



Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Passiiviset turvallisuusjärjestelmät tulevaisuuden kiehutusvesireaktorilaitoksissa

Lappeenranta 14.10.2009

Topi Kärkkäinen 0260001

Ente N

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Topi Kärkkäinen

Passiiviset turvallisuusjärjestelmät tulevaisuuden kiehutusvesireaktorilaitoksissa

Kandidaatintutkielma

2009

40 sivua, 33 kuvaa, 3 taulukkoa

Tarkastaja: Professori Riitta Kyrki-Rajamäki

Ohjaaja: Professori Riitta Kyrki-Rajamäki, Tutkija Virpi Kouhia

Hakusanat: Kiehutusvesireaktori, passiivinen turvallisuusjärjestelmä, ydinvoimalaitos

Keywords: Boiling water reactor, passive safety systems, nuclear powerplant

Kandidaatintyössä on esitelty passiivisten turvallisuusjärjestelmien hyödyntämistä seuraavan sukupolven kiehutusvesireaktorilaitoksissa.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	2
1.1	Passiivisen järjestelmän määritelmä	3
2.	LAITOSTEN ESITTELY	4
2.1	KERENA	4
2.2	ABWR.....	5
2.3	ESBWR.....	6
3.	KERENA - PASSIIVISET JÄRJESTELMÄT	8
3.1	Reaktorin järjestelmät	8
	3.1.1 Eristyslauhduuttimet	8
	3.1.2 Sydämen tulvitusjärjestelmä	9
	3.1.3 Paineastian ulkoinen jäähdytysjärjestelmä.....	10
	3.1.4 Passiivinen ulosvirtaussuutin	11
	3.1.5 Pikasulkujärjestelmän höyryakut	12
	3.1.6 Hätäboorausjärjestelmä.....	12
3.2	Suojarakennuksen järjestelmät.....	13
	3.2.1 Suojarakennuksen lauhdutin	13
	3.2.2 Passiivinen painepulssilähetin.....	14
	3.2.3 Reaktorin ylipainesuojausjärjestelmä	15
3.3	Tutkimus	16
4.	ABWR - PASSIIVISET JÄRJESTELMÄT	18
4.1	Reaktorin järjestelmät	18
	4.1.1 Eristyslauhduuttinjärjestelmä.....	18
	4.1.2 Pikasulkujärjestelmä	19
	4.1.3 Sydämen tulvitusjärjestelmä	20
4.2	Suojarakennuksen järjestelmät.....	21
	4.2.1 Suojarakennuksen lauhdutin	21
	4.2.2 Sydänsieppari	22
4.3	Tutkimus	23
5.	ESBWR - PASSIIVISET JÄRJESTELMÄT	25
5.1	Reaktorin järjestelmät	26
	5.1.1 Eristyslauhduuttinjärjestelmä.....	27

5.1.2	Sydämen tulvitusjärjestelmä	30
5.1.3	Päähöyrylinjasuutin ja virtausrajoitin	31
5.1.4	Pikasulkujärjestelmä	32
5.2	Suojarakennuksen järjestelmät.....	33
5.2.1	Suojarakennuksen lauhdutin	33
5.2.2	Sydänsieppari	35
5.2.3	Murtotappiventtiili	36
5.3	Tutkimus	37
6.	YHTEENVETO	40
	LÄHDELUETTELO.....	41

LYHENNELUETTELO

ABWR	Advanced Boiling Water Reactor – Kehittynyt kiehutusvesireaktori
BiMAC	Basemat-internal Melt Arrest Coolability device - Sydänsieppari
BWR	Boiling Water Reactor – Kiehutusvesireaktori
EC	Emergency Condenser – Eristyslauhduutin
ESBWR	Economical and Simplified Boiling Water Reactor – Ekonominen ja yksinkertaistettu kiehutusvesireaktori
FMCRD	Fine Motion Control Rod Drives - Säätosauvakoneisto
GDCS -	Gravity Driven core Cooling System – Passiivinen reaktorisydämen tulvitusjärjestelmä
HCU	Hydraulic Control Unit – Hydraulinen pikasulkujärjestelmä
IAEA	International Atomic Energy Agency – Kansainvälinen atomienergiajärjestö
JAERI	Japan Atomic Energy Research institute – Japanin atomienergian tutkimusinstituutti
LOCA	Loss Of Coolant Accident – Jäähdytteenmenetyssonnettomuus
NRC	Nuclear Regulatory Commission – Yhdysvaltojen ydinturvallisuusviranomainen
PCCS	Passive Containment Cooling System – Suojarakennuksen lauhduutinjärjestelmä
PPPT	Passive Pressure Pulse Transmitter – Passiivinen painepulssi lähetin
PRCS/IC	Passive Reactor Cooling System / Isolation Condenser – Eristyslauhduutin
SP	Suppression Pool – Lauhdutusallas
SRV	Safety Relief Valves – Paineenalennusventtiilit
SWR	SiedeWasserReactor - Kiehutusvesireaktori

1. JOHDANTO

Tässä työssä esitellään 3+ sukupolven kiehutusvesireaktoreista AREVA konsortion KERENA, Toshiba-Westinghousen ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) sekä GE-Hitachin ESBWR (Economic and Simplified Boiling Water Reactor). Työssä keskitytään laitoksiin suunniteltuihin passiivisiin turvallisuusjärjestelmiin. Passiivisten järjestelmien etuna aktiivisiin verrattuna on se, etteivät ne sisällä niin paljon liikkuvia ja huoltoa vaativia osia. Tästä johtuen päästään yksinkertaisempaan ja taloudellisempaan operointiin. Kaikissa tässä työssä esiteltävissä laitospäätöksissä käytetään luonnonlakeja eli pääasiassa luonnonkierron hyödyntämistä laitosturvallisuuden parantajana.

Luonnonkierron hyödyntäminen ydinvoimalaitoksissa ei ole mikään uusi keksintö. Esimerkiksi Hollannissa operoi yli 25 vuotta hyvällä käyttökertoimella luonnonkierrolla ilman pääkiertopumppuja toimiva Dodewaardin 60 MW yksikkö. Nykyisiä kiehutusvesireaktoreita voidaan periaatteessa käyttää lähes 60 % tehotasoon asti ilman pääkiertopumppuja. Nykyisissä laitoksissa käytettävyyttä ja turvallisuutta varmistetaan hyödyntäen luonnonkiertoa, esimerkiksi jälkilämmönpoistosta selvittää pian ketjureaktion loppumisen jälkeen luonnonkierrolla ilman pääkiertopumppuja. Passiivisten laitosten kehitystyö oli 1980-luvulla aktiivista. Chernobylin onnettomuuden seurauksena kehitystyö hidastui voimakkaasti 1990-luvulla. Nyt kuitenkin monet hankkeet on käynnistetty uudelleen.

Kaikissa esiteltävissä laitospäätöksissä tekniikka perustuu pitkälti käytössä tai kokeellisesti hyväksi todettuihin teknisiin ratkaisuihin. Näitä teknisiä ratkaisuja ei ole vielä sovellettu näin suurissa laitosyksiköissä. Laitospäätöksistä erikoisin vaihtoehto on ESBWR, jossa ei ole pääkiertopumppuja ja sen normaali tehoajo perustuu puhtaasti luonnonkiertoon. KERENA ja ESBWR sisältävät ABWR laitosta enemmän passiivisia ominaisuuksia, joten työn pääpaino keskittyy niihin.

1.1 Passiivisen järjestelmän määritelmä

Passiivinen järjestelmä on IAEA:n (International Atomic Energy Agency) määritelmän mukaan järjestelmä, joka ei tarvitse mitään ulkoista voimanlähdettä, kuten pumppua tai venttiilin ulkoista toimintasygnäalia. Passiivinen järjestelmä voi toimia täysin itsenäisesti, mutta ensisijaisesti sitä ohjaa laitoksen suojausjärjestelmä. Passiivinen järjestelmä on teknisesti yksinkertaisempi ja luotettavuusteknisesti varmempi kuin nykyisin käytössä olevat aktiiviset järjestelmät. Passiiviset järjestelmät ovat yksinkertaisuutensa ansiosta yleensä huomattavasti taloudellisempia ja huoltovapaampia kuin aktiiviset järjestelmät. IAEA jakaa passiiviset komponentit A-D -luokkiin seuraavin määritelmien:

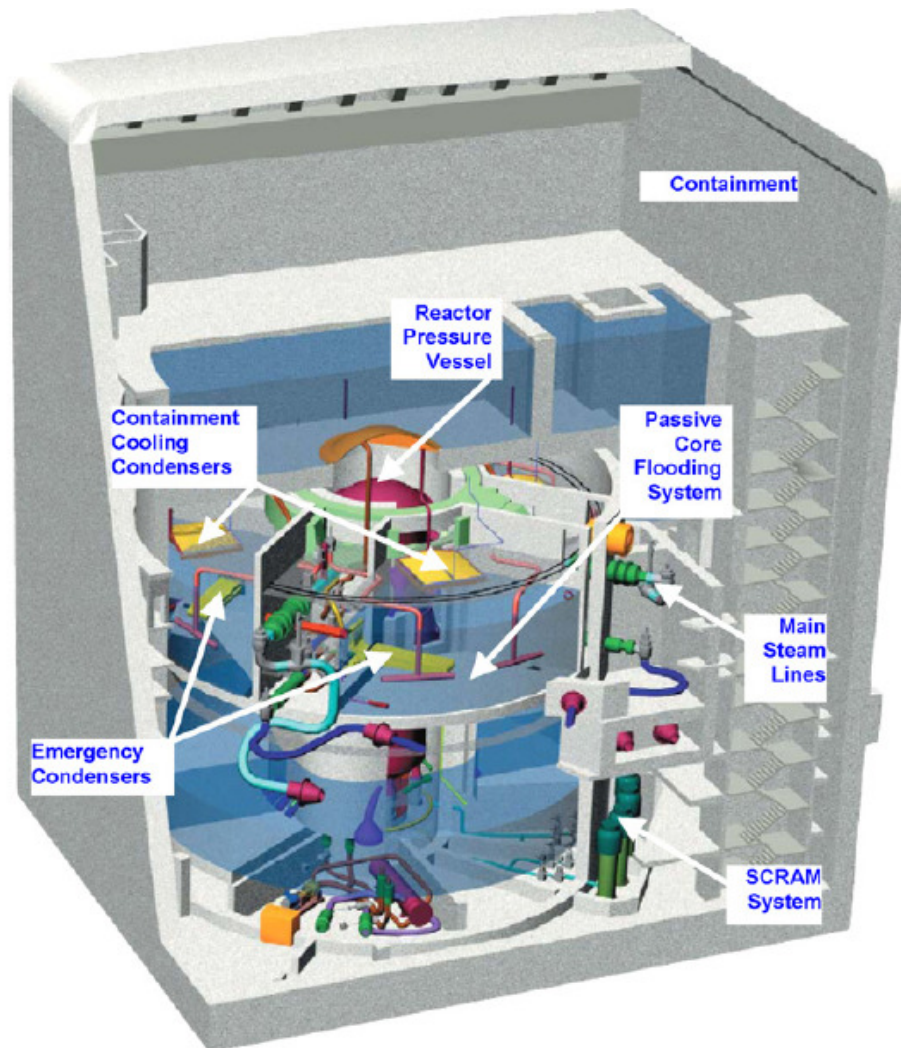
- A-luokka on määritelty sen mukaan, että mitkään sen toiminnot eivät vaadi ulkoista signaalia. Esimerkkinä tällaisista komponenteista voidaan mainita polttoaineen suojakuori ja suojarakennus.
- B-luokkaan kuuluvat järjestelmät, jotka eivät vaadi ulkoista signaalia tai liikkuvaa mekaanista osaa. Esimerkkinä tällaisista järjestelmistä mainittakoon paine-erosta laukeava luonnonkiertoon perustuva reaktorin hätäjähdytys ja luonnonkiertoon perustuva suojarakennuksen jäähdytyspiiri.
- C-luokkaan kuuluvat periaatteellisesti B-luokkaan kuuluvat toiminnot, kuten reaktorin hätätulvitus, mutta toiminto vaatii esimerkiksi paine-ero perusteisen venttiilin aukeamisen reaktorin paineen laskiessa. C-luokkaan voi kuulua esimerkiksi murtolevyyn perustuva virtauseste: levyn murtuessa reaktorin tulvitusjärjestelmä käynnistyy.
- D-luokkaan kuuluvat järjestelmät voivat olla aktiivisen ja passiivisen järjestelmän välimuoto. Tällaisen järjestelmän toteutus tapahtuu passiivisesti, mutta sen laukeaminen vaatii aktiivisen komponentin. (JUHN P.E 2000, 41-59.)

2. LAITOSTEN ESITTELY

2.1 KERENA

KERENA, vanhemmalta nimitykseltään SWR-1000 (SiedeWasserReaktor), on kolmannen sukupolven kiehutusvesireaktori, jonka on kehittänyt ranskalais-saksalainen AREVA. Reaktorista saatava sähköteho on 1000-1250 MW ja sen terminen teho on noin 3370 MW. Painesäiliön korkeus on 23,45 metriä ja leveys on 7,12 metriä. Sydämen aktiivinen korkeus on 3 metriä. KERENA:ssa on 8 painesäiliön sisäisenä toteutettua pääkiertopumppua. (IAEA 2004, 331-333.)

Laitos pyrkii vastaamaan korkeimpia turvallisuusvaatimuksia, käyttämällä aktiivisia ja passiivisia turvallisuusjärjestelmiä ja samalla yksinkertaistaen käytössä havaittujen aktiivisten järjestelmien kankeuksia.



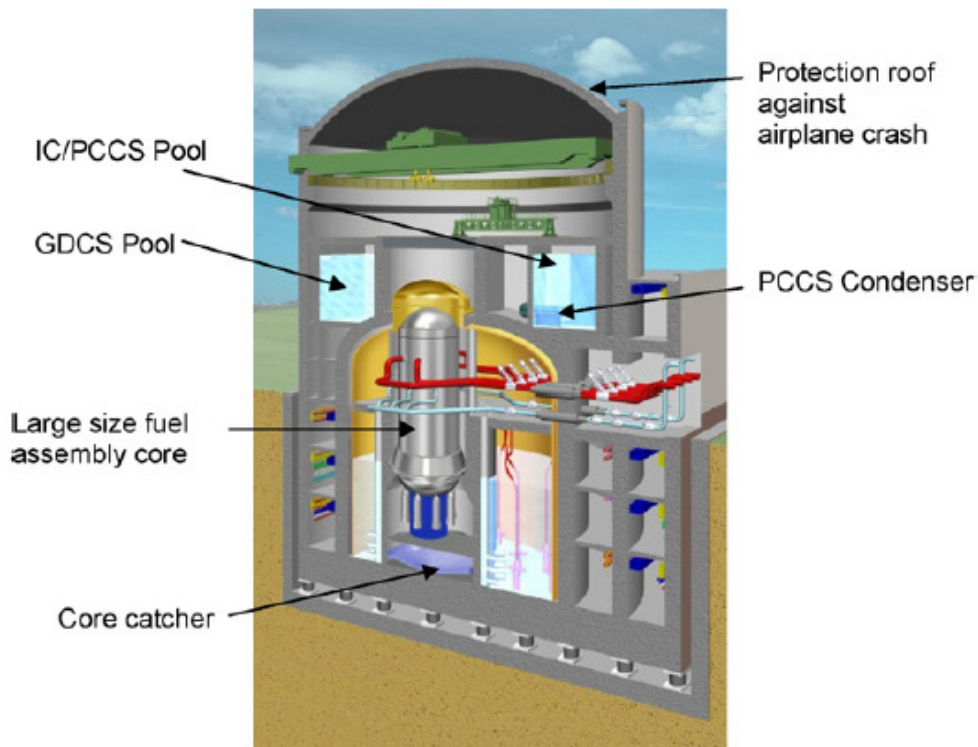
Kuva 1. KERENA reaktorirakennuksen leikkauskuva. (STOSIC Z.V. et al. 2008, 5.)

