

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Pienen modulaarisen ydinreaktorin toiminta ja turvallisuus

Case: NuScale

The operation and safety of a small modular nuclear
reactor Case: NuScale

Työn tarkastaja: Heikki Suikkanen

Työn ohjaaja: Heikki Suikkanen

Lappeenranta 16.12.2018

Mikko Turunen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Mikko Turunen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Heikki Suikkanen

Kandidaatintyö 2018

36 sivua, 14 kuvaa, 6 taulukkoa ja 1 liite

Hakusanat: Pienet modulaariset reaktorit, ydinreaktori, SMR, NuScale

Tässä kandidaatintyössä käsitellään NuScalePowerin kehitteillä olevaa pientä modulaarista ydinreaktoria. Tavoitteena on selvittää NuScalen erityispiirteet ja reaktorin toiminta-arvot, joita vertaillaan muihin kevytvesireaktoreihin perehtymällä aiheesta kirjoitettuun kirjallisuuteen ja NuScalen lisensiointiaineistoon. Näihin tavoitteisiin päästään tutkimalla reaktorisydämen, primääripiirin, sekundääripiirin ja turvallisuusjärjestelmien komponentteja ja toimintaa.

NuScalen oleellinen erityispiirre on sen luonnonkierrolla toimiva reaktorisydämen jäähdytysvirtaus ja paineastian sisään integroitu primääripiiri yhdessä. Koko reaktorimoduuli on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen ja kompakti, sillä luonnonkierron ansiosta primääripiiriin ei tarvita paineastimen ja kahden kompaktin kierreputkihöyrystimen lisäksi pääkiertopumppuja. Yhden moduulin reaktorisydän tuottaa 160 MW_t verran lämpötehoa, mitä käytetään lämmittämään höyrystimien sisällä virtaavaa sekundääripiiriä. Sekundääripiirissä taas höyry tulistuu ja tuottaa 50 MW_e verran bruttosähkötehoa. Yhteen voimalaitokseen voidaan sijoittaa jopa 12 reaktorimoduulia.

Toinen merkittävä erityispiirre NuScalessa on sen korkea turvallisuustaso, mikä johtuu sen passiivisista turvallisuusjärjestelmistä. Onnettomuustilanteessa reaktori pystytään ajamaan turvallisesti alas ja jälkilämpö poistamaan lopullisena lämpönieluna toimivaan reaktorialtaaseen täysin ilman ulkoista sähkövirtaa, lisävettä tai operaattorin toimia. Nämä teknisesti edistyneet ratkaisut ovat keskeisessä asemassa sen yleistymiseen tulevaisuuden SMR-voimaloiden markkinoilla.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	6
2 NuScalen yleisesittely	7
2.1 Voimalaitos	7
2.2 Reaktorimoduuli	9
3 Reaktorin toiminta	11
3.1 Primääripiiri.....	11
3.2 Sekundääripiiri	13
4 Reaktorisydän	14
4.1 Polttoaine.....	15
4.2 Reaktiivisuuden säätö.....	18
5 Turvallisuusjärjestelmät ja –ominaisuudet	20
5.1 Reaktoriallas	21
5.2 Passiiviset jälkilämmönpoistojärjestelmät	22
5.2.1 Jälkilämmön poistojärjestelmä.....	22
5.2.2 Häätäjäähdytysjärjestelmä	23
5.3 Eristysastia.....	26
6 Vertailu ja analysointi muihin laitoksiin	27
7 Yhteenveto	31
Lähdeluettelo	33
Liite 1. Tarkempia teknisiä tietoja höyryjärjestelmästä, polttoaineesta ja säätösauvoista	

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Alaindeksit

e	Sähköteho
t	Lämpöteho
U	Uraani

Lyhenteet

AIC	Ag-In-Cd
APWR	Advanced Pressurized Water Reactor
ARIS	Advanced Reactors Information System
B ₄ C	Boorikarbidi
CNV	Cylindrical Containment Vessel
CRA	Control Rod Assembly
CRDM	Control Rod Drive Mechanism
CVCS	Chemical and Volume Control System
DHRS	Decay Heat Removal System
ECCS	Emergency Core Cooling System
EPR	Evolutionary Power Reactor
FWIV	Feedwater System Isolation Valves
Gd ₂ O ₃	Gadoliniumoksidi
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICIS	Incore Instrumentation System
iPWR	Integral Pressurized Water Reactor
LOCA	Loss of Coolant Accident
LTC	Long-term Cooling
LWR	Light Water Reactor

MSIV	Main Steam Isolation Valve
NIST	NuScale Integral System Test Facility
NPM	The NuScale Power Module
NRC	Nuclear Regulatory Commission
NSSS	Nuclear Steam Supply System
PWR	Pressurized Water Reactor
RCS	Reactor Coolant System
RPV	Reactor Pressure Vessel
RRV	Reactor Recirculation Valve
RVV	Reactor Vent Valve
SMART	System-Integrated Modular Advanced Reactor
SMR	Small Modular Reactors
UO ₂	Uraanidioksidi

1 JOHDANTO

Pienillä modulaarisilla ydinreaktoreilla (SMR, engl. Small Modular Reactor) tarkoitetaan Kansainvälisen atomienergiajärjestön IAEA:n (International Atomic Energy Agency) mukaan sähköteholtaan alle 300-megawattisia reaktorimoduuleita, joita voidaan tuottaa tehtaissa sarjatuotantona ja kuljettaa voimaloihin joko raiteilla tai maantiellä. SMR-voimaloita voidaan käyttää korvaamaan ikääntyviä fossiilisia polttoaineita käyttäviä laitoksia, tarjoamaan taloudellisempaa ja joustavampaa energiantuotantoa entistä kattavammalla alueella sekä parantamaan turvallisuustasoa. (IAEA 2016, s. 1.)

Maailmalla on tällä hetkellä kehitteillä yli 50 erilaista SMR-reaktorityyppiä ja niiden kehitys on edennyt jo valtavasti etenkin USA:ssa, Venäjällä sekä Kiinassa. Niiden odotetaan kaupallistuvan jo 2020-luvun puolella. (IAEA 2016, s. 1.) Aihe on ajankohtainen myös Suomessa, sillä jo muutamissa kaupungeissa on tehty valtuustoaloitteet paikallisen selvityksen teettämiseksi mahdollisuudesta hyödyntää SMR-voimaloita sähkön ja lämmön tuotannossa (Laatikainen 2017).

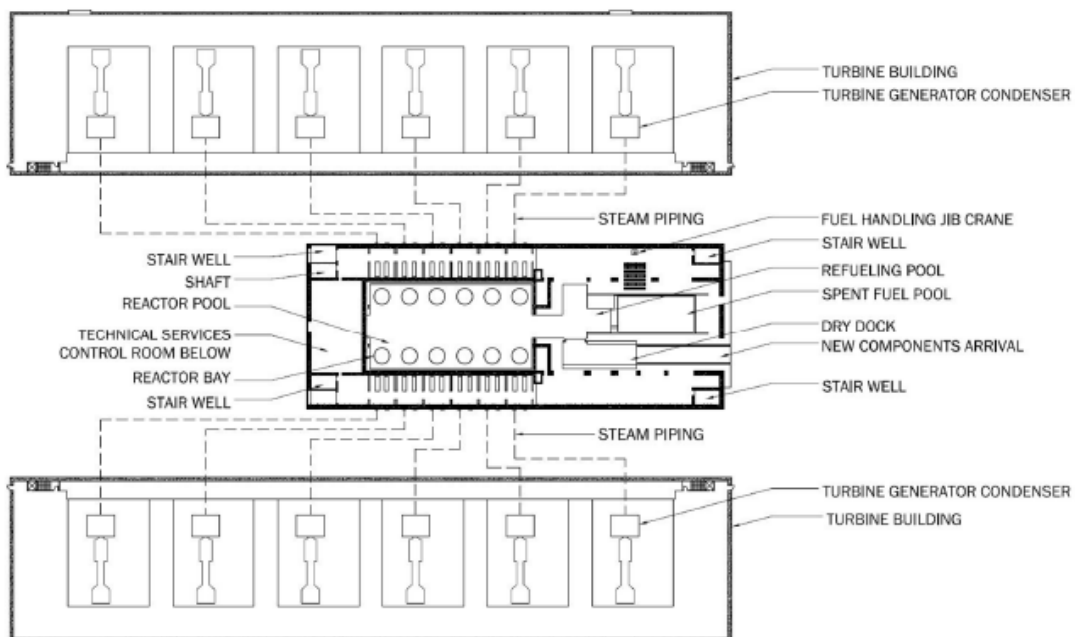
Tässä työssä keskitytään erityisesti USA:ssa sijaitsevan NuScalePowerin kehitteillä olevaan NuScale-reaktorityyppiin. Työ tehdään kirjallisuustyönä, jonka tavoitteena on selvittää NuScalen erityispiirteet ja vertailla sitä sekä muihin SMR:iin että isompiin kevytvesireaktoreihin (LWR, engl. Light Water Reactor). Sitä varten tarkastellaan erityisesti reaktorin ja sen turvallisuusjärjestelmien toimintaa. Tutkimuksessa tarvittavat tiedot kerätään perehtymällä kansainvälisiin kirjallisuuslähteisiin ja etenkin NuScalePowerin NRC:lle (Nuclear Regulatory Commission) luovuttamaan lisensiointiaineistoon ja IAEA:n julkaisemiin raportteihin.

NuScale-reaktorimoduuli (NPM, engl. The NuScale Power Module) on pieni kevytvesijäähdytteinen painevesireaktori (PWR, engl. Pressurized Water Reactor), joka pystyy tuottamaan noin 50 MW_e bruttosähkötehon ja 160 MW_t lämpötehon. Jokainen moduuli toimii itsenäisesti toisistaan riippumatta ja yhteen laitokseen voidaan sijoittaa yhdestä kahteentoista moduulia asiakkaan tarpeiden mukaisesti, mutta laitospokona pidetään tällä hetkellä 12 moduulia suunnittelemista ja lisensiointia varten. (IAEA 2016, s. 121.) 12-moduulinen voimala pystyy tuottamaan jopa 570 MW_e nettosähkötehon verkkoon (NuScalePower 2018a, s. 1.2-2).

