

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Laiwareaktorit

Naval reactors for surface vessels

Työn ohjaaja ja tarkastaja: Ville Rintala

Lappeenranta 26.04.2014

Ilkka Suntio

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Ilkka Suntio

Opinnäytteen nimi: Laivareaktorit

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2014

39 sivua, 11 kuvaa

Hakusanat: laivareaktori, ydinreaktori, ydinvoima

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan laivojen voimanlähteenä käytettäviä ydinreaktoreita ja vertaillaan niiden ominaisuuksia maalla toimiviin reaktoreihin. Lisäksi käydään läpi laivareaktorien historiaa, reaktorin purkaminen ja muut mahdolliset käyttösovellukset. Työssä käytettiin pääasiassa siviilikäytössä olleiden reaktorien tietoja, koska sotilaskäytössä olleiden reaktorien tietoja ei ollut käytettävissä julkisesti saatavilla olevasta aineistosta.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
1 Johdanto	4
2 Ydinvoiman periaate	5
2.1 Fissio	5
2.2 Reaktorin toiminta	6
3 Painevesireaktori	7
3.1 Painesäiliö	8
3.2 Kiertopumput.....	8
3.3 Paineistin	8
3.4 Höyrystin	9
3.5 Polttoaine.....	10
3.6 Reaktiivisuuden säätö.....	11
3.7 Suojarakennus	12
4 Laivareaktorien historia	13
5 Laivareaktorit	16
5.1 Reaktori ja primääripiiri	16
5.1.1 Integroitu reaktori	18
5.2 Polttoaine.....	20
5.3 Reaktiivisuuden hallinta	22
5.4 Turvallisuus	24
5.4.1 Reaktorin turvajärjestelmät	24
5.4.2 Suojarakennus	25
5.4.3 Laivan turvajärjestelmät.....	26
5.5 Työntövoiman tuotto	26
6 Onnettomuudet	27
6.1 Lenin LOCA 1966.....	27
6.2 N.S. Mutsu 1974.....	28
6.3 Admiral Ushakov 1990	28
7 Laivareaktorin purkaminen	30
8 Laivareaktorien muut käyttökohteet	33
8.1 Kelluva ydinvoimalaitos.....	33
8.2 Kelluva suolanpoisto ja juomaveden valmistuslaitos.....	34
8.3 Vedenalainen ydinvoimalaitos	35
8.4 Ydinvoimalaitos maan pinnalla ja alla	35
9 Tulokset	37
10 Yhteenvedo	39
Lähdeluettelo	40

1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan ydinvoimakäyttöisten laivojen voimanlähteinä käytettyjä reaktoreita. Työn tavoitteena on tarkastella laivareaktorien teknisiä toimintaperiaatteita, vertailla laivareaktoreita maalla käytettäviin voimalaitosreaktoreihin sekä lyhyesti tarkastella laivareaktoreiden käyttömahdollisuutta muihin sovelluksiin. Lisäksi käydään läpi laivareaktorien historia ja käydään läpi laivareaktoreille tapahtuneet onnettomuudet. Työssä tarkastellaan vain laivojen voimanlähteenä käytettäviä reaktoreita ja sukellusveneissä käytetyt reaktorit on jätetty työn ulkopuolelle.

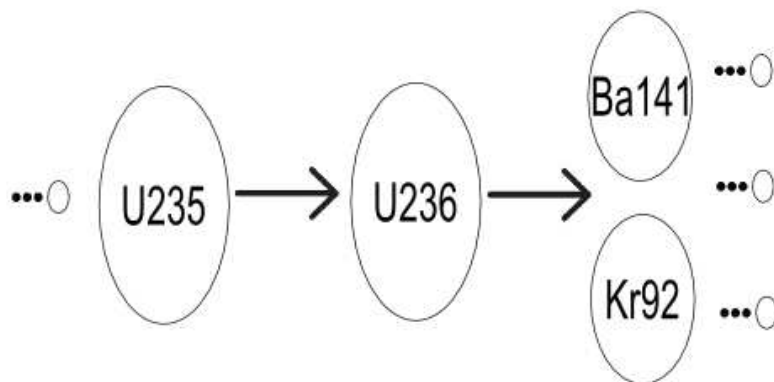
Laivareaktorit ovat kaikki olleet painevesireaktoreita. Suurin osa laivareaktoreista on ollut Yhdysvaltojen ja Venäjän käytössä. Sotilaskäytössä reaktoreita käytetään paljon esimerkiksi lentotukialuksissa ja siviilikäytössä on käytetty muutamissa kauppa-aluksissa sekä venäläisissä jäänmurtaajissa. Sotilaskäyttöön tarkoitettujen reaktorien ei ole saatavilla julkisesta aineistosta, joten tässä kandidaatintyössä lähteinä on pääasiassa käytetty siviilikäyttöön tarkoitettujen laivojen reaktorien tietoja.

2 YDINVOIMAN PERIAATE

2.1 Fissio

Fissiossa neutroni absorboituu raskaaseen ytimeen, kuten uraani-235 (U-235), ja halkaisee kohtioytimen kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi. Tällaisessa reaktiossa vapautuu keskimäärin 2,4 uutta neutronia sekä energiaa. Vapautuneista neutroneista tarvitaan yksi uuteen fissioon, jotta saadaan aikaiseksi jatkuva ketjureaktio. Ketjureaktion pitämiseksi tasaisena kokevat loput neutronit kaappausreaktion tai vuotavat ulos reaktorista. Suurin osa fissiossa saatavasta energiasta on peräisin ytimen sidosenergiasta, mikä vapautuu neutronin halkaistessa ytimen. Yhdessä U-235 fissiossa vapautuu keskimäärin noin 200 MeV, mikä on noin $3,2 \cdot 10^{-11}$ J.

Fissiossa muodostuu fissiotuotteita, jotka ovat peräisin kohtioytimen halkeamisesta. Syntyvien fissiotuotteiden massaluvut ovat useimmiten väliltä 90 - 100 ja 134 - 145. Fissiotuotteet ovat myös lähes aina epävakaita ja radioaktiivisia, jolloin ne hajotessaan tuottavat lämpöä. Kuvassa 1 on esitetty esimerkki aiemmin mainitusta U-235 fissiosta.



Kuva 1. U-235 fissio.

Kuvan 1 U-235 fissiossa neutroni absorboituu ytimeen jolloin muodostuu U-236, jonka hajotessa muodostuu krypton-92 (Kr-92) sekä barium-141 (Ba-141) ytimet ja kolme neutronia. Lisäksi vapautuu myös energiaa, kuten jo aiemmin mainittiin. Kuvan 1 tapauksessa muita vaihtoehtoja fissiotuotteiksi ovat aineet joiden massalukujen summa

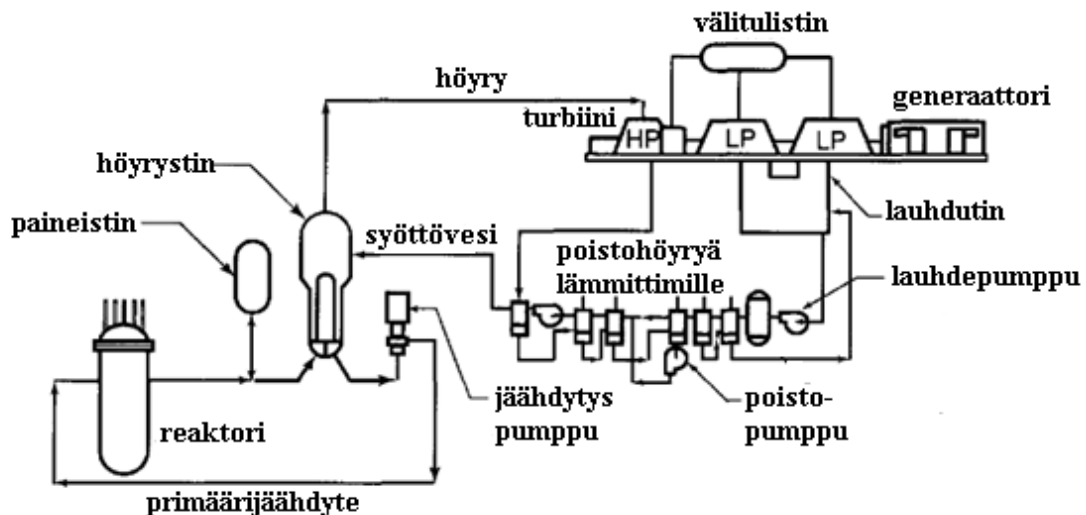
vapautuvat neutronit mukaan lukien olisi 236, kuten U-236:lla ja alkuaineiden järjestyslukujen summa on sama kuin uraanilla, eli 92. (Stacey 2007, s. 5 - 13)

2.2 Reaktorin toiminta

Reaktorit voidaan jakaa kahteen luokkaa riippuen neutronien energiasta, mikä aiheuttaa suurimman osan fissioista. Nopeissa reaktoreissa nopeat fissioneutronit eivät hidastu paljoakaan ennen absorboitumista polttoaineeseen. Yleisempi reaktorityyppi on terminen reaktori, missä nopeat fissioneutronit hidastetaan termisiksi neutroneiksi ennen polttoaineeseen absorboitumistaan. Neutronien hidastamiseen käytettävän hidasteen eli moderaattorin tulisi sisältää mahdollisimman kevyitä ytimiä, jolloin hidastumiseen tarvittavien sirontojen määrä olisi pieni eli neutronien hidastuminen tapahtuisi tehokkaasti. Hidasteen tulisi myös absorboida mahdollisimman vähän neutroneja ettei neutroneja menetettäisi turhaan ennen kuin ne ehtivät aiheuttamaan fission. Termisissä reaktoreissa hidastimina käytetään useimmiten vettä, raskasta vettä, grafiittia ja berylliumia. Tavallista vettä eli kevyttä vettä voidaan käyttää hidasteen lisäksi samalla myös jäähdytykseen. Tämän vuoksi suurin osa käytössä olevista reaktoreista on kevytvesireaktoreita. (Shultis & Faw 2002, s. 298)

3 PAINEVESIREAKTORI

Painevesireaktorilaitokseen kuuluu kaksi vesipiiriä, primääripiiri ja sekundääripiiri. Primääripiiri kierrättää jäähdytysvettä pumppujen avulla reaktorisydämen läpi, jossa veteen siirtyy reaktorissa syntyvää energiaa jolloin veden lämpötila kasvaa. Tullessaan reaktoriin jäähdytysveden lämpötila on noin 290 °C ja se lämpenee reaktorissa noin 25 - 30 °C. Veden korkeasta lämpötilasta huolimatta se ei kuitenkaan ala kiehua, koska nimensä mukaisesti painevesireaktorissa pidetään korkeaa painetta, alkaen 130 bar:sta, jolloin veden kiehumispiste on korkea. Reaktorista vesi siirtyy höyrystimille, joissa se luovuttaa reaktorista saadun lämpönsä sekundääripiirissä olevalle vedelle, joka kiehuu höyryksi. Muodostunut höyry johdetaan turbiineille, jotka pyörittävät generaattoria, joka tuottaa sähköä. (Lamarsh 1975, s. 127-132) Turbiinien jälkeen höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa se tiivistyy takaisin vedeksi. Ennen päätymistään takaisin höyrystimeen vesi kierrätetään useiden syöttöveden esilämmittimien läpi, jolloin veden lämpötilaa saadaan nostettua valmiiksi. Kuvassa 2 on esitetty havainnollistava piirros painevesireaktorin toiminnasta. (Shultis & Faw 2002, s. 350)



Kuva 2. Painevesireaktorilaitoksen toiminta. (Muokattu lähteestä Shultis & Faw 2002)

Seuraavaksi esitellään painevesireaktorin tärkeimmät komponentit.

