siten, että jokainen sauva sisältäisi sekä reaktioketjun aktivoivaa (mahdollisesti hieman rikastettua) uraania, että fertiiliä toriumia toriumdioksidin muodossa. Sellaistakin konfiguraatiota on tutkittu, missä uraani ja torium olisivat omissa erillisissä polttoainesauvoissaan. Tällöin oikeanlaisella toriumin käyttöasteella ja pitoajalla reaktoriytimessä reaktion hyötysuhde olisi mahdollista saada korkeammaksi kuin toriumin sekoittamisella tai sen käytön täydellä sivuuttamisella. Kyseisen konfiguraation toteutus on kuitenkin teknisesti haastavaa polttoainehallinnan näkökulmasta, sillä polttoainesauvat eroaisivat toisistaan reaktiivisuuden ja energian tuottavuuden suhteen. Kertaalleen käytettyä toriumdioksidia olisi myös mahdollista kierrättää raskasvesireaktorissa uudelleenkäytettäväksi ilman minkäänlaista prosessointia kierrätyksen välissä. Jo yhden uudelleenkäyttökierroksen seurauksena tarvittava uraanimäärä tippuisi noin 35 % luonnonuraa käytettäessä, ja reilu 10 % hieman rikastettua uraania käytettäessä. (IAEA 2005)

Keskeinen etu toriumin käyttöön otolla on se, että mitä enemmän U-235 isotooppia kuluu, sitä enemmän ominaisuuksiltaan laadukkaampaa U-233 isotooppia syntyy. Siten tarvittava uraanin rikastustaso voi olla toriumia käytettäessä alhaisempi pyrittäessä samantasoiseen energiantuotantoon kuin pelkällä uraanin käytöllä. Lisäksi raskasvesireaktoreiden nykyisessä käytössä on ongelmana plutoniumin suuri syntyvyys ydinjäteaineena johtuen luonnonuraanin käytöstä. Jäteongelman lisäksi luonnonuraa hyödyntävä energiantuotantotapa mahdollistaa paremmat edellytykset ydinaseiden valmistukselle kevytvesireaktoriin verrattuna. Rauhanomaisen energiantuotannon näkökulmasta toriumia sisältävä polttoainekierto olisi siten vaihtoehtona houkuttelevampi. (IAEA 2005)

Intiassa on kehitteillä uusi niin kutsuttu kehittynyt raskasvesireaktori, joka käyttää kevyttä vettä reaktorin jäähdätykseen ja raskasta vettä hidastimena eli reaktorin väliaineena. Re-

aktorin suunnittelussa on kaksi päätavoitetta. Ensimmäinen on toriumresurssien hyödyntäminen polttoaineena. Toinen on vastaus tulevaisuuden vaatimuksille ydinvoiman suhteen, kuten edistyneempi ydinturvallisuus ja luotettavuus, parempi taloudellinen kannattavuus sekä kehittynyt resistiivisyys ydinaseiden leviämistä vastaan. Useiden passiivisten ja luontaisten turvallisuusominaisuuksien vuoksi reaktori olisi mahdollista rakentaa asutuskeskusten läheisyyteen. (Van Gosen & Tulsidas 2016) Kehittynyt raskasvesireaktori on sukupolviluokituksestaan III+.

### 3.3 Korkean lämpötilan kaasujäähdytteinen reaktori

Ensimmäinen korkean lämpötilan kaasujäähdytteinen reaktori (HTGR, High-Temperature Gas-Cooled Reactor) käynnistettiin koekäyttöön jo vuonna 1966 Yhdysvalloissa. Reaktori operoi Th-232:n sekä U-235:n oksideilla ja dikarbideilla noin 1000 °C lämpötilassa, ja toimi menestyksekkäästi aluksi 40 MW ja myöhemmin 300 MW teholla aina vuoteen 1989 asti. Jäähdytys reaktorissa toteutettiin heliumilla, ja neutronien hidastus grafiitilla. Tämän lisäksi muita koereaktoreita on käynnistetty ainakin Saksassa, Japanissa, Kiinassa ja Venäjällä. Nämä kaasujäähdytteiset reaktorit ovat osana 4. sukupolven ydinreaktoreiden tutkimusta, joka keskittyy reaktoriturvallisuuden ja kestäväen polttoainekäytön parantamiseen. Korkealämpötilaisilla kaasujäähdytteisillä reaktoreilla on kapasiteettia käyttää sekaoksidipolttoainetta (MOX, Mixed Oxide Fuel), jossa toriumdioksidin on sekoitettuna mukaan uraanidioksidia ja plutoniumdioksidia. Näillä reaktoreilla on merkittävä mukautuvuus erilaisten polttoainekiertojen väliseen vaihtamiseen ilman, että reaktoriytimien rakennetta tarvitsee muuttaa. (IAEA 2005; Humphrey & Khandaker 2018) Tähän reaktorimalliin ei ole vakiintunutta järjestelmää polttoaineen uudelleenprosessointia ja kierrätystä varten. Polttoaine kulkee siten vain kerran reaktorin läpi nykyisten kevytvesireaktorien tapaan. Polttoaineen uudelleenprosessoinnilla tarvittavan U-235:n määrää voitaisiin vähentää reaktorissa jopa puolella. Tästä huolimatta ilman uudelleenprosessointiakin U-235:n tarve on merkittävästi pienempi kuin nykyisissä kevytvesireaktoreissa. (Van Gosen & Tulsidas 2016) Huomionarvoista tälle reaktorityypille on myös se, että toriumdioksidin korkea sulamispiste sekä U-233:n ylivoimaiset neutroniset ominaisuudet korkeissa lämpötiloissa lisäävät toriumiin pohjautuvan polttoainekierron houkuttelevuutta (Humphrey & Khandaker 2018).

### 3.4 Nopea hyötöreaktori

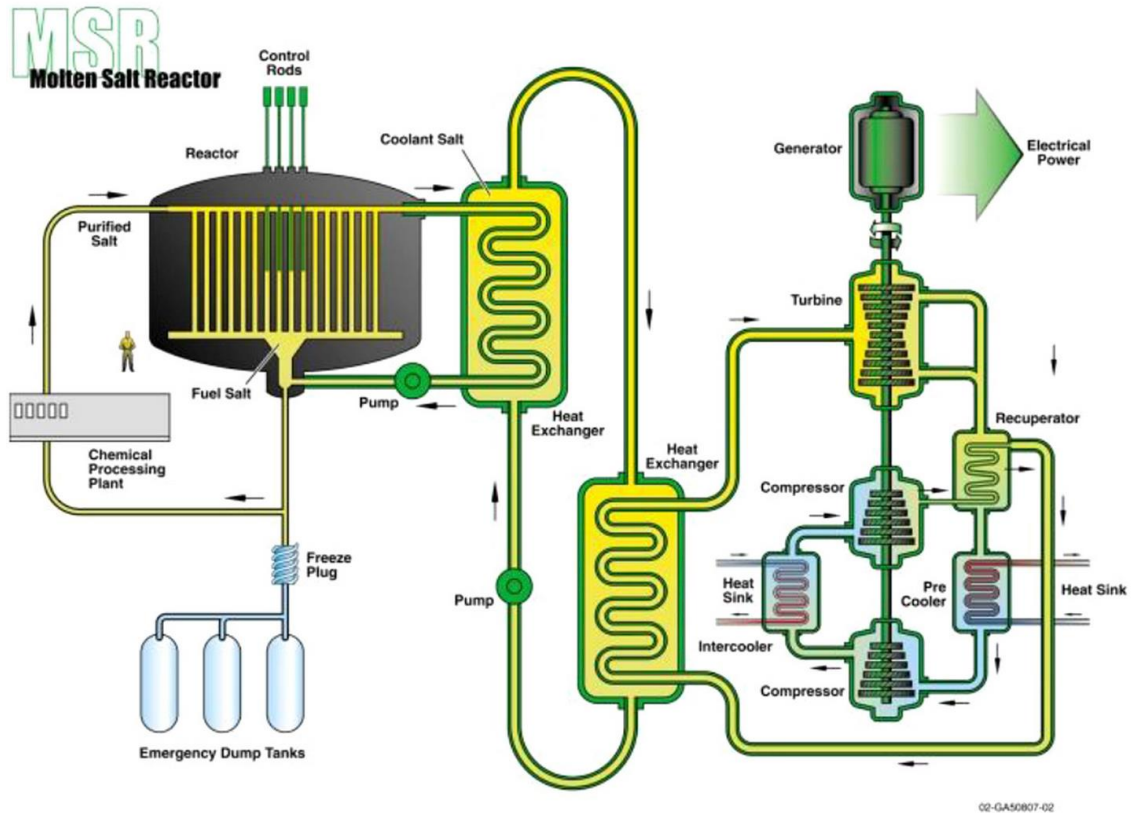
Hyötöreaktorit ovat malliltaan poikkeuksellisia ydinreaktoreita siinä mielessä, että ne tuottavat fissiiliä materiaalia enemmän kuin mitä kuluttavat. Nykyisin käytössä olevat vesireaktorit eivät siten lukeudu hyötöreaktoreiden joukkoon. Hyötöreaktorit ovat malliltaan joko nopeita (FBR, Fast Breeder Reactor) tai termisiä (Thermal Breeder Reactor). Nopean hyötöreaktorin nimi viittaa siihen, että fissiota aikaansaavat neutronit kulkevat nopeasti reaktorin ytimessä ilman hidastavaa väliainetta. Sana "nopea" ei siten viittaa siihen, että fissioreaktion eteneminen tai sähkön tuotanto olisi poikkeuksellisen nopeaa. Nopeiden neutronien korkea energiataso mahdollistaa fertiilin materian poikkeuksellisen tehokkaan muuntautumisen fissiiliksi. (Karam 2006; Sorensen 2016) Termisessä hyötöreaktorissa väliaine sekä jarruttaa neutronin nopeutta merkittävästi, että alentaa sen lämpötilaa, jotta neutronin energiataso olisi otollinen fissiilin materian fissioreaktioita varten (Karam 2006).

