

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
Teknillinen tiedekunta  
Energiatekniikan koulutusohjelma

*Olli Kukkonen*

**Sukellusvenereaktorit**

**Nuclear submarine reactors**

Työn tarkastaja ja ohjaaja: DI Ville Rintala

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
Energiatekniikan koulutusohjelma

Olli Kukkonen

### **Sukellusvenereaktorit**

Kandidaatintyö

2012

44 sivua ja 17 kuvaa

Työn tarkastaja ja ohjaaja: DI Ville Rintala

Hakusanat: Sukellusvenereaktori, ydinsukellusvene, sukellusvene, ydinsukellusveneonnettomuus, ydinreaktori

Kandidaatintyössä tutustuttiin ydinsukellusveneiden reaktoreiden toimintaperiaatteisiin, ydinsukellusvenekäyttöön sopiviin reaktorityyppeihin ja sukellusvenereaktorin rakenteeseen ja erityispiirteisiin.

Ydinsukellusveneiden historiassa perehdyttiin miksi ydinreaktori haluttiin valjastaa ydinsukellusveneeseen energialähteeksi ja mitä etuja se toi sukellusveneelle. Työn lopussa tutustuttiin ja mietittiin tulevaisuuden mahdollisia rauhanomaisia käyttökohteita ydinsukellusveneille ja sukellusvenereaktoreille.

Lyhyesti perehdyttiin myös ydinsukellusveneiden käytöstä poistamiseen ja ydinsukellusveneille sattuneisiin onnettomuuksiin. Onnettomuuksissa perehdyttiin millaisia onnettomuuksia ydinsukellusveneille on tapahtunut ja tutustuttiin muutamaa reaktorionnettomuuteen esimerkkien kautta.

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>Tiivistelmä</b>	<b>2</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>3</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>4</b>
<b>2 Teoriaosa</b>	<b>5</b>
2.1 Ydinreaktorin perusteet .....	5
2.1.1 Fissio .....	5
2.1.2 Lämpövoimakone.....	7
2.2 Reaktorityypit .....	8
2.2.1 Kevytvesireaktorit .....	9
Painevesireaktori .....	10
Kiehumusvesireaktori .....	12
2.2.2 Nestemäisellä metallilla jäähdytetty reaktori .....	13
2.2.3 Muut reaktorityypit .....	15
2.3 Aktivoituminen.....	15
2.4 Väkevöinti .....	16
<b>3 Ydinsukellusveneiden historia</b>	<b>17</b>
<b>4 Sukellusvenereaktorin rakenne</b>	<b>19</b>
4.1 Reaktori ja ensiöpiiri .....	19
4.2 Polttoaineen väkevyys .....	20
4.3 Tehon ja reaktiivisuuden säätö .....	22
4.4 Polttoainesauvat.....	23
4.5 Höyrystin .....	25
4.6 Turbiinikoneikko .....	27
4.7 Lauhdutin.....	28
4.8 Kokoluokka .....	28
4.9 Reaktorin suojarakennelmat .....	29
4.10 Ydinenergian mahdollistamat muut toiminnot.....	31
<b>5 Onnettomuudet</b>	<b>32</b>
5.1 Reaktorionnettomuudet .....	32
<b>6 Käytöstä poisto</b>	<b>34</b>
<b>7 Johtopäätökset</b>	<b>37</b>
7.1 Tulevaisuuden konsepteja. ....	39
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>43</b>

## 1 JOHDANTO

Tämä kandidaatintyö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston kurssille BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari. Kandidaatintyössä tutustutaan sukellusvenereaktoreihin kirjallisuuden kautta. Työn pääpaino on sukellusvenereaktorin rakenteessa ja eroissa voimalaitosreaktoreihin.

Ydinreaktion käyttäminen sukellusveneen energianlähteenä mahdollistaa ilmakehästä riippumattoman energiantuotannon, suuren tehon, hyvin pitkän toimintasäteen ilman tankkausta ja jopa kuukausien kestoiset yhtäjaksoisesti pinnan alla suoritettavat vedenalaiset operaatiot.

Sukellusvenereaktori on yksi ydintekniikan ja atomiajan hienoimmista saavutuksista. Sukellusvenereaktoreiden kehittäminen ja käyttäminen on tuonut valtavasti kokemusta ja tietotaitoa ydinreaktoreista ja muista teknologioista.

Tässä kandidaatintyössä keskitytään lähinnä Yhdysvaltain ja Neuvostoliiton valmistamiin ydinsukellusveneisiin, mutta samat periaatteet pätevät muidenkin valtioiden valmistamiin ydinsukellusveneisiin. Muut valtiot ovat valmistaneet Yhdysvaltoihin ja Neuvostoliittoon nähden hyvin vähän ydinsukellusveneitä, joista löytyy tietoa vielä vähemmän. Länsimaiden ydinsukellusvenehjelmat ovat osittain yhteisiä, jonka takia niistä löytyy vähän eroavuuksia.

## 2 TEORIAOSA

Tässä osassa tutustutaan ydinreaktorin toimintaperiaatteeseen, eri reaktorityyppeihin ja muihin työn kannalta keskeisiin käsitteisiin. Pääpaino on sukellusvenereaktorin poikkeavuuksissa voimalaitosreaktoreihin nähden.

Ydinreaktoreita on lukuisia erilaisia tyyppjä erilaisiin käyttötarkoituksiin, mutta tässä työssä keskitytään vain energiantuotantoon soveltuviin reaktoreihin. Tutustutaan yleisimpiin energiantuotantoon käytettyihin reaktorityyppeihin ja perehdytään mitkä niistä soveltuvat ydinsukellusveneen voimanlähteeksi.

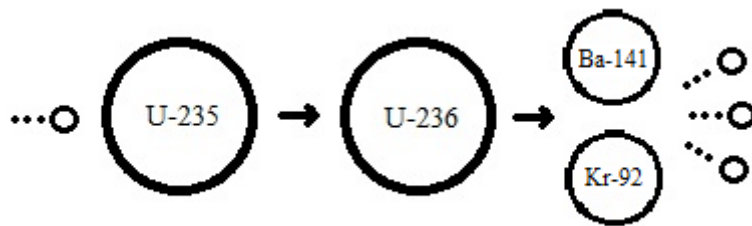
### 2.1 Ydinreaktorin perusteet

Ydinreaktori ylläpitää ja tuottaa erilaisia ydinreaktioita. Ydinreaktorissa lämmönlähteenä toimii fissio ja syntynyttä lämpöä hyödynnetään Rankine-kierron mukaisella lämpövoimakoneella.

#### 2.1.1 Fissio

Eräiden raskaiden alkuaineiden isotooppien, esimerkiksi uraani-235 ytimen absorboidessa neutronin tapahtuu ytimen halkeaminen, eli fissio. Fissiossa raskas ydin halkeaa kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi. Uraani-235:den fissiossa vapautuu energiaa ja keskimäärin 2,4 neutronia. Kaikki nämä vapautuneet neutronit eivät osallistu ketjureaktioon, vaan osa kuluu muihin absorptioreaktioihin tai vuotaa reaktorista ulos. Vapautuneiden neutronien osuessa edelleen uusiin ytimiin ja uusien ytimien haljetessa syntyy ketjureaktio, jota pyritään hallitsemaan ja hyödyntämään ydinreaktoreissa. (Murray 2000, 67.)