3.1 Painesäiliö

Reaktorin painesäiliö pitää sisällään reaktorisydämen. Säiliö on muodoltaan sylinteri, jonka päädyt ovat puolipallon muotoiset. Kestääkseen painevesireaktoreissa käytettävän korkean paineen täytyy säiliön seinämän olla riittävän paksu, noin 23 cm. Koko ja paineenkestävyyden vaatimukset tekevät painesäiliöstä yhden suurimmista painevesireaktorin komponenteista. Säiliö valmistetaan niukkaseosteisesta hiiliteräksestä ja sen sisäpuoli on pinnoitettu ohuella kerroksella ruostumatonta terästä. Jäähdytysvesi johdetaan painesäiliöön reaktorisydämen yläpuolella olevista suuttimista ja se jatkaa kulkuaan alaspäin josta se nousee sydämen läpi siirtäen samalla tuotettua lämpöä eteenpäin. Vesi poistuu painesäiliöstä sydämen yläpuolella sijaitsevista ulosmenosuuttimista. (Shultis & Faw 2002, s. 350)

3.2 Kiertopumput

Kiertopumppujen tehtävänä on kierrättää jäähdytysvettä reaktorisydämen läpi. Pumput ovat yksivaiheisia keskipakopumppuja ja ne on suunniteltu kestämaan käyttöä koko voimalaitoksen käyttöajan ajan. Tavoitteena on myös minimoida pumppujen huollon tarve. Veden kanssa kosketuksessa olevat osat on valmistettu ruostumattomasta teräksestä. (Shultis & Faw 2002, s. 350)

3.3 Paineistin

Paineistin on suuri sylinterin muotoinen pystyssä oleva tankki, jonka alaosassa on vettä ja yläosassa höyryä. Paineistin on yhdistetty yhteen primääripiirin vedenkiertosilmukkaan ja yläosan höyryn tarkoitus on ottaa vastaan äkilliset putkistoissa tapahtuvat paineiskut. Paineiskut muodostuvat veden lämpötilan muutoksista, jotka voivat aiheuttaa suuria äkillisiä paineen vaihteluja. Paineistimen toinen tehtävä on pitää oikeaa painetta primääripiirissä. Järjestelmän painetta pidetään tasaisena muuttamalla tarvittaessa veden ja höyryn määriä paineistimessa. Esimerkiksi jos jäähdytysveden lämpötilaa halutaan laskea, täytyy veden määrää paineistimessa laskea, jolloin myös paine laskee. Paineen putoamisen vuoksi veden kiehumispiste

laskee ja osa vedestä höyrystyy ja näin tasoittaa edellä tapahtunutta paineen pudotusta. Lopullisen paineentasauksen alkuperäiseen tilaan tekevät paineistimen pohjalla olevat sähköiset lämmittimet, jotka käynnistyvät aina paineen laskiessa. Jos taas paine paineistimessa nousee veden lämpenemisen vuoksi, niin paineistimen yläosassa käynnistyy jäähdytysveden ruiskutus. Tämän ruiskutuksen tarkoituksena on saada osa höyrystä tiivistymään vedeksi, jolloin paine tasautuu alkuperäiseen tilanteeseen. (Shultis & Faw 2002, s. 350-351)

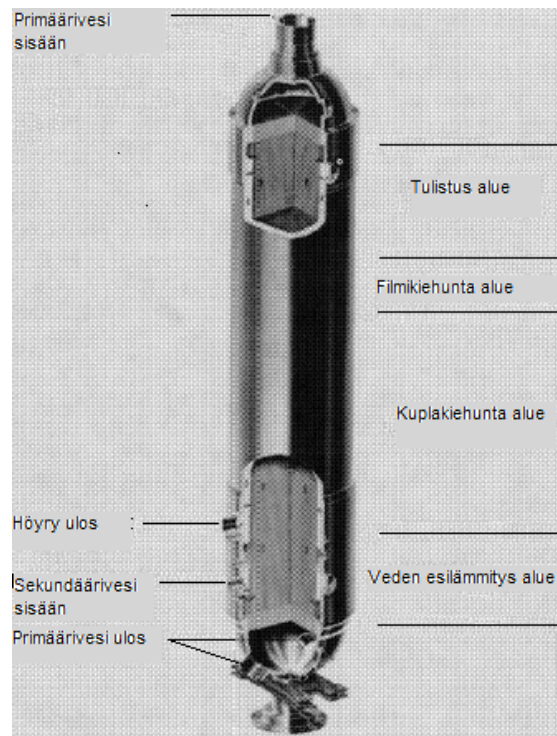
3.4 Höyrystin

Höyrystimien tehtävänä on siirtää reaktorisydäimestä primääripiirin veteen sitoutunut energia eteenpäin sekundääripiirin veteen, joka höyrystyy ja siirretään eteenpäin pyörittämään turbiineja. Höyrystimet ovat kooltaan erittäin suuria, jotkut mallit jopa suurempia kuin reaktorin painesäiliö. Ydinvoimalaitoksissa käytettävät höyrystimet ovat yleensä U-putki höyrystimiä tai once-through höyrystimiä. (Hestroni 2011)

U-putki höyrystimessä primääripiirin vesi menee sisään höyrystimen alaosaan olevasta suuttimesta. Vesi kiertää höyrystimessä väärinpäin olevan U:n muotoisia putkia pitkin samalla lämmittäen sekundääripiirin vettä ja poistuu höyrystimen alaosaan. Sekundääripiirin vesi syötetään höyrystimeen läheltä yläosaa, josta vesi virtaa alas, jossa se pääsee kosketuksiin U-putkipaketin kanssa. Vesi alkaa höyrystyä putkien lämmittämänä ja muodostunut vesi-höyry-seos alkaa nousta ylöspäin kohti höyrystimen yläosaa. Höyrystimen yläosassa on vedenerotin ja höyrykuivain, joiden jälkeen höyry poistuu höyrystimestä. (Hestroni 2011)

Once-through höyrystimessä primääripiirin vesi tulee sisään höyrystimen yläosaan virraten suoraan alas samalla lämmittäen sekundääripiirin vettä, ja poistuu höyrystimen alaosaan. Sekundääripiirin vesi menee sisään höyrystimeen sivusta ja virtaa alaspäin höyrystimen reunalla, jossa vesi sekoittuu höyryyn ja lämpenee. Kylläinen vesi höyrystyy alaosan lämpöpinnalla ja alkaa virrata ylöspäin. Ylös virratessa höyry tulistuu ja poistuu lopulta höyrystimen sivulla olevasta suuttimesta. Once-through höyrystin ja

sekundääriveden höyrystymisen eri vaiheet höyrystimessä on esitetty kuvassa 3. (Hetsroni 2011)



Kuva 3. Once-through höyrystin ja veden höyrystymisen vaiheet. (Muokattu lähteestä Hetsroni 2011)

3.5 Polttoaine

Termisissä reaktoreissa voidaan käyttää polttoaineena uraania tai plutoniumia. Sopiakseen reaktorin polttoaineeksi täytyy polttoaineena käytetyn uraanin tai plutoniumin isotoopin olla fissiili eli halkeava aine, joka tuottaa fission matalillakin neutronien energioilla. Tällaisia isotooppeja ovat esimerkiksi U-235 ja plutonium-239 (Pu-239). Luonnosta löytyvässä uraanissa on U-235:a 0,72 %. Luonnon uraania voidaan käyttää sellaisenaan sekä raskasta vettä että grafiittia hidasteena käyttävissä reaktoreissa. Kevytvesireaktorien polttoaineeksi luonnonuraanin väkevyys ei taas riitä suoraan vaan sitä on rikastettava niin, että U-235 määrä uraanissa on muutaman prosentin luokkaa. (Shultis & Faw 2002, s. 298) Luonnonuraanin väkevöinti sopivan vahvuiseksi voidaan toteuttaa kaasudiffuusiolla, kaasusentrifugilla ja lähivuosina myös

lasererotuksella. Erittäin paljon energiaa vaativa kaasudiffuusio on poistumassa kokonaan käytöstä lähivuosina, jonka jälkeen lähes kaikki väkevöity uraani tuotetaan kaasusentrifugi menetelmällä, jossa rakentamiskustannukset ovat suuremmat kuin kaasudiffuusiolaitoksilla, mutta energian tarve huomattavasti vähäisempää. Uudemman teknologian lasererotuksella on arvioitu tuotettavan muutama prosentti kaikesta väkevöidystä ydinpolttoaineesta. (World Nuclear Association 2013)

Väkevöidystä uraanista valmistetaan uraanidioksidi (UO_2) jauhetta, joka puristetaan pelleiksi ja sintrataan keraamiseen muotoon. Pelletit kasataan päällekkäin noin 3,8 metriä pitkäksi polttoainesauvaksi zirkonium-seoksesta valmistettuun putkeen. Polttoainesauvoista kootaan polttoaine-elementtejä. Yhteen polttoaine-elementtiin tulee yleensä alle 300 polttoainesauvaa ja suureen osaan polttoaine-elementtejä on jätetty paikkoja vapaaksi säätösauvoja varten. Polttoaine-elementtejä kasataan reaktorisydämeen 200 - 300 ja elementtiä pidetään reaktorissa yleensä 3 vuotta eli vuosittain elementeistä vaihdetaan vanhin kolmannes uusiin. (Shultis & Faw 2002, s. 353, 357)

3.6 Reaktiivisuuden säätö

Reaktiivisuuden muutoksilla säädetään fission ketjureaktiota säätämällä neutroniabsorption voimakkuutta eli säädetään reaktorin tehoa. Säätösauvojen avulla tehdään reaktorin tehon säätäminen sekä lyhytaikaiset ja nopeat reaktiivisuusmuutokset, kuten reaktorin pikasulku. Useimmissa tehokäytössä olevissa painevesireaktoreissa säätösauvat ovat useimmiten indium-kadmium-hopea-seoksesta tai teräksestä ja boorista valmistettuja ohuita sormisauvoja. Useat tällaiset sormisauvat muodostavat säätösauvaryhmän, joka sijoitetaan polttoainenipun sisään. Säätösauvaryhmiä on reaktorissa käytössä kymmeniä, jolloin reaktorin tehojakauma saadaan pidettyä tasaisena. Säätösauvat sijaitsevat reaktorin yläpuolella, josta ne voidaan häiriö- ja onnettomuustilanteissa pudottaa reaktorisydämeen painovoiman avulla. (Lamarsh 1975, s. 260-262)

Keskipitkän aikavälin säätöjen sekä pidempiaikaisten reaktiivisuussäätöjen tekemiseen käytetään primääripiirin vedessä olevaa booria. Veden boorihappo absorboi erittäin

hyvin neutroneja, jolloin sen pitoisuutta muuttamalla polttoaineen kulumisen mukaan saadaan vähennettyä säätösauvojen ylimääräisiä liikkeitä. (Shultis & Faw 2002, s. 357)

Kolmas reaktiivisuuden säätötapa on kiinteiden absorbaattoreiden eli niin sanottujen palavien myrkkyjen käyttäminen. Palavaa myrkkyä käytetään pitkäaikaiseen reaktiivisuuden säätöön ja ne sisältävät vahvasti absorboivaa ainetta, esimerkiksi booria. Ne on sijoitettu polttoainepippuihin ja nipun käytön alkuvaiheessa absorboivat tehokkaasti neutroneja. Absorboidessaan neutroneja palavan myrkyn määrä samalla vähenee eli se "palaa", jolloin polttoainepipun käytön edetessä palavan myrkyn määrä jatkuvasti vähenee. (Stacey 2007, s. 250)