Vaikka termisissä voimalaitoksissa fertiilillä toriumilla on parempi neutronin absorptio poikkileikkaus fertiiliin uraaniin U-238 nähden, näin ei ole kuitenkaan nopean reaktorin tapauksessa. Uraanin isotoopilla U-238 on nimittäin jopa 4–5-kertainen nopean neutronin absorptio poikkileikkaus Th-232:een verrattuna. Siten toriumin käytöllä ei saavuteta etua energiatehokkuuden näkökulmasta nopeaa hyötöreaktoria käytettäessä. Uraanin käytön etua vahvistavana tekijänä on lisäksi uraanin rikastusprosessissa sivutuotteena syntyvä köyhdytetty U-238 materia, jota on suuria määriä saatavilla hyödynnettäväksi reaktorissa. Tästä huolimatta toriumin käytöllä voitaisiin parantaa reaktorin ydinturvallisuutta ja ohjattavuutta. Uraanin polttoainekierrossa ongelmana on positiivinen tyhjiökerroin, jota olisi mahdollista lieventää sekoittamalla polttoaineen joukkoon toriumia tai U-233 isotooppia. (Van Gosen & Tulsidas 2016)

### 3.5 Sulasuolareaktori

Maailmalla haluttiin rakentaa kestävä ratkaisu ydinteollisuudessa kertyvään ydinasekäyttöiseen plutoniumiin, pitkäikäisiin aktinideihin ynnä muihin uraaniperäisiin ydinjätteisiin. Oak Ridgen kansallinen laboratorio Yhdysvalloissa kehitti pitkällisen tutkimustyön tuloksena sulasuolareaktorin (MSR, Molten Salt Reactor). Tämän termisen hyötöreaktorin ideana on liuottaa toriumpolttoainetta nestemäisessä muodossa sulasuolaan, joka toimii reaktorissa primäärinä jäähdytysaineena. Ytimen moderaattorina eli hidastimena toimii grafiitti. Sulasuolan eräs keskeinen ominaisuus on sen kyky pysyä nestemäisenä noin 500–1400 °C lämpötilavälillä. (Humphrey & Khandaker 2018) Reaktorin käyttölämpötila liikkuu 450–800 °C välillä (IAEA 2005). Painevesireaktoriin verrattuna jäähdytinnesteen paineistusta ei vaadita (vertaa: 325 °C, 150 atm), ja korkeammat käyttölämpötilat ovat silti mahdollisia. Korkeampi käyttölämpötila mahdollistaa korkeamman termisen hyötysuhteen ja sitä kautta paremman sähkön tai lämmön tuottavuuden. Matalassa paineessa operointi taas ehkäisee räjähdysten ja myrkyllisten jätevuotojen tapahtumisen. Sulasuolareaktori on poikkeuksellinen reaktorityyppi jo siinä mielessä, että se on kehitetty nimenomaan toriumin käyttöön perustuvaksi. Kuvassa 3 havainnollistettu reaktorimallin nestemäinen polttoainekierto mahdollistaa sekä tankkauksen, että fissiotuotteiden poiston laitoksen aktiivisen käytön aikana. (Humphrey & Khandaker 2018; Magwood & Paillere 2018; Mignacca & Locatelli 2020) Tämä reaktorimalli ei tarvitse erillistä väliainetta lämmönsiirtoa varten, sillä polttoainekiertoa tekevä sulasuola toimii itse lämmönsiirtimenä rajapinnoilla (Van Gosen & Tulsidas 2016).

Sulasuolareaktorilla on vahvasti negatiivinen tyhjiökerroin. Tämä ajaa fissioreaktion luonnostaan sammuksiin lämpötilan kasvaessa liian korkeaksi. Polttoaineen oma suoja-mekanismi ehkäisee siten ydinräjähdystilanteeseen ajautumisen jo fysikaalisilla ominaisuuksillaan sekä kemiallisella inerttiydellään. Jos voimalaitoksessa syntyisi kuitenkin hätätilanne, nestemäinen polttoaine pystyttäisiin ajamaan suojasäiliöihin yksinkertaisesti poistamalla polttoainekierron ja suojasäiliöiden välinen tulppa (kuvassa 3: "freeze plug"). (Humphrey & Khandaker 2018) Tämä tulppa on myös rakennettu siten, että se sulaa pois automaattisesti tietyn, ennalta määritetyn lämpötilarajan ylittyessä (Ruzic 2020). Jäähdytysaineena ja polttoaineen kantajana toimiva sulasuola pysyy lisäksi kemiallisesti stabiilina ja inerttinä korkeissakin lämpötiloissa. (Mignacca & Locatelli 2020) Reaktoriytimen sulamisestakaan ei voida puhua, sillä polttoaine on jo valmiiksi sulatetussa olomuodossa. Keskeinen haaste sulasuolareaktorin kehitystyössä liittyy reaktorin materiaalien kestävyysparantamiseen, sillä korroosiota aiheuttava hyvin kuuma radioaktiivinen suola sekä neutronivirtaukset aiheuttavat rakenteisiin erittäin voimakasta rasitusta (Abram & Ion 2008; Muránsky et al. 2019).



**Kuva 3** Sulasuolareaktorin toimintaperiaate (Magwood & Paillere 2018).

Oak Ridgen laboratorio on toistaiseksi ainoa taho maailmassa, mikä on rakennuttanut ajossa olleen sulasuolareaktorin. Tätä koelaitosta ajettiin vuosien 1965–1969 ajan yhteensä 15 kuukautta, ja se osoittautui testinä onnistuneeksi ilman huomattavia vikoja tai ongelmia. Reaktorin operaatiolämpötila oli noin 650 °C. (IAEA 2005; Mignacca & Locatelli 2020) Kyseinen koelaitos todisti, että sekä plutonium, että muut pitkäikäiset aktinidit saadaan palamaan reaktorissa. Voimalaitoksesta syntynyt ydinjäte koostui pääasiassa lyhytikäistä fissiotuotteista, joiden käsittely oli yksinkertaista verrattuna nykyisistä vesireaktoreista syntyviin transuraanisiin ydinjätteisiin. (Humphrey, Khandaker 2018) Oak Ridgen koereaktorin sulasuola oli koostumukseltaan  $\text{LiF} - \text{BeF}_2 - \text{ThF}_4 - \text{UF}_4$  -seosta molaaarisilla osuuksilla 72-16-12-0,4 mol-%. Reaktorilla saavutettiin 1,07 suuruinen hyötösuhde (breeding ratio), mikä oli merkittävää, sillä tämä tarkoitti, että reaktori tuottaa suhteessa enemmän fissiiliä materiaalia kuin mitä se kuluttaa. (Van Gosen & Tulsidas 2016) Toriumin fertiloitumisessa syntyvä protaktinium ei aiheuttanut myöskään ongelmaa, sillä ilman tyypillisesti reaktion aikana tehtävää protaktiniumin poistoakin saavutettava hyötösuhde oli 1,05 (Humphrey & Khandaker 2018).

