



BWRX-300 REAKTORI

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

Joonatan Renko

Tarkastaja: TkT Elina Hujala

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Joonatan Renko

BWRX-300 Reaktori

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

33 sivua, 8 kuvaa ja 3 taulukkoa

Tarkastaja: TkT Elina Hujala

Avainsanat: BWRX-300, SMR, Pienydinvoimala, Luonnonkierto

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on luoda katsaus BWRX-300 pienydinvoimalan pääpiirteisiin ja erityisominaisuuksiin, sekä vertailla laitosta muihin kehitteillä oleviin pienydinvoimaloihin. Työssä pohditaan myös pienydinvoimaloiden roolia tulevaisuuden energiajärjestelmässä. Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena avoimien lähteiden avulla.

Tarkastelun kohteena oleva BWRX-300 on GE Hitachi -ydinenergiayhtiön kehittämä pienydinvoimala, jonka kilpailuetuna suuriin perinteisiin ydinvoimalaitoksiin nähden toimii muun muassa joustavan skaalautuvuuden mahdollistava laitoksen pieni koko, modulaarinen rakennustapa, sekä pienemmät investoinnin pääomavaatimukset. Kustannuslähtöisen suunnittelun ohella laitoksen turvallisuusratkaisuihin on kiinnitetty erityistä huomiota. Yksinkertaisten passiivisten turvallisuusjärjestelmien toiminta perustuu painovoimaan ja konvektioon luoden edellytykset kalliiden aktiivisten turvallisuusratkaisujen poistoon.

Voimalaitosprosessin kannalta laitos toimii samalla tavalla kuin perinteiset ympäri maailmaa käytössä olevat kiehutusvesilaitokset. Merkittävimmän pesäeron näihin laitoksiin luo ratkaisu toteuttaa reaktorin jäähdytys luonnonkiertoon perustuvalla järjestelmällä sekä normaaliajossa, että onnettomuustilanteessa. Työssä luodaan katsaus luonnonkiertoon kokonaisuutena, sekä pohditaan kyseisen toteutuksen etuja ja haasteita ydinvoimalaitoksen viitekehyksessä.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Joonatan Renko

BWRX-300 Reactor

Bachelor's thesis

2023

33 pages, 8 figures and 3 tables

Examiner(s): Doctor of Science Elina Hujala

Keywords: BWRX-300, SMR, Small Modular Reactor, Natural Circulation

The aim of this bachelor's thesis is to provide an overview of the main features and special characteristics of the BWRX-300 small modular reactor, as well as to compare it to other SMR projects under development. The thesis also examines the role of small nuclear power plants in the future energy system. The work has been carried out as a literature review using open sources.

The BWRX-300 is a small modular reactor developed by GE Hitachi Nuclear Energy company. Its competitive advantages over large traditional nuclear powerplants include flexible scalability achieved by its small size, modular construction method and lower capital investment requirements. In addition to cost-oriented design, special attention has been paid to plant's safety solutions. The working principle of simple passive security systems are based on gravity and convection creating conditions for the elimination of expensive active safety solutions.

From the perspective of the power plant process, the BWRX-300 operates in the same way as conventional boiling water reactors used around the world. The most significant difference to these reactors is the solution to use a natural circulation-based cooling system for the reactor in both normal operation and accident situations. The work provides an overview of the natural circulation as a whole and discusses the advantages and challenges of this implementation in the context of a nuclear power plant.

SYMBOLILUETTELO

k	Reaktorin kasvutekijä	[-]
ρ	Reaktorin reaktiivisuus	[-]
g	Putoamiskiihtyvyys	[m/s ²]
p	paine	[bar, pa]
ρ	tiheys	[kg/m ³]

LYHENNELUETTELO

ABWR	Kehittynyt kiehumisvesireaktori (Advanced Boiling Water Reactor)
BWR	Kiehumisvesireaktori (Boiling Water Reactor)
ESBWR	Yksinkertaistettu taloudellinen kiehumisvesireaktori (Economic Simplified Boiling Water Reactor)
FCS	Pakotetun kierron järjestelmä (Forced Circulation System)
FMCRD	Säätösauvojen ajolaitteisto (Fine Motion Control Rod Drive)
FPU	Kelluva voimalaitosyksikkö (Floating Power Unit)
FSF	Perusturvatoiminnot (Fundamental Safety Functions)
HBPP3	Humboldt Bay ydinvoimalan yksikkö 3 (Humboldt Bay Nuclear Power Plant Unit 3)
IAEA	Kansainvälinen atomienergiajärjestö (International Atomic Energy Agency)
ICRP	Kansainvälinen säteilysuojelukomissio (International Commission on Radiological Protection)
ICS	Eristetty lauhdutusjärjestelmä (Isolation Condenser System)
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency)
IPWR	Integroitu painevesireaktori (Integral Pressurized Water Reactor)

NCS	Luonnonkiertojärjestelmä (Natural Circulation System)
NRC	Yhdysvaltain ydinturvallisuusvirasto (Nuclear Regulatory Commission)
NSSS	Tuorehöyryn syöttöjärjestelmä (Nuclear Steam Supply System)
OL3	Olkiluoto 3
PCCS	Passiivinen suojarakennuksen jäähdytysjärjestelmä (Passive Containment Cooling System)
PCV	Reaktoripaineastian suojarakennus (Primary Containment Vessel)
PSS	Passiivinen turvallisuusjärjestelmä (Passive Safety System)
PWR	Painevesireaktori (Pressurized Water Reactor)
RPV	Reaktoripaineastia (Reactor Pressure Vessel)
SBWR	Yksinkertaistettu kiehumisvesireaktori (Simplified Boiling Water Reactor)
SMR	Pieni modulaarinen reaktori (Small Modular Reactor)
VBWR	Vallecitos kiehumisvesireaktori (Vallecitos Boiling Water Reactor)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Symboliluettelo

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	7
2	BWRX-300 kehitys ja historia	8
2.1	Luonnonkiertoon perustuvat GE:n reaktorit	8
2.2	Pakotettuun kiertoon perustuvat GE:n reaktorit.....	8
2.3	ESBWR.....	9
2.4	BWRX-300	9
3	Luonnonkierto ydinvoimalaitoksissa.....	11
3.1	Luonnonkierron toimintaperiaate.....	11
3.2	Luonnonkierron edut.....	12
3.3	Luonnonkierron haasteet.....	13
4	BWRX-300 Pääjärjestelmät	15
4.1	Reaktorirakennus.....	16
4.1.1	Reaktoripaineastia.....	16
4.1.2	Reaktorisydän	16
4.2	Turbiinirakennus	19
4.2.1	Välitulistus	20
5	Laitoksen turvallisuus.....	21
5.1	Eristetty lauhdutusjärjestelmä, ICS.....	22
5.2	Passiivinen suojarakennuksen jäähdytysjärjestelmä, PCCS	24
6	Vertailu muihin SMR-ratkaisuihin.....	25
7	Tulevaisuus.....	28
8	Johtopäätökset	29
	Lähteet	31

1 Johdanto

Maailman väkiluvun lisääntyessä kasvaa myös tarve entistä suuremmalle määrälle sähköä ja lämpöä. Ilmastonmuutoksen vuoksi fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaa energiantuotantoa ei voida jatkaa saatika viedä suurissa määrin kehittyviin maihin. Paine kestävän kehityksen mukaisiin uusiin energiantuotantoratkaisuihin on siis valtava. Siirtymistä vihreisiin energiantuotantomuotoihin on viimeisen vuoden aikana vauhdittanut etenkin euroopassa Ukrainan sota, joka tuo suorastaan raadollisella tavalla päivänvaloon valtioiden fossiilisten polttoaineiden riippuvuuden, sekä keskitetyn energiatuotannon heikkoudet. Ydinvoima on yleistymisensä jälkeen 1970-luvulta eteenpäin nostanut osuuttaan globaalissa mittakaavassa erityisesti sähköntuotannossa aina tähän päivään saakka. Nykyään ydinvoimalla tuotetaan noin kolmannes vähäpäästöisestä sähköstä. Ydinvoiman merkitys maailmanlaajuisessa sähköntuotannossa on siis erittäin suuri ja hajautetut pienreaktorit pyrkivät tarjoamaan yhtä ratkaisua puhtaaseen ja turvalliseen energiantuotantoon. (Char N.L., 1987, 1; Jawerth N, 2020)

Tutkimuksessa luodaan katsaus kehitteillä olevaan General Electric:n 10. sukupolven kiehutusvesireaktoriin, jonka toimintaperiaatteet ovat hyvin yksinkertaiset, mutta jota GE pitää silti innovatiivisimpana reaktorikonseptina vuoden 1955 jälkeen. Reaktorin pienen koon ja yksinkertaisen rakenteen vuoksi voimalaitosta pyritään markkinoimaan perinteisiä suuria voimalaitoksia pienemmällä hinnalla, sekä paljon lyhyemmällä toimitusaikataululla ympäri maailmaa. (GE Hitachi, 2022)

Keskustelu pienistä modulaarisista reaktoreista (SMR) on kiihtynyt viimeisen vuosikymmenen aikana. SMR-konsepteja on kehitteillä eri maiden toimesta useita kymmeniä ja tässä tutkimuksessa onkin tarkoitus panostaa kenties kilpailukykyisimmän konseptin ominaisuuksiin ja erityispiirteisiin, sekä vertailla laitostyyppien etuja ja heikkouksia muihin konsepteihin nähden. Työssä käydään myös läpi laitoksen suunnittelun historiaa pohjautuen vuosikymmeniä taaksepäin edeltäneisiin BWR laitoksiin, sekä käydään läpi tulevaisuuden näkymiä niin laitostyyppien, kuin myös ylipäätään SMR voimalaitoksien kannalta. (IAEA, 2022)

2 BWRX-300 kehitys ja historia

General Electric:llä on pitkälle menneisyyteen ulottuvat juuret mitä tulee ydinvoimaloiden kehittämiseen ja rakentamiseen. Vuonna 1957 ensimmäisen kiehutusvesireaktorin rakentamisen jälkeen kehitystyö kiehutusvesireaktori eli BWR voimalaitosten parissa on jatkunut sekä luonnonkierron, että pakotetun kierron saralla. BWRX-300 edustaa GE:n lähes 70 vuoden kehitystyön tulosta.