3.7 Suojarakennus

Suojarakennuksen tehtävä on estää radioaktiivisen säteilyn ja fissiotuotteiden päätyminen laitokselta ilmakehään. Radioaktiivisten aineiden leviäminen on pyritty estämään kolmella kohtaa laitoksella. Ensimmäinen on polttoaineen suojakuori, joka pitää sisällään polttoaineesta vapautuvat fissiotuotteet. Seuraava leviämiseste fissiotuotteille on reaktorin painesäiliö ja eristetty primääripiiri. Viimeinen leviämiseste on itse suojarakennus, joka pitää sisällään kaikki aiemmat leviämisesteet. Suojarakennus on valmistettu teräksestä ja paksusta betonista, jolloin saadaan estettyä säteilyn ulostulo rakennuksesta. Suojarakennus on suunniteltu kestäämään reaktorivian aiheuttama paineen nousu tiettyyn rajaan asti ja se on myös suunniteltu kestäämään ulkoisia uhkia, kuten luonnon aiheuttamia tapahtumia. (Shultis & Faw 2002, s. 357)

4 LAIVAREAKTORIEN HISTORIA

Toisen maailmansodan jälkeen alettiin tutkia ydinteknologian käyttämisen mahdollisuutta sukellusveneiden voimanlähteenä. Sukellusveneet olivat aiemmin haavoittuvaisia joutuessaan aika ajoin nousemaan pintaan lataamaan sähköakkuja, joten ydinreaktorilla käyvää sukellusvenettä haettiin ratkaisuksi ongelmaan, jolloin pystyisi teoreettisesti pysyttelemään pinnan alla lähes ikuisesti. Ydinpolttoaineen sisältämän korkean energiamäärän ansiosta yhdellä polttoainelatauksella sukellusvene pystyisi toimimaan erittäin pitkiä ajanjaksoja, jolloin aikaisemmin käytössä olleita polttoaineen kuljetusaluksia ei enää tarvittaisi. Lisäksi saataisiin huomattavasti nopeammin kulkevia aluksia verrattuna aikaisempiin sukellusveneisiin. Yhdysvallat laski vesille ensimmäisen ydinreaktorilla toimivan merialuksen, sukellusvene USS Nautiluksen, vuonna 1955. Kuvassa 4 on esitetty USS Nautilus. (Ragheb 2011, s. 3-4)



Kuva 4. Ensimmäinen ydinvoimakäyttöinen merialus USS Nautilus. (NavSource Naval History)

Vaikka ydinreaktorin käyttäminen voimanlähteenä sukellusveneissä toi huomattavia etuja, niin ydinvoiman käyttö veden pinnalla kulkevissa aluksissa epäilytti. Syynä tähän oli se, ettei uskottu saatavien parannusten olevan kannattavia verrattuna projektin vaatimaan rahalliseen panostukseen. Toiseksi laivat vaativat todella paljon uraania polttoaineeksi, josta vielä tuolloin oli pulaa. Korean sodan alkamisen jälkeen vuonna 1950 nähtiin Yhdysvalloissa olevan tarvetta ydinkäyttöisille lentotukialuksille, jolloin Westinghouse alkoi tutkia kyseiseen tarkoitukseen soveltuvia reaktorivaihtoehtoja. Reaktoriksi valittiin painevesireaktori, jonka prototyyppi valmistettaisiin testausta varten ensin maalle. (Hewlett & Duncan 1974, s. 196-198) Westinghouse rakennutti Idaho Fallsin alueelle A1W prototyyppilaitoksen, joka koostui kahdesta

painevesireaktorista. Laitos simuloi suunnitellun lentotukialus USS Enterprisen konehuonetta ja se käynnistettiin 1956. Tehokäyttöön prototyypilaitos saatiin lokakuussa vuonna 1958 ja vuonna 1960 valmistui ensimmäinen ydinvoimalla toimiva lentotukialus USS Enterprise. (Ragheb 2011, s. 7) A1W reaktorien käytöstä saatua tietoa käytettiin myös muiden tyyppisten pinnan yläpuolella liikkuvien alusten reaktorien valmistamiseen. Enterprisen lisäksi haluttiin rakentaa myös ohjuksilla varustettu risteilyalus, joten USS Long Beachin rakentaminen aloitettiin 1957. Valmistuessaan USS Long Beach oli Yhdysvaltojen ensimmäinen veden pinnalla kulkeva ydinvoimakäyttöinen alus. (Hewlett & Duncan 1974, s. 317)

Toinen valtio, joka oli mukana ydinenergian tuomisessa laivojen käyttöön, oli Neuvostoliitto. Suunnitelmien eteneminen oli kuitenkin hitaampaa verrattuna Yhdysvaltoihin, koska Neuvostoliitto halusi ensin saada valmistettua ydinpommin, johon Yhdysvallat oli kyennyt jo aikaisemmin. Myös Neuvostoliitossa alettiin ensiksi käyttää ydinenergiaa sukellusveneiden voimanlähteenä ja niin heinäkuussa 1958 Leninsky Komsomol liittyi ensimmäisenä ydinsukellusveneeseen Neuvostoliiton laivastoon. Koska ydinreaktorilla saatiin laivoille enemmän voimaa ja pidemmät käyttöajat, alettiin suunnitella ydinkäyttöisiä jäänmurtajia, jotta pohjoisten merialueiden laivaliikennettä saataisiin kasvatettua. Vuonna 1957 valmistui ydinkäyttöinen jäänmurtaja Lenin, joka oli ensimmäinen siviilikäytössä oleva ydinalus sekä samalla myös ensimmäinen ydinvoimakäyttöinen pinta-alus. Sen voimanlähteenä käytettiin kolmea OK-150 painevesireaktoria. Jäänmurtajia rakennettiin myöhemmin Neuvostoliitossa useita ja reaktorimalleja kehitettiin. Suomessa rakennettiin 1980-luvulla kaksi jokialueille suunniteltua Taymur-luokan jäänmurtajaa, joiden ydinreaktorit asennettiin Neuvostoliitossa. Kuvassa 5 on Arktika-luokan ydinjäänmurtaja Yamal. (Ragheb 2011, s. 28; Reistad & Ølgaard 2006 s. 3,8)



Kuva 5. Ydinvoimakäyttöinen jäänmurtaja Yamal. (Wikipedia Commons)

Siviilikäytössä on jäänmurtaajien lisäksi ollut käytössä muutamia ydinvoimakäyttöisiä kauppalaivoja, mutta niistä ei ole tullut kaupallisia menestyksiä. Yhdysvaltojen NS Savannah otettiin käyttöön 1962, mutta poistettiin käytöstä jo kahdeksan vuoden kuluttua taloudellisen kannattamattomuuden takia. Saksalaisvalmisteinen rahti- ja tutkimusalus Otto Hahn laskettiin vesille vuonna 1964. Kymmenen vuoden käyttöaikana, jolloin alus oli mukana kaupallisessa liikenteessä, ei aluksessa ollut teknisiä ongelmia, mutta sen käyttö osoittautui liian kalliiksi ja se muutettiin lopulta dieselkäyttöiseksi vuonna 1982. Japanilainen NS Mutsu valmistui vuonna 1970, mutta se kohtasi teknisiä ongelmia ja poliittista vastustusta, eikä alus koskaan päässyt lopullisesti kaupalliseen käyttöön. Parhaiten kauppa-aluksista on onnistunut Neuvostoliitossa vuonna 1988 valmistettu konttilaiva NS Sevmorput. Alus suunniteltiin pohjoisten merialueiden käyttöön ja se on varustettu jäänmurto-ominaisuuksilla. (World Nuclear Association 2013)

Laivareaktoreiden kehittäminen laivastojen käyttöön on auttanut ydinvoiman tuloa siviilien energiantuotantoon monin eri tavoin. Painevesireaktorin erittäin hyvä soveltuvuus reaktorikonseptina huomattiin ja sen ansiosta tänä päivänä suurin osa maailmalla toimivista ydinvoimalaitoksista on varustettu painevesireaktoreilla. Lisäksi sotilaskäyttöön tarkoitetuista reaktoreista saatiin tutkimustietoa ja käyttökokemusta, joita käytettiin siviilikäyttöön tulevien reaktorien parannusten tekemiseen. Myös laivastossa reaktorien parissa työskennellyt henkilökunta oli tärkeässä asemassa, koska heistä saatiin ydinvoimatyöskentelystä kokemusta omaavaa henkilökuntaa, kun siviilikäyttöön tarkoitettuja ydinvoimalaitoksia alettiin ottaa käyttöön. (Ragheb 2011, s. 12)

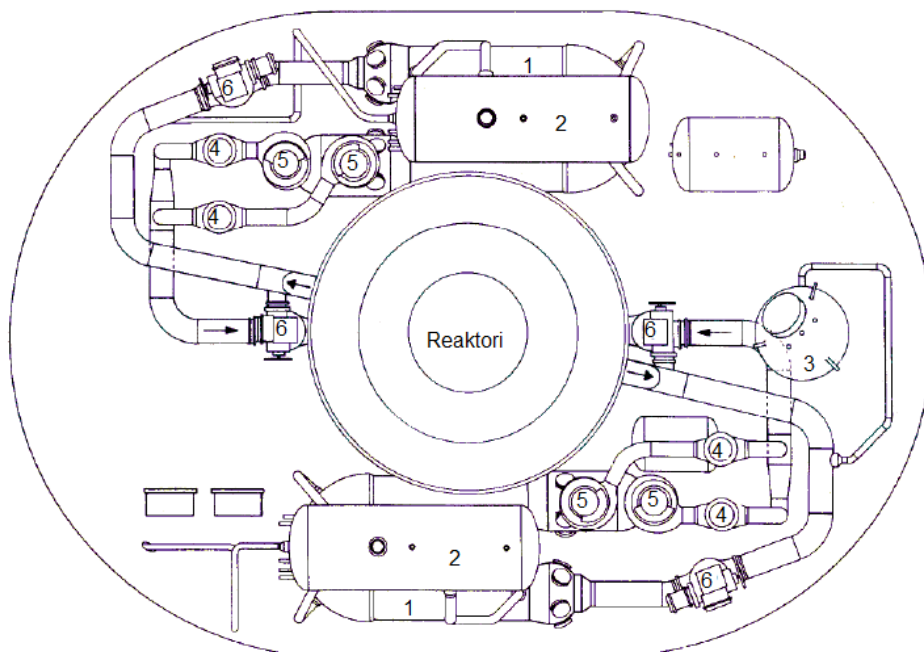
5 LAIVAREAKTORIT

Laivareaktorit ovat rakenteeltaan hyvin samanlaisia kuin "tavalliset" maalla käytettävät reaktorit. Toisaalta niissä on kuitenkin melko paljon eroavaisuuksia. Laivareaktorit ovat huomattavasti pienempiä sekä kooltaan että teholtaan. Maalla toimivan reaktorin lämpöteho voi olla jopa yli 3000 MW_{th}, kun taas laivareaktorien lämpöteho on korkeimmillaankin noin 300 MW_{th}. Osissa laivareaktorimalleista käytetään erilaista polttoainetyyppiä sekä korkeampia polttoaineen rikastusasteita. Polttoaineenvaihtoväli on laivareaktoreissa pidempi kuin maalla toimivissa reaktoreissa, minkä ansiosta laivat pystyvät olemaan pitkiäkin aikoja tehtävissään. Hyötysuhde laivareaktoreissa on huonompi kuin maalla toimivissa reaktoreissa reaktorin suuren tehonsäätötarpeen vuoksi sekä myös tilanpuutteen takia. (Ragheb 2011, s. 3-4, 13) Reaktorien määrä laivoissa vaihtelee reaktorin tehon ja laivan koon mukaan. Esimerkiksi suurissa lentotukialuksissa voidaan tarvita useita reaktoreita. Seuraavaksi on esitelty laivareaktorien ominaisuuksia ja vertailtu niitä maalla toimiviin reaktoreihin. Reaktorien tiedot on pääosin siviilikäyttöön suunnitelluista reaktoreista, koska sotilaskäyttöön suunniteltujen reaktorien tiedot eivät ole saatavilla julkisesti. Voidaan kuitenkin olettaa, että sotilaskäytössä olevat reaktorit eivät poikkea merkittävästi muista laivareaktoreista.

