

Joel Tuomisto

# MODULAARISTEN PIENREAKTORIEN (SMR) NYKYTILA JA TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT ENERGiantuotannossa

Kandidaatintyö  
Informaation ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Lehtori Risto Mikkonen  
Elokuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Joel Tuomisto: Modulaaristen pienreaktorien (SMR) nykytila ja tulevaisuuden näkymät energiantuotannossa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma  
Elokuu 2022

---

Tässä työssä perehdytään siviilikäyttöisten pienreaktorien toimintaperiaatteisiin ja käyttökoh-teisiin sekä pienreaktoritekniikan tulevaisuuden tarpeiden ja haasteiden arviointiin. Työssä perehdytään myös nykyteknologiaan ja esitellään ydinvoimalaitoksien uusia passiivisia turvallisuusrat-kaisuja. Arvioinnin kohteena ovat myös ydinvoiman lähitulevaisuuksien käyttöskenaariot, jotka arvioivat pienydinvoiman kasvupotentiaalin mahdollisuuksia maailmalla.

Maailmalla on kehitteillä yli 80 toisistaan eroavaa pienreaktorityyppiä. Tässä kandidaatin-työssä esitellyt reaktorityypit ovat siis vain osa reaktorivalikoimasta. Työssä esitellyt reaktori-tyyppejä ovat argentiinalainen CAREM, yhdysvaltalainen NuScale, venäläinen KLT-40S, kiinalai-nen HTR-PM, suomalainen LDR-50 sekä eteläkorea - saudi arabialainen SMART. Tarkastelussa keskitytään reaktorikonseptien ominaispiirteisiin, niiden keskinäisiin eroavaisuuksiin ja kehityksen nykytilaan.

Suurin este pienreaktorien käyttöönotossa ei ole puuttuva teknologia, vaan soveltuvan lain-säädännön ja regulaatiotekijöiden puute kohdemaassa. Nykyiset lait ja asetukset on laadittu etäällä asutuskeskuksista sijaitseville suurille ydinvoimaloille, joten lainsäädäntö on puutteellista käsiteltäessä aivan uudenlaisia ydintekniikan sovelluksia ja uusia sijoituskohteita. Reaktoritoimit-tajat eivät voi aloittaa yksityiskohtaista hankesuunnittelua ennen kuin nämä ongelmat ovat rat-kenneet.

Uuden teknologian käyttöönotto vaatii toimenpiteitä kaikilta yhteiskunnan osa-alueilta. Teolli-suuspoliittinen tukeminen ilmastonmuutoksen kannalta kriittisiin energiaratkaisuihin nähdään kestäväksi ratkaisuksi. Uusiutuvien tuuli- ja aurinkovoiman osuus sähköntuotannossa tulee lähi-vuosina kasvamaan, mutta niiden sääriippuvuus luo omat haasteensa energiajärjestelmän säh-kötaseen ylläpitämiselle.

Joustavana tuotantomuotona pienydinvoima on erinomainen vaihtoehto täydentämään tuuli- ja aurinkovoimaan perustavaa tuotantokokonaisuutta, se on vähäpäästöinen ja skaalautuva rat-kaisu sekä sopii sähköverkon perustuotannoksi. Yhdistettynä vedyntuotantoon ja korkean lämpö-tilan lämpövarastoihin saadaan pienreaktoreista myös kustannustehokas tapa lisätä puhdasta tuotantokapasiteettia.

Avainsanat: SMR, ydinvoima, passiivinen turvallisuus, modulaarisuus, pienreaktori

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö tarkastelee pienreaktorien nykytilaa ja tulevaisuuden näkymiä. Aihe on ajankohtainen ja ydinala jatkuvasti kehittyvä. Tulevaisuuden standardit, taksonomiat, uudet lainsäännökset ja yleisön mielipide tulevat asettamaan suurimmat kehykset pienreaktorien ja erityisesti ydinvoiman kehittymiselle ja käyttöönotolle.

Haluan kiittää työni ohjaajaa lehtori Risto Mikkosta positiivisesta ja kannustavasta palautteesta ja mielekkäistä keskusteluista ja Teollisuuden Voima Oyj:n Sami Heinosta haastattelusta. Haluan myös kiittää ystäviäni kannustuksesta ja motivoinnista sekä isääni, Jaakko Tuomistoa motivoidessaan minut hänen jalanjäljissään tekniikan alalle.

Raumalla, 15.8.2022

Joel Tuomisto

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. TEORIA .....	3
2.1 Ydinenergia.....	3
2.2 Reaktorityypit .....	4
2.3 Pienreaktori-konsepti .....	9
2.3.1 Turvajärjestelyt ja turvallisuusjärjestelmät .....	10
2.3.2 Reaktorin sijoitus maanpinnan alapuolelle .....	15
3. SMR-REAKTORIKONSEPTIT .....	16
3.1 Sähköntuotanto.....	16
3.2 Kaukolämmöntuotanto .....	19
4. NYKYTILA .....	21
4.1 Ydinenergiainsäädäntö.....	21
5. TALOUDELLINEN ANALYYSI .....	23
5.1 Sähköntuotannon kustannusrakenne .....	24
6. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT .....	26
7. YHTEENVETO.....	29
LÄHTEET .....	30

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

SMR	Small Modular Reactor
MW	Megawatti
MWh	Megawattitunti
eV	Elektronivoltti
YVL	Ydinturvallisuusohje
BWR	Boiling Water Reactor
PWR	Pressurized Water Reactor
MSR	Molten Salt Reactor
AGR	Advanced Gas-cooled Reactor
IAEA	International Atomic Energy Agency
WANO	World Association of Nuclear Operators

# 1. JOHDANTO

Euroopan komission tutkimuskeskus (Joint Research Centre, JRC) on saanut vuoden 2021 maaliskuussa valmiiksi selvityksen, jonka mukaan ydinvoima luokitellaan tulevassa Euroopan unionin taksonomiassa ympäristön kannalta kestäväksi investoinniksi [1]. Komission raportin mukaan ydinvoiman ei ole nähty aiheuttavan enempää haittaa ympäristölle tai ihmisten terveydelle, kuin muut taksonomiaan jo luokitellut energiatuotannonmuodot kuten tuuli- ja vesivoima. Euroopan parlamentti hyväksyi heinäkuussa 2022 pidetyssä täysistuntoäänestyksessä komission esityksen taksonomiasta [2]. Ilmastonmuutoksen ehkäiseminen ja hillintä vaatii konkreettisia toimia, joista fossiilisten polttoaineiden käytön lopettaminen sähkön- ja lämmöntuotannossa on yksi suurimmista toimenpiteistä. Ydinvoima on todennäköinen vaihtoehto siirtymäajan Euroopalle, jonka tavoitteena on päästä eroon fossiilisesta polttoaineesta ja siirtyä täysin puhtaaseen ja päästöttömään energiantuotantoon.

Suomessa ydinvoiman suosio ei ole koskaan ollut näin korkealla. Energiateollisuus ry:n teettämän kyselyn mukaan 60 % vastanneista suomalaisista suhtautuu keväällä 2022 myönteisesti ydinvoimaan. Energiateollisuus ry on mitannut suomalaisten suhtautumista ydinvoimaan vuosittain vuodesta 1983 lähtien. [3]

Myös kasvanut kiinnostus puhtaaseen ja hiilidioksidittomaan energiantuotantoon on lisännyt kiinnostusta uuden ydinvoiman käyttöönottoon maailmalla, erityisesti Kauko-idässä. Lukuiset valtiot kehittävät omia, pioneerivaiheessa olevia reaktoreja, ja Kiinassa otettiin käyttöön maailman ensimmäinen siviilikäyttöinen pienreaktori joulukuussa 2021 [4].

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutustua pienten modulaaristen ydinreaktorien (Small Modular Reactor, SMR) toimintaan ja rakenteeseen, ja niihin vaikuttaviin lainsäädännöllisiin seikkoihin ja esteisiin. Pienistä modulaarisista ydinreaktoreista käytetään jatkossa myös termiä pienreaktori. Pienreaktorin sähköteho ja lämpöteho ovat kokonsa puolesta murto-osan maailman suurimmista reaktoreista. Pienreaktoreista puhuttaessa, reaktorien sähköteho on luokkaa 10–300 MW ja lämpötehoaan alle 1 000 MW. Modulaarinen pienreaktori pystytään kokoamaan tehtaassa, kuljettamaan junalla tai laivalla laitospaikalle ja kokoamaan, sekä liittämään sähköverkkoon lyhyessä ajassa.

Pienreaktoreita ei pidä tällä hetkellä verrata suoraan isoihin käytössä oleviin ydinlaitoksiin. Kyseessä ovat kaksi täysin erillistä teknistä konseptia, vaikka niiden energiantuotannon periaate onkin identtinen. Ydinvoiman rakentamista on tähän saakka ohjannut suuruuden ekonomia, joka on seurausta monimutkaisista, redundanttisista ja kalliisti toteutettavista turvajärjestelmistä. Nämä järjestelmät ovat samankaltaisia kaikille konventionaalisille ydinvoimalaitoksille, jolloin yksikkökustannus tehoyksikköä kohti laskee laistehon kasvaessa. Tätä suuruuden tuottamaa hyötyä on vaikeaa murtaa ajatuksellisesti. Pienreaktorit tähtäävät sarjavalmistaiseen tuotantoon, nopeaan kokoonpanoon, keskitettyyn kunnossapitoon ja laajasti eri maissa kelpoistettuun ja hyväksytyyn turvallisuusrakenteeseen. Samankaltaisuus, standardisointi ja yksinkertaisuus pienentävät investointikustannuksia ja parantavat kannattavuutta.

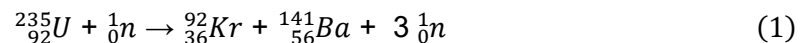
## 2. TEORIA

Tässä kappaleessa tutustutaan ydinreaktion perusteisiin, käydään läpi erilaisia reaktori-tyyppejä ja tutustutaan tarkemmin modulaarisiin pienreaktoreihin. Reaktori-tyyppeihin tutustuttaessa painotetaan erityisesti SMR-käytössä ja kehitteillä olevia reaktori-tyyppejä.

### 2.1 Ydinenergia

Energiaa voidaan tuottaa kahdella toisistaan poikkeavalla ydinreaktiolla, fissiolla ja fuusiolla. Fissioreaktiossa atomit halkeavat ja fuusioreaktiossa ne yhdistyvät. Fuusioreaktio on huomattavasti monimutkaisempi sen vaatiman korkean lämpötilan ja fuusioplasman hallitsemiseen liittyvien moninaisten ongelmien seurauksena. Ranskassa on rakenteilla maailman ensimmäinen fuusioenergiaa hyödyntävä ydinreaktori ITER, joka on tarkoitus saada valmiiksi vuoden 2025 loppuun mennessä. [5] ITER-reaktorin tarkoituksena ei ole kuitenkaan tuottaa sähköä eikä lämpöä yhteiskunnan käyttöön vaan pelkästään todentaa fuusioreaktion toimivuus ja hallittavuus. ITER onkin ennen kaikkea tutkimusprojekti. Fissiolla on sen sijaan keskeinen merkitys sähköntuotannossa, sillä sitä käytetään laajamittaisesti jokaisessa toimivassa ydinreaktorissa energian tuotantoon [6].

Nykyisin sähköntuotanto ydinfissiolla perustuu uraanin, kemiallinen merkki U, isotooppien, erityisesti raskaan  $U^{235}$  halkeamiseen. Ydinpolttoaineena voidaan käyttää myös uraanin muita isotooppeja ja plutoniumin isotooppeja. Eräs  $U^{235}$ :n hajoamisreaktio voidaan esittää yhtälön 1 mukaisesti,



jossa uraaniatomi absorboi ylimääräisen neutronin ja joutuu sen seurauksena epästabiliin viritystilaan. Viritystilan jälkeen ydin hajoaa kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi, kryptoniksi (Kr) ja bariumiksi (Ba). Hajoamisreaktiossa syntyneiden atomien yhteenlaskettu massa on pienempi kuin lähtöaineiden massa, joten reaktiossa vapautuu energiaa noin 200 MeV:n verran. Uraaniatomiin sitoutuneen vapaan energian määrä on miljoonakeräinen verrattuna vastaavaan määrään hiiltä [7], mikä tekee uraanista energiatihedeltään tehokkaan energialähteen.

