

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

**Laitostyyppin EPR keskeiset piirteet ja  
erityisominaisuudet**

The Main Characteristics and Specific Features of EPR  
Nuclear Power Plant

Työn ohjaaja: Heikki Suikkanen

Lappeenranta 22.10.2020

Jenna Ojala

# TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Jenna Ojala

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Heikki Suikkanen

Numeroituja sivuja 35, kuvia 6, taulukoita 2, liitteitä 2

Hakusanat: EPR, PWR, ydinvoima

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan eurooppalaista painevesireaktoria eli EPR-mallista reaktoria. EPR-laitoksia on maailmassa viisi, joista kaksi ovat käynnissä Kiinassa, kaksi ovat rakennusvaiheessa, joista toinen on Ranskassa ja toinen Suomessa, ja yhden rakentaminen on vielä alkutekijöissään Iso-Britanniassa.

Työssä selitetään lyhyesti fission hyödyntäminen ja painevesireaktorin toimintaperiaatteet. Lisäksi selvitetään hieman ydinvoiman historiaa, ja käydään tiivistetysti läpi ydinvoima-alan ja eritoten painevesireaktorin kehitystä ensimmäisen sukupolven reaktorimalleista neljanteen.

Työn pääasiallisena tarkoituksena on selvittää EPR-laitostyyppin primääri- ja sekundääripiirin pääkomponentteja ja niiden ominaisuuksia. Niiden lisäksi käydään läpi kyseiselle laitosmallille tyypillisten turvallisuusjärjestelmien toimintaa ja piirteitä.

Lopuksi työssä kerrotaan lyhyesti APR1400-, AP100-, CAP1400- ja VVER-1200-laitoksista, jotka ovat muita tunnetuimpia kolmannen sukupolven kevytvesijäähdytteisiä painevesireaktoreja, ja vertaillaan niiden suurimpia eroavaisuuksia EPR-mallisiin laitoksiin.

# SISÄLLYSLUETTELO

## Tiivistelmä

## Sisällysluettelo

<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>5</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>7</b>
<b>2 Painevesireaktori</b>	<b>8</b>
2.1 Pääpiirteet.....	8
2.2 Ydinvoiman alku .....	9
2.3 Painevesireaktorin kehitys.....	10
<b>3 Reaktori ja primääripiiri</b>	<b>12</b>
3.1 Reaktorisydän.....	13
3.2 Paineastia.....	13
3.3 Paineistin .....	14
3.4 Pääkiertopumput.....	15
3.5 Höyrystimet ja esilämmittimet .....	15
<b>4 Sekundääripiiri ja voimalaitosprosessi</b>	<b>16</b>
4.1 Kosteudenerotinvälitulistimet .....	17
4.2 Merivesilauhdutin.....	17
4.3 Esilämmitin ja syöttövesijärjestelmä.....	17
4.4 Turbiinigeneraattori.....	18
<b>5 Turvallisuusjärjestelmät</b>	<b>19</b>
5.1 Primääripiirin jäähdytys ja tiiveys.....	20
5.2 Suojarakennus ja sydänsulasieppari .....	22
5.3 Vetyrekombinaattorit.....	24
<b>6 Vertailu 3. sukupolven PWR-laitosten välillä</b>	<b>25</b>
6.1 APR1400 .....	25
6.2 AP1000 ja CAP1400 .....	26
6.3 VVER-1200.....	28

<b>7 Johtopäätökset</b>	<b>29</b>
<b>8 Yhteenveto</b>	<b>30</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>32</b>

**Liite I, Olkiluoto 3 teknisiä ominaisuuksia**

**Liite II, US-EPR prosessikaavio**

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

A	pinta-ala	$m^2$
P	teho	MW, MWth, MWe
p	paine	atm, bar
$q_m$	massavirta	kg/s
$q_v$	tilavuusvirta	$m^3/s$
S	näennäisteho	VA
T	lämpötila	$^{\circ}C$
V	tilavuus	$m^3$
-	massaprosentti	m-%

### Lyhenteet

BWR	Boiling Water Reactor, kiehutusvesireaktori
CVCS	Chemical and Volume Control System, puhdistus- ja tilavuudensäätöjärjestelmä
EBS	Extra Boration System, lisäboorausjärjestelmä
ECCS	Emergency Core Cooling Systems, ytimen hätäjähdytysjärjestelmä
EPR	European Pressurized Water Reactor, eurooppalainen painevesireaktori
IRWST	In-containment Refueling Water Storage Tank, suojarakennuksen sisäinen hätäjähdytysvesiallas
LOCA	Loss of Coolant Accident, jäähdytteenmenetyssonnettomuus

LWGR	Light Water cooled Graphite moderated Reactor, kevytvesijäähdytteinen grafiittireaktori
MOX	Mixed Oxide Fuel, sekaoksidipolttoaine
PAR	Passive Autocatalytic Recombiner, autokatalyyttinen rekombinaattori
PWR	Pressurized Water Reactor, painevesireaktori
RBMK	Reaktor Bolšoi Moštšnosti Kanalnyi, grafiittimoderoitu paineputkireaktori
SIS	Safety Injection System, turvallisuusruiskutusjärjestelmä
SSSS	Standstill Shaft Seal, seisonitatiiviste
VVER	Vodo-Vodjanoi Energetičeski Reaktor

# 1 JOHDANTO

Työssä selvitetään ydinreaktorityypin EPR, eli European Pressurized Water Reactor, toimintaa ja ominaisuuksia verrattuna muihin kolmannen reaktorisukupolven painevesireaktortyyppeihin.

European Pressurized Water Reactor, paremmin tunnettu lyhenteellä EPR, on ranskalais-saksalaissuunnitteinen III+-sukupolven painevesireaktori. EPR on suunniteltu ranskalaisen N4 Plus- ja saksalaisten REP2000- ja KONVOI-reaktorimallien pohjalta. Suunnittelua varten Siemens ja Framatome muodostivat Nuclear Power Internationalin (NPI) vuonna 1989, ja vuonna 1991 EDF (Électricité de France) ja moni saksalainen taho liittyivät suunnitteluun omien kehitysprojektiensa kanssa. Yhteistyön tavoitteena oli suunnitella reaktortyyppi, joka vastaisi sekä Ranskan että Saksan turvallisuusstandardeja ja olisi kilpailukykyinen muita energiantuotantomuotoja vastaan. (Vignon, 1999)

Ensimmäinen käyttöön otettu EPR-mallinen reaktori on sähköteholtaan 1750 MW Taishan 1 Kiinassa, joka aloitti kaupallisen tuotannon 13.12.2018. Samanmallinen Taishan 2 yhdistettiin Kiinan sähköverkkoon vuorostaan 28.6.2019 (World Nuclear News, 2019). Suomessa sijaitseva Olkiluoto 3 piti olla ensimmäinen valmistunut EPR, mutta projekti on viivästynyt useita kertoja sekä suunnittelu- että rakennusvaiheessa. Olkiluoto 3:n on suunniteltu käynnistävän säännöllisen sähköntuotannon helmikuussa 2022 (HS-STT, 2020). Ranskan Flamanville 3:n on suunniteltu aloittavan sähköntuotannon vuonna 2023, mutta kuten Olkiluodon projektissa, myös Flamanvillen rakennustyöt ovat kokeneet ongelmia ja viivästymisiä. Viimeisimpänä syynä aikatauluongelmiin on ollut koronapandemian lisäksi viranomaisten määräys korjata reaktorin suojarakennuksen vialliset hitsaukset ennen laitoksen käyttöönottoa (Reuters, 2020). Käynnissä olevien rakennusprojektien ongelmista ja kaikkien laitosten budjettiongelmista huolimatta Iso-Britanniaan suunnitellun Hinkley Point C:n rakentaminen aloitettiin joulukuussa 2018 (World Nuclear Association, 2019).

## 2 PAINEVESIREAKTORI

Ydinvoima perustuu fissioreaktioon, eli raskaan atomin ytimen halkeamiseen. Ydinvoimassa käytetään yleisesti isotoopin U-235 suhteen väkevöityä uraania ja termisiä neutroneja, jotka törmätessään uraaniatomin ytimeen aiheuttaa sen halkeamisen kahdeksi keskiraskaaksi atomiksi. Reaktiossa vapautuu paljon energiaa.

Käytössä olevia kaupallisia reaktoreja on maailmassa 442 kappaletta, joista 299 ovat kevytvesijäähdytteisiä painevesireaktoreita. Toiseksi yleisin tyyppi on kiehumusvesireaktori eli BWR, joita on käytössä 65. (IAEA, 2020)

### 2.1 Pääpiirteet

Painevesireaktoreilla on kaksi piiriä, joita kutsutaan primääripiiriksi ja sekundääripiiriksi. Primääripiiri käsittää reaktorin ja höyrystimet, ja sekundääripiiri turbiinit. Primääripiiri pidetään noin 150 atm paineessa paineistimien avulla, jolloin primääripiirin vesi pysyy nestemäisenä noin 325°C lämpötilassa (Breeze, 2014). Reaktorissa vesi kuumenee fissiosta vapautuvan energian johdosta, ja sieltä vesi kiertää höyrystimiin, joissa lämpö siirtyy primääripiiristä pienemmässä paineessa kiertävän sekundääripiirin veteen aiheuttaen sen höyrystymisen. Sekundääripiirissä vesihöyry kiertää korkeapaineturbiinille, jonka jälkeen höyry kuivataan, tulistetaan ja ohjataan matalapaineturbiineihin. Turbiinit pyörittävät generaattorin akselia synnyttäen sähköä. Turbiineilta vesi ohjataan lauhduttimeen, jossa höyry lauhtuu takaisin nestemäiseen muotoon ja kierto alkaa alusta.

