

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Uuden laitostyyppin Super LWR keskeiset piirteet ja
erityisominaisuudet

The main characteristics and special features of Super
LWR power plant

Työn tarkastaja: Heikki Suikkanen

Työn ohjaaja: Heikki Suikkanen

Lappeenranta 28.4.2019

Niklas Ahlbom

TIIVISTELMÄ

Niklas Ahlbom

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Heikki Suikkanen

Kandidaatintyö 2019

Uuden laitostyyppin Super LWR keskeiset piirteet ja erityisominaisuudet

38 numeroitua sivua, 15 kuvaa ja 5 taulukkoa

Hakusanat: SCWR, Super LWR, ylikriittinen vesi, ydinvoimalaitos

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää Super LWR -laitoksen (Light Water Reactor) pääpiirteet ja verrata laitosta nykypäivänä toiminnassa oleviin edistyneisiin ydinvoimalaitoksiin. Työ on suoritettu kirjallisuuskatsauksena, ja kaikki työssä käytetty aineisto on avoimesti saatavilla.

Super LWR on Japanissa kehitetty neljännen sukupolven ydinvoimalaitos, joka tavanomaisiin ydinvoimalaitoksiin verrattuna edistää pääasiassa prosessihyötysuhdetta sekä investoinnin hintaa. Super LWR:n toiminta pohjautuu tavanomaisiin kevytvesireaktoreihin ja ylikriittistä vettä jäähdytteenä käyttäviin voimalaitoksiin. Ylikriittisessä paineessa oleva vesi pysyy vain yhdessä faasissa, jolloin kiehumista ei tapahdu. Laitosjärjestelmä on tämän vuoksi yksinkertaistettu, sillä monia tavallisissa kevytvesireaktoreissa käytettyjä komponentteja, kuten höyrystimiä tai paineistinta, ei Super LWR:ssa tarvita. Koko jäähdytevirta kulkeekin reaktorilta suoraan turbiineille.

Super LWR:ssa tullaan ensisijaisesti käyttämään aktiivisia järjestelmiä varmistamaan laitoksen turvallisuus häiriö- ja onnettomuustilanteissa. Nämä järjestelmät eivät kuitenkaan huomattavasti eroa kolmannen sukupolven ydinvoimalaitosten vastaavista järjestelmistä. Tästä huolimatta Super LWR:n ominaisuudet tekevät siitä sekä hyvin kehityksellisen nykypäivän reaktoreihin verrattuna, että myös yhden toteuttamiskelpoisimmista neljännen sukupolven ydinvoimalaitoksista.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	1
Sisällysluettelo	2
Lyhenneluettelo	3
1 Johdanto	5
2 Kriittinen piste ja ylikriittisyys	7
2.1 Ylikriittinen vesi jäähdytteenä ja moderaattorina	8
3 SCWR-laitostyyppien kehitys	10
4 Laitosjärjestelmä	12
4.1 Suojarakennus	13
4.2 Reaktoripaineastia	15
4.2.1 Reaktorisydän.....	16
4.3 Polttoaine-elementti.....	20
4.3.1 Reaktiivisuuskertoimet.....	21
4.3.2 Ylijäämäreaktiivisuuden kompensointi.....	23
4.3.3 Suojakuori	23
4.4 Turbiini ja voimalaitosprosessi	24
5 Turvallisuus	27
5.1 Turvallisuusjärjestelmät	28
5.1.1 Paineenhallintajärjestelmä	29
5.1.2 Matalapaineinen hätäjähdytys	29
5.1.3 Varasyöttövesijärjestelmä	30
6 Vertailu nykypäivän ydinvoimalaitoksiin	31
7 Johtopäätökset	34
8 Yhteenveto	35

LYHENNELUETTELO

ABWR	Advanced Boiling Water Reactor
ADS	Automatic Depressurization System
AFS	Auxiliary Feedwater System
AP	Advanced Passive
BWR	Boiling Water Reactor
DNB	Departure from Nucleate Boiling
DNBR	Departure from Nucleate Boiling Ratio
ECCS	Emergency Core Cooling System
EPR	European Pressurized Reactor
ESBWR	Economic Simplified Boiling Water Reactor
FPP	Fossil Power Plant
FR	Fast Reactor
GIF	Generation IV International Forum
HPLWR	High Performance Light Water Reactor
JSW	Japan Steel Works
LOCA	Loss Of Coolant Accident
LPCI	Low Pressure Core Injection

LWR	Light Water Reactor
NRC	Nuclear Regulatory Commission
PWR	Pressurized Water Reactor
SCLWR	Super Critical Light Water Reactor
SCWR	Super Critical Water Reactor

1 JOHDANTO

Uuden ja paremman teknologian kehittäminen ydinvoimalaitoksia varten on noussut yhä tärkeämmäksi. Ydinvoimalla tuotetun sähkön hinta on vahvasti riippuvainen laitoksen tyypillisesti huomattavan isoista investointikustannuksista, jotka ovat viime vuosikymmenien aikana nousseet. Uusiutuvan energian markkinaosuuden kasvu tulee myös vähentämään ydinvoiman ja muun perusvoimana käytetyn energiantuotannon taloudellista kannattavuutta. Ydinvoimalaitoksien kompakti rakenne sekä korkeampi hyötysuhde ovat täten tavoiteltavia taloudellista kilpailukykyä varten. (World Nuclear Association 2010, 25; Oka et al. 2014)

Tässä työssä esitetään yksi tutkittu vaihtoehto innovatiiviselle ydinvoimalaitokselle, joka parantaa hyötysuhdetta, investoinnin hintaa sekä turvallisuutta nykyisiin laitoksiin verrattuna. Käyttämällä tyypillisiin kevytvesireaktoreihin verrattuna huomattavasti suurempia lämpötila- ja painetasoja, saavutetaan merkittävästi korkeampi hyötysuhde, jolla on vaikutusta myös laitoksen taloudellisuuteen. Parannus taloudelliseen kannattavuuteen saavutetaan pääasiassa kuitenkin reaktori- ja turbiinilaitteiston sekä muiden rakenteiden pienemmällä määrällä, lyhyellä rakennusajalla sekä tehokkaalla polttoaineen käytöllä. (Leung 2017; Oka et al. 2010, 222)

Laitoksen tekniikka pohjautuu suurilta osin kevytvesireaktoreihin, jotka ovat yleisimpiä reaktorimalleja, mutta poikkeaa tavanomaisista ydinvoimalaitoksista siten, että reaktorin jäähdytykseen käytetään ylikriittisen pisteen yläpuolella olevaa vettä, jolloin neste- ja kaasufaasi häviävät ja jäähdyte pysyy koko ajan yhdessä olomuodossa. Tällöin reaktorissa ei tapahdu kiehumista. (Oka et al. 2010, 6)

Ylikriittisellä vedellä toimivia fossiilisia polttoaineita polttavia voimalaitoksia on ollut toiminnassa jo pitkään. Ensimmäinen, Philo 6, käynnistyi Yhdysvalloissa vuonna 1957. Ylikriittisellä vedellä toimivaa ydinvoimalaitosta ei kuitenkaan ole toistaiseksi rakennettu. (Oka et al. 2010, 3)

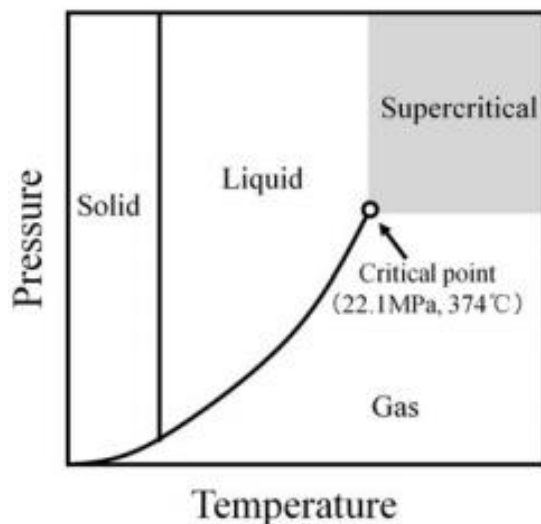
Tällä hetkellä valtaosa toiminnassa olevista ydinreaktoreista on toista reaktorisukupolvea, vain muutamien ollessa kolmannen sukupolven reaktoreita. Ylikriittisellä vedellä toimiva reaktori, eli SCWR (Supercritical Water Reactor) on neljännen sukupolven suunnitteilla oleva ydinreaktorityyppi, jonka pohjalta on suunnitteilla monta erilaista konseptia. (Oka et al. 2014)

Tässä työssä tehdään yleiskatsaus suunnitteilla oleviin reaktorikonsepteihin, mutta keskitytään kuitenkin japanilaiseen Super LWR -konseptiin, sillä sitä on tutkittu jo useampi vuosikymmen ja se pohjautuu kahteen tunnettuun teknologiaan, minkä ansiosta se myös pystytään todennäköisesti kehittämään. Tämän työn tavoitteena on selvittää, miten Super LWR -laitos toimii ja millä tavalla se poikkeaa nykypäivän laitoksista toiminta- ja turvallisuusominaisuuksiltaan.

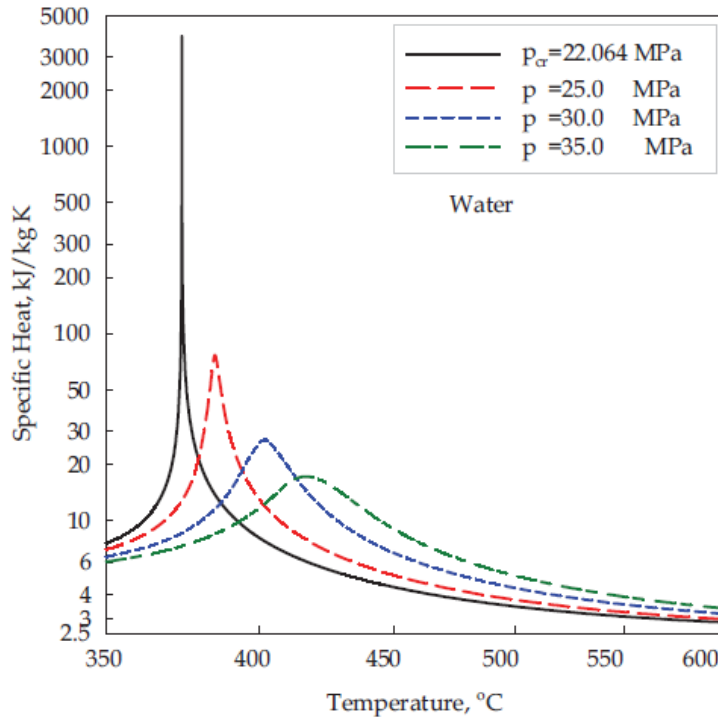
2 KRIITTINEN PISTE JA YLIKRIITTISYYS

Kriittisellä pisteellä tarkoitetaan sitä tilapistettä, jossa tietyillä lämpötilan ja paineen arvoilla neste- ja kaasufaasi häviävät, ja fluidi on vain yhdessä faasissa. Tällöin sitä kutsutaan ylikriittiseksi fluidiksi. Ylikriittinen fluidi ei vaihda faasiaan, vaikka sen termofysikaaliset ominaisuudet vaihtelevatkin merkittävästi, kun lämpötilaa tai painetta nostetaan. Eri fluidit myös saavuttavat kriittisen pisteen eri parametreilla. Veden kriittinen piste on lämpötilassa 374 °C ja paineessa 22,064 MPa, ja ylikriittinen ydinreaktori käyttää jäähdytteenä vettä, joka on tämän pisteen yläpuolella olevalla alueella. Tämä alue on esitetty kuvassa 1 harmaalla. (Pioro & Mokry 2011)

Veden ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus sekä Prandtlin luku saavuttavat huippunsa kriittisen ja pseudokriittisten pisteiden lähellä (Pioro, Mokry, 2011). Pseudokriittinen piste on jollakin kriittisen paineen ylittävällä painetasolla ja lämpötilalla se piste, jossa ominaislämpökapasiteetti saavuttaa huippunsa. Kuvassa 2 on esitetty veden ominaislämpökapasiteetti neljässä eri painetasossa olevalle vedelle lämpötilan funktiona. Kuvassa isoin piikki nähdään kriittisen pisteen tila-arvoilla (374 °C, 22,064 MPa) ja tämän jälkeen kolme pienempää piikkiä, jotka ovat pseudokriittisiä pisteitä.