Fissioreaktiot tuottavat erilaisia fissiotuotteita ja kuvassa 1 on esitetty yksi mahdollinen fissioreaktio. Kuvassa 1 uraani-235 ytimen absorboidessa neutronin syntyy uraani-236 ydin, joka halkeaa. Tässä esimerkkipfissiossa, joka on vain yksi lukuisista mahdollisista fissioreaktioista, vapautuu kolme neutronia, barium-141 ydin, krypton-92 ydin ja energiaa. Fission tuottamien ytimien ja hiukkasten massalukujen ja järjestyslukujen summat ovat yhtä suuret kuin uraani-235:n ja neutronin massalukujen ja järjestyslukujen summat. Yhtälössä 1 on esitetty tämä fissioreaktio. (Ibid, 68.)



**Kuva 1.** Fissioreaktio.

Fissiossa syntyvät neutronit ovat liike-energialtaan nopeita. Lähes kaikki voimalaitos- ja sukellusvenereaktorit ovat termisiä reaktoreita, joka tarkoittaa että niissä käytetään hidastinainetta hidastamaan fissiossa syntyneet nopeat neutronit liike-energialtaan eli nopeudeltaan termisiksi. Termisyys ei tarkoita neutronin lämpötilaa, vaan ytimien lämpöliikettä vastaavaa nopeutta, eli termiset neutronit ovat termisessä tasapainossa ytimien kanssa. Hidastinaineessa, esimerkiksi vedessä, neutronit törmäilevät hidastinaineen hiukkasiin ja menettävät törmäyksissä liike-energiaansa. Hidastinaineet ovat kevyitä aineita ja hidastinaine ei saa kaapata liikaa neutroneita. (Shultis & Faw 2008, 297.)

Jotta ketjureaktio jatkuisi, on ainakin yhden uraani-235:den fissiossa vapautuvan neutronin aiheutettava uusi fissio. Termisillä neutroneilla on huomattavasti suurempi toden-

näköisyys aiheuttaa uraani-235:den fissio kuin tulla kaapatuksi uraani-238: saan, jolloin ydinreaktori saadaan toimimaan vähän väkevöidyllä uraanilla tai jopa väkevöimättömällä luonnonuraanilla riippuen käytetystä hidastinaineesta. Nopeissa reaktoreissa on käytettävä korkeammin väkevöityä polttoainetta kuin termisissä reaktoreissa, jotta kaapausreaktiot eri uraanin isotooppeihin olisivat sopivassa suhteessa ja fissioissa syntyviä neutroneita riittäisi tuottamaan uusia uraani-235:den fissioita. Nopeissa reaktoreissa jäähdyteaine valitaan niin että se hidastaisi neutroneita mahdollisimman vähän. (Ibid, 345.)

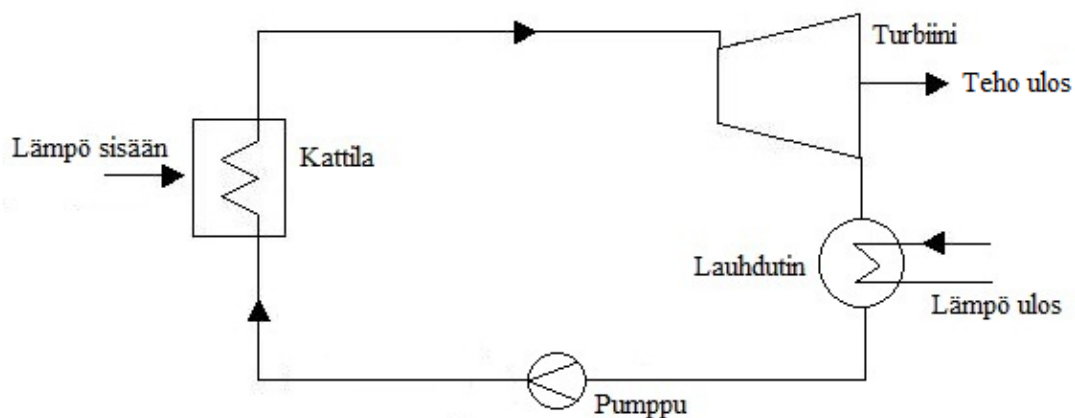
Reaktorin kriittisyydellä tarkoitetaan, että uusia neutroneita vapautuu fissioissa yhtä paljon kuin niitä kuluu uusiin fissioihin ja muihin reaktioihin. Jos vapautuvien neutroneiden määrä ylittää kulumien neutroneiden määrän, niin reaktorin teho nousee fissioiden määrän kasvaessa ja reaktorin sanotaan olevan ylikriittinen. Kun fissioissa vapautuvien neutroneiden määrä alittaa kulumien neutroneiden määrän, fissioiden määrä ja teho laskevat ja reaktorin sanotaan olevan alikriittinen. Reaktorin tehonsäätö perustuu siis reaktorin kriittisyyden säätöön. (Murray 2000, 128.)

### **2.1.2 Lämpövoimakone**

Ydinreaktoreilla tuotetaan energiaa höyrystämällä vettä. Rankine-kierto kuvaa höyrykäyttöisten lämpövoimakoneiden tapaa tuottaa energiaa. Lämmönlähteenä Rankine-kiertoon ydinreaktorin tapauksessa toimii ydinfissiosta vapautuva lämpöenergia. Eri reaktorityypeittäin vaihtelee jäähdyte ja tapa keittää vettä.

Yksinkertaisessa Rankine-kierrossa kattilassa keitetään suljetussa kierrossa kiertävää korkeapaineista vettä höyryksi ja voimalaitoksissa yleensä jatketaan syntyneen höyryn kuumentamista tulistetuksi höyryksi. Ydinreaktorin ollessa lämmönlähteenä ei höyryä yleensä tulisteta reaktorissa, johtuen ydinreaktorin jäähdytteen alhaisesta lämpötilasta ja höyrystimen rakenteesta. Ydinreaktorin korkeapaine- ja matalapaineturbiinin välissä voi olla kosteudenpoisto ja tulistus. Tuotettu höyry johdetaan turbiiniin, jossa höyry paisuu

ja jäähtyy tuottaen energiaa turbiinin pyörimisenä. Turbiinista jäähtynyt ja jopa alipaineen puolelle asti paisunut höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa höyry tiivistyy lauhduttimen jäähdetyillä pinnoilla takaisin vedeksi. Lauhduttimessa kiertovesi ja jäähdytysvesi eivät sekoitu. Lauhduttimessa sukellusveneen tapauksessa jäähdyttävänä nesteenä kiertää merivesi. Vesi johdetaan syöttövesipumppuun, jossa paine nostetaan takaisin korkeaksi, ja palautetaan takaisin kattilaan jolloin kierto alkaa alusta. Turbiinin pyörimisenergiaa hyödynnetään eri tavoin, esimerkiksi voimalaitoksessa pyörittämään generaattoria. Moderneissa ydinvoimalaitoksissa voidaan saavuttaa lähes 40 % sähköntuotantohyötysuhde. Fossiililla polttoaineilla toimivissa voimalaitoksissa voidaan saavuttaa vain muutamia prosenttiyksiköitä parempi sähköntuotantohyötysuhde. (Shultis & Faw 2008, 341.) Kuvassa 2 on esitetty yksinkertainen suljettu Rankine-kierto.