5.1 Reaktori ja primääripiiri

Laivojen voimanlähteenä käytettävät reaktorit ovat huomattavasti pienempiä kuin maalla sähköntuotantoon käytettävät reaktorit. Esimerkiksi venäläisissä ydinjäänmurtajissa käytössä olevassa 135 MW_{th} KLT-40:ssä reaktorisydämen korkeus on 1,0 m ja halkaisija on 1,21 m. (Reistad & Ølgaard 2006, s. 24) Vastaavasti tyypilliset mitat maalla käytettävän reaktorin sydämelle ovat noin 3,5 - 4,0 m ja 3,5 m (Stacey 2007, s. 250). Erityisesti venäläisissä reaktoreissa polttoaine-elementit on sijoitettu painesäiliöön laskettavaan koriin ja korin liikkuminen paikalla ollessaan on estetty korin ylhäällä ja alhaalla olevilla kiinnityksillä. Reaktorin reunoilla ovat lämpökilpi ja heijastin, joiden läpi jäähdytysvesi virtaa tullessaan reaktoriin. Primääripiirin vesi lämpenee laivareaktoreissa noin 30 °C, mikä on samaa luokkaa kuin maalla toimivissa reaktoreissa. (Reistad & Ølgaard 2006, s. 22-24)

Reaktorin primääripiiri koostuu kahdesta tai neljästä jäähdytyskiertopiiristä, joihin jokaiseen kuuluu höyrystin. Tyypillisesti laivareaktoreissa on käytössä once-through-höyrystimet. (Giorsetti 1977, s. 23) Höyrystimiltä lähtevän höyryn lämpötila on noin 290 °C ja sekundääripiirin paine on noin 40 bar (Reistad & Ølgaard 2006, s. 24). Myös vaakahöyrystimiä on käytetty, kuten yhdysvaltalaisessa NS Savannahissa, missä höyryntuotto toteutettiin U-putkihöyrystimellä ja höyryrummulla. NS Savannahin primääripiiri on esitetty kuvassa 6. (ATTN 2009, s. 65)



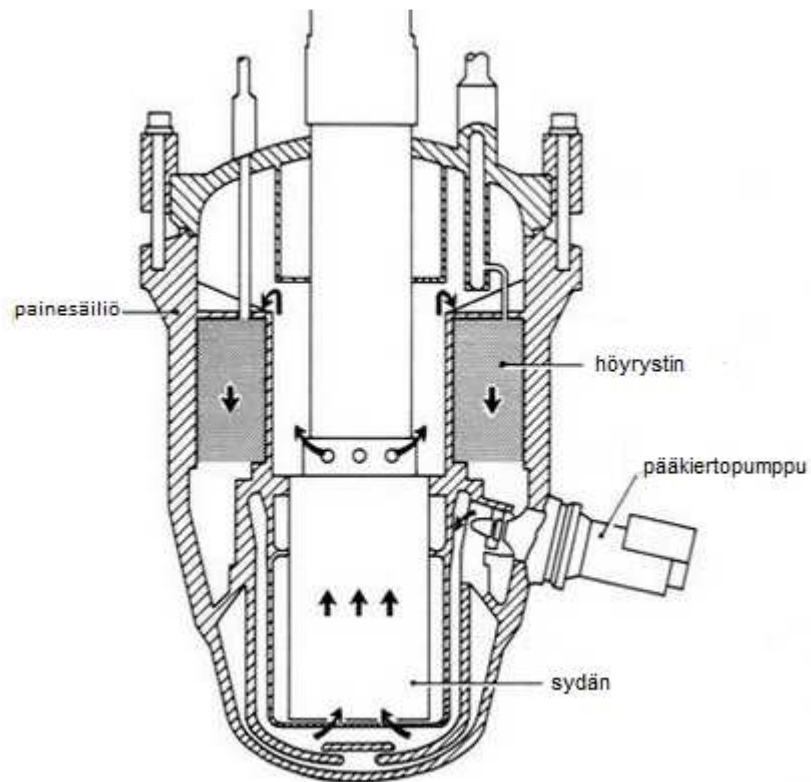
Kuva 6. NS Savannahin primääripiiri. 1. lämmönsiirrin, 2. höyryrumpu, 3. paineistin, 4. sulkuventtiili, 5. pääkiertopumppu, 6. takaiskuventtiili. (Muokattu lähteestä ATTN 2009)

Laivareaktoreissa jokaiseen jäähdytyspiiriin kuuluu ainakin yksi pääkiertopumppu sekä mahdollisesti myös vara- tai hätäpumppu. Primääripiirin putkien pituus ja putkimutkien määrä on laskenut reaktorien kehittyessä. Tällaisella kehityssuunnalla on pyritty ehkäisemään mahdollisimman hyvin primääripiirissä tapahtuvan vuodon mahdollisuus. Nykyisin käytössä olevissa reaktoreissa on mahdollisuus käyttää reaktoria luonnonkierrolla 25 - 30 % teholla. Luonnonkierto tarkoittaa, että lämpenevä vesi virtaa ylös höyrystimille ja jäähtynyt vesi alas reaktorin pohjalle. Esimerkiksi onnettomuustilanteissa voidaan lämpöä siirtää pois reaktorista luonnonkierron avulla. (Reistad & Ølgaard 2006, s. 24-25)

Primääripiirin painetta säädetään ja pidetään yllä paineenhallintajärjestelmällä, joita on käytössä kahdenlaista tyyppiä. Ensimmäinen vaihtoehto on lämmitysvastuksilla ja ruiskutuksella paineen säätelyn toteuttava paineistin, joka on toimintaperiaatteeltaan samanlainen kuin tavallisten maalla käytössä olevien reaktorien paineistimet. (ATTN 2009, s. 59) Toinen vaihtoehto on kaasulla toimiva paineistinjärjestelmä, joka koostuu useammasta paineistimesta. Tällaisessa mallissa primääripiirin painetta hallitaan säätelemällä paineistimien veden pinnan yläpuolella olevan kaasun painetta. Paineistimille tuleva kaasu saadaan erillisistä ulkoisista kaasutankeista. Primääripiirin käyttöpaine on vaihdellut reaktorimallista riippuen 130 - 200 bar välillä. (Reistad & Ølgaard 2006, s. 18-24)

5.1.1 Integroitu reaktori

Integroidussa painevesireaktorissa primääripiirin komponentit, kuten höyrystimet, pääkiertopumput ja paineistin, on sijoitettu painesäiliön sisään. Höyrystimet ovat integroiduissa reaktoreissa once-through höyrystimiä, kuten suurimmassa osassa kiertopiirityyppisistä reaktoreista. (Ishida, Ochiai, & Hoshi 2000, s. 88-89) Kuvassa 7 on esitetty yhdenlainen malli integroidusta painevesireaktorista. Integroidut reaktorimallit ovat pääpiirteittäin kaikki samanlaisia, mutta paineistimen sijoittamisessa on suurimmat eroavaisuudet. Paineistin voidaan sijoittaa myös painesäiliön ulkopuolelle, josta se on ohuella putkella yhdistetty painesäiliöön. (Giorsetti 1977, s. 25) Ensimmäinen integroitua reaktoria käyttänyt alus oli saksalainen Otto Hahn, jossa ei ollut ollenkaan paineistinta, vaan reaktori on itsestään paineistuva. Tällaisessa reaktorissa paineistumisen saa aikaan kylläinen höyry painesäiliössä olevan veden pinnalla. (Bednarczyk 1989, s. 99)



Kuva 7. Integroitu painevesireaktori. (Muokattu lähteestä Ragheb 2011)

Integroidun reaktorin etuja "tavalliseen" kiertopiirityyppiseen reaktoriin on pienempi koko ja paino. Koska pääkomponentit on sijoitettu painesäiliön sisään, saadaan suojarakennuksen kokoa myös pienemmäksi. Lisäksi mahdollisuus valmistaa reaktori kokonaisuudessaan tehtaalla ja sen kuljettamisen sekä asentamisen yksinkertaisuus tekevät siitä myös taloudellisemman vaihtoehdon. Suurten putkien puuttumisen vuoksi integroitu reaktori on myös turvallisempi, koska putket jotka voivat mahdollisesti katketa ovat pieniä, eivätkä aiheuta suurta vuotoa. Tämän vuoksi jäähdytteenmenetysonnettomuudessa reaktorista poistuva vesi saadaan korvattua hätäjäähdytysvedellä. Jäähdytysvettä kierrätetään reaktorissa pääkiertopumppujen avulla, mutta kaikki integroidut reaktorit voivat toimia osittain myös luonnonkierrolla. (Giorsetti 1977, s. 28-29)

Integroitujen reaktoreiden käyttö laivojen voimanlähteenä on ollut tähän mennessä vähäistä, mutta tulevaisuudessa niiden käyttö tulee todennäköisesti lisääntymään. Esimerkiksi seuraavan sukupolven kehittyneemmistä laivareaktorimalleista venäläisten suurille jäänmurtajille kehittämä RITM-200 sekä japanilaisten suunnittelussa oleva

MRX ovat molemmat integroituja painevesireaktoreita. (Ishida, Ochiai & Hoshi 2000, s. 85; IAEA 2011, s. 9)

5.2 Polttoaine

Laivareaktoreiden polttoaineena käytetään matalarikasteista UO_2 -polttoainetta tai korkearikasteista uraani-zirkonium-lejeeringistä valmistettua metallipolttoainetta. Matalarikasteinen keraaminen UO_2 -polttoaine on valmistettu pelleteiksi, kuten maalla toimivien reaktorien polttoaine. Polttoaineen rikastusaste vaihtelee noin 4 - 20 % välillä. Ensimmäisten laivareaktorien polttoaineena käytetyn UO_2 :n rikastusaste oli melko alhainen, noin 4 %, mikä vastaa maalla toimivissa laitoksissa käytettävien polttoaineiden rikastusastetta. UO_2 -polttoaineen käyttö on ollut melko vähäistä, mutta uusien laivareaktorien suunnitelmissa on tarkoitus käyttää polttoaineina UO_2 :a, joiden rikastusasteet tulevat nousemaan 20 %:iin asti. Reaktoriin vaihdetaan uusi polttoaine 3-7 vuoden välein riippuen polttoaineen rikastusasteesta. Laivareaktoreiden polttoaineenvaihdossa vaihdetaan kerralla koko reaktorissa oleva polttoaine, toisin kuin maalla toimivissa reaktoreissa, missä polttoaineesta vaihdetaan vuosittain 1/3 tai 1/4. (IAEA 2011, s. 9; Lange 1990, s. 9; Ragheb 2011, s. 28)