2 NUSCALEN YLEISESITTELY

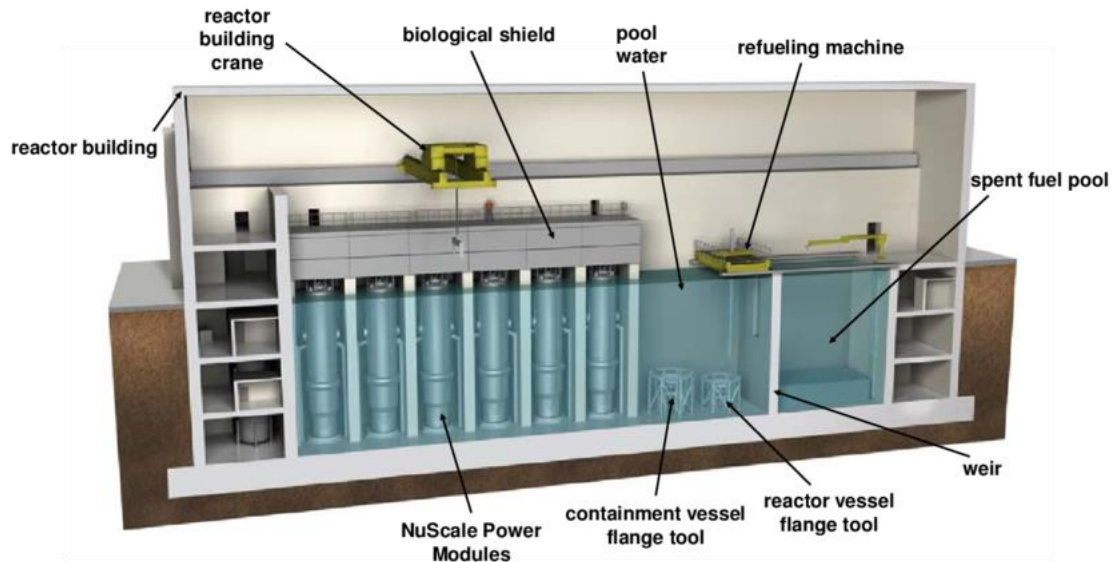
2.1 Voimalaitos

NuScalePowerin ydinvoimalaitoksen yleiskuva esitetään kuvassa 2.1. Siitä nähdään, että jokainen reaktorimoduuli on yhdistetty omaan turbiiniinsa, joita on kahdessa erillisessä turbiinirakennuksessa, kuusi turbiinia rakennusta kohti. IAEA:n raportin mukaan siellä on turbiinien lisäksi myös turbiinien apulaitteet, lauhduttimet, kondensaattorijärjestelmät ja syöttövesijärjestelmät (IAEA 2016, s. 128). Tämän järjestelyn ansiosta yhden moduulin alas ajaminen tai vikaantuminen ei vaikuta muun laitoksen toimintaan. Lisäksi kiskoille asennetuille turbiineille ja generaattoreille on turbiinirakennuksessa paljon tilaa huoltotoimenpiteille (IAEA 2013b). Näin yksittäisten moduulien seisonta-ajat lyhenevät ja huoltokustannukset pienenevät, jolloin moduulit ovat myös tuotannossa pidempään.



Kuva 2.1. Voimalaitoksen periaatekuva (IAEA 2013b).

Turbiinirakennuksien välissä olevassa reaktorirakennuksesta taas löytyy reaktoriallas, joka on yhteinen kaikille 12 moduulille. Jokainen moduuli on omassa käyttöpaikassaan, joka on noin 6 metriä leveä ja pitkä sekä 23 metriä syvä, kun vettä on noin 21 metrin syvyyteen saakka (IAEA 2016, s. 127). Jokaista käyttöpaikkaa ympäröi kolmelta sivulta samalla biologisena suojana toimiva betonikuori (IAEA 2013b.) Kuvassa 2.2 esitetään poikkileikkauskuva NuScalen reaktorirakennuksesta.



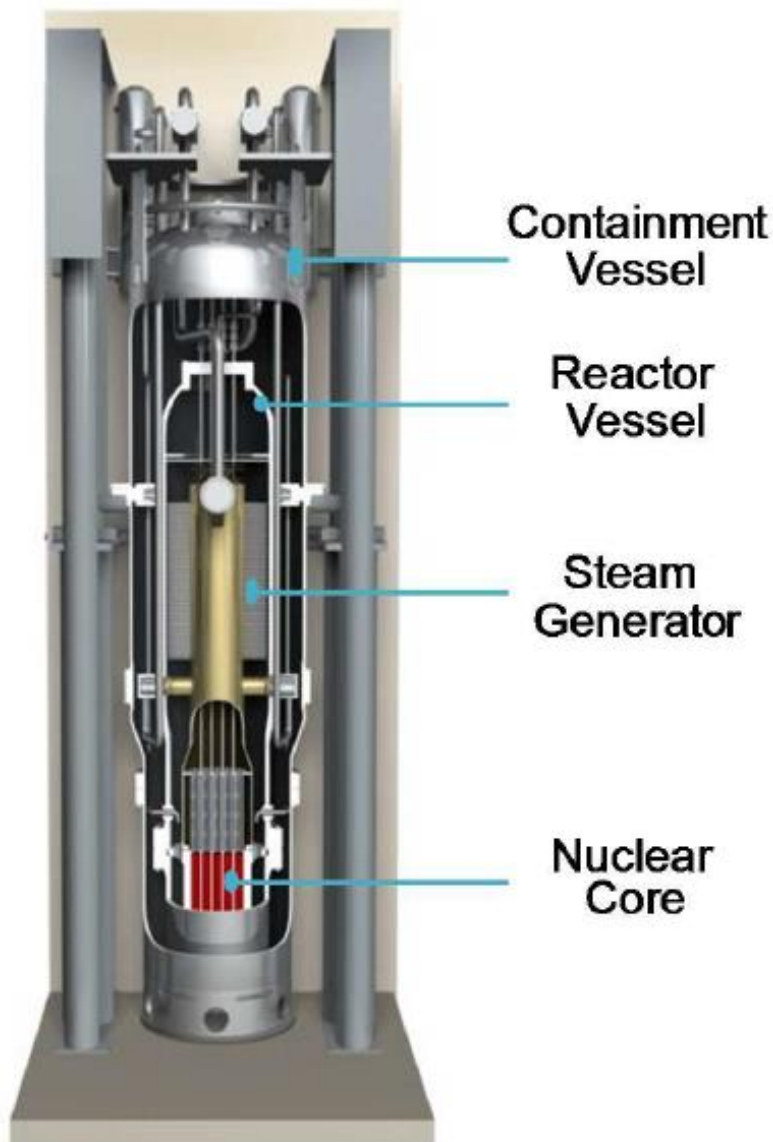
Kuva 2.2. Poikkileikkaus reaktorirakennuksesta (Ingersoll et al. 2015. s. 4).

Kuvasta 2.1 huomataan, että samassa reaktorialtaassa on moduulien lisäksi myös polttoaineen latausallas ja käytetyn polttoaineen varasto. Tästä muodostelmasta syntyy merkittäviä taloudellisia etuja, sillä polttoainetta ladattaessa yhteen moduuliin muut moduulit voivat jatkaa sähköntuotantoaan normaalisti. Polttoaineen vaihtamisen voi suorittaa porrastetusti ympäri vuoden eikä sitä varten tarvitse työllistää väliaikaisesti ulkopuolista urakoitsijaa, vaan sen voi hoitaa laitoksella pysyvästi työskentelevä pieni ja hyvin koulutettu ryhmä. (IAEA 2013b.)

Kuvasta 2.1 nähdään myös, että laitoksen valvomo sijaitsee valvomorakennuksessa reaktorirakennuksen vieressä. Valvomossa on automaattinen hallintalaite jokaiselle reaktoriyksikölle ja yksi operaattori voi samanaikaisesti valvoa sekä ohjata useampaakin yksikköä. Kaikki valvomon monitorit on suunniteltu mahdollisimman yksinkertaisiksi käyttää ihmisten virheiden riskien vähentämiseksi. Monitorien ohjelmista voidaan graafisesti tarkkailla laitoksen järjestelmiä ja komponentteja. Valvomossa on myös päävalvonta-asema, josta nähdään kaikkien reaktorien yleiskatsaus useammalla näytöllä. (IAEA 2016, s. 127-128.)

2.2 Reaktorimoduuli

Jokainen NuScalen reaktorimoduuli koostuu hyvin kompaktiin kokoon rakennetusta sylinterimäisestä eristysastiasta (CNV, engl. Cylindrical Containment Vessel) ja sen sisällä olevasta reaktorin paineastiasta (RPV, engl. Reactor Pressure Vessel). NuScalessa paineastian sisällä ovat asennettuna reaktorisydämen lisäksi paineistin sekä molemmat höyrystimet, jotka muodostavat NuScalen omavaraisen ydinteknisen lämmönkehitysjärjestelmän (NSSS, engl. Nuclear Steam Supply System). (NuScalePower 2018c, s. 4.1-1.) Moduulin rakenne esitetään kuvassa 2.3



Kuva 2.3. Paikalleen asennettu moduuli käyttöpaikassaan (Canadian Nuclear Safety Commission 2014, s. 63).

NuScalen reaktorimoduuli toimii täysin luonnollisella kierrolla, minkä vuoksi primääripiiriin normaalisti kuuluvia pääkiertopumppuja, ulkoisia kierrätysputkia ja näiden venttiileitä ei tarvita. Näin ollen kuvasta 2.3 huomataan, että NuScalen koko primääripiiri on siis integroitu paineastian sisään eli se on integroitu painevesireaktori (iPWR, engl. Integral Pressurized Water Reactor). Primääripiiri kierrättää jäähdytysvettä reaktorissa ja ohjaa paineastian alaosassa sijaitsevasta reaktorisydäimestä poistuvan veden höyrystimiin. Höyrystimien sisällä virtaava sekundääripiiri puolestaan pyörittää turbiini-generaattori-akselia.

Erityisesti pääkiertopumppujen puuttumisen vuoksi laitos kuluttaa selkeästi vähemmän sähkötehoa kuin pakotettua kiertoa käyttävät laitokset. Luonnonkierron myötä laitoksessa on siis vähemmän vikaantumisalttiita komponentteja, jolloin moduulin kompakti ja yksinkertainen rakenne parantaa laitoksen turvallisuutta ja karsii valmistuskustannuksia. (Reyes José N, Jr. 2012, s. 2-3.) Taulukossa 2.1 esitetään suunnitteluparametreja moduulille.

Taulukko 2.1. Moduulin geometrioita (IAEA 2018, s. 75-77).

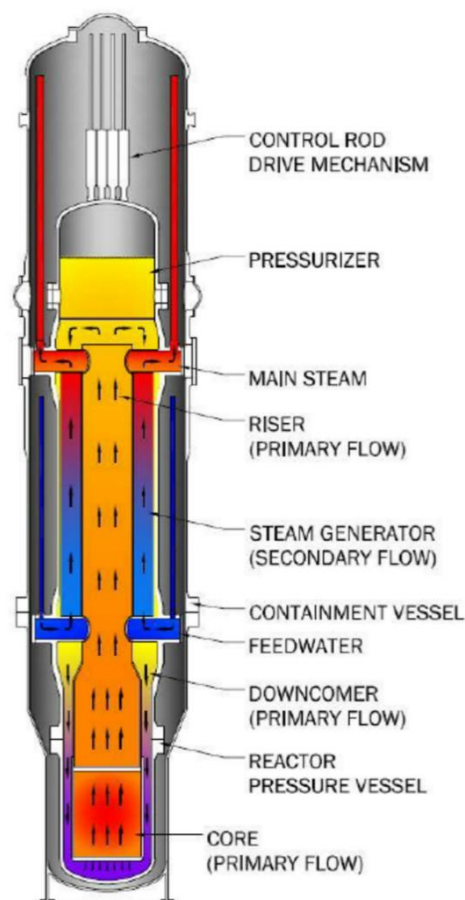
Moduulin massa	700	t
Paineastian korkeus	17,8	m
Paineastian sisähalkaisija	3	m
Eristysastian korkeus	23,1	m
Eristysastian ulkohalkaisija	4,5	m

NuScalen reaktorimoduuli on hyvin pienikokoinen verrattuna tavanomaisiin kevytvesireaktoreihin sen integroidun primääripiirin ansiosta. Esimerkiksi VVER-1000:n eristysastian korkeus on 38,5 metriä mutta sen paineastian korkeus on vain 11,24 metriä ja sisähalkaisija jopa 4,2 metriä (IAEA 2011b). VVER-1000:n kokoisessa laitoksessa käytetään pakotettua kiertoa syöttövesipumpuilla primääripiirin virtauksen aikaansaamiseksi, jotka tarvitsevat myös siihen liittyviä komponentteja, putkistoa ja turvallisuusjärjestelmiä. Näitä ei NuScalessa ole tilaa kuluttamassa.

