

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Kiehutusvesilaitosten komponenttien kehitys

Työn ohjaaja ja tarkastaja: Ville Rintala, Riitta Kyrki-Rajamäki

Lappeenranta 24.4.2014

Kimmo Hilden

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Kimmo Hilden

Opinnäytteen nimi: Kiehutusvesilaitosten komponenttien kehitys

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2014

37 sivua, 12 kuvaa

Hakusanat: kandidaatintyö, kiehutusvesilaitos, pääkiertopumppu, höyrynerotin, säätösauvakoneisto

Tässä kandidaatintyössä on tutkittu kiehutusvesilaitosten komponenttien kehitystä lähdekirjallisuuden perusteella. Kiehutusvesilaitosten komponenteista on keskitytty höyrynkuivainien, pääkiertopumppujen, säätösauvakoneistojen sekä suojarakennusten kehitykseen.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Kiehdutusvesilaitokset	6
2.1 Kiehdutusvesilaitosten toimintaperiaate.....	6
2.2 Kiehdutusvesilaitosten komponentit ja niiden tehtävät.....	7
2.2.1 Pääkiertopumput	7
2.2.2 Höyrynerotin ja höyrynkuivain	8
2.2.3 Säätosauvakoneistot	8
2.2.4 Suojarakennus	8
2.2.5 Polttoaine	9
3 Komponenttien kehitys	9
3.1 Ensimmäiset kiehdutusvesilaitokset.....	9
3.2 Pääkiertopiiri	11
3.2.1 GE	11
3.2.2 ASEA-ATOM	14
3.2.3 KWU	16
3.3 Säätosauvakoneistot	17
3.3.1 GE	17
3.3.2 ASEA-ATOM	18
3.3.3 KWU	19
3.4 Suojarakennus	19
3.4.1 GE	20
3.4.2 ASEA-ATOM	23
3.4.3 KWU	24
3.5 Höyrynerotin ja höyrynkuivain	26
3.5.1 GE	26
3.5.2 ASEA-ATOM	28
3.5.3 KWU	28
4 Pohdinta	30
5 Yhteenveto	32
Lähdeluettelo	34

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

ABWR	Advanced Boiling Water Reactor
BWR	Boiling Water Reactor
ESBWR	Economic Simplified Boiling Water Reactor
GE	General Electric
KWU	Kraftwerk Union
LOCA	Loss Of Coolin Accident
SBWR	Simplyfied Boiling Water Reactor
VBWR	Vallecitos Boiling Water Reactor

1 JOHDANTO

Kiehutusvesilaitokset ovat toiseksi yleisimpiä ydinvoimalaitoksia painevesilaitosten jälkeen. Noin neljännes maailman kaupallisessa käytössä olevista ydinvoimalaitoksista on kiehutusvesilaitoksia. Kiehutusvesilaitokset muistuttavat paljon tavallista lämpövoimalaitosta, sillä vesi kiehuu reaktorissa mikä vastaa tavallisen laitoksen kattilaa. Kiehutusvesilaitosten kehitys on alkanut Yhdysvalloissa 1950-luvulla osana Yhdysvaltojen ydinsukellusveneohjelmaa. Tämän jälkeen laajamittaisempi kiehutusvesilaitosten kehitystyö aloitettiin myös Saksassa, Ruotsissa ja Japanissa. Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan yhdysvaltalaisen GE:n, ruotsalaisen ASEA-ATOMin sekä saksalaisen KWU:n panosta kiehutusvesilaitosten komponenttien kehityksessä.

Kiehutusvesilaitosten komponenteista keskitytään käsittelemään pääkiertopumppuja, höyrynerotusjärjestelmää, säätösauvakoneistoja ja suojarakennusta. Kiehutusvesilaitosten polttoaineen kehityksestä on aikaisemmin tehty oma kandidaatintyönsä joten tässä työssä polttoaineen käsittely jätetään vähemmälle.

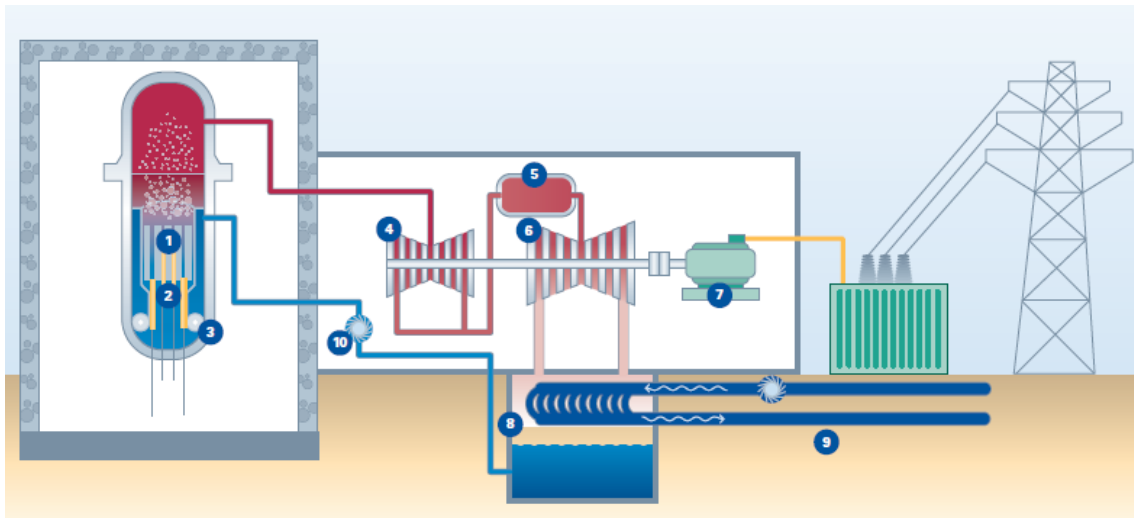
Työssä esitellään ensin ydinvoimalaitoksen ja kiehutusvesilaitoksen periaattellista toimintaa. Sen jälkeen perehdytään kiehutusvesilaitoksen komponentteihin ensin yleisesti ja sen jälkeen käydään läpi kolmen laitostoimittajan komponenttien kehitystyötä. Työn tarkoituksena on selvittää kiehutusvesilaitosten komponenttien kehityksen merkittävimmät edistysaskeleet.

2 KIEHUTUSVESILAITOKSET

Ydinvoimalaitokset muistuttavat perinteisiä polttoaineita käyttäviä voimalaitoksia, joissa polttoaineen palamisessa muodostuvalla lämmöllä tuotetaan vesihöyryä. Tuotettu vesihöyry johdetaan turbiiniin, joka pyörittää sen kanssa samalle akselille kytkettyä generaattoria, mikä puolestaan tuottaa sähköä valtakunnan sähköverkkoon. Ydinvoimalaitoksissa lämpö tuotetaan kattilan sijasta ydinreaktorissa polttoaineatomien halkeamisreaktioissa. Näissä reaktioissa polttoaineytimet halkeavat neutronien törmäysten vaikutuksesta tuottaen lämpöenergiaa. Lämpö siirtyy reaktorin läpi kulkevaan veteen mikä höyrystyy. (Hyvä tietää ydinvoimasta, 9).

2.1 Kiehutusvesilaitosten toimintaperiaate

Ensimmäiset sähköntuotantoon tarkoitetut ydinvoimalat olivat painevesireaktoreita (Rahn et al. 1984, 292). Näissä laitoksissa vesi ei suuren paineen ansiosta pääse kiehumaan itse reaktorissa vaan höyry tuotetaan erillisissä höyrystimissä. Kiehutusvesilaitoksissa vesi kiehuu jo reaktorissa yleensä n. 70 bar:in paineessa. Koska höyry tuotetaan suoraan reaktorissa, kiehutusvesilaitosten rakenne on hieman painevesilaitoksia yksinkertaisempi. Kuvassa 2.1 on kiehutusvesilaitoksen kaaviokuva. Reaktorin sydämen yläpuolella höyrystä erotetaan höyrykuivaimissa vettä, jonka jälkeen höyry johdetaan turbiinille. Reaktorin sisäisen virtauksen säädöstä vastaavat pääkiertopumput jotka ovat näkyvissä kuvassa 2.1 kohdassa 3.



Kuva 2.1 Kiehuksvesilaitoksen rakenne. 1. Polttoainesauvat. 2. Säätosauvat. 3. Pääkiertopumput. 4. Korkeapaineturbiini, 5. Välitulistin. 6. Matalapaineturbiini. 7. Generaattori. 8. Lauhdutin. 9. Jäähdytysvesi. 10. Syöttövesipumppu. (TVO 2007)

2.2 Kiehuksvesilaitosten komponentit ja niiden tehtävät

Tässä kappaleessa esitellään kiehuksvesilaitosten komponenteista pääkiertopumput, höyryerotin, säätosauvakoneistot, suojarakennus sekä polttoaine.

2.2.1 Pääkiertopumput

Pääkiertopumput ovat osa pääkiertojärjestelmää jonka tehtävänä on jäähdyttää reaktorin sydäntä ja toimittaa höyryä turbiineille. (Pershagen 1989 s. 63) Pääkiertopumput kierrättävät vettä paineastian sisällä siten, että osa vedestä tulee syöttövesilinjaa pitkin ja osa tulee höyrynkuivaimelta ja –erottimelta. Pumput kierrättävät vettä paineastian sisäreunalta alas alatilaan, jossa virtaus kääntyy toiseen suuntaan ja vesi virtaa reaktorin sydämen läpi ylöspäin. Reaktorin sydämen ympärillä on hidastintankki joka pitää virtaukset toisistaan erillään. Osa vedestä höyrystyy ja osa palaa takaisin paineastian sisäiseen kiertoon. Pääkiertojärjestelyt on toteutettu laitostoimittajien välillä eri tavoilla joista myöhemmin lisää. Pääkiertopumppujen kierrosnopeutta muuttamalla voidaan säätää reaktorin tehoa. (STUK 2013, s. 49)

2.2.2 Hörynerotin ja höyrykuivain

Hörynerottimen ja höyrykuivaimen tarkoituksena on poistaa sydämessä tuotetussa höyryssä oleva kosteus. Kosteaa höyryä on turbiinille haitallinen, sillä se aiheuttaa turbiinin siipien kulumista. Kun turbiinille menee kuivempaa höyryä se myös kontaminoituu vähemmän, sillä veden mukana turbiinille kulkeutuu radioaktiivisia hiukkasia. Lisäksi on tärkeää, että höyrykuivaimelta ja hörynerottimelta sydämen sisäiseen kiertoon palaavaan veteen sekoittuu mahdollisimman vähä höyryä. Sydämessä syntyvä vesihöyry seos virtaa sydämen yläpuolella olevaan höyrynerottimeen. Hörynerottimen jälkeen virtauksen kosteus on 0-10 %. Lopullinen kuivaus tapahtuu höyrykuivaimessa, jossa veden erotus toteutetaan hieman eri tavalla kuin hörynerottimessa. Kuivaimen jälkeen höyrynkosteus on n. 0,3 %. (Lahey & Moody 1993 s. 310)