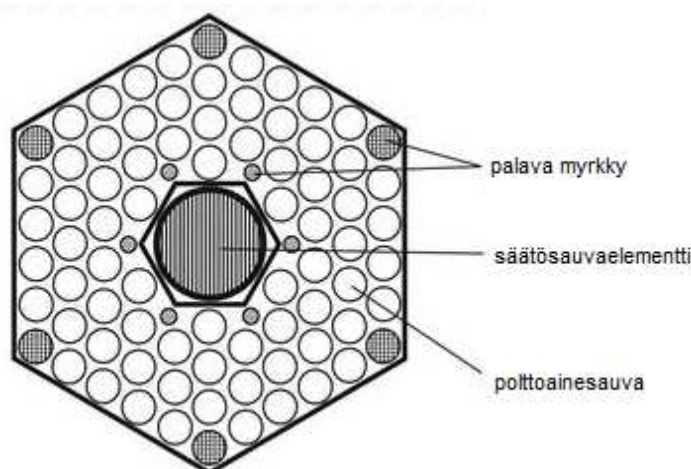
Toinen käytetty polttoaine laivareaktoreissa on metallipolttoaine, joka on valmistettu uraani-zirkonium-lejeeringistä. Metallipolttoaine otettiin käyttöön, koska haluttiin saada UO_2 :a huomattavasti paremmin lämpöä johtava ja paremman ominaislämmön omaava polttoaine. Polttoaineen rikastusaste venäläisissä jäänmurtajissa on suurimmillaan 90 % ja sotilaskäytössä olevien alusten rikastusaste on vieläkin korkeampi. Näiden polttoaineen ominaisuuksien ansiosta reaktorien tehoa saatiin nostettua, polttoaineen käyttöaika korotettua ja pidennettyä polttoaineenlatausväliä parhaimmillaan yli kymmeneen vuoteen. (Reistad & Ølgaard 2006, s. 21, 42; Ragheb 2011, s. 3)

Erittäin korkean polttoaineen rikastusasteen tarkoituksena on myös saada aikaan suuri reaktiivisuus, jotta saadaan fissiossa syntyvien "reaktorimyrkkyjen" negatiivinen reaktiivisuus kompensoitua. Reaktori myrkkujen määrä alkaa nopeasti kasvaa reaktorin sulkemisen jälkeen. Tärkein reaktorimyrkyistä on xenon-135 ($Xe-135$), jota muodostuu fissiossa sekä jodi-135:n puoliintuessa. $Xe-135$ absorboi erittäin voimakkaasti

neutroneja ja sen aiheuttama negatiivinen reaktiivisuus voi estää reaktorin käynnistämisen jopa kymmeniksi tunneiksi. Tämän vuoksi erityisesti sotilaskäyttöön tarkoitettujen reaktorien polttoaine on erittäin korkeaksi rikastettua. Muuten alukset voisivat mahdollisen pikasulun sattuessa joutua vaaratilanteisiin reaktorin toimimattomuuden vuoksi. (Lamarsh 1975, s. 283-289)

Polttoaineen suojakuoren materiaalina käytetään yleisimmin zirkoniumia sekä zirkonium-lejeerinkiä. Suojakuoren materiaalina on ensimmäisissä laivareaktoreissa käytetty myös ruostumatonta terästä ja zirkonium-niobium-lejeerinkiä. Uraanidioksidi polttoainetta käytettäessä polttoainepelletin ja suojakuoren väliin jää n. 0,05 mm kaasurako, mikä on täytetty heliumilla. Metallipolttoainetta käytettäessä kaasurakoa polttoaineen ja suojakuoren välillä ei ole. Polttoainesauvat muodostavat polttoaine-elementin, joissa osassa on paikat säätösauvoille. (Reistad & Ølgaard 2006, s. 15, 21-23) Laivareaktoreissa käytetyt polttoaine-elementit ovat olleet pyöreitä sekä neliskanttisia ja niiden kuori on valmistettu zirkonium-lejeeringistä. Jälkimmäinen polttoaine-elementtimalli on yleisesti käytössä myös maalla toimivissa reaktoreissa. (Reistad & Ølgaard 2006, s. 17; ATTN 2009, s. 55) Yhdessä polttoaine-elementissä on viimeisimmässä venäläisessä reaktorimallissa, KLT-40:ssä, 53 polttoainesauvaa ja polttoaine-elementtejä reaktorissa on 241. U-235:n määrä kyseisessä reaktorissa on noin 150 kg. (Reistad & Ølgaard 2006, s. 22-23)

Seuraavan sukupolven venäläisissä laivareaktoreissa polttoaine-elementit tulevat olemaan kasetti-tyyppisiä, jotka ovat muodoltaan kuusikulmaisia ja niiden keskellä on neutroneja absorboiva säätösauvaelementti. Kasetti-tyypin polttoaine-elementti on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Kasetti-tyyppinen polttoaine-elementti. (Muokattu lähteestä Nuclear Engineering International 2004)

Kasetti-tyypin polttoaine-elementti suunniteltiin käyttöön, koska haluttiin nostaa reaktorin uraanipitoisuutta, jota laivareaktoriin pieni koko rajoittaa. Tällaisia polttoaine-elementtejä käytettäessä saadaan reaktoriin sijoitettua suurin mahdollinen määrä polttoaine-elementtejä ja tällöin saadaan myös suurin mahdollinen määrä urania reaktoriin. (IAEA 2011, s. 9; IAEA 2013, s. 6)

5.3 Reaktiivisuuden hallinta

Kaikissa käytössä olleissa laivareaktoreissa on ollut käytössä negatiivinen lämpötilakerroin, joka antaa reaktorille hyvät itsesäätelyominaisuudet. (Reistad & Ølgaard 2006, s. 23) Negatiivinen lämpötilakerroin pitää reaktorin tehon tasaisena ja palauttaa reaktorin takaisin normaaliin tilaan mahdollisen häiriön sattuessa. Esimerkiksi reaktorin tehon noustessa äkillisesti nousee myös lämpötila, jolloin reaktiivisuus vähenee ja reaktori palaa takaisin stabiiliin tilanteeseen. Negatiivinen lämpötilakerroin toimii myös toiseen suuntaan eli tehon laskiessa reaktiivisuus kasvaa. (Reuss 2008, s. 246) Negatiivisen lämpötilakertoimen lisäksi reaktiivisuuden säätelyyn käytetään säätösauvoja, palavia myrkkyjä sekä hätätilanteissa jäähdytysveten ruiskutettavia nestemäisiä absorbaattoreita. (Reistad & Ølgaard 2006, s. 23)

Laivareaktoreissa on käytetty kahta tapaa reaktiivisuuden säätämiseen säätösauvoilla. Ensimmäisissä reaktoreissa oli käytössä boorista ja ruostumattomasta teräksestä valmistettuja säätösauvoja, joilla toteutettiin sekä reaktiivisuuden säätö että reaktorin pikasulku. (Lange 1990, s.9) Säätösauvojen määrä neuvostoliittolaisissa reaktoreissa oli alkuvaiheessa huomattavasti pienempi, kuin vastaavan ajan yhdysvaltalaisissa reaktoreissa. Reaktorien kehittyessä reaktoreissa on siirrytty käyttämään erillisiä reaktiivisuudensäätö- ja pikasulkujärjestelmiä. Järjestelmät on suunniteltu toimimaan eri toimintaperiaatteilla, jonka vuoksi molempien järjestelmien samanaikaisen vikaantumisen todennäköisyyttä on saatu pienennettyä. Esimerkiksi KLT-40:ssä pikasulkujärjestelmä koostuu neljästä pikasulkusauvojen paketista, jotka toimivat hammastankomekanismilla, jota käytetään servomootorilla ja asynkronimootorilla. Sauvat menevät 16 polttoaine-elementin holkkeihin, kun pikasulku tehdään. Pikasulkusauvat on varustettu kiihtyvillä jousilla, jotka varmistavat sauvojen nopean liikkumisen hätätilanteissa. Säätösauvajärjestelmä koostuu viidestä säätösauvapaketista, joita käytetään ruuvimekanismilla, alennusvaihteella sekä pysäytysmootorilla. (Kovalenko 1993, s. 52)

Palavia myrkkijä käytetään laivareaktoreissa kuten maalla toimivissa reaktoreissa lisäämään polttoaineen käyttöaikaa ja tasoittamaan tehojakaumaa. Palava myrkkijä sijoitetaan erillisinä sauvoina polttoaine-elementteihin. Palavina myrkkijoinä käytetään gadoliniumia sekä booria. Laivareaktoreissa ei käytetä normaaliin reaktiivisuuden säätöön jäähdytteeseen lisättävää absorbaattoria, kuten maalla toimivissa reaktoreissa, joissa esimerkiksi jäähdytteen boorihappo-pitoisuutta muutetaan polttoaineen kuluessa. Tällainen ratkaisu johtuu siitä, että laivan mahdollisesti upotessa voi merivesi aiheuttaa reaktiivisuuden lisäyksen sydämessä. Hätätilanteita varten on kuitenkin käytettävissä nestemäisen absorbaattorin ruiskutus jäähdyteteen, jolla voidaan tarvittaessa varmistaa reaktorin pikasulku. Nestemäisinä absorbaattoreina käytetään booria ja gadolinium-nitraattia. (Reistad & Ølgaard 2006, s. 23; Giorsetti 1977, s. 82-85)

5.4 Turvallisuus

Ydinreaktoria käytettäessä laivan voimanlähteenä on otettava huomioon erilaisia turvallisuusnäkökohtia kuin tavallisilla ydinvoimalaitoksilla. Koska reaktori on sijoitettu laivalle, on otettava eri tavalla huomioon myös reaktorin ulkopuoliset tapahtumat. Laivalla työskentelevät ihmiset joutuvat jonkin verran altistuneeksi säteilylle myös työaikansa ulkopuolella, toisin kuin tavallisissa ydinvoimalaitoksissa työskentelevät ihmiset. Koska laivareaktoreilla varustetut laivat ovat suurimman osan ajastaan kaukana merellä, niin onnettomuuden sattuessa vaikutukset suurelle määrälle ihmisiä pienenee. Mahdolliset reaktorionnettomuudet ovat hyvin samanlaisia kuin tavallisten reaktorien mahdolliset onnettomuudet. (Giorsetti 1977, s. 78)

5.4.1 Reaktorin turvajärjestelmät

Reaktorin turvallisuusjärjestelmiin kuuluvat aiemmin esitetyt säätö- ja pikasulkusavat, jotka on suunniteltu toimimaan automaattisesti kaikissa normaaleissa ja ennakoitavissa laivan kallistumisissa. Vain suuret laivaonnettomuudet, kuten vakava törmäys, tulviminen ja uppoaminen voivat kääntää laivan kulmaan, jossa reaktorin automaattinen pikasulku ei tehoa. Tällaiset tilanteet ovat erittäin epätodennäköisiä ja toisaalta laivan kallistuminen niin hidasta, että pikasulku ehditään suorittaa käsin. (Giorsetti 1977, s. 79-80)

Muita tärkeimpiä reaktorin turvallisuusjärjestelmiä ovat reaktorin jälkijäähdytysjärjestelmä, sydämen hätäjäähdytysjärjestelmä, suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä sekä hätätilanteissa käytettävä absorbaattorin ruiskutus primääripiiriin, mikä käsiteltiin jo aiemmin. (Kovalenko 1993, s. 53) Jälkijäähdytysjärjestelmä siirtää lämpöä mereen kolmannella kiertopiirillä primääripiirin puhdistusjärjestelmästä ja höyrystimistä. Sydämen hätäjäähdytysjärjestelmä on jaettu korkeapaineiseen ja matalapaineiseen järjestelmään. Korkeapaineiseen järjestelmään kuuluu passiivisesti toimivia vesiakkuja sekä pumppuja ja vesivarastoja, joilla vettä syötetään reaktoriin. Matalapaineisen järjestelmän tehtävänä on varmistaa suojarakennukseen tiivistyneen veden palautuminen reaktoriin pumppujen avulla. Suojarakennuksen ruiskutusta käytetään onnettomuustilanteessa suojarakennuksen

paineen alentamiseen. Vakavimmissa onnettomuuksissa suojarakennus voidaan myös tulvittaa laivalla olevilla vesivarastoilla ja sulkea tiiviisti. Edellä esiteltyt turvallisuustoiminnot tulevat voimaan kaikille erikseen määritellyistä parametreista, mutta ne voidaan käynnistää myös manuaalisesti. (IAEA 2013, s. 34-37)