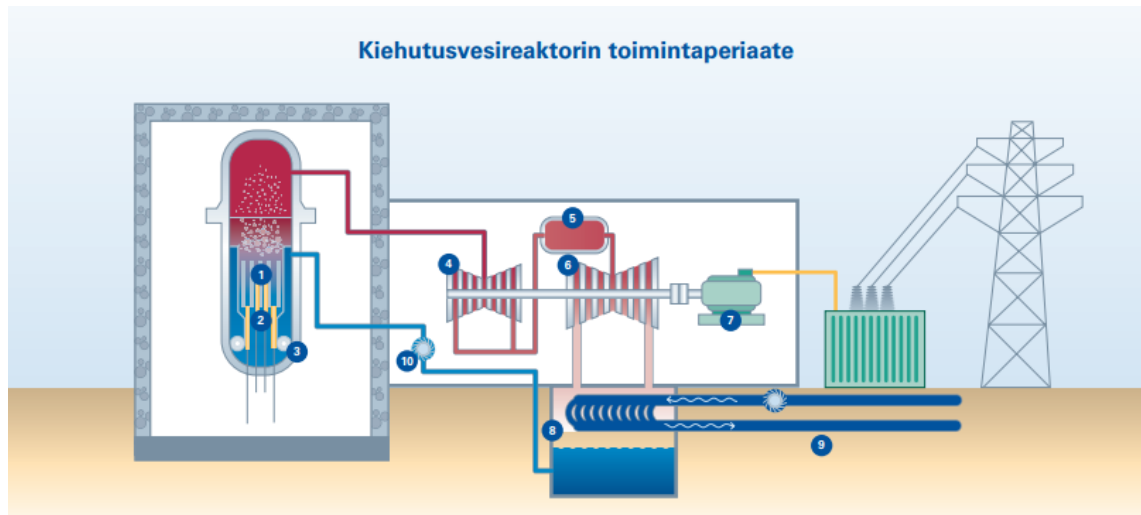
Uraanin hajoamisreaktio vaatii käynnistyäkseen yhden neutronin ja reaktio tuottaa kolme neutronia. Tämä mahdollistaa jatkuvan, itse itseään ylläpitävän ketjureaktion ydinreaktorissa. Tähän ketjureaktion mahdollistamaan jatkuvan lämpöenergian vapauttamiseen perustuu ydinvoimaloiden sähköntuotanto.



Hajoamisessa syntyy ns. nopeita neutroneja, jotka eivät sellaisenaan kykene absorboitumaan uraaniyttimeen. Nämä nopeat neutronit hidastetaan hidastinaineella, jonka jälkeen ne kykenevät jatkamaan ketjureaktiota. Hidastinaineena käytetään yleisemmin kevytvettä, raskasvettä tai grafiittia. Kevytvedellä tarkoitetaan normaalia puhdistettua vettä, kun taas raskasveden molekyyllissä vedyn on korvannut vedyn toinen isotooppi, deuterium. Raskasveden käyttö mahdollistaa vähärikasteisen ydinpolttoaineen käytön reaktorissa. Ydinreaktion tehon hallinta keskittyy näiden hidastettujen neutronien määrän kontrolloimiseen. Neutronien määrään vaikutetaan säätösauvoilla, jotka sitovat neutroneja näin estäen uraaniatomien halkeamisen ja hidastaen ketjureaktiota. Säätösauvojen lisäksi yleinen menetelmä ketjureaktion rajoittamiselle on neutronimyrkyn, yleensä boori-hapon, määrän säätteleminen hidastinaneessa. Hidastinaineen nopealla booraamisella reaktori voidaan myös sammuttaa nopeasti ja turvallisesti.

## 2.2 Reaktorityypit

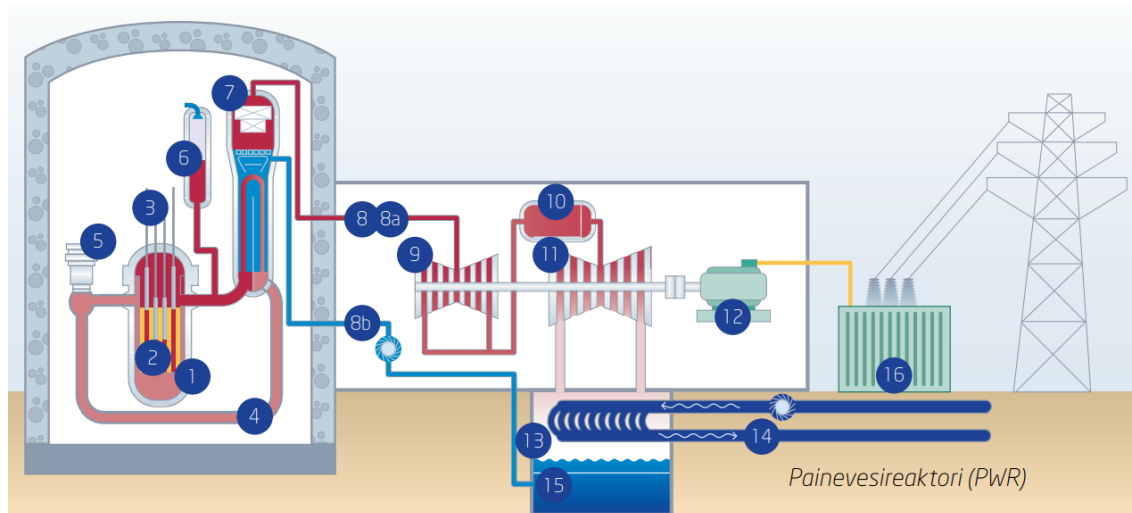
Kiehutusvesireaktorin (Boiling Water Reactor, BWR) toiminta perustuu suljettuun kiertoon, jossa ydinreaktion hidasteaineena sekä jäähdytteenä toimivaa kevytvettä keitetään fissiosta vapautuvalla energialla. Höyrystynyt vesi johdetaan turpiinilaitokselle korkeapaineturpiiniin ja edelleen välitulistimien jälkeen matalapaineturpiiniin pyörittämään generaattoria. Matalapaineturpiinin jälkeen höyry johdetaan lauhduttimeen ja sen jälkeen pumpataan vetenä takaisin reaktoriin. Kiehutusvesireaktori on maailman toiseksi yleisin ydinreaktorimuoto. Lauhduttimessa käytetään lopullisena lämpönieluna (eng. ultimate heat sink) joko vettä tai ilmaa riippuen voimalaitoksen sijainnista. Kuvassa 1 on esitetty kiehutusvesilaitoksen toiminta.



Kuva 1: Kiehutusvesireaktorin toimintaperiaate ja -laitoksen osat: 1. polttoainesauvat, 2. säätösauvat, 3. pääkiertopumput, 4. korkeapaineturpiini, 5. välitulistin, 6. matalapaineturpiini, 7. generaattori, 8. lauhdutin, 9. jäähdytysvesikierto ja 10. syöttövesipumppu.

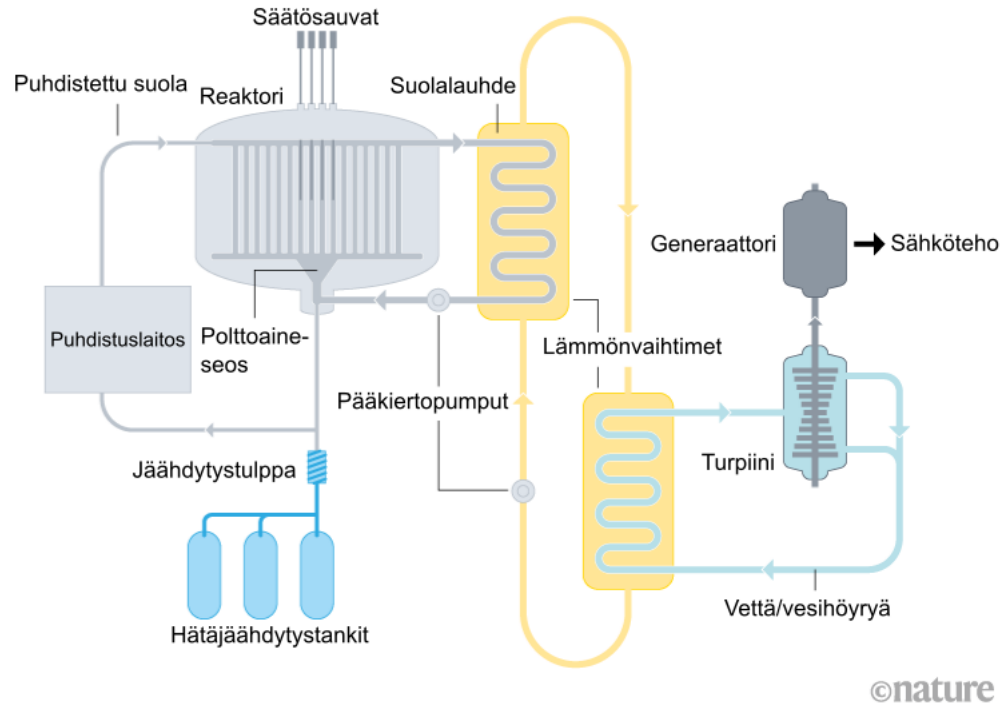
Lainattu viitteestä [8].

Painevesireaktori (Pressurized Water Reactor, PWR) on maailman yleisin ydinreaktori-tyyppi. Se eroaa kiehutusvesireaktorista kahden toisistaan erillisen suljetun kiertonsa ansiosta. Primääripiirin vesi on kovassa paineessa, minkä seurauksena se ei höyrysty reaktorissa. Veden kierrättäminen primääripiirissä tapahtuu pääkiertopumppujen avulla. Höyrystimissä primääripiirin paineistettu kuuma vesi siirtää lämpöä sekundääripiiriin, jonka vesi höyrystyy. Sekundääripiirin kylläinen höyry toimii vastaavalla tavalla turpiinilaitoksessa kuin kiehutusvesilaitoksessa. Kahden suljetun kierron takia, sekundääripiiriin ja turpiinipuolelle ei päädy radioaktiivisia aineita. Kuvassa 2 on esitelty, miten painevesilaitos eroaa kiehutusvesilaitoksesta kahdella suljetulla kierrolla.



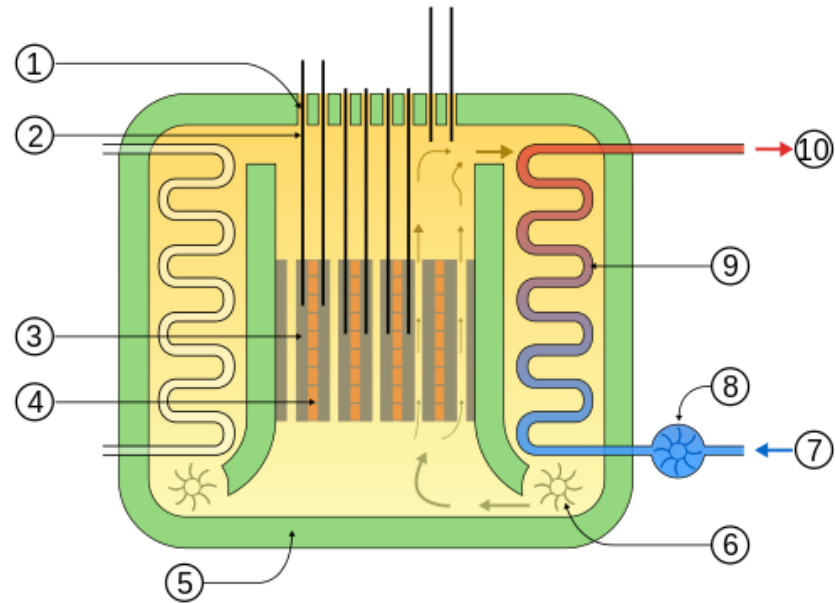
Kuva 2: Painevesireaktorin toimintaperiaatekaavio ja -laitoksen osat: 1. reaktori, 2. sydän, 3. säätösauvat, 4. primääripiiri, 5. pääkiertopumppu, 6. paineistin, 7. höyrystin, 8. sekundääripiiri, 8a. höyry turpiinille, 8b. syöttövesi turpiinille, 9. korkeapaineturpiini, 10. välitulistin, 11. matalapaineturpiini, 12. generaattori, 13. lauhdutin, 14. merivesipiiri, 15. lauhde ja 16. muuntaja. Lainattu viitteestä [9].

Sulasuolareaktorissa (Molten Salt Reactor, MSR) käytetty ydinpolttoaine, yleensä radioaktiivinen torium (Th), on sulaneena jäähdyttäväväliaineena käytetyn suolan seassa. Reaktoriastiassa kuumennut sulanut polttoaine ohjataan lämmönvaihtimiin, joissa lämpöenergia siirretään esimerkiksi hiilidioksidin avulla generaattoria pyörittävään kaasuturpiiniin. Sulasuolareaktorin etuja verrattuna kevytvesilaitoksiin ovat parempi turvallisuus sen alhaisen paineen ja nestemäisen polttoaineen takia sekä jatkuva huollon ja polttoaineen lisäyksen mahdollisuus käytön aikana. Kuvassa 3 on esitelty sulasuolareaktorin toimintaperiaatekaavio.