2.1 Luonnonkiertoon perustuvat GE:n reaktorit

BWRX-300 reaktoriin johtanut kehitys sai alkunsa alun perin testaus ja kokeilukäyttöön rakennetusta Vallecitos kiehutusvesireaktorista. Kaksisyklisen höyrykierron omaavan VBWR reaktorin rakennuksen jälkeen saatujen oppien perusteella vuonna 1957 pakotettuun kiertoon perustuva Dresden 1 reaktorin rakennus voitiin aloittaa. VBWR:n pohjalta aloitettu tutkimustyö johti myös paljon pienempiin ja yksinkertaisempiin luonnonkiertoon perustuviin reaktoreihin eri valmistajilta ympäri maailmaa. Pacific gas and electricity- yhtiön Humboldt bay -ydinvoimalan laitos 3 toimi GE:lle ensimmäisenä ”esikuvana” luonnonkiertoon perustuvasta reaktorista, jota seurasi perässä alankomainen Dodewaard. GE:n luonnonkiertoon perustuva yksinkertaistettu taloudellinen kiehutusvesireaktori (ESBWR) -projekti alkoi 1990-luvulla ja vuonna 1992 GE jätti suunnitelman yksinkertaistetusta kiehutusvesireaktorista (SBWR), joka oli saanut vaikutteita jo valmiiksi hyväksytystä GE:n kehittyneestä kiehutusvesireaktorista (ABWR). GE vetäytyi kuitenkin vuonna 1996 SBWR projektista laitoksen liian pienen tuotannon vuoksi ja keskittyi jatkojalostamaan tutkimusta suurempiin laitoksiin, minkä tuloksena vuonna 2014 Yhdysvaltain ydinturvallisuusvirasto NRC sertifioi GE Hitachin ESBWR reaktoriityypin. (Hylko J, 2010; GE Hitachi, 2022)

2.2 Pakotettuun kiertoon perustuvat GE:n reaktorit

GE:n ensimmäinen pakotetun kierron reaktori Dresden 1 (BWR/1) otettiin käyttöön vuonna 1960, jonka tekniikkaa seurasi vuonna 1962 saksalainen KRB. Dresden 1:n kaksiosainen

höyrykierto yksinkertaistettiin KRB voimalaitoksella sisältämään vain yksinkertaisen kierron, joka vielä nykypäiväänkin asti toimii kiehutusvesireaktoreille ominaisena piirteenä. Yksinkertaisessa höyrykierrossa kuuma aktivoitunut höyry ohjataan suoraan reaktorista turbiinille, josta se kiertää lauhduttimen kautta takaisin reaktoriin. KRB:ssa yksinkertaisen höyrykierron mahdollistivat aikanaan uudet innovaatiot: höyryn erotin ja -kuivain. GE:n oma BWR/1 seuraaja oli Oyster Creek:ssa rakennettu BWR/2, jossa KRB:n tavoin oli yksinkertainen höyrykierto, sekä viisi ulkoista syöttövesipumppua. Ulkoisista syöttövesipumpuista päästiin eroon Dresden 2 yksikössä (BWR/3) vuonna 1971, jolloin otettiin käyttöön ensimmäistä kertaa painesäiliön sisäiset suihkupumput. (GE Hitachi, 2007)

Edellä mainittujen reaktoriratkaisujen pohjalta GE käynnisti ABWR projektin 1980-luvulla, joka johti ensimmäisten kyseisten reaktorien rakentamiseen 1990-luvun alussa Japaniin ja Taiwaniin. Osa valmistuneista reaktoreista on jouduttu myöhemmin sammuttamaan Fukushima onnettomuudesta johtuneen yleisen mielipiteen muutoksen vuoksi. (GE Hitachi, 2007)

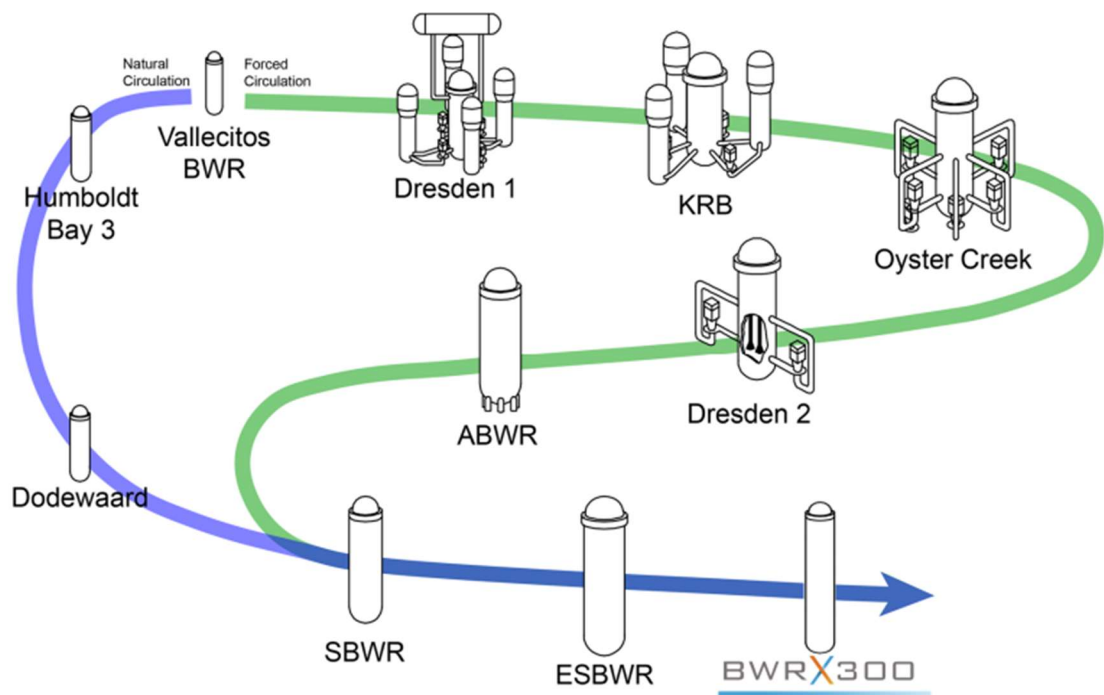
2.3 ESBWR

ESBWR on luonnonkiertoon perustuva kolmannen sukupolven kevytvesireaktori, joka on saanut vahvasti vaikutteita ABWR reaktorista. Kiehutusvesireaktoreiden kehittämisessä kantavana ajatuksena on toiminut yksinkertaisuus, sekä turvallisuus. ABWR reaktorissa yksinkertaistus teki valtavan harppauksen suihkupumppujen suorassa integroinnissa painesäiliöön. ESBWR:n kehityksessä pumppuratkaisun lisäksi hyödynnettiin SBWR:n ratkaisua rakentaa korkea painesäiliö lyhyellä reaktorisydämellä, mikä mahdollistaa tehokkaan luonnonkierron onnettomuustapauksissa ilman ulkoisia pumppuja. Kompaktin suunnittelun vuoksi erilaisten venttiilien ja pumppujen määrää ollaan saatu vähennettyä merkittävästi, mikä taas osaltaan vähentää kustannuksia, sekä lisää laitoksen turvallisuutta ja käyttövarmuutta. (GE Hitachi, 2011)

2.4 BWRX-300

Vuonna 2014 sertifioitu ESBWR ei saavuttanut GE Hitachin sille asettamia tavoitteita. Suurten ydinvoimalaitosten rakentamisen hitaus ja hinta esimerkiksi Ranskan

Flamanvillessä ja Suomen Olkiluodossa nostivat sijoittajien kynnyksiä lähteä mukaan suuriin, sekä mahdollisesti hyvin pitkäkestoisiin projekteihin. Reaktorien kehitystyössä oli tämän vuoksi käännettävä suunta kohti pienempiä yksiköitä, joiden etuna on huomattavasti matalammat rakennuskustannukset, sekä lyhyempi toimitusaika. GE Hitachin uusiin projekteihin BWRX-300 sai alkunsa vuonna 2017 suoraan valmistuneen ESBWR projektin pohjalta tarkoituksena yksinkertaistaa edelleen ESBWR reaktorin ratkaisuja. BWRX-300 reaktorin edeltäjät sekä GE:n omista projekteista, että kansainvälisesti muilta voimalaitoksilta ovat luoneet vakaan osaamis pohjan ja edellytykset BWRX-300 projektille (Kuva 1).