5.4.2 Suojarakennus

Reaktori ja primääripiiri on suljettu tiiviiseen suojarakennukseen, joka estää onnettomuustilanteissa vapautuvien aineiden pääsyn ilmakehään. Suojarakennus on valmistettu teräksestä ja se on suunniteltu kestäväksi oletetun suurimman mahdollisen onnettomuuden aiheuttama paineen nousu. Suojarakennukseen pääsy on estetty aina reaktorin käytön aikana. Pääsy suojarakennukseen on mahdollista, kun reaktori on sammutettu ja säteilytasot ovat laskeneet turvalliselle tasolle. Suojarakennuksen ympärille on rakennettu lisäksi betonista, lyijystä ja polyeteenistä sekundäärinen suojaus. Suojarakennuksen alaosan ympäröidään yli 100 cm paksulla betoniseinällä, joka on tuettu teräsrakenteilla. Yläosan suojaus koostuu noin 15 cm paksusta lyijykerroksesta sekä noin 15 cm paksusta polyeteenikerroksesta, jotka absorboivat gamma-säteilyä ja hidastavat mahdollisia ulos vuotavia neutroneja. Suojarakennuksen sivuille on lisäksi asennettu teräs- ja puukerroksista valmistettuja törmäysmattoja, jotka pienentävät laitokseen kohdistuvia voimia mahdollisen törmäyksen sattuessa. (Ragheb 2011, s. 15)

Reaktorin painesäiliön ympärille on lisäksi valmistettu vesitankki säteilysuojaksi. Tankki on ympäröity noin 5 - 10 cm paksulla lyijykerroksella ja vesikerroksen paksuus tankissa on yli 80 cm. Edellä mainituilla suojauksilla on saatu laskettua miehistölle aiheutuva säteilyannos mahdollisimman pieneksi ottaen huomioon laivan tilarajoitukset. Suojausten ansiosta sekundäärisen suojauksen pinnalta mitattuna vuotuinen säteilyannos ei ylitä 50 mSv vuodessa. (Ragheb 2011, s. 15-16)

5.4.3 Laivan turvajärjestelmät

Laivoissa tulee olla käytettävissä varavoimanlähde, kuten dieselgeneraattori. Näin vältetään laivan joutuminen täysin ajelehtimaan tilanteissa, joissa reaktori vikaantuu. Laivan vapaasti ajelehtiessa kasvaa onnettomuuden mahdollisuus. Mahdollisten törmäysten ja pohjakosketusten laivalle aiheutuvien onnettomuuksien ehkäisemiseksi on useita ratkaisuja, kuten tutkajärjestelmät, jotka jätetään kuitenkin itse reaktoriin ja ydinvoimatekniikkaan liittymättöminä käsittelemättä. (Giorsetti 1977, s. 81, 99)

5.5 Työntövoiman tuotto

Reaktorin tuottaman energian siirtäminen turbiineilla laivan voimanlähteeksi voidaan suorittaa kahdella tavalla. Ensimmäinen vaihtoehto on kytkeä turbiinin akseli potkurin akseliin suoraan kytkimen ja alennusvaihteen avulla. Näin turbiinin tuottama voima saadaan suoraan potkureille. Toinen vaihto ehto on tuottaa ensin sähköä turbiinin ja generaattorin avulla. Tuotettua sähköä käytetään sen jälkeen potkureiden pyörittämiseen. (World Nuclear Association 2013)

Turbiinit on sijoitettu lähemmäs laivan peräosaa, reaktorilaitoksen taakse (World Nuclear Association 2013). Reaktori pyörittää tavallisesti yhtä turbiiniyksikköä, joka voi koostua korkeapaine- ja matalapaineosasta (ATTN 2009, s. 73). Käytettävät turbiinit voivat olla kahteen suuntaan haarautuvia, joissa höyrystimiltä tuleva höyry tulee turbiiniin sen keskeltä ja jakaantuu päädyistä kahteen suuntaan (Ragheb 2011, s. 7).

6 ONNETTOMUUDET

Seuraavassa käydään läpi laivareaktoreille tapahtuneita onnettomuuksia ja häiriötilanteita. Tällaisia tapahtumia voivat olla törmäykset, reaktoriin liittyvät ongelmat, tulipalot ja räjähdykset. Reaktorionnettomuuksia ovat jäähdytteenmenetysonnettomuus (LOCA) ja reaktiivisuusonnettomuudet.

Jäähdytteenmenetysonnettomuudessa jäähdytteen syöttö reaktorisydämeen häiriintyy primääripiirin putken katkeamisen tai pääkiertopumppujen pysähtymisen takia. LOCA:n tullessa voimaan ketjureaktio reaktorisydämessä pysäytetään turvallisuustoimintojen avulla. Reaktorissa olevien fissiotuotteiden hajoaminen tuottaa kuitenkin edelleen jälkilämpöä, jolloin vesi höyrystyy. Jälkilämmön teho on heti reaktorin sammuttamisen jälkeen noin 6 - 7 % täydestä tehosta ja vuorokauden kuluttua noin 0,5 %. Jäähdytteen vähentyessä alkaa polttoaine reaktorissa kuumentua, mikä johtaa polttoaineen vaurioitumiseen ja lopulta sulamiseen ellei jäähdytystä saada palautettua tarpeeksi ajoissa. (Ølgaard 1996, s. 4-5)

Kriittisyysongelmuudessa reaktori tulee ylikriittiseksi eli fissio ketjureaktiossa syntyy enemmän neutroneja kuin kaappauksissa ja absorptioissa niitä häviää, jolloin neutronien määrä ja samalla reaktorin teho alkaa jatkuvasti kasvaa. Tällaisessa onnettomuudessa reaktorin teho nousee todella nopeasti, jolloin reaktorin polttoaineeseen tulee yleensä vaurioita. Onnettomuuden voi aiheuttaa esimerkiksi säätösauvojen äkillinen poistuminen reaktorista. (Ølgaard 1996, s. 6-7)

6.1 Lenin LOCA 1966

Venäläisellä jäänmurtaja Leninillä tapahtui yhdessä sen kolmesta OK-150-reaktorista jäähdytteenmenetysonnettomuus elokuussa 1966 polttoaineenvaihdon yhteydessä. Laivan reaktorit oli juuri sammutettu polttoaineenvaihtoa varten, kun operaattorin tekemän virheen vuoksi kakkosreaktorin sydäimestä kuivui jäähdytysvedet. Reaktori oli jonkin aikaa kokonaan ilman jäähdytystä, jolloin jälkilämmön vaikutuksesta suureen osaan polttoaineesta pääsi aiheutumaan rakenteenmuutoksia ja sulamista. Polttoainetta vaihdettaessa pystyttiin normaalisti vaihtamaan vain 94 reaktorin 219:sta teknisestä

polttoainekanaavasta. Loput vaurioituneet polttoaineet poistettiin reaktorista poistamalla reaktoritankissa sijaitseva polttoaine-elementtien kori. Kaikki kolme aluksen OK-150-reaktoria poistettiin ja ne korvattiin myöhemmin kahdella OK-900-reaktorilla. (Ølgaard 1996, s. 18-19; Reistad & Ølgaard 2006, s. 19)

6.2 N.S. Mutsu 1974

Japanilaisella kauppalaiva NS Mutsulla ei varsinaisesti käynyt onnettomuutta, mutta suunnitteluvirheen vuoksi tapahtui säteilyn aiheuttama vaaratilanne, ja tästä syystä tapahtuma käsitellään onnettomuuksien osassa.

Kauppalaiva NS Mutsu lähti koeajolle 26. päivä elokuuta 1974, jossa suoritettiin laivan reaktorin testauksia. Kriittisyyden lähestyminen ja nolla-teho testit sujuivat hyvin, kunnes 1. syyskuuta alettiin testata reaktorin jälkilämmönpoistojärjestelmää 1,4 % teholla reaktorin kokonaistehosta. Tällöin havaittiin yläkannella olevista gammasäteilymittareista epänormaalin korkea säteilylukema, 0,002 mSv/h. Tehoa laskettiin ja suoritettiin mittauksia, jolloin huomattiin kohonneiden säteilyarvojen johtuvan reaktorin painesäiliön ja primäärisuojan välisestä raosta, josta neutronit pääsivät vuotamaan. (Miyakoshi et. al, s. 1) Alus palasi satamaan, jossa suoritettiin testauksia ja parannettiin reaktorin suojauksia. Tehtyjen muutosten jälkeen NS Mutsun reaktorin testaukset aloitettiin uudelleen maaliskuussa 1990 ja lopulliset laivan testausmatkat loppuivat helmikuussa 1992. (Yamaji & Sakomoto 1992, s. 82) NS Mutsu ei tullut kuitenkaan koskaan kaupalliseen käyttöön ja sen reaktori poistettiin vuonna 1995 ja alus muutettiin merentutkimusalus Miraiksi. (JAMSTEC)

6.3 Admiral Ushakov 1990

Tammikuussa 1990 neuvostoliittolainen risteilijä Admiral Ushakov joutui keskeyttämään tehtävänsä Välimerellä toisessa sen reaktoreissa ilmenneen vian vuoksi. Alus pääsi omin avuin palaamaan tukikohtaansa Kuolan niemimaalle ja reaktorin vika on todennäköisesti johtunut pienestä primääripiirin vuodosta. Alus ei ole ollut käytössä

kyseisen tapahtuman jälkeen. Onnettomuudesta ilmoittaneesta tahosta ei ole täyttä varmuutta, joten myöskään Admiral Ushakovin onnettomuutta/häiriötilannetta ei ole pystytty 100 % varmuudella varmistamaan. (Ølgaard 1996, s. 58)

7 LAIVAREAKTORIN PURKAMINEN

Laivat poistetaan käytöstä niiden tullessa käyttöikänsä päähän tai muista syistä, kuten laivassa ilmenneiden vikojen tai poliittisten syiden takia. Ydinvoimakäyttöisten laivojen käytöstä poiston jälkeen niistä poistetaan käytetty polttoaine ja puretaan radioaktiiviset osat. Purkamisen tapahtuu tietyillä telakoilla, joissa puretaan yleensä sekä ydinkäyttöisiä laivoja että sukellusveneitä. Käytöstä poistettu laiva ankkuroidaan ensimmäiseksi purkamista varten olevaan laituriin ja purkamisen apuna käytettävä tukialus ankkuroidaan sen vierelle. Ensin poistetaan laivan reaktoreissa oleva polttoaine. Poistamiseen käytetään kyseiseen tarkoitukseen tehtyjä laitteita, jotka ovat laivaston suunnitteleamia. Reaktorista ylös nostettu polttoaine siirretään purettavan laivan sekä tukialuksen nosturien avulla tukialukseen, joka on esitetty kuvassa 9. Tukialuksessa reaktorista poistettu käytetty polttoaine säilötään laivalla olevaan käytetyn polttoaineen varastoon. Tukialus siirtyy seuraavaksi erikseen määriteltyyn paikkaan, jossa se ajaa laituriin ja käytetty polttoaine siirretään laivan omasta varastosta kuljetustynnyreihin. Kuljetustynnyrit kuljetetaan välivarastoon, josta ne myöhemmin siirretään eteenpäin yleensä junalla jatkokäsittelyyn tai loppusijoitukseen. (Anitropov et al, s. 2-3)



Kuva 9. Tekninen tukialus PM-74. (Anitropov et al.)