Esiteltävistä laitostyypeistä KERENA on ainoa, jonka turvallisuusjärjestelmät on suunniteltu siten, että se voi tarvittaessa toimia täysin A- ja B- passiivisuusluokitusten mukaisesti. Normaalitilanteessa aktiiviset ja passiiviset järjestelmät toimivat yhdessä. Passiivisilla järjestelmillä pystytään, ainakin teoriassa, toteuttamaan kaikki toimenpiteet laitoksen turvallisen alasajon aikaan saamiseksi.

2.2 ABWR

Toshiba-Westinghousen ABWR on kehittynyt kiehutusvesireaktori. Laitostyyppi on ollut taloudellisessa ajossa jo reilun vuosikymmenen. Ensimmäinen ABWR tekniikkaan perustuva laitos käynnistyi 1996. Laitostyyppi perustuu käytössä toimivaksi todettuun tekniikkaan. Sen sähköteho on noin 1350-1600 MW ja terminen teho noin 3926-4500 MW, kehitysversiosta riippuen. Tässä työssä esitellään AB1600 ja ABWR-II kehitysversioita. AB1600:n painesäiliön korkeus on 23,1 metriä, leveys 7,1 metriä, sydämen aktiivinen korkeus 3,7 metriä ja siinä on 8 painesäiliön sisäisesti toteutettua pääkiertopumppua. (ARAI K. et al, 2008, 3.)

ABWR-II on periaatteessa vastaava kuin AB1600, mutta poikkeaa siitä eräillä teknisillä yksityiskohdilla. Sen painesäiliön korkeus on 21,3 metriä, leveys 7,45 metriä, sydämen aktiivinen korkeus 3,71 metriä ja siinä on AB1600:sta poiketen 10 pääkiertopumppua. ABWR-II vastaa pääpiirteissään Suomeen tarjottua kehitysversiota. (IAEA 2004, 105-106, Säteilyturvakeskus 2009, 8.)

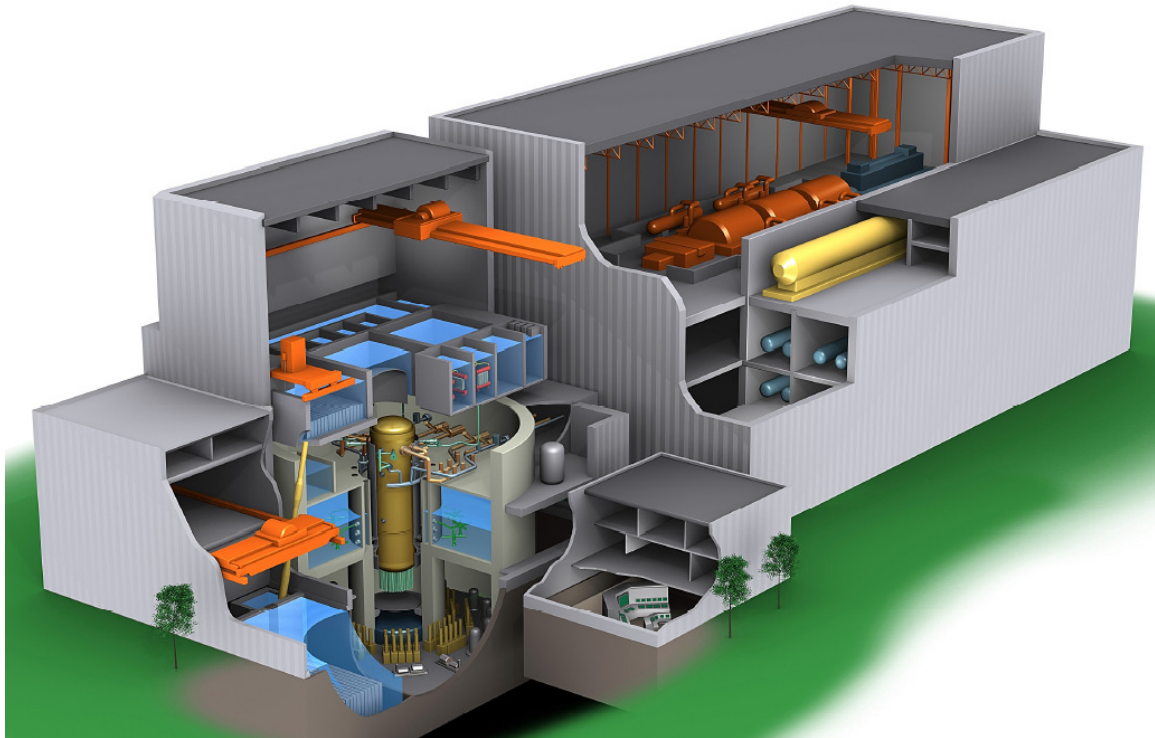


Kuva 2. ABWR AB1600 reaktorirakennuksen leikkauskuva. (ARAI K. et al. 2008, 4.)

ABWR:n etu on, että se perustuu käytössä toimivaksi todettuun tekniikkaan. Laitokseen on suunniteltu eräitä uusia laitoksen taloudellisuutta, jätehuoltoa ja turvallisuutta parantavia ominaisuuksia. Suomeen kaavailtu ABWR-laitosvaihtoehto on jatkojalostettu alkuperäisestä konseptista ja sen referenssilaitoksena toimii Hamaoka 5 (Japani). Edellisestä kehitysversiona siihen on lisätty passiivisia turvallisuusjärjestelmiä.

2.3 ESBWR

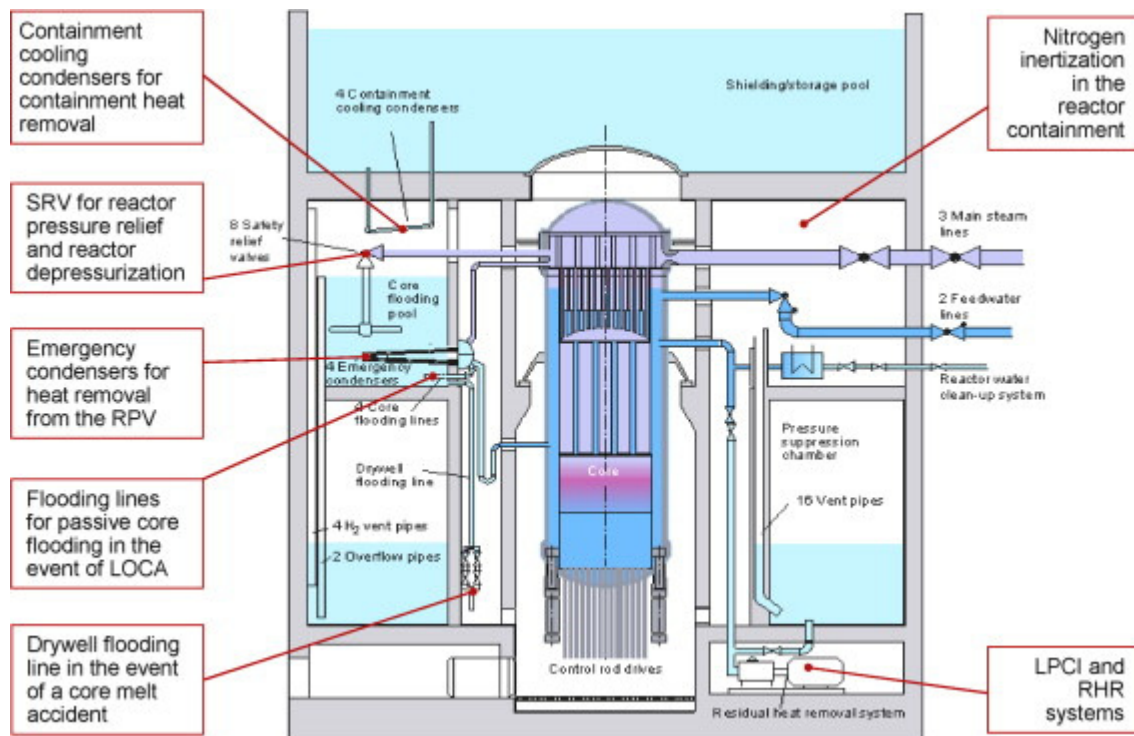
GE-Hitachin ESBWR on kehittynyt ja teknisesti yksinkertaistettu versio ABWR:stä. ESBWR on vielä suurelta osin piirustuspyödyllä ja NRC:n lupaprosessi on käynnissä. GE-Hitachi on toimittanut NRC:lle alustavan lupahakemusmateriaalin vuonna 2005, joten se voi olla tuotannossa aikaistaan seuraavan vuosikymmenen puolivälissä.



Kuva 3. ESBWR laitoksen leikkauskuva. (GE-Hitachi 2009)

ESBWR:n suurin ero muihin esiteltyihin laitoksiin verrattuna on, ettei laitoksessa ole pääkiertopumppuja. Laitoksen toiminta perustuu tiheyseroista johtuvaan luonnonkiertoon. Tämä puolestaan johtaa siihen, että laitoksen painesäiliö on huomattavasti korkeampi kuin muut tarkasteltavat laitokset. ESBWR:n sähköteho on 1550 MW ja terminen teho noin 4400 MW. Paineastian korkeus on 27,6 metriä, leveys 7,1 metriä ja sydämen aktiivinen korkeus 3 metriä. (HINDS, D. 2006, 5.)

3. KERENA - PASSIIVISET JÄRJESTELMÄT



Kuva 4. KERENAN passiiviset järjestelmät (STOSIC Z.V. et al. 2008, 8.)

Kuvassa 4. on esitelty KERENAN turvallisuusjärjestelmiä, joita esitellään yksityiskohtaisemmin seuraavissa kappaleissa.

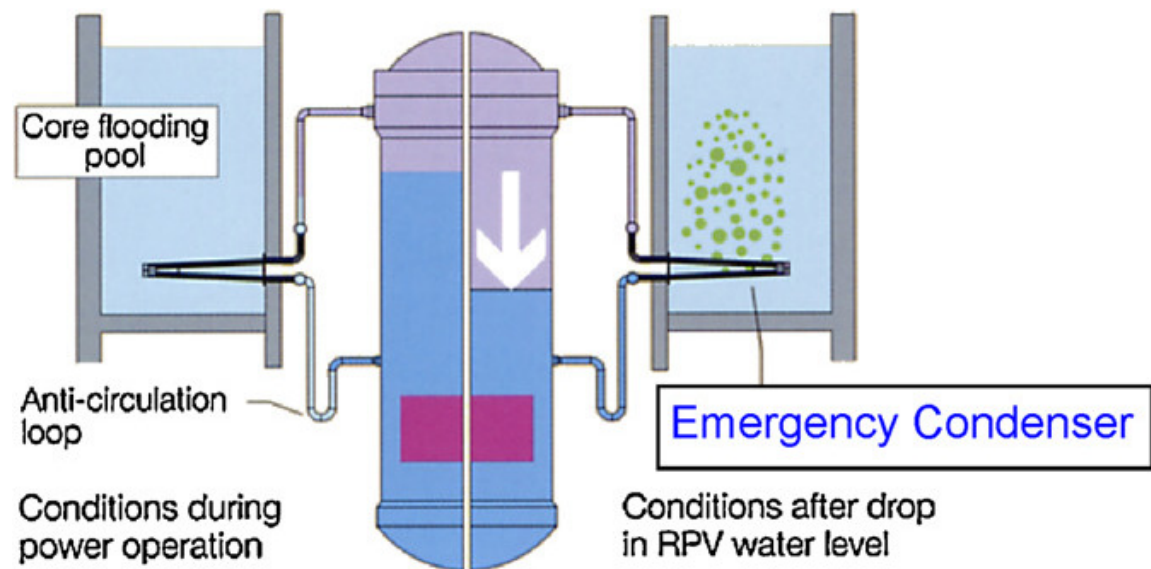
3.1 Reaktorin järjestelmät

Reaktorin passiivisia järjestelmiä ovat eristyslauhdukkimet, sydämen tulvitus sekä hydraulisesti toimiva pikasulkujärjestelmä. Järjestelmät käynnistyvät prosessin poikkeavissa tilanteissa fyysisten muutosten, suojausautomaation tai passiivisen painepulssilähtetimen ohjaamina.

3.1.1 Eristyslauhdukkimet

Eristyslauhdukkimien (EC, Emergency condenser) tehtävä on onnettomuustilanteessa poistaa jälkilämpöä reaktorista. Tämä toteutetaan neljällä korkeapaine-eristyslauhdukkimella. Jälkilämmönpoiston ohella lauhdukkimet osallistuvat myös paineenhallintaan. Eristyslauhdukkimien höyryputket lähtevät reaktorin yläosasta höyrynerottimen jälkeen ja yhtyvät kokoajaputkeen, joka on kuivatilassa reaktorin ja

sydämen tulvitusaltaan välissä. Eristyslauhduutinjärjestelmän ansiosta erillistä korkeapaineruiskutusjärjestelmää ei tarvita. Lauhdutusputket menevät seinämän läpi sydämentulvitusaltaaseen, jossa reaktorin jälkilämpö siirtyy altaan veteen. Lämmönsiirtoa on tehostettu lokeroimalla lauhdutusputket pystysuuntaisilla seinämillä. V-malliset lauhdutusputket ovat altaassa vaakatasossa. Kuivatilassa lauhdutusputket yhtyvät reaktoriin palaavaan kokoajalinjaan. Linjassa on putkimutka, joka estää jäädytteenvirtauksen väärään suuntaan järjestelmässä. Lauhduttimen toimintaperiaate on esitelty kuvassa 5.



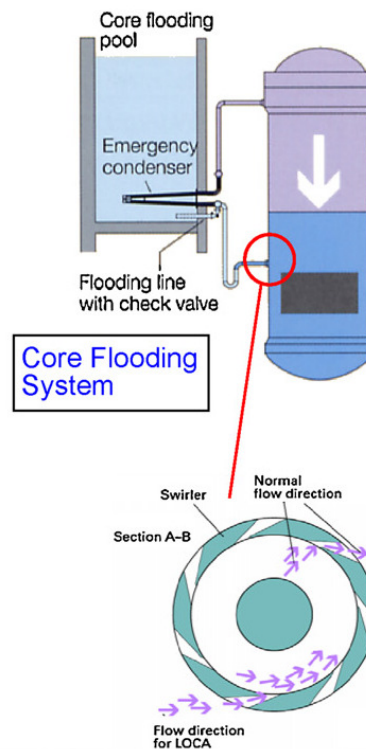
Kuva 5. Eristyslauhduuttimien toimintaperiaate. (STOSIC Z.V. et al. 2008, 12.)

Normaalitilanteessa eristyslauhduutin on täynnä vettä, eikä siinä tapahdu lämmönsiirtoa. Onnettomuustilassa nestepinta paineastiassa laskee, minkä seurauksena myös eristyslauhduuttimen nestepinta laskee, ja höyryä pääsee virtaamaan lauhduttimeen. Tämä käynnistää luonnonkierron lauhduttimen ja paineastian välillä, mikä lisää entisestään paineen laskua. (STOSIC Z.V. et al. 2008, Maaranen P. 2001.)

3.1.2 Sydämen tulvitusjärjestelmä

Sydämen tulvitusjärjestelmä (GDCS, Gravity driven core cooling system) toimii varajärjestelmänä, jos aktiivinen jälkilämmönpoisto on estynyt. Sydämen tulvitusjärjestelmä käyttää samojen altaiden vettä, joissa sijaitsevat eristyslauhduuttimet.

Tilanteessa, jossa sydämen tulvitus käynnistyy, on reaktorin paine laskenut niin alas, että jousiviritteiset venttiilit aukeavat, ja sydämeen alkaa tulvia jäähdytettä painovoimaisesti.