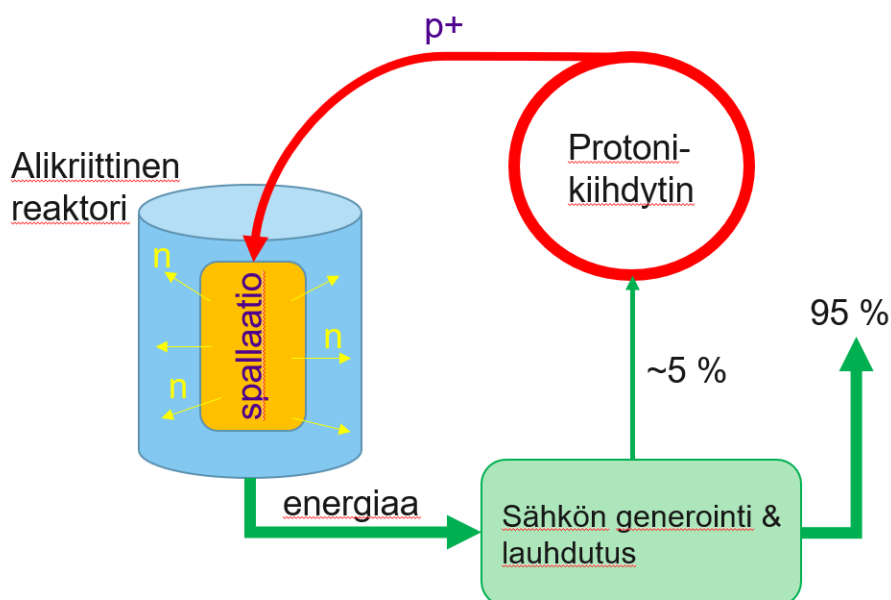
Sulasuolareaktorien taloudellisuutta on tutkittu tähän mennessä hyvin vähän. Aiheesta julkaistiin kuitenkin vuonna 2020 tutkimus, joka tuo esille, että 20-prosenttisesti uraanilla

rikastetun 1000 MW sulasuolareaktorin käyttökustannukset olisivat LCOE-laskentamenetelmällä (Levelized Cost Of Energy) 30,75 € / MWh. Tämä olisi 7 % vähemmän kuin vastaavan kokoisella painevesireaktorilla, ja 9 % vähemmän kuin vastaavan kokoisella kivihiilivoimalaitoksella. Sulasuolareaktorin edullisuus perustuu pääasiassa kahteen eri tekijään: se ei vaadi vesireaktorien tapaan massiivista suojarakennelmaa reaktorin ympärille, ja korkeampi terminen hyötysuhde parantaa kustannustehokkuutta. (Mignacca & Locatelli 2020) Tämän ohella on arvioitu, että toriumpolttoaineen hinta tippuisi noin 20–30 % reaktoreissa, jotka vaativat vain vähän tai ei ollenkaan rikastetun uraanin käyttöä (Humphrey & Khandaker 2018). Taloudellinen kilpailukyky markkinoilla on merkittävä tekijä, jotta reaktorimalli voisi levitä tulevaisuudessa kaupalliseen käyttöön. Sulasuolareaktori on yksi 4. sukupolven suunnitteilla olevista ydinreaktorimalleista.



### 3.6 Kiihdytinreaktori

Fysiikan nobelisti Carlo Rubbia toi esille idean kiihdytinreaktorista (ADS, Accelerator-Driven System) Cernissä vuonna 1996. Kyseessä on alikriittinen reaktori, joka tuottaa fissioreaktioita saavuttamatta kuitenkaan itse itseään ylläpitävää kriittistä tasoa fission ketjureaktioille. Itseään ruokkivan ketjureaktion sijaan tarvittavat neutronit saadaan ulko-puolisesta lähteestä, tässä tapauksessa kiihdyttimestä. Kiihdytin ampuu kuvan 4 mukaisesti protonisäteitä raskasmetallisiin atomeihin, jotka säteilytyksen vaikutuksesta vapauttavat spallaatioreaktion eli ytimen pirstoutumisen kautta neutroneja, jotka ohjataan reaktoriin. Kiihdytinreaktorin yhtenä etuna on sen kyky käyttää erilaisia uraaniin, toriumiin ja plutoniumiin tai näiden sekoitukseen pohjautuvia MOX-polttoaineita, jotka eivät muihin reaktorimalleihin sovi. Lisäksi torium ei tarvitsisi fissiiliä reaktion alulle panijaa ollenkaan, sillä tarvittavat neutronit saataisiin suoraan kiihdyttimestä. (Van Gosen & Tulsidas 2016; Humphrey & Khandaker 2018)



**Kuva 4** Kiihdytinreaktorin yksinkertaistettu toimintaperiaate, muokattu lähteestä (Lee 2018).

Tämä reaktorimalli tarjoaisi korkeaa turvallisuustasoa, kestäväää polttoaineen käyttöä ja taloudellista kilpailukykyä. Korkea turvallisuustaso selittyy reaktorimallin tavasta toimia alikriittisellä tasolla. Fissioreaktiot pysyvät yllä vain niin pitkään kuin kiihdyttimestä syötetään neutroneja reaktoriin. Polttoainekäytön kestävyys ja taloudellinen kilpailukyky selittyvät reaktorin kyvystä tuottaa fissioenergiaa myös radioaktiivisista transuraanisista ydinjätteistä, kuten neptuniumista ja amerikumista. Tämä minimoisi jätteenkäsittelyyn liittyviä haasteita sekä kustannuksia. (Van Gosen & Tulsidas 2016; Humphrey & Khandaker 2018)

Kiihdytinreaktoriin liittyy vielä teknisiä haasteita voitettavaksi, ennen kuin teknologiaa olisi mahdollista ottaa hyötykäyttöön. Haasteita liittyy erityisesti kiihdyttimen halutunlaiseen toimintaan sekä kiihdyttimen ja reaktorin välisen kytkennän toteuttamiseen. (Van Gosen & Tulsidas 2016) Kiihdytinreaktoreita kuitenkin tutkitaan laajasti ympäri maailmaa, kuten Pohjois-Amerikassa, Euroopassa ja eri puolilla Aasiaa (Humphrey & Khandaker 2018). Rubbia on arvioinut, että tehotasoltaan 600 MW kiihdytinreaktoriin vaadittava investointihinta olisi reilusti alle 10 % fuusiovoimahanke ITERiin (International Thermonuclear Experimental Reactor) verrattuna (Rubbia 2016). Kiihdytinreaktorin uskotaan olevan turvallisen ja kestävän toimintamallinsa johdosta nopean hyötöreaktorin ja sulasuolareaktorin ohella laajalti poliittisesti hyväksyttävissä (Humphrey & Khandaker 2018).

Taulukossa 2 on vielä kootusti keskeisiä havaintoja toriumin käytöstä eri reaktorityypeissä. Nämä kaikki reaktoriteknologiat ovat tutkimustyön kohteina.

**Taulukko 2** Vertaileva yhteenveto toriumin eri reaktoriteknologioista.

Reaktorityyppi	Toriumin käytettävyys	Käytön keskeisiä hyötyjä
LWR	Jo pienillä laitemuunnoksilla	Negatiivisempi tyhjiökerroin, vähemmän syntyvää ydinjätettä.
HWR	U-238 korvattavissa Th-232:lla	Polttoaineen kierrättäminen mahdollista ilman väliprosessointia. Merkittävästi vähemmän syntyvää plutoniumia.
HTGR	MOX-polttoaineet	Hyvät neutroniset ominaisuudet korkeissa lämpötiloissa.
FBR	Mahdollista	Parempi ydinturvallisuus, mutta huonompi polttoainetehokkuus.
MSR	Suunniteltu toriumia varten	Loistavat ydinturvallisuusparametrit. Kestävä polttoainetehokkuus ja potentiaalisesti hyvä taloudellisuus.
ADS	Jo ilman fissiiliä materiaa	Loistavat ydinturvallisuusparametrit. Kestävä polttoainetehokkuus ja potentiaalisesti hyvä taloudellisuus.