Kuva 1. Veden kriittinen piste lämpötilassa 374 °C ja paineessa 22,064 MPa. (Oka et al. 2014)



Kuva 2. Veden ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona neljässä eri painetasossa. (Pioro & Mokry 2011, 201, 581)

2.1 Ylikriittinen vesi jäähdytteenä ja moderaattorina

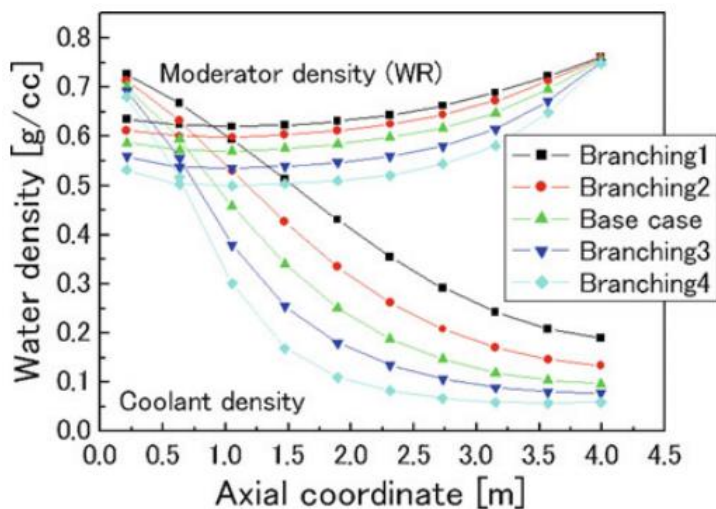
Johtuen ylikriittisten fluidien suuresta termofysikaalisten ominaisuuksien vaihtelusta pseudokriittisten pisteiden lähellä, myös lämmönsiirto ylikriittisillä fluideilla poikkeaa normaaleista jäähdytteistä. Alikriittisten fluidien lämmönsiirrolle tyypillinen kiehumiskriisi, jossa lämmönsiirto heikkenee äkillisen kiehumistavan vaihdon myötä, ei ole mahdollinen operoidessa ylikriittisessä paineessa. (Pizzarelli 2018, 1)

Pisteessä, jossa kiehuminen alkaisi alikriittisellä vedellä, on ylikriittisellä vedellä pseudokriittinen piste ja ominaislämpökapasiteetin huippukohta. Tämän pisteen läheisyydessä jäähdytteen termofysikaaliset ominaisuudet muuttuvat suuresti ja se muuttuu tiheästä vesimäisestä tilasta kaasumaiseen tilaan, jossa sen tiheys on pieni. Jos jäähdytteen massavirta tässä tilanteessa on myös pieni, ja lämpövuoto suuri, tapahtuu

samankaltaista, vaikkakin heikompaa, lämmönsiirron heikkenemistä kuin kiehumiskriisissä. (Oka et al. 2010, 82)

Ylikriittisten fluidien lämmönsiirto riippuukin hyvin paljon lämpövuosta etenkin, kun fluidin keskimääräinen lämpötila lähestyy pseudokriittisiä arvoja. Lämmönsiirto voidaan ennustaa hyvin alhaisilla lämpövuolla käyttämällä Dittus–Boelter-korrelaatiota. Suuremmilla lämpövuolla lämmönsiirto poikkeaa tästä kuitenkin yhä enemmän, johtuen etenkin ominaislämpökapasiteetin lämpötilariippuvuudesta. (Cheng et al. 2009)

Reaktorisydämeen tullessaan pieni osa syöttövedestä menee moderaattoriksi sille varattuihin vesiputkiin. Moderaattorin lämpötilan täytyy vesiputkissa pysyä alle pseudokriittisen lämpötilan, jotta moderaattorin tiheys pysyy korkeana ja moderointitaso hyvänä. Kuvassa 3 on esitetty yksi esimerkki moderaattorin sekä jäähdytteen tiheydestä reaktorisydämen korkeuden funktiona. Kuvasta nähdään, että vaikka jäähdytteen tiheys tippuu hyvin paljon sydämen läpi kulkiessaan, vesiputkien läpi virtaavan moderaattorin tiheys pysyy korkeana. (Oka et al. 2010, 12)



Kuva 3. Moderaattori- ja jäähdytteen tiheyden muutos reaktorisydämen korkeuden funktiona. (Oka et al. 2010, 110)

3 SCWR-LAITOSTYYPPIEN KEHITYS

Fossiilista polttoainetta polttavat ja ylikriittistä vettä käyttävät laitokset alkoivat yleistyä Yhdysvalloissa 1960-luvulla johtuen teollisuuden siirtymisestä isompiin laitossyksiköihin. Ylikriittiset voimalaitokset koostivat 63 % uusista voimalaitoksista 1970–1974-lukujen aikana. 1970-luvun alkupuolella huomattiin kuitenkin ylikriittistä vettä käyttävien laitosten kattilaputkien rakenneominaisuuksien heikkenemistä. Metallin viruminen, väsyminen ja kattilaputkien pinnalle kertyvä kerrostuma aiheuttivat eroosio- ja korroosio-ongelmia, johon pohjimmaisena syynä oli metallurgian riittämätön kehittyvyys. (Yeh & Rubin 2007, 1998)

Nämä syyt johtivat ylikriittisten voimalaitosten huonoon luotettavuuteen, kysynnän heikkenemiseen ja lopulta 1980-luvun alussa laitosten hylkäämiseen. Seuraavista rakennetuista voimalaitoksista suurin osa olikin tavanomaisia, pienemmän hyötysuhteen omaavia alikriittisiä voimalaitoksia. Ylikriittisten laitosten kehitys jatkui kuitenkin Euroopassa ja etenkin Japanissa. (Yeh & Rubin 2007, 1998)

Ylikriittisen veden käyttöä ydinreaktoreissa tutkittiin 1950- ja 1960-luvuilla, ja useita reaktorimalleja kehitettiin Yhdysvalloissa sekä Neuvostoliitossa. Kehitystyön pääasiallisina tavoitteina oli saada ydinvoimalaitosten tavanomainen hyötysuhde 30–35 % nousemaan noin 45–50 %:iin sekä vähentää laitosten investointi- ja käyttökustannuksia. Kehitetyt konseptit olivat teknisesti toteutettavissa olevia, mutta eivät taloudellisesti kannattavia. Huolta herätti myös voimalaitoksen käyttö korkealla painetasolla ja suojakuoren korkea lämpötila. (Squarer et al. 2003; Pioro 2011, 14, 25)

SCWR-konseptien kehitys hylättiin kuitenkin 30 vuodeksi, kunnes se sai uutta kiinnostusta 1990-luvulla. Useat maat, kuten Yhdysvallat, Venäjä, Kanada sekä Japani, ovatkin aloittaneet ylikriittisten ydinvoimalaitosten tutkimus- ja kehitystyön. (Pioro 2011, 14)

Japanissa, Tokion yliopistossa aloitettiin vuonna 1989 tutkimaan kahta eri SCWR-konseptia keskittyen ensin termiseen ja myöhemmin nopeaan reaktorivaihtoehtoon. Nykyisin nämä reaktorikonseptit tunnetaan nimillä Super LWR sekä Super FR (Fast Reactor). Tutkimukset ovat tähän päivään mennessä kattaneet miltei kaikki laitoskonseptien ominaisuudet. (Oka et al. 2010, 571)

SCWR-tutkimusta on tehty myös Euroopassa: vuonna 2006 10 yritystä ja instituutiota kahdeksasta maasta aloittivat tutkimaan termistä SCWR-konseptia nimeltään HPLWR (High Performance Light Water Reactor) (Starflinger et al. 2011). HPLWR-konsepti pohjautuu Japanissa tutkitun Super LWR -konseptin aikaisempiin versioihin, kuten Tokion yliopiston ja Japanin teollisuuden yhteistyönä vuosina 1994 ja 1995 tutkimaan SCLWR:iin (Super Critical Light Water Reactor) (Squarer et al. 2003, 169; Oka et al. 2010, 9). HPLWR-tutkimus kesti 3,5 vuotta, ja Suomesta hankkeessa oli mukana teknologian tutkimuskeskus VTT Oy (Starflinger et al. 2011).

Vuonna 2000 Yhdysvaltain energiaosasto teki aloitteen kansainvälisen järjestön, GIF:n, (The Generation IV International Forum) perustamisesta, jonka tarkoituksena on neljännen sukupolven ydinreaktoreiden tutkimuksen ja kehityksen edistäminen. Järjestö on valinnut kuusi lupaavinta reaktorikonseptia, joihin kuuluu myös SCWR-tyyppiset reaktorit. SCWR on myös ainut valittu reaktorityyppi, joka käyttää jäähdytteenä vettä. (Kelly 2014, 240)

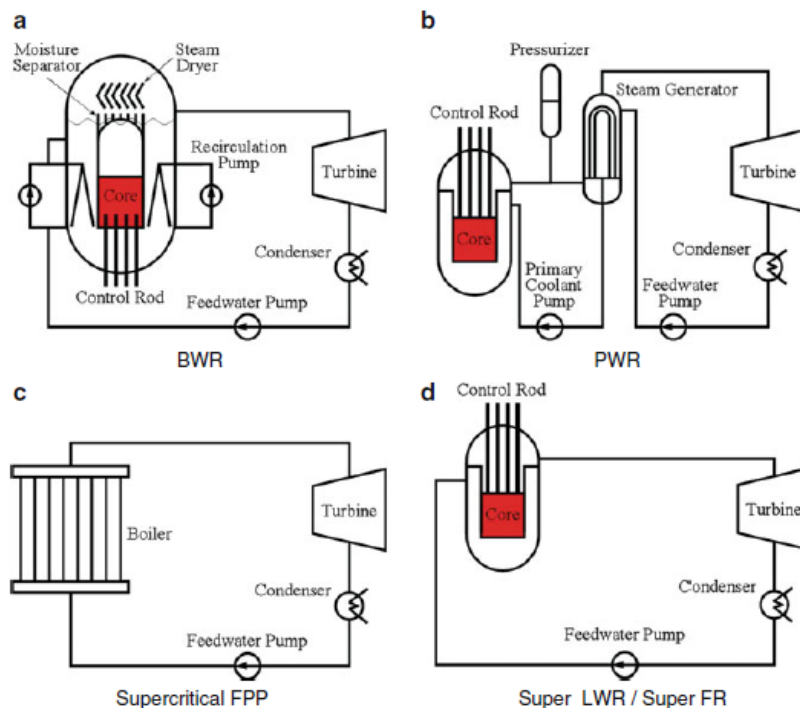
Tällä hetkellä kehitteillä olevat SCWR-konseptit voidaan jakaa kahteen luokkaan, joista toiset hyödyntävät paineastiaa ja toiset paineputkia. Paineastiaa käyttävät konseptit ovat kuitenkin yleisempiä, sillä paineputkimalliset konseptit ovat olleet kehitteillä vain Kanadassa. Muulta suunnittelultaan konseptit ovat kuitenkin samankaltaisia, mikä mahdollistaa yhteisen tutkimus- ja kehitystyön. (GIF 2007, 102)

Japanissa, Kanadassa ja Euroopassa pääasiallisten konseptireaktorien kehitys on jo saatu valmiiksi ja yhteisenä kiinnostuksen kohteena on pienen 10–300 MW:n konseptireaktorin kehitys. Vaikka merkittävää kehitystyötä on jo tehty, termohydrauliikan, materiaalien ja vesikemian osalta vaaditaan vielä lisää tutkimusta. (GIF 2007, 103, 104)