Kuva 1: GE Hitachin BWRX-300 reaktorin kehityskulku ja sen innovoinnin edeltäjät. (GE Hitachi, 2020)

Ydinvoimalaitoksen rakentamisen merkittävimmät kulut muodostuvat suurilta osin rakentamisvaiheen niin sanotuista siviilitöistä, jotka pitävät sisällään esimerkiksi maanmuokkauksen ja betonivalujen teon. Suuret reaktorit kuten ESBWR käyttö- ja turvajärjestelmilleen valtavan määrän tarkasti betonoitua tilaa, mikä kasvattaa asiakkaan pääomainvestoinnin suuruutta, sekä pidentää rakennukseen vaadittavaa aikaa. Näistä lähtökohdista BWRX-300 projektissa on pyritty eliminoimaan mahdollisimman monia ylimääräiseksi pienessä yksikössä jääviä elementtejä ja järjestelmiä uusien innovaatioiden ja ratkaisujen avulla tavoitteena saavuttaa yli 50% vähennykset tarvittavan tilan ja betonin määrässä. (World Nuclear Association, 2022; GE Hitachi, 2022)

3 Luonnonkierto ydinvoimalaitoksissa

Ydinvoimalaitosten kehittäminen ja suunnittelu toteutetaan turvallisuus ensin - ajattelumallilla. Osa voimalaitoksista vaatii turvallisuuskriteerien täyttämiseksi aktiivisia turvallisuutta parantavia järjestelmiä, kun taas osa hyödyntää passiivisia turvallisuusjärjestelmiä (PSS). Uusien voimalaitosten kohdalla on havaittavissa kallistumista passiivisten turvajärjestelmien puoleen niiden eduista sekä turvallisuuden ja luotettavuuden, että myös hinnan vuoksi. Aktiivisissa turvajärjestelmissä onnettomuustilanteessa vaadittavan lämmönpoiston mahdollistaa useilla ulkoisilla pumpuilla toimivat järjestelmät, jotka koostuvat erilaisista lämmönsiirtimistä ja jäähdytysnesteistä. Nämä varsin monimutkaiset järjestelmät tuovat investointiin huomattavia lisäkuluja, sekä lisää mahdollisia vikaantuvia järjestelmiä kasvaneen pumppujen ja venttiilien lukumäärän mukana.

3.1 Luonnonkierron toimintaperiaate

Luonnonkiertoon persutuvat jäähdytysjärjestelmät (NCS) voidaan jakaa käyttöympäristön perusteella kahteen ryhmään: Normaalikäytössä olevan reaktorin jäähdytykseen ja onnettomuustilanteessa aktivoituvien järjestelmien jäähdytykseen. Molempien järjestelmien toimintaperiaate on luonnollisesti sama, jolloin ilmiön perinpohjainen ymmärtäminen nousee etusijalle. (Bertani et al., 2021)

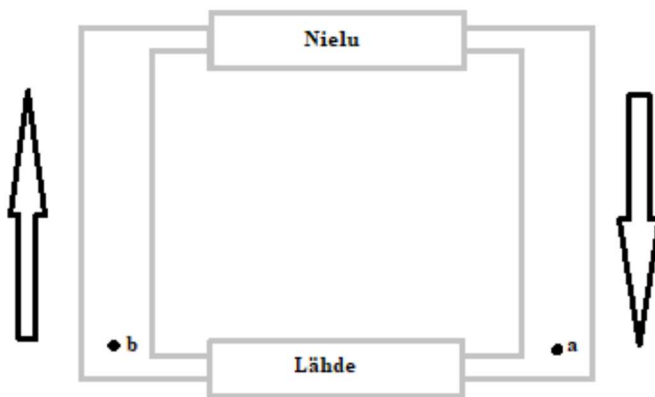
NCS voidaan jakaa karkeasti kolmeen komponenttiin: Lämmönlähteeseen, lämpönieluun ja niitä yhdistävään putkistoon jota kuvataan kuvassa 2. Lämpölähteessä eli tässä tapauksessa reaktorin ytimessä fluidi lämpenee ja höyrystyy, jonka jälkeen kohoaa putkistossa kohti lämpönielua. Nielussa kuuma vesihöyry tiivistyy takaisin raskaammaksi vedeksi, joka painuu alaspäin luoden luonnollisen kierron. Stabiilissa tilassa lämpölähteen ja lämpönielun välillä vallitsee tasapaino, jossa nieluun tulevan lämmön ja lähteen absorboivan lämmön arvot ovat yhtä suuria. Kun stabiili tila on saavutettu voidaan merkitä lähteestä lähtevän höyryn tiheydeksi ρ_h ja nielusta lähtevän virtauksen tiheydeksi ρ_c . Virtauksen tiheyksien ollessa tiedossa on mahdollista ratkaista stabiilin tilan hydrostaattiset paineet pisteissä a ja b.

$$p_a = \rho_c g H \quad (1)$$

$$p_b = \rho_h g H \quad (2)$$

Jossa p on paine [Pa], g on putoamiskiihtyvyyys [m/s^2] ja H on lämpölähteen ja lämpönielun korkeusero.

Pisteiden a ja b välinen paine-ero käy ilmi selkeästi höyryn tiheyden ollessa huomattavasti nestefaasissa olevaa vettä pienempi. Tämä tarkastelupisteiden välinen paine-ero aiheuttaa järjestelmään kiertävän virtauksen, joka siirtää lämpöä lähteestä nieluun ilman tarvetta ulkoisille voimille, kuten pakotetun kierron pumpuille. (Vijayan & Nayak, 2005)



Kuva 2: Havainnekuva yksinkertaistetusta luonnonkiertoon perustuvasta jäähdytysjärjestelmästä.

3.2 Luonnonkierron edut

Luonnonkiertoon perustuvan passiivisen turvajärjestelmän (NCS) ensisijainen etu on sen yksinkertaisuus. Ulkoisten pumppujen ja niiden tehon tarpeen huomiotta jättäminen mahdollistaa järjestelmän helpomman käytön, sekä huollon ja luonnollisesti myös yksinkertaisen rakennusprosessin. Järjestelmän kustannussäästöt muodostuvat edellä mainittujen tekijöiden vuoksi huomattaviksi.

Toinen merkittävä etu suhteessa pakotetun kierron järjestelmään on paremmat virtauksen ominaisarvot. NCS järjestelmässä lämpölähteen kasvava teho aiheuttaa suuremman virtauksen, kun taas pakotetun kierron tapauksessa kasvava teho pienentää virtausta (Vijayan

& Nayak, 2005). Lähteen tehon kasvaessa yhtälöiden 1 ja 2 uusi tasapainotila asettuu korkeammalle p_c arvolle, jolloin virtaus on luonnollisesti suurempi.

Viimeisenä huomionarvoisena nostona on jo valmiiksi sivuttu järjestelmän luotettavuus. Luonnonlakeihin perustuva jäähdytysjärjestelmä on huomattavasti vähemmän altis mahdollisille ongelmatilanteille vikaantuvien osien puuttuessa järjestelmästä.

3.3 Luonnonkierron haasteet

Luonnonkierron kenties suurin haaste liittyy piirin verrattain alhaisiin paineisiin pakotettuun kiertoon nähden. Painovoiman ollessa ainoa fluidia liikutteleva voima on riittävän suuren virtauksen varmistamiseksi korkeuseron lämpölähteen ja -nielun välillä oltava tarkkaan suunniteltu. Kostean höyryn nousuputkien pituutta ja tätä kautta reaktorin paineastian korkeutta voidaan kasvattaa suuremman paineen aikaansaamiseksi, mutta tällöin ongelmaksi saattaa syntyä korkean rakenteen kestävyys. Yleisenä nyrkkisääntönä suurimmalle lisättävälle korkeuserolle lähteen ja nielun välillä pidetään noin kymmentä metriä pakotetun kierron järjestelmään verrattuna. (Vijayan & Nayak, 2005)

Suhteellisen pienestä voimasta johtuen putkiston painehäviöiden pitää pysyä hyvin pieninä riittävän virtauksen ylläpitämiseksi. Putkistoon aiheutuvat painehäviöt muodostuvat esimerkiksi putkien pinnankarheuksista ja kertavastuksista, joita syntyy virtauksen joutuessa muuttamaan suuntaansa tai virtausnopeuttaan. Pinnankarheuksien merkitystä saadaan pienennettyä tarkemmin valmistettujen osien lisäksi leveämpien putkien avulla, jolloin pinnankarheuden suhteellinen merkitys pienenee. Kertavastuksien määrää ja suuruutta pystytään hillitsemään suunnittelemalla yksinkertainen NCS, joka sisältää mahdollisimman vähän käännöksiä, kuristimia ja venttiilejä. Toisaalta liian yksinkertainen järjestelmä voi luoda pullonkauloja muiden komponenttien sijoitteluun. (Vijayan & Nayak, 2005)

NCS järjestelmän pieni jäähdytteen massavirta asettaa reaktoriytimen tuottamalle lämpöviralle kattoarvon huomattavasti pienemmillä arvoilla kuin pakotetun kierron jäähdytysjärjestelmille (FCS). Tilavuudeltaan suurempi reaktoriydin tuo yksinkertaisen ratkaisun liiallisen yksittäisen kanavan lämpövirran muodostumiselle. Suuri reaktoriytimen tilavuus pakottaa käyttämään suurempaa reaktorin painesäilötä verrattuna FCS voimalaitokseen. (Vijayan & Nayak, 2005)

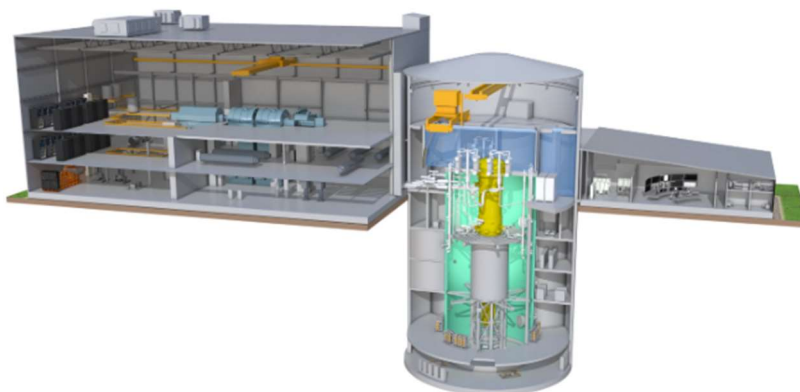
Edellä mainittujen haasteiden lisäksi erityisesti NCS on altis epästabiilin virtauksen aiheuttamiin häiriöihin. Luonnonilmiöön perustuvan NCS järjestelmän virtaus on hyvin harvoin täysin lineaarista ja äkilliset muutokset esimerkiksi lämpönielun vesimäärässä voivat aiheuttaa suuria muutoksia järjestelmän paine-eroihin, mikä taas luo vahingollista oskillaatiota. FCS järjestelmissä samanlaisia ongelmia harvoin tulee vastaan oikein mitoitetun pumpun vuoksi. NCS järjestelmissä äkillisten ulkoisten voimien muutoksiin voidaan toki vaikuttaa asentamalla järjestelmään säädettäviä kuristimia. Nämä kuitenkin luovat piiriin lisää painehäviöitä ja heikentävät täten hyötysuhdetta. (Vijayan & Nayak, 2005)

4 BWRX-300 Pääjärjestelmät

BWRX-300 laitostyyppi koostuu perinteisen BWR laitoksen tavoin kahdesta pääkomponentista: Reaktorista ja turbiinista. Reaktorin ytimessä tapahtuvassa hallitussa fissioreaktiossa vapautuva lämpö kiehuttaa vettä, minkä seurauksena syntynyt vesihöyry johdetaan höyrynerottimen ja -kuivaimen läpi turbiinille. Korkeapaineinen höyry pyörittää turbiinin lapoja, mikä saa aikaan akselin pyörimisen. Turbiinin päässä oleva generaattori muuttaa mekaanisen pyörimisliikkeen sähköksi, joka johdetaan eteenpäin sähköverkkoon. Laitoksen tunnusluvut, sekä oleelliset mitat on koottu alla olevaan taulukkoon.