Kuva 3: Sulasuorareaktorin toimintaperiaatekaavio ja -laitoksen osat. Lainattu viitteestä [10].

Kaasujäähdytteisessä reaktorissa (Gas-cooled Reactor, GR) ydinreaktorin hidastinaaineena käytetään grafiittia ja jäähdytinaineena kaasua, yleensä hiilidioksidia. Kaasujäähdytteisistä generaattoreista käytetään tarkentavia lisätermiä, esim. britannialainen kehittynyt kaasujäähdytteinen reaktori (Advanced Gas-cooled Reactor, AGR) tai korkean lämpötilan kaasujäähdytteinen reaktori (High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR). Kaasujäähdytteisen reaktorin koko on moninkertainen verrattuna muihin reaktorityyppeihin, sillä turpiinia pyörittävä vesi johdetaan reaktorin sisään erillisessä kierrossa, jolloin jäähdytinkaasu pääsee höyrystämään vettä. Kaasua kierrätetään reaktorissa erillisten tuulettimien avulla. Kuva 4 esittää kaasujäähdytteisen reaktorin reaktoripuolen yksinkertaistettua poikkileikkausta. Turpiinipuolen toiminta vastaa täysin edellä esitettyjen BWR- ja PWR-laitosten turpiinipuolten toimintaa.



Kuva 4: AGR:n poikkileikkaus  
 1. polttoaineen latauskammio, 2. säätösauva, 3. grafiittihi-  
 dastin, 4. polttoaine-elementit, 5. reaktoripaineastia ja säteily suoja, 6. kaasun kiertotuu-  
 letin, 7. sekundääripiirin syöttövesi, 8. pääkiertopumput, 9. lämmönvaihdin ja 10. vesi-  
 höyryä. Lainattu viitteestä [11].

Hyötöreaktori (eng. Breeder Reactor) tekee köyhästä polttoaineesta itselleen rikkaam-  
 paan. Käytännössä hyötöreaktori tuottaa enemmän polttoainetta kuin itse kuluttaa. Hyö-  
 töreaktori on kooltaan pienempi, niillä on huomattavasti suurempi polttoaineen hyöty-  
 suhde ja pidempi polttoaineen vaihtoväli verrattuna tavallisiin kevytvesireaktoreihin. Hyö-  
 töreaktoreissa ei ole erillistä hidastinainetta, vaan fissiili polttoaine on sekoitettuna osaksi  
 jäähdytinainetta, esimerkiksi sulasuolaa tai lyijyä. Edellä esitetty sulasuolareaktori on eri-  
 tyistapaus hyötöreaktorista. Hyötöreaktori on laajalti tutkittu reaktorityyppi sen polttoai-  
 neominaisuuksien takia, mutta sen kehitystyö keskeytettiin 1980-luvulla, kun uusia uraa-  
 niesiintymiä löydettiin ja uraanin rikastusprosessi muuttui halvemmaksi sentrifugitekniik-  
 kan kehittyessä. [12] IAEA:n kansainvälinen ydinreaktorien ja polttoainesyklien innovoin-  
 tiprojekti (INPRO) on uudelleenkäynnistänyt hyötöreaktorien kehitystyön. Hyötöreaktori  
 nähdään taas potentiaalisena laitosmallina. [13] Tällä hetkellä käyttöönottovaiheessa on  
 12 eri valmistajan suuren kokoluokan hyötöreaktoria ja kehitteillä 11 pienhyötöreaktoria.  
 [12]

Ydinvoima ei kuitenkaan ole prosessin hyötösuhteen kannalta tehokkain energiantuo-  
 tantomuoto. Kun vesivoimalat yltyvät lähes 90 % hyötösuhteisiin, tyytyvät ydinvoimalat  
 normaalisti noin 33–36 % hyötösuhteisiin. Korkean lämpötilan kaasujäähdytteen reaktori-  
 nin hyötösuhde voi kuitenkin olla lähes hiilivoimaloita vastaava 45 %. [14]

## 2.3 Pienreaktori-konsepti

IAEA määrittelee pienreaktorin reaktoriksi, jonka sähköteho on alle 300 MW ja lämpöteho alle 1 000 MW. WANO listaa modulaaristen pienreaktorien mahdollisiksi ominaisuuksiksi:

- Pienitehoinen ja kompakti arkkitehtuuri ja yleensä (vähintään ydinteknisten lämmönkehitysjärjestelmien ja liittyvien turvajärjestelmien) passiivisten järjestelmien hyödyntäminen. Täten tukeutumista aktiivisiin turvajärjestelmiin ja erillisiin pumppeihin sekä vaihtosähköjärjestelmien varmentamista onnettomuuksien varalta voidaan vähentää,
- Kompakti arkkitehtuuri mahdollistaa modulaarisen rakenteen ja sarjavalmistuksen (tehtaissa), mikä myös voi mahdollistaa korkeampien turvallisuusstandardien implementoinnin,
- Pienempi teho johtaa lähdetermin pienentymiseen ja samalla pienempään radioaktiiviseen ydinainemäärään reaktorissa,
- Potentiaali reaktorin alaluokan (maan- tai vedenalainen) sijoitukselle siten mahdollistaen lisäsuojausta luonnollisilta (esim. maanjäristys tai tsunami laitoksen sijainnista riippuen) tai ihmisen aiheuttamilta (esim. lentokoneen törmäys) vaaroilta,
- Modulaarinen rakenne ja pieni koko mahdollistavat monen reaktoriyksikön sijoittamisen samaan laitokseen,
- Pienempi vaatimus jäähdytysveden saatavuudelle, täten sopiva syrjäisille alueille ja tiettyihin erikoissovelluksiin kuten kaivostoimintaan ja suolanpoistoon,
- Mahdollisuus reaktorimoduulin poistamiseen kokonaisuutena tai laitosaseman käytöstäpoistoon eliniän päätyttyä [15].

Pienreaktori ei ole tekniikan alalla uusi keksintö. Yhdysvallat ja Neuvostoliitto saivat molemmat 1950-luvun loppuun mennessä varustettua sukellusveneensä pienillä ydinreaktoreilla. Myös ASEA-Atomilla oli omat pienreaktorikonseptinsa (SECURE ja PRIUS) 1980-luvulla. Ensimmäisiä sukellusveneiden voimalähteinä toimivia pienreaktoreja ei suunniteltu mahdollistamaan polttoaineen vaihtoa, vaan toimimaan yhdellä latauksella koko aluksen elinkaari yli 30 vuotta. [16] [17]

Monet pienreaktorit ovat suunniteltuja niin kaukolämmöntuotantoon kuin myös sähkön tuotantoon. Pieniä kevytvesireaktoreita rajoittavat painerajoitukset, joten niiden käyttö-

lämpötila on käytön aikana 300–400°C. Muut reaktorityypit voivat operoida korkeammissa lämpötiloissa. Käyttölämpötilat ovat muilla reaktorityypeillä luokkaa: hyötöreaktori 400–600°C, MSR 600-700°C ja AGR 600-900°C. [15] Käyttölämpötilojen puitteissa turvalliseen sähkön- ja lämmöntuotantoon soveltuvat parhaiten kevytvesireaktorit LWR ja PWR. Muut reaktorityypit, kuten MSR ja AGR, soveltuvat soveltavaan suurteollisuus lämmöntuotantoon tai termokemiallisen vedyn valmistukseen. [18]

Suurien ydinvoimalaitosten rakennushankkeissa myös verkon kantokyky (jäykkyys ja inertia) on ratkaiseva tekijä. Sähköverkon on kestävä yli tuhannen megawatin hetkellinen tehovaje voimalaitoksen irrotessa äkillisesti kantaverkosta. Yhdellä modulaarisen laitoksen moduulilla ei ole tätä ongelmaa, eikä yhdellä reaktorilla täten suurta merkitystä koko sähköverkolle.

### **2.3.1 Turvajärjestelyt ja turvallisuusjärjestelmät**

Ydinvoimaloissa turvallisuus on erityisen tärkeää. Ydinvoimaloiden turvallisuuspolitiikka eroaa muista voimalaitoksista, niin turvajärjestelyjen kuin turvallisuusjärjestelmien osalta. Ydinvoimalaitosten turvajärjestelyllä tarkoitetaan laitoksen fyysistä turvaamista tahallisen vahingon tai luvattoman tunkeutumisen varalta. Turvallisuusjärjestelmien tehtävänä puolestaan on estää laitoshäiriön kehittyminen onnettomuudeksi sekä onnettomuuden tapahtuessa rajoittaa onnettomuuden seurauksia. Onnettomuuden sattuessa voi vapautua radioaktiivista säteilyä, kaasua tai hiukkasia, jotka ovat vaarallista elävälle kudokselle. Tämän takia turvallisuusmenettelyihin kiinnitetään erityistä tarkkuutta ja huolellisuutta.

Ydinturvallisuussuunnittelu perustuu yleiseen ydinturvallisuuden ylläpitoon, minkä tarkoituksena on suojata, ennaltaehkäistä ja varautua radiologisiin vaaratilanteisiin. Tavoitteena on ylläpitää korkeaa standardia säteilyltä suojautumiseen, eli pitämään säteilyn ja radioaktiivisten aineiden vapautuminen ydinvoimalaitoksessa tai suunnitellussa päästöissä alle viitearvojen tai mahdollisimman alhaisena. Minkä tahansa radiologisten seurausten lieventäminen onnettomuuksien sattuessa on välttämätöntä. [19]

SMR-turvallisuussuunnittelun lähtökohtana on "turvaa suunnittelulla" -ajattelu eli mahdollisuuksien mukaan eliminoidaan vahingon mahdollisuus, pienennetään onnettomuuksien todennäköisyyksiä ja ennaltaehkäistään seurauksia. Oikealla suunnittelulla reaktoreista saadaan yksinkertaisempia, turvallisempia ja taloudellisempia. [19] Suurin osa

suunnitteluperusteita ovat samat riippumatta reaktorityypistä, mutta eri toimintaperiaatteilla toimivien reaktorien välillä on välttämättömiä eroavaisuuksia, joita käsitellään reaktorityyppikohtaisesti.

Turvajärjestelmien kriittiset toiminnot ovat reaktiivisuuden hallinta, lämmön ja jälkilämmön poisto sydäimestä ja kaiken radioaktiivisen materiaalin eristäminen ja valvonta. Pienreaktorien turvajärjestelmät jaotellaan kolmeen luokkaan: rakenteellisiin turvaratkaisuihin, passiivisiin turvajärjestelmiin ja aktiivisiin turvajärjestelmiin. Rakenteellisiin turvaratkaisuihin kuuluvat reaktorirakennus, suojarakennus ja reaktorin paineastia ympäristöineen. [20]

Passiiviset turvajärjestelmät määritellään siten, että turvajärjestelmät käyttävät luonnonilmiöitä suojaamisessa ja tapahtumien lieventämisessä. Luonnonilmiöllä tarkoitetaan tässä tapauksessa konvektiota, johtumista ja gravitaatiota. Konvektiossa kaasu tai neste siirtyy lämpötilaerojen aiheuttamien virtausten mukana. Johtuminen tasoittaa lämpötilaeroja kappaleessa lämpöopin lainalaisuuksien mukaisesti korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Sijoittamalla säätösauvat sydämen yläpuolella ja hoitamalla hätälaukaisumekanismit gravitaation avulla, voidaan korvata kaasu- ja sähkötoimiset apulaitteet, joita tarvittaisiin säätösauvojen operointiin sydämen alapuolelta. Tällä tavalla reaktorin turvajärjestelmät eivät ole riippuvaisia esimerkiksi sähkönsyötöstä, moottoreista, toimitteista tai pumpuista. Ongelmaksi passiivisilla turvajärjestelmillä muodostuu luonnonilmiöiden heikko voimakkuus voimalaolosuhteissa, esimerkiksi voimakkaita luonnollisia ilmvirtauksia ei esiinny suljetun reaktorirakennuksen sisällä. Pienreaktorien suunnittelussa passiiviset turvaratkaisut ovat nousseet keskeiseen rooliin.

Aktiivinen turvajärjestelmä tarvitsee aina operaattorin toimintaa, ulkoista tehoa, voimaa tai signaalin, esimerkiksi moottoritoimisen venttiilin avautuminen tai pumpun ylläpitämä jäähdytysvirtaus. Riippuvuus ulkoisesta tehosta altistaa Fukushima onnettomuuden kaltaisille tapahtumille, mutta riippuvuutta voidaan vähentää erilaisilla ja erillisillä ulkoisilla tehonlähteillä, kuten akkujärjestelmillä tai varavoimageneraattoreilla (redundanssi ja diversiteetti).

Taulukoissa 1 ja 2 on verrattu nykyisen toimivan kolmannen sukupolven laitoksen turvallisuus- ja apujärjestelmien potentiaaliseen SMR vastaaviin järjestelmiin.