3 REAKTORIN TOIMINTA

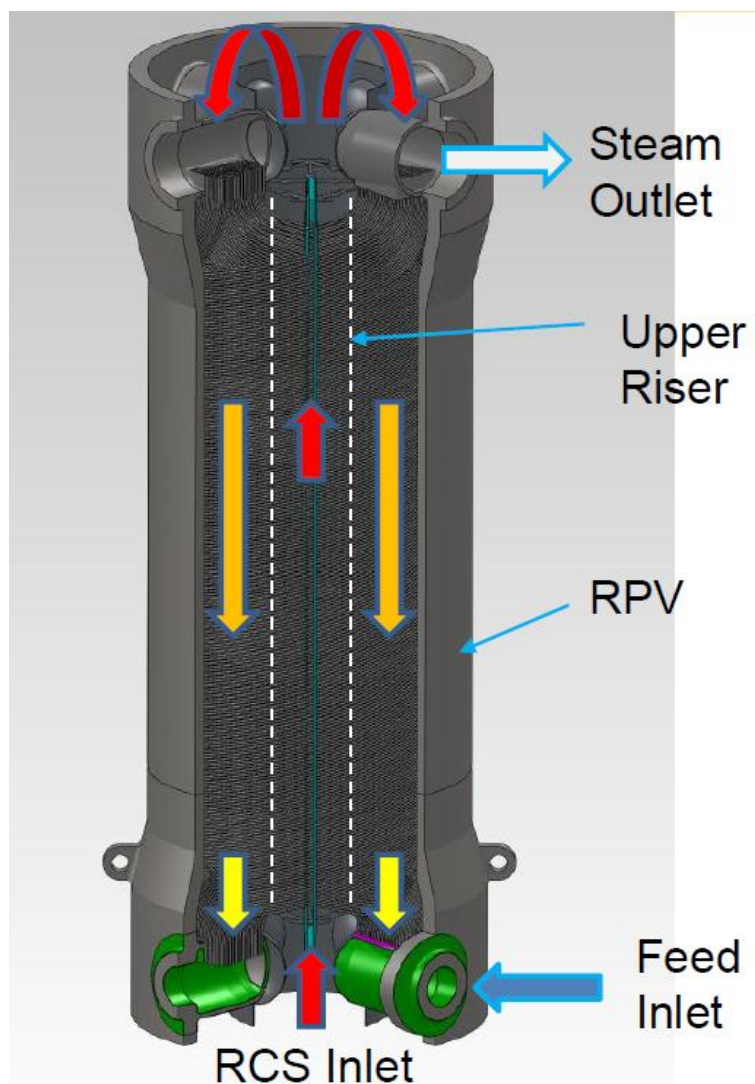
3.1 Primääripiiri

Aivan tavallisten painevesireaktorien tavoin myös NuScalen reaktorisydämessä syntyvää lämpöenergiaa siirretään höyrystimiin korkeapaineisen jäähdytysveden avulla. Primääripiirin jäähdytysveden tehtävänä on jäähdyttää reaktorisydäntä, jolloin se absorboi fissioreaktioissa syntynyttä lämpöenergiaa johtaen veden lämpötilan kasvamiseen. Kuvassa 3.1 esitetään paineastian sisään integroitu primääripiiri. Sen mukaisesti jäähdytysvesi kuumenee virratessaan sydämen ohi ja nousee riseriä pitkin ylöspäin nosteen ansiosta. Sieltä vesi alkaa valua alaspäin kohti höyrystimiä, joiden läpi virratessaan kuuma primääripiirin vesi jäähtyy luovuttaessaan lämpöä sekundääripiirille. Jäähtyneen veden tiheys on korkeampi, jolloin se palaa luonnonkierrolla painovoiman vaikutuksesta rengastilaa pitkin reaktorin pohjalle uudelleen kuumennettavaksi aloittaen uuden kierron sydämen läpi. (NuScalePower 2018e.)



Kuva 3.1. NuScalen primääripiiri (Ingersoll et al. 2014b, s. 2345).

Kuten kuvasta 3.1 huomataan, reaktorin paineistin sijaitsee paineastian yläosassa. Sillä säädetään kuvassa 3.2 näkyvää reaktorin jäähdytysjärjestelmän (RCS, engl. Reactor Coolant System) painetta. Järjestelmällä ylläpidetään tasaista jäähdytyspainetta reaktorin ajon aikana. Tätä painetta voidaan lisätä ohjaamalla enemmän tehoa paineistimen ohjauslevyjen yläpuolella oleviin lämmitinnippuihin tai pienentää ruiskutusjärjestelmällä. (NuScalePower 2018a, s. 1.2-5.)



Kuva 3.2. Höyrystimen periaatekuva (Neutronbytes 2018).

NuScalen höyrystimet taas ovat kierreputkihöyrystimiä (HCSG, engl. Helical Coil Steam Generator) tavanomaisten vaaka- ja pystyhöyrystimien sijaan. Kierreputkihöyrystimet ovat hyvin kompakteja ja niiden kierreputket saavat Zamanin mukaan jopa 16-43 %:a suurempia arvoja lämmönsiirtokertoimiksi verrattuna suoriin putkilämmönsiirtimiin.

Kierreputkiratkaisun ansiosta ne siirtävät myös lämpöä tehokkaammin kuin yleisempi U-putkiratkaisu. Kierreputkihöyrystimet ovatkin Caramellon mukaan kiinnostavia ratkaisuja höyrystimiksi SMR-voimaloissa juuri niiden geometrian vuoksi (Zaman et al, 2018 & Caramello et al. 2014, s. 1.) SMR-voimaloille kompakti ja tehokas rakenne on kaikki kaikessa. NuScalen integroidun primääripiirin ja kierreputkihöyrystimen ansiosta tämä toteutuu sen moduuliratkaisussa. Kuvassa 3.3 esitetään kierreputkihöyrystin.



Kuva 3.3. Kierreputkihöyrystin (NuScalePower 2018f).

3.2 Sekundääripiiri

Sekundääripiirin höyryvirtauksen tehtävänä on tuottaa sähköä pyörittämällä generaattoriin kytkettyä turbiinia. Primääripiirin sydämessä kuumentunut jäähdytysvesi virtaa kuvan 3.1 mukaisesti riserin jälkeen höyrystimien läpi siirtäen lämpöenergiaansa satojen höyrystinputkien sisällä virtaavalle vedelle. NuScalelle ominaisesti näiden putkien sisällä virtaava sekundääripiirin vesi höyrystyy ja kuumenee sen höyrystymislämpötilaa suurempaan lämpötilaan eli tulistuu, mikä kasvattaa lämpötehoa (NuScalePower 2018e). Tämä tulistunut höyryvirtaus taas pyörittää generaattoriin kytkettyä turbiinia tuottaen sähköä. Lauhduttimessa höyry lauhtuu takaisin nesteeksi, josta se pumpataan takaisin höyrystimeen aloittaen kiertoprosessin uudelleen. Kontaminoitumisen estämiseksi primääri- ja sekundääripiiri pidetään toisiltaan suljettuina (NuScalePower 2018e). Höyryjärjestelmän parametreja koostetaan liitteessä I.

4 REAKTORISYDÄN

Tavallisten kevytvesireaktorien (LWR, engl. Light Water Reactor) tavoin myös NuScalessa tavallinen kevytvesi toimii sekä jäähdytteenä että moderaattorina, mikä tekee siitä termisen reaktorin. Moderaattorin tarkoituksena on termisissä reaktoreissa hidastaa nopeat neutronit fissiotodennäköisyyden kannalta paremmalle termiselle energia-alueelle. Kevyet materiaalit hidastavat neutroneita painavampia materiaaleja paremmin, joten kevyiden vedyn ja hapen yhdistelmänä vesi on sen yleisyyden ja taloudellisuuden vuoksi toimii loistavana moderaattorina. Toisaalta, vesi myös absorboi hieman neutroneita, joten neutronitalouden säilyttämiseksi polttoaineena käytetään rikastettua uraania kriittisyyden saavuttamiseksi.

Tekniset tiedot NuScalesta kerätään NuScalePowerin NRC:lle toimittamista lisensiointimateriaaleista. Reaktorin tärkeimpiä parametreja esitetään taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Reaktorin parametreja (IAEA 2013b; IAEA 2018, s. 75; NuScalePower 2018c, s. 4.1-4; NuScalePower 2018d, s. 10.2-15).

Lämpöteho	160	MW _t
Bruttosähköteho	50	MW _e
Nettosähköteho	~45	MW _e
Hyötysuhde	> 30	%
Järjestelmän paine	128	bar
Sisääntulolämpötila	258	°C
Poistumislämpötila	314	°C
Keskilämpötila	284	°C

NuScalePowerin mukaan laitos on suunniteltu toimimaan yli 95 %:n käyttökertoimella sen 60 vuoden käyttöiän aikana (NuScalePower 2018, s. 4.3-24). NuScalen tekniset tiedot eroavat hieman tyypillisistä arvoista pienille modulaarisille reaktoreille. Esimerkiksi eteläkorealainen SMART (System-Integrated Modular Advanced Reactor) on myös integroitu painevesireaktori, jonka lämpöteho on 310 MW_t ja bruttosähköteho 100 MW_e. Sen reaktorisydän toimii suuremmassa paineessa ja lämpötilassa, sillä sen järjestelmän paine on 150 bar, reaktorisydämen sisääntulolämpötila 296 °C ja poistumislämpötila 323 °C. Toisaalta, esimerkiksi reaktoreiden hyötysuhteet ja turbiineiden pyörimisnopeudet ovat yhtä suuret. (IAEA 2011a.) NuScalen reaktorisydämen oleellimmat dimensiot esitetään taulukossa 4.2.

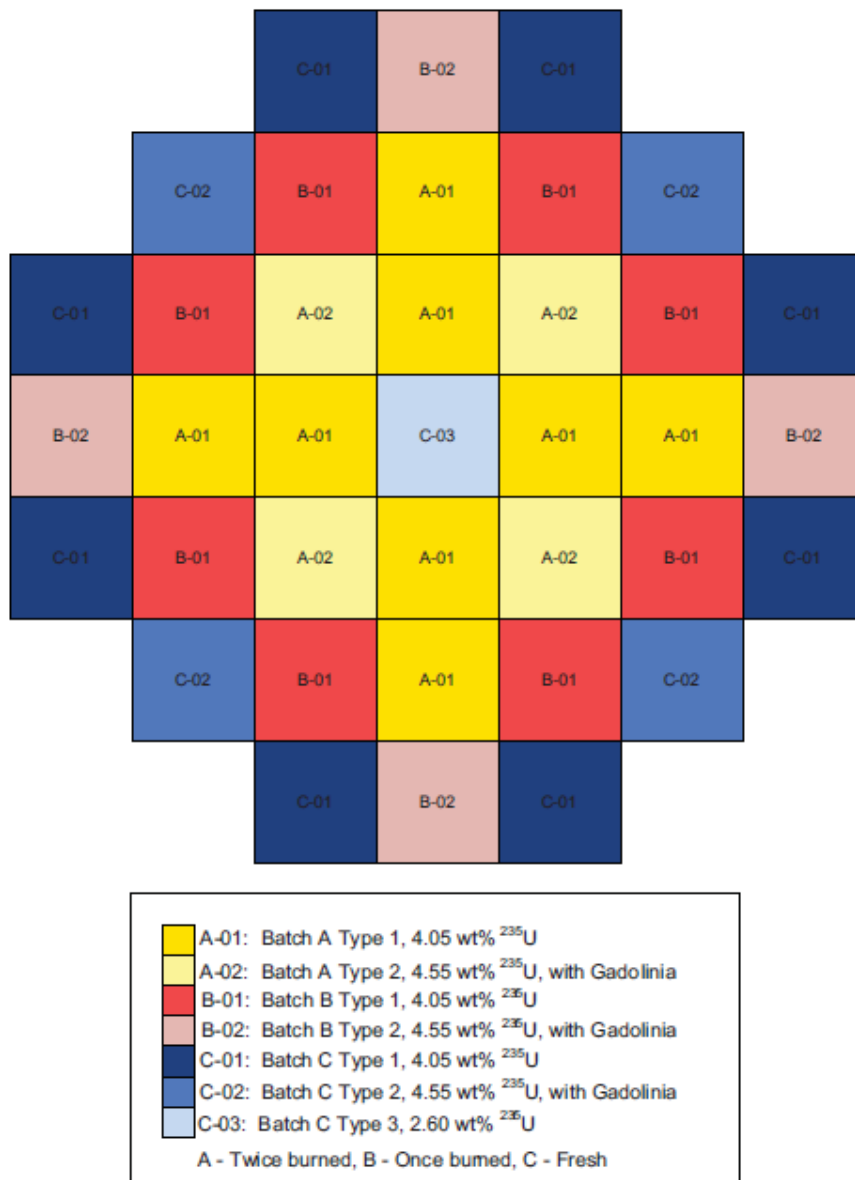
Taulukko 4.2. Reaktorisydämen dimensioita (NuScalePower 2018c, s. 4.1-4 – 4.1-5, 4.3-26).