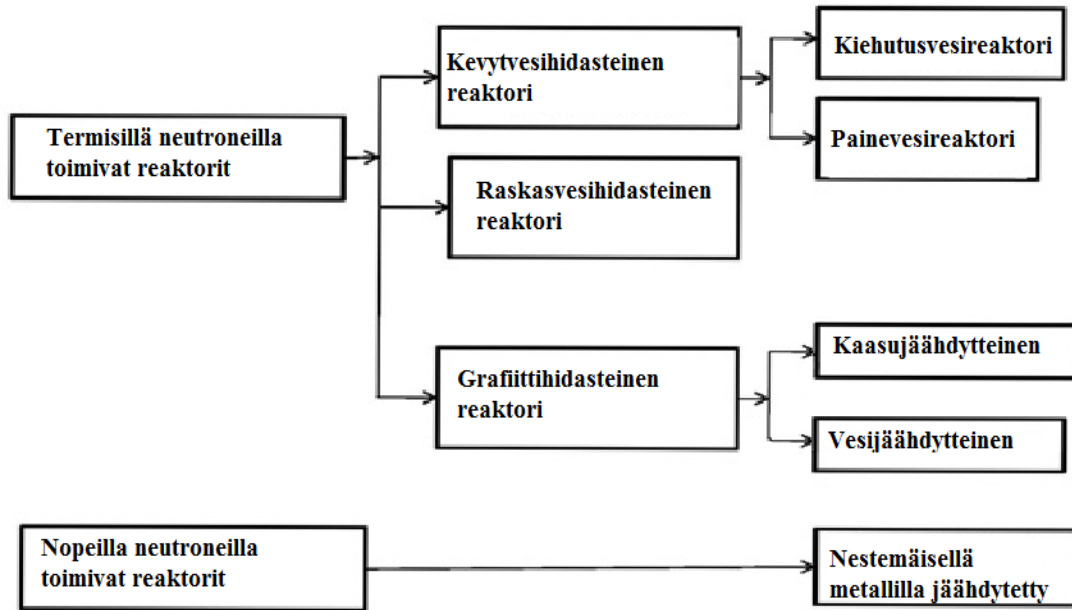
**Kuva 2.** Yksinkertainen Rankine-kierto.

## 2.2 Reaktorityypit

Yksi tapa jaotella ydinreaktorityyppejä on luokitella reaktorit neutroneiden nopeuden mukaan ja edelleen reaktorityypin käyttämän hidastinaineen mukaan. Ydinsukellusveneen kannalta kiinnostavia reaktorityyppejä ovat kompaktin kokoiset reaktorit, joissa on



mahdollista käyttää korkeasti väkevöityä polttoainetta. Kuvassa 3 on esitetty yleisimmät energiantuotantoon tarkoitetut ydinreaktorityypit neutroneiden nopeuden ja käytetyn hidasteaineen mukaan.



**Kuva 3.** Ydinreaktorityypit.

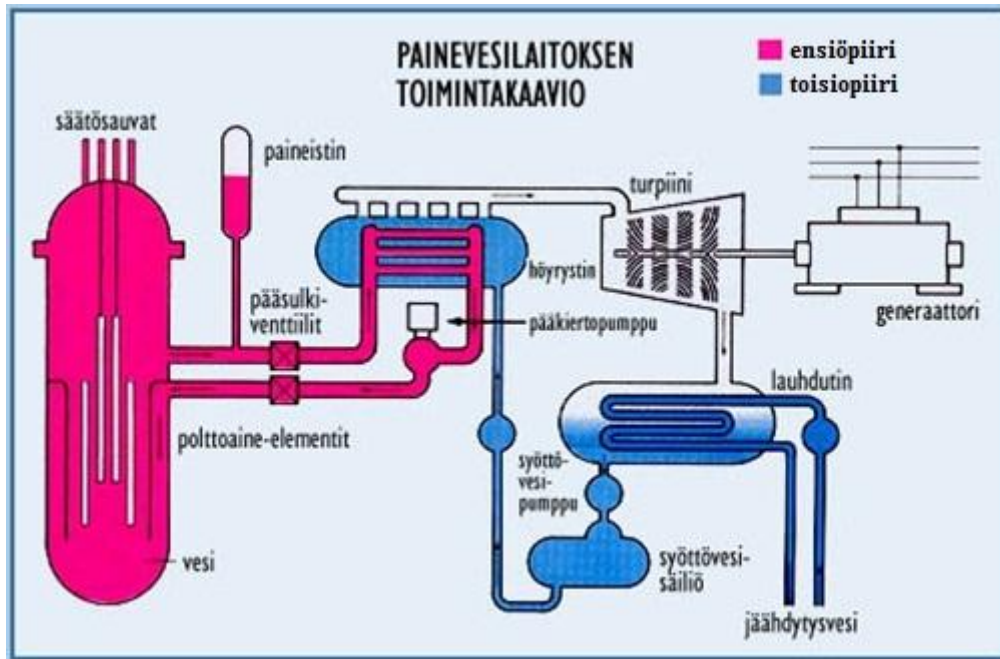
### 2.2.1 Kevytvesireaktorit

Kevytvesireaktoreissa jäähdytteenä ja hidastinaineena toimii tavallinen puhdistettu vesi, jolloin kevytvesireaktoreista tulee yleensä yksinkertaisempia ja halvempia rakentaa. Veden käyttämisen etuja ovat muun muassa halpa hinta, helppo saatavuus ja hyvin tunnetut ominaisuudet. Kevytvesireaktorit jaotellaan toimintansa mukaan kiehumusvesireaktoreihin ja painevesireaktoreihin. Kevytvesireaktoreissa voimalaitoskäytössä yleensä käytetään polttoaineena noin 3 % - 5 % uraani-235:den suhteen väkevöityä uraania. Kevytvesireaktoreissa on myös mahdollista käyttää hyvin voimakkaasti väkevöityä

polttoainetta, joka on ydinsukellusvenereaktorissa toivottu ominaisuus suuren energiatiheyden ja reaktiivisuusreservin vuoksi. (Shultis & Faw 2008, 343.)

### **Painevesireaktori**

Painevesireaktori (engl. Pressurized Water Reactor). Nimensä mukaan painevesireaktorissa ensiöpiirissä kiertävä vesi on niin korkeassa paineessa, että vesi ei korkeasta lämpötilasta huolimatta pääse kiehumaan. Eli reaktorin jäähdytysveden ja reaktorin lämpötilan rajoittaa veden kiehumispiste käyttöpaineessa. Painevesireaktorin ensiöpiirin paine on suuruusluokaltaan noin 150 bar, jolloin reaktorissa kiertävän veden lämpötila on hieman yli 300 °C. Kuuma ensiöpiirissä kiertävä korkeapaineinen vesi johdetaan erilliseen höyrystimeen, jossa toisiopiirissä kiertävä matalapaineisempi vesi kiehuu tuottaen höyryä. Rankine-kierron kattilana toimii siis höyrystin ja Rankine-kierto tapahtuu toisiopiirissä. Koska toisiopiiri on erillään reaktorin ensiöpiiristä, eivät toisiopiirin vesi ja osat aktivoitu. Ensiöpiirin korkea paine vaatii lujan reaktorin painesäiliön ja lujat ensiöpiirin laitteet, jotka sukellusveneessä lisäävät painoa. (Shultis & Faw 2008, 343.) Kuvassa 4 on esitetty painevesireaktorin toimintakaavio.



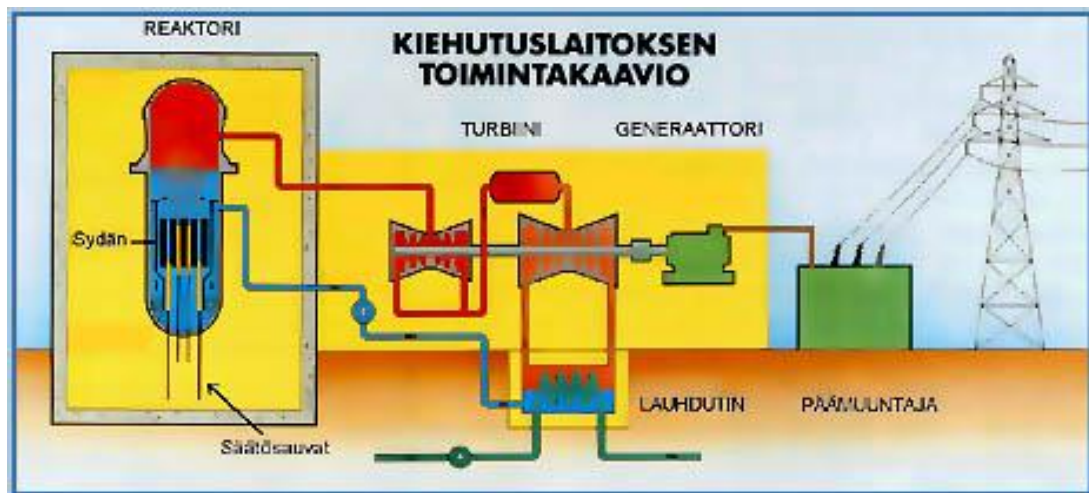
**Kuva 4.** Painevesireaktorin toimintakaavio. Lähde: STUK.