Taulukko 1: Nykysukupolven laitosturvajärjestelmät verrattuna potentiaaliseen SMR turvajärjestelmämalliin. Lainattu viitteestä [20].

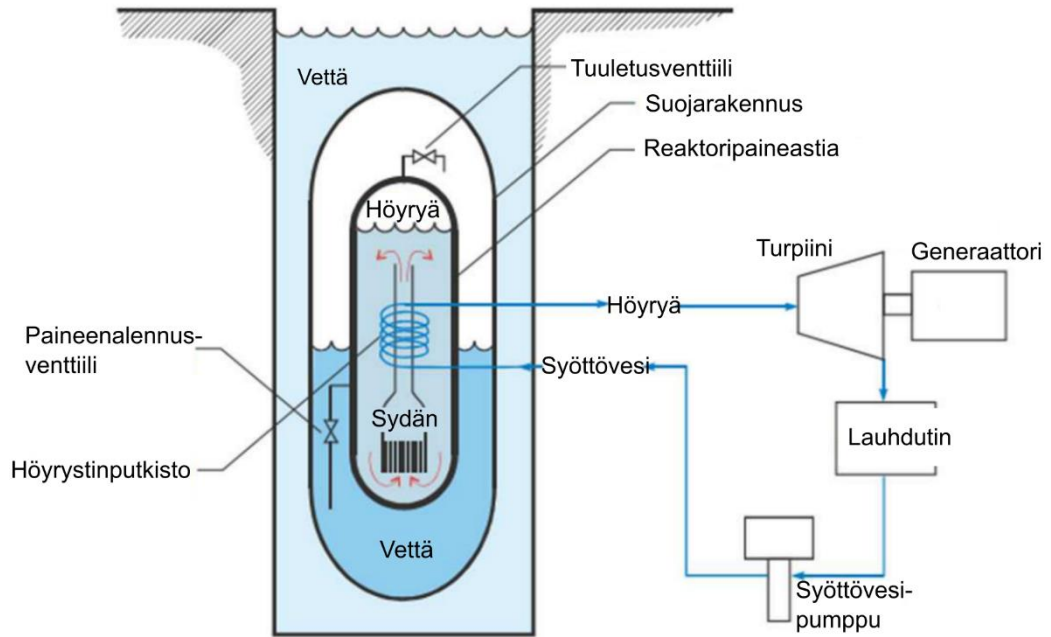
Nykysukupolven LWR turvajärjestelmä	SMR turvajärjestelmä
Korkeapaineinen hätälisävesijärjestelmä. Matalapaineinen hätälisävesijärjestelmä.	Ei vaadi aktiivista lisävesijärjestelmää. Ytimen jäähdytys hoidetaan passiivisilla järjestelmillä.
Hätäsumppi ja liittyvät imukorkeuden (NPSH, Net Position Suction Head) vaatimukset turvallisuuteen liittyville pumpuille.	Ei turvallisuuteen liittyviä pumppuja onnettomuuden lieventämiseen; ei tarvetta reaktorirakennuksen lattiakaivolle (sumppi) tai niiden imusyötölle.
Hätädieselgeneraattori (EDG).	Passiiviset turvaratkaisut eivät vaadi sähkönsyöttöä ylläpitämään ytimen jäähdytystä. Jäähdytys tapahtuu lämmönjohtumilla reaktoriastian lävitse.
Suojarakennuksen aktiivinen lämpeneminen.	Passiivinen lämmön torjuminen suojarakennuksesta.
Suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä.	Ruiskutusjärjestelmää ei tarvita alentamaan höyrynpainetta tai poistamaan radiojodia suojarakennuksessa.
Sydämen hätäjäähdytysjärjestelmän (ECCS) käynnistäminen, instrumentointi ja kontrollointi. Monimutkainen järjestelmä vaatii suuren määrän testausta, mikä lisää laitoksen epäluotettavuutta ja turvajärjestelmien tahatonta käynnistymistä.	Yksinkertaisemmat ja/tai passiiviset turvajärjestelmät vaativat vähemmän testauksista eivätkä ole yhtä alttiita tahattomille käynnistymisille.
Hätäsyöttövesijärjestelmä, kylläisen höyryn varastotankit ja liittyvät hätäjäähdytysvesivarastot.	Kyky jälkilämmön poistoon ilman hätävesijärjestelmää on huomattava turvallisuusparannus.

Taulukko 2: Nykysukupolven laitosapujärjestelmät verrattuna potentiaaliseen SMR apujärjestelmämalliin. Lainattu viitteestä [20].

Nykysukupolven LWR apujärjestelmä	SMR apujärjestelmä
Pääkiertopumppujen tiivisteet. Tiivisteiden vuoto on turvallisuusriski. Tiivisteiden huolto ja vaihto ovat kalliita ja aikaa vieviä toimenpiteitä.	Integroitu suunnittelu poistaa tiivisteiden tarpeen
Lopullinen lämpönielu ja sen toiminnan vaarantavat järjestelmät. Joki- ja merivesijärjestelmät ovat aktiivisia järjestelmiä, alttiita toiminnan menetykselle äärimmäisten sääolosuhteiden ja laitteiden likaantumisen tai sähkönsyötön menetyksen seurauksena.	SMR laitokset ovat passiivisia ja siirtävät lämpöä johtamalla ja konvektiolla. Lämmön siirtämistä ulkoiseen vesistöön ei vaadita.
Suljetut jäähdytysvesijärjestelmät vaaditaan ylläpitämään ytimen ja laitteistojen lämmönpoiston turvajärjestelmiä	Turvajärjestelmät eivät vaadi suljettua jäähdytysvesijärjestelmää
LVI-järjestelmä. Edellytys laitoksen turvajärjestelmien oikean käytön tukemiselle.	Laitossuunnittelu minimoi tai poistaa turvallisuuteen liittyvän huonejäähdytystarpeen sekä LVI-järjestelmän, että siihen liittyvät suljetut vesijärjestelmät.

Taulukosta 1 ja 2 on luettavissa passiivisten turva- ja apujärjestelmien ja laitosprosessin yksinkertaistamisen vaikutukset turvajärjestelyihin.

Reaktoripaineastian pieni koko ja siten suojarakennuksen pieni koko mahdollistavat koko suojarakennuksen upottamisen veden alle. Kuvassa 5 on esitetty veden alle upotetun PWR suojarakennuksen passiivisia turvajärjestelmiä.



Kuva 5: Veden alle upotetun suojarakennuksen poikkileikkaus. Kuva lainattu viitteestä [21].

Kuvasta 5 huomataan, että primäärikierrrossa ei ole pääkiertopumppuja ollenkaan. Reaktoripaineastian sisälle voidaan sijoittaa reaktoriydin, paineistin, höyrygeneraattorit ja säätösauvatoimilaitteet. Ytimessä kuumennut vesi kulkeutuu konvektiolla kierrätyslinjan luonnollista kiertoreittiä pitkin höyrygeneraattoriin. Vesi luovuttaa johtumalla energiaansa sekundääripiiriin ja palaa viilennyttyään painovoiman avulla paineastian pohjalle uusia kiertoa. [21]

Tämä suunnittelu poistaa pääkiertopumput ja ulkoisen höyrystimen putkilinjat sekä reaktoripaineastian ylimääräiset läpiviennit, mikä myös vähentää vuodon riskejä. Kaikki tarpeelliset läpiviennit voidaan sijoittaa reaktoripaineastian kannelle tai ainakin reaktoriydämen yläpuolelle. Onnettomuustilanteessa reaktoripaineastian paineenalennusventtiili aukeaa ja muodostunut höyry voidaan puhalttaa ulos reaktoripaineestiasta suojarakennukseen. Kylläinen höyry tiivistyy osuessaan vedellä tai ilmalla viilennettyyn suojarakennuksen seinään ja valuu suojarakennuksen seinää pitkin rakennuksen pohjalle. Kun kaikki venttiilit ovat sydämen yläpuolella, voidaan suojarakennukseen tiivistynyttä vettä syöttää takaisin reaktoripaineastiaan poistamaan reaktorin jälkilämpöä. Näin saadaan muodostettua suljettu passiivinen jäähdytysvedenkierto. Veden pinta ei pääse laskemaan reaktoriydämen pinnan alapuolelle missään suunnitellussa tilanteessa. [22]

Suuri vesiallas voi samalla toimia lopullisena lämpönieluna onnettomuuden sattuessa. Altaan koon ollessa tarpeeksi suuri, jälkilämpöä pystytään poistamaan vuorokausia.

Vesi-inventaarin höyrystyttyä voidaan jo jäähtynyttä paljastunutta suojarakennusta jäähdyttää pelkästään ilman avulla, mikäli lisäveden pumppaaminen altaaseen ei ole mahdollista. [22]

Pienreaktorien modulaarinen suunnittelu takaa sen, että tapahtuma yhdessä moduulissa ei aloita tai pahenna tapahtumaa toisessa moduulissa. Muiden moduulien on kyettävä samanaikaiseen ja turvalliseen reaktorin sammutukseen ja turvalliseen tilaan saattamiseen. Onnettomuuden sattuessa pienreaktori on kokonsa puolesta pienempi radioaktiivisuuden lähde, jolloin myös ongelmallinen jälkilämpöteho on pienempi. Pieni koko myös pienentää mahdollisten radioaktiivisten päästöjen haittavaikutuksia ympäristössä.

### **2.3.2 Reaktorin sijoitus maanpinnan alapuolelle**

Pienen kokonsa takia SMR-laitoksien yhteydessä on herännyt ajatus ydinvoimalaitoksen sijoittamisesta osittain tai kokonaan maan alle. Pienreaktorit voidaan rakentaa myös konventionaalisesti maan päälle tai luonnollisiin kallioluoliin. Reaktorin apujärjestelmät voidaan sijoittaa reaktorin kanssa samalle syvyydelle tai vaihtoehtoisesti maamassan sisälle tai kokonaan maanpinnan yläpuolelle.

Hyötyinä upotetussa rakentamismallissa on pohjaveden virtaus avointa tilaa siis louhitua reaktorirakennusta kohti, mikä estää kontaminaation leviämisen. Kallioluolia on myös suurissa kaupungeissa valmiina sopivilla sijaintipaikoilla kaukolämpölaitoksia varten (kuten esimerkiksi Helsingin Salmisaaren hiilisiiilot). Maaperä tarjoaa osittain tai kokonaan maanpinnan alapuolelle sijoitetulle reaktorille luonnollista suojaa rajuja sääilmiöitä, onnettomuuksia ja lainvastaisia toimia vastaan. [18]

Osittain tai kokonaan maan alle rakennettaessa tulee ottaa huomioon pohjaveden poiston varmennus ja luokse päästävyden varmistaminen kalliotiloissa. Pohjavesikaivojen erillinen ilmastointi on välttämätöntä radontuuletuksen takaamiseksi. Vaikka luolan kalliorakenteiden sortuminen on epätodennäköistä, niin onnettomuuden todennäköisyyttä ei voida täysin sulkea pois. [18] Koska reaktorin tulee olla kykenevä toimimaan vaihtelevissa sijoituskohteissa, kallioluolasijoitus ei voi olla ainoa suunnitteluperuste.

Maan alle rakentaminen ei tuota erityistä etua säteilyturvallisuuden kannalta. Ympäristöön leviävä säteilykontaminaatio aiheutuu onnettomuustilanteen päästöistä, ei suorasta säteilystä. Suojarakennuksen tiiveys tulee varmistaa samalla tavalla kuin maan päälle rakennettavissa laitoksissa. Poistumis- ja pelastusreitit maan alta asettavat myös omat turvallisuushaasteensa. [18]

### 3. SMR-REAKTORIKONSEPTIT

Tässä kappaleessa tutustutaan eri käyttökohteisiin tarkoitettuihin pienreaktoreihin ja niiden kehityksen nykytilaan. Reaktorit on jaoteltu niiden käyttötarkoituksen mukaan kahtia: sähköntuotantoon sopivat reaktorit ja kaukolämmöntuotantoon sopivat reaktorit. Tiettyjä reaktoreita voidaan käyttää myös yhteistuotannossa, jossa tuotetaan sekä sähköä että lämpöä, joko teollisuusprosesseihin tai kaukolämpöverkoston. Kappaleessa esitetyt reaktorikonseptit on esitetty taulukossa 3.