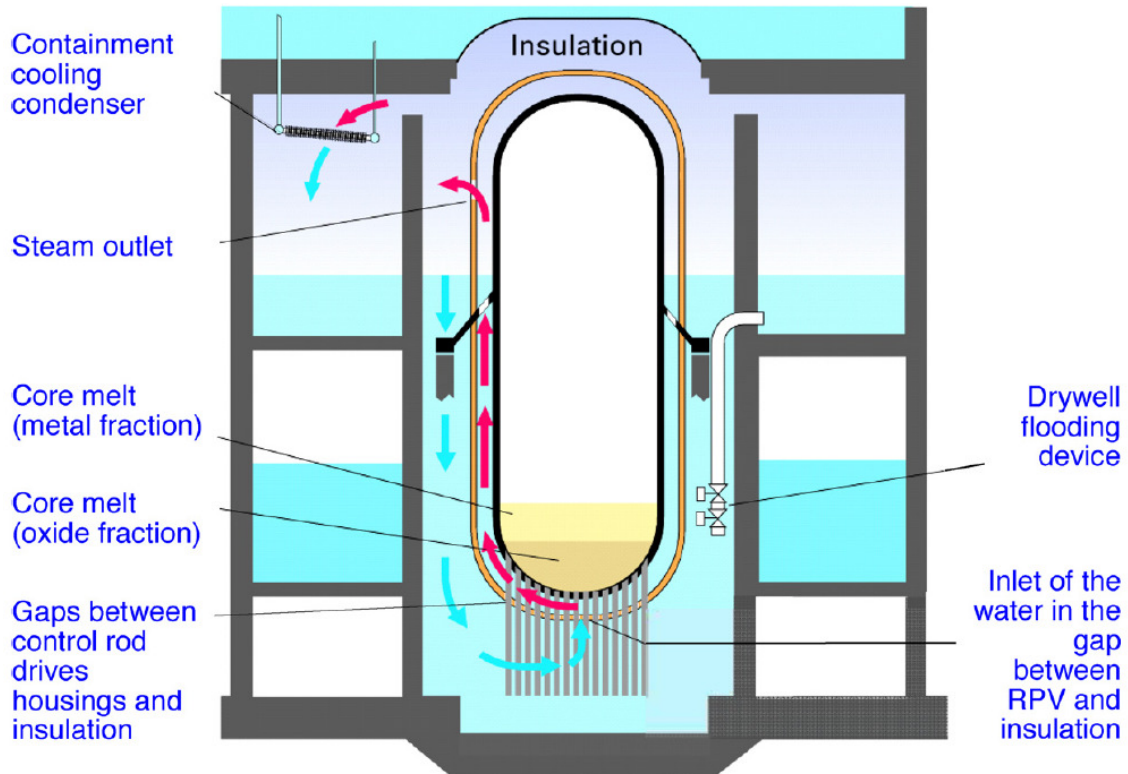


Kuva 6. Sydämen tulvitusjärjestelmä. (STOSIC Z.V. et al. 2008, 12.)

Sydämen tulvitusaltaita on neljä ja ne yhtyvät reaktoriin eristyslauhduttimilta palaaviin kokoajalinjoihin. Tulvitusjärjestelmän toiminta on esitetty kuvassa 6. Vakavan onnettomuuden tapauksessa sydämen tulvitus syöttää paineastian ulkoista jäähdytysjärjestelmää, joka on esitetty seuraavassa kappaleessa ja kuvassa 7. (STOSIC Z.V. et al 2008, Maaranen, P. 2001)

3.1.3 Paineastian ulkoinen jäähdytysjärjestelmä

Muista laitosvaihtoehdoista poiketen KERENA:ssa ei ole varsinaista sydänsiepparia, vaan paineastiaa jäähdytetään tulvittamalla koko alempi kuivatila tulvitusaltaiden vedellä. Tulvitus käynnistyy automaattisesti, kun vedenpinta paineastiassa laskee 5,8 metriin. Kuivatilan tulvitus kestää alle puoli tuntia. Paineastian ulkopuolinen eristekerros on suunniteltu niin, että kiehunasta johtuva paineen nousu eristekerroksessa poistaa eristeen. Näin eristekerrokseen päässyt vesi alkaa jäähdyttää paineastian pintaa luonnonkierrolla, kuten kuvassa 7 on esitetty.



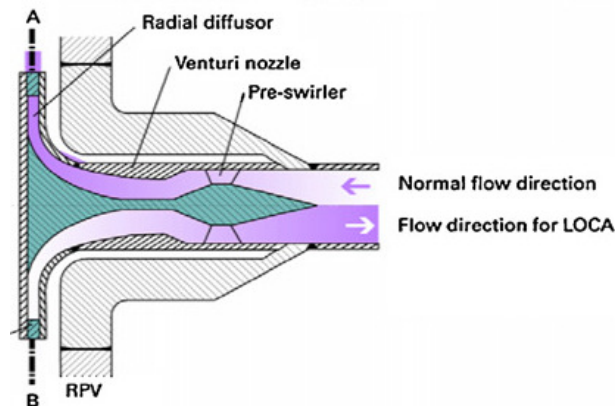
Kuva 7. Paineastian ulkoinen jäähditys. (STOSIC Z.V. et al. 2008,17.)

Tämän konseptin toiminta on kokeellisesti ja laskennallisesti todistettu toimivaksi. Suojarakennuksen alempi kuivatila tulvitetaan paineastian alaosan ollessa 12 metriin asti veden alla. KERENA:n sydämen tehotason suhde painesäiliön pohjapinta-alaan on pienempi kuin muissa uusissa BWR:ssä, joten lämmönsiirtokriisin vaaraa ei ole. Kokeellisten tutkimusten perusteella on voitu todeta, että paineastian eheys ei ole vaarassa. (STOSIC Z.V. et al. 2008, 17-19.)

3.1.4 Passiivinen ulosvirtaussuutin

Sydämen tulvitusjärjestelmään liittyvä ulosvirtaussuutin ei sisällä ainoatakaan liikkuvaa osaa. Sen tehtävänä on vähentää jäähdytteenmenetysonnettomuuden (LOCA, Loss Of Coolant Accident) yhteydessä paineastiasta poistuvaa jäähdytemassavirtaa, jos eristyslauhdutinputkiston eheys on menetetty. Suuttimen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 6 ja suuttimen rakenne kuvassa 8. Kuvista 6 ja 8 voidaan todeta, että jäähdytevirtaus virtaussuuttimessa on LOCA:n aikana päinvastainen kuin normaalitilassa. Virtauksen voimakkaaseen pyörteilyyn perustuen, jäähdyte joutuu vastakkaiseen

suuntaan virratessaan kulkemaan huomattavasti pienemmän purkausaukon kautta, jonka on arvioitu vähentävän LOCA:n aikaista jäähdytemassavirtaa jopa 10 % alkuperäisestä.



Kuva 8. Passiivinen ulosvirtaussuutin. (STOSIC Z.V. et al. 2008,12.)

3.1.5 Pikasulkujärjestelmän höyryakut

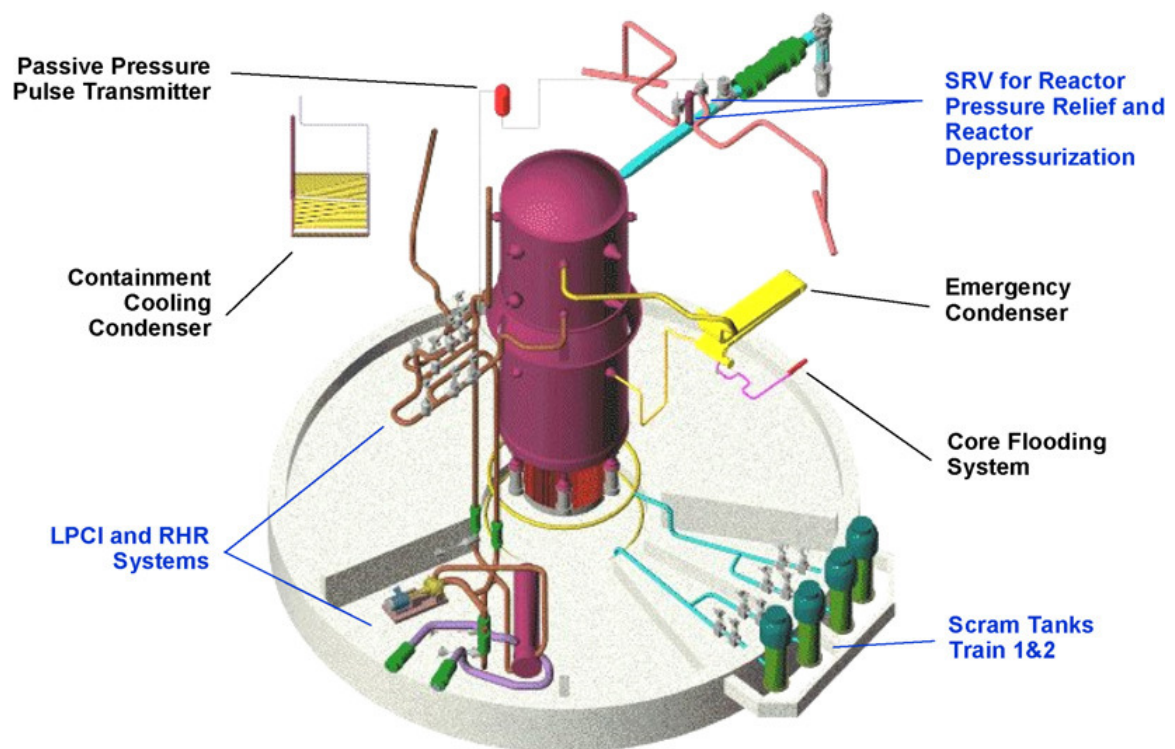
Pikasulkujärjestelmän höyryakut (Scram-tanks) turvaavat reaktorin pikasulun. Järjestelmä koostuu neljästä höyrypainestetusta vesisäiliöstä, jotka on kytketty säätösauvojen ohjaukseen sulkuventtiilin kautta. Järjestelmä on jaettu kahteen itsenäiseen osaan, joista kumpikin ohjaa puolta säätösauvoista. Järjestelmän ohjaamat erillisissä piireissä toimivat säätösauvat on hajautettu sydämeen. Kumpi tahansa yksiköistä pystyy yksinään sammuttamaan reaktorin. Järjestelmä on esitetty kuvassa 9. Säiliöissä on höyryä ja vettä 130 bar:n paineessa, jota ylläpitävät sähkövastukset. Reaktorin pikasulun voi käynnistää aktiivinen suojaussignaali tai passiivinen painepulssilähetin. Järjestelmä on toteutettu typen sijasta höyryllä, näin voidaan välttää lauhtumattomien kaasujen pääsy reaktoriin, sekä pienentää järjestelmän vaativaa tilaa. (Maaranen P. 2001. STOSIC Z.V. et al. 2008,16)

3.1.6 Hätäboorausjärjestelmä

Hätäboorausjärjestelmä toimii pikasulkujärjestelmän varajärjestelmänä, jos säätösauvojen toiminta on estynyt. Hätäbooraus on höyryakuilla toimiva 2 x 100% järjestelmä. Boorijärjestelmä on toteutettu höyryakuilla, joten lauhtumattomien kaasujen pääsy reaktoriin on estetty. (Fennovoima 2009, 274.)

3.2 Suojarakennuksen järjestelmät

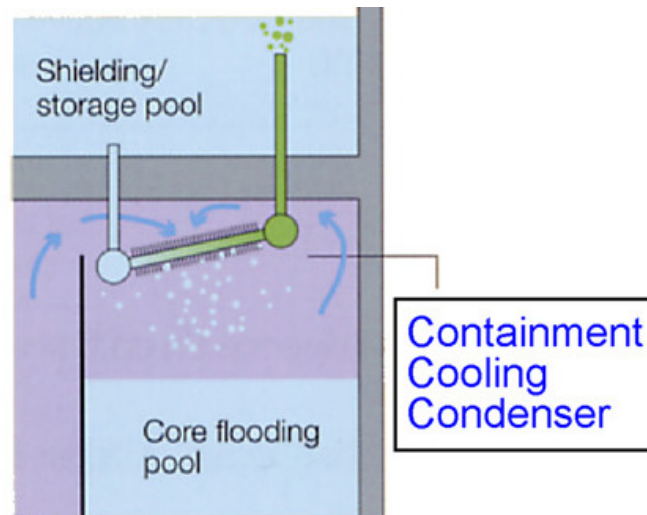
Suojarakennus on suunniteltu pitämään radioaktiiviset aineet sisällään kaikissa mahdollisissa tilanteissa. Suojarakennusta voidaan itsessään pitää yhtenä passiivisena järjestelmänä.



Kuva 9. KERENAN järjestelmät. (STOSIC Z.V et al. 2008,11.)

3.2.1 Suojarakennuksen lauhdutin

Suojarakennuksen lauhdutin (PCCS, Passive containment cooling system), esitetty kuvassa 10, poistaa reaktorin jälkilämpöä suojarakennuksen ylemmästä kuivatilasta suojarakennuksen yläpuolella olevaan varastoaltaaseen. Sen toiminta perustuu puhtaasti tiheyseroihin suojarakennuksen ja varastoaltaan välillä, eikä se tarvitse käynnistyäkseen minkäänlaista ulkoista signaalia.

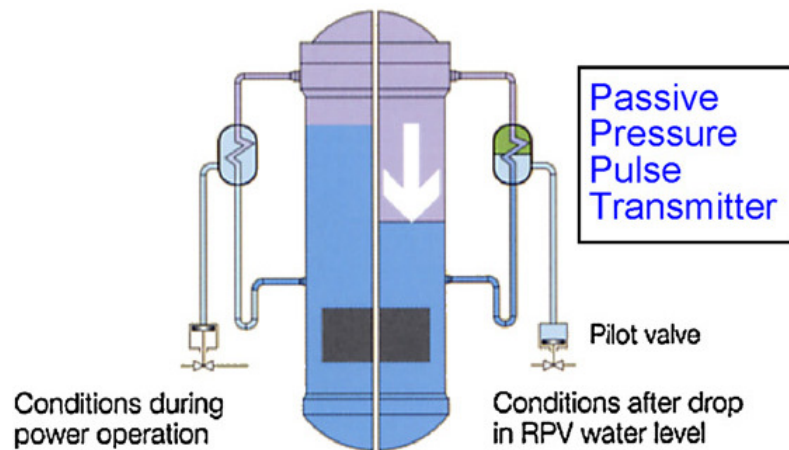


Kuva 10. Suojarakennuksen lauhdutin. (STOSIC Z.V et al. 2008,12.)

Lauhduttimet on sijoitettu suojarakennuksen kattoon hieman yläviistoon, mikä osaltaan helpottaa virtauksen käynnistymistä lauhduttimen ja varastoaltaan välillä. Lauhduttimen tehtävänä on lauhduttaa kuivatilaan paineastiasta paineenalennuksen tai LOCA:n aikana purkautuvaa höyryä ja palauttaa jäähdyte takaisin sydämentulvitusaltaisiin, jotka on sijoitettu niiden alapuolelle.

3.2.2 Passiivinen painepulssilähetin

Passiivinen painepulssilähetin (PPPT, Passive pressure pulse transmitter) toimii täysin passiivisesti. Painepulssilähettimet laukaisevat reaktorin pikasulun, ohjaavat päähöyrylinjojen sisempiä eristysventtiilejä suojarakennuksen eristämiseksi sekä käynnistävät paineastian automaattisen paineenalennuksen. Lähettimen toiminta on esitetty kuvassa 11. Normaalitilassa painepulssianturin lämmönvaihtimen primääripuoli on täynnä vettä. Paineastian vesipinnan laskiessa vesipinta laskee myös PPPT:n lämmönvaihtimessa. Lämmönvaihtimeen alkaa virrata höyryä, joka johtaa lämpötilan ja paineen nousuun lähettimen sekundaaripuolen vesipiirissä. Tämä laukaisee pilottiventtiilin, joka osaltaan ohjaa järjestelmiä.