Toinen yleinen reaktorityyppi on kiehumusvesireaktori eli BWR. Toisin kuin painevesireaktorissa, BWR-tyyppisessä reaktorissa on vain yksi piiri, jolloin vesi höyrystyy jo reaktorissa ja johdetaan sieltä turbiineille. Painevesireaktori on malliltaan monimutkaisempi, mutta säteilyturvallisuuden kannalta parempi sillä turbiineita pyörittävä höyry ei ole radioaktiivista kuten kiehumusvesireaktorissa.



## 2.2 Ydinvoiman alku

Raskaiden atomiydinten halkeamisreaktio eli fissio havaittiin ensimmäisen kerran vuonna 1939. Toinen maailmansota alkoi pian löydön julkaisemisen jälkeen, ja voimanlähteenä käyttämisen sijaan sitä pyrittiin hyödyntämään ydinpommin muodossa. Yhdysvalloissa toteutettu fissioreaktion tutkimus, koodinimeltään Manhattan-projekti, onnistuikin siinä. (Marcum & Spinrad, 2019)

Ensimmäinen itseään ylläpitävä fissioreaktio saavutettiin Enrico Fermin johdolla 2.12.1942 Chicagossa osana Manhattan-projektia. Testin reaktori, joka oli nimetty yksinkertaisesti Chicago Pile No. 1 (Chicago miilu nro. 1), oli puukehikon päälle kasattu grafiittitiilipino, jonka sisällä oli uraania ja cadmiumsauvoja, jotka toimivat neutroniabsorbaattoreina ja hidasteina (Atomic Heritage Foundation, 2016).



**Kuva 2.1.** Chicago miilu nro. 1 (Atomic Heritage Foundation, 2016)

Tutkimus fission käyttömahdollisuuksista jatkui sodan jälkeen sekä idässä että lännessä. Ensimmäiset reaktorit suunniteltiin sukellusveneiden voimanlähteeksi, ja ensimmäinen

ydinsukellusvene USS Nautilus vihittiin käyttöön vuonna 1955. Nautiluksessa oli käytössä S2W-mallinen kevytvesijäähdytteinen painevesireaktori, joka tuotti 10 MW akselitehoa. Seuraavaksi reaktoreita kehitettiin lentotukialusten ja Neuvostoliitossa myös jäänmurtajien voimanlähteiksi. Vuonna 1960 käyttöön vihitty lentotukialus USS Enterprise käytti kahdeksaa 26 MW akselitehoista Westinghousen A2W-mallista painevesireaktoria voimanlähteenä, ja Neuvostoliitossa vuonna 1959 käyttöönotettu jäänmurtaja Lenin kolmea 90 MW OK-150 reaktoria, jotka olivat nekin painevesireaktoreita. (World Nuclear Association, 2019)

Ensimmäinen kaupalliseen sähköntuotantoon tarkoitettu painevesireaktori saavutti kriittisyyden 2.12.1957 ja aloitti sähköntuotannon 26.4.1958 Shippingportin voimalaitoksessa Yhdysvalloissa. Reaktori oli Westinghousen suunnittelema, noin 60 MW sähkötehoa tuottava kaksihaarainen kevytvesireaktori. Reaktori oli käytössä lokakuuhun 1982 asti, tosin sitä muokattiin useasti vuosien varrella (Cummings, 2017).

### **2.3 Painevesireaktorin kehitys**

Niin kutsuttuja ensimmäisen sukupolven reaktoreita rakennettiin vuosien 1950-1970 välillä. Ensimmäiset painevesireaktorit olivat kahden piirin, suunnilleen 100 MW:in luokan reaktoreita (Cummings, 2017). Osa reaktoreista rakennettiin alun perin osana ydinaseohjelmaa, esimerkiksi entisessä Neuvostoliitossa yleisen RBMK-mallin edeltäjä LGWR suunniteltiin plutoniumin tuottoon, samoin Iso-Britanniassa kehitetyt kaasujäähdytteiset Magnox-reaktorit. Muita ensimmäisen sukupolven painevesireaktoreita ovat aikaiset VVER- ja CANDU-reaktorit.

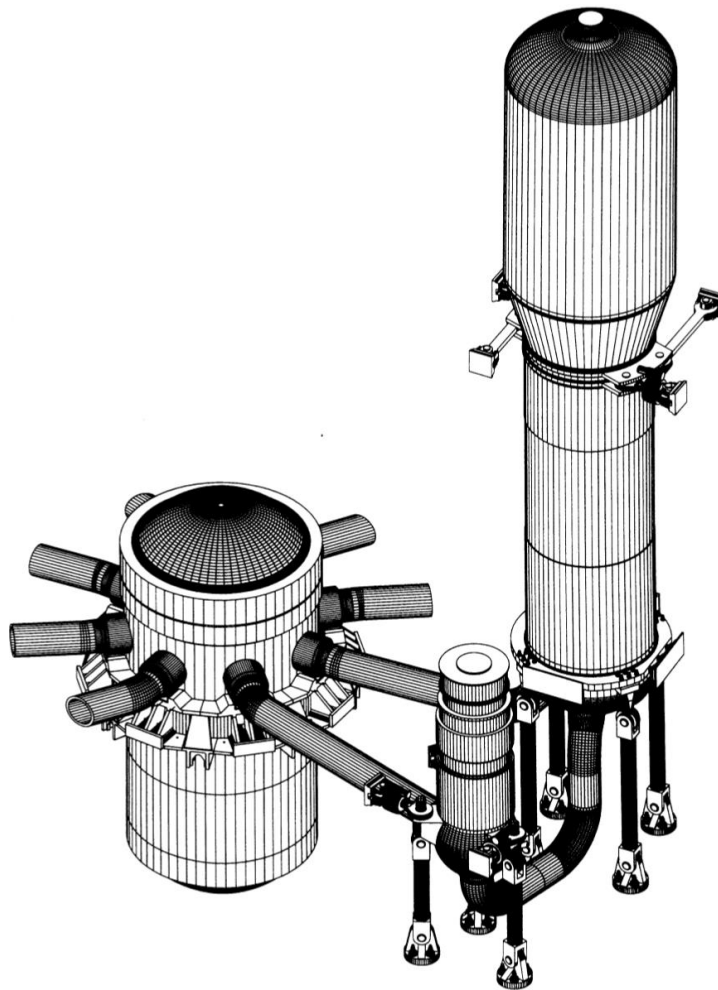
Suurin osa nykypäivän käyvistä ydinvoimalaitoksista on 1970-1990-luvuilla rakennettuja toisen sukupolven malleja. Kyseiset laitokset ovat pääasiassa paranneltuja versioita ensimmäisestä sukupolvesta, joihin on lisätty paljon aktiivisia järjestelmiä lisäämään laitosten turvallisuutta. Painevesireaktorien tehoa alettiin kasvattamaan lisäämällä piirejä, esimerkiksi jos Westinghousen painevesireaktoreissa yksi piiri tuottaa 300 MWe, niin kaksi tuottaa 600 MWe, kolme 900 MWe ja niin edelleen (Cummings, 2017).

Kolmannen ja III+-sukupolven reaktoreja on kehitetty 1990-luvulla ja niitä on alettu rakentamaan 2000-luvun alussa. Kolmannen sukupolven reaktoreissa on pyritty parantamaan turvallisuutta vielä toista sukupolvea enemmän, kuten lisäämällä passiivisia turvallisuusjärjestelmiä aktiivisten lisäksi. Passiiviset järjestelmät eivät tarvitse erillistä voimanlähdettä toimiakseen, minkä taas aktiiviset turvallisuusjärjestelmät vaativat (Marcum & Spinrad, 2019). Painevesireaktorien tehoa alettiin nostamaan kasvattamalla komponenttien kokoa, jolloin kaksipiirinenkin PWR saattoi tuottaa 1400 MWe, jos aikaisemmin nelipiirinen painevesireaktori tuotti 1200 MWe (Cummings, 2017).