Reaktorisydämen halkaisija	1,51	m
Aktiivisen polttoaineen pituus	2,00	m
Aktiivisen sydämen poikkipinta-ala	1,71	m ²
Lämmönsiirtopinta-ala polttoainepinnalla	583	m ²
Reaktorisydämen virtausala	0,91	m ²
UO ₂ :n massa metriä kohden	0,47	kg/m

Reaktorisydän on melko pieni verrattuna esimerkiksi painevesireaktori VVER-1000:seen, jonka aktiivisen polttoaineen eli polttoainesauvassa olevan polttoaineen aktiivisen osuuden pituus on merkittävästi suurempi, jopa 3,53 m. Myös sen reaktorisydämen halkaisija on 3,16 metrisenä suurempi. Kuitenkin esimerkiksi myös SMART:issa aktiivisen polttoaineen pituus on 2,00 m. (IAEA 2011a & IAEA 2011b.) Polttoainesauvat ovatkin yleisesti SMR-voimaloissa perinteisiä lyhyempiä, jolloin reaktorisydän voidaan rakentaa pienemmäksi.

4.1 Polttoaine

NuScalen polttoaineena käytetään uraanidioksidia UO₂, jonka U²³⁵ rikastusaste on < 4,95 %. Osaan sauvoista sekoitetaan gadoliniumoksidia Gd₂O₃ homogeenisesti uraanidioksidipellettien sekaan toimimaan palavana absorbaattorina. Sen tarkoituksena on rajoittaa reaktorin ylijäämäreaktiivisuutta latausjakson alussa kaappaamalla neutroneita. Reaktorisydämessä on siis polttoainenippuja, joissa osaan sauvoista on sekoitettu gadoliniumoksidia sekä nippuja, joiden sauvat sisältävät pelkkää uraanidioksidia. NuScalePower on valinnut tämän polttoaineyhdistelmän nimeksi NuFuel HTP2™ (NuScalePower 2018c, s. 4.1-1). Tällä saavutetaan IAEA:n raportin mukaan yli 30 MWd/kg_U keskimääräinen polttoaineen palama eli polttoaineessa kehittynyt energia megawattipäivinä uraanikiloa kohti (IAEA 2018, s. 75). Esimerkiksi Olkiluoto 3:ssa polttoaineen palama on 45 MWd/kg_U (TVO, s. 58). Kuvassa 4.1 esitetään polttoaineen latauskaavio, josta nähdään kuinka tuore ja käytetty polttoaine sijoitetaan symmetrisesti reaktorisydämeen. Samalla huomataan myös, kuinka gadoliniumoksidia sisältävät ja pelkkää uraanidioksidia sisältävät niput sijoitetaan sydämeen.



Kuva 4.1. Polttoaineen latauskaavio (NuScalePower 2018c, s. 4.3-38).

Kuten ylemmästä kuvastakin voidaan laskea, polttoainenippuja on sydämessä 37 kappaletta. NuScalePower on suunnitellut niput olemaan standardinmuotoisia 17 x 17 neliöitä, joista jokainen koostuu 264 polttoainesauvasta, 24 ohjausputkesta ja keskimmäisestä instrumenttiputkesta. Nipun rakennetta kannattelee ohjausputkien lisäksi myös viisi välilihilaa sekä nipun päätykappaleet. Tällaisten nippujen pituus on noin puolet tyypillisten PWR-voimaloiden polttoainenipuista. (NuScalePower 2018c, s. 4.1-1.) Oleelliset tiedot polttoaineesta koostetaan taulukossa 4.3.

Taulukko 4.3. Polttoaineen ominaisuuksia (NuScalePower 2018c, s. 4.2-37, 4.3-27, 4.4-27).

Polttoaine	UO ₂
Rikastusaste	< 4,95 %
Polttoainenippujen määrä	37
Polttoainenippujen muoto	17 x 17
Polttoainesauvojen määrä nipussa	264
Polttoainesauvojen suojakuorimateriaali	Zirkonium-metalliseos
Polttoainesauvan täytekaasu	Helium
Ohjausputkien määrä nipussa	24
Instrumenttiputkia nipussa	1
Välihiloja nipussa	5

Kuten pienissä modulaarisissa reaktoreissa yleensäkin, on myös NuScalessa uraanin rikastusaste melko korkea ja nippujen lukumäärä vähäinen. Tämän vuoksi reaktorisydän ja samalla koko moduuli on suhteellisen pieni ja kompakti. Itse polttoaineen dimensioita koostetaan enemmän liitteessä I.

NuScalen polttoainekierto on suunniteltu olemaan 24-kuukautinen mutta Surinan mukaan myös 48-kuukautinen kierto olisi mahdollinen (Surina 2015, s. 4). Sen reaktorirakennus on suunniteltu siten, että reaktorialtaan kanssa samassa altaassa on myös polttoaineen latausallas sekä käytetyn polttoaineen allas. IAEA:n mukaan polttoainetta vaihdettaessa moduuli jaetaan kolmeen osaan: paineastian alaosaan, eristysastian alaosaan sekä molempien yhteiseen yläosaan. Reaktorisydän ja alemmat sisäosat ovat asennettuna paineastian alaosassa, kun höyrystimet ja paineistin taas ovat yläosassa. Eristysastian komponenttien luokse päästään tarvittaessa miesluukkujen kautta. Polttoaineenvaihdon aikana muut moduulit voivat jatkaa tuotantoaan normaalisti. (IAEA 2018, s. 77.)

4.2 Reaktiivisuuden säätö

NuScalessa reaktiivisuutta voidaan säätää kahdella toisistaan riippumattomalla tavalla: boorisäädöllä ja säätösauvoilla (NuScalePower 2018c, s. 4.1-2). Jäähdytysveden boorikonsentraatiota säädetään kemikaali-, lisävesi- ja uloslaskujärjestelmällä (CVCS, engl. Chemical and Volume Control System) kompensoimaan polttoaineen palamaa, fissiotuotteiden neutronien absorbointia ja palavan absorbaattorin köyhtymistä. Korkeampi boorikonsentraatio tasapainottaa polttoainekierron alun ylijäämäreaktiivisuutta. (NuScalePower 2018c, s. 4.3-6.)

Säätösauvanippuja (CRA, engl. Control Rod Assembly) NuScalessa on yhteensä 16 ja niitä taas käytetään nopeisiin reaktiivisuuden säätöihin. Säätösauvoja on jokaisessa nipussa 24 kappaletta ja niissä on tavallisille painevesireaktoreille tyypillisesti kaksi neutroniabsorboijaa, IAEA:n raportin mukaan boorikarbida B_4C on sauvan kärjessä ja hopea-indium-kadmium –seosta (AIC, engl. Ag-In-Cd) sauvan pohjassa (IAEA 2016, s. 124). Lisäksi jokaiselle nipulle on omat säätösauvan toimilaitteet (CRDM, Control Rod Drive Mechanism), jotka liikuttavat säätösauvoja reaktorisydämessä tai pitävät niitä sähkömagnetismin avulla paikoillaan. Häiriötilanteessa säätösauvat irtoavat CRDM:ien magneeteista ja tippuvat painovoiman vaikutuksesta reaktorisydämessä oleviin polttoainenippujen ohjausputkiin. (NuScalePower 2018b, s. 3.9-37.) Säätösauvojen ominaisuuksia ja dimensioita koostetaan enemmän liitteessä I.

Säätösauvaniput jaetaan NuScalessa kahteen osaan: säätöryhmään (engl. Regulating Bank) ja sammutusryhmään (engl. Shutdown Bank). Kuvassa 4.2 esitetään säätösauvojen sijainti reaktorisydämessä ja siitä huomataan, että molempiin ryhmiin kuuluu kahdeksan nippua, jotka järjestetään symmetrisesti reaktorisydämeen. Sammutusryhmää käytetään reaktorin alasajoon ja pikasulkuun, kun taas säätöryhmää käytetään reaktiivisuuden säätämiseen normaalissa laitoksen ajossa. (NuScalePower 2018c, s. 4.1-2.)



Kuva 4.2. Säättösauvanippujen ja in-core instrumentointien sijainnit (NuScalePower 2018c, s. 4.3-55)

Vertailemalla säättösauvojen sijaintia polttoaineen latauskaavioon nähdään esimerkiksi, että molemmat säättösauvaryhmät sijaitsevat tuoreiden polttoainenippujen läheisyydessä. Lisäksi kuvassa 4.2 näkyvillä in-core instrumenteilla (ICIS, engl. Incore Instrumentation System) mitataan NuScalePowerin mukaan 12 eri polttoainenipussa sydämen neutronivuojakaumaa, jota käytetään määrittämään sydämen kolmiulotteista tehojakaumaa. Reaktorin ylösajossa tätä tehojakaumaa verrataan sydämen tehojakaumaennusteeseen, jotta voidaan todentaa sydämen toimivan suunnitellusti. Normaalisissa tuotannoissa tällä järjestelmällä valvotaan, että tehojakauman muototekijät pysyvät sallituissa rajoissa. Lisäksi ICIS mittaa polttoainenippujen sisääntulo- ja ulosmenolämpötiloja riittävän jäähdytysvirtauksen varmistamiseksi onnettomuuksien jälkeisissä tiloissa. Polttoainenippujen instrumenttiputkia käytetään tähän In-core instrumentointiin. (NuScalePower 2018c, s. 4.3-11-4.3-12.)

5 TURVALLISUUSJÄRJESTELMÄT JA –OMINAISUUDET

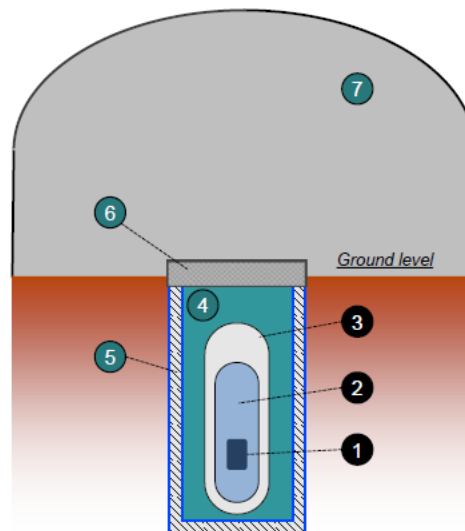
NuScalessa hyödynnetään passiivisia järjestelmiä turvallisuudessa aktiivisten sijaan. Sen perusidea on, että yksinkertaisuus parantaa turvallisuutta. Käytännössä suuren jäähdytteen vuotamisen onnettomuuden mahdollisuus primääripiiristä suojarakennukseen (LOCA, Loss Of Coolant Accident) eliminoiduu, sillä integroidussa primääripiirissä virtaava jäähdyte virtaa vain paineastian sisäpuolella. Lisäksi onnettomuustilanteessa jälkilämmön poistosta huolehditaan usealla eri tavalla, joita käsitellään omilla alaotsikoissaan. Kuvasta 5.1 nähdään lisäksi NuScalen eri leviämissesteet.