Taulukko 1: BWRX-300 tunnuslukuja

Reaktoripaineastian dimensiot	26/4	m (korkeus) / m (halkaisija)
Polttoainenippujen määrä	240/92	Nippua / sauvaa per nippu
Polttoaine	UO ₂	Uraanidioksidi
Rikastusaste	3,40/4,95	Keskimääräinen / maksimi %
Moderaattori	H ₂ O	Vesi
Lämpöteho	870	MW
Sähköteho	300	MW
Säätönopeus	0,5	% / minuutti
Ajettava kuorma	50 - 100	% maksimitehosta
Prosessi- ja kaukolämpö	100 - 200	°C



Kuva 3: Poikkileikkaus reaktorirakennuksen ja turbiinihallin pohjapiirroksesta. (GE Hitachi, 2022)

4.1 Reaktorirakennus

Reaktorirakennus sijoittuu voimalaitoksen pohjapiirrustuksessa turbiinirakennuksen viereen mahdollisimman yksinkertaisen ja lyhyen päähöyryjärjestelmän vuoksi. Sylinterimäinen reaktorirakennus on rakennettu osittain maan alle kuvan 3 tavoin. Reaktorirakennus sisältää reaktoripaineastian (RPV) ja sen suojarakennuksen (PCV), sekä sylinterin muotoisen vesialtaan PCV:n kupolin päällä. Sylinterimäisen vesialtaan lisäksi reaktorihallista on havaittavissa neljä identtistä vesiallasta edellä mainitun altaan ympärillä. Nämä neljä allasta liittyvät onnettomuustilanteessa aktivoituvaan ICS järjestelmään, joka huolehtii lämmönpoistosta ja reaktorin jäähdyttämisestä. (IAEA, 2019)

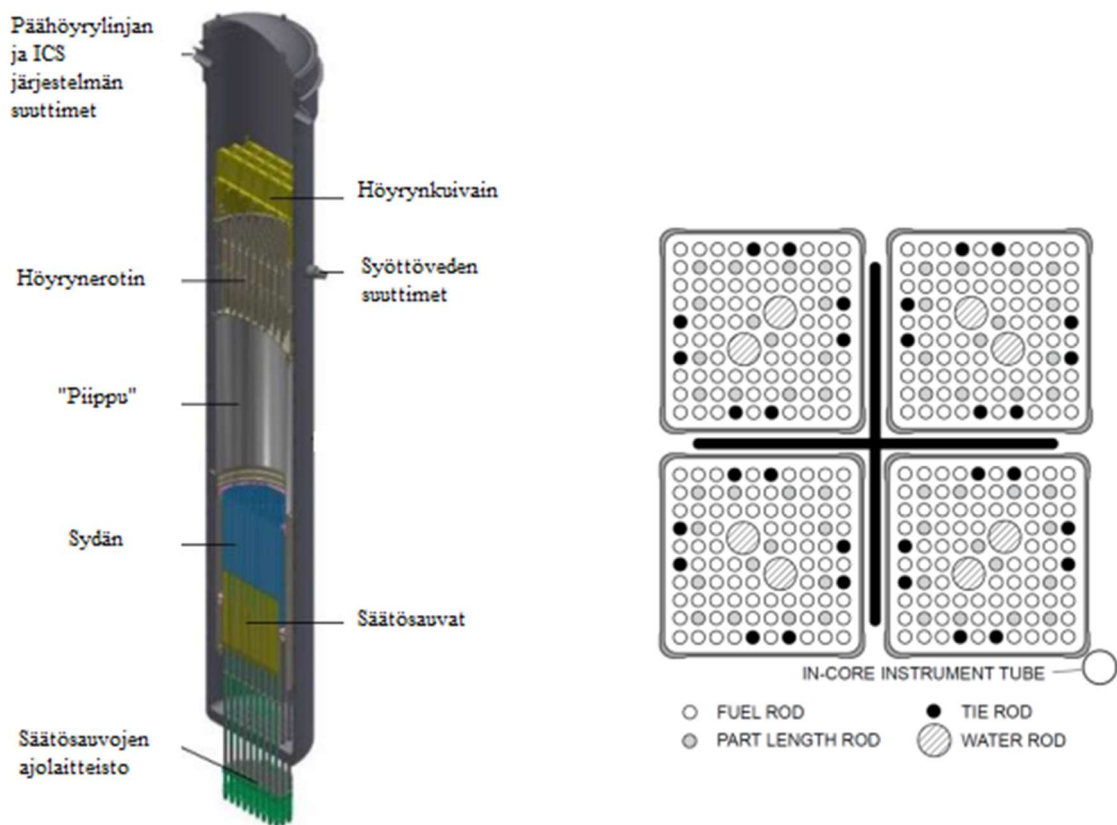
4.1.1 Reaktoripaineastia

BWRX-300 laitoksen RPV on ruostumattomasta teräksestä valmistettu sylinterimäinen säiliö, joka pitää sisällään höyryn pääkiertopiirin kannalta oleellisen reaktorisydämen, höyrynerottimen ja -kuivaimen, sekä syöttöveden sisääntulosuuttimet ja höyrylinjan suuttimet kuvan 4 a osoittamalla tavalla. BWRX-300:n RPV on tavallisiin BWR laitoksiin verrattuna hieman korkeampi sydämen ja höyrynerottimien väliin asennetun ”piipun” vuoksi. Piippu sisältää useita vesihöyryn nousuputkia, jotka tehostavat luonnonkiertoa kasvaneen korkeuseron vuoksi. Ilman piipun asennusta riittävään jäähdytykseen vaadittavan voiman luominen luonnonkiertoon perustuvassa reaktorissa olisi erittäin hankalaa. Sisäosien asennus ja polttoaineen vaihto tapahtuu RPV:n irroitettavan kannen kautta. RPV:n tarkoituksena on lähtökohtaisesti pitää yllä korkea paine, joka mahdollistaa veden kiehumisen korkeammissa lämpötiloissa. Reaktoripaineastia tukee myös säätösauvojen ajolaitteistoa. (IAEA, 2019)

4.1.2 Reaktorisydän

Luonnonkiertoon perustuva jäähdytysjärjestelmä asettaa reaktorisydämelle rajoitteita verrattain pienen jäähdyttimen virtauksen vuoksi. BWRX-300:n reaktorisydämen GNF2 polttoaineniput omaavat hyvin pienet hydrauliset vastukset, joka tekee niistä loogisen valinnan kyseiselle reaktoriyypille. Sydän koostuu 240:stä nipusta, jotka on aseteltu

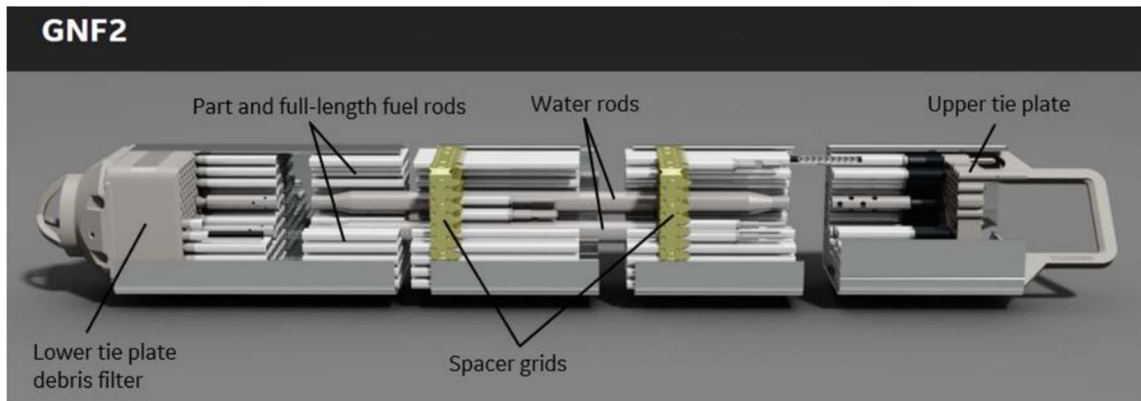
seuraamaan paineastian sylinterimäistä kuorta mahdollisimman tasaisen neutronivuon saavuttamiseksi. Reaktiivisuutta kontrolloivat säätösauvat on asetettu tasaiseen N-hilaan, mikä luo edellytykset sammutusmarginaalin kasvamiselle. Useammin toteutetut polttoaineen vaihdot ovat pakollisia, mikäli laitoken tehoa säädellään verkon tarpeen mukaan, sillä tämä luo polttoaineeseen epätasaisen palamajakauman. GEH:n omaan tuotantoon kuuluva GNF2 polttoainenippu koostuu 92:sta polttoainesauvasta ja kahdesta vesisauvasta 10x10 hilassa, mikä on havainnollistettu kuvassa 4 b. Polttoainenipussa on käytössä GEH:n uusinta vuonna 2017 lanseeraamaa suodatintekniikkaa, joka estää prosessiin kuulumattomien irto-osien pääsyn vahingoittamaan polttoainesauvoja. (IAEA, 2019; GNF, 2016)



Kuva 4: a. BWRX-300 laitoksen RPV:n poikkileikkaus **b.** Neljän GNF2 nipun muodostama moduuli (IAEA, 2019)

Polttoainenippujen jäähdytys toteutetaan yksittäisten nippujen keskellä olevien vesisauvojen avulla. Hilan keskelle asetetut jäähdytyskanavat mahdollistavat polttoaineen riittävän jäähdytyksen verrattain pienellä virtauksella. Vesisauvojen lisäksi jokaisen polttoainenipun 92:sta polttoainesauvasta 14 on noin kolmasosan täyspituisia sauvoja lyhyempiä. Polttoaine-

ja vesisauvojen lisäksi polttoaineniput sisältävät 8 kappaletta kuvassa 4 b mustalla merkittyjä tukisauvoja, jotka on kiinnitetty polttoainenipun pohjaan ja kanteen estämään polttoainesauvojen liikettä kuljetuksen ja käytön aikana.