Neljännän sukupolven reaktorit ovat yhä kehitysvaiheessa, mutta niitä saatetaan alkaa rakentaa seuraavalla vuosikymmenellä. Neljännän sukupolven reaktoreja ovat sulasuolareaktori, natrium-, kaasu- ja lyijyjäähdytteiset nopeat reaktorit, erittäin korkean lämpötilan reaktori ja ylikriittisellä vedellä jäähdytetty reaktori. Nopeilla reaktoreilla tarkoitetaan reaktoria, jossa fissiosta vapautuneita neutroneja ei hidasteta termisiksi. Lisäksi on alettu kehittämään modulaarisia eli pienkokoisia reaktoreja ydinsukellusveneissä käytettyjen reaktorien pohjalta. (World Nuclear Association, 2019)

### 3 REAKTORI JA PRIMÄÄRIPIIRI

Primääripiiri koostuu reaktorisydäimestä ja sen paineastiasta, johon yhdistyy neljä piiriä, joissa jokaisessa on yksi kuuma haara ja yksi kylmä. Kaikkiin piireihin kuuluu höyrystin ja pääkiertopumppu, kuten esitetty kuvassa 3.1, ja niiden lisäksi yhteen piiriin on liitetty paineistin, joka nimensä mukaisesti ylläpitää ja säätelee primääripiirin painetta. EPR:n primääripiirin suunnittelupaine on 176 bar ja käyttöpaine on 155 bar. Piirissä kiertävän jäähdytteenä toimivan kevytveden lämpötila reaktorin ulostulossa eli kuumassa haarassa on noin 328°C ja sisääntulo eli kylmän haaran lämpötila on noin 296°C. (TVO, 2010)



**Kuva 3.1.** Pääkomponentit; reaktori, pääkiertopumppu ja höyrystin (Quinot & Desfontaines, 1999)

### 3.1 Reaktorisydän

Reaktori on suunniteltu saavuttamaan korkea lämpöteho ja alhaiset polttoainekustannukset sekä olemaan joustava polttoainekierron ja laitoksen ohjattavuuden suhteen. Reaktorisydämen käyttöjakso voi vaihdella 12-24 kk riippuen käytetystä polttoaineesta. Polttoaineena on tarkoitettu käytettäväksi pääasiassa uraanidioksidia ( $\text{UO}_2$ ), mutta lisäksi on mahdollista käyttää 50 % MOX-polttoainetta. (Sengler et al., 1999)

Reaktorisydän koostuu 17x17-polttoainesauvamatriiseista, ja polttoainesauvoja on yhteensä 241 kappaletta. Polttoainesauvat on tehty zirkaloy-putkista, joiden sisällä on keraamisia polttoainepellettejä. Pelletit ovat noin 5 m-% rikastettua uraania ( $^{235}\text{U}$ ). Riippuen uraanin rikastusasteesta osassa sauvoista on myös 8-10 m-% gadoliniumia ( $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ) palavana absorbaattorina. MOX-polttoaineen tapauksessa pelletit ovat köyhdytettyä uraania, joissa plutonium on plutoniumoksidina ( $\text{PuO}_2$ ). Plutoniumin rikastusaste on tehdasrajoitusten vuoksi rajoitettu 7,44 m-% yhdessä polttoainesauvassa. (Sengler et al., 1999)

Sydäntä jäähdytetään ja säädellään booripitoisella vedellä. Boorihappo toimii neutroniabsorbaattorina, joten veden booripitoisuutta säädellään sydämen reaktiivisuuden ja lämpötilan vaihteluiden mukaan (Sengler et al., 1999). Nopeaa säätöä tarvittaessa käytetään säätösauvoja, jotka on valmistettu neutroneja absorboivista materiaaleista, pääasiassa hopeasta (Ag), indiumista (In), kadmiumista (Cd) ja boorikarbidista ( $\text{B}_4\text{C}$ ). Säätöelementtejä on 89 kappaletta, ja ne on suunniteltu toimimaan itsenäisesti toisistaan riippumatta. (TVO, 2010)

### 3.2 Paineastia

Paineastia on sylinteri, jossa on puolipallon muotoinen pohja, joka on hitsattu kiinni sylinteriin, ja puolipallon muotoinen kansi (Framatome ANP, 2005). Paineastia on valmistettu standardista mangaani-molybdeeni-nikkeli-metalliseoksesta (Mn-Mo-Ni), josta on pyritty poistamaan mahdollisimman paljon epäpuhtauksia. Suunniteltu käyttöikä

on 60 vuotta (Quinot & Desfontaines, 1999). Paineastian rakenteiden altistumista neutronisäteilylle on pyritty vähentämään minimoimalla paineastian hitsaussaumoja ja suurentamalla etäisyyttä putkiyhteiden ja reaktorisydämen välillä (TVO, 2010).

Sydämen ympärillä on neutroniheijastin, joka koostuu ruostumattomasta teräksestä valmistetuista, limittäin asetetuista metallilevyistä, jotka kiertävät ytimen tukilevyn ympärillä. Neutroniheijastin vähentää huomattavasti ulosmenevän neutronisäteilyn määrää, tasaa tehojakaumaa ja säästää polttoainekuluissa 3-5 %. Metallilevyissä on jäähdytyskanavia, jotka poistavat sydämen säteilystä aiheutuvaa lämpöä. (Quinot & Desfontaines, 1999)

### **3.3 Paineistin**

Piirin painetta ylläpidetään ja säädelään paineistimen avulla. Paineistimessa on sekä vettä että höyryä, ja kun halutaan nostaa primääripiirin painetta, niin veden lämpötilaa nostetaan paineistimen alaosissa olevien sähkövastusten avulla. Paineen pienentämistä varten höyryä ruiskutetaan paineistimesta erillisiin säiliöihin, joissa höyry kondensoituu vedeksi. Paineistimen avulla voidaan myös säädellä jäähdytteen määrää primääripiirissä (Framatome ANP, 2005).

EPR:n paineistin on tilavuudeltaan perinteistä suurempi, ja käyttöaikaa on pyritty pidentämään erottamalla kaksi normaalikäyttöön tarkoitettua ruiskutuslinjaa ja CVCS-järjestelmään yhdistetty apusuihkuputki toisistaan (Framatome ANP, 2005). Ruiskutuspäällä varustetut linjat on liitetty sivusuunnassa ylempään lieriömäiseen kuoreen. Ruiskutusjärjestelmän tarkoituksena on tuottaa jatkuva virtaus, mikä minimoi lämpösiirtymiä venttiilin nopean avaamisen yhteydessä. Paineistimet on valmistettu ferriittisestä teräksestä, jossa on lisäksi kaksi kerrosta ruostumatonta terästä. (Quinot & Desfontaines, 1999)

### 3.4 Pääkiertopumput

Pääkiertopumppuja on käytössä neljä kappaletta eli yksi jokaista haaraa kohden. Pumput ovat teholtaan 9 MW ja ovat hydrostaattisesti laakeroituja, mikä pienentää pumpun värinätasoa. Pumppujen moottorit ovat vuotosuojattuja häkkikäänitysmoottoreita, jotka voidaan huoltaa irrottamatta niitä pääkiertopumpuista. (TVO, 2010)

Pääkiertopumpuissa on kolme eri akselitiivistettä. Ensimmäinen on hydrostaattinen, keraamisesta piinitridistä valmistettu tiiviste, johon kohdistuu suurin painegradientti. Toinen on hydrodynaaminen tiiviste, joka toimii ensimmäisen tukena laitoksen alasajon ajan, jos ensimmäinen tiiviste vuotaa. Kolmas tiiviste on myös hydrodynaaminen, ja sen ainoa tarkoitus on varmistaa piirin tiiveys jäähdytteenmenetysonnettomuudessa (LOCA). (Framatome ANP, 2005)