Toriumin käyttöönotto olisi helpointa jo olemassa olevissa uraanikäyttöisissä ydinvoimaloissa. 4. sukupolven uudet reaktoriteknologiat tarjoavat kuitenkin ylivoimaisia käyttöominaisuuksia.

## 4. TUTKIMUS JA KEHITYS MAAILMALLA

Tässä luvussa käydään läpi sitä, miten tutkimus- ja kehitystyö etenevät maailmalla, ja minkälaista suuntaa kehitykselle on odotettavissa julkaistun aineiston perusteella. Luku etenee aluksi kronologisesti historian tapahtumista kohti nykyhetkeä. Tämän jälkeen nykytilanne ja tulevaisuuden näkymät kartoitetaan maantieteellisestä näkökulmasta käsin ympäri maailman.

### 4.1 Atomiajan alusta nykyaikaan

Kiinnostus toriumin käyttöön ydinpolttoaineena syntyi jo niin kutsutun atomiajan alussa 1950-luvulla, kun ensimmäisiä sähköntuotantoon tarkoitettuja ydinvoimaloita rakennettiin. Tällöin oli kuitenkin meneillään kylmän sodan aikakausi, ja ydinaseiden kehitykselle ja valmistamiselle oli paljon poliittisia intressejä. Toriumin huono soveltuvuus ydinaseiden valmistukseen ajoi siten rahoitusta pois toriumiin pohjautuvan ydinteknologian kehittämiseltä. Tämän ohella toriumin käytölle vaadittava fissiili aines reaktion aikaansaamiseksi, sekä uusien, logistisesti helppopääsyisten uraanivarantojen löytäminen käänsivät lopulta kehityksen kulun täysin kohti uraani-plutonium-polttoainekiertoa. (Arumuga et al. 2020) Siten maailmanlaajuinen mielenkiinto toriumia kohtaan sammui 1970-luvun loppuun mennessä käytännössä kokonaan (IAEA 2005).

Kuten jo luvussa 3 tuli esille, atomiajan alkuaikoina rakennettiin toriumin käyttöön pohjautuvia koereaktoreita, kuten onnistuneesti ajossa ollut Oak Ridgen sulasuolareaktori. Koeajon onnistuneesta lopputuloksesta huolimatta tämä projekti ajettiin alas vuonna 1969 tarkoituksena siirtää rahoitus nopeiden uraanipohjaisten hyötöreaktorien kehittämiseksi. Siten projektin seuraavana etappina ollutta 1000 MW:n sulasuolareaktoria ei koskaan rakennettu. (IAEA 2005; Van Gosen & Tulsidas 2016) Atomiajan alussa tehdyt laajamittaiset kokeet ovat kuitenkin yhä suurilta osin perustana nykypäivän tietoudelle toriumpolttoaineisiin liittyen. Uusien koetestien tulokset ovat edelleen vertailukelpoisia atomiajan alussa saatujen tulosten kanssa. (Verwerft & Boer 2020)

Kiinnostus toriumin käyttöä kohtaan on viime vuosien aikana herännyt uudelleen, kun on pyritty löytämään ydinturvallisia ja hiilidioksidineutraaleja ratkaisuja vastaamaan maailmalla alati kasvavaan sähköntarpeeseen (Humphrey & Khandaker 2018). Useat valtiot eri mantereilla ovat käynnistäneet 1990-luvulta lähtien uusia tutkimusprojekteja toriumvoiman kehittämiseksi (Van Gosen & Tulsidas 2016).

## 4.2 Intia

Toriumilla on merkittävä rooli Intian valtiollisessa ydinvoimaohjelmassa. Tätä selittää maailman suurimpien toriumvarantojen sijaitseminen Intiassa sekä uraanin hyvin niukka esiintyminen Intian maaperässä. Maalla on siten intressejä olla maailmalla edelläkävijänä toriumiin pohjautuvien energiajärjestelmien käyttöönotossa. Valtion ydinohjelma pohjautuu kolmivaiheiseen toriumin käyttöönottoon, minkä perusajatus on esitetty luvussa 2.4. Ohjelman eräänä tavoitteena on saada moninkertaistettua vaiheiden 1 ja 2 jalostuksen avulla maan sisäisten fissiilien resurssien määrää. Ensimmäinen vaihe on saavuttanut kaupallisen kypsyyden. Vuonna 2017 maassa oli 18 paineistettua raskasvesireaktoria sähköä tuottavassa ensimmäisen vaiheen toiminnassa, ja lukuisia uusia rakenteilla. Nämä reaktorit käyttävät polttoaineena luonnonuraania, josta saatua plutoniumia sekä köyhdytettyä urania hyödynnetään toisessa vaiheessa toriumin jalostamiseksi muotoon U-233. Toinen vaihe on tarkoitus toteuttaa nopeiden hyötöreaktoreiden avulla. Testireaktori on ollut toiminnassa jo vuodesta 1985 lähtien, mutta 500 MW:n prototyyppireaktori on pysynyt rakennuttamisen viimeisessä vaiheessa jo vuosikausia. Alun perin reaktorin piti valmistua vuonna 2015. Nopeista hyötöreaktoreista tuotteena saatua U-233 toriumjalostetta käytettäisiin kolmannen vaiheen (Th-232-U-233) alkuunpanijana. Kehittynyt raskasvesireaktori on rakenteilla kolmannen vaiheen toteutusta varten. Tämän reaktorimallin valmistumisen uskotaan avaavan tietä myös muiden kehittyneiden toriumreaktorien kehittämislle ja rakennuttamiselle. (Vijayan et al. 2017)

Intia on kerännyt insinööritason kokemusta toriumin käytöstä koko kolmivaiheisen polttoainesyklin yli, ja tätä pyritään hyödyntämään parhaillaan teknologian valmistamiseksi. Kun kolmatta vaihetta varten olisi rakennettuna riittävästi tuotantokapasiteettia, tarkoituksena olisi kyetä ylläpitämään sähköntuotantoa pelkän toriumin voimin ilman fissiilien aineiden käyttöä. (Vijayan et al. 2017) Toriumin laajamittaisen käyttöönoton uskotaan tapahtuvan noin 30–40 vuoden kuluttua nopeiden hyötöreaktoreiden kaupallisen toiminnan käynnistyttyä. Intia pitää toriumin ennenaikaista käyttöönottoa epäoptimaalisena ratkaisuna, ja maa haluaakin kerätä ensin merkittävät varastot fissiiliä materiaa ennen kolmannen vaiheen käynnistämistä. Siten erään kriittisen arvion mukaan toriumreaktorien käyttöönotto tapahtuisi mahdollisesti vasta vuoden 2070 jälkeen. (Van Gosen & Tulsidas 2016)

Intian ydinohjelma on kiinteästi kytköksissä kiinteiden polttoaineiden käyttöön. Uraanin ohella näin on myös toriumin kohdalla. Toriumin polttoainekäsittely tapahtuu käyttäen THOREX-prosessia (Thorium Uranium Extraction) eli toriumin ja uraanin uuttamista mineraaleista. THOREX oli vielä vuonna 2017 kehitysvaiheessa vaatien laajamittaista muokkausta ennen kuin suuren mittakaavan tuotanto voisi mahdollistua. Haasteina ovat

muun muassa toriumpolttoaineen sintraukseen vaadittava hyvin korkea lämpötila sekä polttoaineen inerttiys sitä liuotettaessa. (IAEA 2005; Van Gosen & Tulsidas 2016) Intia on osoittanut viime vuosina kiinnostusta myös sulasuolareaktoreita, kiihdytinreaktoreita ja pienikokoisia korkean lämpötilan reaktoreita kohtaan. Maalla on tutkimus- ja kehitysprojekteja käynnissä näiden kaikkien reaktorityyppien valmistamiseksi. (OECD NEA & IAEA 2016; Van Gosen & Tulsidas 2016)