4 LAITOSJÄRJESTELMÄ

Super LWR -laitos on suunniteltu fossiilisia polttoaineita polttavien ylikriittisten voimalaitosten sekä kevytvesireaktoreiden pohjalta. Laitoksesta tekee erittäin kompaktin se, että monia tavanomaisten kevytvesireaktoreiden komponentteja ei tarvita lainkaan. Jäähdyte pysyy vain yhdessä faasissa kriittisen pisteen yläpuolella, jolloin esimerkiksi höyrystimiä, vedenerottimia ja höyrynkuivaimia ei tarvita lainkaan. (Oka et al. 2010, 221)

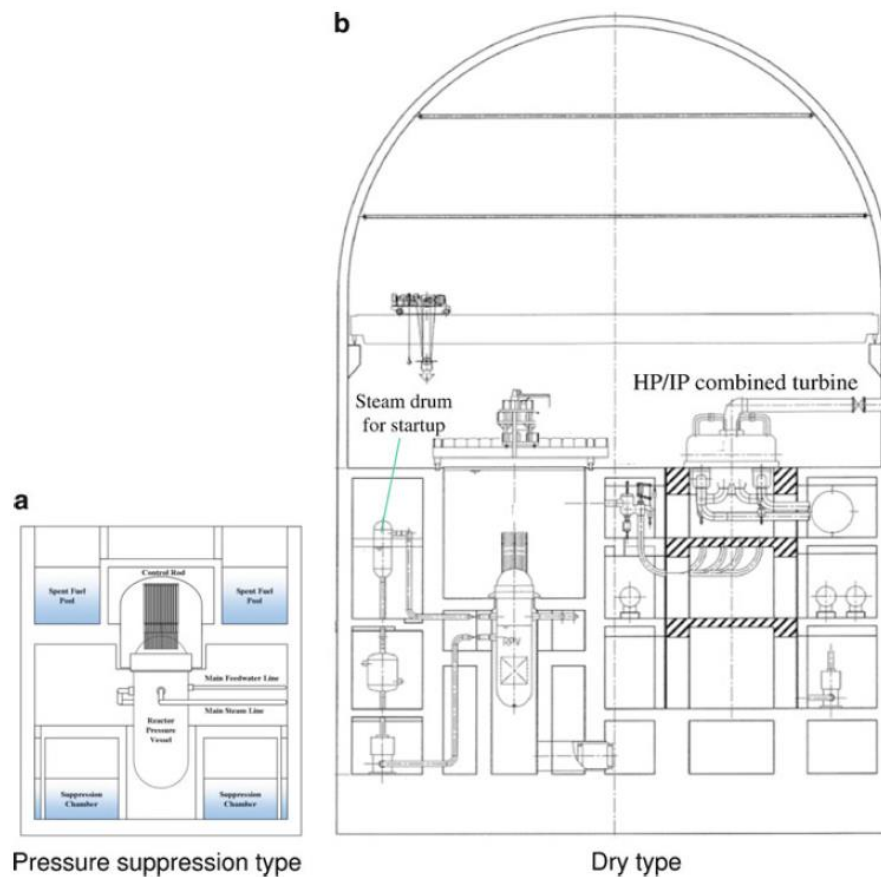
Kuvassa 4 on esitetty BWR:n (Boiling Water Reactor), PWR:n (Pressurised Water Reactor), Super LWR:n sekä ylikriittisen fossiilisen voimalaitoksen laitosjärjestelmät. Kuvasta nähdään, että ylikriittiset voimalaitokset ovat huomattavasti yksinkertaisempia laitosjärjestelmiltään. Super LWR -laitoksessa jäähdyte kulkee reaktoripaineastiasta suoraan turbiinille, eikä muita jäähdytepiirejä tarvita, kuten PWR-tyyppisissä laitoksissa, joissa jäähdytteellä on erillinen primaari- ja sekundaarikierto. (Oka et al. 2010, 221)



Kuva 4. BWR- ja PWR-laitoksiin tarvittavat pääkomponentit verrattuna ylikriittisiin FPP ja Super LWR -laitoksiin. (Oka et al. 2010, 222)

4.1 Suojarakennus

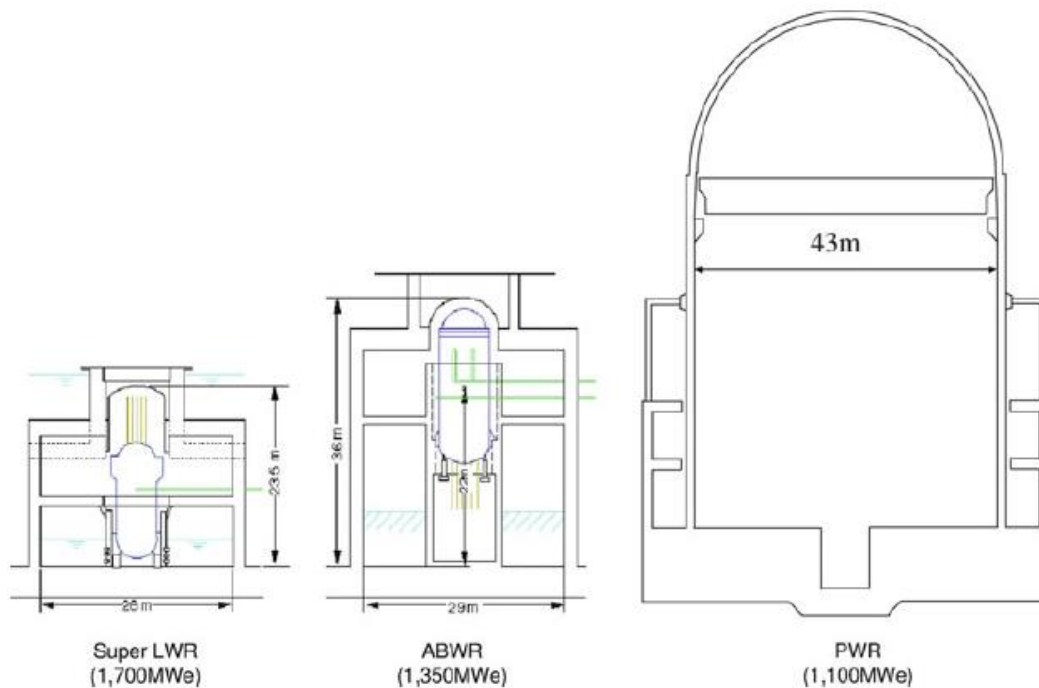
Super LWR:lle sopii kuiva tai painekontrolloitu primaarisuojarakennus. Jos käytössä on kuivatyyppinen suojarakennus, voidaan höyrystimien ja jäähdytteen uudelleenkierrätysjärjestelmien puuttuessa samaan rakennukseen sijoittaa myös korkea- ja välipaineturbiinit. Kuvassa 5 on vertailtu Super LWR -laitoksen kahta mahdollista suojarakennusratkaisua. Kuvasta nähdään, että b-kohdan kuivatyyppiseen suojarakennukseen on sisällytetty myös korkea- ja välipaineturbiini.



Kuva 5. Painekontrolloitu sekä kuivatyyppinen suojarakennus. (Oka et al. 2010, 224)

Alustavissa suunnitelmissa käytetään kuitenkin painekontrolloitua suojarakennusta, joka on hyvin samankaltainen modernin ABWR:n (Advanced Boiling Water Reactor) suojarakennuksen kanssa. Super LWR:n suojarakennus voidaan kuitenkin tehdä hieman

kompaktimmaksi, johtuen pienemmästä tarvittavasta hätävesivarastosta. Suojarakennuksen tilavuus Super LWR -laitoksessa on 7900 m^3 . Kuvassa 6 on esitetty vertailu Super LWR:n, ABWR:n sekä tyypillisen PWR-laitoksen suojarakennuksien ko'oista.



Kuva 6. Super LWR:n, ABWR:n ja tyypillisen PWR:n suojarakennukset. (Oka et al. 2010, 225)

Painekontrolloitujen suojarakennusten etuna kuivatyypisiin on muun muassa onnettomuuden sattuessa taattu lämmön poisto vesialtasiin, turvattu veden saanti reaktorisydämen hätäjähdytysjärjestelmä ECCS:iin (Emergency Core Cooling System), sekä kyky suodattaa vapautuneet fissiotuotteet. (Hitachi-GE Nuclear Energy)

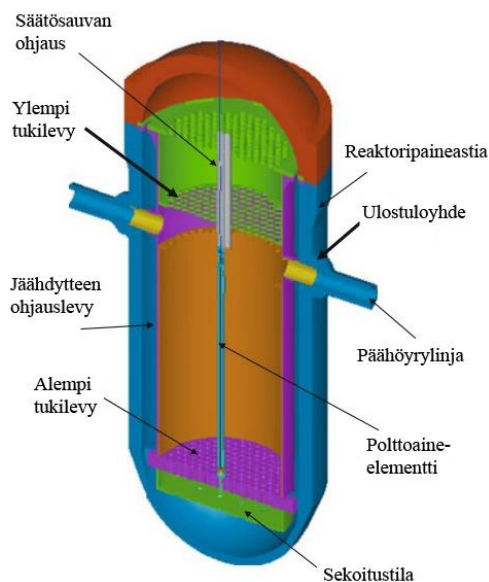
LOCA:n (Loss Of Coolant Accident) eli jäähdytevirran menettämisen kaltaisten onnettomuuksien sattuessa suojarakennuksen paine saadaan myös pidettyä sopivalla tasolla. Painetason alentamiseen käytetään märkätilaa (wetwell), johon onnettomuudessa vapautunut ylikriittinen fluidi lopulta lauhdutetaan sen ensin höyrystyttyä paineen muutoksen takia kuivatilassa (drywell). Altaassa on valmiina suuri määrä vettä, jolloin sinne johdettu höyry saadaan nopeasti lauhdutettua. Kuivatilaa sekä vesialtaita ympäröi

lisäksi tiivis sylinterimäinen terässuoja, joka estää fissiotuotteiden pääsyn ympäristöön. (Oka et al. 2010)

4.2 Reaktoripaineastia

Reaktoripaineastian pätehtäviin kuuluu reaktorisydämen sijoitus, jäähdytteen paineen kesto, polttoaineen ja säätösauvojen tukeminen sekä kohdistaminen ja virtauskanavan luominen jäähdytteelle polttoaineen ohi. Paine Super LWR:n sydämessä on 25 MPa ja täten paineastian seinämän paksuuden täytyy olla 350 mm (Oka et al. 2010, 248). 1700 MWe -teholuokkaisessa yksikössä paineastian massa on 750 tonnia (Oka et al. 2010, 223). Reaktoripaineastian mitat ja käyttöikä on esitetty taulukossa 1.