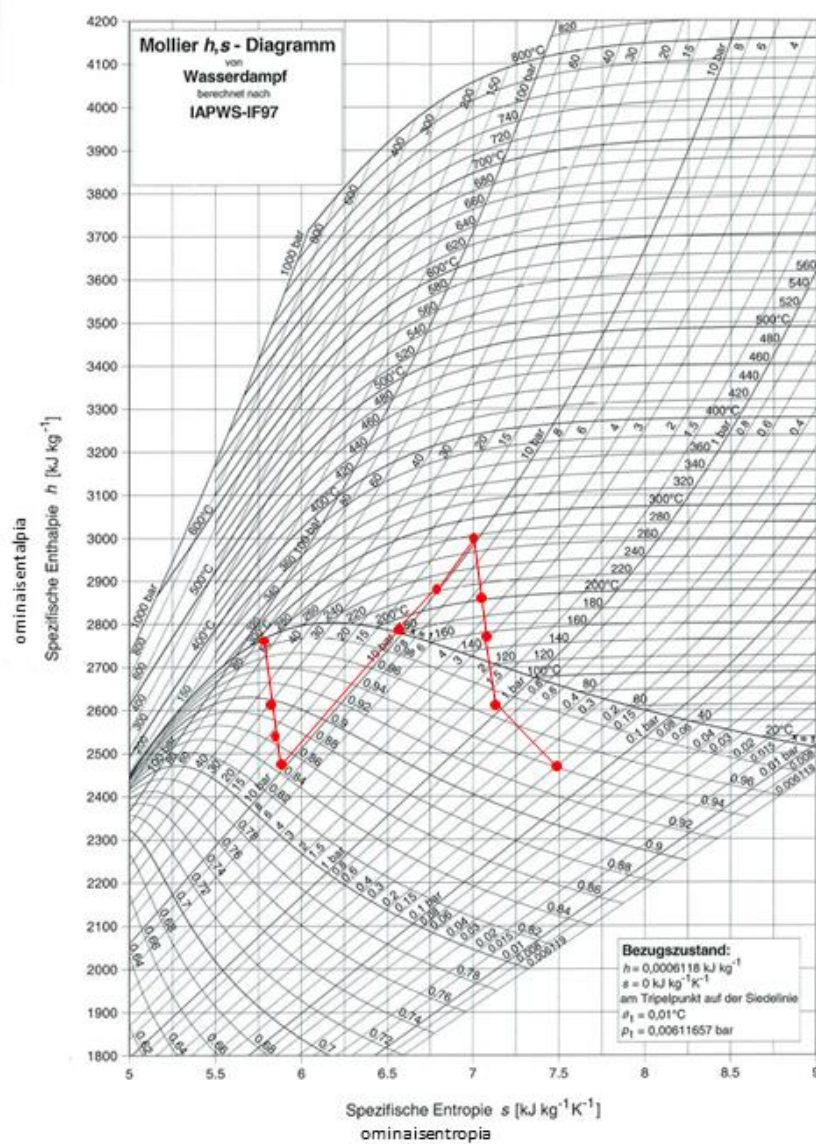
### 3.5 Höyrystimet ja esilämmittimet

Höyrystimet ovat U-putkityyppisiä pystylämmönvaihtimia. Hyötysuhdetta on pyritty parantamaan kasvattamalla lämmönvaihtopinta-alaa ja lisäämällä aksiaalinen esilämmitin. Putkiryhmä on tehty rasiitusta ja korroosiota kestävästä Incoloy 800 tai Inconel 690 metalliseoksesta (Quinot & Desfontaines, 1999). Turvallisuuden kasvattamiseksi höyrystimen vesitilavuutta on suurennettu verrattuna muihin saman kokoluokan lämmönvaihtimiin. Vesitilavuuden kasvattaminen lisää toiminta-aikaa onnettomuustilanteissa, joissa kaikki syöttövesijärjestelmät ovat pettäneet.

Aksiaalisessa esilämmittimessä kaikki sekundääripiirin syöttövesi ohjataan kylmään haaraan ja 90 % kierrätetystä vedestä ohjataan kuumaan haaraan, jolloin saadaan suurempi lämpötilaero primääripuolen sisään- ja ulostulon välillä. Esilämmittimen avulla voidaan saavuttaa 3 bar suurempi paine ulostulossa ja parantaa hyötysuhdetta verrattuna samankokoiseen lämmönvaihtimeen ilman esilämmitintä. (Quinot & Desfontaines, 1999)

## 4 SEKUNDÄÄRIPIIRI JA VOIMALAITOSPROSESSI

Sekundääripiiri koostuu höyrystimistä, korkea- ja matalapaineturbiineista, kosteudenerotinvälitulistimista, lauhdutinlohkoista, syöttövesijärjestelmästä ja esilämmittimistä. Suunnittelupaine on 100 bar ja päänhöyräpaine normaalissa käytössä on 78 bar. Toisin kuin primääripiiri, sekundääripiiri ei ole radioaktiivinen (TVO, 2010). Kuvassa 4.1 on esitetty sekundääripiirin paisuntakäyrä. Paisuntakäyrän tilapisteen on luettu US-EPR:n prosessikaaviosta, jonka näkee liitteestä II.



Kuva 4.1. EPR paisuntakäyrä



## **4.1 Kosteudenerotinvälitulistimet**

Korkeapaineturbiinin jälkeen höyry kuivataan ja tulistetaan kosteudenerotinvälitulistimissa kahdessa vaiheessa käyttämällä pientä osaa korkeapaineturbiinilta lähtevästä väliottohöyrystä ja päänhöyrylinjan tuorehöyrystä lämmitykseen. Kuivauksen ja tulistuksen jälkeen höyry johdetaan matalapaineturbiineille.

## **4.2 Merivesilauhdutin**

Matalapaineturbiineilta poistuva höyry johdetaan merilauhdutinlohkoihin, jossa höyry lauhtuu takaisin vedeksi. Merilauhdutinlohkoja on kolme, jotka on valmistettu titaanista, mikä kestää hyvin merivedestä johtuvaa korroosiota. Jäähdyttimenä toimiva merivesi lämpenee lauhduttimessa noin 12°C. Merivesilauhdutin lauhduttaa myös turbiinin ohitushöyryjärjestelmän höyryä. (TVO, 2010)

Lauhdutinlohkoista lauhde pumpataan esilämmityksen jälkeen syöttövesisäiliöön. Päälahdepumppuja on käytössä kaksi, ja kolmatta pidetään varalla. Kyseinen päälahdejärjestelmä sisältää lisäksi mekaanisen puhdistusjärjestelmän. (TVO, 2010)

## **4.3 Esilämmitin ja syöttövesijärjestelmä**

Syöttövesisäiliön jälkeen vettä kuumennetaan kahdessa rinnakkaisessa, kolmivaiheisessa esilämmittimessä, joissa kahdessa ensimmäisessä vaiheessa käytetään korkeapaineturbiinilta tulevaa höyryä ja kolmannessa välitulistimessa käytettyä höyryä, ja näin esilämmitin toimii myös välitulistinhöyryn jäähdyttimenä. Esilämmittimen läpi tullut vesi pumpataan turvallisuusjärjestelmärakennuksissa olevien syöttövesiventtiilien kautta höyrystimiin. Syöttövesipumppuja on käytössä kolme ja neljäs on varalla. (TVO, 2010)

Normaalin käytön aikana syöttövesijärjestelmä säätelee höyrystimille virtaavan veden määrää. Onnettomuustilanteessa järjestelmän tehtävä on havaita mahdollinen vuoto

primääripiiristä sekundääripiiriin, ja eristää vuotava höyrystin ja näin estää radioaktiivisuuden leviäminen sekundääripiirissä. Syöttövesijärjestelmä toimii tarvittaessa myös primääripiiriin jäähdyttäjänä höyrystimien kautta, ja sillä voidaan ylläpitää höyrystimien painetta tilanteessa, jossa primääripiirissä olevaa vuotoa ei voida eristää. (Framatome ANP, 2005)

#### **4.4 Turbiinigeneraattori**

Turbiineja on yhteensä neljä kappaletta, yksi korkeapaineturbiini ja kolme matalapaineturbiinia. Olkiluodossa on käytössä Siemensin turbiinigeneraattoriyhdistelmä (TVO, 2010), kun taas Flamanvillessä ja Taishanissa on GEmotorsin (entinen Alstom) Arabelle-malliset turbiinigeneraattoriyhdistelmät, joiden tehot ovat 1750 MWe ja 1755 MWe (GE, 2015).

Siemensin turbiinigeneraattoriyhdistelmän generaattori perustuu Konvoi-malliseen generaattoriin, joita on ollut käytössä useissa ydinvoimalaitoksissa. Uudempi EPR-laitokseen suunniteltu generaattorimalli on nelinapainen, ja roottorit jäähdytetään vedyllä. Staattorien käämit ja roottoreilta tuleva vety jäähdytetään vuorostaan vedellä. (Struken et al, 2010)

## 5 TURVALLISUUSJÄRJESTELMÄT

Laitoksen suunnittelussa turvallisuus on ollut suuressa roolissa, ja on pyritty nelitasoiseen turvallisuuskonseptiin, joka on esitetty taulukossa 5.1. Työntekijöiden vuosittainen säteilyannos on pyritty rajoittamaan 0,75 manSv/a (Czech et al., 1999).

**Taulukko 5.1.** Syvyysuuntainen puolustus (Czech et al., 1999)

Syvyyspuolustus	Tavoite	Keskeiset keinot
Taso 1	Normaalista toiminnasta poikkeamisen estäminen	Huolellinen suunnittelu ja korkea laatu rakentamisessa ja toiminnassa
Taso 2	Normaalista toiminnasta poikkeamisen hallinta ja virheiden havaitseminen	Valvonta, hallinta ja rajoitusjärjestelmät
Taso 3	Onnettomuuksien hallinta, vakavien onnettomuuksien estäminen	Turvallisuusjärjestelmät ja onnettomuusmenettelyt
Taso 4	Suojarakennuksen eheyden säilyttäminen ja vakavien onnettomuuksien hallinta	Vakavan onnettomuuden ominaisuudet ja menettelyt

EPR:ssä on käytössä neljä rinnakkaista turvallisuusosajärjestelmää, joista jokainen pystyy yksinään jähdyttämään reaktorin. Kaksi osajärjestelmää sijaitsee reaktorin suojarakennuksessa, ja kaksi on omissa rakennuksissaan, jotka reaktorin suojarakennuksen tavoin kestävät ulkoisen räjähdysten ja lentokoneen törmäyksen. Jokaisessa osajärjestelmässä on hätäjähdytys-, jälkilämmönpoisto-, ja hätäsyöttövesijärjestelmä sekä niihin liittyvät sähkö- ja automaatiojärjestelmät. (TVO, 2010)