### 4.3 Muu Aasia

Kiinassa on käynnissä aktiivinen tutkimustyö sulasuolareaktoreiden kehittämiseksi. Maan tiedeakatemia käynnisti vuonna 2011 kehitysprojektin, jossa myös Yhdysvallat on yhteistyökumppanina. Vuonna 2013 Kiinan kansallinen energiahallinto liitti projektin maan 25 tärkeimmän energiateknologian tutkimusprojektin joukkoon osana valtion energiakehityksen strategiaa. Kehitysprojekti on rakenteeltaan kolmiosainen. Ensimmäisen osan testireaktorit ovat valmistuneet ja kolmannen osan kaupallinen 1000 MW laitos olisi tarkoitus aloittaa operointinsa 2030. Kiinassa alettiin rakentamaan vuonna 2014 myös korkean lämpötilan kaasujäähdytteistä reaktoria, joka kykenisi käyttämään toriumia polttoaineenaan. (Van Gosen & Tulsidas 2016) Reaktorissa tehdään tällä hetkellä testiajoja, ja sen olisi tarkoitus aloittaa toimintansa myöhemmin vuonna 2021. (World Nuclear News 2021)

Japanissa kehitetään ITMSF:n (International Thorium Molten Salt Forum) ja TTS:n (Thorium Tech Solution Inc.) yhteisvoimin kolmivaiheista FUJI sulasuolareaktoriprojektia. 7 MW miniFUJIn jälkeen tarkoitus olisi rakentaa varsinainen 200 MW FUJI ja tämän jälkeen vielä mahdollisesti 1000 MW Super-FUJI. Suunnittelutyöt on aloitettu jo myös Super-FUJIn osalta. Omintakeisena piirteenä projektilla on sen tarkoitus tuottaa fissiili materia reaktoria varten käyttämällä kiihdytintä neutronipommitusten aikaansaamiseksi. Laskelmien mukaan FUJI-reaktori kuluttaisi 30 vuoden käyttöiän aikana 3,9 tonnia toriumia, ja tuottaisi vain 300 g plutoniumia ja 5,3 kg muita aktinideja. Syntyneen plutoniumin määrä olisi vain 0,03 %, ja muiden aktinidien määrä vain 5 % vastaavan kokoiseen kiehutusvesireaktoriin verrattuna. Myös Kyoto Neutronicsilla on vastaavanlainen projekti käynnissä kiihdyttimen käyttöön pohjautuvan sulasuolareaktorin toteuttamiseksi. (OECD NEA & IAEA 2016; Van Gosen & Tulsidas 2016)

Indonesia on arvioinut maassaan olevan 1,5 mrd. tonnia spekulatiivisia toriumia sisältäviä resursseja, joita voitaisiin louhia toriumin ja harvinaisten maametallien keräämiseksi. Pilottihanke monatsiitin rikastamiseksi aloitettiin vuonna 2015, ja muiden hankkeiden

kaavoitustyötä mineraalien keräämiseksi on tehty ainakin vuoteen 2019 asti. Malesia aloitti vuonna 2014 nelivuotisen kansallisen hankkeen toriumvoiman kehittämistä varten. Hanke sisältää toimintoja toriummineraalien tutkimiseen ja uuttamiseen, sekä polttoaineen valmistustekniikkaan liittyen. Hankkeen pitkäaikaissuunnitelmana on tarkoituksena tutkia myös mahdollisuuksia pienten sekä keskisuurten toriumreaktorien rakentamiseen. Hanke on saanut IAEA:n tuen taakseen. (OECD NEA & IAEA 2016)

#### 4.4 Eurooppa

Huhtikuussa 2013 norjalainen yksityisrahoitteinen Thor Energy aloitti toriumin ja plutoniumin MOX-polttoaineen testausohjelman Haldenin tutkimusreaktorissa. Polttoaineen säteilytystä tutkitaan sen selvittämiseksi, voisiko polttoaineseosta käyttää kaupallisissa kevytvesireaktoreissa. Thor Energy on aloittanut keskustelut eri tahojen kanssa sekaoksidipolttoaineen käytöstä ja sen mahdollisesta lisensoimisesta kevytvesireaktoreihin. (Van Gosen & Tulsidas 2016) Thor Energy tekee yhteistyötä FUJI-projektissa työskentelevän japanilaisen TTS:n kanssa (Zheng et al. 2018).

Yhdistyneessä kuningaskunnassa käynnistettiin 2014 startup projekti Moltex Energy Limited kehittämään erityistä vakaan suolareaktorin prototyyppiä (SSR, Stable Salt Reactor), jossa sekä nopeiden, että termisten neutronien käyttö olisi mahdollista (Van Gosen & Tulsidas 2016; Denbow et al. 2020). Yhtiön toiminta oli joulukuussa 2020 ja mahdollisesti yhä tällä hetkellä valvonnan alaisessa arvioinnissa siitä, rikkooko se virallisia ydinsäätelyn turvallisuusperiaatteita (Office of Nuclear Regulation's Safety Assessment Principles) vastaan. Yhtiöllä on yhteistyökumppanina kanadalainen NB Power. Projektin tavoitteena olisi kehittää lopulta sähköä tuottava modulaarinen voimalaitos, jonka tuotantokapasiteettia voisi säätää 1000–3000 MW tehoalueen välillä vaihtelevan sähkötarpeen mukaan. Pilottihankkeen etenemissuunnitelma on kehitetty alustavasti vasta vuoteen 2026 asti. Maasta löytyy myös muita startup projekteja, kuten kanadalaisperusteinen Terrestrial Energy tavoitteenaan rakentaa ja lisensoida 29–290 MW kaupallinen sulasuolareaktori 2020-luvun aikana. (Denbow et al. 2020)

Saksassa Institut für Festkörper-Kernphysik gGmbH suunnittelee sulasuolareaktorin teknologiaan perustuvaa kaksoisfluidireaktoria (DFR, Dual Fluid Reactor), jossa polttoaine ja jäähdytysaine kiertävät omissa erillisissä piireissään. Reaktori kykenisi hyödyntämään hyvin laajaa kirjoa polttoaineita toriumista aina köyhdytettyyn uraaniin ja ydinjätteeseen asti. Tämän skaalan mahdollistaa nopeiden neutronien käyttö reaktoriytimessä. Reaktori mahdollistaisi myös mukautettujen nuklidien valmistamisen lääketeollisuutta varten.

Tanskalainen Copenhagen Atomics suunnittelee merikonttiin mahtuvaa toriumia käyttävää sulasuolareaktoria. Tarkoituksena olisi toriumin avulla polttaa aktinideja käytetystä ydinjätteestä ja saada siten pitkäikäinen ydinjäte muutetuksi lyhytikäisempään muotoon samalla lämpöä tuottaen. Ensimmäisellä versiolla on tarkoitus olla 50 MW tuotantokapasiteetti. (Van Gosen & Tulsidas 2016)

Euroopassa on lisäksi käynnissä 11 tahon kansainvälinen yhteishanke SAMOFAR (Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactor) tarkoituksenaan todistaa ja kehittää nopean sulasuolareaktorin innovatiivista turvallisuuskäsitelmää kehittyneiden koemenetelmien ja numeerisen laskennan avulla. Osallistuvina tahoina on eri yliopistoja ja tutkimuslaboratorioita Ranskasta, Alankomaista, Italiasta, Sveitsistä, Saksasta ja Meksikosta. (Van Gosen & Tulsidas 2016) Suomalaiset tahot eivät ole tietävästi mukana missään toriumin ydinvoimaa kehittävässä hankkeessa. Tällaiseen osallistumisesta ei myöskään ole tiedossa julkisia tulevaisuudensuunnitelmia.