Conventional Designs

1. Fuel Pellet and Cladding
2. Reactor Vessel
3. Containment

NuScale's Additional Barriers

4. Water in Reactor Pool
5. Stainless Steel Lined Concrete Reactor Pool
6. Biological Shield Covers Each Reactor
7. Reactor Building

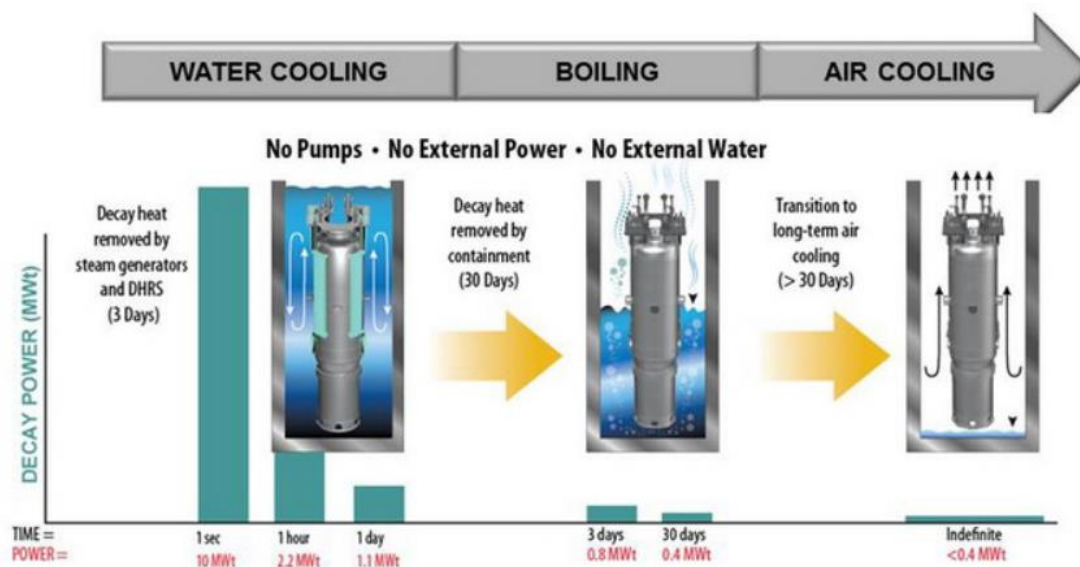


Kuva 5.1. NuScalen suojakerrokset (McGough 2016, s. 26).

NuScalesta löytyy kuvan 5.1 mukaisesti kaikki ydinvoimalaitoksille tyypilliset leviämissesteet. Reaktorirakennus toimii uloimpana suojakerroksena ja kuten yleensäkin, myös NuScalessa reaktori on reaktorialtaassa veden alla. NuScale-voimalaitoksessa moduulien altaiden päälle asennetaan kuitenkin vielä biologinen suoja ylimääräiseksi leviämissesteeksi. Toisaalta, NuScalen reaktorimoduulit ovat kaikki samassa reaktorialtaassa siten, että jokaisen moduulin käyttöpaikan ympärillä on vain kolmella sivulla biologisena suojana toimiva betonikuori. Altaan puoleinen sivu on avonainen. Reaktorimoduuli itsessään koostuu vielä eristysastiasta ja paineastiasta sekä polttoainepelletit ovat oman suojakuorensa sisällä.

5.1 Reaktoriallas

NuScalen reaktoriallaassa oleva aktiivinen vesi toimii lopullisena lämpönieluna onnettomuustilanteessa. Kaikki reaktorimoduulit sijoitetaan samaan altaaseen, joka on tehty ruostumattomasta teräksestä ja sijaitsee voimalan katutasen alapuolella. Se tarjoaa moduulille jäähtytystä vähintään 72 tunniksi suunnittelupohjaisissa onnettomuuksissa. Normaalisissa voimalan ajossa lämpö poistetaan altaasta jäähdytysjärjestelmän kautta ilmakehään jäähdystornin tai vastaavan ulkoisen lämpönielun kautta. (IAEA 2016, s. 125.) Voimalan sähkötehon menettämisonnettomuudessa lämmönpoistaminen hoidetaan pitkän aikavälin jäähdyttämällä (LTC, engl. Long Term Cooling), mikä esitetään kuvassa 5.2.



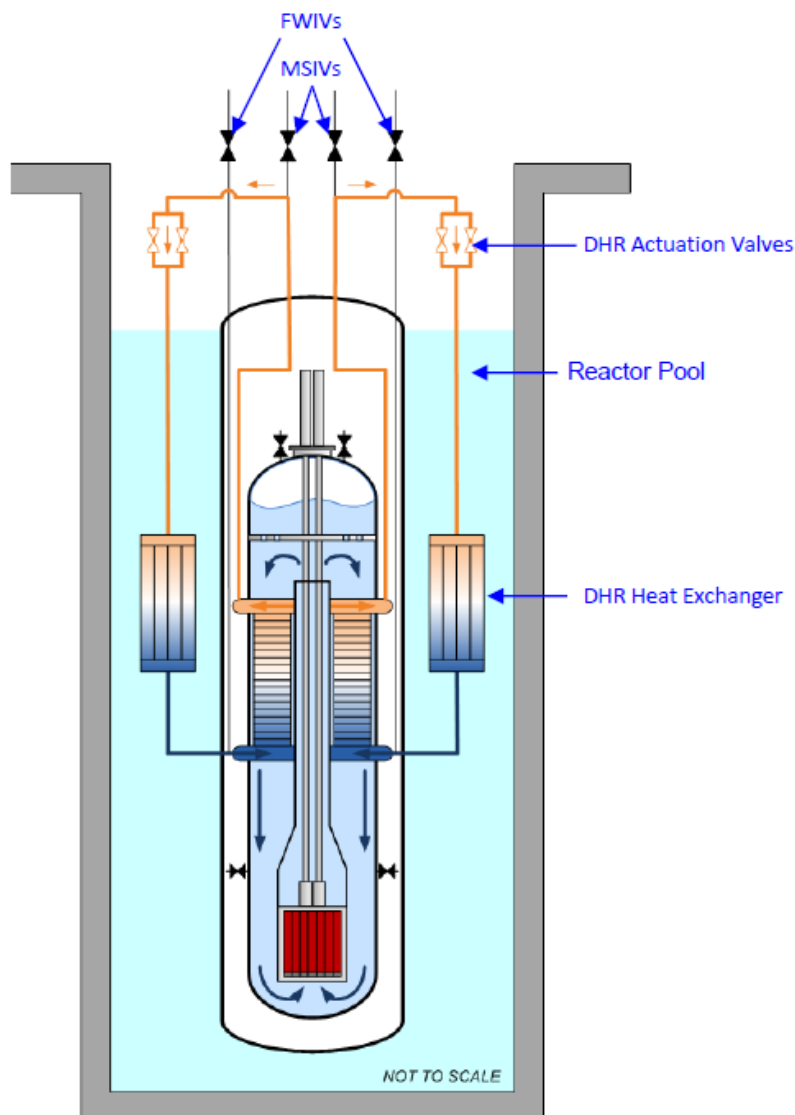
Kuva 5.2. Jälkilämmön poistaminen (NuScalePower 2018h)

Kuvan 5.2 mukaisesti jälkilämpöteho poistetaan reaktorimoduulista sallimalla altaan lämmitä ja kiehua hiljalleen. Onnettomuustilanteessa altaan jälkilämpötehon absorboimiskyky suhteessa reaktorien matalaan tehotasoon on tarpeeksi suuri jäähdyttämään jokaista reaktoria ja estämään polttoainevauriot ainakin 30 päiväksi ilman sähköä, lisävettä tai operaattorin toimia. Altaan kiehuttua tyhjäksi riittää passiivinen ilmajäähdytys pitämään reaktorin jäähdytettynä äärettömän kauan, sillä reaktorin jälkilämpöteho on siinä vaiheessa hyvin pieni. (IAEA 2016, s. 125 – 126 & Ingersoll et al. 2014c, s. 87.)

5.2 Passiiviset jälkilämmönpoistojärjestelmät

5.2.1 Jälkilämmön poistojärjestelmä

NuScalessa on kaksi passiivista lämmönpoistojärjestelmää, jotka siirtävät sydämessä syntyvän jälkilämmön reaktorialtaaseen. Kumpikaan näistä ei tarvitse ulkoista virtalähdettä niiden aktivoitumiseen. Ensimmäinen niistä on jälkilämmön poistojärjestelmä (DHRS, engl. Decay Heat Removal System), joka estää jäähdytteen vuotamisen primääripiiristä suojarakennukseen. Järjestelmä on suljettu ja kaksivaiheinen luonnollinen kiertojärjestelmä. (NuScalePower 2018g.) Sen rakenne esitetään kuvassa 5.3.

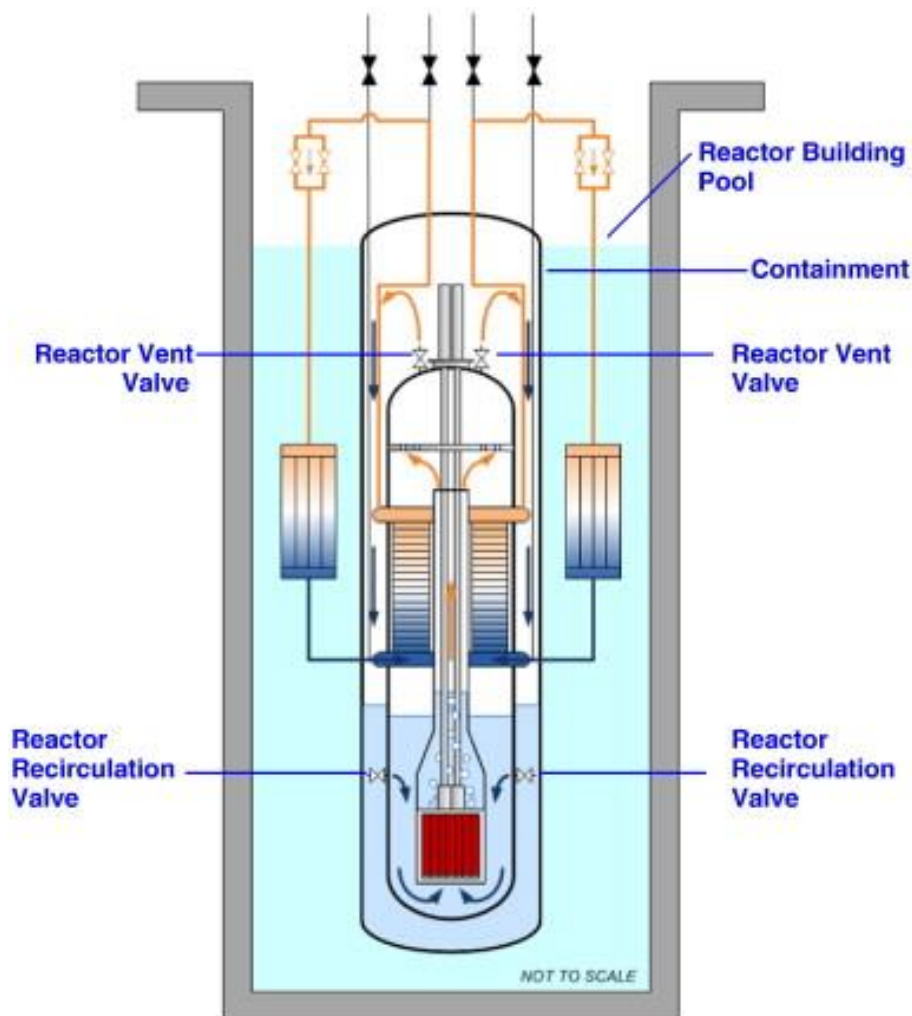


Kuva 5.3. Decay Heat Removal System (Surina 2015, s. 14).