2.2.3 Säätosauvakoneistot

Säätosauvoilla säädetään reaktorin tehoa käyttöjakson aikana sekä suoritetaan tarvittaessa hätätilanteissa reaktorin pikasulku. Koska reaktorisydämen yläpuolinen tila on varattu hörynerottimelle ja -kuivaimelle, on säätosauvat koneistoinen täytynyt sijoittaa sydämen alapuolelle joita varten reaktorin paineastian pohjassa on läpivientireiät. Tehon säätö toimii liikuttamalla säätosauvoja pidemmälle reaktoriin tai sieltä pois päin säätosauvakoneistojen avulla. Säätosauvojen avulla tehtävä tehonsäätö on toteutettu valmistajasta riippuen hieman eri tavoilla joista myöhemmin lisää. Sen sijaan pikasulku toimii valmistajasta riippumatta samalla periaatteella, jossa säätosauvat pakotetaan reaktoriin paineistetun veden avulla. (Rahn et al. 1984, 295)

2.2.4 Suojarakennus

Suojarakennus on ilmatiivis rakennus reaktorin ja pääkiertopiirin ympärillä. Sen tehtävänä on toimia biologisena suojana reaktorin ympärillä, sekä estää radioaktiivisten aineiden vapautuminen primääripiiriin vuoto-tilanteissa. (Pershagen 1989 s. 67) Suojarakennus myös suojaa reaktoria ulkoisilta vaaroilta, kuten ohjusiskuilta. Nykyaikaiset suojarakennukset on mitoitettu kestämään suuren matkustajakoneen törmäyksen. Suojarakennus on reaktorirakennuksen sisällä. Nykyisissä suojarakennuksissa LOCA:n (Loss Of Cooling Accident) aiheuttama paineen nousu

hoidetaan lauhdutusaltaiden avulla. Putkirikön aiheuttaman paineen nousun seurauksena vesihöyry siirtyy putkia pitkin vesialtasiin joissa se lauhtuu vedeksi ja paine alenee. (Marshall 1983 s. 259)

2.2.5 Polttoaine

Kiehutusvesilaitosten polttoaineen kehityksestä on tehty erillinen kandidaatintyö, joten tässä työssä polttoainetta ei käsitellä kuin tässä kappaleessa lyhyesti.

Sydän koostuu polttoainepiipuista jotka on koottu polttoainesauvoista. Polttoainesauvat puolestaan pitävät sisällään UO_2 pellettejä joiden uraani on rikastettu U-235:den suhteen. Pelletit on ladottu päällekkäin sauvaan siten että sauvan yläosaan on jätetty tilaa lämpölaajenemiselle. Polttoainesauvan ulkokuori on zirkonium-metallia. Sauvat muodostavat 9x9, 10x10 tai 11x11 kokoisen polttoainepipun. Nippu on koteloitu sekä tuettu pituudeltaan välituilla. Ylä- ja alapäissä sauvat kiinnittyvät nipuissa päätyhiloihin. Osassa sauvoista on palavaa absorbaattoria jonka tehtävä on kompensoida reaktorin ylijäämäreaktiivisuutta käyttöjakson alussa. Uusimmissa polttoainepiipuissa on myös vesikanavia, häiriötilanteiden hallittavuuden parantamiseksi. Polttoaine-elementit ovat valmistajasta riippuen eri pituisia, kuitenkin n. 4 m. (TVO 2007 s. 15)

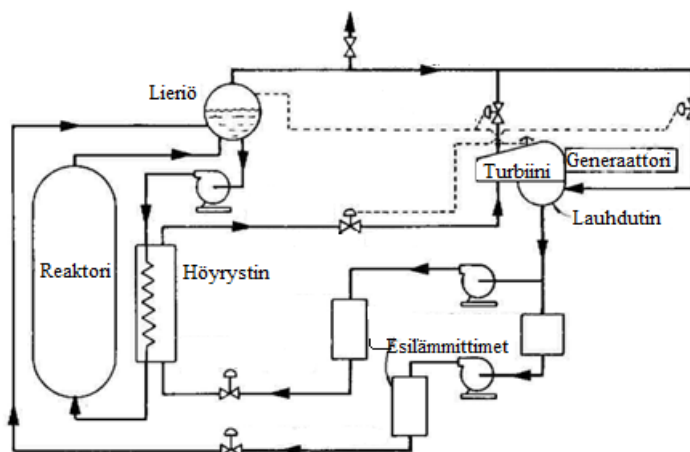
3 KOMPONENTTIEN KEHITYS

Komponenttien kehitystä on tapahtunut muutaman eri laitostoimittajan toimesta. Tästä syystä työssä käsitellään komponenttien kehityksen kulku laitostoimittaja kerrallaan, jotta voidaan hahmottaa kuka on kehittänyt ja mitä.

3.1 Ensimmäiset kiehutusvesilaitokset

Ensimmäinen kaupallisessa käytössä ollut kiehutusvesireaktorilla varustettu laitos oli General Electricin vuonna 1957 rakentama VBWR (Vallecitos Boiling Water Reactor) Yhdysvaltojen Kaliforniassa. VBWR oli pääasiassa kooreaktori jonka tarkoituksena oli tutkia kiehutusvesilaitosten eri kiertopiirivaihtoehtoja, mutta siitä saatiin myös 5 MW sähkötehoa paikalliseen verkkoon. VBWR:a pystyttiin käyttämään neljällä seuraavalla

kiertopiirillä: suora luonnonkierto, suora pakotettu kierto (pääkiertopumput), epäsuora kierto pakotetulla kierrolla sekä yhdistetty suora ja epäsuora kierto. Laitoksella tehdyt testit osoittivat muun muassa, ettei höyryn turbiinille tuoma kontaminaatio ole este kiehutusvesilaitosten käytölle, sekä laitostyyppin olevan riittävän vakaa eri käyttötilanteissa. Testeissä kuitenkin ilmeni, että luonnonkierrolla toimiva reaktori oli epävakaampi kuin pakotetulla kierrolla toimiva reaktori. Kaikki BWR/1 -tyyppin reaktoreiksi kutsutut reaktorit olivat prototyypireaktoreita joita rakennettiin myös Yhdysvaltojen ulkopuolelle. Niissä höyrykierto oli toteutettu eri tavoin ja niiden tehot vaihtelivat 70 – 220 MW:iin. Ensimmäinen prototyypireaktori oli Dresden 1 mikä käynnistyi vuonna 1960. Sen kiertopiiri on esitetty kuvassa 3.1. (Lahey & Moody s. 4-7)



Kuva 3.1 Dresden-1 kiertopiiri. Muokattu lähteestä (Lahey & Moody 1993)

Kuvasta nähdään, että varhaiset tuplakerrolla varustetut laitokset muistuttavat hyvin paljon konventionaalista höyryvoimalaitosta. Tässä laitoksessa ei ole varsinaista paineastian sisäistä höyrynerotinta lainkaan, vaan sen virkaa toimittaa paineastian ulkopuolella oleva lieriö. Lisäksi osa laitoksen höyrystä tuotetaan höyrystimessä. Yhdistetyllä höyrykierrolla varustetuilla laitoksilla saadut käyttökokemukset osoittivat kiehutuslaitosten olevan käyttökelpoisia. Niiden valmistaminen oli kuitenkin paljon kalliimpaa kuin suoralla höyrykierrolla varustettujen laitosten, johtuen komponenttien suuremmasta määrästä, suuremmasta suojarakennuksesta sekä suuremmista

huoltokustannuksista. Tästä syystä GE alkoi valmistaa kiehutuslaitoksia tyypin BWR/2 tuotantolinjalla ainoastaan suoralla höyrypiirillä. (Lahey & Moody s. 8)

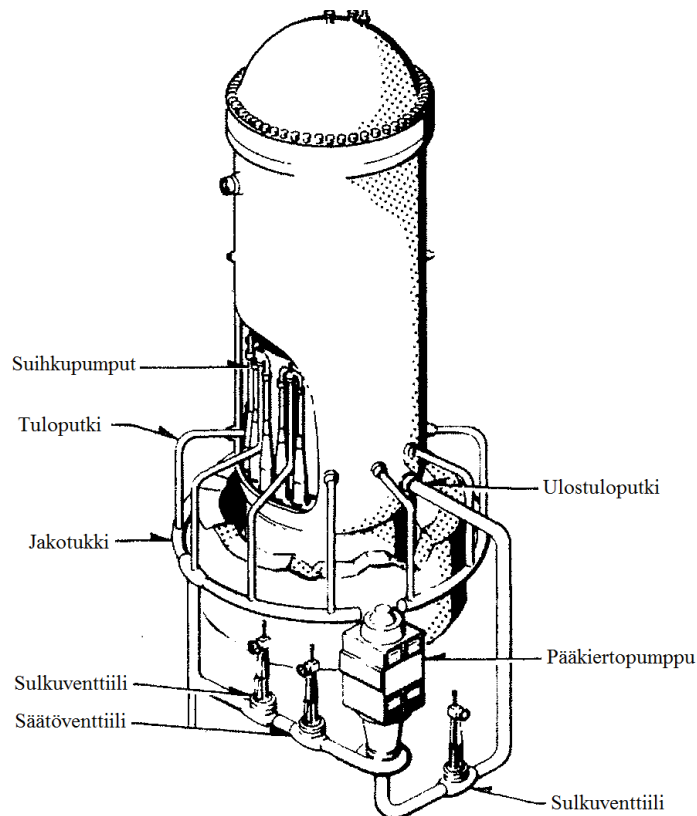
3.2 Pääkiertopiiri

Pääkiertopiiri on kehittynyt kiehutusvesilaitosten myötä merkittävästi. Tässä kappaleessa keskitytään sekä pääkiertojärjestelyiden, että pääkiertopumppujen kehitykseen.