Super LWR:n reaktoripaineastia vastaa PWR:ien paineastian suunnittelua siten, että paineastian alapuolella ei ole isoja läpivientejä, ja höyrynerottimien sekä -kuivaimien puuttuessa paineastiasta, voidaan säätösauvat sijoittaa paineastian yläosaan. Kuvassa 7 on esitetty Super FR -laitoksen reaktoripaineastia, joka suunnittelultaan vastaa kuitenkin myös Super LWR:n paineastiaa. (Oka et al. 2010, 226)



Kuva 7. Super FR ja Super LWR -laitoksen reaktoripaineastia ja sisäosat. (Muokattu lähteestä Oka et al. 2010, 226)

Paineastia valmistettaisiin takomalla Japanissa JSW:n (Japan Steel Works) toimesta. Säteilyhaurastuminen minimoidaan takomalla yhtenäisen aktiivisen sydämen osa ja rajoittamalla säteilylle herkistäviä materiaaleja kuten kuparia ja fosforia hitsausalueilla. (Oka et al. 2010, 227)

Taulukko 1. Super LWR:n reaktoripaineastian mitat ja suunniteltu käyttöikä. (Oka et al. 2014, 248)

Korkeus [m]	15
Sisähalkaisija [m]	4,34
Seinämäpaksuus [m]	0,35
Suunniteltu elinikä [vuotta]	60

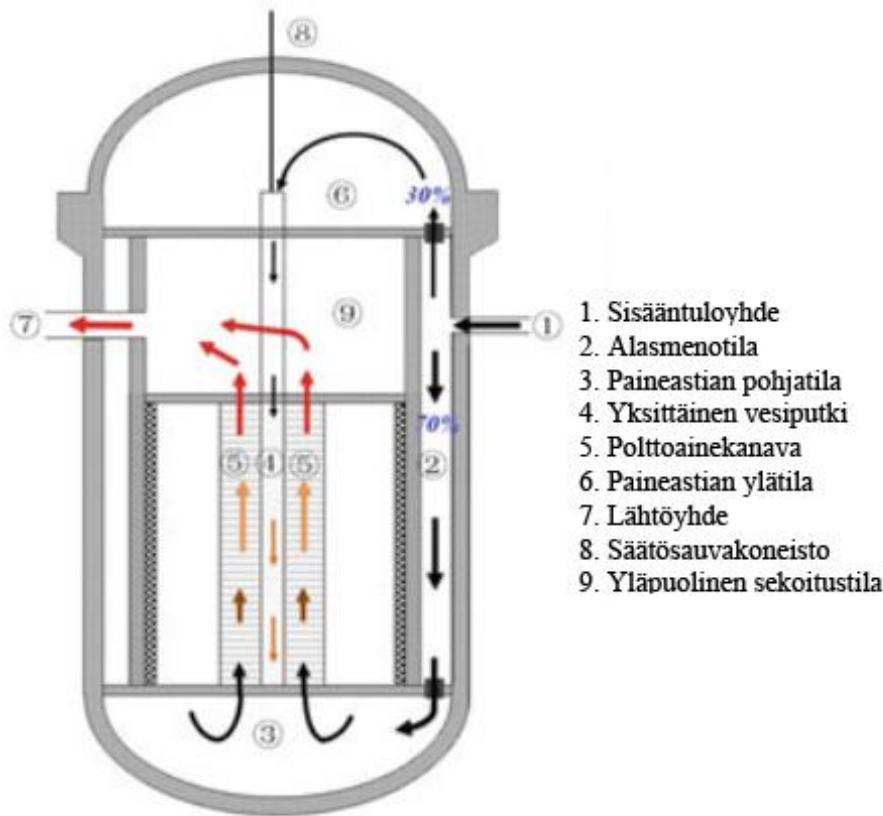
Reaktoripaineastian sisäseiniä jäähdytetään vain sisään tulevalla jäähdytteellä, sillä vain ulosmenoyhteet ovat kosketuksessa kuumaan jäähdytteeseen. Ulosmenoyhteet saattavatkin näin ollen tarvita lisäsuojauksia lämmöltä. Sisä- ja ulosmenoyhteitä ei tarvita kuin kaksi, sillä sähkötehoon nähden jäähdytteen massavirta on paljon pienempi kuin normaaleissa kevytvesireaktoreissa: noin 1/8 samalla lämpöteholla toimivan BWR-laitoksen massavirrasta. Sisäseinille tulevan pienen lämpöaltistuksen takia voidaan seinämateriaalina käyttää samaa terästä kuin PWR:ssa. (Oka et al. 2010)

4.2.1 Reaktorisydän

Super LWR -laitokselle on suunniteltu muutamia erilaisia sydänrakenteita, joille yhteisiä suunnittelutavoitteita ovat yksinkertaistettu sydämen yläosan rakenne, 500 °C:n keskimääräinen ulostulolämpötila 43,8 % termisen hyötysuhteen saavuttamiseksi, 1000MWe teho sekä 45 GWd/t keskimääräinen palama (Oka et al. 2014, 23). Kolme keskeisintä suunniteltua mallia on esitetty kuvissa 8, 9 ja 10.

Kuvassa 8 on kuvattu reaktorisydän kahdella läpivirtauksella. Aikaisemmat Super LWR -konseptit pohjautuivat valtaosin tähän malliin, koska sillä saavutetaan tehokkaasti sydämen jäähdytys ja moderointi. Osa jäähdytteestä ohjataan heti reaktoripaineastian

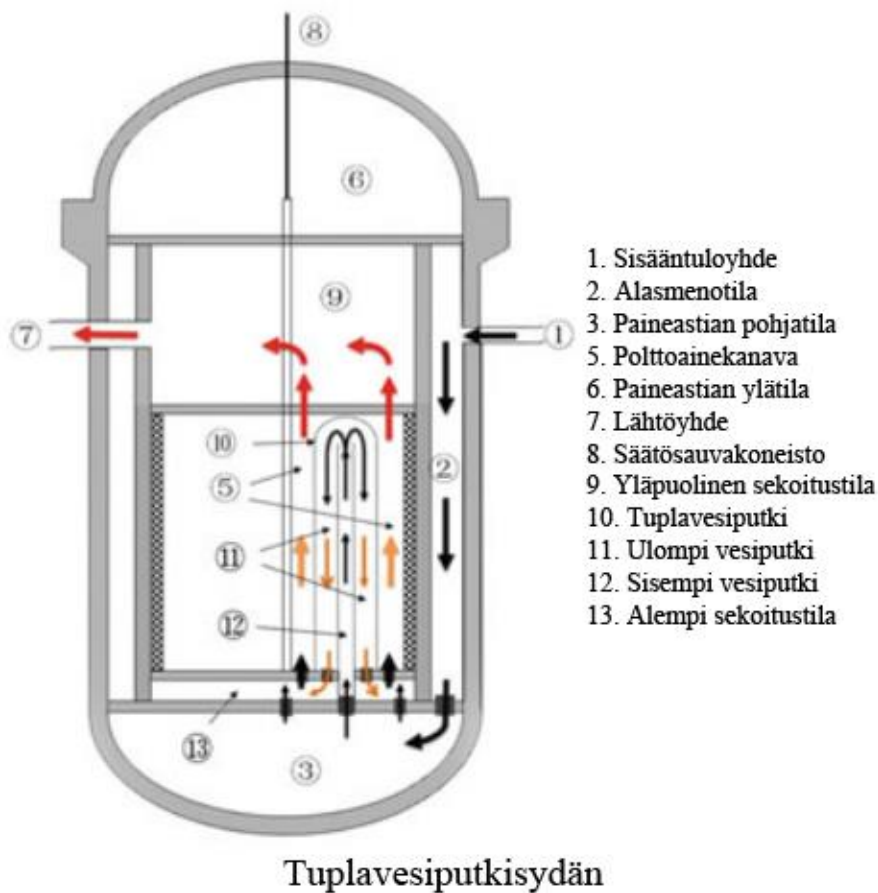
yläosaan, josta se laskeutuu alas vesiputkissa ja sekoittuu muun jäähdytteen kanssa paineastian alaosassa. Tämän jälkeen jäähdyte kulkee polttoainekanavia pitkin ylemmän sekoitustilaan ja poistuu paineastiasta.



Kaksikulkuinen sydän

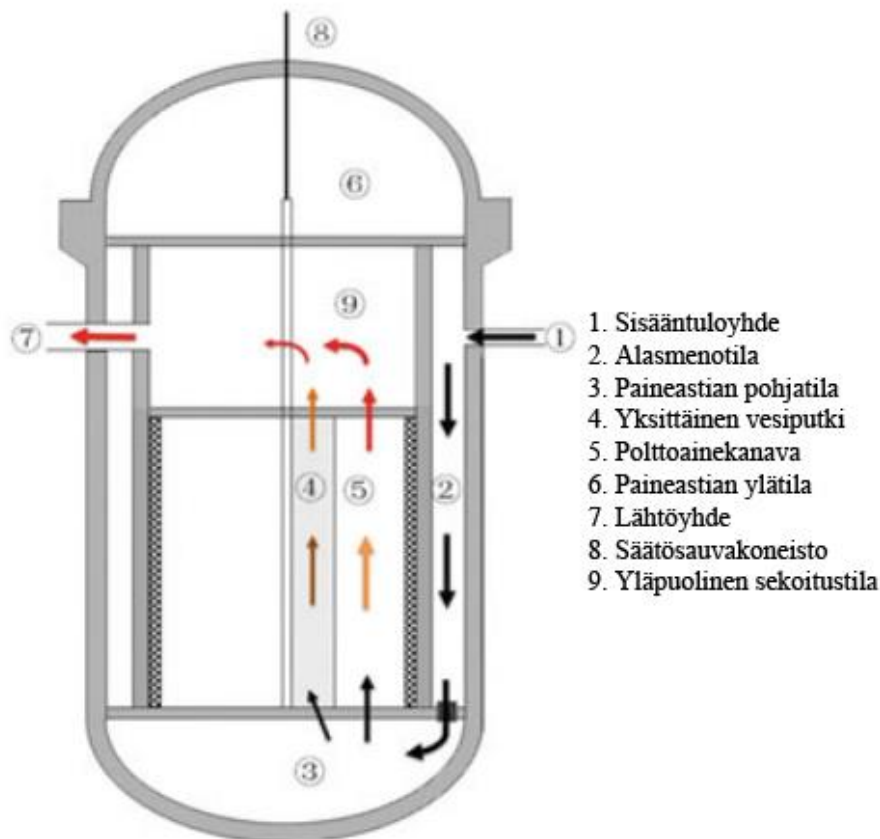
Kuva 8. Super LWR:n kaksikuluisen reaktorisydämen rakenne ja virtaus sen sisällä. (Muokattu lähteestä Oka et al. 2014, 6)

Vesiputkissa laskeutuneen lämpimämmän jäähdytteen sekä suoraan paineastian alaosaan kulkevan jäähdytteen sekoittumisen ansiosta saavutetaan 500 °C:n keskimääräinen ulosmenolämpötila. Jäähdytteen ohjaus- sekä jakeluputkien takia reaktorisydämen yläosan rakenne sekä polttoaineen lataus kuitenkin monimutkaistuu. Tämän yksinkertaistamiseksi kehitettiin tuplavesiputkilla toimiva malli, jonka virtaussysteemi on kuvattuna kuvassa 9. (Oka et al. 2014, 22, 23).



Kuva 9. Super LWR:n tuplavesiputkisydämen rakenne ja virtaus sen sisällä. (Muokattu lähteestä Oka et al. 2014, 6)

Tuplavesiputkilla toimivissa mallissa reaktorisydämen yläosa on yksinkertaistettu poistamalla jäähdytteen ohjaus- sekä jakeluputket. Tässä suunnittelussa kaikki jäähdyte virtaa suoraan reaktoripaineastian alaosaan. Osa jäähdytteestä kulkee edelleen suoraan alempaan sekoitustilaan ja osa kulkee ensin sisempään vesiputkeen, jossa se virtaa ylöspäin ja muuttaa sitten suuntansa päinvastaiseksi uloimmassa vesiputkessa ja lopulta sekoittuu jo valmiiksi alemmassa sekoitustilassa olleen jäähdytteen kanssa. Tämä sekoittunut jäähdyte nousee lopulta ylös polttoainekanavissa ylempään sekoitustilaan ja edelleen ulos reaktorista. Alaosan sekoitustilasta tulee kuitenkin tässä tapauksessa varsin monimutkainen, jota yksinkertaistaakseen kehitettiin vain yhdellä läpivirtauksella toimiva reaktorisydän, joka on esitetty kuvassa 10. (Oka et al. 2014, s.23).