Järjestelmä aktivoituu, kun syöttövettä ei normaalisti ole saatavilla. Sen ensimmäisenä vaiheena säätösauvat laskeutuvat reaktoriin. Kuvassa 5.3 näkyvät pähöyryventtiilit (MSIV, engl. Main Steam Isolation Valve) ja syöttövesivesiventtiilit (FWIV, engl. Feedwater System Isolation Valves) ovat normaalissa tuotannossa auki, jotka sulkeutuvat seuraavaksi. NuScalePowerin mukaan tämän jälkeen DHR-venttiilit aukeavat, jolloin sekundääripiirin höyry virtaa reaktorin höyrystimiltä DHR-lämmönsiirtimille kuvan mukaisesti. DHR-lämmönsiirtimiltä lämpö johtuu reaktorialtaaseen ja lauhtunut höyry palautuu lämmönsiirtimiltä takaisin höyrystimiin luonnollisessa kierrossa painovoiman vaikutuksesta. Tällöin NuScale-reaktorimoduuli jatkaa jäähtymistään ilman sähkövirtaa tai operaattorin toimia käyttäen reaktoriallasta lopullisena lämpönieluna. (NuScalePower 2018g.)

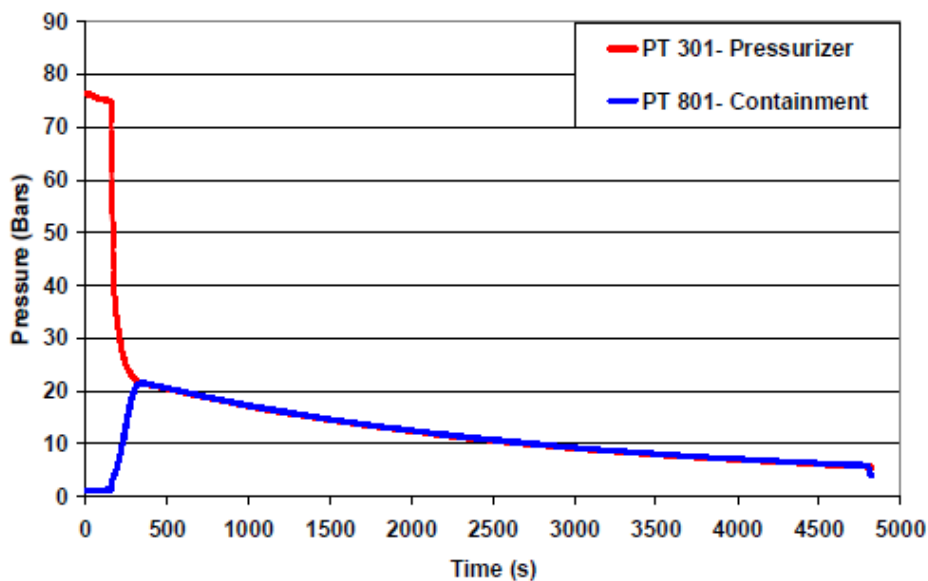
5.2.2 Häätäjähdytysjärjestelmä

Toisena passiivisena jälkilämmönpoistojärjestelmänä toimii häätäjähdytysjärjestelmä (ECCS, engl. Emergency Core Cooling System), jonka tarkoituksena on poistaa sydämen jälkilämpöä tilanteessa, jossa höyrystinputkiniput eivät ole käytettävissä. Se toimii NuScalePowerin mukaan avaamalla ilmanpoistovenntiilejä (RVV, engl. Reactor Vent Valve) reaktorin päässä, jolloin reaktorin paineastiasta eristysastiaan purkautunut primäärijärjestelmän höyry pääsee tiivistymään suojapinnoille. Tämä kondensoitunut lauhde jäähtyy passiivisesti reaktorialtaan veteen lämmön johtumisella ja konvektiolla. Itse lauhde päättyy eristysastiaan, josta se saadaan uudelleenkierrätysventtiilien (RRV, engl. Reactor Recirculation Valve) kautta uudestaan kiertoon. Uudelleenkierrätysventtiileitä on kaksi ja ilmanpoistovenntiileitä kolme ja ne toimivat kaikki toisistaan riippumatta itsenäisesti. ECCS vaatii näistä yhden uudelleenkierrätysventtiilin ja kahden ilmanpoistovenntiilin aukeamisen toimiakseen onnettomuustilanteessa. (NuScalePower 2018g & IAEA 2013b.) Häätäjähdytysjärjestelmä esitetään kuvassa 5.4.



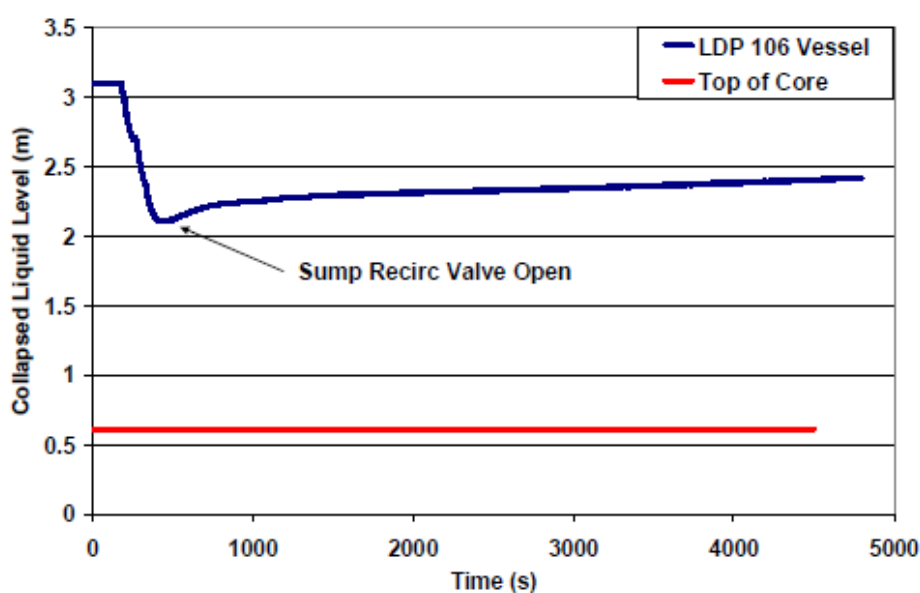
Kuva 5.4. Emergency Core Cooling System (Ingersoll et al. 2014c, s. 87).

Onnettomuustilanteessa ECCS sammuttaa NuScalePowerin mukaan sydämen ketjureaktiot laskemalla säätösauvat reaktoriin sekä sulkemalla höyry- ja syöttövesiventtiilit. Tällöin kuvassa 5.4 näkyvät reaktorin ilmanpoistoveniilit aukeavat ja höyry purkautuu venttiileistä eristysastiaan. (NuScalePower 2018g.) Kuvassa 5.5 esitetään ilmanpoistoveniilien aukeamisen jälkeen mitattua dataa paineen käyttäytymisestä pienessä LOCA-tyyppisessä onnettomuusskenaariossa. Mittaus on suoritettu NuScalen Oregonin valtionyliopistossa sijaitsevassa testilaitoksessa (NIST, engl. NuScale Integral System Test Facility), joka toimii täydessä NuScalen reaktorimoduulin paineessa ja lämpötilassa, vaikka on kooltaan 1/3 –mittakaavassa rakennettu (IAEA 2013b).



Kuva 5.5. Eristysastian ja reaktorin paine ajan funktiona ECCS:n aktivoituessa (IAEA 2013b).

Kuten kuvasta 5.5 nähdään, ilmanpoistoveniilien aukeamisen seurauksena eristysastian paine kasvaa samalla kun reaktorin paine laskee, kunnes paineet saavuttavat tasapainon. Tasapainon saavuttamisen jälkeen molemmat paineet alkavat laskea hiljalleen. Tästä seuraa höyryn tiivistyminen lauhteeksi, jolloin eristysastian pohjalle alkaa muodostua vettä. Kuvassa 5.6 esitetään reaktorin vesitason korkeuden mittausdataa samasta LOCA-tyypin onnettomuudesta kuin kuvan 5.5 testissä.



Kuva 5.6. Reaktorin vesitaso ja ydinpolttoaineen huippu ajan funktiona ECCS:n aktivoituessa (IAEA 2013b).

Höyryn tiivistymisen seurauksena vedenpinnan taso nousee eristysastiassa ja laskee reaktorissa, kunnes vedenpinnat saavuttavat tasapainon ja pysyvät lähes vakiona. Kuten myös kuvasta 5.6 nähdään, tasapainotilassa reaktorin vesitaso on edelleen korkeammalla kuin ydinpolttoaineen huippu eikä koskaan laske sen alapuolelle. Tässä tilassa laitos on ajettu turvallisesti alas. (NuScalePower 2018g.)

5.3 Eristysastia

Turvallisuusteknisesti eristysastian tarkoituksena on pitää sisällään oletetun onnettomuuden radioaktiivisen materiaalin vuoto, heijastaa reaktorista vapautunut lämpö reaktorialtaaseen ECCS:n aktivoituessa ja turvata paineastiaa sisältöineen ulkoisilta uhkilta. Se onkin suunniteltu kestäämään onnettomuustilanteessa syntyvää painetta ja lämpötilaa. Reaktoriallas toimii passiivisena lämpönieluna LOCA –tyyppisessä onnettomuudessa. (NuScalePower 2018a, s. 1.2-6 – 1.2-7.)

Eristysastian sisällä pidetään NuScalePowerin mukaan tyhjiötä normaalissa ajossa, sillä siitä saadaan merkittäviä hyötyjä. Tyhjiön ansiosta eristysastialle haitallinen kosteuspitoisuus pysyy matalana, mikä voisi vaikuttaa turvallisuusjärjestelmien luotettavuuteen ja komponenttien korroosioon. Tyhjiö helpottaa vuotojen havaitsemista reaktorin jäädytteen painerajasta ja rajoittaa hapen määrää astiassa, mikä vähentää palavista kaasuista syntyvän onnettomuuden riskiä. Lisäksi tyhjiö kasvattaa onnettomuudessa mahdollisesti syntyvien höyryjen kondensoitumismääriä ja käytännössä eliminoi konvektiivisen lämmönsiirron tapahtumisen, jolloin paineastia ei tarvitse eristysmateriaalia eikä siitä tällöin synny mahdollista irtoroskaa astian sisälle. (NuScalePower 2018a, s. 1.2-7 & NuScalePower 2018f.)

ECCS:n aktivoituessa onnettomuustilanteessa höyry johdetaan paineastiasta ulos reaktorin ilmanpoistoventtiilien kautta, jolloin eristysastian paine ja lämpötila nousevat hetkellisesti korkeiksi. Ne kuitenkin laskevat jyrkästi, kun höyry tiivistyy eristysastian sisäpinnoille, jolloin se jäähtyy passiivisesti luovuttamalla lämpöä altaaseen johtumisella ja konvektiolla. Tästä seuraa paineen ja lämpötilan säilyminen suunnitteluolosuhteita pienempänä pitkiäkin aikoja. (NuScalePower 2018a, s. 1.2-7.)