3.2.1 GE

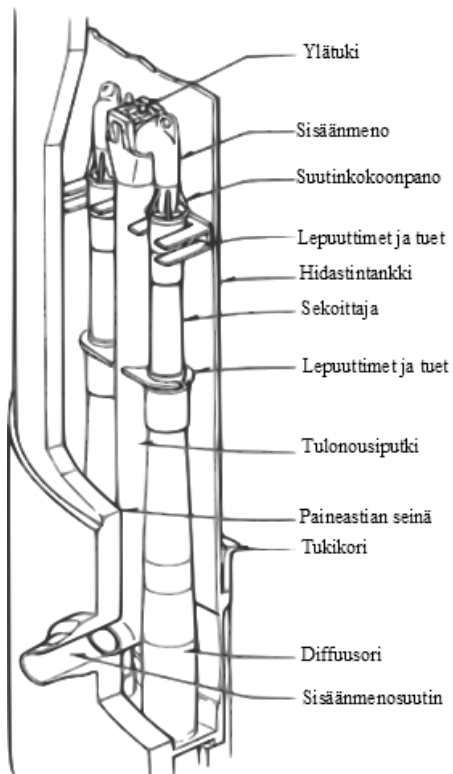
Ensimmäiset GE:n prototyyppilaitokset kokeilivat eri kiertopiirivaihtoehtoja joista päädyttiin koekäyttöjen ja testien jälkeen kuitenkin suoran kierron järjestelmään. BWR/2 tyypin laitoksissa höyrykierto oli toteutettu suoralla kierrolla. Niissä koko sydämen läpi menevä virtaus oli toteutettu viidellä erillisellä kiertopiirillä, joissa jokaisen piirin virtausta sääteli pääkiertopumppuun asennettu moottori-generaattori yhdistelmä. BWR/2 laitosten teho vaihteli tilaajasta riippuen välillä 350 – 650 MW:a. Seuraava GE:n tuotantolinja BWR/3 esitteli vuonna 1965 toisenlaisen toteutuksen sydämen sisäiselle vesikierrolle. BWR/3 tyypin reaktoreissa ulkoisia kiertopiirejä oli viiden sijasta vain kaksi ja ne sisälsivät paineastian sisäiset suihkupumput. Tässä reaktorityypissä suihkupumput esiteltiin ensimmäistä kertaa ja ne säilyivät GE:n toimittamien laitosten sydämen sisäisen kierron ratkaisuna aina 1980-luvulle asti. Suihkupumppujen ansiosta vain yksi kolmasosa sydämen virtauksen määrästä täytyy kierrättää, sillä puuttuva vesivirtaus saadaan aikaan suihkupumppujen aiheuttaman imun ansiosta. Suihkupumput on sijoitettu paineastian ja sydämen väliin ja ne saavat vesisyötön kahdelta ulkoiselta kiertopiiriltä. Virtauksen säätö toteutettiin BWR/3 tyypin laitoksissa edelleen ulkoisten kiertopiirien pääkiertopumppujen avulla. BWR/3 tyypin myötä laitosten teho kasvoi jälleen tehokkaimman toimitetun laitoksen tuottaessa 810 MW:n sähkötehon. Seuraava kehitysaskel pääkiertopiirin parissa nähtiin BWR/5 tyypin laitoksissa, joiden pääkiertovirtaus oli toteutettu suihkupumpuilla samalla tavalla kuin BWR/3 tyypin laitoksissa, mutta joissa virtauksen säätö oli ratkaistu eri tavalla. Enää virtausta sydämen läpi ei säädelyt pääkiertopumppujen kierroslukua säätämällä, vaan sen sijaan se toteutettiin venttiilisäädöllä joko kuristamalla tai avaamalla venttiiliä.

(Lahey & Moody s. 9-11) BWR/6 tuotantolinjan laitoksissa suihkupumppua uudistettiin suutinreikiä lisäämällä ja geometriaa uudistamalla. Uudistuksen tuloksena oli entistä pienempi ja tehokkaampi suihkupumppu. (Bray et al. 1972 s. 4) Suihkupumppujen sijoitus on esitetty kuvassa 3.2.



Kuva 3.2 Pääkiertopiiri GE. Muokattu lähteestä (Kok & al. 2009)

Kuvassa oleva suihkupumppu installaatio on ollut käytössä GE:n laitostyypeissä BWR/3,4,5,6 lähes muuttumattomana. (Lahey & Moody s. 9-11) Ulkoisia kiertoirejä on kaksi kappaletta joissa molemmissa on oma kiertopumppu, sulku- ja säätöventtiilit sekä jakotukki. Jakotukilta lähtee 5 tai 6 tuloputkea reaktorin paineastian läpi suihkupumpuille. Jokainen tuloputki syöttää vettä suihkupumppuparille. Kuvassa 3.3 on esitetty suihkupumppupari tarkemmin. (Rahn & al. s.314)



Kuva 3.3 Suihkupumpupari. Muokattu lähteestä (Kok & al. 2009)

Kuvassa näkyy suihkupumpuille tuleva syöttöputki, joka tulee paineastian läpi pumppujen yläreunan alapuolelta ja vesi nousee nousuputkea pitkin molempien pumppujen yläosaan. Pumppujen yläpäässä on suutinosat joissa virtaukseen liittyy imuvesi. Suutinosan jälkeen vedet sekoittuvat ja virtaavat diffuusoriin. (Rahn et al. 1984, 310)

GE oli mukana suunnittelemassa seuraavan sukupolven ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) laitosta. ABWR-laitoksessa ei ole enää ulkoisia kiertopiirejä sydämen sisäistä vesikiertoa varten. Sen sijaan kyseisessä laitoksessa on reaktorin paineastian sisäiset kiertovesipumput. ABWR-laitoksen suunnittelu aloitettiin vuonna 1978 jolloin projektissa oli mukana kaikki silloiset laitostoimittajat. Tarkoituksena oli kehittää seuraavan sukupolven kiehutusvesilaitos johon otettaisiin käyttökokemusten perusteella parhaiksi todetut tekniset ratkaisut. Lisäksi projektin tavoitteena oli parantaa laitoksen käytettävyyttä sekä turvallisuutta ja taloudellisuutta. Suurin osa kehitystyöstä tehtiin Japanissa paikallisten laitostoimittajien (Toshiba ja Hitachi) toimesta. Japanissa kehitettiin ABWR:a varten omat paineastian sisäiset kiertovesipumput eurooppalaisten

mallien pohjalta. Ensimmäiset ABWR-laitokset rakennettiin Japaniin ja ne valmistuivat vuosina 1997 ja 1998. GE:n laitosvalikoimassa ABWR on nykyäänkin yksi vaihtoehto. (Anahara 1998 s. 257) ABWR:a markkinoi myös Toshiba. Toshiba on kehittänyt mm. useampaa pääkiertopumppua kerrallaan ohjaavan invertterin. Tämä pienentää laitoksen investointikustannuksia. ABWR-laitoksen teho on 1350 MW.

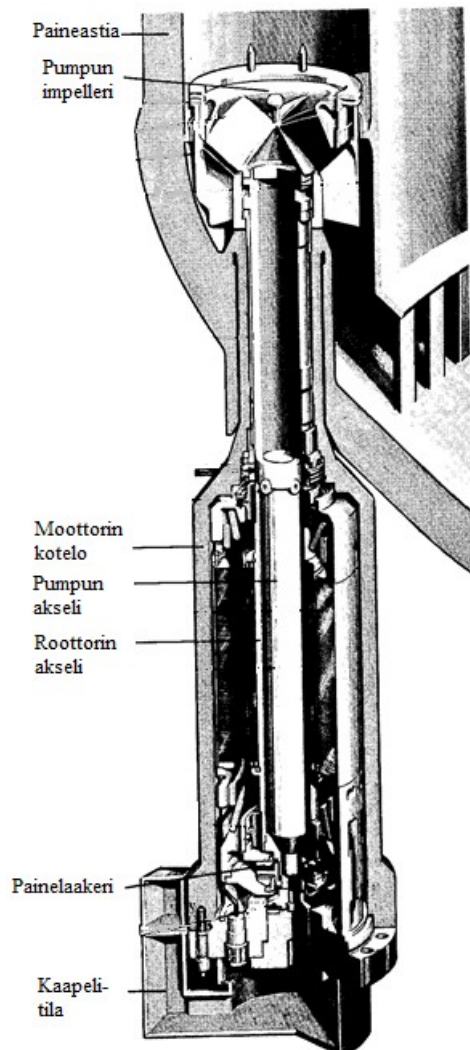
GE kehitti ABWR-laitoksen suunnittelun aikaan myös toista laitoskonseptia nimeltään SBWR (Simplified/Safe Boiling Water Reactor). Se oli pienemmän kokoluokan laitos jonka teho oli 600 MW. Tässä laitostyyppissä pääkiertopumput oli jätetty kokonaan pois ja reaktorin vesikierto oli toteutettu luonnonkierrolla. Sen kehitystä auttoivat Dodewaardin ydinvoimalaitokselta saadut hyvät kokemukset luonnokierrolla varustetun reaktorin vakaudesta ja käytettävyydestä. Dodewaardin reaktori oli GE:n toimittama BWR/1 tyyppin laitos Hollannissa mikä käynnistyi vuonna 1968. (Kullberg et al. 1993 s. 7) SBWR:n kehitys jäi kuitenkin suunnitelmatasolle eikä niitä ole valmistettu lainkaan. Sen sijaan siitä kehitettiin ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor) jonka taloudellisuutta parannettiin SBWR:n verrattuna. Myös ESBWR:n tehoa kasvatettiin 600 MW:sta 1500 MW:iin. Lisäksi siitä tehtiin turvallisuusvaatimusten osalta sopiva Euroopan markkinoille. (ESBWR 1997 s. 4)

3.2.2 ASEA-ATOM

ASEA-ATOM rakensi ensimmäisen kevytvesireaktorin länsimaissa, mitä ei ollut tehty GE:n lisenssillä. Tämä laitos oli Oskarshamn 1, jonka rakennustyöt aloitettiin vuonna 1966 ja se valmistui vuonna 1971. Kyseessä oli kiehutusvesilaitos, joka muistutti pitkälti sen aikaisia GE:n valmistamia laitoksia. Tässäkin laitosmallissa paineastian vesikierto oli toteutettu ulkoisilla kiertopiireillä joita oli GE:n malleista poiketen kuitenkin neljä kappaletta eivätkä ne sisältäneet suihkupumppuja. (OKG 1972) Samantyyppisiä laitoksia rakennettiin myös Ringhalsiin sekä Barsebäckiin.