## 5.1 Primääripiirin jäädytys ja tiiveys

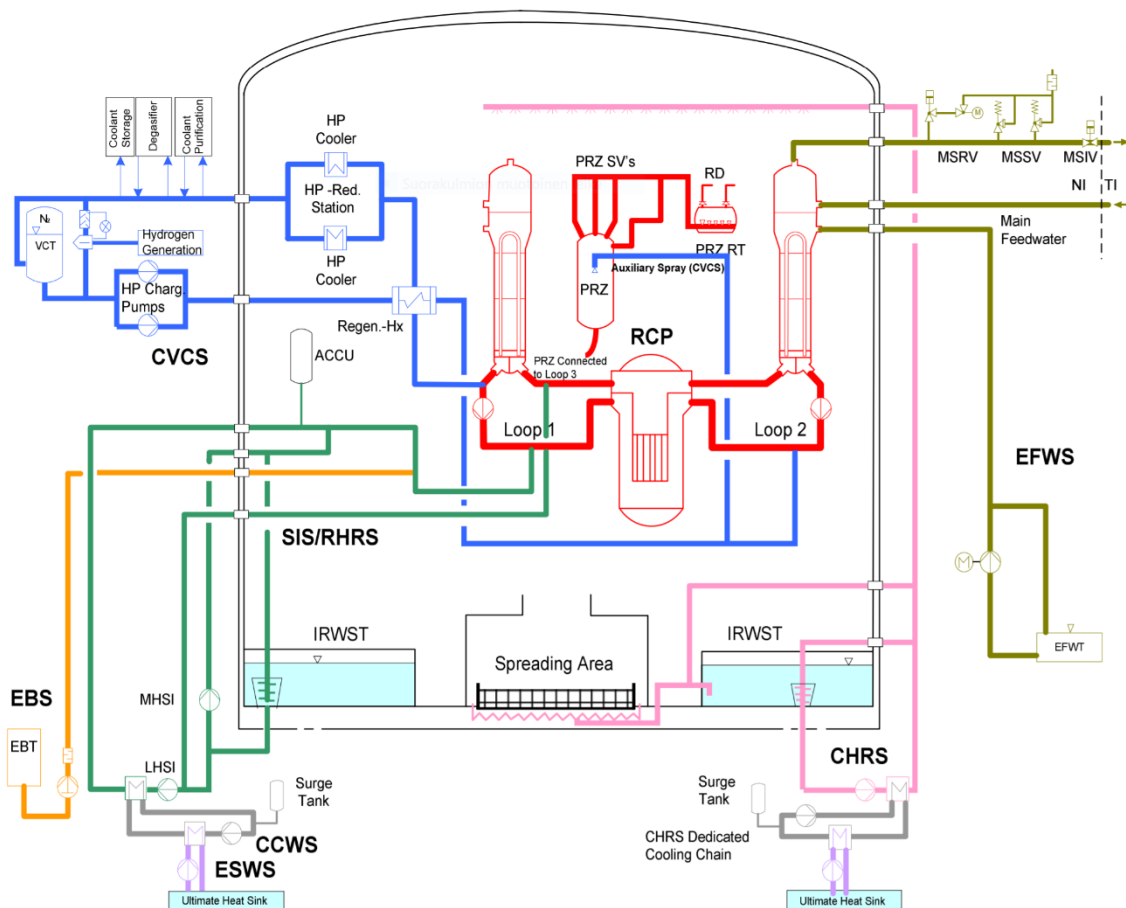
Hätäjäähdytysjärjestelmä koostuu mm. suojarakennuksen sisällä olevasta suojarakennuksen sisäisestä hätäjäähdytysvesialtaasta (IRWST), tyypellä paineistetuista paineakuista ja matala- ja keskipaineisesta hätäjäähdytysjärjestelmästä (LHSI ja MHSI). Muista laitoksista poiketen EPR:n turvallisuusjärjestelmiin ei kuulu korkeapaineista hätäjäähdytysjärjestelmää (U.S NRC, 2007). Hätäjäähdytysjärjestelmiä on yksi jokaista primääripiirin haaraa kohti, ja järjestelmät on sijoitettu omiin rakennuksiinsa (TVO, 2010). Hätäjäähdytysjärjestelmä on esitetty kuvassa 5.1.

Suojarakennuksen sisäisen hätäjäähdytysaltaan vedellä täytetään polttoaineallas latauksen aikana, ja vettä käytetään suojarakennuksen ja sydämen jäädytykseen onnettomuuden sattuessa. Matala- ja keskipaineisen järjestelmän pumput pumppaavat vettä hätäjäähdytysaltaasta primääripiirin kylmään haaraan, ja jäädytteenmenetysonnettomuudessa matalapaineinen hätäjäähdytysjärjestelmä voidaan yhdistää kuumaan haaraan, jolloin sydämen booripitoisuus ei pääse kasvamaan liian suureksi. (U.S NRC, 2007)

Jälkilämmönpoisto voidaan toteuttaa johtamalla lämpö höyrystimien kautta sekundääripiiriin ja sieltä lauhduttimiin. Vaihtoehtoisesti lämpöä voidaan poistaa myös puhaltamalla sekundääripiirin puhdasta höyryä ulospuhallusventtiilien kautta ulos. Laitoksen käynnin aikana käytetään syöttövesijärjestelmää (MFWS) ja onnettomuustilanteessa hätäsyöttövesijärjestelmää (EFWS). Hätäsyöttövesijärjestelmässä on hätäsyöttöpumput jokaista primääripiirin haaraa kohti, ja jokainen pumppu on lisäksi erillisessä turvallisuusjärjestelmärakennuksessa, ja käyttää samassa rakennuksessa olevan hätäsyöttövesitankin vettä. Tilanteessa, jossa sekundääripiirin jäädytys menetetään, otetaan käyttöön keski- ja matalapaineiset hätäjäähdytyspumput, joilla pumpataan lisävettä primääripiiriin (TVO, 2010). Komponenttien jäädytysjärjestelmä (CCWS) varmistaa hätäjäähdytysjärjestelmän eri komponenttien, kuten polttoainealtaan ja turvallisuusruiskutusjärjestelmän jäädytyksen. (Framatome ANP, 2005)

Primääriveden puhdistus- ja tilavuudensäätöjärjestelmä (CVCS) puhdistaa primääripiirin vedestä korroosio- ja fissiotuotteita, säätelee booritasoa ja kompensoi veden tilavuuden muutoksia lisäämällä tai vähentämällä piirissä kiertävän veden määrää. (TVO, 2010)

EBS (Extra Boration System) hoitaa piirin korkeapaineisen boorauksen CVCS:n ollessa poissa käytöstä onnettomuustilanteissa. EBS-järjestelmän tarkoituksena on pitää reaktori sammuneena kaikissa lämpötiloissa, myös ilman säätösauvoja, ja varmistaa tarvittavan booripitoisuuden ylläpito reaktorin palauttamiseksi alikriittiseen tilaan. (Framatome ANP, 2005)

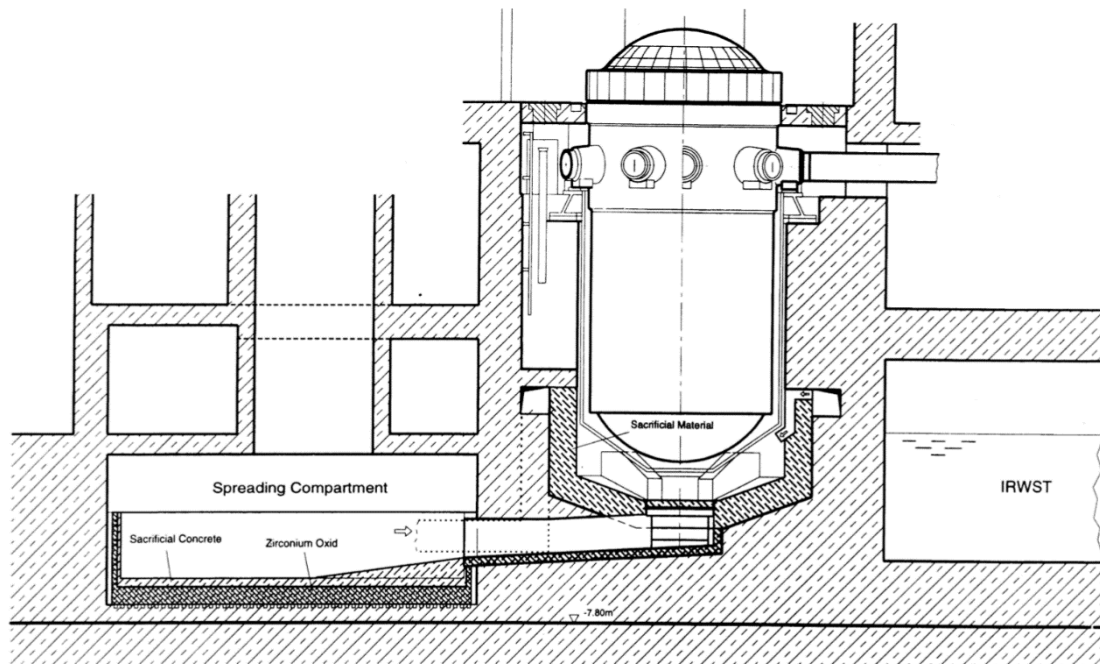


**Kuva 5.1.** Turvallisuusjärjestelmät (Areva, 2010)

Pääkiertopumpuissa on lisäksi kaasupaineella toimiva seisontatiiviste (SSSS), mikä varmistaa piirin tiiveyden siltä varalta, että molemmat CVCS ja CCWS ovat poissa käytöstä eivätkä muut kolme akselitiivistettä toimi. Jos kyseinen tilanne toteutuu, niin silloin typpipaine lyö rengastiivisteiden roottorin tasannetta vasten ja luo näin metalli-metalli tiivisteiden pumpun ollessa sammunut. Samankaltaista seisontatiivistettä ei ole missään muussa laitostyyppissä käytössä. (Framatome ANP, 2005)

## **5.2 Suojarakennus ja sydänsulasieppari**

Sydämen sulamiseen on varauduttu rakentamalla suojarakennuksen pohjalle sydänsulasieppari, kuten esitetty kuvassa 5.2. Paineastian pohja koostuu uhrattavista materiaaleista, jotka antavat periksi sydänsulan vuotaessa astian pohjalle. Paineastian pohjalta lähtee kouru, jota myöten sydänsula ohjautuu erilliseen kammioon. Kammio täytetään vedellä, ja suurin osa sydänsulan lämmöstä poistuu veden kautta suojarakennukseen. Kammion alla olevat jäähdytyskanavat tehostavat lämmönpoistoa. Jäähdytteenä käytetään booripitoista vettä, joka virtaa kanavissa painovoiman ajamana suojarakennuksen sisällä olevasta hätäjäähdytysvesialtaasta (Pikkarainen, 2006).