Yksikulkuinen sydän

Kuva 10. Super LWR:n yksikulkuisen sydämen rakenne ja virtaus sen sisällä. (Muokattu lähteestä Oka et al. 2014, 6)

Yksikulkuisessa reaktorisydämessä koko jäähdytevirtaus ohjautuu heti reaktoripaineastian alaosaan. Sieltä 3,5 % jäähdytevirrasta ohjataan vesiputkiin moderaattoriksi ja 96,5 % polttoainekanaviin jäähdytteeksi (Oka et al. 2014, 37). Moderaattorin lämpötilan täytyy vesiputkissa olla alle pseudokriittisen lämpötilan, jotta moderaattorin tiheys pysyy korkeana ja moderointitaso hyvänä. Tämän takia vesiputkien ja jäähdytekanavien välissä on ohut kerros zirkoniaeristettä (Oka et al. 2010, 12). Moderaattori ja jäähdyte kulkevat ylöspäin omissa kanavissaan, jonka jälkeen virtaukset sekoittuvat ja virtaus ohjataan pois reaktorista. Yksikulkuinen jäähdytevirtaus yksinkertaistaa reaktorisydämen ala- ja yläosaa. Tämän yksikulkuisen reaktorisydämen ominaisuuksia on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Reaktorisydämen ominaisuuksia. (Oka et al. 2014, 36; Oka et al. 2010, 19)

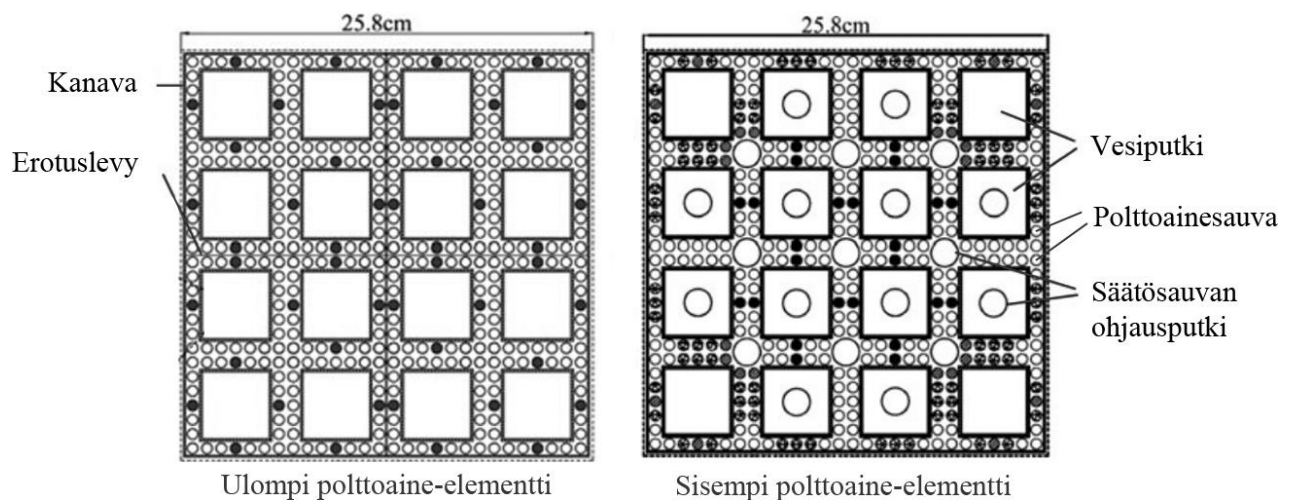
Reaktorin lämpöteho [MW]	2744
Käyttöpaine [MPa]	25
Jäähdytevirtaus [kg/s]	1418
Jäähdytteen sisääntulolämpötila [°C]	280
Jäähdytteen poistolämpötila [°C]	500
Reaktorisydämen aktiivisen osan korkeus [mm]	4200
Reaktorisydämen ekvivalenttihalkaisija [mm]	3730
Polttoaineniippujen lukumäärä	129
Polttoainesauvojen lukumäärä nipussa (sisempi/ulompi nippu)	348 / 384
Keskimääräinen lineaariteho [kW/m]	18

4.3 Polttoaine-elementti

Useita polttoainejärjestelyjä on suunniteltu muun muassa edellisessä luvussa esitetyille erilaisille reaktorisydämille. Tässä luvussa keskitytään kuitenkin vain yksikulkuisen reaktorisydämen polttoainejärjestelyyn, sillä se on virtaussysteemiltään ja rakenteeltaan yksinkertaisin. Reaktorisydämessä jäähdytteen lämpötilaero sisäänmenon ja ulostulon välillä on noin 220 °C. Pienen massavirran takia polttoainesauvojen välisen etäisyyden täytyy olla pieni, jotta jäähdytteen nopeuden kasvamisen kautta lämmönsiirto olisi riittävän tehokasta jäähdyttämään polttoainesauvoja. (Oka et al. 2010, 129)

Kuvassa 11 on esitetty sydämeen suunnitellut polttoaine-elementit. Elementit ovat samankokoisia, mutta sisemmän sydämen elementit poikkeavat ulomman sydämen elementeistä polttoainesauvojen lukumäärällä ja sillä, että niissä tiettyihin kohtiin on asennettu 21 säätösauvan ohjausputkea. Sisemmän sydämen elementeissä polttoainesauvoja on 348 kappaletta ja ulomman sydämen elementeissä 384 kappaletta. Ulommissa elementeissä on myös erotuslevyt, joilla tasataan teho-jäähdytevirtaussuhteen epäkohtia, jotka aiheutuvat sydämen ulomman osan suuresta tehojakaumasta. (Oka et al. 2014, 35, 36)

Polttoainesauvat ovat suurimmaksi osaksi samanlaisia molemmissa polttoaine-elementeissä, ja yhdessä sauvassa uraanidioksidia on kolmessa eri rikastusasteessa: 7,9 %, 7,5 % ja 7,0 %. Sisemmissä polttoaine-elementeissä on myös edellä mainitun kaltaisten polttoainesauvojen lisäksi joitakin alhaisemman ja korkeamman rikastusasteen omaavia sauvoja. (Oka et al. 2014, 35, 36)



Kuva 11. Ulomman ja sisemmän sydämen polttoaine-elementti yksikulkuisessa reaktorissa. (Muokattu lähteestä Oka et al. 2014, 35, 36)

4.3.1 Reaktiivisuuskertoimet

Reaktiivisuus kuvaa reaktorin efektiivisen kasvutekijän muutosta, eli muutosta neutronien lukumäärässä peräkkäisissä neutronisukupolvissa. Kriittisessä reaktorissa reaktiivisuus on nolla reaktorin tehoasosta riippumatta. Reaktiivisuuteen vaikuttavat muun muassa jäähdytteen, moderaattorin ja polttoaineen lämpötila ja tiheys sekä säätö- ja rakennemateriaalien ominaisuudet. Reaktiivisuuskertoimet määrittelevät näiden ominaisuuksien muuttumisen vaikutusta reaktiivisuuteen. (Eurasto et al. 2004, 35)

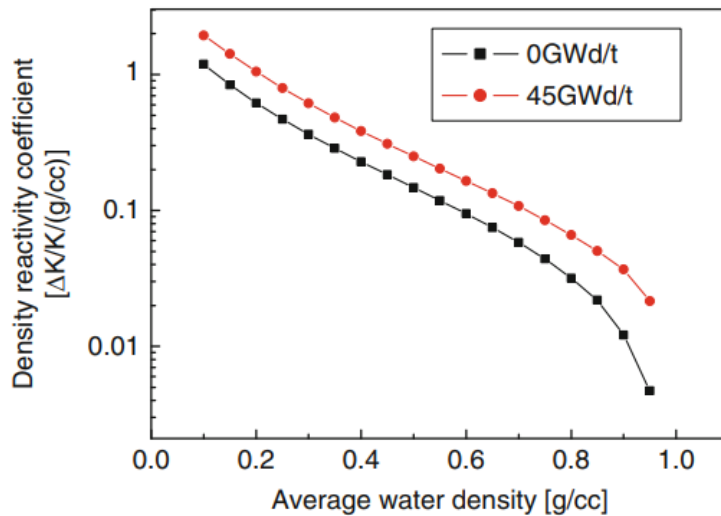
Reaktiivisuuskertoimien on tärkeää olla sellaisia, että niiden vaikutus kaikissa toimintatiloissa on reaktiivisuuden kasvua hillitsevä. Kevytvesireaktoreissa tärkeimpiä reaktiivisuuskertoimia ovat jäähdytteen, moderaattorin sekä polttoaineen lämpötilan tai tiheyden reaktiivisuuskertoimet. Termisissä reaktoreissa polttoaineen lämpötilan

reaktiivisuuskerroin on aina negatiivinen johtuen polttoaineen resonanssiabsorption noususta polttoaineen fertiileihin isotooppeihin ^{238}U ja ^{240}Pu . Polttoaineen lämpötilan nousu pyrkii siis rajoittamaan tehon nousua. Super LWR:ssa polttoaineen lämpötilan reaktiivisuuskerroin pidetään negatiivisena polttoaineen lämpötila-alueella 150-2000 °C. (Eurasto et al. 2004, 35; Oka et al. 2010, 155, 157)

Jäähdytteen lämpötilan reaktiivisuuskerroin on kevytvesireaktoreissa yleensä negatiivinen, sillä jäähdytteen tiheys pienenee lämpötilan noustessa, jolloin jäähdytteen moderointikyky heikkenee. Jäähdytteen lisäksi höyrystyessä siihen ikään kuin muodostuu aukkoja neutroneille, jolloin niiden vuoto ulos reaktorista sekä fissioon johtamattomat neutronikaappaukset kasvavat, ja teho edelleen pienenee. Aukko-osuuden reaktiivisuuskerroin onkin termisille kevytvesireaktoreille yleensä negatiivinen, jollei reaktorisydän ole ylimoderoitu. (Eurasto et al. 2004, 36)

Super LWR:ssa jäähdytteen ja moderaattorin positiivinen tiheyden reaktiivisuuskerroin vastaa negatiivista aukko-osuuden reaktiivisuuskerrointa. Tämän takia esimerkiksi reaktorin paineen alennus ja tätä seuraava veden höyrystyminen vähentää reaktiivisuutta tehokkaasti. Lämmönsiirto moderaattoriveteen on kuitenkin hidastettua verrattuna jäähdytteeseen, sillä moderaattorivesi on omissa vesiputkissaan. Tämä tekee vesiputkia käyttävästä reaktorimallista epävakaamman. (Oka et al. 2010, 35, 140)

Polttoaineen palaman kasvaessa myös tiheyden reaktiivisuuskertoimella on taipumus kasvaa. Tämä johtuu polttoaineeseen kertyvän plutoniumin määrästä, jolla on uraania suurempi termisten neutronien absorptio-, fissio- ja resonanssi-absorptiovaikutusala. Toisaalta tiheys-reaktiivisuuskerroin laskee veden keskimääräisen tiheyden noustessa, joka on esitetty kuvassa 12. Veden keskimääräisen tiheyden nousu johtuu aksiaalisen tehojakauman vähäisestä siirtymisestä sydämen alaosaan yläosaan ja näin muuttuvasta tiheän ja harvan jäähdytteen tilavuussuhteesta. Reaktiivisuuskerroin pidetään positiivisena koko tiheysalueella, eli kuin aukko-osuuden reaktiivisuuskerroin olisi negatiivinen. Tällöin reaktorisydän säilyttää sen luontaisen turvallisuutensa. (Oka et al. 2010, 97, 155)



Kuva 12. Tiheyden reaktiivisuuskertoimen muutos veden keskimääräisen tiheyden kasvaessa. (Oka et al. 2010, 156)

4.3.2 Ylijäämäreaktiivisuuden kompensointi

Sydämen reaktiivisuus laskee vähitellen polttoaineen palaman mukana. Tämän takia uuden polttoainesyklin alkaessa reaktiivisuuden täytyy olla suuri, jotta sen alenemista voidaan kompensoida palaman mukana. PWR-laitoksissa kompensointi tehdään pääasiallisesti boorin syötöllä primaaripiiriin (Oka et al. 2010, 136). Tämä ei kuitenkaan sovi Super LWR:lle jäähdytteen läpivirtauksen takia. Reaktiivisuutta voidaan kontrolloida myös säätösauvoilla, mutta tämä aiheuttaa häiriöitä sydämen tehojakaumaan. Muun muassa BWR-laitoksissa käytetään joihinkin polttoainepelletteihin sekoitettua gadoliniumia (Gd_2O_3), jolla voidaan kompensoida reaktiivisuuden alenemista. Super LWR:ssa reaktiivisuuden kompensointi tapahtuu myös gadoliniumia käyttäen. Gadoliniumia käytetään myös aksiaalisen tehojakauman tasaukseen. (Oka et al. 2010, 102).