6 VERTAILU JA ANALYSOINTI MUIHIN LAITOKSIIN

Vaikka SMR-voimalat hyödyntävät pitkälti jo olemassa olevaa teknologiaa, on niissä huomattavasti eroavaisuuksia perinteisiin suuriin ydinvoimalaitoksiin eikä NuScale ole tässä poikkeus. Näistä eroavaisuuksista merkittävin on kenties NuScalen integroitu primääripiiri, mikä hyödyntää luonnonkiertoa jäähdytysvirtauksen aikaansaamiseksi reaktorisydämelle. IAEA:n raportin perusteella luonnonkierron hyödyntäminen ja integroitu primääripiiri erikseen ovat melko yleisiä ratkaisuja pienissä modulaarisissa reaktoreissa mutta vain kahdessa muussa SMR-konseptissa NuScalen lisäksi niitä käytetään yhdessä (IAEA 2018, s. 7, 31). NuScale pystyy lisäksi tuottamaan tulistunutta höyryä NSSS:ssä, mikä ei ole kovin yleistä kevytvesireaktoreille mutta ei harvinaista SMR-voimaloille. Näiden ratkaisujen ansiosta NuScalen rakenne on yksinkertaisempi ja kompaktimpi verrattuna suurempiin laitoksiin, joissa tarvitaan pääkiertopumppuja ja niihin liittyviä komponentteja tuottamaan tarpeeksi suurta jäähdytysvirtaa reaktorisydämelle.

Toinen merkittävä eroavaisuus liittyy NuScalen teknisesti edistyneisiin passiivisiin turvallisuusjärjestelmiin. Onnettomuustilanteissa NuScalen turvallisuusjärjestelmät eivät tarvitse toimiakseen lainkaan ulkoista sähkövirtaa, lisävettä tai operaattorin toimenpiteitä, sillä ne pystyvät ajamaan laitoksen turvallisesti alas täysin luonnonvoimien, kuten painovoiman ja konvektion, avulla. Monissa muissakin SMR:ssä hyödynnetään paljon passiivisia turvallisuusjärjestelmiä aktiivisten lisäksi mutta NuScale on NRC:n mukaan ainoa ydinvoimalaitos Yhdysvalloissa, joka ei tarvitse ollenkaan ulkoista virtalähdettä turvallisuusjärjestelmilleen (Nabizad 2018).

Kolmas huomattava eroavaisuus on samalla kilpailuvaltti kaikille pienille modulaarisille reaktoreille. Vaikkakin niiden kokonaiskustannusten tuotettua energiayksikköä kohti odotetaan olevan perinteisiä ydinvoimalaitoksia suurempia, tarjoavat ne taloudellisesti sijoittajille vähäriskisen vaihtoehdon. Niiden rakennuskustannukset ovat pienempiä kuin suuremmissa ydinvoimalaitoksissa (Nuclear Energy Agency 2011 s. 15-16). Tämä johtuu suoraan niiden yksinkertaisesta ja modulaarisesta rakenteesta, joita voidaan tuottaa tehtaissa sarjatuotantona. NuScale-reaktorimoduulit voidaan myös niiden pienen kokonsa vuoksi koota valmiiksi tehtailla ja kuljettaa kokonaisina rakennustyömaalle, kun perinteisesti komponentit kasataan paikalleen rakennusvaiheessa. Näistä syistä johtuen

SMR:ien rakennusajat ovat huomattavasti lyhyempiä, jolloin ne ovat myös tuotannossa aikaisemmin. Samoista syistä SMR:t soveltuvat myös syrjäisemmille alueille, joissa ei ole kehittyneitä sähköverkkoja ja tarvittavaa infrastruktuuria suuremmille ydinvoimaloille (Hartman & Rodman 2015). Lisäksi yksinkertaisen rakenteen vuoksi niissä on vähemmän hajoavia komponentteja, joiden uusimiseen ja huoltamiseen tarvitaan investointeja.

NuScalen teknisiä tietoja vertaillaan tarkemmin US-EPR:in (US-Evolutionary Power Reactor) ja US-APWR:in (US-Advanced Pressurized Water Reactor) vastaaviin tietoihin taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1. Reaktoriparametrien vertailua (NuScalePower 2018c, s. 4.4-27).

Parametri	NuScale	US-EPR	US-APWR	
Reaktorisydämen lämpöteho	160	4590	4451	MW _t
Järjestelmän paine	128	155	155	bar
Sisääntulolämpötila	258	295	288	°C
Keskilämpötila	284	314	309	°C
Jäähdytysveden minimivirtaus	$1,94 \cdot 10^6$	$7,85 \cdot 10^7$	$7,62 \cdot 10^7$	kg/h
Jäähdytysveden maksimivirtaus	$2,38 \cdot 10^6$	$8,85 \cdot 10^7$	$8,53 \cdot 10^7$	kg/h
Jäähdytysveden suunnitteluvirtaus	$2,11 \cdot 10^6$	$8,16 \cdot 10^7$	$7,94 \cdot 10^7$	kg/h
Keskimääräinen lineaariteho	8,2	17,1	15,3	kW/m
Lämmönsiirtopinta-ala polttoainepinnalla	583	8005	8488	m ²
Reaktorisydämen virtausala	0,91	5,91	6,32	m ²

Taulukosta 6.1 huomataan, että US-EPR:n ja US-APWR:n reaktoriparametrien arvot melko tyypillisiä vastaavan kokoluokan reaktoreissa. Esimerkiksi Olkiluoto 3:n reaktorisydämen lämpöteho on 4300 MW_t, järjestelmän paine 155 bar, jäähdytteen keskilämpötila 312 °C ja jäähdytteen virtaus $8,3 \cdot 10^7$ kg/h (TVO, s. 58). Taulukkoa 6.1 tutkimalla nähdään myös, että yhden pienen NuScale-reaktorimoduulin tuottama lämpöteho reaktorisydämissä on hyvin pieni verrattuna suurempiin laitoksiin. Mutta yhdessä laitoksessa 12 moduulia tuottaakin lämpötehoa jo 1920 MW_t. Tämä huomioiden ei ole yllättävää, että NuScale toimii pienemmässä paineessa ja lämpötilassa kuin US-EPR, US-APWR ja OL3. Lisäksi NuScalessa syöttöveden suunnitteluvirtaus on vain 2,6

% US-EPR:n vastaavasta mutta keskimääräinen lämmönousu sydämessä yli kaksi kertaa suurempi.

Taulukosta 6.1 huomataan myös, että keskimääräinen lineaariteho eli lämpöteho polttoainesauvan pituusyksikköä kohti on myös NuScalessa noin puolet vertailukohteista. Myös NuScalen keskimääräinen polttoaineen palama 30 MWd/kg_U on melko pieni, sillä nykyisin isommissa painevesireaktoreissa päästään tavallisesti isompiin lukemiin. Pienemmästä lineaaritehosta ja palamasta voidaan päätellä, että NuScalessa kuluu enemmän uraania tuotettua energiayksikköä kohti kuin isommissa reaktoreissa. Tällöin myös käytetyn polttoaineen määrä tuotettua energiayksikköä kohti on suurempaa. Heikompi polttoaineen käyttösuhte tuotettua energiayksikköä kohti on kuitenkin tyypillistä useimmille pienille modulaarisille reaktoreille, kun vertailukohteena on isommat ydinreaktorit.

NuScale, US-EPR ja US-APWR käyttävät kaikki polttoaineenaan rikastettua uraania, joten vertaillaan myös sitä taulukossa 6.2. Esimerkiksi myös Olkiluoto 3:ssa polttoaineen arvot ovat TVO:n lähettä tutkimalla hyvin samanlaisia (TVO, s. 58).

Taulukko 6.2. Polttoaineen vertailua (NuScalePower 2018c, s. 4.4-27 & Mitsubishi Heavy Industries, LTD 2008, s. D-56).

Parametri	NuScale	US-EPR	US-APWR	
Rikastusaste	4,95	4,95	4,55	%
Polttoaineen pituus	244	420	420	cm
Polttoaineen paino nipussa	249	536	612	kg
Reaktorisydämen halkaisija	151	377	304	cm
Polttoainepipujen määrä	37	241	257	-
Polttoainesauvojen määrä nipussa	264	264	264	-
Nipun hilaväli	21,50	21,50	21,50	cm
Sauvan hilaväli	1,26	1,26	1,26	cm
Sauvan ulkohalkaisija	0,950	0,950	0,950	cm
Pelletin suojakuoren hilaväli	0,008	0,008	0,008	cm
Polttoainepylvään korkeus	200	406	420	cm
Pelletin suojakuoren ulkohalkaisija	0,812	0,812	0,818	cm

Pienissä modulaarisissa reaktoreissa polttoaineen rikastusaste on usein suurempi kuin monissa perinteisissä voimaloissa, joissa uraani-235 isotoopin rikastusaste vaihtelee välillä 3-5 %, kun NuScalen rikastusaste on jopa $< 4,95 \%$. Taulukosta 6.2 huomataan,

että NuScalessa polttoainesauvojen pituus on lähes puolet US-EPR:n ja US-APWR:n sauvojen pituudesta sekä polttoainenuippuja on merkittävästi vähemmän, jolloin reaktorisydän voidaan rakentaa pienemmäksi kuin perinteisissä voimaloissa. Samasta syystä polttoaineen paino nippua kohti on huomattavasti pienempi NuScalessa. Muutoin polttoaine on lähes identtistä vertailukohteisiin. Lisäksi polttoaineen vaihtoväliä voidaan suuren rikastusasteen ansiosta kasvattaa jopa nelivuotiseksi, vaikkakin NuScalen polttoainekierto on suunniteltu olemaan kaksivuotinen (Surina 2015, s. 4).

Reaktorien jakamisessa useaan pieneen moduuliin on lukuisia etuja yhteen suureen reaktoriin verrattuna. NuScalessa muut reaktorimoduulit voivat jatkaa tuotantoaan, vaikka osa moduuleista olisi alhaalla esimerkiksi häiriötilan tai polttoaineen lataamisen vuoksi (IAEA 2018, s. 77). Pieniä moduuleita voidaan myös siirtää kokonaisina reaktorialtaasta erilliseen polttoaineen latausaltaaseen, kun perinteisesti suuremmissa laitoksissa tuotanto pysähtyy vuosihuollon ajaksi. Niissä polttoaine ladataan suoraan reaktorialtaassa sijaitsevaan reaktoriin. Niin ikään, kun tuotanto hajautetaan useampaan reaktorimoduuliin, on yhdessä moduulissa absoluuttisesti vähemmän polttoainetta kuin suurissa reaktoreissa. Tällöin myös mahdollisessa onnettomuudessa karkaavan radioaktiivisen materiaalin määrä on pienempi.

7 YHTEENVETO

NuScale on maailmalla vallitsevan trendin mukaisesti kaupalliseen käyttöön suunniteltu kevytvesireaktori, joka käyttää uraanidioksidia polttoaineenaan. Sen primääripiirin rakenteen ansiosta se luokitellaan iPWR:ksi, jonka reaktorisydämessä syntyy 160 MW_t lämpöteho. Kokonaisessa NuScale-voimalaitoksessa reaktorimoduuleita on yhteensä 12 samassa reaktorialtaassa, jotka tuottavat verkkoon yhteensä noin 570 MW_e sähkötehoa.

Kehitteillä olevissa SMR-voimaloissa integroidaan usein primääripiiri eristysastian sisään tai hyödynnetään luonnonkiertoa saamaan riittävä jäähdytysvirtaus reaktorisydämelle mutta vain harvoissa konsepteissa niitä hyödynnetään samanaikaisesti, kuten NuScalessa. Sen NSSS:iin kuuluvat paineastian lisäksi paineistin ja kaksi kierreputkihöyrystintä, joissa tuotetaan tulistunutta höyryä sekundääripiirin höyryvirtaukseen. Koska primääripiiri on asennettu kokonaan paineastian sisään, reaktorin jäähdyte virtaa ainoastaan paineastian sisäpuolella. Turvallisuusteknisesti tämä eliminoi suuren LOCA-onnettomuuden mahdollisuuden. Näiden ratkaisujen ansiosta NuScalen reaktorimoduuli saadaan hyvin kompaktiksi ja turvalliseksi, mitkä ovat SMR-voimaloille hyvin ominaisia piirteitä.