**Kuva 5.2.** Sydänsulasieppari (Weisshauptl, 1999)

Reaktorin suojarakennus koostuu kahdesta samalla pohjalaatalla olevista teräsbetonista valetusta suojista, joiden välissä on ilmarako. Ulkoinen suojarakennus on raudoitettu betonisylinteri, joka on suunniteltu kestäämään matkustajalentokoneen törmäys, ulkopuolinen räjähdys ja maanjäristykset, ja sen tarkoituksena on myös estää radioaktiivisten partikkeleiden pääsy ympäristöön sisemmän suojarakennuksen pettäessä. Sisempi suojarakennus on esijännitetty teräsbetonisylinteri (TVO, 2010). Sisemmän suojarakennuksen suuri tilavuus pienentää paineräjähdyksen vaaraa, ja rakennusta pidetään pienessä alipaineessa, mikä vähentää hiukkasten vuotoa rakennuksen ulkopuolelle rakenteen hajoamisen sattuessa (Czech et al., 1999). Tiiveyden varmistamiseksi suojarakennuksilla on lisäksi teräksinen suojavuoraus. Suojarakennuksien välitilassa on käytössä ilmanpoistojärjestelmä, joka suodattaa mahdollisen radioaktiivisen ilman ennen sen johtamista ilmastointipiippuun (TVO, 2010).

### 5.3 Vetyrekombinaattorit

Vetyräjähdysten välttämiseksi suuren tilavuuden lisäksi sisemmässä suojarakennuksessa on vetyrekombinaattorit (PAR). Rekombinaattoreissa vety ja happi yhdistyvät eksotermisellä reaktiolla vesihöyryksi. Reaktion katalyyttinä toimii platina tai palladium. Vetyrekombinaattori on passiivinen järjestelmä, joten se ei tarvitse ulkoista voimanlähdettä, vaan reaktio tapahtuu automaattisesti vetypitoisuuden kasvaessa. Reaktiosta syntyvä lämpö johtuu konvektiivisesti ulos järjestelmästä. (Arnould et al., 2001)



## 6 VERTAILU 3. SUKUPOLVEN PWR-LAITOSTEN VÄLILLÄ

Kolmannen sukupolven painevesireaktoreja on monia muitakin. Joitain laitoksia on valmistunut 2010-luvulla ja ovat osana aktiivista sähköntuotantoa, ja toiset ovat yhä rakenteilla. Taulukossa 6.1 on listattu tunnetuimpien kolmannen sukupolven painevesireaktoriensa tehoja, sekä valmistuneita ja rakenteilla olevia kyseisen mallin laitoksia. Kappaleessa vertaillaan niiden suurimpia eroja järjestelmissä ja rakentamisessa EPR-laitoksiin.

**Taulukko 6.1.** Edistyneet kevytvesireaktorit (IAEA, 2015)

	Suunniteltu sähköteho [MWe]	Suunniteltu lämpöteho [MWt]	Rakenteilla	Valmistunut
EPR	1750	4590	3	2
CAP1400	1500	4058	0	1 (prototyyppi)
APR1400	1400	3983	8	2
AP1000	1200	3400	2	4
VVER-1200	1170	3200	11	3

### 6.1 APR1400

Advanced Power Reactor 1400 eli APR1400 on kaksipiirinen painevesireaktori, joka on kehitetty korealaisen OPR1000- ja yhdysvaltalaisen System 80+-mallin pohjalta. Polttoaine on 16x16-matriisissa, toisin kuin EPR:ssa, jossa on 17x17-polttoainematriisit. (Woo et al., 2018)

Laitoksen suojarakennus on yksinkertainen ja betonista valettu. Käytössä on neljä mekaanista ja toisistaan itsenäistä turvallisuusjärjestelmää, ja kaksi erillistä sähköjärjestelmää. Järjestelmät on pyritty suunnittelemaan mahdollisimman

yksinkertaisiksi turvallisuuden varmistamiseksi, ja kaikki järjestelmät käyttävät sekä passiivisia että aktiivisia turvallisuusjärjestelmiä. APR1400 eroaa EPR:sta myös siinä, että reaktoripiirissä on pumppu sekä kylmässä että kuumassa haarassa, kun taas EPR:lla on vain yksi pumppu per piiri (IAEA, 2011).

APR1400-laitoksen keskimääräinen rakennusaika kestää suunnilleen 45-51 kuukautta rakentamisen aloituksesta ensimmäiseen polttoainelataukseen. Barakahin neljän laitoksen kokonaisuuden hinnat on arvioitu olevan 20 miljardin dollarin luokkaa. (Kadak, 2017)

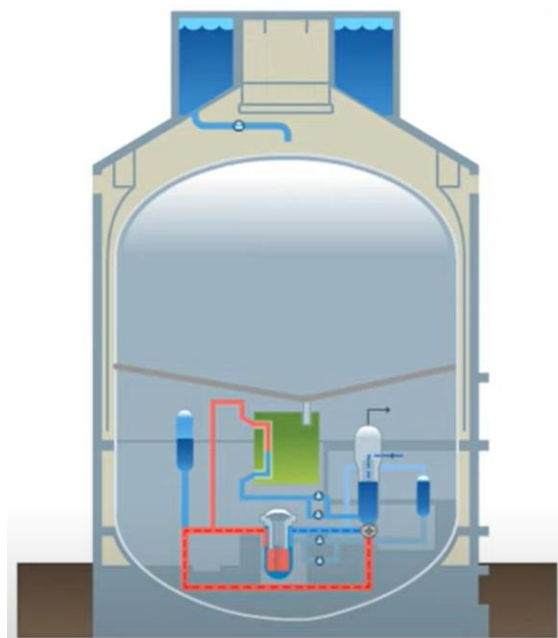
Etelä-Koreassa on jo kaksi käyvästä APR1400-laitosta, Shin-Kori 3 ja 4, jotka aloittivat tuotannon vuosina 2016 ja 2019. Alun perin Shin-Kori 3:n piti aloittaa sähköntuotanto jo vuonna 2013 ja Shin-Kori 4:n vuotta myöhemmin, mutta käyttöönottoa jouduttiin siirtämään turvallisuusjärjestelmien testausten vuoksi. APR1400-laitoksia on rakenteilla Etelä-Koreassa neljä, Shin Hanul 1 ja 2, ja Shin-Kori 5 ja 6. Arabiemiraateissa on rakenteilla Barakahin voimalaitos, jonne on rakenteilla neljä laitosesikettä, joista ensimmäisen pitäisi aloittaa tuotanto vuonna 2020. (World Nuclear News, 2019)

## **6.2 AP1000 ja CAP1400**

Westinghousen kehittämä kaksipiirinen AP1000 on suunniteltu olemaan kilpailukykyinen fossiilisia polttoaineita käyttävien voimalaitosten kanssa alentamalla ydinvoimalaitoksen kokonaiskustannuksia (Westinghouse, 2019). Reaktori on suunniteltu kokoamaan osissa, minkä vuoksi laitos voidaan teoriassa rakentaa lyhyemmän ajan sisällä kuin muut saman teholuokan reaktorit.

Laitoksen turvallisuusjärjestelmät perustuvat pääasiassa luonnolliseen kiertoon ja painovoimaan, eivätkä tarvitse ulkoisia voimanlähteitä, kun taas EPR käyttää suurimmaksi osaksi aktiivisia turvallisuusjärjestelmiä. Esimerkiksi yhden hätäjähdytysjärjestelmän vesi on varastoitu teräksisen suojarakennuksen päällä olevaan altaaseen kuvan 6.1 mukaan, joten pumppuja ei tarvita vaan painovoima riittää, toisin kuin EPR:n hätäjähdytysjärjestelmässä, jossa vesi pumpataan suojarakennuksen alla

olevasta altaasta (Westinghouse, 2019). AP1000:n teräksinen suojarakennus itsessään eroaa EPR:n suojarakennuksesta, joka on kaksinkertainen ja teräsbetonista valmistettu.