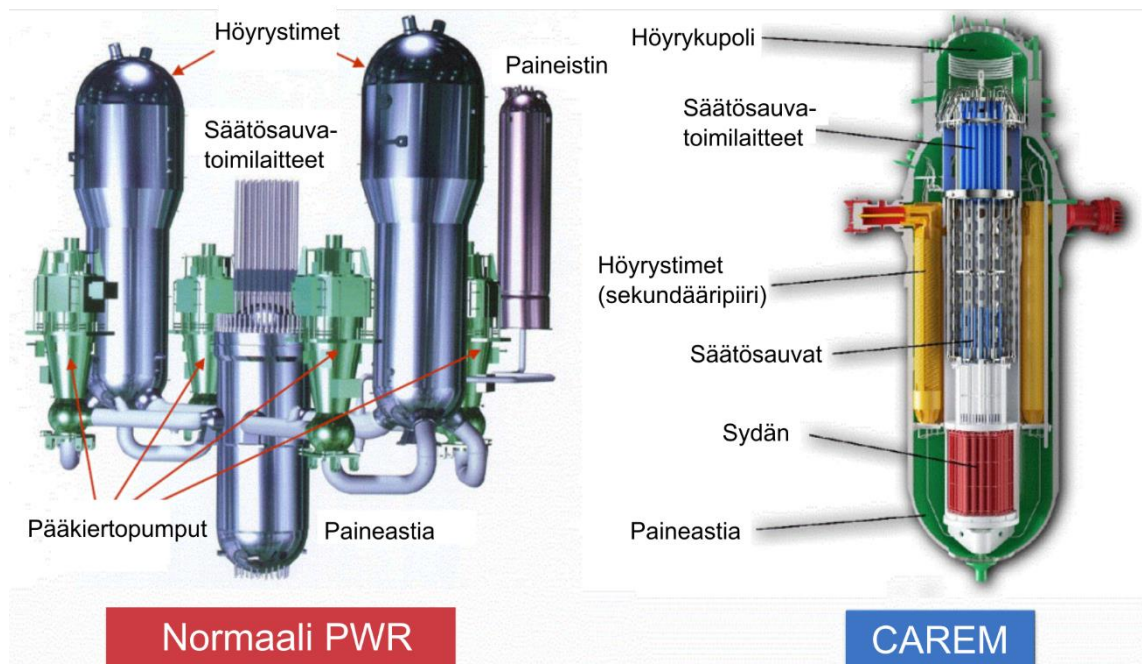
Taulukko 3: Työssä esiteltävät reaktorikonseptit.

Reaktorikonsepti	Sähköteho MW(e)	Lämpöteho MW(t)	Reaktori-tyyppi	Maa	Status
CAREM	30	100	PWR	Argentiina	Rakenteilla
NuScale	60	200	PWR	USA	Lisensoitavana
KLT-40S	35	150	PWR	Venäjä	Käytössä
HTR-PM	210	250x2	HTGR	Kiina	Käytössä
LDR-50	-	50	PWR	Suomi	Esisuunnittelu
SMART	107	365	PWR	Etelä-Korea/ Saudi Arabia	Lisensoitu

#### 3.1 Sähköntuotanto

**CAREM** on argentiinalainen luonnonkierrolla toimiva PWR laitos. CAREM:ia pidetään yhtenä SMR-tekniikan lippulaivana yhdysvaltaisen NuScalen kanssa. Reaktori on lämpötehoaan 100 MW(t) ja sähkötehoaan noin 30 MW(e). Argentiinan kansallisen atomienergiakomission (Argentina's National Atomic Energy Commission, CNEA) tavoitteena on ollut suunnitella maailman ensimmäinen innovatiivinen ja kotimainen pienreaktori, CAREM on suunniteltu rakennettavaksi vähintään 70 % argentiinalaisten yritysten komponenteista ja palveluilla. CAREM on suunniteltu sijoitettavaksi pienikulutteiselle rannikkoseudulle ja tarpeen mukaan reaktoria voidaan myös käyttää meriveden suolapoistoon. Prototyypireaktorin rakentaminen aloitettiin 2014 Atuchan ydinlaitosalueelle ja projektin myöhästymisen jälkeen reaktorin ensimmäinen kriittisyys on tavoitteena saavuttaa 2023. [23] [24] Ensimmäinen kriittisyys tarkoittaa täysin uuden ketjureaktion käynnistämistä eli hetkeä, jolloin uraaniytimiä halkaisemalla saadaan energiaa ensimmäistä

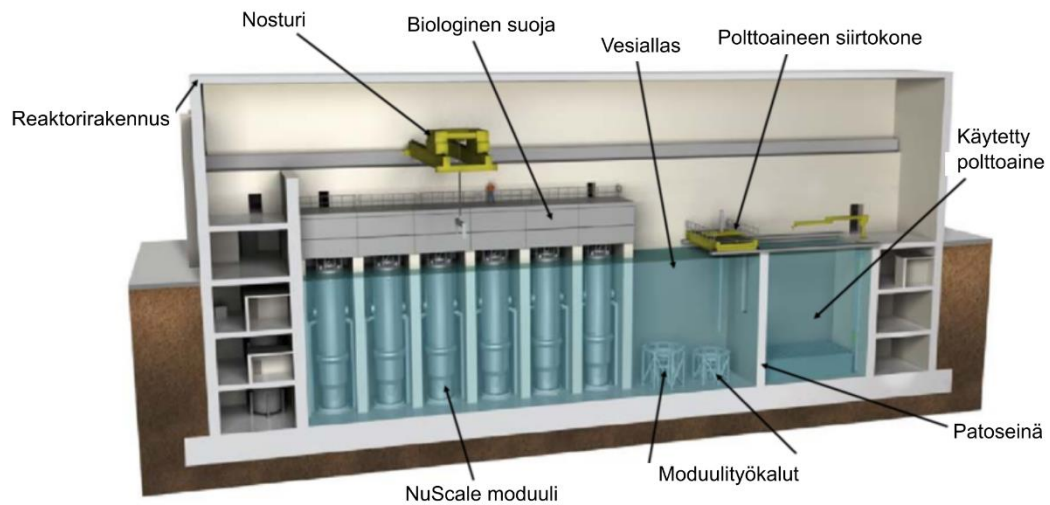
kertaa. Sitä pidetään ydinvoimalan rakentamisprosessin yhtenä merkittävimmistä virs-  
tanpylväistä. Kuvassa 6 on esitetty normaalin PWR-reaktorisaarekkeen ja CAREM-pien-  
reaktorin rakenteellisia eroja.



Kuva 6: Normaalin PWR ja CAREM rakenteelliset eroavaisuudet. Kuva lainattu viit-  
teestä [24].

Kuvasta 6 nähdään oleelliset eroavaisuudet standardi-PWR:n ja CAREM:n välillä, pää-  
kiertopumput ja paineistin puuttuvat CAREM:sta ja suuret höyrystimet on sijoitettu  
PWR:n ulkopuolelle integroidun ratkaisun sijasta.

**NuScale** on yhdysvaltalaisen NuScale Powerin suunnittelema ja kelpoistama kevytvesi  
PWR. Yksi moduuli on lämpöteholtaan 200 MW(t) ja sähköteholtaan 60 MW(e). Suunni-  
teltu NuScale voimalaitos tulisi koostumaan kahdestatoista moduulista, jolloin koko lai-  
toksen kooksi tulisi 2400 MW(t) / 720 MW(e), mikä luokitellaan jo suureksi ydinvoima-  
laksi. Kaikkia kahtatoista reaktoria voidaan monitoroida yhdestä valvomosta yhden käyt-  
töhenkilökunnan voimin. Reaktorimoduuli on suunniteltu kriittisiltä turvajärjestelmiltään  
täysin passiiviseksi ja onnettomuuden sattuessa jälkilämmön poisto tapahtuu rajoitta-  
mattoman ajan ilman ulkoista sähköenergiaa, lisäjähdytysvettä altaaseen tai operaat-  
torin toimintaa. [23] Kuvassa 7 on esitetty kahdentoista moduulin NuScale laitoksen poik-  
kileikkaus:



Kuva 7: NuScale-laitoksen reaktorirakennuksen poikkileikkaus. Kuva lainattu viitteestä [25].

NuScale on saanut Yhdysvaltojen hallitukselta virallisen hyväksynnän laitoksen suunnittelusta, mitoituksesta, laitteiden valmistusvaatimuksista ja käyttöönottosuunnitelmasta [18]. Hyväksyntä on voimassa 15 vuotta, jonka aikana voidaan aloittaa moduulien sarjatuotanto. Täyden kokoluokan 12 moduulin laitosta aloitetaan rakentamaan Yhdysvaltoihin vuonna 2023 ja ensimmäisen kahdestatoista moduulista on tarkoitus aloittaa toimintansa vuonna 2027 [23].

**KLT-40S** on Venäjän valtion ydinenergiakorporaatio Rosatomin tytäryhtiö OKBM Afrikantovin kehittämä, lisensoima ja rakentama pienreaktori. Reaktori on teholtaan 150 MW(t)/ 35 MW(e) ja tyypiltään PWR. KLT-40S reaktori on suunniteltu sijoitettavaksi laivaan, jolloin kelluva ydinvoimalaitos voidaan kuljettaa tarpeen mukaan ympäri maailmaan. Rajoittavana tekijänä on vesiyhteys käyttökohteeseen. Reaktori luottaa pääasiassa aktiivisiin turvajärjestelmiin ja koko suojarakennus voidaan onnettomuuden sattuessa upottaa mereen. Kaksi KLT-40S reaktoria on sijoitettu venäläisen Akademik Lomonsovi 1 & 2 laivan kyytiin. Laivan ja täten laitoksen kooksi saatiin 144,4 m pitkä ja 30 m leveä alus. Sama KLT-40S reaktori on myös käytössä jäänmurtajien ja öljynporauslauttojen tehonlähteenä. Kesällä 2019 ensimmäinen KLT-40S sijoitettiin aluksen kyytiin ja vuoden 2020 alussa kytkettiin syrjäisen Pevekin kaupungin sähköverkkoon Siperian merellä. [23] Koko aluksen hinnaksi on arvioitu 400–480 milj. US\$ ja alusta sekä verkoliitääntä varten rakennetun rantainfran kustannuksiksi 111 milj. US\$. [26]

**HTR-PM** on kiinalaisvalmisteinen, maailman ensimmäinen, siviilikäyttöinen kantaverkkoon kytketty pienreaktori. Reaktorin rakennustyöt aloitettiin 2012 ja kaupallinen tuotanto

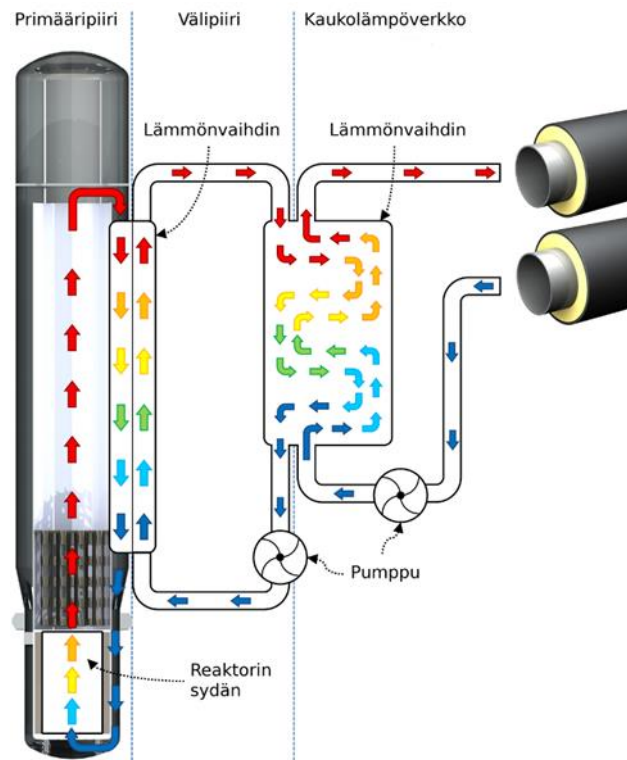
alkoi joulukuussa 2021 [27]. HTR-PM on reaktorityypiltään HTGR ja tehoiltaan 2x250 ME(t)/ 210 MW(e). Laitos sisältää kaksi reaktoria, jotka molemmat tuottavat 250 MW(t) ja syöttävät omien höyrystimien kautta höyryä turpiinilaitokselle. HTR-PM eroaa muista esitellyistä reaktoreista, sillä sen polttoaine on sauvamuodon sijasta kuulina. Noin tennispallon kokoisten grafiittikuulien sisällä on keraamilla päällystettyjä uraanihiukkasia. Grafiitti toimii samalla hidastinaineena ja kaasureaktorissa jäähdytinaineena toimiva kaasu virtaa kuulien välissä. Kuulareaktorin etuina on mm. käytönaikainen polttoaineen vaihto ja käytetyn polttoaineen sopimattomuus ydinasetuotantoon. [23]

### 3.2 Kaukolämmöntuotanto

Kaukolämpö on Suomen yleisin lämmitysratkaisu, huippukuormitus kylmänä talvipäivänä on noin 2 500 MW. Kaukolämpö ei ole pelkästään Pohjoismainen erikoisuus, sillä myös Itä- ja Keski-Euroopassa on laajat kaukolämpöverkostot. Koko Euroopassa kaukolämpöä tuotetaan lähes 5 000 TWh/a. [28]

**LDR-50** (Low-temperature District heating and desalination Reactor, matalalämpötilainen kaukolämpö- ja suolanpoistoreaktori) on Teknologian tutkimuskeskuksen (VTT) kehittämä konsepti ydinkaukolämpölaitoksesta. Projekti aloitettiin helmikuussa 2020 tarkoituksena kehittää kaukolämpölaitos suomalaisille markkinoille. LDR-50-pienydinreaktori on tyypiltään PWR, lämpöteholtaan 50 MW ja käyttölämpötilaltaan 65–120°C. [18] Reaktori kytketään kaukolämpöverkkoon kuvan 8 mukaisesti:





Kuva 8: Kaukolämpöreaktorin toimintaperiaate. Kuva lainattu viitteestä [18].