ASEA-ATOMin ensimmäinen laitos paineastian sisäisillä kiertovesipumpuilla oli Forsmark 1. Sen rakentaminen aloitettiin 1971, mutta se saatiin tuotantoon vasta 1980 mm. Harrisburgissa tapahtuneen onnettomuuden jälkiseurauksista johtuen. Tässä laitostyyppissä ei ole ulkoisia kiertopiirejä vaan ne on korvattu paineastian sisäisillä kiertovesipumpuilla. Näin ollen reaktorin suojarakennus voidaan rakentaa merkittävästi

pienemmäksi ja säästää tällä tavoin rakennuskustannuksissa. Ulkoisen kiertopiirin aiheuttaman painehäviön poistumisesta hyödytään taloudellisesti, kun pumppujen tehontarve pienenee. Kiertovesipumppujen lukumäärän kasvattaminen kahdesta useampaan kasvattaa myös laitoksen energiantuotannon luotettavuutta, sillä yhden pumpun vioittuminen ei johda niin suureen tehon menetykseen. Ulkoisten kiertopiirien aiheuttama putkirikon mahdollisuus häviää kokonaan. ASEA-ATOM oli testannut reaktorin sisäisiä kiertovesipumppuja laboratoriossaan ja todennut ne toimivaksi ratkaisuksi. Lisäksi ne pyrittiin tekemään mahdollisimman samanlaisiksi kun jo käytössä toimiviksi ja luotettaviksi todetut pumput. (ASEA-ATOM 1972 s.3) Kuvassa 3.4 on esitetty Forsmark 3 kiertovesipumppu.



Kuva 3.4 Forsmark 3:n kiertovesipumppu. Muokattu lähteestä (Pershagen 1989)

Yllä oleva pumppu sijaitsee suoraan paineastian alapuolella. Kuvasta nähdään, että pumpun pesä on osa reaktorin paineastiaa. Moottorin kotelo on toimii paineastian jatkeena ja näin ollen siellä vallitsee sama paine. Pumpun impellerin takia reaktorin paineastian halkaisija on hieman ulkoisilla kiertopiireillä varustetuja reaktoreita suurempi. Halkaisijan suurenemista voidaan kuitenkin minimoida asentamalla useampia pumppuja, jolloin yksittäisen impellerin koko pienenee, ja näin pumput saadaan mahtumaan pienempään paineastiaan. Samalla hyödytään myös yksittäisen pumpun vioittumisen aiheuttaman tehon laskun pienemisestä. (ASEA-ATOM 1972 s. 3)

ASEA-ATOM tarjosi vielä 90-luvulla BWR 90 ja BWR 90+ kolmannen sukupolven laitoksia, joissa pääkiertojärjestelyt oli BWR-75 laitoksissa saatujen hyvien kokemusten perusteella säilytetty samanlaisina. Nykyisin ASEA-ATOMin toiminnat ovat siirtyneet Westinghouselle. (IAEA 1988 s. 48)

3.2.3 KWU

Saksaan rakennettiin ensimmäiset kiehutusvesilaitokset GE:n lisenssillä. Niistä ensimmäinen oli prototyypilaitos Kahlin joka valmistui tuotantoon vuonna 1961. Kahlin laitoksen teho oli 16 MWe ja se toimi luonnonkierrolla. Höyry tuotettiin höyrystimessä joten reaktorin kiertopiiri oli epäsuoraa tyyppiä. (IAEA 1963) Seuraavat kaksi Saksan kiehutusvesilaitosta olivat myös GE:n lisenssillä valmistatteuja. Niistä ensimmäinen valmistui Gundremmingeniin vuonna 1967 ja toinen Lingeniin vuonna 1968. Molemmat olivat demonstraatiolaitoksia joilla oli tarkoitus osoittaa, että kyseisen laitoksen teknologia sopii kaupalliseen käyttöön. Gundremmingenin laitos perustui Kahlin laitokseen ja siinä oli kaksoiskierrolla varustettu reaktori. Lingenin laitoksessa puolestaan erikoista oli fossiilisilla polttoaineilla toiminut höyryn välitulistin, mikä mahdollisti tavallisen turbiinin käytön. Myöhemmin saksalaiset suunnittelivat oman laitoksen ja perustivat AEG:n ja Siemensin toimesta Kraftwerk Unionin. KWU:n ensimmäinen laitos valmistui Würgasseniin vuonna 1971. Siinä oli ulkoiset kiertopiirit ja suihkupumput kuten GE:n laitoksissakin. Seuraava KWU:n suunnittelema ja valmistama laitos oli maailman ensimmäinen paineastian sisäisillä kiertovesipumpuilla varustettu kiehutusvesilaitos. Se valmistui Brunsbuttelissa vuonna 1976 ja oli BWR-69 mallia. Viimeisimmät KWU:n Saksaan rakentamat laitokset ovat Gundremmingenin B

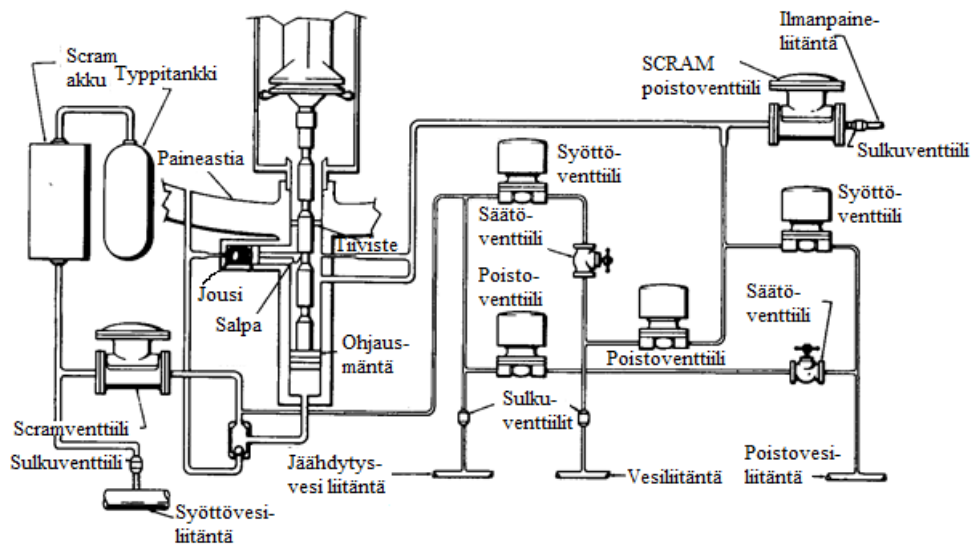
ja C laitokset jotka ovat BWR-72 mallia. Myös niissä on paineastian sisäiset kiertovesipumput. (Brettschuh 1999) (Leclercq 1986 s. 98)

KWU:n toiminta on nykyisin siirtynyt Arevalle. Areva tarjoaa tällä hetkellä yhtä kiehutusvesilaitos mallia nimeltään Kerena (ent. SWR-1000). Tässä laitostyyppissä on paineastian sisäiset kiertovesipumput kuten KWU:n paljon aikaisemmin suunnittelemassa BWR-72 laitoksessa. (AREVA 2003)

3.3 Säätösauvakoneistot

3.3.1 GE

GE:n kaikissa BWR\X laitoksissa säätösauvakoneistot toimivat hydraulisesti. (Leclercq 1986 s.97) Seuraavaksi esitellään tämän järjestelmän toimintaperiaate. Tehonsäätötilanteissa säätösauvoja joko nostetaan ylöspäin sydämeen tai lasketaan sieltä alaspäin. Yksittäisen säätösauvan ohjausjärjestelmä on esitetty kuvassa 3.5. Kuva 3.5 Säätösauvan ohjaus Jokainen säätösauva on alaosaan kiinni säätösauvakoneiston ohjausmännässä. Hydraulinen ajojärjestelmä toimii siten, että haluttaessa nostaa tai laskea säätösauvoja, männän alapuolella tai yläpuolelle johdetaan lauhdevesitankista paineistettua vettä. Tällöin säätösauvan ollessa lepotilassa, ts. paikoillaan, ohjausmännän molemmilla puolilla vallitsee reaktorin paine. Säätösauva pysyy paikallaan männän sylinteriin kiinnittyvien salpojen avulla. Kun häiriötilanteessa säätösauvat halutaan syöttää reaktoriin nopeasti, ohjausmännän yläpuolella oleva tila vapautetaan venttiilin avulla ilmakehän paineeseen ja ohjausmännän alapuolelle johdetaan yli reaktorin paineista vettä. Ylipaineinen vesi on paineistettu typpitäytteisellä paineakulla. Tällä tavoin saadaan männän ylä- ja alapuolen välille suurempi työpaine. Reaktorin ollessa käyttöpainainen, paineakuista saatava teho ei riitä kokonaan syöttämään säätösauvoja reaktoriin. Tällöin ohjausmännän alapuolelle johdetaan reaktorin paineista vettä, jotta sauvat siirtyvät kokonaan reaktoriin. (Rahn et al. 1984, 295)



Kuva 3.5 Säätösauvan ohjausjärjestelmä. Muokattu lähteestä (Lahey & Moody 1993)

Nykyisin GE-Hitachin ja Toshiba tarjoamassa ABWR, sekä GE-Hitachin tarjoamassa ESBWR laitoksissa on siirrytty sähköhydrauliseen säätösauvojen ohjaukseen, jossa tehonsäätötilanteissa säätösauvoja ohjataan sähköisesti ja pikasulku tapahtuu vanhaan tyyliin hydraulisesti. Tämä teknologia on peräisin eurooppalaisilta valmistajilta.

3.3.2 ASEA-ATOM

ASEA-ATOM kehitti omiin laitoksiinsa toisenlaisen säätösauvojen ohjaustavan. Pikasulku toimii sen järjestelmässä samalla periaatteella kuin GE:n laitoksissa, mutta tehonsäätöön tarvittavat säätösauvojen liikkeet tapahtuvat erilaisella mekanismilla. ASEA-ATOMin säätösauvakoneiston työntömäntä on kiinnitetty mutteriin jonka sisällä on ruuvi. Ruuvia pyöritetään sähkömoottorin voimalla jolloin ohjausmäntä ja säätösauva liikkuvat. Sähkömoottorin ja ruuvin välissä on vaihteisto sopivan säätönopeuden aikaansaamiseksi. Reaktorin joutuessa pikasulkuun, säätösauvat irtoavat mutterista, jotta ne saadaan mahdollisimman nopeasti syötettyä reaktoriin. Pikasulkuun tarvittavan paineen loppuessa säätösauvat lukkiutuvat paikalleen reaktorin sydämeen lukitussalpojen avulla. Tämän jälkeen mutterit ajetaan toimilaitteilla yläsentoon jonka jälkeen lukitussalvat voidaan vapauttaa ja sauvat laskeutuvat ajomutterin päälle. Tästä säätösauvat lasketaan pikkuhiljaa alas tavalliseen toimintakorkeuteensa. Säätösauvat on jaettu pikasulkuryhmiin joilla jokaisella on oma paineakkunsa ja ohjausjärjestelmä.