**Kuva 6.1.** AP1000 suojarakennus (Westinghouse, 2014)

Kiinalaisten suunnittelema CAP1400 on kehitetty Westinghousen AP1000-reaktorimallin pohjalta, ja on vielä pienempi kuin AP1000 (Zheng et al., 2016). Kokoerot EPR-laitosten ja AP1000- tai CAP1400-laitoksien välillä ovat huomattavat, vaikka ero tuotetussa sähkötehossa on EPR- ja CAP1400-reaktoreissa vain 14 % (IAEA, 2015). Laitosten välinen ero rakennuskustannusten välillä johtuu suunnitteluvaiheen kohdalla tehdyistä päätöksistä, kuten valinnasta hankkia kaikki mahdollinen materiaali mahdollisimman läheltä kohdetta, ja koota laitos modulaariteylyisistä osista, jolloin mahdollisimman paljon työtä jää pois rakennuskohteesta itsestään (Zheng et al., 2016).

AP1000-laitoksen valmistumisaika on suunnilleen kolme vuotta alkaen rakentamisen aloituksesta ja loppuen ensimmäiseen polttoainelataukseen. Yhdysvalloissa rakennettujen laitosten hinnat on arvioitu olevan noin kahdeksan miljardia dollaria per laitos. (Kadak, 2017)

Kiinaan on rakennettu neljä AP1000-reaktorilla varustettua laitosta, joista kaksi on Sanmenissa, ja toiset kaksi Haiyangissa. Sanmen 1 ja 2 aloittivat sähköntuotannon syksyllä 2018, Haiyang 1 ja 2 aloittivat tuotannon puolestaan syksyllä 2018 ja tammikuussa 2019. Yhdysvalloissa on rakenteilla kaksi AP1000-reaktoria, Vogtle 3 ja 4, joiden odotetaan valmistuvan vuosina 2021 ja 2022. (World Nuclear News, 2019)

### **6.3 VVER-1200**

Venäläinen VVER on vanha reaktorimalli, jota on kehitetty vuosikymmenten aikana tehokkaammaksi ja turvallisemmaksi. Uusimpia malleja ovat VVER-1200 ja VVER-1500, jotka ovat sähkötehoiltaan noin 1200 MW ja 1500 MW. VVER-laitokset eroavat useimmista PWR-laitoksista VVER-laitoksille tyypillisten vaakasuuntaisten ristivirtahöyrystimien vuoksi. (IAEA, 2015)

Turvallisuusjärjestelminä on käytössä mm. passiivinen lämmönpoistojärjestelmä, vetyrekombinaattorit ja kaksinkertainen suojarakennus, eli hyvin samankaltaista kuin EPR-laitoksen turvallisuusjärjestelmät. Laitoksella on myös sydänsulasieppari, mutta se kuitenkin eroaa EPR:n sydänsulasiepparista. Se on rakennettu betonisen suojarakennuksen pohjalle, ja astia on täytetty materiaaleilla, jotka sekoittuvat sydänsulaan, mikä taas varmistaa sydänsulan tasaisen leviämisen astiaan. (Kazanskiy et al., 2017)

VVER-1200-laitoksen rakentamisen aloituksesta sähköverkkoon yhdistämiseen on arvioitu kestävän maksimissaan 54 kuukautta. Hinta kahdelle VVER-1200-laitokselle Valkovenäjällä on arvioitu olevan 10 miljardin dollarin luokkaa. (Kadak, 2017)

Suomessa Fennovoima odottaa rakennuslupaa Hanhikivi 1-laitokselle, jonne on suunniteltu rakentaa VVER-1200-reaktori. Venäjälle on valmistunut kaksi yksikköä Novovoronež II-laitokselle, ja yksi Leningrad II-laitokselle. Hanhikiven lisäksi VVER-1200 reaktoreja on suunniteltu rakennettavan kaksi Valkovenäjälle, kaksi Kiinaan, kaksi Unkariin ja neljä yksikköä Egyptiin (Rosatom, 2019).

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

EPR on kaikista kolmannen sukupolven kevytvesijäähdytteisistä painevesireaktoreista tehokkain. Sen suunnittelussa on keskitytty turvallisuuteen, ja siinä on eniten aktiivisia turvallisuusjärjestelmiä, mikä puolestaan lisää laitoksen monimutkaisuutta muihin verrattuna. Sitä paitsi vain VVER-1200-laitoksissa on kaksinkertainen reaktorin suojarakennus EPR:n lisäksi, kun muut käyttävät vain yksinkertaista suojarakennusta. AP1000 ja CAP1400 ovat ainoat laitokset, joiden turvallisuusjärjestelmät nojaavat enemmän passiiviselle puolelle. Muut ovat varsin perinteisiä turvallisuuskonsepteissaan.

EPR on kuitenkin myös keskimääräistä kalliimpi investointi kuin muut samaa teholuokkaa olevat reaktorit useiden rakennusvaiheeseen liittyvien ongelmien vuoksi. Olkiluoto 3:n alkuperäinen hinta-arvio oli noin 3,2 miljardia euroa, mutta tähän mennessä kustannukset ovat suunnilleen yhdeksän miljardin euron luokkaa, ja aikataulu on yli kymmenen vuotta myöhässä. Flamanville 3:n tilanne on jopa huonompi, sillä sen kustannusten odotetaan nousevan jopa 11 miljardiin euroon suunnitellusta 3,3 miljardista. Hinkley Point C:n kahden laitoksen hinta-arvio on tällä hetkellä 23,2 miljardia euroa, ja niiden suunniteltu valmistumisaika on vuonna 2025 (Laatikainen, 2019). Hinta on EPR-laitokselle lähes kaksinkertainen toisiin verrattuna, jos muiden laitosten hintalappu on neljästä seitsemään miljardia euroa.

## 8 YHTEENVETO

Työssä on selvitetty, kuinka fissiota hyödynnetään ydinvoimassa, ja kerrottu yksinkertaistettu versio painevesireaktorin toiminnasta. Sen lisäksi on käyty läpi ydinvoiman historiaa ja painevesireaktoriin kehitystä ensimmäisistä malleista viimeisiin versioihin. Aikaiset painevesireaktorit olivat tarkoitettu sukellusveneiden ja suurten laivojen, kuten lentotukialusten ja jäänmurtaajien, voimanlähteiksi. Myöhemmin fissioenergiaa alettiin valjastaa myös yleisen käyttösähkön muotoon, ja painevesireaktorit ovat kehittyneet ensimmäisistä 100 MWe:n reaktoreista jopa 1750 MWe:n tehoisiksi.

EPR on suunniteltu ranskalaisen N4 Plus- ja saksalaisten REP2000- ja KONVOI-reaktorimallien pohjalta. Projektin tarkoituksena oli luoda ydinvoimalaitos, joka täyttää Saksan ja Ranskan turvallisuusstandardit, ja joka on kilpailukykyinen muita energiamuotoja vastaan. EPR:n komponentteja on pyritty parantamaan ja niiden käyttöikää kasvattamaan käyttämällä mahdollisimman hyvälaatuisia materiaaleja ja kokoamalla laitos siten, että reaktorisydämen säteily vahingoittaisi komponentteja mahdollisimman vähän. EPR-laitoksen turvallisuuskonsepti on keskittynyt aktiivisiin turvallisuusjärjestelmiin, ja on tässä suhteessa hyvin perinteinen. Käytössä on kuitenkin myös useita passiivisia järjestelmiä sekä sydänsulasieppari.

EPR on paperilla tehokas ja turvallinen, mutta käytännössä laitospöytäkirjojen rakennusprojektien ongelmat ja niihin liittyvä byrokratia ovat syöneet sen luotettavuutta, samoin kuin ne ovat kuluttaneet ydinvoiman uskottavuutta nykyaikaisena energiamuotona yleensä. Kaikkia EPR-rakennusprojekteja on vaivannut budjetin ylitys ja käyttöönoton viivästyminen. Vaikka budjettiongelmat ja viivästymiset eivät ole EPR-laitoksille uniikki ilmiö, niin Olkiluodon aikataulu on jo yli kymmenettä vuotta myöhässä, ja sama ongelma vaivaa Flamanvilleä. Olkiluoto 3 on myös saanut kyseenalaisen kunnian maailman kalliimpana rakennuksena.

Ajan kuluessa nähdään, onko EPR-laitos niin turvallinen ja tehokas kuin suunnitelmat antavat ymmärtää. Oletettavasti seuraavalla vuosikymmenellä alati pienenevällä ydinvoima-alalla kuitenkin investoidaan enemmän neljännen sukupolven ja modulaaristen reaktorien kehittämiseen, joten EPR-laitosten lukumäärä voi jäädä viiteen, jos Euroopan projektit koskaan valmistuvat.

## LÄHDELUETTELO

Arnould F. et al., 2001. State of the Art on Hydrogen Passive Autocatalytic Recombiner. International conference on nuclear engineering; Nice, Acropolis (France); 8.-12.4.2001.

Atomic Heritage Foundation, 2016. Chicago Pile-1 [verkkoartikkeli]. [Viitattu 14.10.2020] Saatavilla: <https://www.atomicheritage.org/history/chicago-pile-1>

Breeze Paul, 2014. Power Generation Technologies (Second Edition) [tieteellinen artikkeli].

Cummings William Edward, 2017. Design Evolution of PWRs: Shippingport to generation III+. Progress in Nuclear Energy 102 (2018), s. 9-37 [tieteellinen artikkeli].