Kuva 5: GNF2 -polttoainenipun havainnekuva (GE Hitachi, 2019)

Kuvassa 5 on esitetty polttoainenippua tukevan teräsrakenteen malli. Tukisauvojen lisäksi nipun keskivaiheille asennetut välilevyt pitävät huolen yksittäisten polttoainesauvojen ylimääräisen liikkeen estämisestä. Nipun kanteen ja kartiomaiseen pohjaan on niin ikään varattu jokaista sauvaa varten omat ”istuimet”, jotka osaltaan pitävät huolen sauvojen keskinäisten etäisyyksien ylläpitämisestä. (IAEA, 2019)

Jäähdytinnesteen virtaus tapahtuu vesisauvojen läpi polttoainenipun pohjasta ylöspäin. Virtauksen suunta määräytyy luonnonkiertoon perustuvan jäähdytysjärjestelmän vuoksi. Polttoainenippujen läpi kulkeva jäähdytin lämpenee ja höyrystyy, jolloin tiheyden pienentyessä se alkaa kohota ylöspäin. Höyrystyneen jäähdyttimen tilalle syötetään tiheämpää nestettä alhaaltapäin, jolloin saadaan aikaan kiehutusvesireaktoreille tunnusomainen jäähdyttimen kiertosuunta.

Reaktorisydämessä tapahtuvassa fissioreaktiossa tiiviisti pakatuista keraamisista uraanioksidipelleteistä vapautuvat neutronit aiheuttavat ketjureaktion, josta syntyy lämpöenergiaa käytetään veden höyrystämiseen. Yhdessä neutronisukupolvessa syntyvien neutronien määrä vaihtelee polttoaineen rikastusasteesta riippuen. Mikäli syntyneiden neutronien lukumäärää ei rajoiteta riittävästi, sanotaan reaktorin olevan ylikriittisessä tilassa, jolloin sen teho kasvaa. Reaktorin kriittisyyttä kuvataan kasvutekijällä k . Reaktorin tehon kasvu havaitaan sydämen kämpötilan nousuna. Liian suuri lämpötila aiheuttaa paineen kasvua RPV:ssä ja vaarantaa reaktorin turvallisen operoinnin. (Kalli, 2012)

Reaktorin kasvutekijän rinnakkaissuure reaktiivisuus ρ kuvaa kasvutekijän todellista muutosta yhden neutronisukupolven syklin aikana. Normaalissa tehoajossa reaktori on kriittisessä tilassa, jolloin sen reaktiivisuus on nolla. Reaktiivisuutta hallitaan pääasiassa neutroneja absorboivaa booria sisältävien säätösauvojen avulla, jotka syötetään reaktorisydämeen polttoainenippujen väliin RPV:n pohjasta säätösauvojen ajolaitteistolla (FMCRD). Automaatiolla toimivaa FMCRD järjestelmää käytetään reaktiivisuuden ja sitä kautta tehon säätämiseen, sekä epätasaisen palamisen hallintaan sydämen keskiosissa ja reunoilla. Säätösauvojen manuaalinen tai hydraulinen ajaminen kokonaan sisään reaktoriin on mahdollista onnettomuustilanteessa, jossa reaktori pitää saada pysähtymään. Toinen mahdollinen tapa reaktorin pysäyttämiseen on moderaattorina ja jäähdytteenä toimivan veden ja boorin yhdistelmän suora ruiskutus reaktoripaineastiaan. (Kalli, 2012; GE Hitachi, 2021)

4.2 Turbiinirakennus

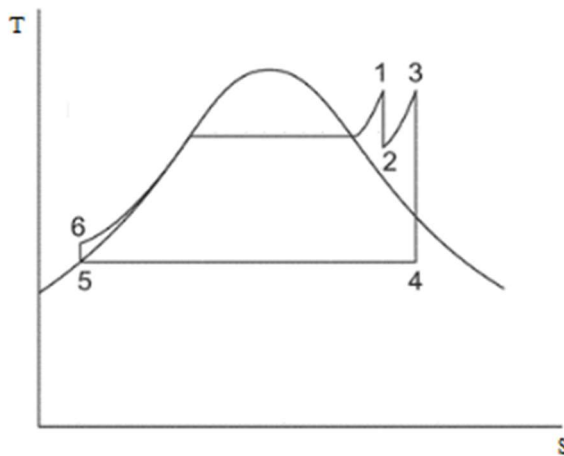
Turbiinirakennus sisältää sähköntuotannon mahdollistavan turbiinin ja generaattorin, sekä kytkennät muuntajakentälle. BWRX-300 laitoksella on käytössä GE:n omaa tuotantoa edustava STF-D650 höyryturbiini, jonka ominaisuudet on esitelty taulukossa 2. Turbiini sisältää yhden korkeapaineturbiinin, yhden keskipaineturbiinin ja yksi tai kaksi matalapaineturbiinia konfiguraatiosta riippuen. STF-D650 turbiinissa on käytössä höyryn välitulistus korkea- ja keskipaineosien välillä, millä saadaan parannettua turbiinin hyötysuhdetta. (IAEA, 2019; GE, 2022)

Taulukko 2: STF-D650 ominaisarvot 50 Hz ja 60 Hz taajuusalueille (GE, 2022)

Päähöyrylinja paine	190 bar
Tuore/tulistettu höyryn lämpötila	585/585 °C
Tehon tuotanto	200 – 700 MW
Hyötysuhde	≤ 48 %

4.2.1 Välitulistus

Paremmen turbiinihyötysuhteen saavuttamiseksi tehdään jatkuvasti tutkimustyötä maailmanlaajuisesti niin osien mallinnuksessa, kuin myös erilaisten kiertojenprosessien hyödyntämisessä. Muunneltuun Rankine prosessiin perustuva STF-D650 turbiini hyödyntää välitulistusta tuorehöyrylle sen paisuttua ensin korkeapaineturbiinissa. Paisunut kaasu ohjataan välitulistimeen, jossa se lämpenee takaisin sisääntulolämpötilaan. Tämän jälkeen höyry ohjataan keskipaineturbiiniin ja sen kautta matalapaineturbiiniin kuvan 6 tavoin. Välitulistuksella saavutetaan noin 1,5 – 2 % absoluuttinen hyötysuhteen parannus verrattuna prosessiin ilman välitulistusta. Tämän lisäksi välitulistuksella saadaan vähennettyä höyryn kosteutta ja sitä kautta turbiinin siivistön eroosiota matalapaineturbiinissa. (Tanuma, 2022)



Kuva 6: Välitulistetun Rankine prosessin S,T -taso (Muokattu lähteestä Tanuma, 2022)

5 Laitoksen turvallisuus

Uusien ydinvoimaloiden suunnittelua ohjaa vahvasti kansallisten lakien ja asetusten lisäksi kansainvälinen atomienergiajärjestö IAEA, sekä kansainvälinen säteilysuojeluorganisaatio ICRP. IAEA:n asettamat turvallisuuskehykset ja -standardit määräävät järjestelmien ja materiaalien ominaisuudet siten, että laitoksen normaalin elinkaaren aikana tai onnettomuustilanteessa radioaktiivisuutta ei pääse karkaamaan ympäristöön. Vaatimusten toteuttamiseksi onnettomuustilanteissa IAEA on määrittänyt viisiportaisen järjestelmän, missä jokaisen itsenäisen suojaustason tulisi pettää vaaran aiheutumiseksi ympäristölle tai ihmisille. (IAEA, 2011) Defense in depth (D-in-D) periaatteen viisi porrasta ovat:

- Estää järjestelmien hajoaminen ja poikkeamat normaalista toiminnasta
- Havaita ja ennaltaehkäistä poikkeavien tapahtumien eskaloituminen onnettomuustilanteeksi
- Hallita onnettomuuden vaikutukset
- Eristää radioaktiivinen materiaali vakavassa onnettomuudessa
- Minimoida ympäristön säteilyvuodon seuraamukset

Edellä mainittujen koko laitosta koskevien turvallisuusportaiden lisäksi D-in-D ajattelutapaa käytetään luomaan biologiset suojat radioaktiiviselle polttoaineelle. Vesijähdytteisiin reaktoreihin biologiset suojat ovat suurinpiirtein samat, mutta pieniä reaktorikohtaisia eroavaisuuksia saattaa löytyä. (IAEA, 2011)

- Ensimmäinen suojarakenne on uraanioksidipellettien keraaminen rakenne, mikä pitää pelletit kiinteinä ja yhteinäisinä kappaleina fissioreaktiossa vapautuvassa korkeassa lämpötilassa.
- Toinen suojarakenne on polttoainesauvojen metalinen, zirkonium-yhdisteestä valmistettu suojakuori, mikä pitää sisällään aktivoituneen polttoaineen. Mikäli polttoaine jätettäisiin ilman suojakuorta, tai se olisi vahingoittunut, aktivoituneita hippuja saattaisi päästä prosessiin primääripiirin mukana aiheuttamaan toimintavirheitä järjestelmässä kohonneen säteilytason vuoksi.