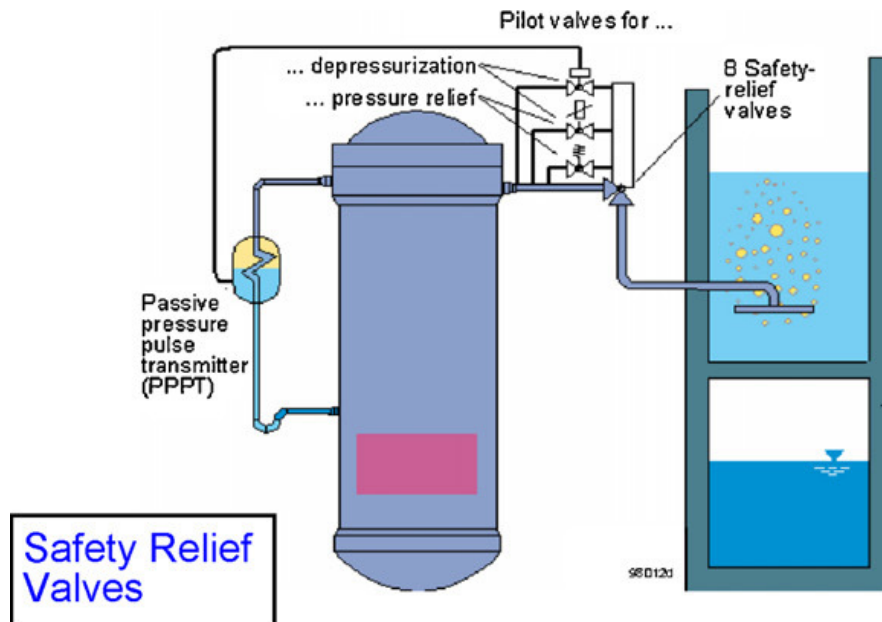


Kuva 11. Passiivinen painepulssilähetin. (STOSIC Z.V et al. 2008,12.)

Painepulssilähettämiä on neljä kappaletta. Lähettimet on toteutettu 2/2-periaatteella. Suojaustoiminnon laukaisemiseksi riittää signaali kahdesta painepulssilähettimestä. Yhden lähettimen laukeaminen ei vielä johda pikasulkuun ja suojarakennuksen eristykseen, eikä yhden lähettimen menetys johda koko järjestelmän menetykseen. (STOSIC Z.V et al. 2008)

3.2.3 Reaktorin ylipainesuojausjärjestelmä

Ylipainesuojausjärjestelmän (SRV, Safety relief valves) tehtävänä on estää paineen nousu yli paineastian suunnittelurajojen sekä aloittaa automaattinen paineenalennus LOCA:n tapauksessa. Vakavien onnettomuuksien aikana SRV estää sydänsulan paineenalaisen purkautumisen paineastiasta. Järjestelmä on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Reaktorin ylipainesuojajärjestelmä. (STOSIC Z.V et al. 2008,12.)

Järjestelmä koostuu kahdeksasta venttiilistä. Venttiileitä on kahdenlaisia ja kutakin neljä kappaletta. Automaattisen paineen laskun pääventtiilit on varustettu solenoidilaukaisulla ja PPPT:n pilottiyksiköillä. ylipainesuojajärjestelmän laukeamisen varmistamiseksi on käytetty erilaisuusperiaatetta, joten venttiilit on varustettu sekä solenoidilaukaisulla että jousiviritteisillä venttiileillä. Paine purkautuu putkilinjoja myöten sydämen tulvitusaltaaseen höyrystysammuttimen (Steam quencher) läpi, suojaten voimakkaan höyrystyslaitteen haitalliselta vaikutukselta altaan eheyteen. (STOSIC Z.V et al. 2008,11. Fennovoima 2009,271-280)

3.3 Tutkimus

KERENAN kehitystyö on esitellyistä vaihtoehdoista pisimmällä. Seuraavissa taulukoissa 1-3. on esitetty koeohjelmia, joita KERENA:n suhteen on suoritettu. Suomessa LUT on ollut mukana KERENAN tutkimuksessa yhdessä VTT:n ja TVO:n kanssa. Areva:lla on suunnitelmat jatkaa täyden mittakaavan koeohjelmaa Karlsteinin koelaitoksessa.

Taulukko 1. Pienennetyn mittakaavan kokeet. (STOSIC Z.V et al. 2008, 21.)

Pikasulkujärjestelmän höyryakut	Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Hätäboorausjärjestelmä höyryakuilla	Lappeenrannanteknillinen yliopisto
Passiivinen sydämentulvitusjärjestelmä	Julich Research Center, Saksa
Passiivinen ulosvirtausrajoitin	AREVA NP Karlstein, Saksa

Taulukko 2. Kokeet karsitulla järjestelmäkokooppaalla. (STOSIC Z.V et al. 2008, 21.)

Eristyslauhduutin	Julich Research Center, Saksa
Suojarakennuksen lauhduutin	Paul Scherrer Institute, Sveitsi
Paineastian ulkopuolinen jäähditys	AREVA NP Erlangen, Saksa

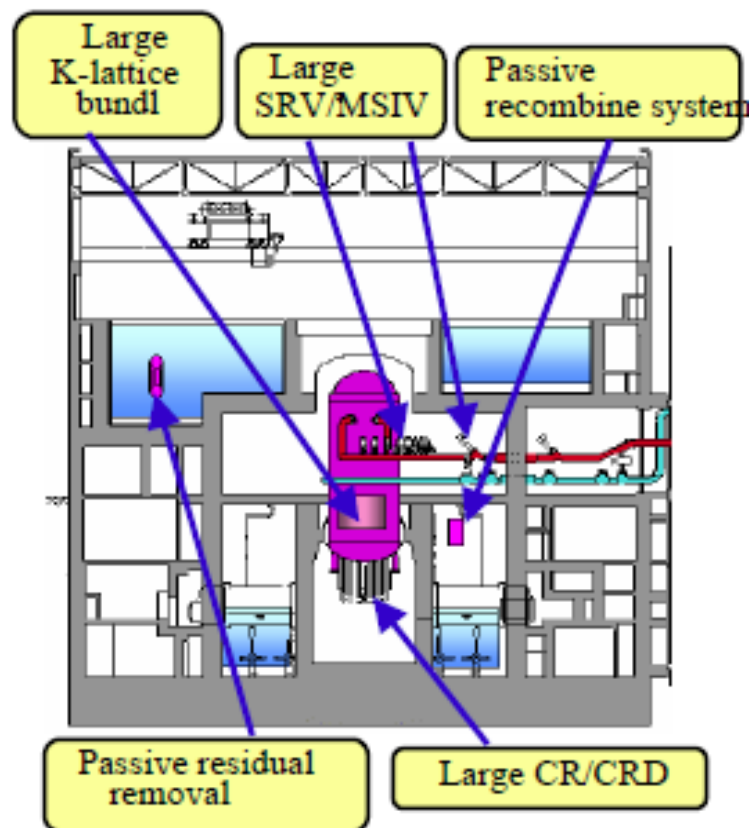
Taulukko 3. Täyden mittakaavan kokeet. (STOSIC Z.V et al. 2008, 21.)

Passiivinen painepulssilähetin	AREVA NP Karlstein, Saksa
Puhallusputki	AREVA NP Karlstein, Saksa
Kaksihaarainen höyrysuihkusammutin	AREVA NP Karlstein, Saksa
ATRIUM 12 polttoaine elementti	AREVA NP Karlstein, Saksa

Tietokonemallinnuksessa on käytetty ainakin 11 eri simulointikoodia mm, RELAP5, RAMONA. (STOSIC Z.V et al. 2008.)

4. ABWR - PASSIIVISET JÄRJESTELMÄT

ABWR:n kehitysversioissa ei ole paljon poikkeamia toisiinsa verrattuna, mutta kuitenkin joitain eroja on löydettävissä. Esimerkiksi ABWR-II:ssa ei ole AB1600:n mukaista GDCS järjestelmää. ABWR-II vastaa paremmin Suomeen tarjottua kehitysversiota. Seuraavissa kappaleissa esitellään molempia kehitysversioita. ABWR-II on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. ABWR-II suojarakennus ja järjestelmät. (IAEA 2004, 109.)

4.1 Reaktorin järjestelmät

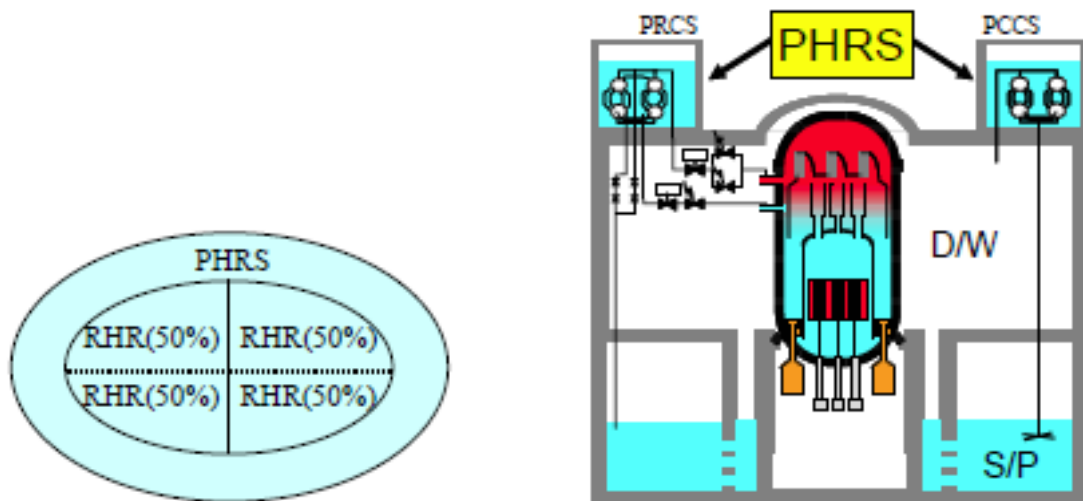
Seuraavissa kappaleissa esitellään reaktoriin liittyviä järjestelmiä. Reaktorin järjestelmiä ovat eristyslauhdutinjärjestelmä, hydraulinen pikasulkujärjestelmä ja sydämen tulvitus.

4.1.1 Eristyslauhdutinjärjestelmä

Eristyslauhdutinjärjestelmä (PRCS/IC - Passive Reactor Cooling System / isolation condenser), esitetty kuvassa 14, koostuu 4 x 33 % luonnonkiertolämmönvaihtimista.

Järjestelmän tehtävänä on poistaa jälkilämpö reaktorista pähöyrylinjasulun tai pienen LOCA:n tapauksessa.

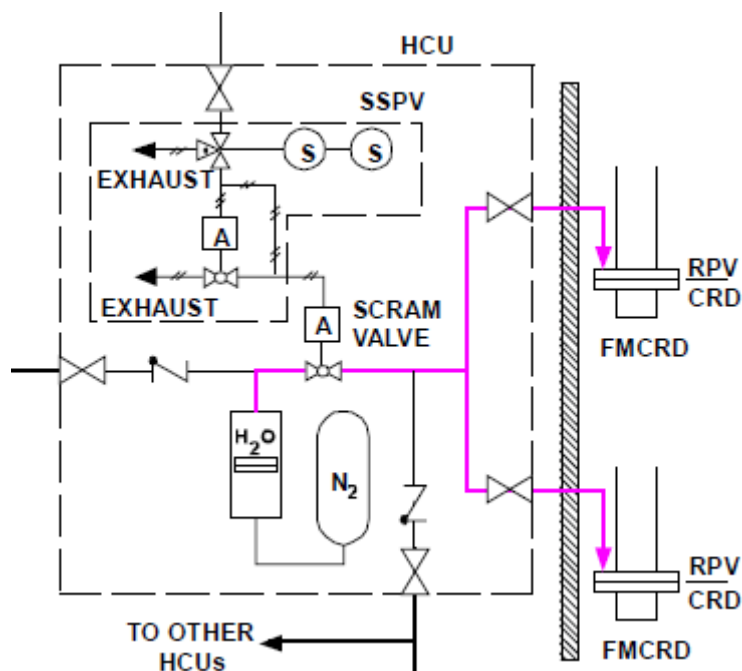
Järjestelmän lämmönvaihtimet sijaitsevat kahdessa altaassa suojarakennuksen ulkopuolella suojarakennuksen lauhduttimien kanssa. Eristyslauhduksimet saavat höyryn suoraan paineastiasta putkilinjaa myöten. Lämmönvaihtimissa höyry lauhtuu vedeksi ja valuu takaisin paineastiaan paluulinjaa myöten. Järjestelmä mahdollistaa paineenhallinnan ja jälkilämmönpoiston ilman, että jäähdytettä menetetään paljon paineenalennuksen yhteydessä lauhdutusaltaaseen tapahtuvan puhalluksen seurauksena. (Säteilyturvakeskus 2009, 6-21, ARAI K. et al. 2008, 5-7.)



Kuva 14. ABWR-II passiiviset järjestelmät. (IAEA 2004,100.)

4.1.2 Pikasulkujärjestelmä

ABWR:n hydraulinen pikasulkujärjestelmä (HCU Hydraulic control unit) varmistaa reaktorin turvallisen sammutuksen. Järjestelmän virtauskaavio on esitetty kuvassa 15. Hydraulisessa pikasulkujärjestelmässä on työkaasuna paineistettu typpi, joka lauetessaan työntää edessään olevan veden säätösauvakoneiston hydrauliseen työsylinteriin. Tämä mahdollistaa nopean säätösauvojen työntymisen reaktoriin. Hydraulista järjestelmää varmistaa 2 x 100 % paineistettu boorivesijärjestelmä.



Kuva 15. ABWR HCU:n virtauskaavio toimintatilanteessa. (Beard J.A. 2007, 9.)

Yksi hydraulinen yksikkö ohjaa kahta säätösauvaa. Järjestelmän ohjaamien hydraulisten yksiköiden ohjaamat säätösauvat ovat hajautettu sydämeen pikasulun varmistamiseksi. Hajauttaminen varmistaa sydämen saattamisen sammutustilaan, vaikka yksittäisvika estäisi eräiden yksiköiden toiminnan. (Beard J.A. 2007, 6-9. Säteilyturvakeskus 2009, 11.)

4.1.3 Sydämen tulvitusjärjestelmä

Tulvitusjärjestelmä toimii onnettomuustilanteessa yhdessä taseuslinjan kanssa reaktorisydämen tulvituksessa. Sydämen tulvituksen heikkoutena on, että sen toiminta alkaa vasta, kun reaktorin paine on laskenut riittävästi. Siihen asti järjestelmä toimii aktiivisesti pumppujen varassa. (ARAI K. et al. 2008, 5-7.) Kyseistä järjestelmää ei kuitenkaan ole suunniteltu lisättäväksi Suomeen tarjottavaan versioon, vaan se on AB1600-kehitysversiossa. Suomeen tarjotussa versiossa sydämentulvitus tapahtuu aktiivisten korkea- ja matalapainehätäjäähdytysjärjestelmien avulla. (Säteilyturvakeskus 2009, 6-21.)

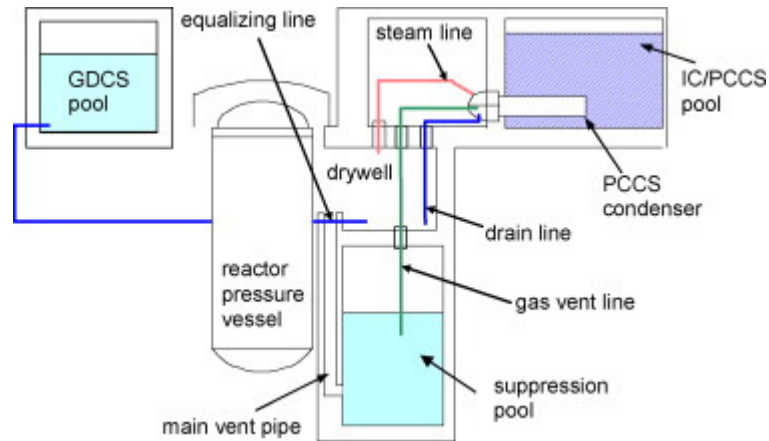
4.2 Suojarakennuksen järjestelmät

Seuraavissa kappaleissa esitellään suojarakennuksen järjestelmiä. Suojarakennuksen järjestelmiä ovat suojarakennuksen lauhdutin ja sydänsieppari.