Czech J. et al., 1999. European pressurized water reactor: safety objectives and principles. Nuclear Engineering and Design 187 (1999), s. 25–32 [tieteellinen artikkeli].

Framatome ANC, 2005. EPR design description.

General Electric Company, 2015. Powering the World with GE's Solutions for Nuclear Turbine Islands.

HS-STT, 2020. Olkiluoto 3:n uusi aikataulu julki: säännöllinen sähköntuotanto alkaa helmikuussa 2022. Helsingin Sanomat [verkkoartikkeli]. [Viitattu 16.10.2020] Saatavilla: <https://www.hs.fi/talous/art-2000006616364.html>

International Atomic Energy Agency, 2015. Advanced Large Water Cooled Reactors. Advanced Reactor Information System [tietokanta]

International Atomic Energy Agency, 2011. Status report 83 - Advanced Power Reactor 1400 MWe (APR1400) [raportti]. Advanced Reactors Information System [tietokanta]



International Atomic Energy Agency, 2020. Power Reactor Information System. Operational & Long-Term Shutdown Reactors. [viitattu 14.10.2020] Saatavilla: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx>

Kadak Andrew C., 2017. A Comparison of Advanced Nuclear Technologies. The Center on Global Energy Policy at School of International and Public Affairs of Columbia University.

Kazanskiy V.R. et al, 2017. New generation first-of-the kind unit – VVER-1200 design features. Nuclear Energy and Technology 3 (2017), s. 260–269 [tieteellinen artikkeli].

Kim Han-Gon, 2011. The Design Characteristics of Advanced Power Reactor 1400. IAEA-CN-164-3S09

Laatikainen Tuula, 2019. Tiedelehti tylyttää Suomen hanketta: ”Viimeinen naula ydinvoiman arkkuun”. Uusi Suomi [verkkoartikkeli]. [Viitattu 16.10.2020] Saatavilla: <https://www.uusisuomi.fi/uutiset/tiedelehti-tylyttaa-suomen-hanketta-viimeinen-naula-ydinvoiman-arkkuun/f0e35629-f2b3-31d5-bb1f-4425e2a1aaa4>

Marcum Wade, Spinrad Bernard I., 2019. Nuclear reactor. Encyclopaedia Britannica. [tieteellinen artikkeli]. [Viitattu 10.10.2020] Saatavilla: <https://www.britannica.com/technology/nuclear-reactor/History-of-reactor-development>

Pikkarainen Mika, 2006. Heat Transfer Analysis of the EPR Core Catcher Test Facility Volley. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Quinot P., Desfontaines G., 1999. The main components of the European pressurized water reactor. Nuclear Engineering and Design 187 (1999), s. 121–133 [tieteellinen artikkeli].

Reuters, 2020. Regulator unaware of fresh delays at EDF's Flamanville 3 nuclear reactor. Reuters [verkkoartikkeli]. [Viitattu 16.10.2020] Saatavilla: <https://www.reuters.com/article/france-nuclearpower-idUSL8N2DA3O9>

Rosatom, 2019. Modern Reactors of Russian Design [Rosatomın verkkosivut]. [Viitattu 10.10.2020] Saatavilla: <https://www.rosatom.ru/en/rosatom-group/engineering-and-construction/modern-reactors-of-russian-design/>

Rosatom, 2019. Projects [Rosatomın verkkosivut]. [Viitattu 10.10.2020] Saatavilla: <https://rosatom.ru/en/investors/projects/>

Rosatom. VVER tänään.

Sengler G. et al, 1999. EPR Core Design. Nuclear Engineering and Design 187 (1999), s. 79–119 [tieteellinen artikkeli].

Struger Dietmar et al, 2010. Steam Turbine Generator Packages for Advanced Nuclear Power Plants. Siemens AG. POWER-GEN Asia 2010 – Singapore November 2-4, 2010

Teollisuuden voima, 2010. Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3.

United States Nuclear Regulatory Commission, 2007. US-EPR Technology Manual.

United States Nuclear Regulatory Commission, 2013. AREVA Design Control Document Rev. 5 - Tier 2 Chapter 10 - Steam and Power Conversion System - Figures for Section 10.1 [asiakirja]

Vignon Dominique, 1999. Franco-German nuclear cooperation: from the ‘common product’ to the first European pressurized water reactor. Nuclear Engineering and Design 187 (1999), s. 1–3 [tieteellinen artikkeli].

Weisshäupl H.A. Severe accident mitigation concept of the EPR. Nuclear Engineering and Design 187 (1999), s. 35–45 [tieteellinen artikkeli].

Westinghouse. AP1000 Pressurized Water Reactor [Westinghousen verkkosivut]. [Viitattu 5.10.2020] Saatavilla: <http://www.westinghousenuclear.com/New-Plants/AP1000-PWR>

Woo Sweng-Woong et al, 2018. Design Description and Comparison of Design Differences between APR1400 Plants. Multinational Design Evaluation Programme Technical Report TR-APR1400-01 [raportti]

World Nuclear Association, 2019. Generation IV Nuclear Reactors [verkkoartikkeli]. [Viitattu 15.10.2020] Saatavilla: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>

World Nuclear Association, 2019. Nuclear-Powered Ships [verkkoartikkeli]. [Viitattu 15.10.2020] Saatavilla: <http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx>

World Nuclear Association, 2019. Nuclear Power in United Kingdom [verkkoartikkeli]. [Viitattu 15.10.2020] Saatavilla: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom.aspx>

World Nuclear News, 2019. Fourth Chinese AP1000 enters commercial operation [verkkoartikkeli]. [Viitattu 10.10.2020] Saatavilla: <http://world-nuclear-news.org/Articles/Fourth-Chinese-AP1000-enters-commercial-operation>

World Nuclear News, 2019. Second APR-1400 unit starts commercial operation [verkkoartikkeli]. [viitattu 10.10.2020] Saatavilla: <http://world-nuclear-news.org/Articles/Second-APR-1400-unit-starts-commercial-operation>

World Nuclear News, 2019. Second EPR at China's Taishan site connected to grid [verkkoartikkeli]. [Viitattu 10.10.2020] Saatavilla: <http://world-nuclear-news.org/Articles/Second-EPR-at-China-s-Taishan-site-connected-to-gr>

Zheng Mingguang et al, 2016. The General Design and Technology Innovations of CAP1400. Engineering 2 (2016), s. 97–102 [tieteellinen artikkeli].

**OLKILUOTO 3 TEKNISIÄ TIETOJA (TVO, 2010)****Yleistä**

Lämpöteho	4300 MWt
Sähköteho	1600 MWe
Hyötysuhde	n. 37 %
Pääkiertovirtaus	23 135 kg/s
Reaktorin paine	155 bar
Jäähdytteen keskilämpötila reaktoripaineastiassa	312 °C
Jäähdytteen lämpötila kuumahaarassa	328 °C
Jäähdytteen lämpötila kylmähaarassa	296°C
Merivesivirtaus	57 m <sup>3</sup> /s
Suunniteltu käyttöikä	n. 60 vuotta
Rakennustilavuus	n. 1 000 000 m <sup>3</sup>
Suojarakennuksen tilavuus	80 000 m <sup>3</sup>
Suojarakennuksen suunnittelupaine	5,3 bar

**Reaktorisydän**

Polttoainenippujen määrä	241 kpl
Reaktorisydämen aktiivikorkeus	4,2 m
Reaktorisydämen halkaisija	3,77 m
Uraanin määrä reaktorissa	n. 128 tU
Polttoaine	uraanidioksidi UO <sub>2</sub>
Nipputyyppe	17x17 HTP
Polttoainesauvoja nipussa	265 kpl
Polttoainenipun pituus	4,8 m
Polttoainenipun sivupituus	213,5 mm
Suojakuorimateriaali	M5 <sup>TM</sup>
Säätöelementtien lukumäärä	89 kpl
Kokonaispituus	4 717,5 mm
Absorbaattoriosan pituus	Yläosa: 1 340 mm (B <sub>4</sub> C) Alaosa: 2 900 mm (Ag, In, Cd)

**Reaktoripaineastia**

Sisähalkaisija	4,9 m
Sisäkorkeus	12,3 m
Seinämän paksuus	250 mm
Suunnittelupaine	176 bar
Suunnittelulämpötila	351°C

**Turbiinigeneraattori (Olkiluoto)**

Turbiinigeneraattoriyksikkö	1 kpl
Turbiinien nimellisteho	n. 1720 MW
Höyryn paine turbiinilla	75,5 bar
Höyryn lämpötila	290°C
Höyryn virtaus	2 443 kg/s
Kierrosluku	1500 rpm
Korkeapaineturbiini	1 kpl
Matalapaineturbiini	3 kpl
Generaattorin nimellisteho	1 992 MVA

**Lauhdutin ja syöttövesi**

Jäähdytyspinta-ala	110 000 m <sup>2</sup>
Jäähdytysveden virtausmäärä	52 m <sup>3</sup> /s
Lämpötilan nousu	12°C
Syöttöveden loppulämpötila	230°C

# US-EPR PROSESSIKAAVIO (U.S NRC, 2013)

U.S. EPR FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT

Figure 10.1-1—Design Heat Balance for Steam and Power Conversion System Cycle