Erityistä tässä reaktorissa on matala lämpötila ja pitkä, 2–3 vuoden mittainen, polttoaineen vaihtoväli. Kaukolämpölaitos voidaan rakentaa yhdestä tai useammasta 50 MW moduulista sopimaan erikokoisten kaupunkien kaukolämpöverkostoihin. [18] Reaktori on vielä esisuunnitteluvaiheessa, mutta joulukuussa 2021 reaktorin passiivisille jäähdytysratkaisuille myönnettiin merkittävä patentti, ja maaliskuussa 2022 Euroopan komissio palkitsi konseptin Ydininnovaatiopalkinnolla reaktorien turvajärjestelmien kategoriassa [29] [30].

**SMART** (System-integrated Modular Advanced Reactor) on Korean atomien tutkimuslaitoksen (Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI) ja Saudi Arabian energiaministeriön K.A.CARE-hankkeen (The King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy) lisensoima kiinteä PWR pienreaktori. SMART:in on tarkoituksena toimia yhteistuotantoreaktorina, joka tuottaa sähkötehoa 107 MWe ja lämpötehoa 365 MWt. Reaktorin jäähdytysratkaisut ovat suunniteltu toimivan merivedellä, joten sijoitus rannikon läheisyyteen on välttämätöntä. Polttoaineen vaihtoväli on suunniteltu olevan 30 kuukautta. SMART on suunniteltu kattamaan 100,000 asukkaan kaupungin päivittäinen energian ja puhtaan veden tarve (90 MW sähköä ja 40,000 tonnia vettä). [23] [31] Sarjatuotantomallin hinnaksi on arvioitu noin 525 milj. US\$. [26]

## 4. NYKYTILA

Suomessa ydinvoima on sähköteholtaan merkittävin energiatuotantomuoto. Vuonna 2021 lähes kolmasosa kaikesta Suomessa tuotetusta sähköstä tuotettiin ydinvoimalla [32]. Oikiluoto 3 säännöllisen sähköntuotannon käynnistyessä ydinvoimalla tuotetun sähkön osuus Suomessa nousee lähes 40 %:iin. Maailmalla kaikesta tuotetusta sähköstä 10,1 % ja Euroopan Unionissa 26,4 % tuotetaan ydinvoimalla [33] [34]. Ydinvoima on siis maailmalla todettu vakavasti otettavaksi ja perusvoiman tuottamiseen soveltuvaksi tuotantomuodoksi.

Kansainvälisen atomienergiajärjestön (International Atomic Energy Agency, IAEA) tavoitteena on kaksinkertaistaa maailman ydinvoimakapasiteetti vuoteen 2050 mennessä, minkä avulla maailma voisi saavuttaa nollapäästöisen energiantuotannon samalla vuosikymmenellä [35]. Ydinvoima on tehokas, mutta kallis keino leikata ilmastopäästöjä. Suuret ydinvoimalat ovat miljardiluokan investointeja ja rakennusprojektit voimaloiden kelpoistuksien ja monimutkaisen turvallisuusrakenteen takia pitkiä. Sarjavalmistesteiden keskisuurien ja pienten ydinvoimaloiden kaupallistaminen olisi ratkaisu vähäpäästöiseen ja säästä riippumattomaan energiantuotantoon. Ydinvoimaloiden keskeiset ongelmat ovat luvitus, hinta ja pitkä rakentamisaika.

### 4.1 Ydinenergiainsäädäntö

Yli 50 vuoden aikana kehittynyt ammattitaito, maailman suurin yksittäinen voimalaitos ja korkea turvallisuuskulttuuri luovat perustan suomalaiselle, maailman huippua olevalle ydinosaiselle. Suomen ydinenergianlain uudistukselle nähtiin tarve, sillä vanha vielä voimassa oleva laki ei mahdollista pienten modulaaristen reaktorien joustavaa luvitusprosessia [36]. Valtioneuvoston kanslian laatiman selvityksen mukaan ydinenergialakiin tarvitaan erillisten hyväksyntien mahdollisuus sekä laite- ja laitospaikalle sarjatuotannon etujen varmistamiseksi. Myös turvallisuuden ja suojaetäisyyden arvioinnin tulisi perustua osoitettuihin suorituskykyihin. [18]

Suomen ydinenergialaki tuli voimaan 1988. Ydinalan toimintaympäristö on muuttunut huomattavasti lain voimaantulon jälkeen ja tarve uudistukselle on nähty. Uuden ydinenergianlain valmistelu aloitettiin vuonna 2021, lakiluonnoksen on tavoitteena tulla eduskunnan lausunnolle vuonna 2024 ja voimaan seuraavalla vaalikaudella vuonna 2028. Ydinenergialakia täydennetään STUK:n ydinturvallisuusohjeilla, eli YVL-ohjeilla, joita on

viimeksi päivitetty vuonna 2021. Energialakien ja säännösten yhdenmukaistaminen EU-tasolla helpottaisi liiketoimintaa SMR:n ympärillä. [37]

STUK on käynnistänyt oman ydinturvallisuussäännöstönsä ja ydinturvallisuusohjeistonsa kokonaisuudistusprojektin. Uudistetun ydinenergiasäännösten toivotaan tuovan helpotuksia kilpailukykyiseen energian tuotantoon ja enemmän mahdollisuuksia luvanhaltijoille, lisäävän riskitietoisuuden näkyvyyttä viranomaistoiminnassa sekä edesauttavan mm. SMR-teknologioiden käyttöönottoa. [38] STUK:n ydinturvallisuussäännöstö koostuu YVL-ohjeiden lisäksi yleisistä turvallisuusmääräyksistä. Säännöstöä ja YVL-ohjeita sovelletaan ydinlaitoksen elinkaaren jokaiseen vaiheeseen sekä polttoaineen loppusijoittamiseen. Ydinenergialaki velvoittaa Säteilyturvakeskusta valvomaan säännösten noudattamista. [36]

Ydinkaukolämpölaitoksien tapauksessa ongelmaksi osoittautuvat vaatimukset varoaluiden koosta. Kaukolämpölaitos tulisi sijoittaa lähellä käyttökohdetta kaukolämpöputkiston hinnan minimoimiseksi ja käyttövarmuuden parantamiseksi. YVL A.2 vaatimus 402 velvoittaa laitoksen sijoittamista harvaan asutulle alueelle ja vaatimus 411 asettaa 5 kilometrin suoja-alueen laitosalueen ympäristölle. Suoja-alueella ei saa sijaita kouluja, sairaaloita tai muita vaikeasti evakuoitavia kohteita, kuten laajaa pysyvää asutusta. [39] Nykyinen laki ei siten mahdollista ydinkaukolämpölaitosten sijoittamista kaupunkeihin, ei maanpinnalle eikä pinnan alle.

Ydinkaukolämpöä tutkittiin Suomeen ensimmäisen kerran 1970-luvun loppupuolella osana SECURE-hanketta (Safe Environmentally Clean Urban REactor), mutta hankkeesta luovuttiin lainsäädännöllisten haasteiden takia. SECURE:ssa kehitetyt passiiviset turvajärjestelmät ovat merkittäviä vielä nykyisten SMR:ien turvallisuusratkaisujen suunnittelussa [17].

## 5. TALOUDELLINEN ANALYYSI

Pienreaktoria ja jättikokoista ydinlaitosta ei ole tarkoituksenmukaista verrata toisiinsa pelkästään taloudellisten tunnuslukujen perusteella. Vertailun on perustuttava hankekokonaisuuteen. Tarkastelun kohteena tulee olla kokonaisturvallisuus, elinjaksokustannukset, toteutusaika, rahoitettavuus sekä käytettävyys. Isojen ydinvoimaloiden hinnat ovat miljardeja ja rakennusprojektit kestävät useita vuosia. Pienreaktorien hinnat tulevat olemaan matalampia reaktorin koon, teholuokan ja passiivisten turvallisuusjärjestelmien ansiosta.

Tehtaassa liukuhihnalla tuotetut moduulit poistavat sijoittajilta ydinreaktoreihin liittyvät suuret pääomakustannukset. Yhden pienreaktorin kustannus on huomattavasti suurta laitosta matalampi, joten tarvittavat pääomakustannukset ovat hankintaprosessin alusta asti pienemmät. Osa valmistajista ei luovuta vain yhtä laitosta ostajilleen, vaan hankintasopimukseen sisältyy ennalta määritelty minimimäärä moduuleja. Esimerkiksi Yhdysvaltalaisen NuScale Powerin kehitteillä oleva 60 MW painevesilaitos vie vain 1 % suuren ydinvoimalaitoksen vaatimasta tilasta ja rakennusehtona on jäähdytysjärjestelmän rakentaminen vähintään kahtatoista laitosta varten. Täten moduuleista koottu huomattavasti normaalia pienempi laitosalue tuottaakin yhteensä 720 MW, mikä on enemmän kuin Olkiluoto 1 nettosähköteho rakentamisvuonnaan (660 MW 1979) [8]. Jäähdytysratkaisujen kehittyessä pystytään toimittamaan myös yksittäisiä NuScale-reaktoreja.

Reaktorit rakennettaisiin yksi kerrallaan sarjatuotannolla valmistetuista vakio-osista. Kun ensimmäinen reaktori saadaan valmiiksi, alkaa valmiin laitoksen energiantuotanto ja seuraavan reaktorin rakentaminen. Täten rahaa tarvitaan vähemmän ensimmäiseen ja investoinnilla aletaan saamaan takaisinmaksua tuotannon käynnistyessä seuraavien yksikköjen rakennuksen aikana. Etua saadaan siis suuresta sarjatuotannosta.

Ydinvoimalaitokset vaativat vuosittaista huoltoa. Kyseessä voi olla huolto- tai polttoainenvaihtoseisokki, jolloin molemmissa tapauksissa koko laitos ajetaan alas useaksi viikoksi. Vuosihuoltojen aikana vaihdetaan polttoainetta, huolletaan laitokset, edistetään voimaloiden tuottavuutta ja turvallisuutta uusimalla komponentteja sekä korvaamalla vanhoja ja vanhentuneita osia myös uudella teknologialla. Yhden suuren laitoksen, esimerkiksi 1 600 MW Olkiluoto 3, tapauksessa koko tuotantokapasiteetti voi olla hyödyntämättä jopa neljä viikkoa, mikä tuo ison loven Suomen energiantuotantoon. Pienreaktoreista koostuvan laitoksen tapauksessa voidaan yksi reaktori huoltaa kerrallaan, jolloin

esimerkiksi NuScalen kohdalla, käytöstä poistuu kerrallaan vain noin 8 % tuotantokapasiteetista. Tämä mahdollistaa noin 92 % jatkuvan tuotannon nimelliskapasiteetista ja sen kautta taloudellisen edun. [40]

On hyväksytty ajatus, että kaikkea tekniikkaa ei tarvitse kehittää omakustanteisesti vaan on olemassa tahoja, jotka tukevat vihreän energiantuotannon kehittämistä. Tukirahoitus mahdollistaakin osaltaan pienreaktorien kehityksen. Kun vaihtoehtoista tekniikkaa on, ydinvoima kilpailee tuuli-, aurinko- ja aaltovoiman kanssa rahoituksesta. Yhdysvaltojen energiaministeriö (United States Department of Energy, DOE) on myöntänyt 1,355 miljardin USD\$ sitoumuksen ensimmäiselle NuScale-voimalaitosta rakentavalla konsortiolle auttamaan takaamaan sähkön koko elinkaaren tavoitetuotantokustannuksen 55 US\$/MWh [41]. Suomessa työ- ja elinkeinoministeriöltä (TEM) voi hakea investointitukea uudelle energiateknologialle ja demonstraatiohankkeille [38]. Energiatukea voi hakea hankkeisiin, joiden investointikustannukset ovat vähintään 5 milj. euroa. Tukirahoituksella TEM pyrkii tukemaan tulevaisuuden energiaratkaisuja 2030-luvun kansallisten ja EU-ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi sekä edistämään kansainvälisesti uutuusarvoltaan merkittäviä hankkeita. [38]

## 5.1 Sähköntuotannon kustannusrakenne

Koko elinkaaren tuotantokustannus tarkoittaa sähköntuotannon keskimääräistä nettonykykustannusta koko laitoksen elinkaaren aikana. Se on toimivaksi todettu työkalu sähköntuotantomenetelmien vertailuun. Taulukossa 4 on esitetty vuonna 2017 toteutettu eri sähköntuotantolaitosten tuotantokustannusten vertailu laskettuna 5 % reaalikorolla. [42]

Taulukko 4: Voimalaitosten elinkaaren tuotantokustannukset.