NuScalen turvallisuusjärjestelmät toimivat täysin passiivisesti eivätkä tarvitse lainkaan ulkoista virtalähdettä toimiakseen. Sen jälkilämmön poistojärjestelmät siirtävät onnettomuuksissa syntyvän jälkilämmön reaktorialtaaseen, mikä toimii passiivisena ja lopullisena lämpönieluna. Nämä järjestelmät pystyvät onnettomuustilanteessa ajamaan reaktorin turvallisesti alas ja jäähdyttämään reaktorisydäntä täysin ilman sähköä, lisävetä tai operaattorin toimia. Reaktoriallas kykenee absorboimaan riittävästi lämpöä jäähdyttääkseen reaktorisydämet ja estämään polttoainevauriot ainakin 30 päiväksi ennen sen tyhjäksi kiehumista, minkä jälkeenkin reaktorit pysyvät jäähdytettynä äärettömän kauan ilmajäähdytyksellä.

Polttoainetta yksittäisissä reaktorimoduuleissa on vähemmän kuin perinteisissä LWR-voimaloissa. Polttoainenippuja on yksittäisessä reaktorimoduulissa vain 37 nippua ja ne ovat lisäksi vain noin puolet perinteisten voimaloiden nippujen pituudesta. Uranin rikastusaste on myös SMR-voimaloissa yleensä korkeampi ja se on NuScalessa jopa 4,95 %. Muilta osin polttoaine on lähes identtistä perinteisiin voimaloihin verrattuna.

Ylijäämäreaktiivisuutta reaktorissa polttoaineen latausjakson alussa rajoitetaan sekoittamalla gadoliniumoksidia osaan polttoaineen sekaan. Keskimääräisesti tällä saavutetaan yli 30 MWd/kg_U palama. Sen ja muiden SMR-voimaloiden polttoaineen käytösuhde on kuitenkin heikompaa kuin isommissa laitoksissa.

Tuotannon aikana reaktiivisuutta taas säädetään boorisäädöllä ja säätösauvoilla. Boorisäädöllä kompensoidaan polttoaineen palamaa, fissiotuotteiden neutronien absorbointia ja palavan absorbaattorin köyhtymistä. Säätösauvoja käytetään nopeisiin reaktiivisuuden säätöihin ja reaktorin pikasulkuihin. Muut reaktorimoduulit voivat jatkaa tuotantoaan, vaikka yksi tai useampi niistä olisikin alhaalla esimerkiksi häiriötilan tai polttoaineen latauksen aikana. Modulaarisuus ja sarjatuotantomahdollisuudet tekevätkin SMR-voimaloista houkuttelevan investoinnin esimerkiksi alueille, joissa ei ole kehittyneitä sähköverkkoja tai tarvittavaa infrastruktuuria suuremmille ydinvoimalaitoksille.

LÄHDELUETTELO

Canadian Nuclear Safety Commission. 2014. R550.1 Survey of Design and Regulatory Requirements for New Small Reactors, Contract No. 87055-13-0356. Final Report. Saatavissa: <http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/RSP-0299-eng.pdf>

Caramello M. et al. 2014. Helical coil thermal hydraulic model. Saatavissa: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/547/1/012034/pdf>

Hartman Kristy & Rodman Lauren. 2015. New Nuclear Power Plant Designs: The Not So Small Role of Small Modular Reactors. [verkkojulkaisu]. [viitattu 16.2.2018]. Saatavissa: <http://www.ncsl.org/research/energy/nuclear.aspx>

IAEA. 2011a. Status report 77 - System-Integrated Modular Advanced Reactor (SMART). [viitattu 1.12.2018]. Saatavissa: <https://aris.iaea.org/PDF/SMART.pdf>

IAEA. 2011b. Status report 93 - VVER-1000 (V-466B) (VVER-1000 (V-466B)). [viitattu 1.12.2018]. Saatavissa: [https://aris.iaea.org/PDF/VVER-1000\(V-466B\).pdf](https://aris.iaea.org/PDF/VVER-1000(V-466B).pdf)

IAEA. 2013a. Advanced Reactors Information System (ARIS). [verkkojulkaisu]. [viitattu 16.2.2018]. Saatavissa: <https://aris.iaea.org/sites/SMR.html>

IAEA. 2013b. NuScale Power Modular and Scalable Reactor. Saatavissa: <https://aris.iaea.org/sites/..%5CPDF%5CNuScale.pdf>

IAEA. 2016. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. Saatavissa: https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2016.pdf

IAEA. 2018. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. Saatavissa: https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2018.pdf

Ingersoll D.T. et al. 2014b. NuScale energy supply for oil recovery and refining applications. Saatavissa: <https://www.nuscalepower.com/-/media/Nuscale/Files/Technology/Technical-Publications/nuscale-energy-supply-for->

oil-recovery-and-refining-
applications.ashx?la=en&hash=B26EA9739159B6CD9672CFBD640845171A42DBED

Ingersoll D.T. et al. 2014c. NuScale small modular reactor for Co-generation of electricity and water. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916414000885/pdf?md5=0c4db15f379808426fdac5c94f52ac15&pid=1-s2.0-S0011916414000885-main.pdf>

Ingersoll D.T. et al. 2015. Can Nuclear Energy and Renewables be Friends? Saatavissa: https://docplayer.net/storage/50/25948955/1543789419/UaTtKeVdDj5XArxu_eSHCQ/25948955.pdf

Laatikainen Tuula. 2017. Haave omasta pienestä ydinvoimalasta villitsee kuntia – vaatisi ydinenergialakien perusteellisen mylläyksen. [verkkojulkaisu]. [viitattu 16.2.2018]. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/haave-omasta-pienesta-ydinvoimalasta-villitsee-kuntia-vaatise-ydinenergialakien-perusteellisen-myllayksen-6693613>

McGough Mike. 2016. NuScale Power Small Modular Reactors. Saatavissa: https://www.losalamosnm.us/UserFiles/Servers/Server_6435726/File/Government/Departments/Public%20Utilities/DPU%20Files/CFPP/NuScale_Los%20Alamos%20PublicMtg%20120116-FINAL.pdf

Mitsubishi Heavy Industries. LTD, 2008. US-APWR Fuel System Design Evaluation. Saatavissa: <https://www.nrc.gov/docs/ML0807/ML080720649.pdf>

Nabizad Mariam. 2018. U.S. Nuclear Regulatory Commission Approves Key Safety Aspect to NuScale Power's Advanced Reactor Design. [verkkojulkaisu]. [viitattu 23.11.2018]. Saatavissa: <https://newsroom.nuscalepower.com/press-release/company/us-nuclear-regulatory-commission-approves-key-safety-aspect-nuscale-powers-adv>

Neutronbytes. 2018. New Milestones Achieved for SMR Development. [verkkojulkaisu]. [viitattu 14.12.2018]. Saatavissa: <https://neutronbytes.com/2017/11/15/new-milestones-achieved-for-smr-development/>

Nuclear Energy Agency. 2011. Current Status. Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors. Saatavissa: <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011/current-status-small-reactors.pdf>

NuScalePower. 2018a. Chapter One. Introduction and General Description of the Plant. Part 2 - Tier 2. Revision 2. Saatavissa: <https://www.nrc.gov/docs/ML1831/ML18310A314.pdf>

NuScalePower. 2018b. Chapter Three. Design of Structures, Systems, Components and Equipment. Part 2 - Tier 2. Revision 2. Saatavissa: <https://www.nrc.gov/docs/ML1831/ML18312A294.html>

NuScalePower. 2018c. Chapter Four. Reactor. Part 2 - Tier 2. Saatavissa: <https://www.nrc.gov/docs/ML1831/ML18310A325.pdf>

NuScalePower. 2018d. Steam and Power Conversion System. Part 2 - Tier 2. Revision 2. Saatavissa: <https://www.nrc.gov/docs/ML1831/ML18310A332.pdf>

NuScalePower. 2018e. How NuScale Technology Works. [verkkojulkaisu]. [viitattu 3.3.2018]. Saatavissa: <http://www.nuscalepower.com/our-technology/technology-overview>

NuScalePower. 2018f. NuScale International Test Programs. [verkkojulkaisu]. [viitattu 3.3.2018]. Saatavissa: <http://www.nuscalepower.com/our-technology/test-programs/international-test-programs>

NuScalePower. 2018g. Passive Safety Systems. [verkkojulkaisu]. [viitattu 23.2.2018]. Saatavissa: <http://www.nuscalepower.com/smr-benefits/safe/reactor-modules>

NuScalePower. 2018h. Triple Crown for Nuclear Plant Safety. [verkkojulkaisu]. [viitattu 5.3.2018]. Saatavissa: <http://www.nuscalepower.com/smr-benefits/safe/triple-crown>

Reyes José N Jr. 2012. NuScale plant safety in response to extreme events. Saatavissa: <https://www.nuscalepower.com/-/media/Nuscale/Files/Technology/Technical-Publications/nuclear-plant-safety-in-response-to-extreme-events.ashx?la=en&hash=F526A531E5B114B415162C3A8099CEDA51D416BB>

Surina Jay. 2015. NuScale Technology & Economic Overview. Simple, Safe, Economic. Saatavissa: <https://businessdocbox.com/storage/80/81901097/1543789756/UQB4hgsWmXQj8q7KzT8I-A/81901097.pdf>

TVO. Nuclear Power Plant Unit Olkiluoto 3. Saatavissa: https://www.tvo.fi/uploads/julkaisut/tiedostot/ydinvoimalayks_OL3_ENG.pdf

Zaman Fakhari et al. 2017. Thermal hydraulics analysis of a helical coil steam generator of a small modular reactor. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/sdfe/pdf/download/read/noindex/pii/S0306454916305527/1-s2.0-S0306454916305527-main.pdf>

**LIITE 1. TARKEMPIA TEKNISIÄ TIETOJA
HÖYRYJÄRJESTELMÄSTÄ, POLTTOAINEESTA JA
SÄÄTÖSAUVOISTA**

Turbiinin pyörimisnopeus	3600 rpm
Päähöyryvirtaus täydellä teholla	241 t/h
Päähöyryjärjestelmän paine	34 bar
Päähöyryjärjestelmän lämpötila	307 °C
Suunnittelulämpötila	343 °C
Syöttöveden lämpötila	149 °C

Höyryjärjestelmän parametreja (NuScalePower 2018d, s. 10.1-4, 10.2-15).

Polttoaineen paino nipussa	250 kg
Nipun pituus	2,44 m
Nipun hilaväli	0,22 m
Sauvan pituus	2,16 m
Sauvan hilaväli	12,60 mm
Sauvan ulkohalkaisija	9,50 mm
Sauvan sisähalkaisija	8,28 mm
Sauvan kuoren paksuus	0,61 mm
Pelletin pituus	10,16 mm
Pelletin suojakuoren ulkohalkaisija	8,12 mm

Polttoaineen dimensioita (NuScalePower 2018c, s. 4.2-37, 4.3-27, 4.4-27)

Nipun massa	19,50	kg
Nipun pituus	2,40	m
Sauvan ulkohalkaisija	9,68	mm
Sauvan sisähalkaisija	8,74	mm
Säätösauvan ylempi absorbaattori	B ₄ C	
Säätösauvan alempi absorbaattori	Ag-In-Cd	
Säätösauvan suojakuorimateriaali	304 ruostumaton teräs	
Säätösauvan täytekaasu	Helium	

Säätösauvojen ominaisuuksia ja dimensioita (NuScalePower 2018c, s. 4.2-39, 4.3-27).