- Kolmas suojarakenne on reaktorin paineastia ja siihen kuuluvat primääripiirin ja turvajärjestelmien venttiilit, mitkä pitävä onnettomuustilanteessa vapautuneen radioaktiivisen materiaalin sisällään.
- Neljäs polttoaineen suojarakenne on paineastian suojarakennus, joka edellisten rakenteiden pettäessä tarjoaa suojan ympäristölle ja rajaa radioaktiiviset päästöt sisälleen.

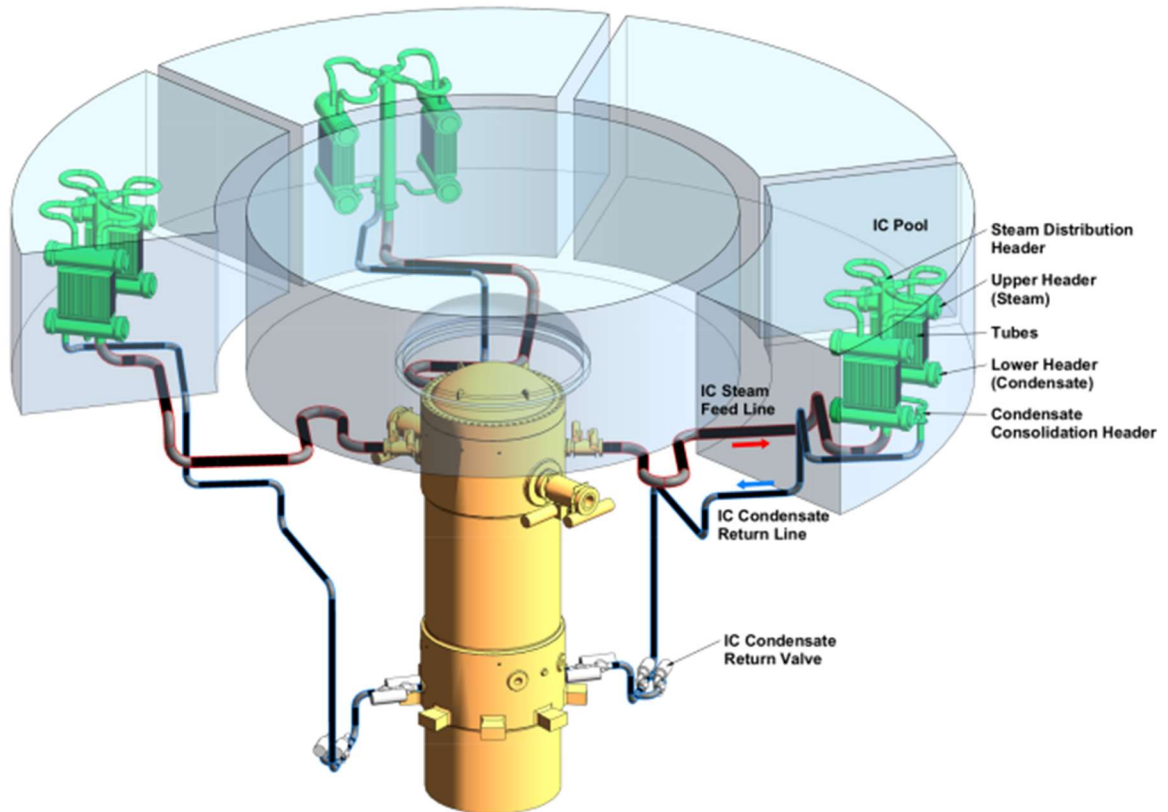
GE Hitachi on kuvattujen periaatteiden ja säädösten pohjalta laatinut BWRX-300 projektiin perusturvatoimintojen (FSF) listan, jossa käy ilmi turvallisuusjärjestelmien ja biologisten suojiin yhteydet, sekä toimintaperiaatteet. Hyvin pitkälti IAEA:n D-in-D listan mukaisesti muodostettu FSF pitää sisällään: (IAEA, 2019)

- Reaktorin reaktiivisuuden kontrollointi
- Polttoaineen jäähdytys
- Jälkilämmön poisto
- Radioaktiivisen materiaalin eristys

Reaktori pysyy turvallisessa tilassa niin kauan kun FSF listan kolmeen ensimmäiseen kohtaan liittyvät järjestelmät toimivat suunnitellusti. Polttoaineen jäähdytykseen ja jälkilämmön poistoon liittyviä ongelmatilanteita varten BWRX-300 laitoksessa on kaksi passiivista turvajärjestelmää, jotka pitävät huolen laitoksen turvallisuudesta onnettomuustilanteen sattuessa.

5.1 Eristetty lauhdutusjärjestelmä, ICS

Eristetty lauhdutusjärjestelmä ICS on passiivinen turvajärjestelmä, jonka tehtävänä on poistaa fission tuottamaa jälkilämpöä reaktorista normaalin jäähdytysjärjestelmän toiminnan häiriintyessä reaktorin sammuttamisen jälkeen. Kuvassa 7 on esitetty ICS:n kolme erillistä silmukkaa, joista jokainen sisältää oman lauhtumis- eli IC-altaan, 33 MW lämmönsiirtimen, sekä luonnollisesti höyry- ja lauhdeputket.



Kuva 7: ICS järjestelmän havainnekuva. Kuvassa keltaisena reaktoripaineastia, punaisena höyryputket, sinisenä lauhdevesiputket, sekä vihreällä lämmönvaihtimet. (GE Hitachi, 2021)

Reaktorin ollessa normaalissa käyttötilassa höyryn syöttölinja RPV:n kyljessä on auki, jolloin osa tuorehöyrystä kulkeutuu lämmönsiirtimille ja kondensoituu IC altaaseen. Tiivistyneen veden paluuputken venttiiliä pidetään normaalitilassa kiinni, jolloin sekä tiivistyneen veden paluuputki, että IC allas täyttyvät maksimikapasiteettiinsa. Altaan ollessa täynnä reaktorin tuorehöyry ohjautuu pelkästään turbiinille ilman höyryventtiilin erillistä sulkemista. Vastaavasti onnettomustilanteessa ICS järjestelmä saadaan toimimaan avaamalla tiivistyneen veden paluuputken venttiilin, jolloin painovoima työntää viileän lauhdeveden jäähdyttämään reaktorisydäntä. Kuumassa reaktorisydämessä lauhdevesi höyrystyy ja päätyy takaisin RPV:n yläpuolella sijaitseviin IC altaisiin luoden luonnonkierron. Lämmönsiirtimien kautta altaisiin siirtyvä lämpöenergia kuluttaa vähitellen vesivarastoa, joka vapauttaa samaansa energiaa höyrystymällä. Syntynyt vesihöyry ei sisällä radioaktiivisuutta, joten se voidaan siirtää ympäristöön ilman erityistoimenpiteitä. Päähöyrylinjan sulkeutuessa kolme ICS piiriä kykenevät vesikapasiteetillaan pitämään reaktoria stabiilissa tilassa poistamalla lämpöä ja ylimääräistä painetta RPV:stä noin viikon

ajan, jonka jälkeen järjestelmän toiminta-aikaa saadaan pidennettyä täyttämällä lauhdevesialtaita. (GE Hitachi, 2021)

ICS järjestelmä on ollut käytössä sekä SBWR, että ESBWR projekteissa erilaisilla konfiguraatioilla. BWRX-300 laitoksella ICS:n lämmönsiirtimille ja altaille on tehty tarvittavat skaalaukset vastaamaan laitoksen vaatimaa jälkilämmön poiston määrää pitäen mielessä pyrkimyksen mahdollisimman yksinkertaisesta ja minimalistisesta järjestelmästä kustannustehokkuuden vuoksi. (GE Hitachi, 2021)

5.2 Passiivinen suojarakennuksen jäähdytysjärjestelmä, PCCS

Toinen käytössä oleva passiivinen turvallisuusjärjestelmä PCCS on ICS:n tavoin ollut käytössä ESBWR projektissa, josta se on skaalattu BWRX-300 laitokseen. Reaktorin pääasiallisen jäähdytyksen pettäessä ICS pitää huolen reaktoripaineastian lämpötilan ja paineen noususta. Mikäli vikaantumisen tapahtuu paineastian ja suojarakennuksen välisissä putkistoissa tai paineastian painetta joudutaan alentamaan turvallisuussyistä, on suojarakennukseen kerääntyvä ylimääräinen lämpö ja paine kyettävä siirtämään PCV:n ulkopuolelle turvallisesti. PCCS järjestelmään kuuluvat matalapaineiset lämmönsiirtimet siirtävät suojarakennukseen kertyneen lämmön RPV:n kupolin yläpuolella olevaan vedellä täytettyyn reaktorialtaaseen, josta vesihöyry voidaan vapauttaa ilmakehään.