4.3.3 Suojakuori

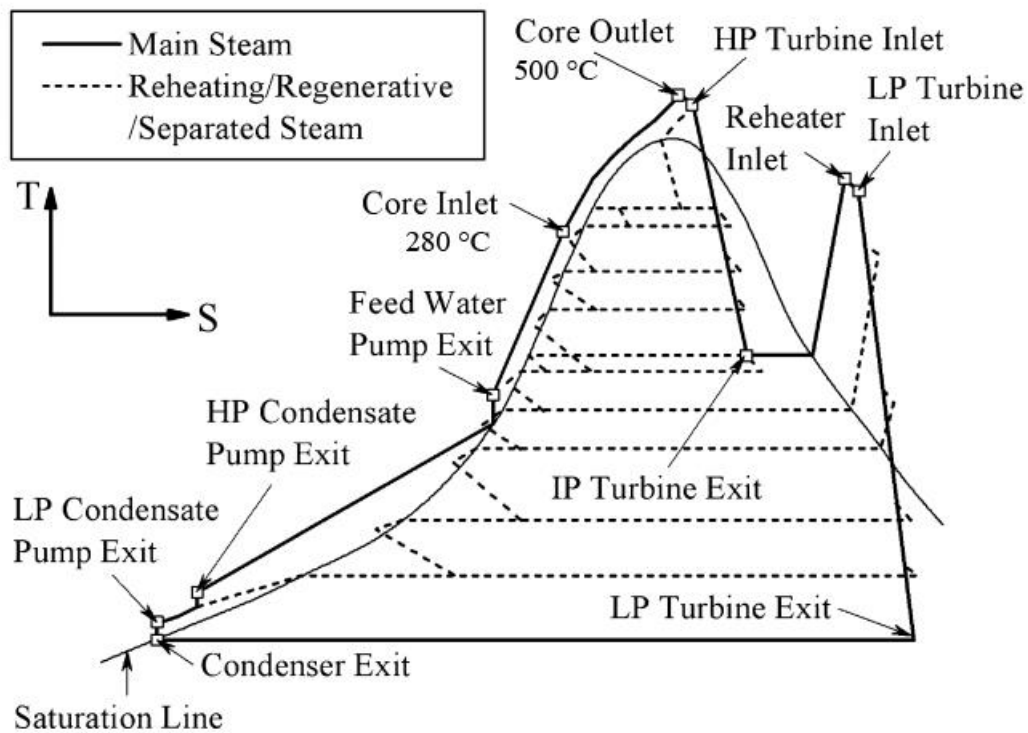
Polttoainesauvojen suojakuoren materiaalina on PWR-, sekä BWR-laitoksissa yleisesti käytetty erilaisia zirkoniuempohjaisia materiaaleja johtuen zirkoniuumin pienestä

absorptiovaikutusalasta, eli niiden kyvystä absorboida neutroneja. Zirkonium on myös hyvin korroosionkestävää. Nykyisiä zirkoniumseoksia ei kuitenkaan voida Super LWR -laitoksessa käyttää johtuen sydämen suuresta paineesta ja lämpötilasta, jotka heikentävät suojakuoren vahvuutta. Austeniittiset ja ferriittiset ruostumattomat teräkset sekä monet nikkelseokset ovat joitakin vartenotettavia vaihtoehtoja suojakuoren materiaaliksi, mutta kehitys- ja tutkimustyön alla on myös monenlaisia uusia päällystemateriaaleja. (Oka et al. 2010, 124)

Johtuen siitä, että zirkoniumseoksia ei voida käyttää, ovat polttoaineen rikastusasteet korkeat verrattuna tyypillisiin kevytvesireaktoreihin. Kehittämällä uusi, korkeaa lämpötilaa kestävä zirkoniumseos, saadaan vähennettyä myös tarvittavaa rikastusastetta. (Oka et al. 2014, 8)

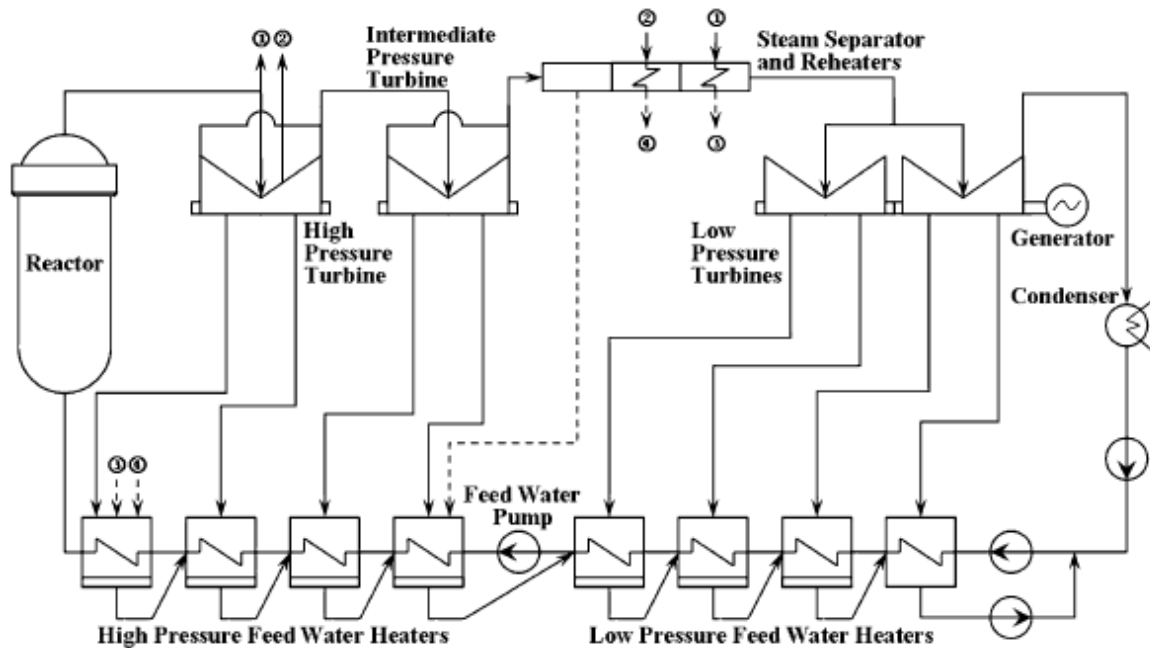
4.4 Turbiini ja voimalaitosprosessi

Uuden turbiinitekniikan tutkiminen ei ylikriittisiä ydinvoimalaitoksia varten ole tarpeen, sillä turbiinien osalta voidaan hyödyntää jo olemassa olevaa teknologiaa fossiilisia polttoaineita polttavista ylikriittisistä voimalaitoksista. Lisäksi nykyisten turbiinien hyötysuhteen parannus optimoimalla virtausta tai turbiinien lapoja on hyvin vähäistä. Lämpötilaa nostamalla voidaan kuitenkin vielä saavuttaa merkittäviä hyötysuhteen parannuksia (Oka et al. 2010, 228). Tyypillisten ylikriittisten FPP-voimalaitoksien korkeapaineturbiinien maksimilämpötila on 538 °C, joten tätä hyödyntääkseen on tärkeää nostaa jäähdytteen lämpötila reaktorista 500 °C:een. Kuvassa 13 on esitetty Super LWR -laitoksen prosessi T–S-tasossa. (Oka et al. 2014)



Kuva 13. Super LWR -laitoksen prosessi T–S-tasossa. (Muokattu lähteestä Oka et al. 2010, 234)

Super LWR -laitoksessa käytetään yhtä korkeapaineturbiinia, yhtä välipaineturbiinia ja kahta matalapaineturbiinia. Höyryä välilämmitetään välipaine- ja matalapaineturbiinien välissä kaksi kertaa. Höyryä johdetaan yhteensä neljällä väliotolla korkea- sekä välipaineturbiinilta neljään korkeapaine-esilämmittimeen. Korkeapaineturbiinilta osa tuorehöyrystä, ja osa jo hieman paisuneesta höyrystä otetaan myös käytettäväksi matalapaineisen höyryn välilämmittimiin. Matalapaineturbiineilta lähtee vastaavasti neljä väliottoa, joista jokainen johdetaan yhteen matalapaine-esilämmittimeen. Syöttöveden lämpötila saadaan kahdeksalla esilämmittimellä 280 °C:een (Oka et al. 2010, s. 232). Super LWR -laitoksen prosessikaavio on esitetty kuvassa 14, jossa turbiinit ja näiden väliotot ovat kuvattu.



Kuva 14. Super LWR -laitoksen prosessikaavio. (Oka et al. 2010, 231)

Pumppujen tarkoituksena on tuottaa pakotettu jäähdytevirtaus reaktoriin poistamaan fissioreaktion tuottama lämpöenergia. Laitoksen normaalissa toiminnassa käytettäviä pääkiertopumppuja ajetaan turbiinilla, jotta saavutetaan korkeampi terminen hyötysuhde verrattuna sähkömoottorikäyttöisiin pumppuihin. Normaalitilassa molemmat pääkiertopumput ovat vastuussa 50 % jäähdytevirrasta. Kuten BWR-tyyppisissä laitoksissa, myös Super LWR:ssa on kaksi sähkömoottorikäyttöistä pumppua, joita käytetään reaktorin käynnistykseen, sammutusjäähdytykseen ja jotka toimivat myös hätävarana pääkiertopumpuille. (Ishiwatari et al. 2005, 930)

5 TURVALLISUUS

Super LWR -laitoksessa on neljä normaalin toiminnan kriteeriä, joilla varmistetaan sydämen turvallisuus sekä polttoainesauvojen eheys. (Oka et al. 2014, 23)

1. Maksimi lineaarinen lämpöteho alle tai yhtä suuri kuin 39 kW/m.
Arvo on hieman pienempi kuin tyypillisissä kevytvesireaktoreissa, johtuen korkeasta keskimääräisestä jäähdytteen lämpötilasta. Kiehumusvesireaktoreissa tyypillinen arvo on noin 44 kW/m ja painevesireaktoreissa noin 42,6 kW/m. (Oka et al. 2010, 12)
2. Suojakuoren lämpötilan maksimiarvo 650 °C.
Suurin sallittava suojakuoren lämpötila ja paine ovat tilapäisissä epänormaalitylanteissa 800 °C ja 28,9 MPa ja vastaavasti onnettomuustilanteissa 1260 °C ja 30,3 MPa. (Tamiya et al. 2013, 130)
3. Sydämen sammutusmarginaali suurempi tai yhtä suuri, kuin 1 % dk/k.
4. Jäähdytteen tiheyden positiivinen reaktiivisuuskerroin.