Polttoaineen poistamisen jälkeen alus siirretään purettavaksi, jossa aluksesta poistetaan mastot, kansirakenteet ja osa aluksen laitteistosta. Tämän jälkeen aluksen runko hinataan telakalle, jossa runko pilkotaan termisesti leikkaamalla kolmeen osaan, jotka ovat keula, perä ja keskiosa, jossa sijaitsee ydinvoimantuotantoon tarvittavat järjestelmät. Keulaa ja perää pilkotaan pienempiin osiin, minkä jälkeen ne viedään eteenpäin lopullista romuttamista varten. Keskiosa siirretään pois telakalta maalle rakennettuun purkulaitokseen, jossa runko pilkotaan pienempiin osiin ja reaktorilohkosta muodostetaan pitkäaikainen varasto. Reaktorilohko siirretään edelleen varastoitavaksi paikkaan, johon toimitetaan laivojen reaktorit pitkäaikaiseen varastointiin. (Anitropov et al, s. 4-5, 7)

Laivojen purkamisesta muodostuu suuri määrä erilaista kiinteää, nestemäistä ja kaasumaista jätettä. Suurimman terveysriskin aiheuttavat radioaktiiviset ja myrkylliset laivan purkujätteet. Vaarallisimmat purkujätteet on jaettu neljään ryhmään, kiinteät radioaktiiviset jätteet, nestemäiset radioaktiiviset jätteet, kiinteät myrkylliset jätteet ja nestemäiset myrkylliset jätteet. Kiinteät radioaktiiviset jätteet kuten suojarakennuksen materiaalit ja suojavaatteet sekä suojakengät säilötään reaktorilohkosta muodostettuun pitkäaikaiseen varastoon. Nestemäisiin radioaktiivisiin jätteisiin luetaan dekontaminaatiossa eli puhdistamisessa aktiivisuuden vähentämiseksi käytetyt liuokset ja erilaiset pesu- ja huuhteluvedet. Nämä jätteet siirretään purettavasta aluksesta erillisiin kelluviin tankkerialuksiin. Kuvassa 10 on esitetty neuvostoliittolaisia PE-tyypin tankkerialuksia. Kiinteitä myrkyllisiä jätteitä ovat esimerkiksi maalaustarvikkeet, metallinkäsittelyssä syntyneet jätteet ja asbesti. Nestemäiset myrkylliset jätteet pitävät sisällään öljyä ja vastaavia myrkyllisiä aineita sisältävät ei-radioaktiiviset nesteet. (Anitropov et al, s.6)



Kuva 10. PE-tyyppin tankkerialuksia. (Anitropov et al.)

Laivareaktorien purkaminen on jonkin verran kalliimpaa toteuttaa verrattuna sukellusveneiden purkamiseen. Tämä johtuu pinta-alusten suuremmasta koosta, jolloin purkamiseen ja jätteiden käsittelyyn tarvitaan enemmän henkilöstöä ja teknologisia resursseja. Pinta-aluksissa, joita on rakennettu huomattavasti vähemmän kuin sukellusveneitä, tarvitaan purkamisessa hieman erilaista kalustoa kuin sukellusveneiden purkamisessa, jolloin kustannukset kasvavat. (Anitropov et al, s. 2-3)

8 LAIVAREAKTORIEN MUUT KÄYTTÖKOHTEET

Laivareaktoriin käyttöä muissa sovelluksissa on tutkittu ja suunniteltu jo pidemmän aikaa. Laivareaktorit ovat kooltaan pienempiä verrattuna tavallisiin painevesireaktoreihin, jonka vuoksi niiden soveltamista muihin tarkoituksiin on tutkittu. Seuraavaksi on esitelty muutamia käyttökohteita, mihin laivareaktoreita on suunniteltu käytettävän.

8.1 Kelluva ydinvoimalaitos

Kelluvien ydinvoimalaitosten käyttöä on suunniteltu energian lähteeksi kaukaisille ja vaikeasti päästäville alueille. Näiden voimalaitosten reaktoreiksi on suunniteltu käytettäväksi laivareaktoreita erityisesti niiden pitkien latausvälien vuoksi. Kelluva ydinvoimalaitos on erikoisvalmisteen alus, jossa ei ole potkuria ja sen tehtävänä on pelkästään tuottaa sähköä ja lämpöä eri käyttötarkoituksiin. Suunnitelmien mukaan tällaiset laitokset käsittävät yhden tai kaksi reaktoria ja niiden käyttöikäksi on arvioitu 40 vuotta. Kelluvat ydinvoimalaitokset tuottavat sähköä samalla periaatteella kun normaalit ydinvoimalat. Kuvassa 11 on esitetty kelluva ydinvoimalaitos. (Mitenkov F.M. 1994, s. 311-312)



Kuva 11. Kelluva ydinvoimalaitos (OKBM Afrikantov)

Ensimmäinen kelluva ydinvoimalaitos oli Yhdysvaltojen valmistama, jossa toisen maailmansodan aikaiseen rahtialukseen oli sijoitettu armeijan MH-1A-reaktori. Se käytti polttoaineena matalasti rikastettua uraania ja sen sähköteho oli 10 MW. Laitos oli toiminnassa Panaman kanavan alueella vuosina 1968 - 1975 ja se tuotti samalla puhdasta juomavettä sähkön tuotannon ohessa. (Adams 1996)

Venäläiset ovat viime vuosina rakentaneet kelluvaa ydinvoimalaitosta, joka on saanut nimen Akademik Lomonosov. Akademik Lomonosov koostuu kahdesta KLT-40S ydinreaktorista, joiden sähköteho on yhteensä 70 MW. Ydinvoimalaitos alkaa olla lähes valmis, vaikka taloudellisten ongelmien takia valmistuminen on jonkin verran viivästynyt alkuperäisestä aikataulusta. Tämän hetkisen aikataulut mukaan Akademik Lomonosov alkaa kaupallisesti tuottaa sähköä syyskuussa 2016. Laitos tullaan sijoittamaan Viljutsinskiin Kamtsatkan alueelle, joka sijaitsee Koillis-Venäjällä. (World Nuclear News 2012)

8.2 Kelluva suolanpoisto- ja juomaveden valmistuslaitos

Kaukaisille alueille, joissa on pulaa juomavedestä, on suunniteltu rakennettavan kelluvia suolanpoisto- ja juomaveden valmistuslaitoksia, jotka tuottavat puhdasta juomavettä ydinreaktorin avulla. Juomavettä voidaan valmistaa poistamalla suolaa merivedestä reaktorin tuottaman lämmön avulla. Laitoksessa on kolme veden kiertopiiriä. Ensimmäinen on normaali reaktorin primääripiiri, toinen on välipiiri, jota valvotaan tarkasti, jotta säteily ei pääse vaikuttamaan viimeisessä piirissä tuotettavaan suolattomaan veteen. Lisäksi laitoksessa on erityisiä vedentuotantoon tarkoitettuja laitteistoja, joilla saadaan valmistettua lopuksi täysin juomakelpoista vettä. Kahdella KLT-40-reaktorilla varustettu laitos tuottaisi arvioiden mukaan suolatonta vettä noin 80 tonnia päivässä. (Mitenkov F.M. 1994, s. 312-313) Maalla sijaitsevia suolanpoisto ja veden valmistuslaitoksia on sekä käytössä että suunnitteilla maailmalla useita, mutta kelluvia suolanpoistolaitoksia ei kuitenkaan ole vielä rakennettu käyttöön. (World Nuclear Association 2013)

Toinen vaihtoehto tuottaa juomavettä ydinreaktorin avulla on poistaa merivedestä suola käänteisosmoosilla. Tällainen kelluva juomaveden valmistuslaitos koostuu kelluvasta

ydinvoimalaitoksesta sekä suolanpoistoaluksesta, jossa suolanpoistoon tarvittava käänteisosmoosi- sekä muu puhtaan juomaveden valmistukseen tarvittava laitteisto sijaitsee. Kelluvalla ydinvoimalaitoksella tuotetaan sähköä, kuten ydinvoimalassa normaalistikin tuotetaan ja se siirretään suolanpoistoalukselle, jolloin käänteisosmoosilaitteisto saa tarvitsemansa sähkön. Jäljelle jäänyt reaktorin tuottama sähkö voidaan siirtää maihin kuluttajien käytettäväksi. (Mitenkov F.M. 1994, s. 313) Maalla sijaitsevia käänteisosmoosilla vettä tuottavia laitoksia on käytössä Japanissa, Intiassa ja Pakistanissa. Useissa muissa maissa käänteisosmoosiprojekteja on tekeillä, mutta kelluvia käänteisosmoosilaitoksia ei toistaiseksi ole valmisteilla. (World Nuclear Association 2013)

8.3 Vedenalainen ydinvoimalaitos

1970-luvun lopulla tutkittiin mahdollisuutta käyttää laivareaktoreita meren pohjaan sijoitetuissa voimalaitoksissa, joilla tuotettaisiin sähköä vedenalaisten öljynporauskompleksien tarpeisiin. Suunnitelmista kuitenkin luovuttiin, koska se olisi vaatinut lisää uutta kalustoa ja polttoaineen vaihtamista pidettiin erityisen hankalana. (Battle, s. 14) Ajatus vedenalaisten ydinvoimalaitosten käytöstä on herännyt myöhemmin eloon uudestaan ja polttoaineen vaihtoa ei pidetä enää ratkaisevana ongelmana. Ranskalainen DCNS on suunnitellut merenpohjaan sijoitettavan Flexblue ydinvoimalaitoksen. Tämä suunniteltu laitos ei kuitenkaan käytä voimanlähteenä laivareaktoria, vaan reaktorina on suunniteltu käytettävän sukellusvenereaktoria. (Flexblue)

8.4 Ydinvoimalaitos maan pinnalla ja alla

Laivareaktorien käyttöä maalla normaalien ydinvoimaloiden tapaan on myös suunniteltu tilanteisiin, joissa sähkön/lämmön tuotantoon riittää pienempikin ydinvoimalaitos. Esimerkiksi venäläisten KLT-40S-reaktoria voidaan käyttää maalla samalla tavalla kuten jo rakenteilla olevassa kelluvassa ydinvoimalaitoksessa. (Mitenkov F.M. 1994, s. 315) Maalle rakennettaviin ydinvoimalaitoksiin ei kuitenkaan

toistaiseksi ole otettu voimanlähteeksi laivareaktoreita. (World Nuclear Association 2013)

Laivareaktoreita on suunniteltu käytettävän myös maanalaisissa ydinvoimaloissa. Tutkimusten mukaan kahdesta KLT-40-reaktorista koostuva ydinvoimalaitos tarvitsisi 25 · 30 · 100 m kokoisen luolan. Tällaisessa laitoksessa kaikki voimalaitoksen käyttöön liittyvät toimenpiteet, mukaan lukien jätteen käsittely, suoritettaisiin maan alla. Tällaisia laivareaktoreilla toimivia maan alle rakennettuja voimalaitoksia ei kuitenkaan ole toteutettu. (Mitenkov F.M. 1994, s. 315)

9 TULOKSET

Tässä kandidaatintyössä käytettiin aineistona pääasiassa ydinenergiajärjestöjen tekemiä tutkimuksia ja raportteja. Lisäksi aineistona käytettiin muita ydintekniikan julkaisuja ja kirjallisuutta. Laivareaktorioiden tarkemmissa tiedoissa on pääasiassa käytetty sähköisiä dokumentteja, joita voidaan kuitenkin pitää luotettavina lähteinä, koska niiden julkaisijoita olivat esimerkiksi Kansainvälinen atomienergiajärjestö (IAEA) ja Pohjoismainen ydinturvallisuustutkimus (NKS).

Laivareaktorit ovat pääpiirteiltään hyvin samankaltaisia kuin maalla sähköntuotannossa käytettävät painevesireaktorit. Reaktori koostuu painesäiliöstä, kiertopumpuista, paineistimesta, höyrystimestä, polttoaineesta, reaktiivisuudensäätöjärjestelmästä ja suojarakennuksesta, kuten maalla toimivat painevesireaktoritkin. Laivojen vähäisestä tilasta johtuen komponentit ovat pienempiä, kuin tavallisissa reaktoreissa sekä reaktorin teho on huomattavasti matalampi. Laivareaktorioiden hyötysuhde on huonompi, kuin maalla toimivien reaktorioiden, koska laivan tehontarve ei ole tasainen, vaan tehoa joudutaan säätämään paljon. Kiertopiirityypin reaktori on kokonaisuudessaan hyvin samankaltainen maalla käytettävien reaktorioiden kanssa. Enemmän eroavaisuuksia on integroidussa reaktorissa, missä pääkomponentit on sijoitettu painesäiliön sisään.