Pikasulkuryhmässä on reaktorityypistä riippuen 8-10 säätösauvaa ja ryhmiä on samasta asiasta riippuen 7-14. (Pershagen 1989 s.61-62) (US Patent 1973 s. 4) Kaikissa ASEA-ATOMin rakentamissa laitoksissa on käytössä tämänkaltainen säätösauvojen ohjaussysteemi.

3.3.3 KWU

Saksalaisten ensimmäinen kiehutusvesilaitos oli Kahlin ydinvoimalaitos. Se oli kiehutusvesilaitosten ensimmäistä sukupolvea ja se rakennettiin GE:n lisenssillä AEG:n toimesta. Kahlin ydinvoimalaitos oli saksalaisten koelaitos, jolla haettiin kokemuksia ydinvoimasta ja tutkittiin erilaisia teknisiä ratkaisuja. Tässä laitoksessa säätösauvoja säädettiin mekaanisesti sähkömoottorilla ja ruuvisysteemillä kuten ASEA-ATOMin laitoksissa. Pikasulku toimi kuitenkin paineilmalla. Tällä koereaktorilla saadut kokemukset sähköisesti toimivasta säätösauvojen asentosäädöstä osoittautuivat hyviksi, ja ne löytyvät myös myöhemmin rakennetuista KWU:n omista laitoksista. Saksan Lingeniin vuonna 1967 rakennettu laitos oli ensimmäinen jossa oli sähköhydraulinen säätösauvakoneisto. Kaikki laitosvalmistajat ovat jälkeinpäin siirtyneet kyseisen säätösauvakoneiston käyttöön. (IAEA 1974 s. 45, 301) (IAEA 1963 s. 342) (Leclercq 1986 s. 95)

Arevan tällä hetkellä tarjoamassa Kerena laitoksessa on yhä KWU:n aikaisemmin kehittämät säätösauvakoneistot. (AREVA 2003)

3.4 Suojarakennus

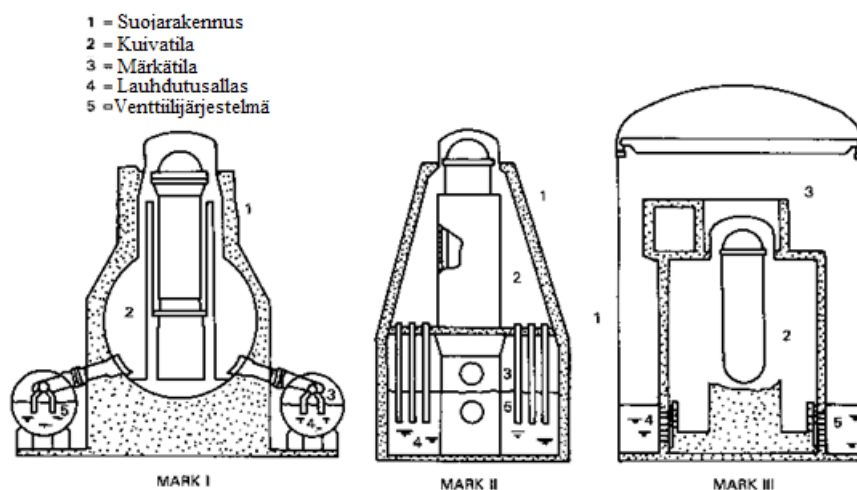
Ensimmäiset suojarakennukset olivat kuivaa mallia. Tällainen oli muun muassa GE:n Dresden 1 laitoksella. Niiden toimintaperiaate oli yksinkertaisuudessaan kestää kaikki suuressa putkirikossa (LOCA) vapautuva energia. Suojarakennus oli periaatteessa vain suuri kupu paineastian ympärillä. (Lahey & Moody 1993 s. 15) Tämänkaltaiset suojarakennukset toimivat hyvin pienehköissä koereaktoreissa. Laitosten yksikkökoon kasvaessa myös suojarakennusten koko olisi kasvanut todella suureksi ja niiden rakentaminen olisi ollut taloudellisesti kannattamatonta. (Sesonke 1973 s. 272) Tämän takia kehitettiin kontainmentteja, eli suojarakennuksia, joiden LOCA-ratkaisu perustui

paineen alentamiseen. Niissä paineisesta kuumasta vedestä putkirikon aikana muodostuva höyry ohjataan paineen alentamiseksi vesialtaisiin joissa se lauhtuu. Koska vesi pystyy sitomaan paljon enemmän energiaa kuin ilma, voidaan suojarakennuksesta tehdä pienempi ja säästää näin rakennuskustannuksissa. Tällaiseen paineen alentamiseen perustuva suojarakennus koostuu kahdesta osasta; kuivatilasta sekä märkätilasta. Kuivatila on reaktorin ympärillä oleva tila jonka tarkoituksena on estää radioaktiivisten aineiden leviäminen suojarakennuksen ulkopuolelle. Onnettomuustilanteissa kuivatilassa tapahtuvan putkirikon johdosta kuivatilan paine nousee primääripiirin paineen vapautuessa putkesta. Tällöin putkirikossa muodostuva höyry johdetaan erilaisin järjestelyin märkätilan vesialtaisiin lauhtumaan. Märkätila koostuu vesitilasta ja ilmatilasta johon lauhtumattomat kaasut jäävät. Märkätilan vesialtaat toimivat myös hätäjähdytysvesivarastona josta saadaan vettä mm. reaktorin hätäjähdytystä varten. Kuiva- ja märkätila toimivat ensisijaisena suojarakennuksena jonka lisäksi toisen suojan muodostaa itse reaktorirakennus. Märkätilaan vesialtaista otetaan vettä myös suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmään, jonka tehtävänä on lauhduttaa kaikki höyry mitä primäärisuojarakennuksesta pääsee karkaamaan. (Rahn et al. 1984 s. 371)

3.4.1 GE

GE valmisti ensimmäisen paineen alennukseen perustuvan suojarakennuksen. Ensimmäisen suojarakennuksen nimeksi tuli Mark-I. Se muistuttaa muodoltaan ylösalaisin käännettyä hehkulamppua, tai päärynää, ja on valmistettu teräksestä. Kyseisessä mallissa reaktorin paineastia on suljettu kokonaan kuivatilan sisään. Kuivatilaa ympäröi betonirakennus mikä toimii säteilysuojana. Märkätila on kuivatilan alapuolella ja se on uimarenkaan muotoinen säiliö. Kuivatila on yhteydessä märkätilaan usean putkikyhteen kautta. Molemmat, sekä kuivatila, että märkätila on valmistettu teräksestä. Seuraavaksi GE kehitti Mark-II tyyppin suojarakennuksen. Se on muodoltaan katkaistu kartio sylinterin päällä. Reaktorin paineastia on yläosan eli kartio-osan sisällä siten että sen yläosa rajautuu kuivatilan yläosaan. Kuivatila päättyy kartio-osan lattiaan josta alkaa sylinteriosa mikä on märkätilaa. Yhteet kuivatilasta märkätilaan menevät suoraan kuivan tilan lattiasta alla olevaan märkätilaan ja lauhdutusaltaisiin. Mark-II

tyypin suojarakennukset on yleensä rakennettu teräs- tai esijännitetystä betonista metallisella sisäpinnalla. (IAEA 1977 s. 6), (Rahn et al. 1984 s. 372) 1970-luvulla Japaniin rakennettiin japanilaisten ydinvoimayhtiöiden toimesta useita kiehutusvesilaitoksia GE:n lisenssillä. Näissä käytettiin sekä Mark-I että Mark-II tyypin suojarakennuksia joita japanilaiset olivat kuitenkin hieman muokanneet tehden niistä suurempia työskentelytilan luomiseksi, sekä LOCA:n aiheuttaman paineen pienemiseksi. (Lahey & Moody 1993 s. 18) Kolmas GE:n kehittämä suojarakennus on Mark-III tyypin suojarakennus. Kyseisessä mallissa kuiva- ja märkätila ovat sisäkkäin, siten että märkätila on sylinteri kuivatilan ympärillä. Paineenalennusputket kuivatilasta märkätilaan ovat kuivatilan alaosassa vaakasuorassa tasossa. Reaktorin paineastia on suojattu kuivatilan sisällä olevalla betonisynterillä. Mark-III suojarakennus on huomattavasti tilavampi kuin sitä edeltävä malli. Märkätilassa ilman tilavuus on 6-7 kertaa suurempi kuin vanhassa mallissa. Kontainmentin kokoa kasvatettiin rakennus- ja huoltotöiden helpottamiseksi. Lisäksi koon kasvattaminen vähensi vedyn kertymisestä aiheutuvaa onglemaa LOCA:n tapauksessa. Mark-III suojarakennus on valmistettu teräsbetonista. (IAEA 1977 s. 6) Seuraavassa kuvassa 3.6 on esitetty GE:n valmistamat edellä kuvatut suojarakennustyyppit. Kuvasta nähdään kuinka kontainmentin koko on kehityksen myötä hiukan kasvanut.

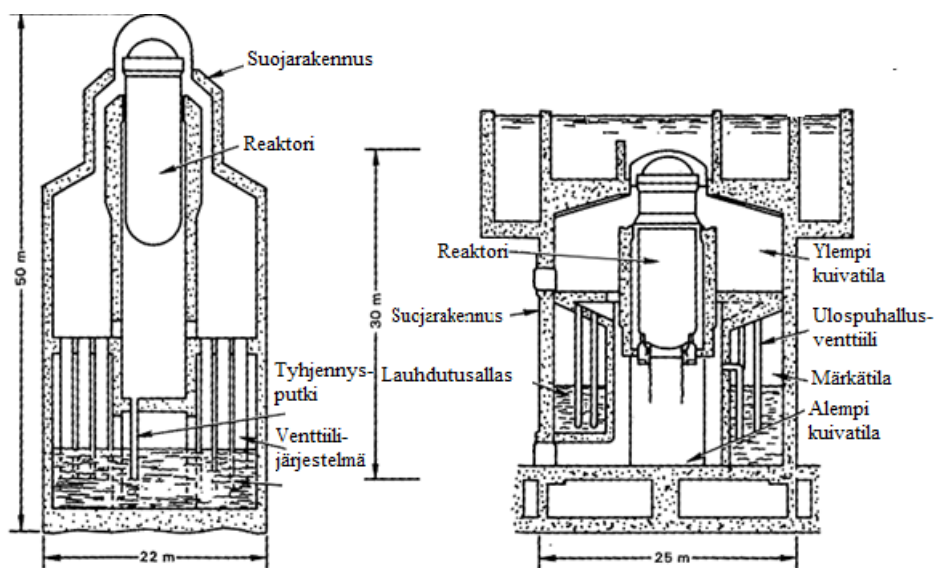


Kuva 3.6 GE:n suojarakennustyyppit. Muokattu lähteestä (Lahey & Moody 1993)