ICS järjestelmän tavoin PCCS:n toiminta perustuu luonnonkiertoon, joten erillisiä kiertopumppuja ei tarvita. PCCS järjestelmä ei myöskään sisällä erillisiä venttiilejä suojarakennuksen kuivatilan (drywell) ja lämmönvaihtimien välillä, joten järjestelmän voidaan sanoa olevan aina aktiivinen. (IAEA, 2019; Rassame et al, 2016)

6 Vertailu muihin SMR-ratkaisuihin

Tässä luvussa luodaan suppea katsaus maailmanlaajuisesti muutamaan merkittävään SMR-ratkaisuun ja pohditaan niiden kilpailukykyä verrattuna BWRX-300 reaktoriin. Vertailukohteiksi valittavat reaktorit ovat ACP100 (Kiina), RITM-200 (Venäjä), CANDU SMR (Kanada) ja NuScale (Yhdysvallat). Vertailua pyritään toteuttamaan ensi sijassa modulaarisuuden ja reaktorityypin kannalta, mutta myös reaktorin toimittajatahon kannalta. Kaikkia valikoituja reaktoreja yhdistää niiden pitkälle edennyt kehitys: Reaktorit ovat joko viranomaisten tarkasteluvaiheessa tai jo rakenteilla.

BWRX-300 eroaa perustavanlaatuisesti muista tarkasteltavista laitoksista laitostyyppin kannalta. BWRX-300 on nimensä mukaisesti kiehumisvesireaktori, kun taas muut vertailureaktorit ovat painevesireaktoreja. Voimakkaasti PWR:n puoleen kallistunut jakauma pienessä vertailujoukossa ei ole yllättävää, sillä uusista SMR-konsepteista valtaosa kehitetään olemassa olevan PWR tekniikan pohjalle. BWR laitosten tuorehöyryn syöttöjärjestelmän (NSSS) huomattavasti yksinkertaisempi rakenne vähentää rakennus- ja ylläpitokustannuksia huomattavasti verrattuna PWR laitosten ratkaisuun. Vaikka PWR laitoksilla saadaan aikaan korkeammat tuorehöyryn lämpötilat ja sitä kautta paremmat hyötysuhteet, ovat erillisen höyrytimen, paineistimen ja valtaviin lämmönvaihtimien aiheuttamat lisäkustannukset varteenotettavia tekijöitä kannattavuuslaskelmissa. Edellä mainittujen komponenttien lisäksi laitoksen fyysinen koko kasvaa sekundääripiirin vaatiman tilan myötä aiheuttaen edelleen lisäkuluja. Laitosten fyysisen koon ja niillä tuotetun sähkö- ja lämpötehon suhteet ilmenevät taulukosta 3.

Taulukko 3: Vertailulaitosten sähkö- ja lämpötehot, sekä vaaditut laitosalueen pinta-alat. (IAEA, 2020)

	BWRX-300	ACP100	RITM-200	CANDU SMR	NuScale
Laitostyyppi	BWR	iPWR	iPWR	PHWR	iPWR
Sähköteho [MW]	300	125	53	300	60
Lämpöteho [MW]	870	385	165	960	200
Pinta-ala [m ²]	8400	200000	60000	21000	140000

BWRX-300 laitoksen suuri sähköntuotanto on onnistuttu tuottamaan hyvin pienellä laitoskoolla verrattuna muihin tarkastelussa oleviin reaktorikonsepteihin. Integroidulla painevesireaktorilla (iPWR) pyritään kutistamaan laitoksen fyysistä kokoa sijoittamalla primääripiirin komponentit (höyrystin, paineistin ja säätösauvojen ajurit) RPV:n sisään. Tästä huolimatta laitosten vaatimat pinta-alat pysyvät suurina luoden huomattavan kilpailuedun BWRX-300:lle.

Ydinvoimalaitosten modulaarisuudella tarkoitetaan tiivistettynä rakennusprosessin lähestymistä sarjatuotannon kannalta, sekä valmiiden reaktoriyksiköiden modulaarista yhdistämismahdollisuutta toisiin reaktoriyksiköihin kasvattamaan maksimikapasiteettia. Sarjatuotanto luo edellytykset edullisempaan komponenttien tuotantoon ja lyhyempiin rakennusaikoihin. Pienten yksittäisten reaktorikomponenttien yhdistämismahdollisuudet samaan valmiiksi rakennettuun reaktorirakennukseen taas mahdollistavat laitoksen kyvyn vastata joustavasti tarpeen mukaan kasvavaan energiatarpeeseen. Tarkasteltavien laitosten modulaarisuudella on sekä selkeitä yhtymäkohtia, että myös huomattavia eroja BWRX-300 reaktoriin. (World Nuclear Association, 2022; Hujala et al., 2022)

BWRX-300 reaktoriin modulaarisuus perustuu rakennuskustannuksia minimoivaan elementtimäiseen rakennustapaan, joka on tullut tunnetuksi viimeisen vuosikymmenen aikana asuntomarkkinoilla. Yksittäinen reaktoriyksikkö vaatii ympärilleen perinteisen kiehutusvesireaktorin tavoin lopun voimalaitosprosessin eikä toisen samanlaisen reaktorin yhdistämismahdollisuutta samaan reaktorirakennukseen ole. Pienen sähkötehon omaavan NuScale-reaktorin ja venäläisen RITM-200 reaktorin modulaarisuus ilmenee taas mahdollisuutena yhdistellä useita reaktoreja samaan voimalaitosyksikköön. NuScale-reaktoreita voidaan samaan reaktoriaaltaaseen yhdistää 2-12 kappaletta, kun taas RITM-200 -yksiköitä 2 kappaletta yhtä reaktorirakennusta kohti. Molempien edellä mainittujen konseptien etuna on niiden skaalautuvuus, sekä kyky hyödyntää voimalaitosprosessin muita komponentteja sellaisenaan reaktorimäärän lisäyksen jälkeen. (IAEA, 2020; Hujala et al., 2022)

ACP100 reaktori on modulaarisuuden kannalta lähempänä BWRX-300:a ja perinteistä kevytvesireaktoria kuin pieniä SMR reaktoreja. Selkeän pesäeron perinteisiin painevesireaktoreihin nähden tuo innovaatio RPV:n sisään osittain integroidusta primääripiiristä, mikä pienentää reaktorirakennuksen pinta-alaa.

BWRX-300:n tavoin CANDU SMR on hyvin pitkälti ”normaalin” ydinvoimalaitoksen tapainen laitosyksikkö, jonka suunnittelua on lähtenyt ohjaamaan tarve pienestä ja joustavasti sijoitettavasta voimalaitoksesta. Rakennusajan ja kustannusten minimointi toimivat perusteena voimalaitoksen modulaariseen lähestymistapaan, missä pyrkimys yksinkertaisista ja nopeasti sarjatuotettavista komponenteista on etusijalla.

Eroavaisuuksista huolimatta kaikkia SMR konsepteja yhdistää näkemys minimalistisesta ja nopeasti käyttöönotettavasta voimalaitoksesta, jonka kyky vastata joustavasti muuttuviin energiatarpeisiin on olemassa tavalla tai toisella. Reaktorien sarjatuotanto pyritään tekemään mahdollisimman helpoksi käyttämällä suunnittelussa jo valmiiksi olemassa olevia osia vanhemmista reaktoreista. BWRX-300 reaktorin kustannus- ja turvallisuuslähtöisessä suunnittelussa tämä on otettu huomioon ja käytännössä kaikki RPV:n sisäiset osat ovat lainattu joko sellaisenaan tai hieman muunneltuina vanhemmista laitostyypeistä.

7 Tulevaisuus

Globaalissa mittakaavassa kiinnostus puhtaaseen energiantuotantoon on vahvassa kasvussa sekä julkisella, että yksityisellä sektorilla. Aurinko-, tuuli- ja vesivoiman energiatuotanto on erittäin olosuhde riippuvaista, sekä laajassa mittakaavassa energian varastointimenetelmien kahlitsemata, mikä johtaa katseiden kääntymiseen kohti lupaavaa ydinvoimaa. Huolimatta keskustelun kiihtymisestä SMR voimalaitosten ympärillä, on niiden elinkaari ottanut vasta ensimmäiset taaperon askeleet.

IAEA:n vuoden 2022 puolivälissä päivitetyn raportin mukaan SMR voimalaitoksia on maailmanlaajuisesti käytössä ja rakenteilla neljä kappaletta. Venäjän ensimmäinen ”laivareaktori” (FPU) otettiin kaupalliseen käyttöön vuonna 2020. Kyseinen sähkön ja lämmön tuotantoon rakennettu voimalaitos sisältää kaksi KLT-40S reaktoria, joiden pohjalta RITM-200 projekti on saanut alkunsa. Toinen käytössä oleva voimalaitos sijaitsee Kiinan koillisosassa, jossa kaksi HTR-PM -reaktoria on tuottanut sähköä vuoden 2021 joulukuusta eteenpäin. Valmiiden käytössä olevien reaktorien lisäksi Argentiinan ydinvoiman tutkimuksesta ja kehittämisestä vastaava valtiollinen virasto CNEA on rakentanut prototyypikäyttöön tulevaa CAREM reaktoria vuodesta 2014 lähtien. Viimeisin rakenteilla oleva reaktori on niin ikään kiinalainen, edellisessä luvussa esitelty ACP100, jonka rakennus aloitettiin vuonna 2021. (IAEA, 2022)

Valmiiden ja rakenteilla olevien reaktorien lisäksi suunnittelun ja lisensioinnin eri vaiheissa olevia SMR konsepteja on yli 80, mikä kuvaa hyvin kiinnostuksen laajuutta aihepiiriä kohtaan. BWRX-300 hanke on edennyt lisensiointivaiheeseen, mikä tekee siitä kiinnostavan reaktorityypin kansainvälisellä tasolla. BWRX-300 reaktorin toimitus onkin sovittu Darlingtonin voimalaitosalueelle vuosikymmenen loppupuolella, sekä Kanadan Saskatchewan osavaltioon 2030-luvulla. Näiden lisäksi BWRX-300 on saanut osakseen kiinnostusta Puolalaiselta SGE:ltä jopa kymmenen yksikön toimittamisesta maahan, joka vielä vuonna 2020 tuotti 85% energiastaan fossiilisilla polttoaineilla. (GE Hitachi, 2022; IEA, 2022)