4.2.1 Suojarakennuksen lauhdutin

Suojarakennuksen lauhdutin, esitetty kuvassa 16, koostuu eristyslauhduuttimien tapaan 4 x 33 % luonnonkiertolämmönvaihtimista, jotka sijaitseva kahdessa lauhdutusvesialtaassa suojarakennuksen ulkopuolella. Järjestelmä koostuu höyrylinjasta, joiden kautta suojarakennukseen vapautunut höyry pääsee vapaasti purkautumaan ja siitä edelleen lauhduttimiin, lauhtuakseen takaisin vedeksi. Lauhde valuu purkulinjaan, joka johtaa jäähdytettä ylempään kuivatilaan. Lauhduttimissa on kaasuyhde lauhtumattomille kaasuille lauhdutusaltaaseen (SP, Supression Pool), jotta lauhduttimien lämmönsiirto ei heikkenisi niihin kerääntyvien kaasujen takia. Onnettomuustilanteessa korkeapaineinen kuuma höyry pääsee ylempään kuivatilaan, mikä paine- ja lämpötilaeron aikaansaamana käynnistää luonnonkierron. Kuivatilaan päässyt höyry ja kaasu alkavat kiertää eristyslauhduuttimeen höyrylinjan kautta. Lauhduttimelta palaava vesi muodostaa yhdessä sydämen tulvitusaltaan ja reaktorista purkautuneen jäähdytteen kanssa vesitilan ylempään kuivatilaan, josta se kulkee taseuslinjoja pitkin reaktorin paineastiaan. Taseuslinjat avautuvat, kun jäähdytepinna paineastiassa laskee. Näin syntyy lauhduuttimen ja paineastian välille kierto poistaen jälkilämmön reaktorista ja pitäen sen jatkuvasti tulvitettuna. (ARAI K. et al. 2008, 5-7.)

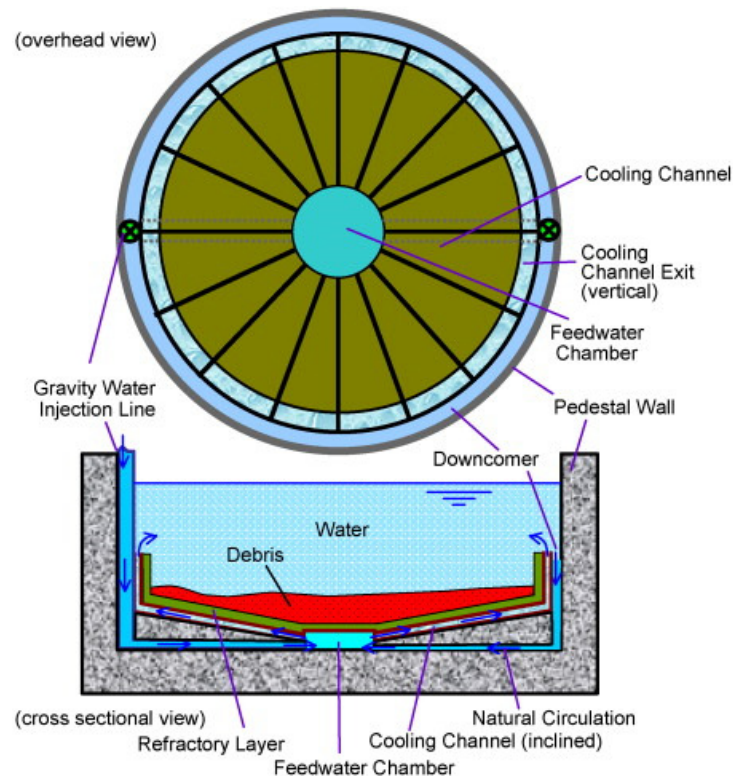
Suomeen tarjottavassa versiossa ei ole sydämen tulvitusjärjestelmää, vaan suojarakennuksen ylätilassa olevan lauhdutusaltaan vesi pumpataan imusiivilöiden läpi aktiivisella hätäjähdytysjärjestelmällä takaisin reaktoriin. (Säteilyturvakeskus 2009, 12.)



Kuva 16. AB1600 Passiivisen järjestelmän toimintakaavio. (ARAI K. et al. 2008, 5.)

4.2.2 Sydänsieppari

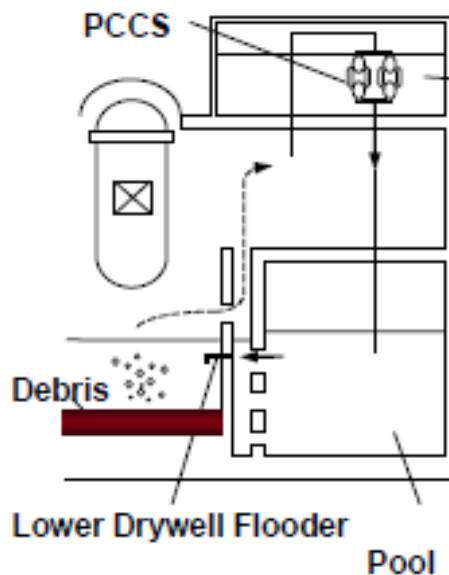
AB1600 ja ABWR-II on varustettu vakavien onnettomuuksien varalta sydänsiepparilla, jonka kapasiteetti on jäähdyttää noin 300 tonnia (AB1600) reaktori-sulaa. Sydämen sulamisonnettomuudessa reaktorissa sulanut sydänmassa sulattaa tiensä paineastian läpi alemmassa kuivatilassa olevaan sydänsieppariin. Sydänsieppari on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. AB1600 sydänsieppari. (ARAI K. et al. 2008, 6.)

Sydänsieppari toimii yhdessä sydämen tulvitusjärjestelmän kanssa luonnonkierrolla. Lämmönsiirto sydänsiepparilta tapahtuu passiivisesti ja muodostunut höyry lauhtuu

suojarakennuksen lauhduttimessa ja palaa takaisin ylemmän ja alemman kuivatilan kautta. (ARAI K. et al. 2008, 5-7)

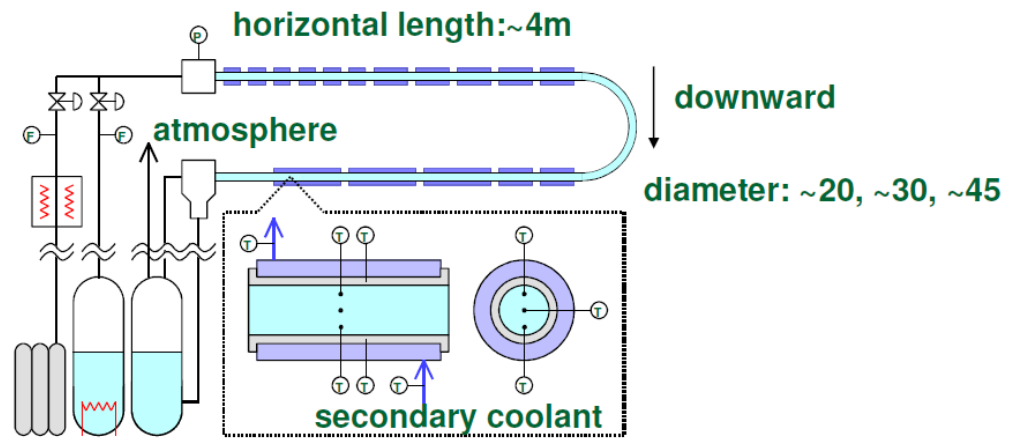


Kuva 18. ABWR-II:n sydänsiepparin jäähdytys PCCS järjestelmällä. (IAEA 2006, 53.)

ABWR-II:ssa ei ole sydämen tulvitusjärjestelmää. Siinä jäähdytys tapahtuu vastaavasti kuin AB1600:ssa, mutta lauhtunut jäähdyte palaa suoraan paluulinjaa myöden lauhdutusaltaaseen, ja sieltä edelleen sydänsieppariin. Sydänsiepparin jäähdytyksen toiminta on esitetty kuvassa 18.

4.3 Tutkimus

JAERI (Japan Atomic Energy Research institute) on suorittanut suojarakennuksen lauhduttimelle sarjan erilaisia kokeita, joissa on koelaitteistolla tutkittu PCCS-lauhduksen lämmönsiirtoa keskittyen vaakatasoisiin lämmönvaihtimiin. Koesarjassa tutkittiin yksittäisen lämmönsiirtoputken toimintaa, kuvassa 19, sekä kokonaisen putkinipun käyttäytymistä simuloidussa onnettomuudessa. Saatuja koetuloksia on käytetty RELAP5/ACE-3D simulointiohjelman validointiin. Koetulosten perusteella näyttää siltä, että PCCS-järjestelmä pystyy pitämään suojarakennuksen paineen nousun suunnittelurajojen sisäpuolella vakavassa onnettomuudessa. (Yonomoto T. et al. 2005)



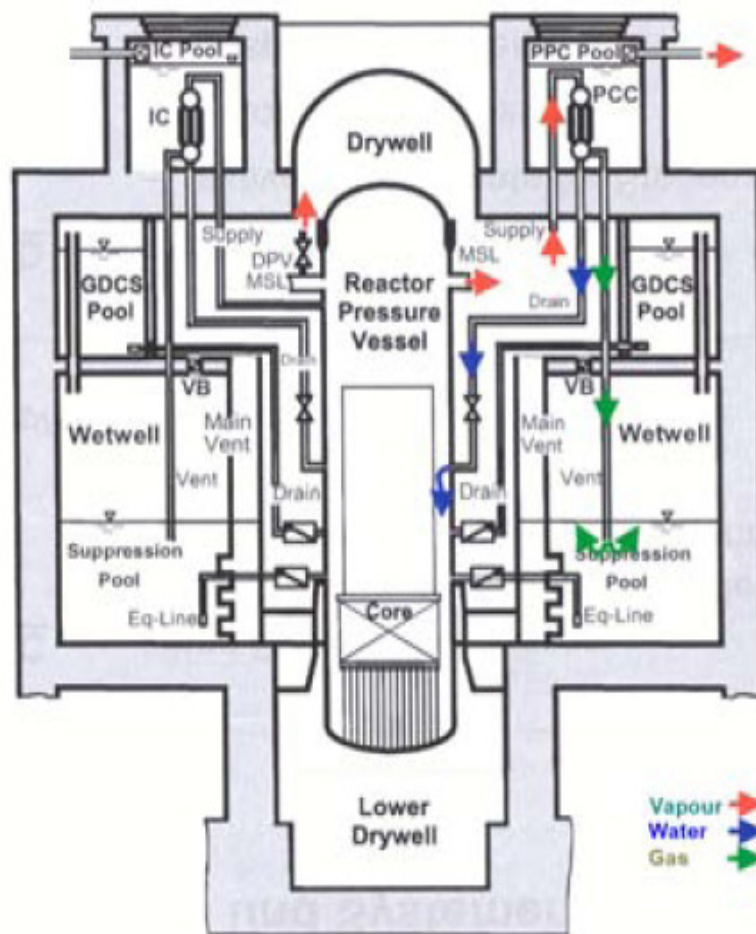
N2 gas tank boiler

Kuva 19. JAERI:n koelaitteiston yksinkertaistettu kuva. (Yonomoto T. et al. 2005,6.)

Laitostoimittaja on tehnyt suunnitelmat sydänsiepparin lämmönsiirtokokeista ja kokeet pienen mittakaavan laitteistolla on aloitettu. Täyden mittakaavan laitteiston koeohjelman on määrä alkaa vuoden 2009 aikana. (Säteilyturvakeskus 2009, 10-11.)

5. ESBWR - PASSIIVISET JÄRJESTELMÄT

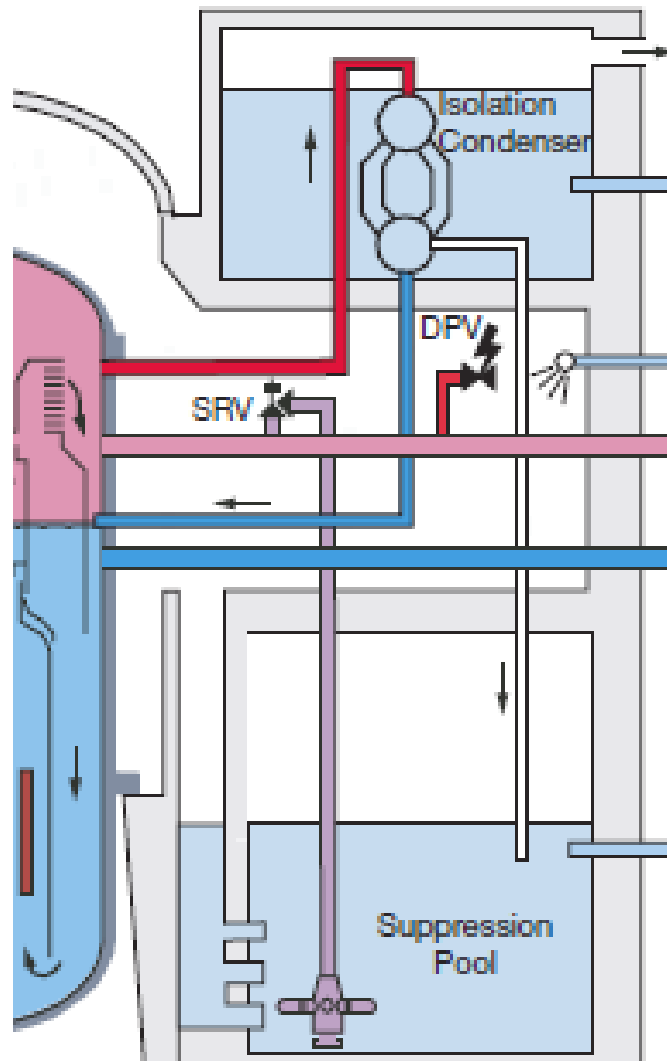
ESBWR:n toiminta perustuu luonnonkiertoon eli siinä ei ole ollenkaan pääkiertopumppuja. Reaktori on suunniteltu huomattavasti korkeammaksi kuin aiemmat BWR:t, jotta ylä- ja alapään välinen paine-ero saadaan tarpeeksi suureksi. Korkea rakenne on tarpeen, jotta luonnonkierrolla päästään halutulle tehotasolle. ESBWR:n paineastian korkeus on aikaisempiin kiehutusvesireaktoreihin nähden massiivinen. Tätä vaikutelmaa lisää matalampi sydämen korkeus. Matala ja leveä sydän voi olla ongelmallinen luonnonkierrolla. Tämän mittakaavan sydämällä luonnonkiertoa ei ole kokeellisesti testattu. Sydämen kaksifaasivirtauksen käyttäytyminen aukko-osuuden suhteen ja tästä mahdollisesti seuraavat tehon oskillaatiot ja vääristymät sydämessä voivat olla hyvin arvaamattomia. Nämä ilmiöt ovatkin ESBWR- tutkimuksen ja simuloinnin keskipisteessä, etenkin kun laitoksessa ei ole pääkiertopumppuja mahdollisten hallitsemattomien heilahtelujen rauhoittajana.



Kuva 20. ESBWR:n suojarakennus ja järjestelmät. (IAEA 2005, 105.)