Uudemmassa ABWR-laitoksessa suojarakennus on rakenteeltaan hieman erilainen verrattuna GE:n edelliseen, Mark-III suojarakennukseen. ABWR-laitoksen suojarakennuksen seinämän sisään on upotettu teräksinen lineri. Vastaava seinärakenne löytyy myös KWU:n ja ASEA-ATOMin aikaisemmin rakennetuista suojarakennuksista. Paineenalennusputket kuivatilasta märkätilaan on upotettu suojarakennuksen seinämään. Lisäksi kuivatila on jaettu ylempään ja alempaan osaan jotka ovat yhteydessä toisiinsa paineenalennusputkien kautta. ABWR:n suojarakennus on jonkin verran Mark-III suojarakennusta pienempi johtuen ulkoisten kiertopiirien poistumisesta. (GE 2007 kappale 8-8)

3.4.2 ASEA-ATOM

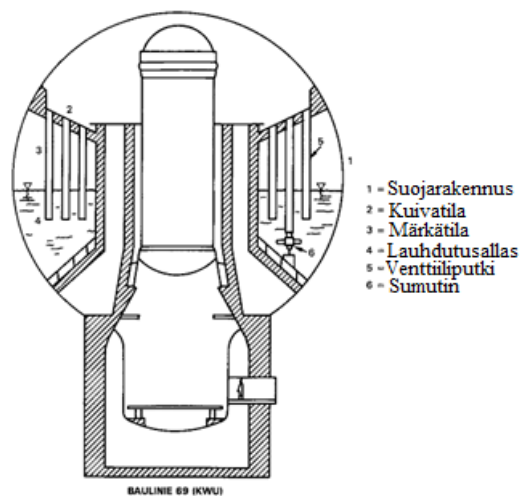
ASEA-ATOM kehitti oman paineen alentamiseen perustuvan suojarakennuksensa. Se on käytössä ASEA-ATOMin ensimmäisessä omassa laitoksessa Oskarshamn 1 :llä. ASEA-ATOM käytti ensimmäistä kertaa esijännitettyä betonia suojarakennuksensa seinissä. Lisäksi heidän suunnittelemassaan suojarakennuksessa oli käytössä ensimmäistä kertaa betonin sisään upotettu teräskuori – liner. Paineenalennus kuivatilasta märkätilaan on järjestetty pystyputkin samaan tapaan kuin GE:n Mark-II suojarakennuksessa. ASEA-ATOMin suojarakennuksen seinämärakenteella on monia etuja. Koska teräskuori ei ole kosketuksessa märkätilan veden kanssa, veden teräkseen aiheuttama korroosio vähenee merkittävästi. Esijännitetty betoni kestää paremmin iskuja kuin teräsbetoni ja lisäksi seinät voidaan rakentaa hoikemmiksi kuin mitä ne olisivat teräsbetonia käytettäessä. Lisäksi tämänkaltainen seinämärakenne antaa paremman suojan ulkoisia ja sisäisiä uhkia vastaan pitäen samalla suojarakennuksen tiiviinä ja parantaa näin ollen laitoksen turvallisuutta. (ASEA-ATOM 1972 s. 8-9) Alla olevassa kuvassa on esitetty ASEA-ATOMin suojarakennusratkaisut. Vasemmalla puolella oleva suojarakennus on ensimmäisiä laitoksia varten joissa oli vielä ulkoiset kiertopiirit. Tällainen suojarakennus on mm. Oskarshamn 1 laitoksella. Oikean puoleisessa kuvassa on puolestaan sisäisillä kiertovesipumpuilla varustettuun laitokseen tarkoitettu suojarakennus. Tämänkaltaisia ovat mm. Olkiluoto 1. ja 2. suojarakennukset. Kuvassa 3.7 olevista mittasuhteista nähdään kuinka uudempi suojarakennus on huomattavasti matalampi kuin vanhanmallinen.



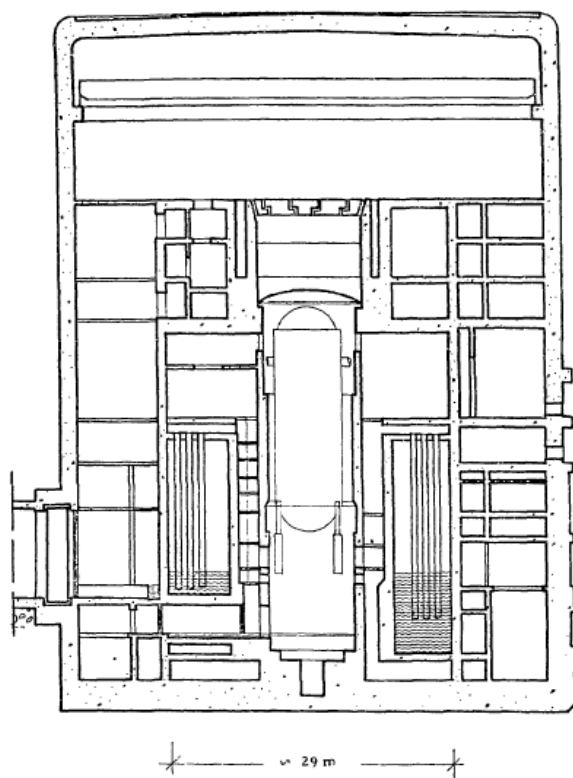
Kuva 3.7 ASEA-ATOMin suojarakennukset. Muokattu lähteestä (Lahey & Moody 1993)

3.4.3 KWU

KWU:n ensimmäinen omaa suunnitelua oleva suojarakennus on nimeltään Baulinie 69. Se on muodoltaan suuri teräspallo jonka pohjalla on sylinterin muotoinen jatke. Märkätila on teräspallon sisällä oleva rengasmaisen tila. Pallo on reaktorirakennuksen sisäpuolella. Suuri teräspallo hitsataan kasaan reaktorirakennuksen ulkopuolella ja siirretään sen sisäpuolelle sitä varten jätetyn reiän kautta. Varsinaisen pallomaisen suojarakennuksen ulkopuolella on vielä toinen ohut teräskuori. Tämä kuori on rakennettu mahdollisten läpivientien vuotojen keruuta ja takaisin pumppausta varten. (IAEA 1977 s. 7) Seuraava suojarakennus malli oli nimeltään Baulinie 72. Se muistuttaa muodoltaan aikansa muiden valmistajien suojarakennuksia. Se on sylinterimäinen paineastiaa ympäröivä rakennus. Paineenalennusputket kuivatilasta märkätilaan ovat pystysuorat kuten edellisessäkin versiossa. Molemmat KWU:n suojarakennustyyppit on esitetty kuvissa 3.8 ja 3.9. Ensimmäisen suojarakennustyyppin kuva esittää vain itse suojarakennusta joka on kokonaisuudessaan reaktorirakennuksen sisällä. Toisessa kuvassa on koko reaktorirakennus. Uudemman suojarakennuksen halkaisija on kuvan mukaan 29 m mikä on muutaman metrin suurempi kuin ASEA-ATOMin suojarakennuksen halkaisija.



Kuva 3.8 Baulinie 69 suojarakennus. Muokattu lähteestä (Lahey & Moody 1993)



Kuva 3.9 Baulinie 72 suojarakennus. (IAEA 1977)

Arevan nykyisin tarjoamassa Kerena-laitoksessa suojarakennus on pääpiirteittäin sama kuin aikaisemmissa KWU:n laitoksissa. Suojarakennus on samankaltainen sylinterin muotoinen rakennus kuin edellisetkin versiot. Muutamia eroavaisuuksia kuitenkin löytyy. Painealennusputket on sijoitettu suojarakennuksen ulompaan

seinämärakenteeseen. Paineenalennusaltaiden lisäksi suojarakennuksen sisällä on myös sydämen tulvitusallas. (AREVA 2003 s. 17)

3.5 Hörynerotin ja höyrynkuvain

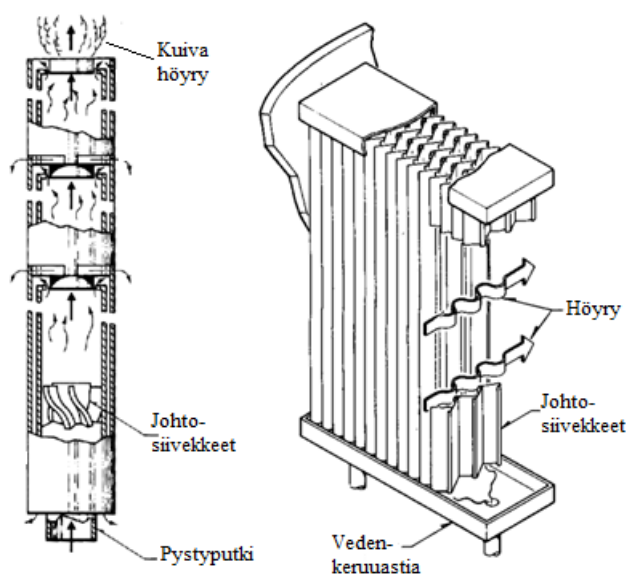
Ensimmäisissä koekäyttöön tarkoitetuissa kiehutusvesireaktoreissa hörynerottimet toimivat painovoimalla. Tämänkaltainen hörynerotin perustuu siihen, että höyry on nestemäistä vettä kevyempää jolloin ne erottuvat toisistaan. Kyseiset hörynerottimet toimivat parhaiten pienissä koereaktoreissa, sillä reaktorin tehon kasvaessa höyryn tyydyttävään erottamiseen vaadittava tila kasvaa liian suureksi. Painovoimaan perustuvien erottimien lisäksi joissain koelaitoksissa on ollut käytössä myös konventionaalisista voimalaitoksista tuttu lieriö. Tämäkin järjestely on myöhemmin jäänyt pois käytöstä. (Prins 1971 s. 17)

3.5.1 GE

GE:n ensimmäisessä laitoksessa Dresdenissä hörynerottimet oli sijoitettu paineastian ulkopuolelle. Sen lisäksi Dresdenin laitoksessa oli myös erilliset höyrystimet joten höyryä tuotettiin suoraan reaktorissa sekä höyrystimissä. GE:n ensimmäinen paineastian sisäisillä hörynerottimilla varustettu laitos rakennettiin Saksaan Gundremmingeniin. Tämän jälkeen samanlaiset hörynerottimet löytyivät myös Yhdysvaltoihin rakennetuista reaktoreista. (Lahey & Moody 1993 s. 7)