Kevytvesireaktori on selvästi yleisin energiantuotantoon käytetty ydinreaktorityyppi ja painevesireaktori on kevytvesireaktorityypeistä yleisin. Suomessa painevesireaktoreita ovat Loviisan ydinvoimalaitoksen molemmat osittain Neuvostoliitossa suunnitellut VVER-440 tyyppiset reaktorit. Myös rakenteilla olevan olkiluodon kolmannen yksikön EPR-reaktori perustuu painevesireaktoriin. (STUK 2010.)

Ensimmäiset kaupalliset painevesireaktorit kehitettiin Yhdysvalloissa sukellusvenekäyttöön tarkoitettujen painevesireaktoreiden pohjalta soveltaen sukellusvenereaktoreista opittuja asioita. Painevesireaktori on myös nykyään yleisin käytetty ydinreaktorityyppi sukellusvenereaktoreissa kompaktin koon, yksinkertaisuuden, luotettavuuden ja hyvän turvallisuuden vuoksi. (Shultis & Faw 2008, 348.)

## Kiehausvesireaktori

Kiehausvesireaktori (engl. Boiling Water Reactor). Kiehausvesireaktorissa nimensä mukaisesti reaktorin jäädytteenä ja hidastinaineena kiertävä vesi kiehuu reaktorissa. Syntynyt höyry johdetaan suoraan turbiiniin. Reaktorissa aktivoituva vesi kiertää myös turbiinissa ja muissa osissa, joten kiehausvesireaktorissa myös turbiini ja putkistot on käytön aikana suojattava. Maailmalla kiehausvesireaktori on painevesireaktorin jälkeen toiseksi yleisin voimalaitoskäytössä oleva ydinreaktorityyppi. (Shultis & Faw 2008, 343.) Kuvassa 5 on esitetty kiehausvesireaktorin toimintakaavio.



**Kuva 5.** Kiehausvesireaktorin toimintakaavio. Lähde STUK.

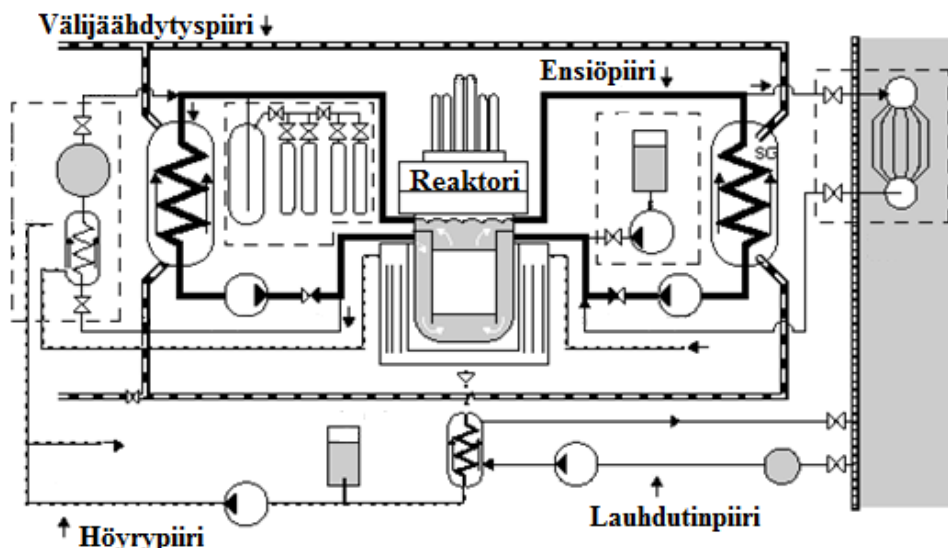
Suomessa Olkiluodon kaksi ensimmäistä yksikköä ovat ruotsalaisen ASEA-Atomin valmistamia kiehausvesireaktoreita. (STUK 2010.)

Kiehausvesireaktori ei sovellu sukellusvenereaktoriksi, koska ydinsukellusveneen liikkuessa ja kallistellussa reaktorissa kiehuvan veden pinta ei pysyisi vakiona ja säteilyltä suojattavien osien määrä kasvaisi.

### 2.2.2 Nestemäisellä metallilla jäädytetty reaktori

Nestemäisellä metallilla jäädytetty reaktori (engl. Liquid metal cooled reactor). Nestemäisellä metallilla jäädytetyssä reaktorissa jäädytteenä toimii nestemäinen metalli tai metalliseos, kuten elohopea, natrium tai lyijy. Suurin osa nestemäisellä metallilla jäädytetyistä reaktoreista on nopeita reaktoreita, joissa ei käytetä ollenkaan hidastinainetta. Jäädytteenä käytettävät nestemäiset metallit koostuvat keskiraskaista atomeista, jotka hidastavat neutroneita mahdollisimman vähän. Tällöin reaktorissa on käytettävä korkeasti väkevöityä polttoainetta. (Shultis & Faw 2008, 345.)

Kuvassa 6 on esitetty neuvostoliittolaisen lyijy-vismutti-seoksella jäädytetyn ydinsukellusvenereaktorin toimintakaavio, jossa näkyy jäädytteen aktivoitumisen takia tarvittava välijäädytyspiiri. Jos höyrystin vuotaisi, välijäädytyspiiri estää ettei reaktorissa aktivoitunut jäädyteaine pääse reagoimaan höyrystimen veden kanssa ja levittämään säteilyä. Vesipiirit ovat nestemäisellä metallilla jäädytetyssä reaktorissa toiminnaltaan käytännössä samanlaiset kuin painevesireaktorissa. (Ibid.)



**Kuva 6.** Neuvostoliittolaisen nestemäisellä metallilla jäädytetyn reaktorin toimintakaavio.

Lähde: Bellona 1997.

Nestemäisellä metallilla jäähdytetyissä reaktoreissa sukellusvenekäytön kannalta ongelmia ovat nestemäisten metallien hankalat ja vaaralliset ominaisuudet. Esimerkiksi natrium on kemiallisesti hyvin reaktiivista ja lyijyllä on natriumiakin korkeampi sulamispiste. (Ragheb 2012, 7 – 9.)

Maailmalla energiantuotantoon käytettyjä metallijäähdytteisiä reaktoreita ovat esimerkiksi venäläinen BN-600 ja japanilainen MONJU. (Murray 2000, 166.)

Sukellusvenekäytössä nestemäisellä metallilla jäähdytetyissä reaktoreissa positiivisia ominaisuuksia ovat reaktorin kompakti koko, pieni käyttöpaine ensiöpiirissä, jäähdytteen korkea lämmönjohtavuus, korkeampi ensiöpiirin lämpötila kuin painevesireaktorissa ja korkeasti väkevöidyn polttoaineen suuri teho- ja energiatiheys. (Ragheb 2012, 7.)