Voimalaitos	Tuotantokustannus (LCOE) (€/MWh)
Ydinvoimala (uusi tontti)	55,4
Ydinvoimala (valmis tontti)	42,4
Kaasuturpiini	68,9
Turvelauhde	75,7
Hiilivoimala	75,9
Puulauhde	76,2
Tuulivoimala (on-shore)	41,4
Tuulivoimala (off-shore)	68,9
Aurinkovoimala	99,6

Ydinvoimalan tuotantokustannusten huomataan taulukosta 4 olevan kilpailukykyisiä. Ainoa edullisempi vaihtoehto on vain maalla sijaitseva tuulivoimala. Olemassa olevalle tontille on myös huomattavasti edullisempaa rakentaa ydinvoimala kuin täysin uudelle. Rakennuskustannukset myös pienenevät, jos ydinreaktorin sijoittamisessa käytetään hyväksi käytöstä poistettujen hiili- ja ydinlaitosten olemassa olevaa infrastruktuuria, kytkinlaitoksia, verkkoliitäntöjä ja jäähdytysratkaisuja, mikä alentaa välillisesti myös elinkaaren tuotantokustannuksia. [42] [43]

NuScale on tähtäämässä ensimmäisensä 12 moduulin, 720 MW(e) pienydinvoimalan, kanssa 40–65 US\$ /MW/h tuotantokustannuksiin riippuen asiakkaan rahoitusprofiilista. Tuotantokustannusten odotetaan laskevan pienempien ylläpitokustannusten ja sarjatuotannon vakiintumisen jälkeen. Tavoitekustannus laitostoimittajan mukaan on taulukossa 4 esitetyn suuren ydinvoimalan tuotantokustannusten mukainen 55 US\$/MWh (= 52,7 €/MWh). Ensimmäisen moduulin on tarkoituksena aloittaa säännöllinen sähköntuotanto vuonna 2029. [44]

## 6. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

WANO:n vuonna 2015 valmistuneessa SMR lisensoinnin standardisointi- ja sääntelymallin yhdenmukaistamisraportissa [15] listataan modulaaristen pienreaktorien potentiaalitekijät:

- Pienen kokonsa ja modulaarisuuden takia, SMR:t voitaisiin valmistaa kontrolloidussa tehdasympäristössä korkein vaatimuksin ja asentaa moduuli moduulilta, täten parantaen kustannustehokkuuden ja laadun tasoa,
- Alhainen teho, pieni koko ja passiiviset turvajärjestelmät mahdollistavat reaktoriin luovuttamisen maille, joilla on pienempi sähköverkon kapasiteetti ja vähemmän osaamista ydinvoimasta,
- Koko, rakentamisen tehokkuus ja passiiviset turvajärjestelmät (jotka vaativat vähemmän redundanssia ja diversiteettiä) voivat johtaa helpommin toteutettavaan rahoitukseen verrattuna suurempiin laitoksiin,
- Sarjatuotannon taloudellisuuden saavuttaminen tietyille SMR tyyppille alentaa kustannuksia edelleen.

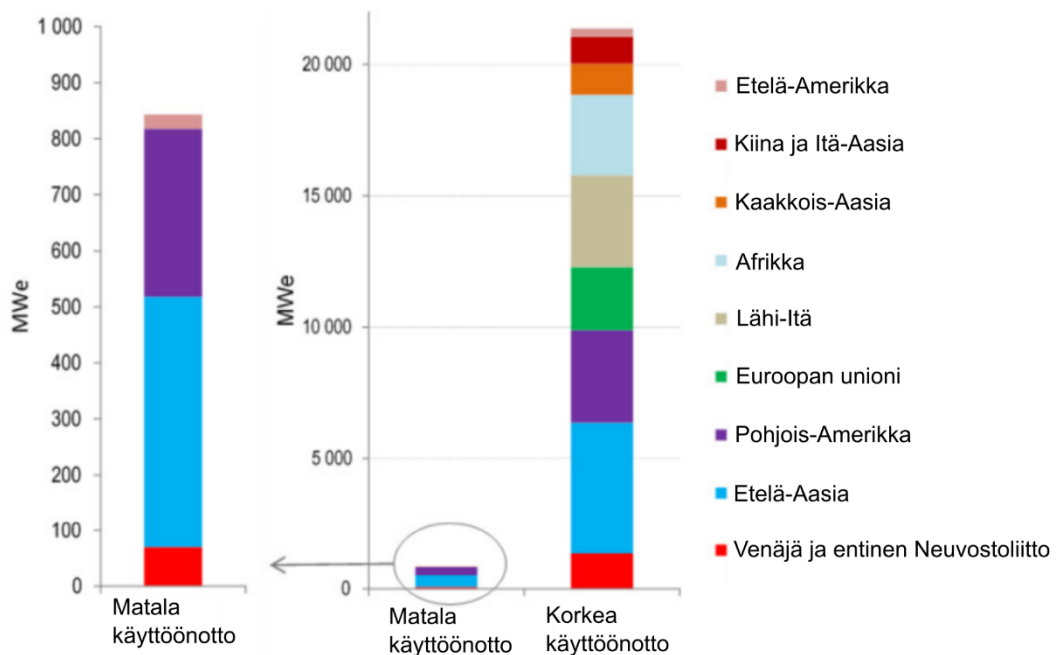
IAEA listasi vuonna 2020 yli 80 kehitteillä olevaa SMR-konseptia [23]. Sarjatuotannolla tavoiteltuja etuja ja kustannusvähennyksiä ei saavuteta, jos markkinoille ilmestyy edes puolet SMR käsikirjan suunnitteilla olevista reaktorikonsepteista. Vaihtoehtoja voi olla liikaa, kun valmistajat siirtyvät konseptien suunnittelusta lisensointivaiheisiin. Alan ensimmäinen harmonisoiija ja oman reaktorikonseptinsa standardoinnin varmistaja voi viedä markkinoista suuren osan. [26] Avainhaasteena onkin saada reaktoritoimittajalle vakaa rahoituspohja ja valmius tehdä omasta konseptistaan kaupallinen tuote.

Haasteina pienreaktoreille ja pienydinvoimalle nähdään yhteiskunnan ja poliittisen järjestelmän hyväksyntä, sidosryhmien ja tulevien käyttäjien ymmärrys ja valmius käyttööntöön, markkinoiden valmius ja sarjavalmistajien etujen vaatima useiden kappaleiden tilauskirja.

Pienreaktorit mahdollistavat ydinvoiman käytön perinteisen sähköntuotannon lisäksi myös muihin käyttökohteisiin. Pienreaktori soveltuisi tuottamaan päästötöntä prosessilämpöä hyvinkin korkeita lämpötiloja vaativiin teollisuusprosesseihin niin jalostamoihin, kemian teollisuuteen kuin myös paperi- ja selluteollisuuden sekä suolanpoistolaitosten tarpeisiin. Vetytuotannon energiatarpeet voitaisiin myös toteuttaa pienydinvoimalla. Vety toimii energiankantajana, ja siitä voidaan valmistaa puhtaita polttoaineita ja kemikaaleja,

kuten ammoniakia, metanolia ja lentokerosiinia. Pienydinvoimalla tuotetun vedyn hinnaksi arvioidaan 2 US\$ /kg, joka on kilpailukykyinen verrattuna tuuli- ja aurinkovoimalla tuotetun vedyn hintaan 2,5–6 US\$/kg. [43] [45]

Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestön OECD:n (Organisation for Economic Cooperation and Development) atomienergiajärjestö NEA (Nuclear Energy Agency) ennusti vuonna 2016 kaksi lyhyenajan (2035) SMR:n kasvuskenaariota. [46] Molemmat skenaariot on esitetty kuvassa 9:



Kuva 9: Arvioitu SMR kapasiteetti maanosittain vuonna 2035. Kuva lainattu viitteestä [46].

Korkean käyttöönoton skenaariossa edellytetään optimistisesti SMR:ien onnistunutta laajaa lisensointia ja modulaarisen tehdastuotannon ja siihen liittyvien toimitusketjujen perustamista, mikä johtaisi suoraan kilpailukykyyn markkinoilla. Toisessa skenaariossa ajateltiin SMR:ien rakentamisen ja operoinnin olevan kallista, täten vain rajoitettu määrä ydinvoimahankkeita saatettiin loppuun, mukaan lukien prototyytit ja voimalat syrjäisillä alueilla. Molemmissa skenaarioissa on otettu huomioon useat markkinatekijät, kuten sähköverkon kehittäminen, uuden ydinvoiman rakentamisen kehittäminen ja kansainväliset ydinvoimapolitiikat. [46]

Kuvasta 9 nähdään, että optimaalisessa skenaariossa jopa 21 GW sähkötehoa tulisi tuotantoon vuoteen 2035 mennessä useilla eri mantereilla, mikä edustaa noin 3 % koko maailman asennetusta ydinvoimakapasiteetista. [34] Täten noin 9 % ydinvoiman uudis-



rakentamisesta voisi olla SMR:iä vuosina 2020–2035. Matalan käyttöönoton skenaariossa pienydinvoiman käyttöönotto on rajoitettu alle 1 GW, mikä käsittää lähinnä prototyyppivoimalat maissa, joissa on käynnissä kansalliset SMR-ohjelmat. Voidaan olettaa, että vuoden 2035 jälkeen markkinat modulaarisille pienreaktoreille kehittyvät entisestään hiilidioksidipäästöjen vähentämistavoitteiden saavuttamiseksi, mikä edellyttää puhtaan sähköntuotannon käyttöönottoa.

## 7. YHTEENVETO

SMR:t ovat jo nykyaikaa. Todisteina tästä ovat Akademik Lomonsovin kelluvat ja siirrettävät ydinvoimalat, Argentiinassa rakenteilla oleva CAREM ja Kiinassa käyttöön otettu HTR-PM. SMR:t ovat myös tulevaisuutta. NuScalen edennyt lisensointivaihe ja hankkeen saama taloudellinen tuki tekevät siitä potentiaalisen SMR-markkinahaltijan tulevaisuudessa. Pienreaktorien toteutuessa riittävässä mittakaavassa, avautuvat miljardien liiketoimintamahdollisuudet, joille varmasti löytyvät hyödyntäjät.

Ilmastonmuutoksen torjumisessa ihmisellä ei ole varaa olla hyödyntämättä yhtään potentiaalista ratkaisua. Ydinvoima, siihen liittyvän ja uuden teknologian kehittäminen ja sen mahdollisimman nopea käyttöönotto on välttämätöntä. Ydinvoimalla tulee jatkossakin olemaan suuri rooli maailman energiapaletissa, mikä antaa mahdollisuuden suomalaiselle osaamiselle myös kansainvälisillä markkinoilla. Tarve kotimaisen teollisuuden, liikenteen ja kotitalouksien puhtaalle sähkölle ja viilennys- ja lämmitysratkaisuille ei ole katoamassa kuitenkaan minnekään.

Suurien ydinvoimalamaiden, Yhdysvaltojen, Kanadan, Britannian ja Ranskan, luvitusprosesseja ja kehitteillä olevia ydinlaitoksia on syytä seurata erityisen tarkasti, jotta saadaan tarvittavat tiedot tukemaan Suomen lainsäädännön ja lisensoinnin erityiskysymyksiä ja kehitystyötä. Uuden lainsäädännön tulee olla pienreaktoreja ja modulaarisuutta tukeva ja mahdollistaa sarjavalmistettujen komponenttien standardisointi ja käyttö. Soveltuva lainsäädäntö on edellytys sujuville luvitus- ja hankintaprosesseille sekä SMR:n rakentamiselle.

SMR:ien käyttöön perustuvia kustannustietoja ei ole vielä saatavilla, mikä vaikeuttaa kustannusten arviointia verrattaessa kilpaileviin teknologioihin ja energian tuotantomuotoihin. Isojen ydinvoimaloiden suuruuden ekonomian korvaamisen haasteet on kyettävä paikkaamaan modulaarisuudella, sarjatuotannolla ja passiivisilla turvajärjestelmillä. Nämä toimenpiteet mahdollistavat pienreaktorien kilpailukykyiset elinkaarikustannukset.