GE:n hörynerottimet sekä höyrynkuvaimet eivät ole merkittävästi muuttuneet eri laitosten välillä. Niiden perusrakenne on kaikissa sama. Hörynerotin muodostuu pystyputkista ja niiden päällä olevasta kolmivaiheisesta erottimesta. Pystyputket ovat hidastetankin kannen päällä siten että höyry ohjautuu sydäimestä suoraan erottimiin. Sydämen yläosassa höyryn kosteus on luokkaa 10 – 15 %. Pystyputkista tuleva höyry ohjataan erottimessa pyörivään liikkeeseen jonka synnyttämän keskipakoisvoiman ansiosta vesipisarat siirtyvät putken ulkoreunalle ja höyry kerääntyy putken keskelle. Erottimessa vesi poistuu virtauksesta kolmessa vaiheessa. Vesi johdetaan pystyputkia ympäröivään altaaseen josta se siirtyy alas reaktorin pohjalle menevään virtaukseen. Erottimen yläosasta höyry kerätään höyrynkuvaimen. Ennen kuivainta erottimen jälkeen höyryn kosteusprosentti on n. 5 %. (Rahn et al. 1984 s.310) Kuivaimessa

virtauksen suuntaa muutetaan useita kertoja johtosiivekkeiden avulla. Vesi jää siivekkeisiin joista se johdetaan alas takaisin reaktoriin ja höyry siirtyy kohti turbiinia. Höyrynkuivaimen jälkeen höyrystä 0,1 painoprosenttia on vettä. GE on kehittänyt höyrynerotusjärjestelmäänsä laitostyyppien mukana. BWR\6 laitostyyppin höyrynerotusjärjestelmän painehäviö on pienentynt ensimmäiseen verrattuna. Näin säästetään laitoksen pumppauskustannuksissa. Lisäksi höyry on kuivempaa jolloin turbiinin kuluminen vähentyy ja turbiinisaareke pysyy kontaminaation suhteen puhtaampana. Samalla syöttöveteen sekoittuu vähemmän sen alijäähtyneisyyttä pienentävää höyryä, mikä saa reaktorin vakaammaksi ja näin ollen parantaa sen turvallisuutta. (Bray et al. 1972 s. 4) Saksalaisen KWU:n laitoksissa käytettiin myöhemmin GE:n valmistamia höyrynerottimia. (Rouhani 1980 s. 7) Alla olevassa kuvassa on esitetty BWR/6 tyyppin laitoksissa olleet höyrynerotin sekä höyrynkuivain. Kuvassa 3.10 nähdään pystyputken päällä seisovan yksittäisen höyryerottimen kääntösiivekkeet, joiden avulla vettä erotetaan höyrystä. Lisäksi kuvasta voidaan erottaa höyrynerottimen kolmivaiheinen vedenpoisto. Höyrynkuivaimesta on esitetty yksittäinen paneeli. Höyry johdetaan paneeleihin niiden etupuolelta josta se virtaa vaakatasossa kuivaimen läpi. Vesi virtaa alas keräimeen ja höyry siirtyy ylöspäin. (Lahey & Moody 1993 s. 310)



Kuva 3.10 Höyrynerotin ja höyrynkuivain mallia GE. Muokattu lähteestä (Lahey & Moody 1993)

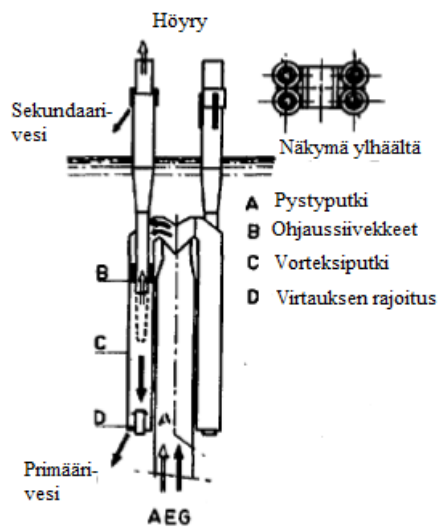
3.5.2 ASEA-ATOM

ASEA-ATOMin laitostyyppissä BWR/75 oli hiukan paremmat höyrynerottimet kuin GE:n laitoksissa. Niiden aiheuttama painehäviö oli pienempi. ASEA-ATOMin höyrynerottimessa poistetaan vettä kolmen vaiheen sijasta vain yhdessä vaiheessa. (Rouhani 1980 s. 6)

3.5.3 KWU

Saksalaisten Gundremmingeniin vuonna 1967 rakentamassa ja GE:n toimittamassa koelaitoksessa oli ensimmäistä kertaa maailmassa paineastian sisäinen höyrynerotin. Tämän jälkeen samankaltainen höyrynerotusjärjestelmä vakiinnutti paikkansa osana kiehutusvesilaitosten paineastiaa. Lingeniin rakennettiin vuonna 1968 toinen koelaitos ja siinä höyrynerottimet oli sijoitettu reaktorin sydämen ympärille. Sydäimestä tuleva höyryvirtaus käännettiin alaspäin sydämen ympärille. Höyrynerottimet oli aseteltu hidastintankin ja paineastian väliin. Erotin toimii keskipakoisvoimalla siten, että vesi sijoittuu erottimen ulkoreunalle ja höyry keskelle. Höyrynerottimen loppuosassa höyryvirtaus käännetään vielä kertaalleen ylöspäin putkeen josta se johdetaan reaktorin yläpuoliseen tilaan. Koska höyrynerottimet eivät ole polttoaineen päällä, päästään siihen suoraan käsiksi, mikä voidaan katsoa eduksi polttoainetta vaihtaessa. Toisaalta paineastian koko kasvaa sillä erottimien on mahdollista sen ja sydämen väliin. Tällöin kuitenkin säästetään tilaa pystysuunnassa. (Prins 1971 s. 20)

Lingenissä käytössä ollut höyrynerotusjärjestelmä asennettiin myös Würgassenin laitokseen. Siellä saatujen kokemusten perusteella sen aikaansaama höyrynerotus ei ollut riittävää. Höyrynerotusta tehostettiin siirtämällä erottimet sydämen päälle ja lisäämällä erottimien päälle höyrykuivain. Kyseinen höyrynerotusjärjestelmä oli kuitenkin liikaa tilaa vievä, koska virtausta piti kääntää monta kertaa. AEG:n toimittama, sekä Lingenissä että Würgassenissa käytössä ollut höyrynerotin on nähtävillä kuvassa 3.11. Kuvasta voidaan huomata AEG:n höyrynerottimen verrattain monimutkainen rakenne. Vesi poistuu erottimesta kahdessa eri vaiheessa. (Wisman 1979 s. 203) Seuraavissa KWU:n laitoksissa käytettiin GE:n suunnittelemaa jo aikaisemmin esiteltyjä höyrynerottimia. (Rouhani 1980 s. 7)



Kuva 3.11 AEG:n suunnittelema höyrynerotin. Muokattu lähteestä (Wisman 1979)

Arevan Kerena reaktorissa on edelleen KWU:n aikaisemmissa laitoksissa hyväksi todettu höyrynerotusjärjestelmä.

4 POHDINTA

Työn perusteella voidaan huomata, että kiehutusvesilaitosten kehityksessä on tapahtunut merkittäviä kehitysaskelia lähes kaikkien tarkasteltujen komponenttien osalta. Kehityksestä ovat vastanneet pääasiassa kolme eri laitosvalmistajaa: yhdysvaltalainen GE, saksalainen KWU sekä ruotsalainen ASEA-ATOM. Vaikka kiehutuslaitosten kehityksestä ovat vastanneet myös eurooppalaiset laitostoimittajat, suurin osa maailman kiehutusvesilaitoksista sijaitsee kuitenkin Yhdysvalloissa sekä Japanissa (STUK 2013 s. 51).

Kiehutusvesilaitoksissa pääkiertopumppuja on ollut pääasiassa kahta eri mallia; GE:n kehittämä ja aikaisemmin käyttämä suihkupumppujärjestelmä, sekä KWU:n ensimmäisenä kehittämä paineastian sisäisten kiertopumppujen järjestelmä. GE kehitti aikanaan useita vuosia omaa järjestelmäänsä kunnes se siirtyi myöhemmässä laitosyypissään (ABWR) käyttämään myös paineastian sisäisiä kiertovesipumppuja. KWU:n ja GE:n lisäksi, myös ASEA-ATOM on käyttänyt laitoksissaan samantyyppisiä pääkiertopumppuja. Monissa nykyisinkin markkinoilla olevissa kiehutusvesilaitoksissa on paineastian sisäiset kiertovesipumput. Näin ollen voidaan paineastian sisäisten kiertovesipumppujen olevan merkittävä kehitysaskel kiehutusvesilaitosten historiassa. Nykyisin markkinoilla on tarjolla myös luonnonkiertoisia kiehutusvesireaktoreita. Voidaan lisäksi todeta, että pääkiertopiirin toteutukset ovat yksinkertaistuneet kehityksen myötä kun ulkoiset kiertopiirit ovat jääneet pois.

Säätösauvakoneiston osalta voidaan tehdä sama huomio kuin pääkiertopumppujen kohdalla. GE on kehittänyt oman järjestelmänsä ja KWU omansa. ASEA-ATOM kehitti käyttöönsä toimintatavaltaan KWU:n säätösauvakoneistoa vastaavan järjestelmän. GE:n säätösauvakoneisto perustuu kokonaan hydrauliseen ohjaukseen, kun taas KWU:n ja ASEA-ATOMin järjestelmä perustuu hydrauliseen sekä sähköiseen ohjaukseen. Voidaan todeta KWU:n kehittämän säätösauvakoneiston olleen merkittävä kiehutuslaitosten historiassa siihen perustuu myös nykyisin markkinoilla olevien kiehutusvesilaitosten säätösauvakoneistot.

Suojarakennusten osalta ensimmäinen merkittävämpi kehitysaskel oli siirtyminen kuivan tyyppin suojarakennuksista paineenalennukseen perustuviin suojarakennuksiin.