Vaikka Super LWR:n jäähdytekierto on hyvin samankaltainen BWR:ien sekä PWR:ien primaaripiirin kierron kanssa, on sen perus turvallisuusperiaate kuitenkin erilainen. PWR- sekä BWR-laitoksissa ratkaisevaa on tarpeeksi suuren vesimäärän pitäminen kiertosysteemissä, jota seurataan mittaamalla vedenpinnan korkeutta BWR:ien tapauksessa reaktoripaineastissa tai PWR:ssa paineistimessa. (Oka et al. 2010, 349)

Super LWR -laitoksessa jäähdytemäärä ei kuitenkaan läpivirtauskattilan luonteen vuoksi ole keskeisin turvallisuusperiaate. Reaktoripaineastiassa ei ole vedenpintaa, eikä jäähdytteen määrää ole helppo monitoroida. Tällöin ratkaisevaa on vain jäähdytevirtauksen ylläpitäminen. Tämä tarkoittaa jäähdytteen pumppauksen onnistumista reaktoriin sekä onnistunutta jäähdytteen poistoa reaktorista. (Oka et al. 2010, 350)

Suunnittelukriteerit eroavat esimerkiksi PWR-tyyppisistä laitoksista siten, ettei kriteereitä, kuten kriittisen lämpövuon suhdetta lokaaliin lämpövuohon, eli DNBR:ta

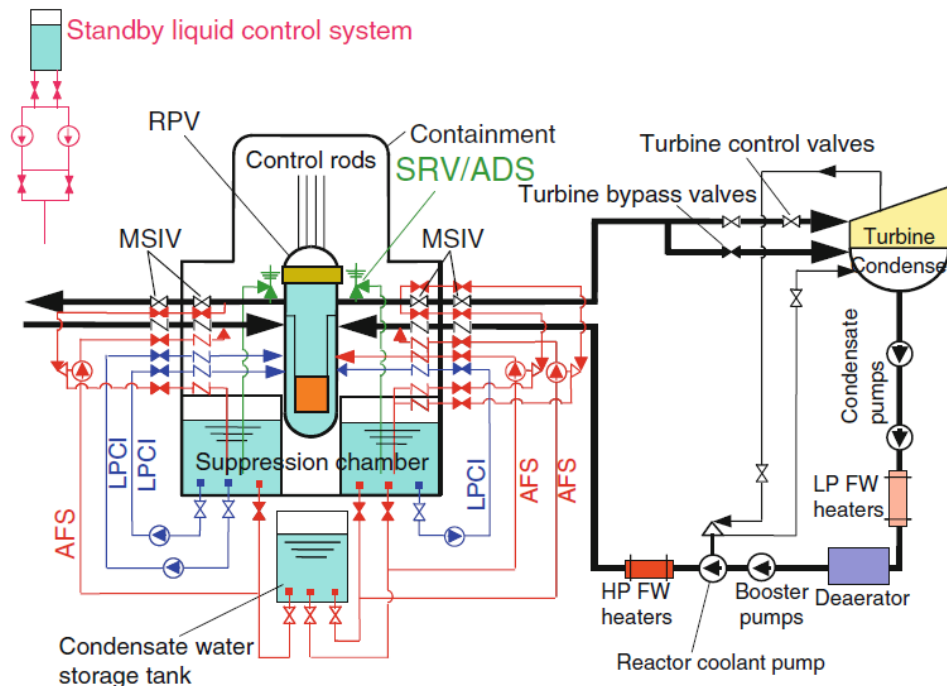
(Departure from Nucleate Boiling Ratio) ole. Keskeisin arvioitava parametri Super LWR -laitoksen suunnittelussa onkin suojakuoren maksimilämpötila, jota ei saa ylittää missään reaktorisydämen kohdassa. (Oka et al. 2010, 184)

Lämmönsiirron heikkeneminen ylikriittisillä paineilla ei ole yhtä voimakasta kuin alikriittisillä paineilla tapahtuva kiehumiskriisi, eli DNB (Departure from Nucleate Boiling). Laitoksen käynnistyksen aikana sekä häiriö- ja onnettomuustilanteissa voidaan havaita vähäistä lämmönsiirron heikkenemistä, joka on kuitenkin riittämätöntä aiheuttamaan pinnan lämpötilan välitöntä jyrkkää nousua. Täten häiriötilanteissa tapahtuva lämmönsiirron heikkeneminen voidaan sallia niin, että polttoaineen eheys säilytetään. (Oka et al. 2010, 82)

5.1 Turvallisuusjärjestelmät

Tässä kappaleessa keskitytään vain aktiivisiin turvallisuusjärjestelmiin, sillä laitoksen tämän hetkinen toiminta on analysoitu vain käyttäen aktiivisia järjestelmiä. Super LWR -laitoksessa voidaan kuitenkin käyttää passiivisia turvallisuusjärjestelmiä, kuten paineakkuja, passiivista suojarakennusjäähdytystä, painovoimalla toimivaa hätäjäähdyteruiskutusta sekä eristyslauhduttimia. (Oka et al. 2010, 12)

Super LWR -laitoksen sydämen turvallisuusjärjestelmä ECCS (Emergency Core Cooling System) koostuu AFS-varasyöttövesijärjestelmästä (Auxiliary Feedwater System), LPCI-jäähdytesuihkutusjärjestelmästä (Low-pressure Core Injection System) sekä automaattisesta paineenalennusjärjestelmä ADS:stä (Automatic Depressurization System). Kuvassa 15 on esitetty Super LWR -laitoksen turvallisuusjärjestelmät. (Oka et al. 2010, 350)



Kuva 15. Super LWR -laitos ja sen turvallisuusjärjestelmät. (Oka et al. 2014, 40)

5.1.1 Paineenhallintajärjestelmä

Jäähdytteen poistamista varten pääjäähdytelinjoihin on asennettu kahdeksan varoventtiiliä, joilla ADS pystyy säätämään linjan painetta, kuten BWR-laitoksissa (Tamiya et al. 2013, 130). BWR-laitoksissa ADS:n tarkoitus on alentaa järjestelmän painetta, jotta matalapaineinen hätäjäähdytys voisi toimia. Toisaalta Super LWR -laitoksessa läpivirtauskierron takia ADS-järjestelmän käynnistyminen ja täten reaktorin paineen aleneminen kiihdyttää jäähdytevirtausta ja jäähdyttää sydäntä tehokkaasti. Paineen alennus vähentää myös reaktiivisuutta ja täten reaktorin kriittisyyttä, jolloin myös teho automaattisesti laskee. ADS-järjestelmällä pidetään lisäksi auki jäähdytteen ulosmenoa silloin, kun pääjäähdytelinjan sulkuventtiilit ovat kiinni. Paineen alennuksen jälkeen sydäntä jäähdytetään LPCI-yksiköillä. (Oka et al. 2010, 353, 357)

5.1.2 Matalapaineinen hätäjäähdytys

Sydämen jäähdytykseen on käytössä kolme LPCI-yksikköä, joilla sydämeen saadaan tuotua alhaisemmassa paineessa olevaa jäähdytettä, kun normaalia jäähdytevirtausta ei

ole. Yhden yksikön kapasiteetti on 12 % nimellisjäähdytevirrasta, jolloin polttoainesauvojen suojakuoren lämpötila saadaan pidettyä hyvin raja-arvojen alapuolella. Lämpötila pysyy myös hallinnassa, vaikka yksi yksiköistä ei toimisikaan.

LPCI-yksiköiden sähkönsaanti on varmistettu hätädieselgeneraattoreilla, jotka tuottavat vaaditun sähkön yksiköiden ajamiseen, jos laitoksen ulkopuolinen sähkönsaanti on menetetty. LPCI-yksiköillä hoidetaan myös jälkilämmön poisto esimerkiksi reaktoria sammutettaessa ja sammutuksen jälkeen. Niiden tarkoituksena on lisäksi toimia hätävarana AFS:lle. (Tamiya et al. 2013, 130)

5.1.3 Varasyöttövesijärjestelmä

AFS-yksiköt puolestaan toimivat hätävarana sähkömoottorikäyttöisille varajäähdytepumpuille. Yhden AFS-yksikön kapasiteetti on 4 % nimellisjäähdytevirrasta, jolloin kahdella yksiköllä saavutetaan riittävä jälkilämmönpoisto tilanteessa, jossa jälkilämpöteho on 6 % nimellistehosta. Riittävän jäähdytevirran varmistamiseksi AFS-yksiköitä on laitoksessa kolme ja ne toimivat ylikriittisessä paineessa. (Oka et al. 2010, 351, 352)

6 VERTAILU NYKYPÄIVÄN YDINVOIMALAITOKSIIN

Tässä kappaleessa vertaillaan Super LWR -laitosta nykypäivänä käytettyihin edistyneisiin kevytvesireaktoreihin. Vertailukohteina käytetään EPR-, AP1000-, (Advanced Passive) ABWR- sekä ESBWR-tyyppisiä (Economic Simplified Boiling Water Reactor) laitoksia.

Super LWR:n merkittävin ero nykypäivän laitoksiin on ylikriittisen veden käyttö jäähdytteenä ja tämän takia vähentynyt suurten voimalaitoskomponenttien, kuten höyrystinten tai paineistimen tarve. Tämä ero laitosjärjestelmissä on esitetty aiemmin kuvassa 4. Jäähdytteen paine- ja lämpötilatasot ovat huomattavasti korkeammat kuin tavallisilla paine- ja kiehutusvesireaktoreilla. Taulukossa 3 on esitetty eri reaktorien painetasot, massavirrat sekä jäähdytteen sisääntulo- ja poistolämpötilat.

Taulukko 3. Eri reaktorityyppien sähköteho sekä jäähdytteen ominaisuuksia. (GE-Hitachi 2007; TVO; Oka et al. 2010, 19; IAEA)

	Super LWR	EPR	ABWR	AP1000	ESBWR
Sähköteho [MW]	1200	1600	1350	1200	1600
Paine [MPa]	25	15,5	7,2	15,5	7,17
Jäähdytteen sisääntulolämpötila [°C]	280	296	269	279,4	276,2
Jäähdytteen poistolämpötila [°C]	500	329	286	324,7	287,7
Massavirta [kg/s]	1418	23135	14400	14300	9570

Jäähdytteen lämpötilan ja entalpian nousu on merkittävästi isompi Super LWR:ssa, minkä takia tarvittava massavirta on hyvin pieni muihin laitoksiin verrattuna. Täten myös pääkiertopumppujen määräksi riittää vain kaksi. Pääkiertopumppujen lukumäärät sekä muita ominaisuuksia on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Eri laitostyyppien valittuja ominaisuuksia. (Oka et al. 2010, 223; NRC; GE 2007; Westinghouse Electric Co. 2003)

	Super LWR	EPR	ABWR	AP1000	ESBWR
Terminen hyötysuhde [%]	44	37	34,5	32	34
Reaktoripaineastian massa [t]	750	526	910	417	853
Suojarakennuksen tilavuus [m ³]	7900	80000	17000	58333	12638
Päähöyrylinjojen määrä	2	4	4	2	4
Turbiinin pyörimisnopeus [rpm]	3000	1500	1500	1500	1500
Lauhduttimien lukumäärä	2	3	3	3	3
Pääkiertopumppujen lukumäärä	2	4	3	4	4

Laitoksien suojarakennuksien ko'oissa on huomattavia eroja, mikä on aiemmin esitetty kuvassa 6. Suojarakennuksen tilavuus on paineistettua suojarakennusta käytettäessä Super LWR:ssa huomattavasti pienempi kuin muissa. Modernien ABWR:ien suojarakennus on joka tapauksessa suunnittelultaan oleellisesti samanlainen kuin Super LWR:ssa. ABWR:n suojarakennuksen suurempi koko johtuu käytännössä suuremmasta reaktoripaineastiasta sekä suuremmasta tarvittavasta jäähdytevarastosta.