Ainoa yhdysvaltalainen nestemäisellä metallilla jäähdytetyllä reaktorilla varustettu ydinsukellusvene oli USS *Seawolf* (SSN-575). USS *Seawolf* ydinsukellusveneen S2G-tyyppinen reaktori käytti jäähdytteenä nestemäistä natriumia. Esiintyneiden vuoto-ongelmien ja heikon suorituskyvyn takia USS *Seawolf* ydinsukellusveneen nestemäisellä natriumilla jäähdytetty reaktori korvattiin painevesireaktorilla ja turbiini muutettiin toimimaan kostealla höyryllä. (Ibid, 8.)

Neuvostoliiton kehittämässä nestemäisellä metallilla jäähdytetyissä sukellusvenereaktoreissa on käytetty jäähdytteenä nestemäistä lyijy-vismutti-seosta, joka korkean käyttölämpötilansa takia tarjoaa paremman hyötysuhteen kuin painevesireaktori ja korkean sulamispisteen takia jähmettyy vuotoissa. Toisaalta korkea sulamispiste vaatii jatkuvan lämmityksen, jottei lyijy-vismutti-seos jähmety. (Lewis 2008, 94). Sukellusveneen käytöstä poiston yhteydessä lyijy-vismutti-seoksen annettiin jähmettyä, jolloin se paransi säteilysuojausta. Ongelmia olivat muun muassa korrosio reaktorin komponenteissa ja radioaktiivisen polonium-210 muodostuminen jäähdytteen vismutin aktivoitumisen seurauksena. (Ragheb 2012, 9). Neuvostoliitossa rakennettiin vain kahdeksan lyijy-vismutti-seoksella jäähdytetyllä reaktorilla varustettua ydinsukellusvenettä, yksi K-27 ja seitsemän alfa-luokan sukellusvenettä. (FAS 2000).

Painevesireaktorit syrjäyttivät molemmissa valtioissa nestemäisellä metallilla jäähdytetyt ydinreaktorit yksinkertaisuuden, luotettavuuden, paremman turvallisuuden, kompaktin koon ja massatuotannon vaatimuksien vuoksi. (Bukalov & Nursbayev 1964, 236.)

### **2.2.3 Muut reaktoryypit**

Muita voimalaitoskäytössä olevia termisiä reaktoreita ovat raskasvesireaktorit ja grafiittihidasteiset reaktorit. Raskasvesireaktorissa hidastinaineena ja jäähdytteenä käytetään raskasta vettä, jossa on vesimolekyylien vedyn sijasta raskaampaa vedyn isotooppia deuteriumia. Grafiittihidasteisessa reaktorissa hidastinaineena käytetään grafiittia, joka on yksi hiilen olomuodoista. Grafiittihidasteisessa reaktorissa jäähdytteenä käytetään kaasua tai vettä riippuen reaktorin tyypistä. (Shultis & Faw 2008, 345.)

Kumpikaan näistä ydinreaktoryypeistä ei suuren kokonsa puolesta sovellu sukellusvenereaktoriksi. Myöskään mahdollisuudesta käyttää väkevöimätöntä luonnonuraania polttoaineena ei ole hyötyä sukellusvenereaktoreissa, koska sukellusvenereaktorin polttoaineelta vaaditaan suurta energiatiheyttä ja reaktiivisuusreserviä, jotka saavutetaan polttoaineen korkealla väkevöintiasteella. (Lewis 2008, 92.)

## **2.3 Aktivoituminen**

Aktivoitumisella tarkoitetaan aineen muuttumista radioaktiiviseksi, kun stabiili, ei radioaktiivinen, aine kaappaa ydinreaktorissa syntyneen neutronin. Kaapatessaan neutronin aine voi muuttua raskaammaksi radioaktiiviseksi isotoopikseen, joka hajoaa yleensä beetasäteilynä. (Murray 2000, 243.)

## 2.4 Väkevöinti

Uraanin väkevöinnillä tarkoitetaan uraanin isotooppirikastusta, jossa fissiilin uraani-235 isotoopin osuutta kasvatetaan suhteessa uraani-238 isotooppiin.

Ydinreaktioita varten on tarve erotella saman aineen isotoopit toisistaan, esimerkiksi lisätä uraani-235:den osuutta suhteessa uraani-238:an tai erotella raskasvesi tavallisesta vedestä. Koska saman aineen isotoopeilla on sama järjestysluku, ovat isotoopit periaatteessa kemiallisesti samanlaisia. Siksi on käytettävä menetelmiä, jotka erottelevat aineita toistaan massaluvun perusteella. Uraanin väkevöintiin käytetään muun muassa massaspektrometri-, kaasusentrifugi-, kaasudiffuusio- ja lasermetelmiä. Mitä suuremaksi fissiilin uraani-235 isotoopin osuutta uraanipolttoaineesta kasvatetaan, sitä enemmän erotteluun kuluu uraanimalmia, energiaa, ja rahaa. (Murray 2000, 99.) Kuvassa 7 on uraanin väkevöintiin käytettäviä kaasusentrifugeja.



**Kuva 7.** Kaasusentrifugeja. Lähde: Wikimedia Commons.



### 3 YDINSUKELLUSVENEIDEN HISTORIA

Kompaktit energianlähteet, jotka eivät tarvitse polttoaineen lisäämistä usein, ovat ideaalisia voimanlähteitä laitteisiin, jotka joutuvat kulkemaan pitkiä matkoja. Sukellusveneitä kehittäessä havaittiin, että ydinreaktori täyttää nämä kriteerit, jolloin alettiin kehittää sukellusveneiden tarpeisiin sopivia sukellusvenereaktoreita. (Murray 2000, 298.)

Ensimmäinen operationaalinen ydinsukellusvene ja ydinvoimalla vesillä liikkuva alus oli vuonna 1955 valmistunut Yhdysvaltalainen ydinsukellusvene USS *Nautilus* (SSN-571). USS *Nautilus* teki heti merille päästyään useita sukellusveneiden nopeus- ja sukellusmatkaennätyksiä, joita perinteinen dieselsähköinen sukellusvene ei pysty rikkomaan. Nämä ennätykset teki mahdolliseksi aluksen käyttämä uusi energialähde, ydinvoima, joka mahdollisti dieselsähköistä sukellusvenettä pidemmät ja nopeammat matkat veden alla. Enää sukellusvene ei tarvinnut nousta pintaan lataamaan akkujaan happea tarvitsevilla dieselgeneraattoreilla. Vuonna 1958 USS *Nautilus* suoritti maailman ensimmäisen sukelluksen maantieteellisen pohjoisnavan peittävän jäätikön alitse ja seuraavana vuonna USS *Skate* nousi pintaan pohjoisnavan jään läpi. Neuvostoliitto saavutti pohjoisnavan ydinsukellusveneellä neljä vuotta myöhemmin vuonna 1962. (Ibid.) Kuvassa 8 USS *Nautilus* merellä.



**Kuva 8.** USS Nautilus Lähde: Wikimedia Commons.

Ydinsukellusveneestä tuli aivan uudentyylinen ase ja uhka. Ase, joka pystyi kuljettamaan ydinaseita ympäri maailman merien käytännössä huomaamatta, herätti kylmän sodan osapuolien kiinnostuksen ja sai aikaan varustelukilpailun. Siksi sotateollisuuden tarpeiden ajamana suuri osa ydinreaktorin ja erityisesti painevesireaktorin kehitystyöstä on tehty sukellusvenereaktoreiden parissa. (Shultis & Faw 2008, 379.)

Ydinsukellusveneiden suurin etu on kulkea suurella nopeudella pitkiä matkoja ilman polttoaineen lisäämistä ja pintaan nousemista. Ydinsukellusvene ei myöskään tarvitse polttoainetarastoa ja jatkuvaa polttoaineen syöttöä. Koska käytössä oleva ydinreaktori vaatii jatkuvasti jäähdytyksen, heikentää meriveteen muodostuva lämpöjälki ydinsukellusveneiden huomaamattomuutta. Ydinsukellusvene voi pysytellä veden alla yhtäjaksoisesti vaikka maailmanympärimatkan verran, koska ydinreaktori ei tarvitse happea tuottaakseen energiaa. (Murray 2000, 298.)