5.1.1 Eristyslauhduutinjärjestelmä

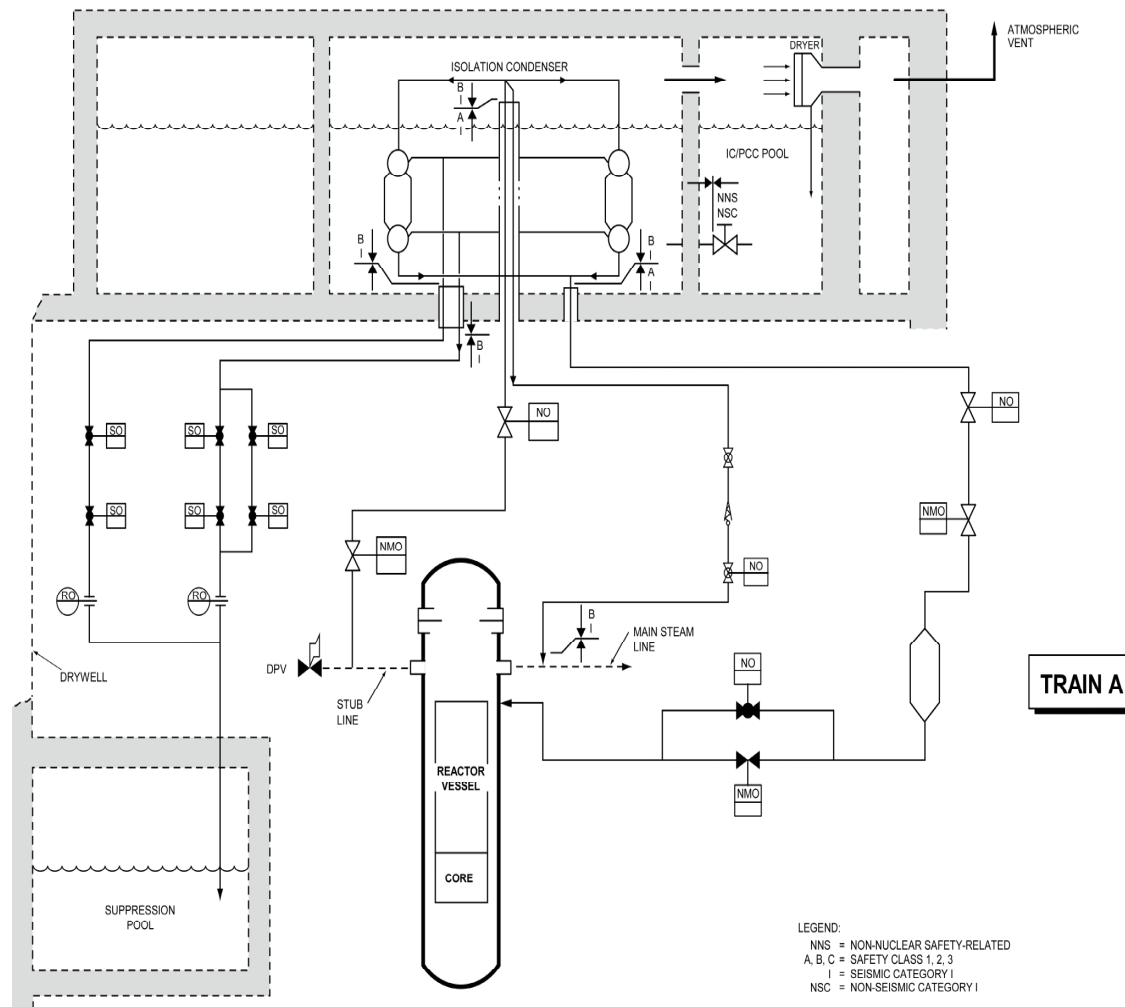
Eristyslauhduutinjärjestelmä, kuvassa 22, on suunniteltu ja mitoitettu siten, että se kykenee poistamaan reaktorin jälkilämmön ja takaamaan reaktorille turvallisen tilan 72 tunniksi ilman operaattoritoimintaa hätätilanteissa, joissa ei ole kyse LOCA:sta. Tämän jälkeen lauhdutinaltaan vettä on lisättävä.



Kuva 22. Eristyslauhduutin. (HINDS D. 2006, 4.)

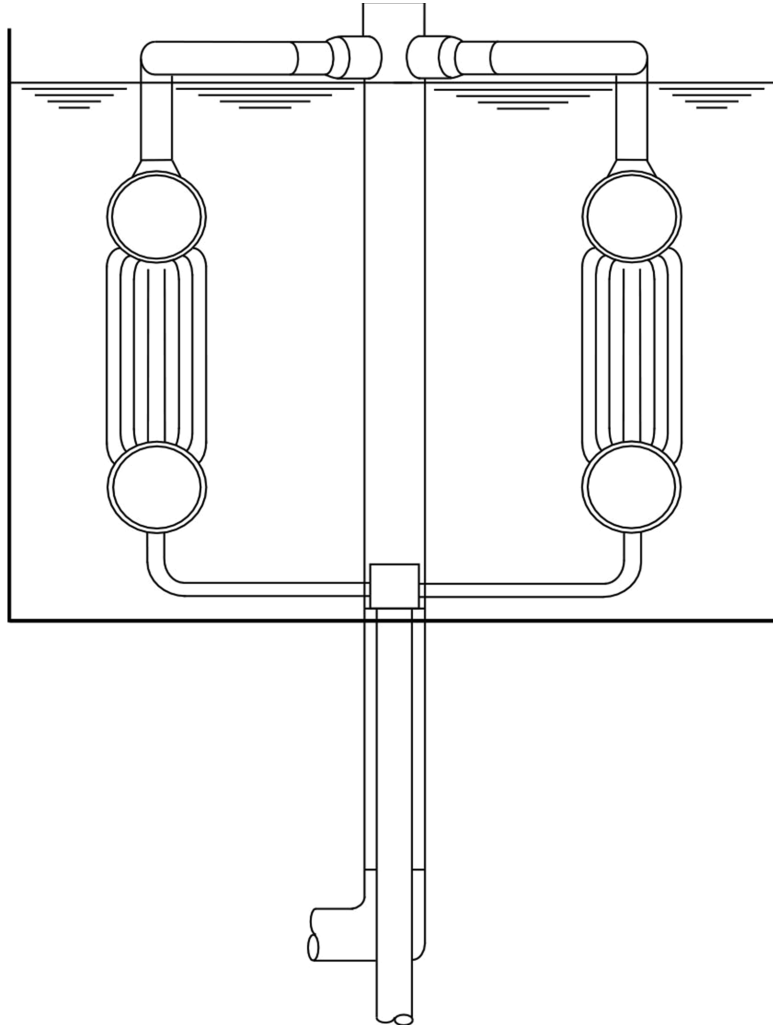
Lauhduutinjärjestelmä toimii passiivisesti luonnonkierrolla ja huolehtii jälkilämmönpoistosta, jos normaaliyhteys turpiinilauhduttimeen ei ole käytettävissä. Järjestelmä toimii varajärjestelmänä esimerkiksi ulkoisen sähköverkon menetystilanteessa ja LOCA:n aikana. Lauhduttimen tarkoitus lämmönsiirron ohella on huolehtia osaltaan reaktorin paineenhallinnasta ja vähentää tarvetta erillisen paineenalennusjärjestelmän ulospuhallukselle lauhdutusaltaaseen tai kuivatilaan.

esimerkiksi päänhöyryventtiilien sulkeuduttua. Tarkempi virtauskaavio on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Eristyslauhduksen virtauskaavio (GE-Hitachi 2007a, 26.)

Järjestelmän käynnistyessä lauhduttimissa oleva vesi vapautuu reaktoriin paluulinjan venttiilien avautuessa ja lisää reaktoriveden määrää. Eristyslauhduksimet ovat erillisessä tilassa suojarakennuksen yläpuolella ja ne on varustettu lauhtumattomien kaasujen ulospuhallusjärjestelmällä. Lauhduttimeen kertyneet lauhtumattomat kaasut heikentävät lauhduttimien lämmönsiirtokapasiteettia, joten niitä on aika-ajoin puhallettava lauhdutusaltaaseen. Eristyslauhduksinaltaassa oleva vesi alkaa ennen pitkää höyrystyä ja höyry tuuletetaan ilmakehään kosteudenerottimen läpi. Eristyslauhduksimien säteilytasoja seurataan mahdollisten vuotojen varalta ja korkean tason tapauksessa kyseinen lauhdutin erotetaan automaattisesti radioaktiivisen päästön estämiseksi. (GE-Hitachi 2007a, 175, 186-187.)

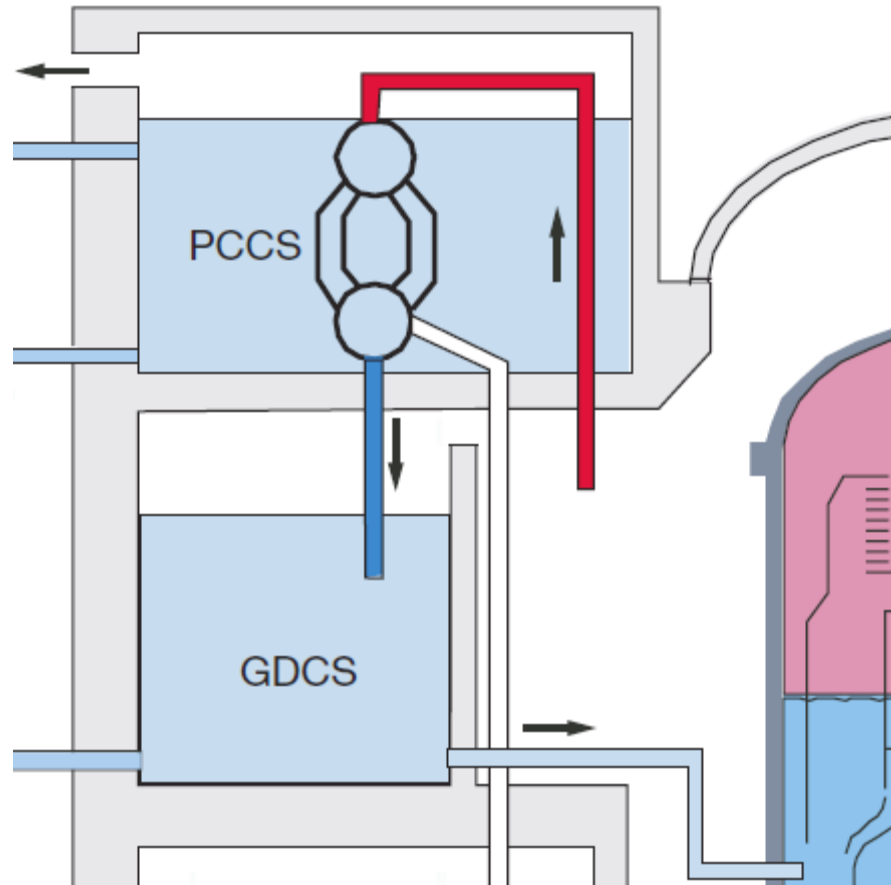


Kuva 24. Eristyslauhdutin-yksikkö (GE-Hitachi 2007a, 170.)

Järjestelmä koostuu neljästä erillisestä korkeapainelauhduttimesta, joista jokaisessa on kaksi identtistä lauhdutinyksikköä, esitetty kuvassa 24. Lauhduttimissa höyry jakautuu molemmille yksiköille ja lauhtunut jäähyte palaa alaosasta takaisin kokoajalinjaan ja takaisin kiertoon. (IAEA 2004, 220)

5.1.2 Sydämen tulvitusjärjestelmä

Painovoimatoiminen sydämen tulvitusjärjestelmä, GDCS 4 x 50 %, koostuu kolmesta tulvitusaltaasta ja se toimii yhdessä suojarakennuksen lauhduttimen kanssa. Järjestelmän tarkoituksena on vakavan onnettomuuden tapauksessa taata reaktorisydämen tulvitus jäähdytteellä. Järjestelmä on esitetty alla kuvassa 25.

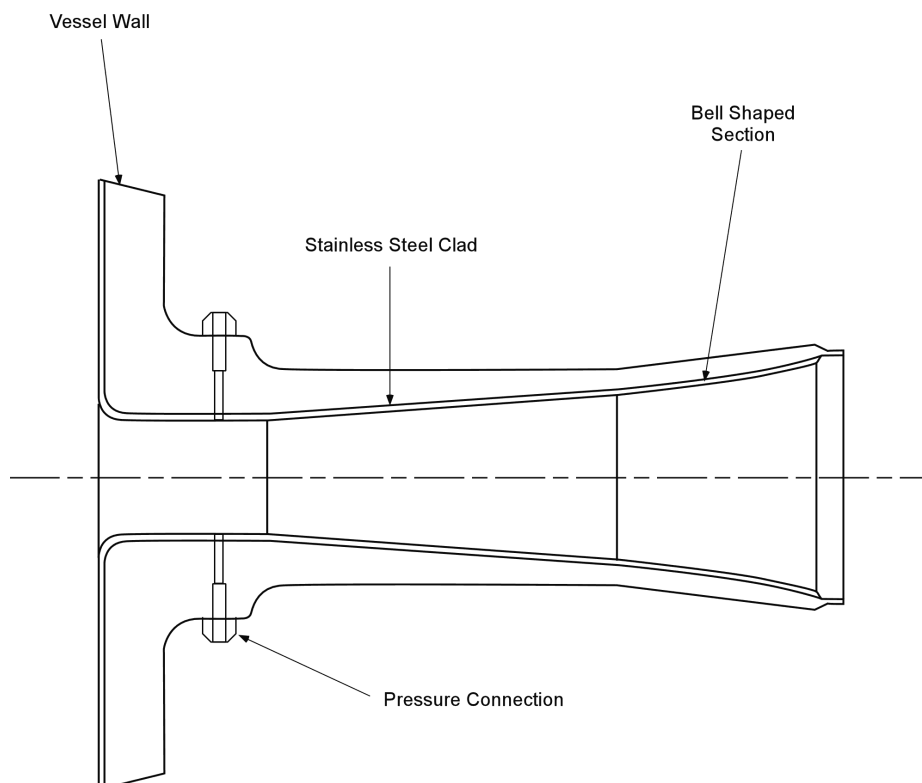


Kuva 25. Sydämen tulvitusjärjestelmä (HINDS D. 2006, 4.)

Järjestelmä vaatii tulvituslinjassa olevien murtotappiventtiilien avautumisen ja paineenalennusjärjestelmän toiminnan, jonka jälkeen sydämen tulvitus tapahtuu painovoimaisesti. Suojarakennuksen lauhduttimien paluulinjat johtavat lauhtuneen veden takaisin tulvitusaltaisiin. GDCS- järjestelmällä tulvitetaan vakavien onnettomuuksien tapauksissa sydänsieppari erillistä alemman kuivatilan tulvituslinjaa pitkin. (Säteilyturvakeskus, 2009, 29, IAEA, 2004, 220)

5.1.3 Päähörylinjasuutin ja virtausrajoitin

Kuten KERENA:n vastaavassa ei ESBWR:n päähörylinjasuuttimessakaan ole liikkuvia osia. GE-Hitachin omissa testeissä on havaittu suuttimen kasvattavan hieman höyrynkosteutta.

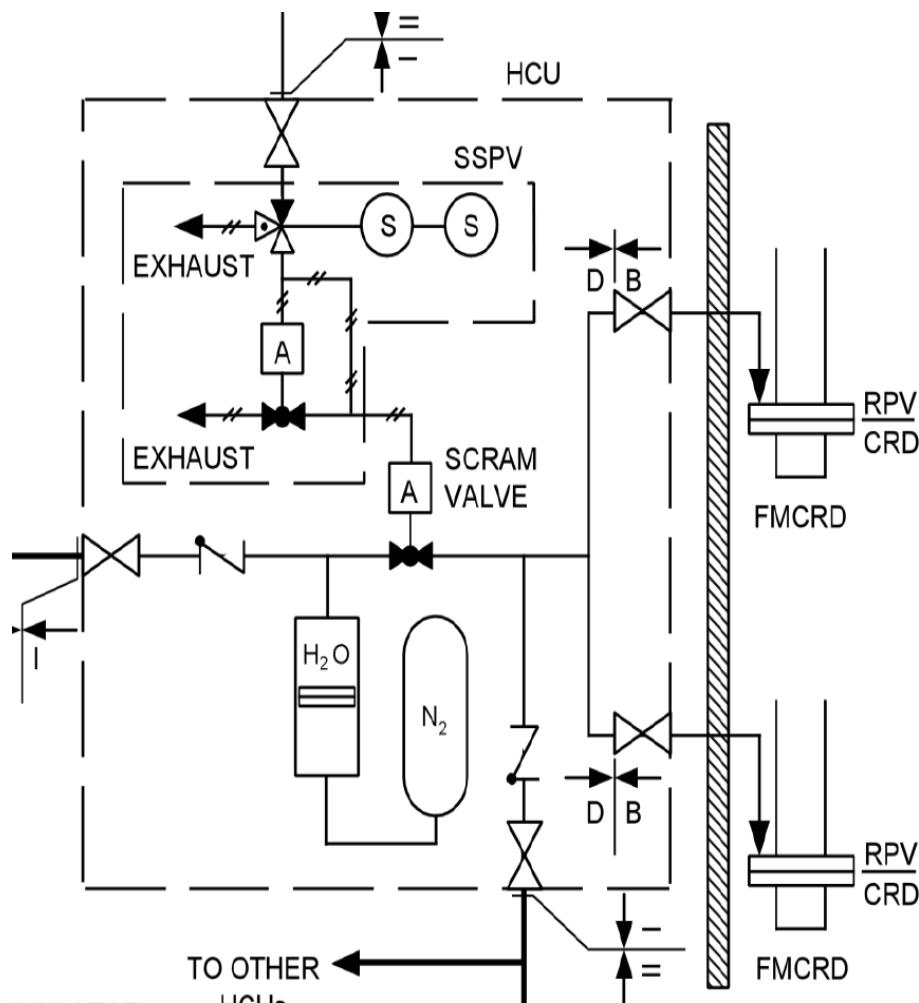


Kuva 26. Päähöryrsuutin. (GE-Hitachi 2007b, 167.)