Toisaalta kaupalliseen käyttöön tarkoitetuissa laitoksissa on ollut käytössä ainoastaan paineenalennukseen perustuvia suojarakennuksia. Eri laitostoimittajien suojarakennukset eivät toimintaperiaatteeltaan merkittävästi eroa toisistaan. Suojarakennusten perusarkkitehtuurissa on kaikkien laitostoimittajien välillä havaittavissa eroja. ASEA-ATOMin sylinterimallinen suojarakennus jonka seinämärakenteeseen on upotettu liner, näyttää nykyisten suojarakennusten valossa menestyksekkäimmältä kehitelmältä. Lisäksi suojarakennusten kuivatilan typpitäyttö on ollut suuri kehitysaskel niiden historiassa, sillä tämä parantaa laitosten turvallisuutta poistamalla vedyn palamisen uhan. (IAEA 2000, s. 7)

Höyrynerottimissa ja –kuivaimissa on eri laitostoimittajien välillä havaittavissa pientä variaatiota, mutta yleisestikin kirjallisuudessa näistä on saatavilla heikosti tietoa ja näin ollen merkittäviä kehitysaskelia näiden osalta on vaikea erottaa. Yleinen suunta on työn perusteella ollut kuitenkin höyrynkuivausjärjestelmien tehokkuuden paraneminen.

Kokonaisuudessaan kiehutusvesilaitokset ovat kehittyneet merkittävästi ensimmäisistä kooreaktoreista. Nykyiset laitokset ovat ensimmäisiä laitoksia huomattavasti tehokkaampia ja kookkaampia. Kiehutusvesilaitosten kehitystä on ohjannut taloudellisuuden sekä ydinturvallisuuden parantaminen.

5 YHTEENVETO

Ensimmäiset kiehutusvesilaitokset olivat rakenteeltaan varsin erilaisia kuin nykyisin saatavissa olevat laitokset. Kiehutusvesilaitosten kehityksen alussa kokeiltiin erilaisia teknisiä ratkaisuja joiden perusteella päädyttiin lähemmäs nykyisiä laitoksia. Yhdysvallat johtivat kiehutusvesilaitosten kehitystä sen alkuvaiheessa. Myöhemmin Eurooppalaiset valmistajat liittyivät kehitykseen mukaan ja veivät sitä merkittävästi eteenpäin.

Pääkiertopiiri on muuttunut ensimmäisistä kaksoiskierrolla varustetuista laitoksista, suihkupumppulaitosten kautta reaktorin paineastian sisäisillä kiertovesipumpuilla varustettuihin laitoksiin. Nykyisin on myös tarjolla passiivisella luonnonkierrolla varustettuja laitoksia.

Säätösauvakoneistojen kehitys on ollut pääkiertopumppujen kehitystä maltillisempaa. Pääasiassa nykyisin käytössä olevissa laitoksissa on käytössä kahta eri säätösauvakoneistojen versiota: GE:n kehittämä kokonaan hydraulinen säätösauvakoneisto sekä euroopassa kehitetty sähköhydraulinen säätösauvakoneisto. Tänä päivänä markkinoiduissa laitoksissa on käytössä jälkimmäinen sähköhydraulinen säätösauvakoneisto.

Höyrynerottimien kehityksen alkuvaiheessa käytössä oli kokonaan painovoimaan perustuvat ratkaisut. Myöhemmin kehitettiin mekaanisia keskipakovoimaan perustuvia erottimia, sekä sen jälkeen kaksiosaisia, höyrynerottimesta ja höyrynkuivaimesta muodostuvia höyrynkuivauskokonaisuuksia.

Ensimmäiset suojarakennukset olivat niin kutsuttuja kuivia suojarakennuksia joissa koko LOCA:ssa vapautuva paine purkautui suojarakennukseen ilman paineenalennusta. Seuraavaksi kehitettiin GE:n toimesta paineenalennukseen perustuva suojarakennus, jossa LOCA:ssa vapautuva höyry lauhdutetaan erillisessä paineenalennusaltaassa. Tämänkaltaisesta paineenalennukseen perustuvasta suojarakennuksesta on nähty monia versioita useilta eri valmistajilta. Uusien laitosten suojarakennusten koko ei ole enää juurikaan kasvanut koko ajan jatkuneesta laitosten tehojen kasvusta huolimatta.

Höyrynerottimet ovat tehostuneet huomattavasti ensimmäisistä versioista jotka toimivat painovoimalla. Nykyinen höyrynerotin-höyrykuivain yhdistelmä on ollut laitoksissa jo pitkään käytössä. Se on kuitenkin tehostunut huomattavasti ajan myötä.

LÄHDELUETTELO

Anahara N. 1998. Development and Completion of First ABWR and Further Improvement. [PDF-julkaisu]. Saatavissa:

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/067/29067658.pdf

Viitattu: [27.1.2014]

Areva. 2003. SWR-1000 General Description. [PDF-julkaisu]. Saatavissa:

<http://www.aveva->

[np.com/common/liblocal/docs/product_sheet/2/PRS_2_2_1_SWR1000-Gen_Des.pdf](http://www.aveva-np.com/common/liblocal/docs/product_sheet/2/PRS_2_2_1_SWR1000-Gen_Des.pdf)

Viitattu: [25.2.2014]

ASEA-ATOM 1972. Reactor Containment Vessel. [PDF-julkaisu]. Saatavissa:

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/04/057/4057190.pdf

Viitattu: [16.1.2014]

ASEA-ATOM 1972. Main Circulation Pumps. [PDF-julkaisu]. Saatavissa:

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/04/051/4051393.pdf

Viitattu: [16.1.2014]

Bernader Ö. Haga I. Segerberg F. 1972. ASEA-ATOM BWR. Development and Core Performance Experience [PDF-julkaisu]. Saatavissa:

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/04/064/4064286.pdf

Viitattu: [16.1.2014]

Bray A.P. Rubio A. Imhoff D.H. 1972. Design Features of a New Class of BWRs [PDF-julkaisu]. Saatavissa:

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/04/064/4064287.pdf

Viitattu: [24.1.2014]

Brettschuh W. 1999. SWR 1000: The new boiling water reactor concept. [PDF-julkaisu]. Saatavissa:

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/007/31007045.pdf
Viitattu: [6.2.2014]

Energiateollisuus ry. 2009 Hyvä tietää ydinvoimasta [PDF-julkaisu] Saatavissa:
http://energia.fi/sites/default/files/ht_ydinvoimasta.pdf Viitattu: [20.1.2014]

General Electric. 2007. The ABWR Plant General Description. [PDF-julkaisu].
Saatavissa: http://www.ge-energy.com/content/multimedia/_files/downloads/ABWR%20General%20Description%20Book.pdf Viitattu: [26.2.2014]

General Electric. 1997. ESBWR-An Economic Passive Plant. 162 s.

IAEA. 1963. Operating Experience With Power Reactors. [PDF-julkaisu]. Saatavissa:
http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/064/44064225.pdf
Viitattu: [29.1.2014]

IAEA. 1974. Experience From Operating and Fuelling Nuclear Power Plants. [PDF-julkaisu]. Saatavissa:
http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/05/130/5130629.pdf
Viitattu:[11.2.2014]

IAEA. 1988. Status of Advanced Technology and Design for Water Cooled Reactors: Light Water Reactors [PDF-julkaisu]. Saatavissa:
http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/20/019/20019250.pdf
Viitattu: [11.2.2014]

IAEA. 2000. Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: Metal components of BWR containment systems [PDF-julkaisu]. Saatavissa:
http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/062/31062377.pdf
Viitattu: [18.4.2014]

Kok K. D. 2009. Nuclear Engineering Handbook. USA: CRC Press. 768 s. ISBN 978-1-4200-5390-6

Kullberg C. Jones K. Heath C. 1993. Operating Experience of Natural Circulation Core Cooling in Boiling Water Reactors. [PDF-julkaisu]. Saatavissa:

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/25/015/25015342.pdf

Viitattu: [11.2.2014]

Lahey R.T Jr, Moody F.J. 1993. The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor. La Grange Park Illinois USA: American Nuclear Society. 631 s. ISBN 0-89448-037-5.

Leclercq J. 1986. The Nuclear Age. Ranska: Sodel. 417 s. ISBN 2-85108-439-9

Marshall W. 1983. Nuclear Power Technology: Volume 1 Reactor Technology. Iso-Britannia: The Thetford Press. 503 s. ISBN 0-19-851948-6

Oskarshamnverkets Kraftgrupp 1972. Oskarshamnin Ydinvoimalaitos. [PDF-julkaisu] Saatavissa:

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/03/035/3035019.pdf

Viitattu: [16.1.2014]

Pershagen Bengt. 1989. Light Water Reactor Safety. Iso-Britannia: Pergamon Press plc. Tarkastettu ja päivitetty alkuperäisestä ruotsalaisesta painoksesta. 467 s. ISBN 0-08-035915-9

Prins C. A. 1971. Aspects of Two-Phase, Gas-Liquid, Separation Related to Nuclear Steam Supply System. [PDF-julkaisu]. Saatavissa:

<http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:ee693a98-62ee-46ee-afdf-cffc2a168115/P1929-1299.pdf>

Viitattu: [6.2.2014]

Rahn F. J. Adamantiades A. G. Kenton J. E. Braun C. 1984. A Guide to Nuclear Power Technology. USA: John Wiley & Sons. 985 s. ISBN 0-471-188914-8

Rouhani Z. 1980. State of the Art Thermal-Hydraulics of BWRs. [PDF-julkaisu].

Saatavissa:

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/12/585/12585831.pdf

Viitattu: [6.2.2014]

Sesonke A. 1973. Nuclear Power Plant Design Analysis. [PDF-julkaisu]. Saatavissa:

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/05/110/5110875.pdf

Viitattu: [29.1.2014]

STUK. 2013. Ydinturvallisuus –kirjasarja: Luku 2 Ydinvoimatekniikan perusteet.

[PDF-julkaisu]. Saatavissa:

http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/kirjasarja/fi_FI/kirjasarja5/_files/12222632510021139/default/kirjasarjaV_ydinturvallisuus_2.pdf Viitattu: [18.4.2014]

Turrichia A. 1977. Trends In The Development Of Reactor Containments. [PDF-

julkaisu] Saatavissa:

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/08/303/8303572.pdf

Viitattu: [23.1.2014]

TVO. 2007. Ydinvoimalaitosyksiköt Olkiluoto 1 & 2. [PDF-julkaisu]. Saatavissa:

[http://www.tvo.fi/uploads/File/yksikot-OL1-OL2\(1\).pdf](http://www.tvo.fi/uploads/File/yksikot-OL1-OL2(1).pdf) Viitattu: [28.1.2014]

United States Patent. 1973. Control Rod Drive For a Water-Cooled Nuclear Reactor.

[PDF-Julkaisu] Saatavissa:

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/05/115/5115308.pdf

Viitattu: [16.1.2014]

Wisman R. 1979. Fundamental Investigation on Interaction Forces in Bubble Swarms and Its Application to the Design of Centrifugal Separators. [PDF-julkaisu] Saatavissa:

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/11/497/11497241.pdf

Viitattu:[6.2.2014]