Modulaariset pienreaktorit ovat konkreettinen osoitus asiasta, että jo kymmeniä vuosia käytössä ollut teknologia voi uusiutua, kun tarve sille on ilmeinen ja tutkimukselle on varattu riittävästi resursseja. Ratkaisuja on syytä analysoida ja pohtia ratkaisujen soveltuvuutta verrattuna nykyisiin käyviin ja rakenteilla oleviin laitoksiin. Kehitystyössä tulee ilmi uusia ideoita ja osaa niistä voidaan nyt jo soveltuvin osin hyödyntää ydinvoimaloissa ja muilla teollisuuden osa-alueilla.

## LÄHTEET

- [1] European Commission: Technical assessment of nuclear energy with respect to the 'do not significant harm' criteria of Regulation (EU) 2020/852 ('Taxonomy Regulation'), [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/business\\_economy\\_euro/banking\\_and\\_finance/documents/210329-jrc-report-nuclear-energy-assessment\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/210329-jrc-report-nuclear-energy-assessment_en.pdf). Viitattu 15.2.2022.
- [2] Euroopan parlamentti: Parlamentti ei vastusta kaasun ja ydinvoiman sisällyttämistä kestäväen rahoituksen taksonomiaan, <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/press-room/20220701IPR34365/taksonomia-parlamentti-ei-vastusta-kaasua-ja-ydinvoimaa-koskevaa-saadosta>. Viitattu 7.7.2022
- [3] Energiateollisuus ry: Ydinvoiman suosio ennätyslukemissa, [https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/ydinvoiman\\_suosio\\_ennatyslukemissa.html#material-view](https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/ydinvoiman_suosio_ennatyslukemissa.html#material-view). Viitattu 20.6.2022
- [4] Bloomberg News: China is Home to World's First Small Modular Nuclear Reactor, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-12-21/new-reactor-spotlights-china-s-push-to-lead-way-in-nuclear-power>. Viitattu 15.2.2022.
- [5] ITER: When Will Experiments Begin, <https://www.iter.org/proj/inafewlines>. Viitattu 1.7.2022
- [6] Murray RL, Holbert KE. Nuclear energy: an introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes. Seventh edition. Amsterdam: Elsevier; 2015. [https://andor.tuni.fi/discovery/fulldisplay?docid=alma9910630045505973&context=L&vid=358FIN\\_TAMPO:VU1&lang=fi&search\\_scope=My\\_inst\\_and\\_CI\\_extended\\_search&adaptor=Local%20Search%20Engine&isFrbr=true&tab=Everything&query=any,contains,%22nuclear%20energy%22%20AND%20fission&sortby=date\\_d&facet=frbrgroupid,include,9047351213899199908&offset=0](https://andor.tuni.fi/discovery/fulldisplay?docid=alma9910630045505973&context=L&vid=358FIN_TAMPO:VU1&lang=fi&search_scope=My_inst_and_CI_extended_search&adaptor=Local%20Search%20Engine&isFrbr=true&tab=Everything&query=any,contains,%22nuclear%20energy%22%20AND%20fission&sortby=date_d&facet=frbrgroupid,include,9047351213899199908&offset=0) Viitattu 15.2.2022.
- [7] Whatisnuclear: Energy density calculations of nuclear fuel: <https://whatisnuclear.com/energy-density.html>. Viitattu 18.2.2022
- [8] L. Saarelainen, Teollisuuden Voima Oyj: Ydinvoimalaitosyksiköt Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2, [www.tvo.fi/uploads/File/yksikot-OL1-OL2.pdf](http://www.tvo.fi/uploads/File/yksikot-OL1-OL2.pdf). Viitattu 8.4.2022.
- [9] Energiateollisuus: Hyvä tietää ydinvoimasta 01/2020: [https://energia.fi/files/5161/Ydinvoima\\_esite\\_2020.pdf](https://energia.fi/files/5161/Ydinvoima_esite_2020.pdf). Viitattu 8.8.2022.
- [10] USA Office of Nuclear Energy: Molten Salt Reactor, <https://www.energy.gov/ne/office-nuclear-energy>. Viitattu 20.6.2022
- [11] Wikimedia: Schematic diagram of the Advanced Gas-cooled Reactor, [https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced\\_Gas-cooled\\_Reactor#/media/File:AGR\\_reactor\\_schematic.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Gas-cooled_Reactor#/media/File:AGR_reactor_schematic.svg). Viitattu 20.6.2022
- [12] WANO: Fast Neutron Reactors, <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors.aspx>. Viitattu 22.6.2022

- [13] IAEA: International Project on Innovative Nuclear and Fuel Cycles (INPRO), <https://www.iaea.org/services/key-programmes/international-project-on-innovative-nuclear-reactors-and-fuel-cycles-inpro>. Viitattu 22.6.2022
- [14] Union of the Electricity Industry: Efficiency in Electricity Generation, [https://wecan-figurethisout.org/ENERGY/Web\\_notes/Bigger\\_Picture/Where\\_do\\_we\\_go\\_Supporting\\_Files/Efficiency%20in%20Electricity%20Generation%20-%20EURELECTRIC.pdf](https://wecan-figurethisout.org/ENERGY/Web_notes/Bigger_Picture/Where_do_we_go_Supporting_Files/Efficiency%20in%20Electricity%20Generation%20-%20EURELECTRIC.pdf). Viitattu 8.8.2022.
- [15] WANO: Facilitating International Licensing of Small Modular Nuclear Reactors, Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing (CORDEL), [https://world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working\\_Group\\_Reports/REPORT\\_Facilitating\\_Intl\\_Licensing\\_of\\_SMRs.pdf](https://world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/REPORT_Facilitating_Intl_Licensing_of_SMRs.pdf). Viitattu 22.6.2022
- [16] USDOE: Nuclear Reactors Build, Being Built, or Planned in the United States as of June 30, 1970, <https://www.osti.gov/biblio/4115425>. Viitattu 22.6.2022
- [17] J. Leppänen, VTT: A Review of District Heating Reactor Technology, [https://cris.vtt.fi/files/24936486/VTT\\_R\\_06895\\_18.pdf](https://cris.vtt.fi/files/24936486/VTT_R_06895_18.pdf). Viitattu 29.6.2022
- [18] Valtioneuvoston kanslia: E. Hujala, J. Hyvärinen, R. Rintamaa, H. Suikkanen, J. Vihavainen, S. Wähä: Uusien ydinenergiateknologioiden mahdollisuudet ja kehitystarpeet, <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164168>. Viitattu 22.6.2022
- [19] IAEA: SMR; Safety and Security, [https://gnssn.iaea.org/main/ANNuR/Activity%20Documents%20%20Public/Workshop%20on%20Small%20Modular%20Reactor%20\(SMR\)%20Safety%20and%20Licensing/SMR\\_Safety\\_and\\_Security\\_TemplateB.pdf](https://gnssn.iaea.org/main/ANNuR/Activity%20Documents%20%20Public/Workshop%20on%20Small%20Modular%20Reactor%20(SMR)%20Safety%20and%20Licensing/SMR_Safety_and_Security_TemplateB.pdf). Viitattu 22.6.2022
- [20] WANO: Small Nuclear Power Generators, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>. Viitattu 22.6.2022
- [21] PIEAS: Assessment of Passive safety system of a Small Modular Reactor (SMR), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454916305485#ab010>. Viitattu 22.6.2022
- [22] NuScale: Comprehensive Safety Features, Passive Systems, <https://www.nuscalepower.com/benefits/safety-features/passive-systems>. Viitattu 22.6.2022
- [23] IAEA: SMR Book 2020, [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf). Viitattu 27.6.2022
- [24] CAREM25: SMR design and technology development in Argentina and Status of the construction of CAREM25 prototype, [https://nucleus.iaea.org/sites/htgr-kb/twg-smr/Documents/TWG-2\\_2019/D01\\_CAREM-TWG-SMR-2019.pdf](https://nucleus.iaea.org/sites/htgr-kb/twg-smr/Documents/TWG-2_2019/D01_CAREM-TWG-SMR-2019.pdf). Viitattu 27.6.2022.
- [25] World Nuclear News: NRC agrees NuScale SMR needs no back-up power, <https://www.world-nuclear-news.org/RS-NRC-agrees-NuScale-SMR-needs-no-back-up-power-1001184.html>. Viitattu 27.6.2022

- [26] L. Mäkelä, FinNuclear Association: SMR-selvitys, <https://finnuclear.fi/wp-content/uploads/2019/10/201909-SMR-selvitys-tiivistelm%C3%A4-Finnuclear-ry-www.pdf>. Viitattu 28.6.2022
- [27] Bloomberg News: China is Home to World's First Small Modular Nuclear Reactor, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-12-21/new-reactor-spotlights-china-s-push-to-lead-way-in-nuclear-power>. Viitattu 15.2.2022.
- [28] VTT J. Leppänen: Low-temperature District Heating and Desalination Reactor (LDR) Technology, [https://www.ecosmr.fi/wp-content/uploads/2021/06/Leppanen\\_EcoSMR\\_15062021.pdf](https://www.ecosmr.fi/wp-content/uploads/2021/06/Leppanen_EcoSMR_15062021.pdf). Viitattu 27.6.2022
- [29] VTT: Kohti puhdasta kaukolämpöä: Merkittävä patentti VTT:n kehittämälle pienydinreaktorin lämmitysratkaisulle, <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-jat tarinat/kohti-puhdasta-kaukolampoa-merkittava-patentti-vtt-kehittamalle>. Viitattu 27.6.2022
- [30] European Commission: Nuclear Innovation Prize: Seven applications awarded, [https://ec.europa.eu/info/news/nuclear-innovation-prize-seven-applications-awarded-2022-may-31\\_en](https://ec.europa.eu/info/news/nuclear-innovation-prize-seven-applications-awarded-2022-may-31_en). Viitattu 27.6.2022
- [31] SART power Co. Ltd, <http://smart-nuclear.com/>. Viitattu 27.6.2022
- [32] Energiateollisuus ry: Energiavuosi 2021 Sähkö, [https://energia.fi/files/4428/Sahkokuusi\\_2021\\_netti.pdf](https://energia.fi/files/4428/Sahkokuusi_2021_netti.pdf). Viitattu 18.2.2022.
- [33] BP: Statistical Review of World Energy, 2021, 70<sup>th</sup> edition, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>. Viitattu 18.2.2022.
- [34] European Commission: EU energy in figures, Statistical pocketbook 2021, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/41488d59-2032-11ec-bd8e-01aa75ed71a1>. Viitattu 4.3.2022.
- [35] International Atomic Energy Agency: IAEA Increases Projections for Nuclear Power Use in 2050, <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-increases-projections-for-nuclear-power-use-in-2050>. Viitattu 4.3.2022.
- [36] STUK: STUK aloittaa ydinturvallisuussäädännön uudistuksen: <https://www.stuk.fi/-/stuk-aloittaa-ydinturvallisuussaannoston-uudistuksen>. Viitattu 8.4.2022.
- [37] Työ- ja elinkeinoministeriö: Ydinenergian tulevaisuus edellyttää asianmukaista ja ajantasaista lainsäädäntöä, <https://tem.fi/-/ydinenergian-tulevaisuus-edellyttaa-asianmukaista-ja-ajantasaista-lainsaadantoa>. Viitattu 29.6.2022
- [38] Työ- ja elinkeinoministeriö: Energiatuki, <https://tem.fi/energiatuki>. Viitattu 29.6.2022
- [39] STUK: YVL A.2: Ydinlaitoksen sijaintipaikka, <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLA-2>. Viitattu 29.6.2022
- [40] NuScale: Cost-Competitive Energy, <https://www.nuscalepower.com/newsletter/nucleus-spring-2019/cost-competitive-energy>. Viitattu 1.7.2022

- [41] Public Power: DOE cost-share award of 1,355 bil is approved for UAMPS small modular reactor project, <https://www.publicpower.org/periodical/article/doe-cost-share-award-1355-bil-approved-uamps-small-modular-reactor-project>. Viitattu 27.6.2022
- [42] LUT: E. Vakkilainen & A. Kivistö: Sähkön tuotantokustannusvertailu, <https://lut-pub.lut.fi/handle/10024/143861>. Viitattu 1.7.2022
- [43] Energiforsk: Pienreaktorit ja niiden käyttökohteet, <https://energiforsk.se/media/27591/pienreaktorit-ja-niiden-kaytokohteet.pdf>. Viitattu 30.6.2022
- [44] NuScale: A Cost Competitive Nuclear Power Solution, <https://www.nuscale-power.com/benefits/cost-competitive>. Viitattu 1.7.2022
- [45] KPMG: The hydrogen trajectory, <https://home.kpmg/xx/en/home/insights/2020/11/the-hydrogen-trajectory.html>. Viitattu 30.6.2022
- [46] NEA: Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities?details=true](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities?details=true). Viitattu 30.6.2022