Suuttimet on suunniteltu rajoittamaan virtausta reaktorista suojarakennuksen ulkopuolisen höyrylinjarikon tapauksessa sekä rajoittamaan radioaktiivisen materiaalin ja jäädytteen pääsyä ulos suojarakennuksesta ennen päähörylinjan eristysventtiilien sulkeutumista. Suuttimet on suunniteltu kestävämmän paine-ero päähörylinjan täydellisen katkon aikana ja niihin asennetut paineanturit välittävät päähörylinjan eristysventtiileille sulkeutumiskäskyn, jos höyryvirtaus suuttimien läpi ylittää suunnitteluarvot. Päähöryrsuuttimen leikkauskuva on esitetty kuvassa 26. (GE-Hitachi 2007b, 122-123.)

5.1.4 Pikasulkujärjestelmä

Pikasulkujärjestelmä (FMCRD, Fine motion control rod drives) on hydraulinen järjestelmä, joka vastaa reaktorin nopeasta sammuttamisesta. Sähköinen järjestelmä vastaa normaaliolosuhteissa säätösauvojen operoinnista. Kuvassa 26 on esitetty hydraulisen pikasulkujärjestelmän prosessikaavio.



Kuva 27. Hydraulisen pikasulkujärjestelmän prosessikaavio. (GE-Hitachi, 2007a, 85.)

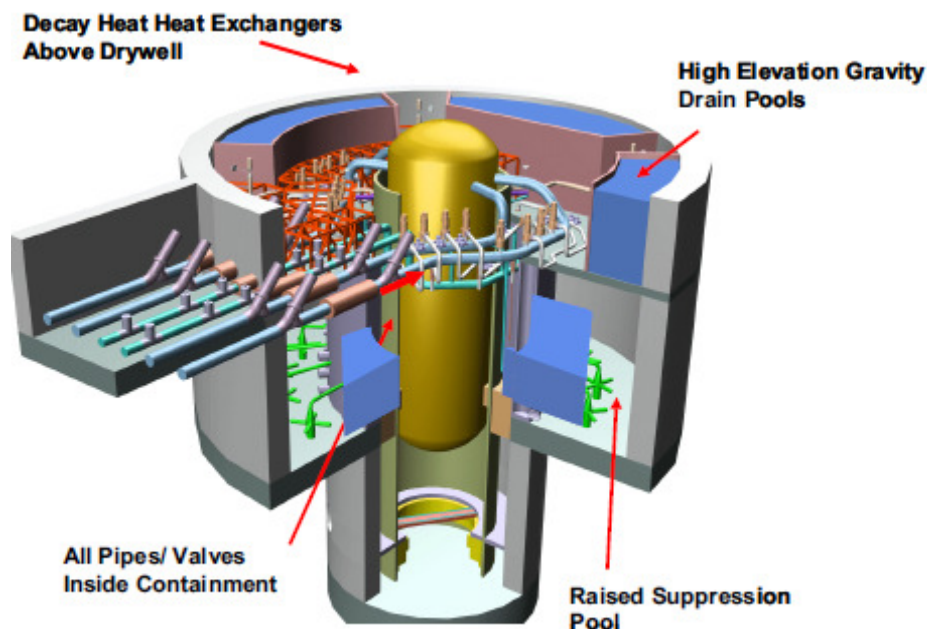
Järjestelmän työkaasuna toimii paineistettu typpi, joka lauetessaan työntää edessään olevan vesisäiliön veden säätösauvakoneiston hydraulikan työsylinteriin. Yksi hydraulinen yksikkö ohjaa kahta säätösauvaa. Järjestelmän ohjaamien hydraulisten yksiköiden ohjaamat säätösauvat ovat hajautettuna ympäri sydäntä pikasulun varmistamiseksi. Hajauttaminen varmistaa sydämen saattamisen sammutustilaan, vaikka

yksittäisvika estäisi eräiden yksiköiden toiminnan. Hydraulista pikasulkua varmistaa passiivinen hätäboorausjärjestelmä 2 x 50 %. Sen toiminta perustuu hydraulisen järjestelmän tapaa paineistetulla tyypellä tapahtuvaan booriliuoksen syöttämiseen reaktoriin. (GE-Hitachi 2007a, 70-85, Säteilyturvakeskus 2009, 27.)

5.2 Suojarakennuksen järjestelmät

ESBWR:n suojarakennuksen leikkauskuva on esitetty kuvassa 28. Kuvasta nähdään suojarakennuksen järjestelmien pääpiirteinen sijoittuminen suojarakennuksen sisällä.

Kuvasta nähdään myös päähöyrylinjojen eristysventtiilit, jotka on sijoitettu suojarakennuksen sisä- ja ulkopuolelle. Suojarakennuksen järjestelmiä ovat suojarakennuksen lauhdutin, sydänsieppari sekä murtotappiventtiilit.

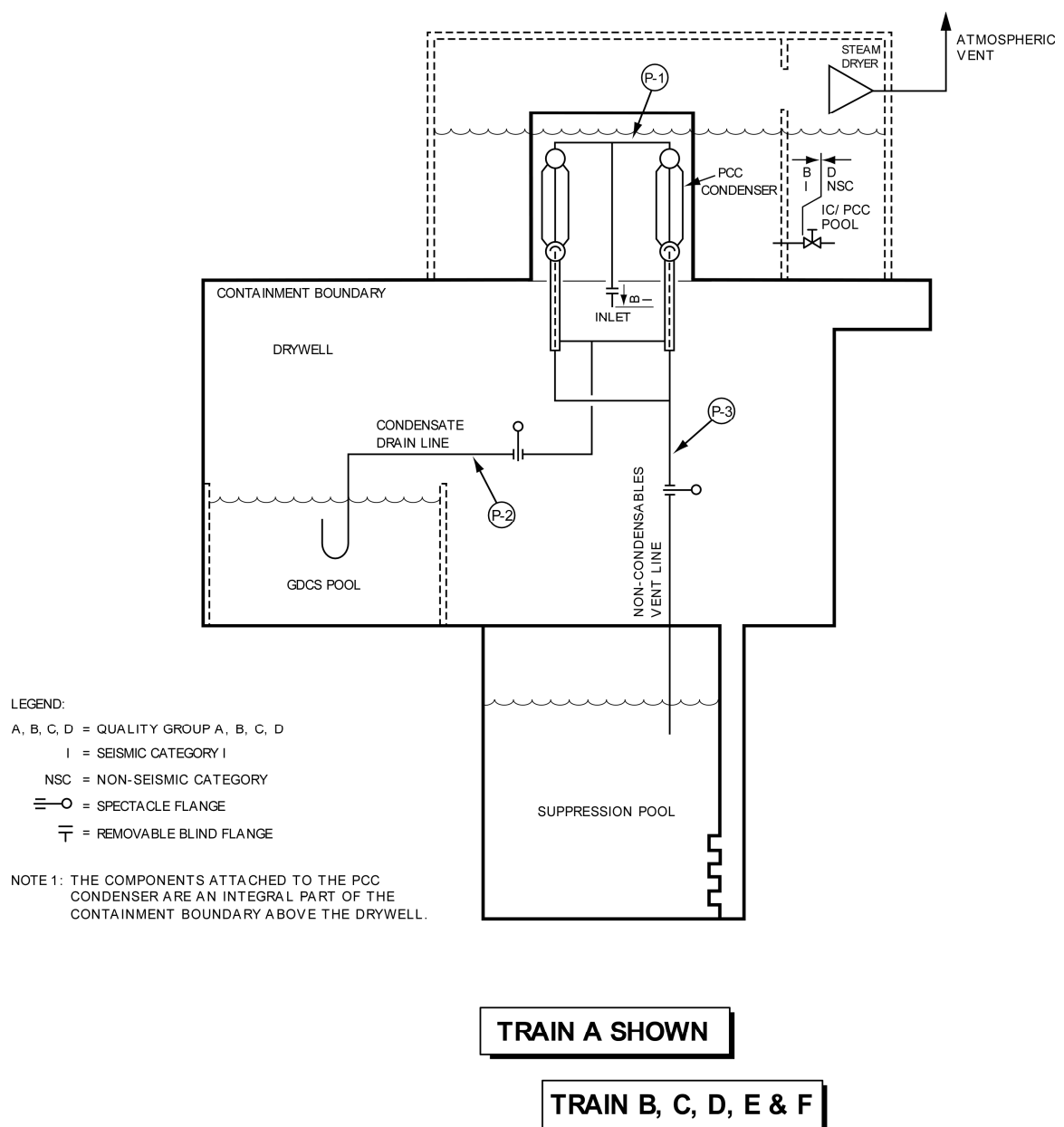


Kuva 28. ESBWR suojarakennuksen leikkauskuva. (IAEA 2004, 209.)

5.2.1 Suojarakennuksen lauhdutin

Järjestelmä koostuu 6 x 25 % matalapaine lämmönvaihtimista, jotka ovat yhteydessä johonkin kolmesta sydämen tulvitusaltaasta. Järjestelmän tehtävänä on putkirikko- tai reaktorin ylipainesuojaustilanteessa lauhduttaa kuivatilaan vapautuvaa höyryä takaisin vedeksi sydämen tulvitusaltaisiin ja hallita suojarakennuksen painetta ja lämpötilaa. Järjestelmä voi toimia tarvittaessa eristyslauhduuttimien varajärjestelmänä. Järjestelmän

lopullisena lämpönieluna toimii ilmakehä, jonne altaista höyrystyvä höyry lopulta johdetaan. Vastaavasti kuin eristyslauhdutin, suojarakennuksen lauhdutin koostuu kahdesta samanlaisesta yksiköstä, jotka lauhduttavat höyryä yhteen tulvitusaltaaseen. Järjestelmän lämmönvaihtimet sijaitsevat samoissa altaissa kuin eristyslauhduttimet suojarakennuksen yläpuolella. Ne on lokeroitu ja allasosioiden välissä on kynnykset, jotka estävät koko allasta tyhjentymästä, jos jokin altaan osa tyhjenee. Lauhduttimen toiminta on esitetty kuvassa 29.

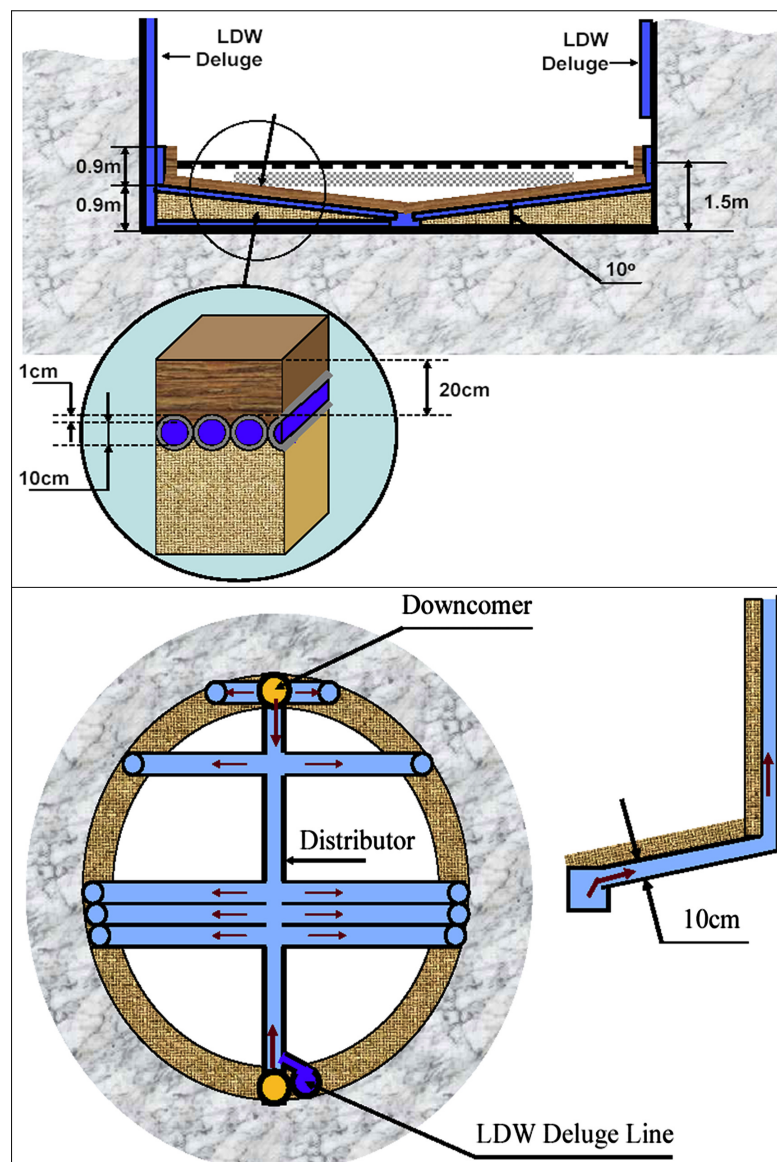


Kuva 29. Suojarakennuksen lauhduttimen toimintakaavio. (GE-Hitachi 2007c, 241.)

Lauhduttimen toiminta perustuu kuiva- ja märkätilan väliseen paine-eroon. Normaalityllassa järjestelmässä yksikään venttiili ei ole suljettu, joten se on aina käytettävissä. Lauhdutin voidaan kuitenkin erottaa huollon ajaksi sulkemalla järjestelmän ainoa venttiili. (Säteilyturvakeskus 2009, 21-37, IAEA 2004, 219-220.)

5.2.2 Sydänsieppari

ESBWR:n sydänsieppari (BiMAC, Basemat-internal Melt Arrest Coolability device), kuvassa 30, on varustettu kannella, joka suojaa varsinaista jäähdytysputkistoa putoavalta sydänsulalta. Järjestelmän toiminta perustuu siihen, että sydänsula saadaan sopivaan geometriaan luonnonkierrolla jäähdytetylle alustalle.

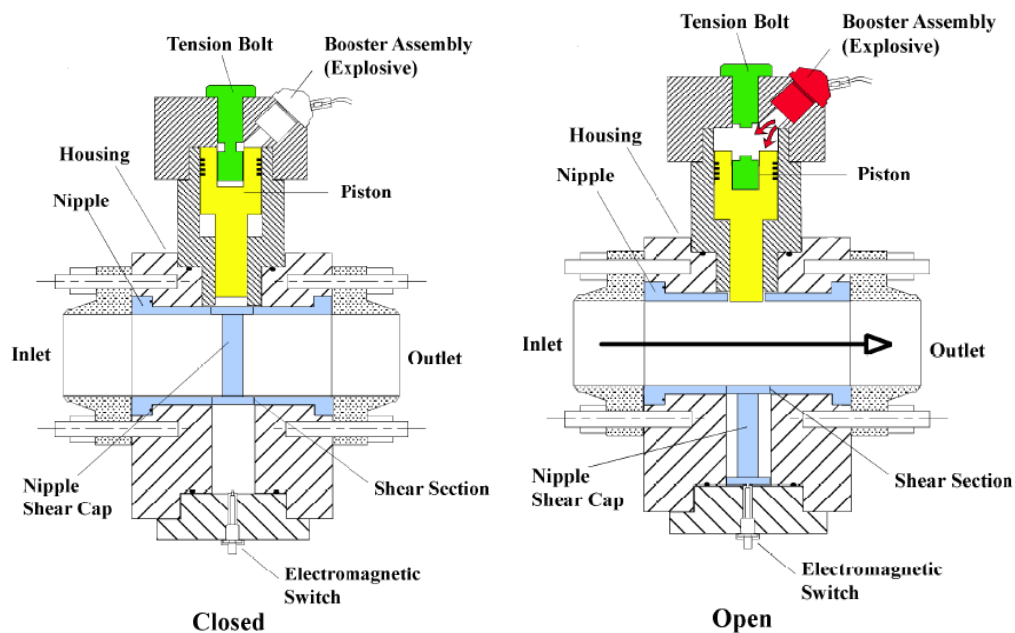


Kuva 30. Sydänsieppari. (GE-Hitachi 2007d, 4.)