## 4.5 Pohjois-Amerikka

Kanadassa on yli 70 vuoden kokemus Atomic Energy of Canada Limitedin (AECL) kehittämästä CANDU-reaktorista (Canadian Deuterium Uranium). Kyseessä on kanadalaisen lisensoima erityinen raskasvesireaktori. (Wei et al. 2017) Jo vuonna 2005 saavutetun yli 90 reaktorivuoden operaatiokokemuksella AECL on kehittänyt kehittyneen CANDU-reaktorin ACR (Advanced CANDU Reactor) laajalle käyttöön otetun CANDU 6 -reaktorin perusteella. ACR:n pitäisi vastata nykypäivän kehittyneisiin ydinvoimaloiden turvallisuus- ja kestävyysvaatimuksiin. (IAEA 2005) ACR:n merkittävin etu on kuitenkin sen joustava kyky käyttää muun muassa MOXia sekä toriumia polttoaineenaan (Wei et al. 2017). Vuodesta 2008 lähtien kanadalainen CANDU Energy on yhteistyössä kiinalaisen CNNC:n (China National Nuclear Corporation) kanssa pyrkinyt kehittämään toriumista ja käytetystä uraanista polttoainetta uusia CANDU-reaktoreita varten. Näin erityisesti tuoreen uraanipolttoaineen tarve, sekä myös syntyvän ydinjätteen määrä pienenisivät. Neljästä painevesireaktorista syntyvät ydinjätteet riittäisivät tutkimusten valossa kattamaan yhden ACR:n koko polttoainetarpeen. (Van Gosen & Tulsidas 2016)

Pidemmälle tulevaisuuteen katsottaessa AECL:llä on tavoitteena suunnitella ylikriittinen CANDU-reaktori. Tämä olisi kehityksen kulussa seuraava askel ACR:n jälkeen. Ylikriittisessä CANDU-reaktorissa jäähdytysaineena käytettävä kevyt vesi olisi termodynaamisesti kriittisen pisteen (374 °C, 221 bar) yläpuolella lämpötilan ja paineen suhteen. Tämä parantaisi reaktorin termistä hyötysuhdetta. Alustavien laskelmien perusteella reaktorin

pitäisi operoida hyvin toriumin polttoainekierrolla. Tämä on olennainen tekijä tulevaisuuden laajojen käyttäjävaatimusten täyttämiseksi. (IAEA 2005)

Yhdysvalloissa on käynnissä useita eri toriumin hyödyntämiseen perustuvia projekteja eri reaktorityypeille. Lightbridge kehittää edistyksellistä metallista ydinpolttoainetta käytettäväksi kevytvesireaktoreissa. Polttoaineen olisi tarkoitus maksimoida reaktorin tehokas sekä toimintasyklin pituutta. X-energy suunnittelee korkean lämpötilan kaasujäähdytteistä 4. sukupolven kuulareaktoria nimeltään Xe-100. Tämä reaktori kehitetään muokattavaksi ilman erillistä säätöä suureen kirjoon erilaisia ydinpolttoaineita, mukaan lukien torium. Projekti saa rahoitusta Yhdysvaltojen energiaministeriöltä. (Van Gosen & Tulsidas 2016) Transatomic Power aloitti vuonna 2011 suunnittelemaan edistyksellistä sulasuolareaktoria. Laitoksen kokeelliset testit oli jo ehditty aloittaa, kun vuonna 2018 yhtiö joutui ajamaan toimintansa alas ja lopettamaan saatuaan selville projektissa aiemmin tapahtuneet laskuvirheet ydinjätteen käyttömahdollisuuksista. Virheiden paljastuminen hidastutti liikaa projektin etenemistä, jotta se olisi voinut pysyä kannattavana. Kehitystyöstä saadut tulokset jaettiin kuitenkin vapaaseen levitykseen muiden tahojen hyödynnettäviksi. (Van Gosen & Tulsidas 2016; St. John 2018)

Myös Yhdysvalloista kotoisin oleva Martingale sai vuonna 2014 valmiiksi alustavan suunnittelutyön ThorCon -nimistä sulasuolareaktoria varten. Tämän jälkeen alkoi etsintä sopivan isäntämaan löytämiseksi, jotta rakennusprojekti voitaisiin aloittaa. Yhteistyökumppaniksi valikoitui Indonesia, jonne on nyt rakenteilla 500 MW prototyyppilaitos. Valmistumisen jälkeen sähköntuotantokapasiteettia olisi tarkoitus lisätä yhteensä 3000 MW uusia voimaloita rakentamalla. Yhtiön arvioima sähkön tuotantohinta olisi 30 \$/MWh. (Van Gosen & Tulsidas 2016; Thorium Energy World 2018; Mignacca & Locatelli 2020; ThorCon 2021) Lisäksi yhdysvaltalaisella Fluor Energy -yhtiöllä on tarkoituksena suunnitella ja kaupallistaa oma sulasuolareaktori, joka tuottaa U-233:ä fluori-litium-berylliumsuolaan (FLiBe) lisätystä toriumfluoridista (Van Gosen & Tulsidas 2016). On kuitenkin mahdollista, että vasta uraanin ja plutoniumin hintojen merkittävä nousu voisi synnyttää Yhdysvaltojen kaltaisissa uraanirikkaissa valtioissa laajaa kiinnostusta toriumin käyttöä kohtaan (Schaffer 2013).

## 4.6 Muut valtiot

Venäjällä osana maan ydinreaktoreiden tutkimuslaitoksen MARS-projektia (Minor Actinide Recycling in Molten Salt) on suunnitteilla 2400 MW lämpöä tuottava nopea sulasuolareaktori aktinidien kierrätykseen ja muuntamiseen. Polttoaineena käytössä on vain



transuraanisia fluorideja, jotka pohjautuvat kevytvesireaktorissa jo kertaalleen käytettyyn uraani- tai MOX-polttoaineeseen. Reaktoriytimen malli on homogeeninen koostuen Li-Na-Be-fluorideista ilman kiinteää grafiittista hidastinta. Tämä on vähentänyt tarvetta polttoaineen jälleenkäsittelylle verrattuna alkuperäiseen yhdysvaltalaiseen suunnitteluun. Myös toriumin käyttö reaktorissa on mahdollista, vaikka reaktoria ei luokitella hyötöreaktoriksi vaan polttomuuntajaksi (burner-converter). (Van Gosen & Tulsidas 2016)

Etelä-Afrikassa Steenkampskraal Thorium Limited -yhtiöllä (STL) on käynnissä useita hankkeita toriumin polttoainekiertoon liittyen. Yhtiöllä on oma kaivos toriumin ja harvinaisten maametallien louhintaan, sekä suunniteltuna toriumin jalostamo polttoainetason tuotantoa varten. STL suunnittelee myös 100 MW modulaarista korkean lämpötilan kaasujäähdytteistä kuulareaktoria, jossa jäähdytys toteutetaan heliumilla ja toimintalämpötila on noin 750 °C. STL:n kaivos ehti tuottaa 3,3–7,6 % toriumia sisältävää monatsiittia noin 50 000 tonnia 1950-luvulta vuoteen 1963 asti ennen kuin kaivoksen toiminta keskeytettiin. Kaivoksen toiminta on kuitenkin tarkoitus käynnistää uudelleen lähiaikoina, kun entisöintityöt kaivoksessa on saatu päätökseen. Toriumin arvioitu kaivuutahti olisi noin 360 tonnia per vuosi. (OECD NEA & IAEA 2016; Van Gosen & Tulsidas 2016)

Myös muita vastaavanlaisia toriumin ja harvinaisten maametallien louhintaan liittyviä projekteja on käynnistymisvaiheessa maailmalla. Eräs sellainen on Australiassa sijaitseva Nolans Bore, mistä on löytynyt 81 810 tonnia toriumia maaperästä 0,27 % rikkausasteella. Grönlannin Kvanefjeld ja Brasilian Pitinga ovat esimerkkejä muista vastaavanlaisista kaivosprojekteista. (OECD NEA & IAEA 2016)

Kansainvälinen 4. sukupolven foorumi GIF (Generation IV International Forum) sisältää Euroopan atomienergiayhteisö Euratomin (The European Atomic Energy Community) lisäksi useita jäsenvaltioita Euroopasta, Aasiasta, Pohjois-Amerikasta ja Afrikasta. GIF tutkii eri tahojen yhteisiä mielenkiinnon kohteita, sekä tekee suosituksia tutkimuksesta ja kehityksestä 4. sukupolven ydinvoimaloihin liittyen. GIF:n vuoden 2014 raportti ehdotti vuotta 2025 sulasuolareaktorien toteuttamiskelpoisuuden tutkimisen lopettamisajankohdaksi. (Van Gosen & Tulsidas 2016) Ennusteena GIF:llä on, että vuonna 2030 ensimmäiset kaupalliset toriumpolttoainetta käyttävät ydinreaktorit voisivat käynnistyä. Todennäköisimpinä ensin valmistuvina reaktoriyypeinä pidetään kevytvesi-, sulasuola- ja korkean lämpötilan kaasujäähdytteisiä reaktoreita. Tavoitteeseen pääsemiseksi tutkimus- ja kehitystyön kapasiteettia on kuitenkin kasvatettava tulevien vuosien aikana. (Humphrey & Khandaker 2018)