Ydinsukellusveneitä operoivat eri valtioiden armeijat, jolloin tekniset, taloudelliset ja poliittiset vaikeudet eivät rajoita ydinreaktorin hyödyntämistä samalla tavoin kuin siviilikäytössä. Kuudella maalla on nykyään omia ydinsukellusveneitä: Yhdysvallat, Iso-Britannia, Venäjä, Kiina, Intia ja Ranska. (Bukharin & Handler 1995, 245.)

Siviilikäytössä ydinreaktoreita laivojen voimanlähteenä on käytetty ja on käytössä vain muutamassa kokeellisessa rahtialuksessa ja venäläisissä jäänmurtaajissa. (Murray 2000, 300.) Kuvassa 9 on Suomessa osittain valmistettu venäläinen jokijäänmurtaaja NS *Vaigach*.



**Kuva 9.** NS Vaigach Lähde: Wikimedia Commons.

## 4 SUKELLUSVENEREAKTORIN RAKENNE

Sukellusvenereaktorin on oltava kompaktin kokoinen sukellusveneeseen tila- ja painorajoitteiden vuoksi. Sukellusvenereaktorin on toimittava kallistelusta huolimatta, oltava iskunkestävä ja värinäkestävä, sekä hiljainen. Kompakti koko auttaa hiljaisuuden tavoittelussa, koska silloin pumppauksen tarve ja säätökoneistot liikkuvine osineen ovat pienempiä.

Sukellusvenereaktorin komponenteilta vaaditaan pitkäikäisyyttä ja luotettavuutta, koska reaktorin painesäiliötä ei välttämättä avata käyttöikänsä aikana kertaakaan. Sukellusvenereaktorin osien on oltava hyvin laadukkaita, mahdollisimman huoltovapaita ja pitkäikäisiä, koska lähimpään ystävälliseen satamaan tai huoltoon kotisatamaan voi olla vian sattuessa matkaa jopa tuhansia kilometrejä.

Sukellusveneeseen painevesireaktori koostuu kahdesta kiertojärjestelmästä: Ensiö- ja toisiopiiristä. Nestemäisellä metallilla jäähdytetyssä reaktorissa voi olla välijäähdytyspiiri, mutta reaktori on periaatteessa samanlainen hörypiirin osalta kuin painevesireaktorin toisiopiiri.

Sukellusvenereaktoreissa on huomattavasti huonompi hyötysuhde kuin voimalaitosreaktoreissa, johtuen höyryjärjestelmän tilanpuutteesta, korkeammasta lauhdutinpaineesta ja tehonmuutoksien tarpeesta. Ydinsukellusveneeseen reaktorin hyötysuhteella ei ole niin suurta merkitystä kuin voimalaitoksissa, koska ydinsukellusveneeseen reaktorilla ei tuoteta myytävää energiaa. (Ragheb 2012, 87.)

### 4.1 Reaktori ja ensiöpiiri

Ydinfissiossa vapautuva energia kuumentaa painevesireaktorissa ensiöpiirissä kiertävää korkeapaineista vettä. Reaktoriin kuuluvat painesäiliö, reaktorin suojarakennelma, polt-

toainesauvat ja säätösauvat koneistoiheen. Reaktorin oheislaitteita ovat paineistin, pääjähdytyspumput ja valvontaelektroniikka. Ensiöpiiriin kuuluu myös höyrystin.

Jähdytysveden kiertopumppujen aiheuttaman melun takia on kehitetty painevesireaktoreita, joissa ensiöpiirin jäähdytysvesi kiertää luonnonkierrolla ilman pumppausta reaktorin toimiessa osateholla. Luonnonkierrossa jäähdytysveden virtauksen saavat aikaan lämpötilaeroista johtuvat veden tiheyserot ja painovoima. (Ragheb 2012, 9.)

Koska painevesireaktorin ensiöpiiri on lähes vakio-tilavuudessa, tarvitaan paineistin säätämään ensiöpiirin painetta ja estämään veden lämpölaajenemisesta johtuvat painemuutokset. Veden lämpölaajeneminen on painevesireaktorissa tärkeä turvallisuustekijä, koska lämpötilan noustessa vesi lämpölaajenee ja veden tiheys laskee. Veden tiheyden laskiessa heikkenee veden kyky hidastaa neutroneita ja reaktorin teho laskee, koska fission aiheuttavien termisten neutronien määrä laskee. (Lewis 2008, 348.)

## 4.2 Polttoaineen väkevyyt

Sukellusvenereaktoreissa käytettävä polttoaine on huomattavasti väkevää kuin voimalaitosreaktoreissa käytettävä polttoaine. Sukellusvenereaktoreiden polttoaine on hyvin korkeasti väkevöityä vaihdellen yleensä 20 % uraani-235:stä noin jopa yli 97 % uraani-235:teen asti. Esimerkiksi yhdysvaltalaisessa S8G painevesireaktorissa käytetään 97,3 % uraani-235:den suhteen väkevöityä polttoainetta. Toisen ääripään esimerkki on ranskalainen SNA72 painevesireaktori, jossa käytetään vain 7 % uraani-235:den suhteen väkevöityä polttoainetta. (Ma & Von Hippel, 91.)

Suurempi polttoaineen väkevöinti mahdollistaa huomattavasti suuremman energiatiheden, palaman ja reaktiivisuusreservin. Suuri energiatiheys on ydinsukellusveneessä tärkeä sen pienen koon takia. Palamalla tarkoitetaan paljonko energiaa saadaan tuotettua per polttoaineen massa, esimerkiksi yksikössä megawattipäivää per kilogramma. Suurta reaktiivisuusreserviä tarvitaan pitkän käyttöiän lisäksi ylittämään eräiden lyhytikäisten

fissiotuotteiden aiheuttama reaktiivisuuden lasku. Reaktiivisuuden lasku johtuu näiden fissiotuotteiden ominaisuudesta kaapata ketjureaktiolle elintärkeitä neutroneita. Aiheutunut reaktiivisuuden lasku voi estää reaktorin käynnistyksen hätäpysäytyksen jälkeen tai estää reaktorin tehonnoston tehonmuutosten jälkeen. Tällaista tilannetta kutsutaan reaktorin myrkytykseksi. Vaikka nämä fissiotuotteet ovat lyhytikäisiä, ei ydinsukellusveneen ole mahdollista odotella näiden fissiotuotteiden hajoavan. Nostaessa säätösauvoja tarpeeksi ulos reaktoriytimestä polttoaineen ylijäämäreaktiivisuus ylittää reaktorin myrkytyksen aiheuttaman reaktiivisuuden laskun. Ksenon-135 on näistä neutroneita kaappaavista fissiotuotteista merkittävin ja sen puoliintumisaika on noin 9 tuntia. (Ragheb 2012, 6 & 21 – 23.)

Polttoaineen väkevöintiaste voi vaihdella reaktorissa alueittain riippuen neutronivuon tiheydestä. Luonnollisesti korkeampi polttoaineen väkevyys tekee ydinsukellusveneen polttoaineesta huomattavasti kalliimpaa valmistaa kuin vain muutamia prosentteja väkevöidystä ydinvoimalaitoksen polttoaineesta. (Bukharin & Handler 1995, 250.)