Painesäiliö, kiertopumput ja suojarakenne eroavat tavallisten reaktorioiden vastaavista järjestelmistä pienemmän kokonsa puolesta. Suojarakennuksen toteutuksessa on otettu huomioon reaktorin sijoitus laivaan ja merellä liikkuminen, mutta perusperiaate on sama kuin tavallisten reaktorioiden suojarakennuksilla.

Paineenhallinta laivareaktoreissa toteutetaan joko lämmitysvastuksilla ja ruiskutuksella toimivalla paineistimella, kuten maalla käytettävissä laitoksissa, tai kaasulla toimivan paineistinjärjestelmän avulla. Höyrystiminä käytetään useimmiten once-through höyrystimiä, koska niillä saadaan tuotettua tulistettua höyryä ja säästettyä tilaa verrattuna U-putki höyrystimien käyttöön.

Polttoaine on laivareaktoreissa korkeammin rikastettua kuin maalla toimivissa reaktoreissa. Laivareaktoreissa käytettävä UO₂ polttoaine on valmistettu pelleteiksi, kuten tavallisissa reaktoreissa. UO₂ polttoaineen rikastusaste on suurimmillaan noin 20 %. Metallipolttoainetta käytetään, kun halutaan kasvattaa reaktorin tehoa, nostaa

palamaa ja pidentää reaktorin latausväliä. Metallipolttoaineen rikastusaste voi olla jopa yli 90 %.

Laivareaktorin normaaliin reaktiivisuuden säätöön ei käytetä nestemäistä absorbaattoria normaaliin pitkäaikaiseen reaktiivisuuden säätöön, kuten maalla käytettävissä reaktoreissa. Tällä ratkaisulla saadaan estettyä mahdollisessa laivan uppoamistilanteessa tapahtuva äkillinen reaktiivisuuden nousu meriveden päästessä reaktoriin. Reaktorin pikasulku on myös toteutettu siten, että reaktori saadaan sammutettua suurissa laivaonnettomuuksissa. Laivareaktoreille on käytössä hätä- ja jälkijäähdytysjärjestelmät, kuten maalla toimivissa reaktoreissakin.

Laivareaktoriin muista käyttökohteista kelluva ydinvoimalaitos sekä suolanpoisto-/juomaveden valmistuslaitos näyttäisivät tällä hetkellä parhaimmilta mahdollisuuksilta. Ensimmäistä kelluvaa ydinvoimalaitosta ollaan hiljalleen ottamassa käyttöön ja suolanpoisto- ja vedentuotantolaitoksia on käytössä, mutta tämänhetkiset laitokset eivät käytä voimanlähteenä laivareaktoria. Tällaisiin uusiin käyttökohteisiin voisi perinteistä kiertopiirityypin reaktoria paremmin sopia integroitu reaktori, jonka etuja on käsitelty luvussa 5.1.1. Uusien sovellusten laajamittaiseen käyttöönottoon menee vielä kuitenkin aikaa. Rajoitteina ovat esimerkiksi taloudelliset asiat.

10 YHTEENVETO

Laivareaktorit, pois lukien integroitu reaktori, eroavat tavallisista maalla käytettävistä painevesireaktoreista pienemmän tehon ja koon lisäksi lähinnä polttoaineen ominaisuuksissa ja reaktiivisuuden säädössä. Laivareaktorien turvallisuus on kasvanut huomattavasti alkuajoista ja nykyaikaisten reaktorien turvallisuustoiminnot ovat samanlaisia kuin maalla toimivissa reaktoreissa.

Ydinvoimaa on käytetty laivojen voimanlähteenä jo yli 50 vuoden ajan. Tänä aikana laivareaktorit ovat kehittyneet ja alkuaikoina saatujen käyttökokemusten ansiosta ovat kehittyneet myös maalla käytettävät painevesireaktorit. Laivareaktoreiden käyttö on ollut onnistunutta ja hyvin toimivaa erityisesti laivastojen käytössä sekä jäänmurtaajissa. Ydinvoiman käyttö kaupallisten siviilialusten voimanlähteenä todettiin aikanaan liian epätaloudelliseksi.

Laivareaktoreiden käyttö tulee jatkumaan ja mahdollisesti myös lisääntymään. Erityisesti jäänmurtaajien käyttöön tarkoitettuja uuden sukupolven laivareaktoreita kehitetään jatkuvasti. Laivareaktorien käyttö kauppalaivojen voimanlähteenä on myös varteenotettava vaihtoehto muiden polttoaineiden hinnan noustessa ja kun tarvitaan nopeaa laivaa pitkille välimatkoille. Lisäksi mahdollisuus käyttää laivareaktoreita kelluvissa ydinvoimalaitoksissa syrjäisillä alueilla ja juomaveden valmistuksessa tulevat lisäämään laivareaktorien käyttöä tulevaisuudessa.

LÄHDELUETTELO

Adams Rod, 1996. First Nuclear Power Barge: Pioneer Barge Built in America. [viitattu 15.10.2013] Saatavissa: <http://atomicinsights.com/first-nuclear-power-barge-pioneer-barge-built-america/>

Anitropov V.A. et al. Dismantlement of surface vessels with nuclear power installations and nuclear service ships. [viitattu 10.6.2013] Saatavissa: http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/documents/ws052007_4E.pdf

ATTN: Document Control Desk, 2009. Submittal of Final Safety Analysis Report, Revision V. [viitattu 19.11.2013] 148 s. Saatavissa: http://www.marad.dot.gov/documents/STS_004-002_%28Rev_V%29.pdf

Battle N. PWR Plant Development for Marine Propulsion. The Nuclear Engineer, Vol. 25, No. 1

Bednarczyk Adalbert A., 1989. Nuclear electric magnetohydrodynamic propulsion for submarine. Massachusetts institute of technology. [viitattu 13.1.2014] 196 s. Saatavissa: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a213401.pdf>

Flexblue. DCNS. [viitattu 17.10.2013] Saatavissa: <http://en.dcnsgroup.com/energy/civil-nuclear-engineering/flexblue/>

Giorsetti Domingo Ricardo, 1977. Analysis of the technological differences between stationary and maritime nuclear power plants. Massachusetts institute of technology. [viitattu 13.1.2014] 257 s. Saatavissa: <https://dspace.mit.edu/search?query=giorsetti&submit.x=11&submit.y=8>

Hetsroni Gad, 2011. Steam generators, nuclear. Päivitetty 8.2.2011. [viitattu 7.2.2014] Saatavissa: <http://www.thermopedia.com/content/1149/>

Hewlett Richard G. & Duncan Francis, 1974. Nuclear Navy 1946-1962. [viitattu 13.5.2013] 477 s. Saatavissa: http://energy.gov/sites/prod/files/edg/media/Nuclear_Navy.pdf

International Atomic Energy Agency. KLT-40S. Päivitetty 23.4.2013. [viitattu: 23.1.2014] 35 s. Saatavissa: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/25.KLT-40S.pdf>

International Atomic Energy Agency, 2011. Status of Small and Medium Sized Reactor Designs. [viitattu 14.11.2013] 42 s. Saatavissa: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/files/SMR-booklet.pdf>

Ishida T., Ochiai M. & Hoshi T., 2000. Advanced marine reactor mrx and its application for electricity and heat co-generation. Specific nuclear reactors and associated plants. 196 s. ISSN 1011-4289 [viitattu: 17.1.2014] Saatavissa: http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:31058473

JAMSTEC. Oceanographic Research Vessel MIRAI. [viitattu 5.10.2013] Saatavissa: <http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/mirai.html>

Kovalenko V, 1993. Braving the chill of the market. Nuclear Engineering International , Vol. 38, No. 462, 1/1993.

Lamarsh John R., 1975. Introduction to nuclear engineering. 626 s. ISBN 0-201-04160-X

Lange Robie S., 1990. Maritime Heritage of the United States NHL Theme Study - Large Vessels: N.S. Savannah Theme Study. [viitattu 20.11.2013] 32 s. Saatavissa: <http://pdfhost.focus.nps.gov/docs/NHLS/Text/82001518.pdf>

Mitenkov F.M., 1994. Prospects for applications of ship-propulsion nuclear reactors. Atomic Energy, Vol. 76, No. 4, 1994.

Miyakoshi J. et. al. Radiation streaming of N.S. Mutsu and its repair plan. 8 s.

NavSource Naval History. [viitattu 4.4.2014] Saatavissa:
<http://navsource.org/archives/08/571/0857101.jpg>

Nuclear engineering international, 2004. Fuelling floating reactors. [viitattu 23.1.2014]
Saatavissa: <http://www.neimagazine.com/features/featurefuelling-floating-reactors>

OKBM Afrikantov. Reactors for Small and Medium Power Stations. [viitattu 15.10.2013] Saatavissa: <http://www.okbm.nnov.ru/npp#regional>

Ølgaard Povl L, 1996. Accidents in Nuclear Ships. Nordisk kernesikkerhedsforskning. 85 s. ISBN 87-550-2266-9

Ragheb Magdi, 2011. Nuclear Naval Propulsion. [viitattu 22.11.2013] 32 s. Saatavissa:
http://cdn.intechopen.com/pdfs/19667/InTech-Nuclear_naval_propulsion.pdf

Reistad Ole & Ølgaard Povl L., 2006. Russian Nuclear Powerplants for marine applications. Nordisk kernesikkerhedsforskning. 92 s. ISBN 87-7893-200-9

Reuss Paul, 2008. Neutron Physics. 669 s. ISBN 978-2-7598-0041-4

Shultis J. Kenneth & Faw Richard E., 2002. Fundamentals of nuclear science and engineering. 509 s. ISBN 0-8247-0834-2

Stacey Weston M., 2007. Nuclear reactor physics, Second edition, Completely revised and enlarged. 706 s. ISBN 978-3-527-40679-1

Wikipedia Commons. [viitattu 15.4.2014] Saatavissa:
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:NSF_picture_of_Yamal.gif

World Nuclear Association. Nuclear Desalination. Päivitetty 10.2013 [viitattu 15.10.2013] Saatavissa: <http://world-nuclear.org/info/Non-Power-Nuclear-Applications/Industry/Nuclear-Desalination/#.UIRPklNc18t>

World Nuclear Association. Nuclear-Powered Ships. Päivitetty 14.11.2013 [viitattu 22.11.2013] Saatavissa: www.world-nuclear.org/info/Non-Power-Nuclear-Applications/Transport/Nuclear-Powered-Ships/

World Nuclear Association. Small Nuclear Power Reactors. Päivitetty 15.11.2013 [viitattu 16.11.2013] Saatavissa: <http://world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Small-Nuclear-Power-Reactors/>

World Nuclear Association. Uranium Enrichment. Päivitetty 10.2013 [viitattu 25.5.2013] Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Conversion-Enrichment-and-Fabrication/Uranium-Enrichment/>

World Nuclear News, 2012. Delivery of floating plant set for 2016. [viitattu 15.10.2013] Saatavissa: http://www.world-nuclear-news.org/NN-Delivery_of_floating_plant_set_for_2016-1212124.html

Yamaji Akio & Sakomoto Yukio, 1992. Comparison between Measured and Design Dose Rate Equivalents on Board of Nuclear Ship MUTSU. Journal of Nuclear Science and Technology, 9/1993. 19 s.