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Toriumin käytöllä ydinvoiman polttoaineena saataisiin useita merkittäviä etuja hyödynnettäväksi energiantuotannon alalla. Edut ovat vertailukelpoisia tavanomaisen uraanipohjaisen ydinvoiman kanssa. Keskeisiä etuja ovat:

- Torium on maaperässä 3–4 kertaa yleisempi alkuaine kuin uraani, ja resurssien loppumisesta tulevien vuosisatojen aikana ei ole pelkoa edes toriumin laajamittaisessa käyttöönotossa.
- Toriumin louhinta maaperästä on pääasiassa yksinkertaisempaa ja turvallisempaa toteuttaa kuin uraanin louhinta.
- Toriumin ja siitä saatavan U-233:n ylivoimaiset fysikaaliset ominaisuudet parantavat suorituskykyä ydinreaktorissa ja mahdollistavat jopa kaiken ydinennergian vapautumisen hyödynnettäväksi.
- Toriumin kemiallinen stabiilius, inerttiys sekä fertiili luonne tekevät alkuaineen käsittelystä ja varastoinnista turvallisempaa uraaniin verrattuna.
- Syntyvän ydinjätteen määrä sekä sen radioaktiivinen elinikä ovat toriumia käytettäessä merkittävästi vähäisempiä kuin nykyisessä uraani-plutonium-polttoainesykliissä. Sulasuolareaktoria tai kiihdytinreaktoria käyttämällä myös syntyneet transuraaniset ydinjätteet olisi mahdollista kuluttaa pois jo polttoainekierrossa.
- Toriumista saatava fissiili U-233 on hyvin resistentti ydinaseteknologiaa vastaan.
- Th-232-U-233-polttoainekierto soveltuu hyvin useisiin eri reaktortyyppeihin.
- Toriumin käytöllä saavutetaan ydinreaktoreissa negatiivinen tyhjiökerroin, mikä tekee polttoaineen käytöstä luontaisesti ydinturvallista.
- Toriumin käyttöön suunniteltu sulasuolareaktori sisältää passiivisen turvajärjestelmän, mikä ehkäisee ydinräjähdyskseen ajautumisen.
- 4. sukupolven toriumreaktorit pystyvät paremman ydinturvallisuuden sekä kestävämmän ja joustavamman polttoainekäytön ohella tarjoamaan lisäksi taloudellista kilpailukykyä aiempaa pienemmillä rakentamiskustannuksillaan. Ominaisuuksiensa avulla ne voivat myös saada aikaan laajempaa poliittista hyväksyntää uuden ydinvoiman rakentamiselle ja käytölle.

Toriumin hyödyntämiseen liittyy kuitenkin myös haittapuolia sekä haasteita, jotka täytyisi ratkaista ennen teknologian käyttöönottoa:

- Toriumin polttoainesykliässä reaktion alulle panevan ulkoisen fissiilin materian tarve synnyttää vaatimuksen monimutkaisemman teknologian käyttöönotolle kuin uraanin polttoainesykliässä. Kiihdytinreaktoreilla tätä ongelmaa ei kuitenkaan ole.
- Toriumdioksidin 500–600 °C korkeampi sulamislämpötila uraanidioksidin verran vaatii hyvin korkean sintrauslämpötilan polttoaineen valmistusprosessissa.
- Toriumin fertiloitumisreaktiossa protaktiniumilla on pitkä, noin 27 vuorokauden puoliintumisaika. Tämä hidastaa fissiilin polttoaineen valmistusprosessia merkittävästi.
- Toriumvoimalassa käyttökelpoisten polttoainekomponenttien erottaminen ydinjätteestä on toriumin inerttiydestä johtuen haastavampaa kuin tavanomaisessa uraanivoimalassa.
- Toriumista ei ole uraanin tapaan laajamittaista käyttökokemusta ja tutkimusdataa, jotka ovat tarpeellisia ennen kuin suuria kaupallisia investointeja voitaisiin tehdä.
- 4. sukupolven toriumvoimalat vaativat mittavaa rahoitusta teknologian käyttöön saamiseksi. Nykyisiä ydinvoimaloita olisi tosin mahdollista muuntaa toriumia hyödyntäviksi jo pieniä laitosmuokkauksia tekemällä. Lisäksi 4. sukupolven toriumvoimaloiden rahoitustarve on vain murto-osa käynnissä olevaan fuusiovoimahankkeeseen verrattuna.

Nämä haittapuolet eivät vaikuta ylitsepääsemättömiltä, sillä ympäri maapalloa löytyy lukuisia eri tahoja, joilla on käynnissä erilaisia tutkimusprojekteja toriumvoiman kehittämiseksi. Vaikka nämä projektit ovat saaneet osakseen vähemmän huomiota kuin monet muut uudet energiantuotantomuodot, vaihtoehtona toriumvoima vaikuttaa silti teknologiana realistisemmalta ja helpommin saavutettavalta kuin esimerkiksi kansainvälistä huomiota osakseen saanut fuusiovoima. Työstä saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että toriumista saatava ydinvoima kykenee täyttämään kaikki johdannossa esitetyt 4 kriteeriä tulevaisuuden energiantuotantoon liittyen.

Intian valtio on todennäköisesti merkittävin yksittäinen toimija toriumvoiman kehittämisessä, ja ainoa taho maailmassa, millä on keskeisesti toriumin käytön ympärille rakennettu valtiollinen energiastrategia. Useassa maassa tilanne saattaa kuitenkin olla se,

ettei toriumvoimasta olla merkittävästi kiinnostuneita niin pitkään kuin uraanin ja plutoniumin hintatasot pysyvät alhaalla, ja välitöntä tarvetta muutokselle ei ole. Suomi kuuluu todennäköisimmin kyseiseen kategoriaan, sillä tietoa mistään toriumvoimaa edistävästä suomalaisesta hankkeesta ei ole tullut vastaan. Harkitsemisen arvoista voisi olla kuitenkin yhteistyö esimerkiksi muiden pohjoismaisten toimijoiden, kuten norjalaisten tai tanskalaisien kanssa. Näin myös Suomeen saataisiin aiheeseen liittyvää asiantuntijuutta. Maaperän varannoiltaan toriumrikkaalla maallamme olisi näin paremmin mahdollisuuksia kehittää energiasektoria tulevaisuudessa kohti sekä uusia edistyksellisempiä ratkaisuja, että energiaomavaraisuutta. Samalla Suomi parantaisi asemaansa kehityksen kulun edelläkävijänä.

Maailmalla ensimmäisiä toriumkäyttöisiä ydinvoimaloita voitaisiin nähdä todennäköisesti aikaisintaan 2030-luvulla. Nämä reaktorit olisivat oletettavasti joko kevytvesi-, sulasuola tai korkean lämpötilan kaasujäähdytteisiä reaktoreita. Pidemmällä aikavälillä myös raskasvesireaktorit, kiihdytinreaktorit ja nopeat hyötöreaktorit olisivat mahdollisia. Jos jokin taho onnistuisi tuottamaan energiaa toriumia hyödyntävällä ydinvoimalalla turvallisesti ja onnistuneesti, kansainvälinen kiinnostus voisi synnyttää teknologian käyttöönottoon pyrkiviä projekteja ja tuotantorakenteita suuremmassa mittakaavassa.