Jäähdyte tulvitetaan sieppariin murtotappiventtiilien läpi sydämen tulvitusaltaasta. Tulvituslinjat yhtyvät siepparin alla yhteen jakolinjaan, josta jäähdyte jakautuu lämpökuorman mukaisesti jäähdytysputkiin ja poistuu höyrynä ulkoreunalta palatakseen jälleen suojarakennuksen lauhduttimen kautta takaisin tulvitusaltaaseen. (GE-Hitachi 2007d.)

5.2.3 Murtotappiventtiili

ESBWR:ssä useimpien tavallisten aktiivisten venttiilien tilalla on turvallisuusjärjestelmissä suunniteltu käytettävän murtotappiventtiiliä (Squib valve), kuva 31, jossa räjähdyspanos laukaisee venttiilin toiminnon.



Kuva 31. ESBWR:n murtotappiventtiili. (GE-Hitachi 2007c, 295.)

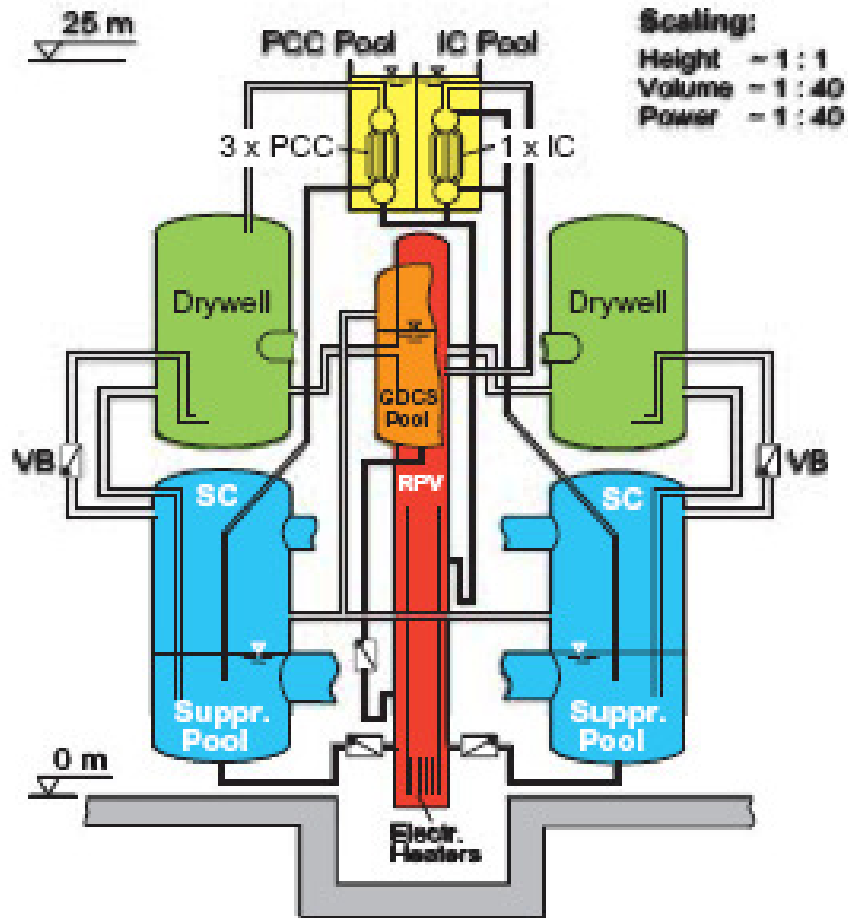
Järjestelmä saa käyttövoimansa laitosverkosta ja se on akkuvarmennettu. Murtotappiventtiilejä on suunniteltu käytettäväksi esimerkiksi GDCS-, sydänsieppari- ja paineenalennusjärjestelmissä. Säteilyturvakeskus on esittänyt huolen murtotappiventtiilien luotettavuudesta. (GE-Hitachi 2007c, 262, Säteilyturvakeskus 2009, 21-37.)

5.3 Tutkimus

Suuri kokoisen sydämen on epäilty aiheuttavan epästabiilisuutta, koska näin suurella sydämellä käynnistys ilman pääkiertopumppuja on uutta. Jäähdytteen tasaisen virtauksen aikaansaamiseksi suuressa sydämessä luonnonkierrolla vaatii tarkkaa käynnistysmenettelyä. ESBWR:n käynnistystransientteja on tutkittu virtauslaskennallisesti TRACG malleilla. Näitä saatuja laskennallisia malleja on verrattu Dodewaard:n reaktorilla tehtyihin kokeisiin ja saatuihin käyttökokemuksiin. Näistä on voitu todeta, että käynnistuksen pitäisi onnistua ilman ongelmia, kun käytetään suunniteltuja lämmitysnopeuksia. (CHEUNG Y.K. et al. 2005a.)

Hätäjäähdytysjärjestelmän ja suojarakennuksen järjestelmien toimintaa LOCA-tilanteessa on tutkittu käyttäen TRACG-laskentaohjelmaa. Simulointilaskujen mukaan ESBWR:n hätäjäähdytysjärjestelmät yhdessä suojarakennuksen järjestelmien kanssa pitävät sydämen tulvitettuna, eikä polttoaineen ylikuumenemista pääse tapahtumaan. Myös suojarakennuksen huippupaine pysyy alle suunnittelu rajojen. (CHEUNG Y.K. et al. 2005b.)

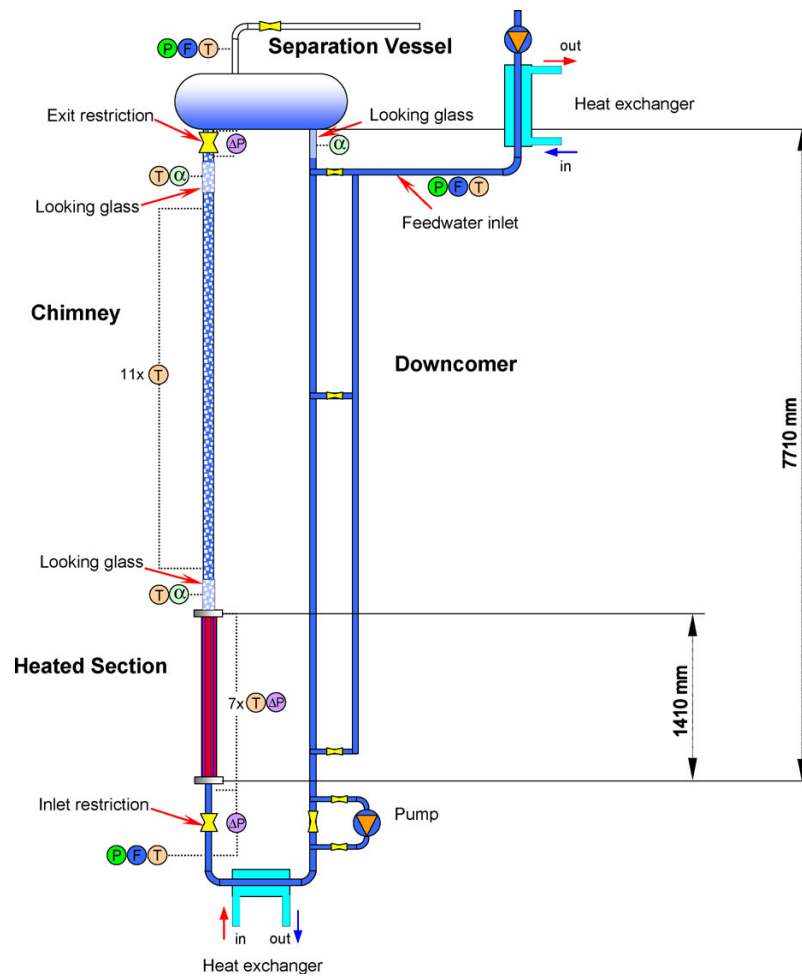
ESBWR:n toimintaa on tutkittu mm. Sveitsiin rakennetussa PANDA-koelaitteistossa, joka on korkeudeltaan 1:1 mittakaavassa ESBWR laitokseen. Kuvan 32 mukaisella järjestelmällä on suoritettu useita koesarjoja luonnonkiertojärjestelmien toiminnan todentamiseksi.



Kuva 32. Panda-koelaitteisto. (IAEA 2005, 418.)

PANDA-koelaitteisto on antanut mahdollisuuden testata toimintaa kokonaisuutena. Saatujen tulosten perusteella on voitu testata ja kehittää laskentaohjelmien soveltuvuutta. Tulosten perusteella on voitu todeta SPECTRA parhaiten soveltuvaksi koodiksi. Myös RELAP5 ja CATHARE ovat tuottaneet hyviä tuloksia. COCOSYS-ohjelmalla on laskettu suojarakennuksen käyttäytymistä ja senkin tulokset ovat olleet hyväksyttäviä. Tulevia tai jo käynnissä olevia koeohjelmia ovat TEMPEST, NACUSP sekä SETH/PANDA.

Kuvassa 33, on esitetty GENESIS Freoni-134a-pohjainen koelaitteisto, jota on simuloitu ATHLET 2.0a – ja TRACG koodeilla. Laitteisto on skaalattu koelaitteisto, joka on aikaisempien tutkimusten perusteella pyritty rakentamaan niin, että se on mahdollisimman lähellä aikaisempien tutkimusten mukaista käyttäytymistä.



Kuva 33. GENESIS koelaitteisto. (ROHDE M. 2008, 3.)

Tutkimusten perusteella GENESIS laitteistolla sekä ATHLET ja TRACG -koodeilla saadut tulokset viittaavat siihen, että normaalilla toiminta-alueella ESBWR on stabiili. ESBWR:n stabiilia käyttäytymistä voidaan tutkia sekä laskennallisesti että kokeellisesti. Tutkimusraportin (ROHDE M. et al. 2008) johtopäätöksissä tekijät kuitenkin huomauttavat, että tuloksiin liittyy vielä paljon epävarmuuksia BWR laitteiston vaikean simuloitavuuden takia.

Sydänsiepparin toiminnan kokeellisesta varmistamisesta ei löytynyt tietoa.

6. YHTEENVETO

Passiiviset turvallisuusjärjestelmät omaavat suuren potentiaalin parantaa laitosten turvallisuutta, samalla yksinkertaistaen niiden rakenteita. Näillä järjestelmillä voidaan korvata nykyisiä aktiivisia järjestelmiä, vähentäen huollon tarvetta sekä henkilöstölle aiheutuneita säteilyannoksia. Yksinkertaistettu rakenne vähentää myös laitosten investointikustannuksia. Kaikissa esitellyissä laitosvaihtoehtoissa passiiviset järjestelmät ovat hyvin samantapaisia, ja joiltain osin lähes identtisiä. Lähes kaikissa järjestelmissä toiminta perustuu luonnonkierron hyödyntämiseen.

Työssä esitellyistä laitoksista tekniseltä valmiusasteeltaan pisimmällä on ABWR, jonka tyyppisiä laitoksia on jo tehoajossa. Jo valmiiseen konseptiin lisätään passiivisia turvallisuusjärjestelmiä ja Suomessa vaadittuja teknisiä yksityiskohtia. KERENA ja ESBWR ovat kehitystyössä jäljessä, sillä ne ovat aivan uusia laitoskonsepteja. Näistä pidemmällä kehityksessä on KERENA. ESBWR:ssä uusien passiivisten järjestelmien lisäksi on luonnonkiertoon perustuva tehoajo. Jos ESBWR:n luotettavuus voidaan todentaa, on se erittäin mielenkiintoinen vaihtoehto seuraavan sukupolven laitoksista.

Passiivisten järjestelmien kehitystyö on kuitenkin vielä kesken ja niiden käyttöönotto vaatii vielä paljon lisätutkimusta. Maailmalla on käynnissä useita tutkimusohjelmia, joissa näiden järjestelmien toimivuutta tutkitaan sekä koelaitteistoilla että laskennallisesti.

LÄHDELUETTELO

ARAI, K., MURASE, A., HAMAZAKI, R. and KUROKI, M., 2008. AB1600—Progress of ABWR technology toward next generation ABWR. Nuclear Engineering and Design, 238(8), 1902-1908.

BEARD, J.A., 13.4 2007. ABWR auxiliary systems. GE Energy/Nuclear
<http://www.ne.doe.gov/np2010/pdfs/ABWRAuxiliarySystems.pdf>

CHEUNG, Y.K., 2005a. Analysis of ESBWR startup in natural circulation. Proceedings of the American Nuclear Society - International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2005, ICAPP'05, 5, 2554-2563.

CHEUNG, Y.K., 2005b. Performance analyses of ESBWR ECCS and containment systems. Proceedings of the American Nuclear Society - International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2005, ICAPP'05, 5, 2564-2571.

Fennoivoima, 2009, Ydinvoimalaitoksen periaatepäätöshakemus.
<http://www.fennovoima.fi/hanke/hakemus-ja-yva-aineisto/pap-aineistot>

GE-Hitachi, verkkosivut, saatavuus tarkastettu: 9/2009.
http://gepower.com/prod_serv/products/nuclear_energy/en/index.htm

GE-Hitachi Nuclear Energy, 2007a ESBWR Design Control Document tier 1.
<http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/esbwr/dc-review.html>

GE-Hitachi Nuclear Energy, 2007b ESBWR Design Control Document tier 2, chapter 5
Reactor Coolant System and Connected Systems
<http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/esbwr/dc-review.html>

GE-Hitachi Nuclear Energy, 2007c ESBWR Design Control Document tier 2, chapter 6
Engineered Safety Features
<http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/esbwr/dc-review.html>

GE-Hitachi Nuclear Energy, 2007d ESBWR Design Control Document tier 2, chapter 21 Containment and Bimac-device performance against exvessel steam explosions (EVE) <http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/esbwr/dc-review.html>

HINDS, D., 2006. Next-generation nuclear energy: The ESBWR. Nuclear News, 49(1), 35-40.

IAEA, 2005. Tecdoc-1474 Natural circulation in water cooled nuclear power plants

IAEA, 2004. Tecdoc-1391. Status of advanced light water reactor designs

IAEA, 2006 Tecdoc-draft. Description of natural circulation and passive safety systems in water cooled nuclear power plants

JUHN, P.E., KUPITZ, J., CLEVELAND, J., CHO, B. and LYON, R.B., 2000. IAEA activities on passive safety systems and overview of international development. Nuclear Engineering and Design, 201(1), 41-59.

Maaranen Päivi, 2001, Diplomityö, LUT, Passiivisten turvallisuusjärjestelmien luontaiset virhetoiminnot ydinvoimalaitoksissa.

MARCEL, C.P., 2008. Experimental investigations on the ESBWR stability performance. Nuclear Technology, 164(2), 232-244.

ROHDE, M., 2008. Investigating the ESBWR stability with experimental and numerical tools: A comparative study. Nuclear Engineering and Design, In Press, Corrected Proof .

SAHA, P., GAMBLE, R.E., SHIRALKAR, B.S. and FITCH, J.R., 2009. Applicability of small-scale integral test data to the 4500 MWt ESBWR loss-of-coolant accidents. Nuclear Engineering and Design, Nuclear Engineering and Design, 239, 956–963

STOSIC, Z.V., BRETTSCUH, W. and STOLL, U., 2008. Boiling water reactor with innovative safety concept: The Generation III+ SWR-1000. Nuclear Engineering and Design, 238(8), 1863-1901.

Säteilyturvakeskus, 4.5 2009. ALUSTAVA TURVALLISUUSARVIO OLKILUOTO 4 -
YDINVOIMALAITOS-HANKKEESTA

YONOMOTO T.,KONDO M.,NAKAMURA H., 2005. Summary of the research project
on horizontal heat exchanger for PCCS, JAERI. IAEA's Second Research Coordination
Meeting on the CRP on Natural Circulation Phenomena,
Modelling, and Reliability of Passive Safety Systems that Utilize Natural Circulation
Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA, Aug. 29 - Sep.2, 2005