Terminen hyötysuhde on jäähdytteen korkeamman lämpötilatason takia Super LWR:ssa seitsemän prosenttiyksikköä korkeampi kuin EPR:ssa, joka omaa nykypäivän reaktoreista korkeimman hyötysuhteen. Hyötysuhde pysyy Super LWR:ssa kuitenkin merkittävästi muita korkeampana, vaikka jäähdytteen poistolämpötilaa alennettaisiin 380 °C:een. (Oka et al. 2010, 90)

Reaktorisydämen osalta Super LWR on melko samankaltainen kuin muut vertailun laitokset, ollen kooltaan hyvin samanlainen kuin EPR. Polttoaineena Super LWR:ssa käytetään muiden laitosten tapaan uraanidioksidia, jonka rikastusaste on kuitenkin parin prosenttiyksikön verran korkeampaa. Tämä johtuu pääosin Super LWR:ssa käytettävästä suojakuorimateriaalista, joka absorboi neutroneja tehokkaammin kuin tyypillisesti käytettävät zirkoniumpohjaiset metalliseokset. Reaktorisydämen ominaisuuksia eri laitoksille on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Eri laitostyyppien reaktorisydämen ominaisuuksia. (Oka et al. 2014, 36; IAEA; TVO; GE 2017; NRC)

	Super LWR	EPR	ABWR	AP1000	ESBWR
Sydämen aktiivisen osan korkeus [mm]	4200	4200	3810	4267	3048
Sydämen ekvivalenttihalkaisija [mm]	3730	3767	5163	3040	5880
Keskimääräinen lineaariteho [kW/m]	18	16,67	13,3	18,7	15,1
Polttoaine	UO ₂	UO ₂	UO ₂	UO ₂	UO ₂
Keskimääräinen rikastusaste [%]	7,31	4,95	4,2	4,8	4,2
Polttoaineniippujen lukumäärä	129	241	872	157	1132
Polttoainesauvojen lukumäärä nipussa	348/384	265	92	264	92

Super LWR:n pääturvallisuusjärjestelmät ovat melko samankaltaisia ABWR:n kanssa. Super LWR -laitoksessa käytettävien LPCI:n ja AFS:n kokoonpano pohjautuukin ABWR-laitoksiin. Molempien laitosten korkea- ja matalapaineiset hätäjärjestelmät koostuvat kolmesta yksiköstä. Myös monessa muussa Super LWR:n turvallisuusjärjestelmässä parametreja määritetään ja arvioidaan pohjautuen ABWR:n turvallisuusanalyysiin. Esimerkiksi reaktorin kylmäsammutukseen tarvittava booripitoisuus ja vesisäiliön tilavuus on arvioitu hieman pienemmäksi kuin ABWR:ssa. (Oka et al. 2010, 351, 352)

Super LWR -laitoksen turvallisuusanalyysiin ei ole sisällytetty passiivisia turvallisuusjärjestelmiä, joihin monen nykyaikaisen ydinvoimalaitoksen, kuten ESBWR:n ja AP1000:n turvallisuus ensisijaisesti perustuu. Näitä systeemeitä on kuitenkin mahdollista käyttää myös Super LWR:ssa. (Oka et al. 2014, 12)

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Super LWR:n kuten muidenkin SCWR:ien rakentamiseen ja toimintaan vaadittavasta tekniikasta suuri osa on jo olemassa tavanomaisista kevytvesireaktoreista sekä ylikriittisistä tavanomaisista voimalaitoksista. Yleisesti ottaen kaikista GIF:n valitsemista neljännen sukupolven ydinvoimalaitoksista SCWR-tyyppiset reaktorit ovat tekniikaltaan lähimpänä nykyisiä kevytvesireaktoreita.

Ylikriittisen veden käytöstä johtuva laitokseen kompaktius sekä hyötysuhteen huomattava nousu verrattuna tavanomaisiin kevytvesireaktoreihin on jo varsin merkittävä askel eteenpäin ydinvoimaloiden kehityksessä. Nämä seikat tulevat myös todennäköisesti vaikuttamaan positiivisesti Super LWR -laitoksen taloudelliseen kannattavuuteen, sillä suuri osa laitoksen rakentamis- ja käyttöprosessista on jo tunnettua nykyisistä laitoksista. Toisaalta esimerkiksi polttoaineen korkeampi rikastusaste sekä reaktoripaineastian suurempi seinämäpaksuus tuovat laitokselle lisää hintaa.

Super LWR ei itse asiassa eroa tavanomaisista reaktoreista niin huomattavasti kuin jotkin muut neljännen sukupolven reaktorit. Esimerkiksi hätäjähdytys, ja muut turvallisuustoiminnot ovat melko samankaltaisia kuin nykypäivänä toiminnassa olevien laitoksien vastaavat järjestelmät. Super LWR:n turvallisuusjärjestelmiä on kuitenkin toistaiseksi analysoitu vain aktiivisten järjestelmien kannalta, ja toisaalta ylikriittisen veden käyttö jäähdytteenä sekä läpivirtaustyyppinen jäähdytekierto parantavat turvallisuutta joissakin häiriö- ja onnettomuustilanteissa.

Vaikkakin Super LWR on monessa suhteessa merkittävästi parempi kuin kolmannen sukupolven reaktorit, ei sitä tai muita SCWR-tyyppisiä laitoksia voi välttämättä kuitenkaan väittää täysin kehityksellisiksi. Toisaalta, SCWR-laitokset ovat kuitenkin hyvin todennäköisesti ensimmäisiä neljännen sukupolven toteutuskelpoisia ydinvoimalaitoksia, sillä esimerkiksi Super LWR:n toiminta on jo erittäin kattavasti analysoitu, vaikkakin lämmönsiirtoon ylikriittisellä vedellä liittyy vielä joitakin kysymyksiä.

8 YHTEENVETO

Tässä työssä selvitettiin, miten Super LWR -laitos toimii ja miten se eroaa nykypäivän edistyneistä ydinvoimalaitoksista. Ylikriittistä vettä jäähdytteenä käyttäviä ydinvoimalaitoksia on tutkittu jo pitkään ja teknisesti näiden kehitys on ollut mahdollista, vaikkakin taloudellisesti kannattamatonta, jo pitkään. Super LWR:ssa suurena eroavaisuutena tavanomaisiin kevytvesireaktoreihin onkin ylikriittisen veden käyttö jäähdytteenä, jolloin vesi pysyy vain yhdessä, ylikriittisessä faasissa. Näin ollen jäähdytteen kiehumista ei reaktorissa tapahdu.

Ylikriittisen veden käytön takia voidaan monia tavanomaisten kevytvesireaktorien komponentteja karsia. Esimerkiksi höyrystimiä tai paineistinta ei Super LWR -laitoksessa tarvita lainkaan, mikä tekee laitoksesta verrattain kompaktin. Painecontroloitua suojarakennusta käytettäessä sen koko jää hyvin pieneksi, ja kuivatyyppisessä ratkaisussa voidaan suojarakennuksen sisälle sijoittaa myös korkea- ja välipaineturbiini.

Super LWR:n reaktoripaineastia on läpivirtaustyyppinen, jolloin koko jäähdytevirtaus kulkee vain kerran reaktorisydämen läpi. Jäähdyte myös lämpenee reaktorissa huomattavasti enemmän kuin tavanomaisissa kevytvesireaktoreissa, minkä takia tarvittava jäähdytevirta on merkittävästi pienempi. Suuremman lämpötilan ja paineen vuoksi ei Super LWR:ssa voida polttoaineen suojakuorena käyttää zirkoniumpohjaisia materiaaleja, vaan käyttöön valitaan todennäköisesti jokin ruostumaton teräs. Tämän takia polttoaineen rikastusaste on muutaman prosenttiyksikön korkeampaa kuin normaaleissa kevytvesireaktoreissa.

Tavanomaisista reaktoreista poiketen Super LWR -laitoksessa keskeisenä turvallisuusperiaatteena on jatkuvan jäähdytevirran ylläpitäminen reaktoriin. Häiriö- ja onnettomuustilanteissa tähän käytetään ensisijaisesti aktiivisia turvallisuusjärjestelmiä, joita ovat varasyöttövesijärjestelmä, matalapaineinen hätäjäähdytys sekä automaattinen paineenhallintajärjestelmä. Nämä järjestelmät eivät kuitenkaan eroa merkittävästi nykyisistä ydinvoimalaitoksien turvallisuusjärjestelmistä.

Lähdeluettelo

Cheng et al. 2009. A simplified method for heat transfer prediction of supercritical fluids in circular tubes. *Annals of Nuclear Energy*, 36, s. 1120-1128.

GE Hitachi Nuclear Energy. 2007. The ABWR Plant General Description. Viitattu: 5.4.2019. Saatavissa: https://nuclear.gewater.com/content/dam/gewater-nuclear/global/en_US/documents/ABWR%20General%20Description%20Book.pdf

GE Hitachi Nuclear Energy. 2011. The ESBWR Plant General Description. Viitattu: 6.4.2019. Saatavissa: https://nuclear.gewater.com/content/dam/gewater-nuclear/global/en_US/documents/ESBWR_General%20Description%20Book.pdf

Generation IV International Forum (GIF). 2017. Annual report. Viitattu: 10.4.2019. Saatavissa: https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2018-09/gif_annual_report_2017_210918.pdf

Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd. UK ABWR Generic Design Assessment. Viitattu: 25.2.2019. Saatavissa: <http://www.hitachi-hgne-uk-abwr.co.uk/downloads/2017-12-14/UKABWR-GA91-9101-0101-28000-RevC-PB.pdf>

IAEA ARIS, 2011. Status report 100 – Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR). Viitattu: 6.4.2019. Saatavissa: <https://aris.iaea.org/PDF/ESBWR.pdf>

IAEA ARIS, 2011. Status report 78 – The Evolutionary Power Reactor (EPR). Viitattu: 8.4.2019. Saatavissa: <https://aris.iaea.org/pdf/epr.pdf>

IAEA ARIS, 2011. Status report 81 – Advanced Passive PWR (AP 1000). Viitattu: 5.4.2019. Saatavissa: <https://aris.iaea.org/pdf/ap1000.pdf>

Ishiwatari et al. 2005. Safety of Super LWR. (I) Safety System Design. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 42, s. 927-934.

Kelly John. 2014. Generation IV International Forum: A decade of progress through international cooperation. *Progress in Nuclear Energy*, 77, s. 240-246.

Leung Laurence. 2017. Super-Critical Water-Cooled Reactors. Viitattu: 25.3.2019.
Saatavilla: https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2017-04/geniv_template_laurence_leung_final.pdf

Oka et al. 2010. Super Light Water Reactors and Super Fast Reactors. Springer. ISBN 978-1-4419-6034-4. e- ISBN 978-1-4419-6035-1.

Oka Yoshiaki, Mori Hideo. 2014. Supercritical-Pressure Light Water Cooled Reactors. Japani. Springer. ISBN 978-4-431-55024-2. e-ISBN 978-4-431-55025-9

Pioro Igor. 2011. Introduction and historical development of SCWR.

Pioro Igor, Mokry Sarah. 2011. Thermophysical Properties at Critical and Supercritical Conditions. Heat Transfer – Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems, s. 573-592. ISBN: 978-953-307-226-5.

Pizzarelli Marco. 2018. The status of the research on the heat transfer deterioration in supercritical fluids: A review. International Communications in Heat and Mass Transfer, 95, s. 132-138.

Squarer et al. 2003. High performance light water reactor. Nuclear Engineering and Design, 221, s. 167-180.

Starflinger et al. 2011. HPLWR Public Final Activity Report. Viitattu: 25.1.2019
Saatavissa: https://cordis.europa.eu/publication/rcn/13342_en.html

Teollisuuden Voima Oyj. Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3. Viitattu: 01.04.2019
Saatavissa:
https://www.tvo.fi/uploads/julkaisut/tiedostot/ydinvoimalayks_OL3_ENG.pdf

United States Nuclear Regulatory Commission. Westinghouse AP1000 Design Control Document Rev. 19 Tier 2 Chapter 5 Reactor Coolant System and Connected Systems. Viitattu: 5.4.2019. Saatavissa: <https://www.nrc.gov/docs/ML1100/ML110030065.pdf>

United States Nuclear Regulatory Commission (NRC). Westinghouse AP1000 Design Control Document Rev. 16 Tier 2 Chapter 4 - Reactor. Viitattu: 5.4.2019. Saatavissa: <https://www.nrc.gov/docs/ML0715/ML071580895.pdf>

Westinghouse Electric Co., LLC. 2003. The Westinghouse AP1000 Advanced Nuclear Plant: Viitattu: 5.4.2019. Saatavissa: <http://www.apcnean.org.ar/arch/3e139fc91ebe2e675db2194460badc7c.pdf>

World Nuclear Association, 2017. Nuclear Power Economics and Project Structuring. Viitattu 25.3.2019. Saatavissa: http://www.world-nuclear.org/getmedia/84082691-786c-414f-8178-a26be866d8da/REPORT_Economics_Report_2017.pdf.aspx.

Yeh Sonia, Rubin Edward, 2007. A centurial history of technological change and learning curves for pulverized coal-fired utility boilers. *Energy*, 32, 1996-2005