## LÄHTEET

- ABRAM, T. and ION, S., 2008. Generation-IV nuclear power: A review of the state of the science. *Energy Policy*, **36**(12), pp. 4323-4330.
- ALAMERI, S.A. and ALKAABI, A.K., 2020. 1 - Fundamentals of nuclear reactors. In: S.U. KHAN and A. NAKHABOV, eds, *Nuclear Reactor Technology Development and Utilization*. Woodhead Publishing, pp. 27-60.
- ARUMUGA KUMAR, E.R.S., PANCHOLI, M.K., DARNOWSKI, P. and DZIDO, A., 2020. Neutronic performance of a thorium based mixed oxide fuel in a burner sodium-cooled fast reactor. *Energy*, **212**, p. 118744.
- BOLONKIN, A. and NEWMAN, Z., 2016. Cost of Tritium Fusion Energy. (viXra archive), pp. 3.
- BREEZE, P., 2019. Chapter 17 - Nuclear Power. In: P. BREEZE, ed, *Power Generation Technologies* (3rd Edition). Newnes, pp. 399-429.
- DENBOW, C., LE BRUN, N., DOWELL, N.M., SHAH, N. and MARKIDES, C.N., 2020. The potential impact of Molten Salt Reactors on the UK electricity grid. *Journal of Cleaner Production*, **276**, p. 122873.
- EWING, R.C., 2007. Ceramic matrices for plutonium disposition. *Progress in Nuclear Energy*, **49**(8), pp. 635-643.
- FREIGH, F. and GOSWAMI, D.Y., 2012. *CRC Handbook of Mechanical Engineering* (2nd edition). CRC Press, 2012.
- GABRIEL, S., BASCHWITZ, A., MATHONNIÈRE, G., FIZAINE, F. and ELEOUE, T., 2013. Building future nuclear power fleets: The available uranium resources constraint. *Resources Policy*, **38**(4), pp. 458-469.
- GAD CONSULTING SERVICES, 2014. *Encyclopedia of Toxicology*. Saint Louis: Elsevier Science & Technology.
- Global Energy Statistical Yearbook 2020, 2020-last update. Available: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html> [18.02.2021].
- HUMPHREY, U.E. and 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**, pp. 259-275.
- IAEA, 2005. *Thorium fuel cycle -Potential benefits and challenges*. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency.
- KARAM, A., 2006. How do fast breeder reactors differ from regular nuclear power plants? *SCIENTIFIC AMERICAN*, a Division of Springer Nature America, Inc.

- KUPITZ, J., 1995. Role of advanced reactors for sustainable development. *Progress in Nuclear Energy*, **29**, pp. 11-18.
- LEE, D.S., 2018. *Neutron production with thorium fuel in accelerator driven subcritical reactors*, University of Huddersfield.
- MACFARLANE, A.M. and MILLER, M., 2007. Nuclear Energy and Uranium Resources. *Elements*, **3**(3), pp. 185-192.
- MAGWOOD, W.D. and PAILLERE, H., 2018. Looking ahead at reactor development. *Progress in Nuclear Energy*, **102**, pp. 58-67.
- MIGNACCA, B. and LOCATELLI, G., 2020. Economics and finance of Molten Salt Reactors. *Progress in Nuclear Energy*, **129**, p. 103503.
- MOTIVA, 7.10.2020-last update, Energy Use in Finland, Total Energy Consumption. Available: [https://www.motiva.fi/en/solutions/energy\\_use\\_in\\_finland/total\\_energy\\_consumption](https://www.motiva.fi/en/solutions/energy_use_in_finland/total_energy_consumption) [18.02.2021].
- MURÁNSKY, O., YANG, C., ZHU, H., KARATCHEVTSEVA, I., SLÁMA, P., NOVÝ, Z. and EDWARDS, L., 2019. Molten salt corrosion of Ni-Mo-Cr candidate structural materials for Molten Salt Reactor (MSR) systems. *Corrosion Science*, **159**, p. 108087.
- MURRAY, L., 2019. The need to rethink German Nuclear Power. *The Electricity Journal*, **32**(6), pp. 13-19.
- NAGY, S., 2009. *Radiochemistry and Nuclear Chemistry - Volume II*. Oxford, United Kingdom: Eolss Publishers Co. Ltd., pp. 155.
- OECD NEA & IAEA, 2016. *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*. NEA, pp. 38-44.
- OLAWUYI, D.S., 2020. Can MENA extractive industries support the global energy transition? Current opportunities and future directions. *The Extractive Industries and Society*.
- RAHMAN, S.M. and MIAH, M.D., 2017. The impact of sources of energy production on globalization: Evidence from panel data analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **74**, pp. 110-115.
- RUBBIA, C., 2016. A Future for Thorium Power? J. REVOL, M. BOURQUIN, Y. KADI, E. LILLESTOL, J. DE MESTRAL and K. SAMEC, eds. In: *Thorium Energy for the World*. 2016, Springer International Publishing, pp. 9-25.
- RUZIC, D., Apr 23, 2020-last update, What You Need to Know: Thorium Nuclear Power. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=F92L6F0INYk> [23.3.2021].
- SCHAFFER, M.B., 2013. Abundant thorium as an alternative nuclear fuel: Important waste disposal and weapon proliferation advantages. *Energy Policy*, **60**, pp. 4-12.

- SHUCHENG, Z., PING, L. and BAOJU, Z., 2005. Thorium resources and their availability. *World Nuclear Geoscience*, **22**(2), pp. 98-103.
- SOIMAKALLIO, S., SANKALO, P., KOPSAKANGAS-SAVOLAINEN, M., SEDERHOLM, C., AUVINEN, K., HEINONEN, T., JOHANSSON, A., JUDL, J., KARHINEN, S., LEHTORANTA, S., RASANEN, S. and SAVOLAINEN, H., 2020. *Tekninen raportti: Turpeen rooli ja sen käytöstä luopumisen vaikutukset Suomessa*. Sitra: Itämerenkatu 11-13 PL 160 00181 Helsinki.
- SORENSEN, K., 2016. *What's the Difference Between Thorium and Uranium Nuclear Reactors?* Available: <https://www.machinedesign.com/learning-resources/whats-the-difference-between/article/21832119/whats-the-difference-between-thorium-and-uranium-nuclear-reactors> [18.02.2021].
- ST. JOHN, J., Sep 25, 2018-last update, Transatomic to Shutter Its Nuclear Reactor Plans, Open-Source Its Technology. Available: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/transatomic-to-shutter-its-nuclear-reactor-plans-make-its-technology-public> [6.4.2021].
- SUPKO, E., 2016. 13 - Nuclear fuel fabrication. In: I. HORE-LACY, ed, *Uranium for Nuclear Power*. Woodhead Publishing, pp. 353-382.
- THORCON, 2021-last update, Indonesia ThorCon 3.5 GW fission power project. Available: <https://thorconpower.com/project/>.
- THORIUM ENERGY WORLD, 2018-last update, ThorCon. Available: <http://www.thoriumenergyworld.com/thorcon.html>.
- TSUCHIHASHI, K. and AKINO, F., 1987. Analysis of Reactivity Coefficients of Chernobyl Reactor by Cell Calculation. *null*, **24**(12), pp. 1055-1065.
- VAN GOSEN, B.S. and TULSIDAS, H., 2016. 10 - Thorium as a nuclear fuel. In: I. HORE-LACY, ed, *Uranium for Nuclear Power*. Woodhead Publishing, pp. 253-296.
- VERWERFT, M. and BOER, B., 2020. 5.05 - Thorium Oxide Nuclear Fuels. In: R.J.M. KONINGS and R.E. STOLLER, eds, *Comprehensive Nuclear Materials* (2nd Edition). Oxford: Elsevier, pp. 139-168.
- VIJAYAN, P.K., SHIVAKUMAR, V., BASU, S. and SINHA, R.K., 2017. Role of thorium in the Indian nuclear power programme. *Progress in Nuclear Energy*, **101**, pp. 43-52.
- WEI, S., WANG, C., TIAN, W., QIU, S. and SU, G.H., 2017. Thermal hydraulic design and analysis of Thorium-based Advanced CANDU Reactor (TACR). *Nuclear Engineering and Design*, **323**, pp. 16-27.
- WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 11., 2020-last update, Thorium. Available: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx> [01.03., 2021].

WORLD NUCLEAR NEWS, 2021, Jan 04., Hot functional testing of HTR-PM reactors starts. *World Nuclear Association*.

ZHENG, G., WU, H., WANG, J., CHEN, S. and ZHANG, Y., 2018. Thorium-based molten salt SMR as the nuclear technology pathway from a market-oriented perspective. *Annals of Nuclear Energy*, **116**, pp. 177-186.