8 Johtopäätökset

Tässä työssä luotiin katsaus GE Hitachin uuteen BWRX-300 pienydinreaktoriin, sen ominaisuuksiin, sekä kilpailuetuihin muihin SMR projekteihin verrattuna. BWRX-300 laitoksen turvallisuutta ja turvallisuusjärjestelmiä toimintameteineen käsiteltiin sekä kustannusten, että toimintavarmuuden näkökulmasta. Pääpaino järjestelmien tarkastelussa keskittyi aktiivisten ja passiivisten turvajärjestelmien etujen ja heikkouksien vertailuun. Työssä tarkasteltiin myös yleiskuvaa maailman energiatilanteesta ja ydinvoiman osuutta tulevaisuuden energiajärjestelmissä, sekä erityisesti SMR voimalaitosten roolia puhtaana ja turvallisena energiantuottajana vihreää siirtymää ajavassa yhteiskunnassa, jossa ydinvoiman merkitys luotettavana ja olosuhteista riippumattomana energiantuotantomuotona on näyttäytynyt viimeisen vuoden aikana aivan uudessa valossa. Erityisesti Eurooppaa, mutta myös muuta maailmaa runteleva Ukrainan sodasta johtuva energiakriisi nostaa pinnalle toiveet ja tahtotilat energiaomavaraisuudesta sekä valtiollisella, että myös pienemmässä mittakaavassa organisaatiotasolla. Toimitusketjujen heikkous ja epävarmuus fossiilisten polttoaineiden osalta kiristyneessä maailmanpoliittisessa tilanteessa on ajanut pahiten fossiilisista polttoaineista riippuvaisia valtioita ja yrityksiä syvään ahdinkoon puhumattakaan yksityishenkilöiden tilanteista kohoavan inflaation ja kallistuvan energian ympäristössä. Kaikki nämä tekijät nostavat ydinvoiman ja kysymykset sen merkityksestä energiapolitiikan keskustelun keskiöön.

Työssä tarkasteltiin SMR-konsepteista kiehutus- ja painevesireaktoreja, joiden toimintaperiaate on käytännössä sama verrattuna perinteisiin suuriin kevytvesireaktoreihin. Käsitellyistä painevesireaktoreista suurin osa oli niin kutsuttuja integroituja painevesireaktoreja, joissa primääripiirin komponentit ovat sijoitettuna painesäiliön sisään säästämään rakennuskustannuksia ja parantamaan laitoksen turvallisuutta. Vertailukohteena toiminut pieni kiehutusvesireaktori on käytännössä samanlainen perinteisten BWR laitosten kanssa lukuunottamatta luonnonkiertoon perustuvaa jäähdytysjärjestelmää, joka ei vaadi toimiakseen ulkoisia pumppuja.

Vaikka ydinvoima saattaa vaikuttaa täysin ongelmavapaalta energian tuotantomuodolta sisältyy siihen myös ongelmia erityisesti kapasiteetin lisäämisessä ja ydinjätteen loppusijoittamisessa. Perinteiset suuret ydinvoimalaitokset vaativat valtavia

kertainvestointeja, sekä jopa vuosikymmeniä kestäviä rakennusaikoja, kuten esimerkeistä ympäri maailmaa ollaan opittu. Huomattavasti pienemmät SMR reaktorit pyrkivät vastaamaan nimenomaan nopeaan toimitusaikatauluun modulaarisen suunnittelun ja osien sarjatuotannon avulla. Yksittäisen yksikön hinnan ja toimitusajan laskiessa kynnyksen uuden yksikön rakentamiseen energiatarpeen kasvaessa madaltuu huomattavasti.

Ilmastonmuutoksen ja energiakriisin aiheuttama energiamurros tähtää tulevaisuudessa hiilineutraaliin sähköntuotantoon. Kuten aikaisemmissa luvuissa on todettu, olosuhderiippuvaiset puhtaan energian tuotantomenetelmät ovat suuressa roolissa tulevaisuuden puhtaassa energijärjestelmässä. Energiamurrokseen liittyy kiinteästi tarve energian varastointimenetelmien kehittämisestä, mihin ollaan tarjottu vastaukseksi vetytalouteen siirtymistä. Vetytaloudessa energiaa varastoidaan vetymolekyyleihin erottamalla ne elektrolyysin avulla veden hapestaa. Polttokennoissa vedyn ja hapen välisessä palamisreaktiossa vapautuu huomattava määrä energiaa vedyn korkean energiatihedysvoiksi. Vetytalouden ongelmat kohdistuvat erityisesti räjähdysherkän vedyn varastointiin ja tuottamiseen. Vedyn erottaminen veden hapestaa elektrolyysin avulla vaatii paljon energiaa, joka voitaisiin tulevaisuudessa tuottaa SMR voimalaitoksella turvallisesti ja ilman haitallisia päästöjä. Mikäli vetytalous energian varastointimuotona yleistyy tulevaisuudessa, luo se varmasti kysyntää puhtaalle energiantuotannolle, johon SMR voimalat kykenevät joustavasti vastaamaan.

SMR voimalaitosten teknisten osa-alueiden ja lisensoinnin valmistuessa katse kääntyy kenties viimeiseen ongelmaan eli lainsäädäntöön. Valtiokohtaisesti lakipykälissä on eroja, mutta esimerkiksi Suomessa suuria voimalaitoksia varten suunniteltu ydinvoimalaki hidastaa SMR laitosten yleistymistä. Sähköntuotantoon keskittyvä voimalaitos voidaan sijoittaa kohtuullisen kauas asutuksesta riittävien kantaverkkoyhteyksien rajoissa, kun taas kaukolämmön tuotantoon keskittyvät reaktorit vaativat etäisyyden käyttökohteeseen nähden mahdollisimman pieneksi lämpöhäviöiden minimoimisen voiksi.

Lähteet

- Bertani, C., Bersano, A., De Salve, M., Sobrero, G., 2021. Experimental analysis of the start-up of a natural circulation loop in single and two-phase flow. Nuclear Engineering and Design, Vol. 385.
- Char, N.L., Csik, B.J., 1987. Nuclear development: History and outlook. IAEA bulletin. Vol. 29-3.
- GE Hitachi, 2021. BWRX-300 Reactivity Control. Viitattu 22.11.2022. Saatavilla: <https://www.nrc.gov/docs/ML2106/ML21060B579.pdf>
- GE Hitachi, 2007. ABWR General description book. Viitattu 15.11.2022. Saatavilla: https://nuclear.gpower.com/content/dam/gpower-nuclear/global/en_US/documents/ABWR%20General%20Description%20Book.pdf
- GE Hitachi, 2011. ESBWR Plant general description. Viitattu 15.11.2022. Saatavilla: https://nuclear.gpower.com/content/dam/gpower-nuclear/global/en_US/documents/ESBWR_General%20Description%20Book.pdf
- GE Hitachi, 2022. BWRX-300: The case for SMRs. Viitattu 17.11.2022. Saatavilla: https://www.openbusinessday.fi/day2_ecosmr/1_F_Vitaback_ECOSMR%204-5.pdf
- GE Hitachi, 2022. ESBWR nuclear power plant. Saatavilla: <https://nuclear.gpower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/esbwr>
- GE Hitachi, 2022. The BWRX-300 small modular reactor. Saatavilla: <https://nuclear.gpower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwrx-300>
- GNF, 2016. GNF2 Advantage Generic Compliance with NEDE-24011-P-A (GESTAR II). Viitattu 21.11.2022. Saatavilla: <https://www.nrc.gov/docs/ML1608/ML16084A036.pdf>
- Hujala, E., Hyvärinen, J., Rintamaa, R., Suikkanen, H., Vihavainen, J., Wähä, S., 2022. Uusien ydinergiateknologioiden mahdollisuudet ja kehitystarpeet. Pienet modulaariset sarjavalmistettävät ydinreaktorit eli SMR:t. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2022, Vol. 43.

Hylko, J.M., 2010. The Evolution of the ESBWR. Saatavilla: <https://www.powermag.com/the-evolution-of-the-esbwr/>

IAEA, 2011. Core knowledge on instrumentation and control systems in nuclear power plants. Viitattu 24.11.2022. Saatavilla: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1495_web.pdf

IAEA, 2020. Advances in small modular reactor technology developments. IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), 2020 edition.

IAEA, 2022. Small Modular Reactors: A new nuclear energy paradigm. Viitattu 16.12.2022. Saatavilla: https://nucleus.iaea.org/sites/smr/Shared%20Documents/SMR%20Booklet_22-9-22.pdf

IAEA Aris, 2019. Status Report – BWRX-300 (GE Hitachi and Hitachi GE Nuclear Energy). Viitattu 21.11.2022. Saatavilla: https://aris.iaea.org/PDF/BWRX-300_2020.pdf

IAEA, 2022. Small modular reactors. Saatavilla: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>

IEA, 2022. Poland 2022 Executive summary. Viitattu 16.12.2022. Saatavilla: <https://www.iea.org/reports/poland-2022/executive-summary>

Jawerth Nicole, 2020. What is clean energy transition and how does nuclear power fit in? IAEA bulletin. Vol. 61-3.

Kalli, H., 2012. Ydinreaktorien fysiikka osa 1. Saatavilla: <https://moodle.lut.fi/course/view.php?id=5769>

Rassame, S., Takashi, H., Mamoru, I., 2016. ESBWR passive safety system performance under loss of coolant accidents. Progress in Nuclear Energy, Vol. 96.

Tanuma, T., 2022. Advances in steam turbines for modern power plants (2nd edition). [kirja]. Saatavilla: Lut Primo.

Vijayan, P.K., Nayak, A.K., 2005. Natural circulation systems: Advantages and challenges. Viitattu 20.11.2022. Saatavilla: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1474_web.pdf

World Nuclear Association, 2022. Small Nuclear Power Reactors. Saatavilla: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>

World Nuclear Association, 2022. Economics of Nuclear Power. Saatavilla: <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>