Suuremman väkevyyden tarjoaman suuremman energiatiheyden vuoksi sukellusvenereaktorit ovat pienikokoisia ja tarvitsevat harvoin polttoaineen vaihtoa. Polttoaine riittää uusimmissa reaktoreissa koko niiden vuosikymmenien kestoiseksi käyttöäksi. Jos polttoaineen suunnitellaan riittävän koko sukellusveneen käyttöänsä ajaksi, vähenevät tuotetun ydinjätteen määrä ja kustannukset kalliista ja aikaa kuluttavasta polttoaineen vaihdosta. Voimalaitoksien kevytvesireaktoreissa polttoaine vaihdetaan yleensä osa polttoaineesta kerrallaan, niin että koko polttoaine vaihtuu kokonaan uuteen kolmen tai neljän vuoden kierroissa. (Lewis 2008, 90).

Kun polttoaineen lämpötila nousee, kasvava polttoaineen atomien lämpöliike aiheuttaa ilmiön nimeltään Doppler-takaisinkytkentä. Doppler-takaisinkytkentä tarkoittaa uraanipolttoaineen lämmitessä kasvavaa todennäköisyyttä fission vapautuneiden neutronien tulla kaapatuksi uraani-238:saan fissiilin uraani-235:den sijasta, jolloin polttoaineen reaktiivisuus ja reaktorin teho laskevat polttoaineen lämmitessä. Doppler-takaisinkytkentä on siis tärkeä reaktorin tehon kasvua hillitsevä tekijä. (Murray 2008,

268). Ydinsukellusveneissä yleensä käytettävässä korkeasti väkevöidyssä polttoaineessa on vähän uraani-238:saa, jolloin Doppler-takaisinkytkennän vaikutus heikkenee ja on käytettävä muita menetelmiä korvaamaan Doppler-takaisinkytkentä. Käytetyistä lähteistä ei selvinnyt millä menetelmillä väkevimmissä ydinsukellusveneiden polttoaineissa on korvattu Doppler-takaisinkytkennän heikkeneminen.

### **4.3 Tehon ja reaktiivisuuden säätö**

Sukellusvenekäytössä reaktorilta vaaditaan kykyä vastata nopeisiin tehonmuutoksiin vaihtelevissa tilanteissa, kun voimalaitosreaktorit ovat yleensä käytössä jatkuvasti täydellä teholla tuottamassa peruskuormaa sähköverkkoon.

Reaktorissa ketjureaktion käynnissä pysyminen vaatii väkevöityä polttoainetta ja neutroneita, jotka aiheuttavat fissiot. Terminen reaktori tarvitsee lisäksi hidastainainetta hidastamaan neutronit termisiksi.

Säätösauvoilla säädetään sukellusvenereaktorin tehoa normaalikäytössä ja hätätilanteissa pysäytetään uraanin fissioreaktiot kaappaamalla fissioissa syntyviä neutroneita säätösauvojen materiaaliin, jossa ei tapahdu fissioita. Painevesireaktorin ensiöpiirin veteen liuotettavalla neutronimyrkyllä säädetään ydinvoimalaitosten tehoa, mutta tämän säätötavan nopeus ei riitä sukellusvenereaktorin tarvitsemiin nopeisiin tehonmuutoksiin. Jos ydinsukellusveneessä on kaksi reaktoria, voidaan molempien tehoa säätää tarvittaessa erikseen. Sukellusvenereaktorissa säätösauvojen ei voi luottaa hätätilanteessa putoavan painovoimalla reaktoriyttimeen pysäyttämään ketjureaktion, koska sukellusvene voi hätätilanteessa olla vaikka kääntynyt kyljelleen. Tämän vuoksi painovoimatoimisen järjestelmän sijasta on käytettävä esimerkiksi hydraulitoimista järjestelmää ja mahdollisesti neutroneita absorboivan aineen, neutroniabsorbaattorin, pumppaamista painevesireaktorin ensiöpiiriin. (Bukalov & Nursbayev 1964, 247.)

Palavalla neutroniabsorbaattorilla ja myös säätösauvoilla kompensoidaan polttoaineen reaktiivisuuden laskua. Korkeasti väkevöidyssä polttoaineessa on hyvin suuri ylijäämäreaktiivisuus, joka on kompensoitava jotta reaktorin teho pysyisi vakiona. Fissiilien uraani-235 ytimien haljetessa ja neutroneita kaappaavien fissiotuotteiden kertyessä polttoaineeseen polttoaineen ylijäämäreaktiivisuus laskee, jolloin ylijäämäreaktiivisuuden kompensointia on vähennettävä. Palavat neutroniabsorbaattorit ovat aineita, jotka kaappaavat neutroneita ja muuttuvat neutronikaappauksissa toisiksi aineiksi, jotka eivät enää kaappaa yhtä tehokkaasti neutroneita, jolloin kompensoiva vaikutus laskee vähitellen. Palava neutroniabsorbaattori on pitkäaikaista reaktiivisuuden säätöä varten, eikä sillä voi vaikuttaa nopeisiin tehonmuutoksiin. Palavaa neutroniabsorbaattoria voi olla polttoainesauvoissa, sekä sitä voi liuottaa painevesireaktorin ensiöpiirin veteen. Palavia neutroniabsorbaattoreita ovat esimerkiksi boori-10 ja gadolinium-157. Säätösauvoilla reaktiivisuuden kompensoinnin lasku tapahtuu vetämällä säätösauvoja reaktorista ulospäin. Säätösauvoja käytetään polttoaineen reaktiivisuuden säätöön erityisesti tilanteissa, joissa on ylitettävä lyhytikäisten fissiotuotteiden vaikutus. (Shultis & Faw 2008, 354.)

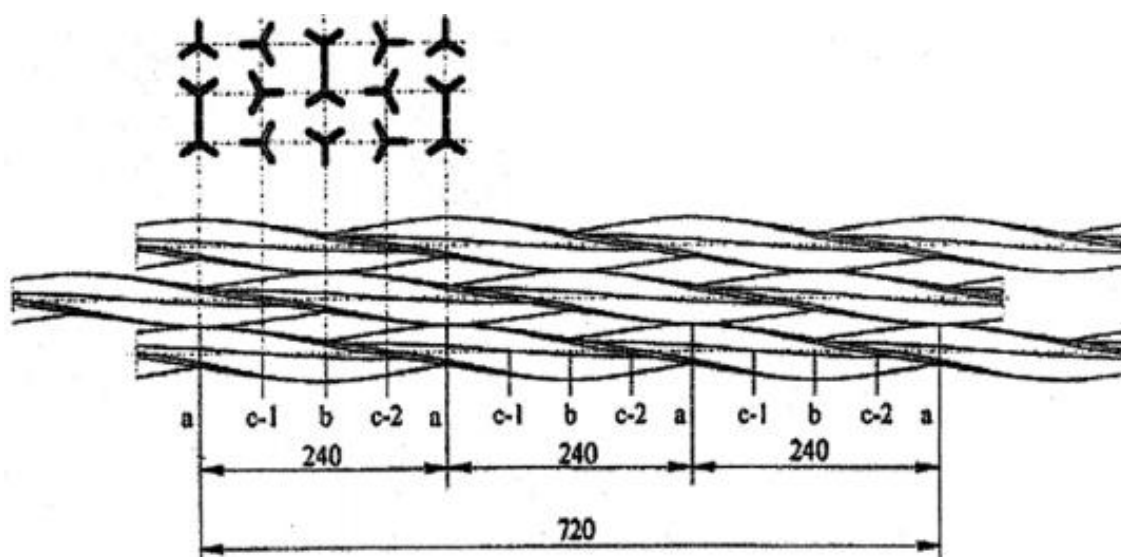
Nopea turbiinien tehonlasku voidaan suorittaa ohjaamalla osa tuotetusta höyrystä turbiinien ohi suoraan lauhduttimiin. (Bukalov & Nursbayev 1964, 261.)

#### **4.4 Polttoainesauvat**

Sukellusvenereaktorin polttoaineen on kestävä kovia oloja merillä jopa vuosikymmeniä. Polttoaineen kuluessa säteilyn vaurioittaessa tai onnettomuuksissa polttoaine voi halkeilla. Tämän takia sukellusveneen polttoainesauvojen polttoaine on yleensä metallista, esimerkiksi uraani-zirkoniumseosta tai uraani-alumiiniseosta. Metallisella polttoaineella on suurempi lämmönjohtavuus ja tiheys, mutta metalliseokset eivät kestä niin korkeita lämpötiloja kuin keraamiset uraanidioksidinapit. Polttoainesauvojen suunnittelussa on huomioitava, että metalliset polttoainenapit kärsivät paisumisongelmista jo suhteellisen pienillä palamilla. (Bukalov & Nursbayev 1964, 245.)

Polttoainesauvan kaasutiivis suojakuori on joko zirkoniumia tai terässeosta. Suojakuori suojaa polttoainetta jäähdytteen aiheuttamalta korroosiolta ja eristää polttoaineen jäähdytteestä, jotta radioaktiiviset fissiotuotteet eivät pääse sekoittumaan jäähdytteeseen ja leviämään jäähdytteen mukana. (Bukharin & Handler 1995, 250.)

Polttoainesauvat sukellusvenereaktoreissa ovat perinteisesti poikkileikkaukseltaan pyöreitä, mutta muita muotoja kuten laattamaisia, spiraalimaisia, ja kolmiomaisia on myös käytetty. Aivan ensimmäisissä ydinsukellusveneissä polttoaine oli yhtenä kappaleena, jolloin polttoaineen vaihtaminen oli hyvin vaikeaa ja siihen kului jopa kuukausia. Polttoainesauvanippuja ydinsukellusveneen reaktorissa on noin kaksisataaviisikymmentä, joissa on muutama kymmenen polttoainesauvaa per nippu. Voimalaitosreaktorissa on suunnilleen yhtä monta polttoainenippua, mutta voimalaitoksen polttoainenipussa voi olla jopa yli kaksisataa polttoainesauvaa. (Ibid.) Kuvassa 10 on spiraalimaisia polttoainesauvoja poikkileikkauksineen.



**Kuva 10.** Spiraalimaisia polttoainesauvoja. Lähde: Ragheb 2012.

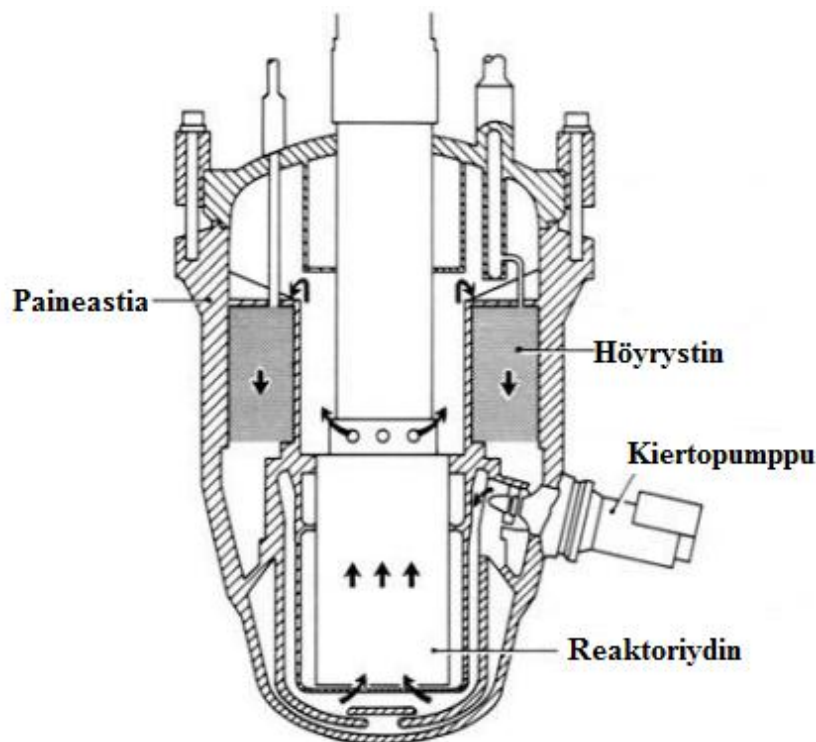


Ydinsukellusveneiden polttoainesauvat sisälsivät ensimmäisissä reaktoreissa noin viisikymmentä kilogrammaa fissiiliä uraani-235 isotooppia. Reaktoreiden tehon ja polttoainelatauksen keston kasvaessa fissiilin uraani-235 isotoopin määrän polttoainesauvoissa arvioidaan nousseen moderneissa reaktoreissa noin neljänsataan kilogrammaan. (Ma & Von Hippel, 92.)

## 4.5 Höyrystin

Höyrystimessä tapahtuu höyryntuotto turbiineja varten. Painevesireaktorin ensiöpiirissä kiertävä vesi tai nestemäisellä metallilla jäähdytetyn reaktorin nestemäinen metalli lämmittää ja keittää höyrystimen lämpöpintojen toisella puolella kiertävää toisiopiirin vettä.

Höyrystimien sijoituspaikka ja määrä vaihtelevat. Höyrystimiä on sijoitettu reaktorin painesäiliön päälle ja reaktorin ympärille, sekä integroituna reaktorin painesäiliön sisään. Höyrystimiä voi olla useampiakin per reaktori. Kuvassa 11 on sukellusvenereaktori, jossa on painesäiliön sisään integroitu höyrystin. (Ragheb 2012, 17.)



**Kuva 11.** Reaktorin painesäiliön sisään integroitu höyrystin. Lähde: Ragheb 2012, 17.

Painevesireaktorin ensiöpiirin vesi jäähtyy kiertäessään höyrystimessä noin 20 °C ja palaa takaisin reaktoriin. Ensiöpiiri on eristetty toisiopiiristä ja mahdollisesta välipiiristä, niin että eri piirien nesteet eivät pääse sekoittumaan missään vaiheessa. (Shultis & Faw 2008, 352.)

Höyrystimissä tuotetaan melko matalapaineista kylläistä höyryä. Matalahko paine sallii myös paineellisten osien kevyemmän rakenteen, mutta matalapaineista höyryä ei voi paisuttaa turbiinissa niin paljoa. Sukellusveneen painevesireaktoreissa toisiopiirin paine höyrystimessä on suuruusluokkaa 40 bar, jolloin veden höyrystymispiste on noin 250 °C. Nestemäisellä metallilla jäähdytetyissä reaktoreissa käytetään korkeampia höyrystin-arvoja kuin painevesireaktoreissa, koska nestemäinen metalli on kuumempaa kuin paineistettu vesi. Painevesireaktoreissa reaktorin paineistettu vesi, joka johdetaan höyrystimeen, on vain noin 300 °C lämpöistä kun nestemäisen metallin lämpötila voi olla satoja asteita korkeampi. (Bukalov & Nursbayev 1964, 239.)

## 4.6 Turbiinikoneikko

Höyryturbiinissa höyry paisuu ja jäähtyy tuottaen mekaanista turbiinin pyörimisenergiaa turbiinin akselille. Ydinsukellusveneessä työntövoiman tuotantoon on joko erilliset korkeapaine- ja matalapaineturbiinit ja niiden välissä kosteudenpoisto tai yksivaiheinen turbiini. Turbiineja voi olla useampiakin per reaktori. Ydinsukellusveneiden höyrystimet tuottavat kylläistä tai vain vähän tulistettua höyryä, joten turbiinien siivet on suunniteltava kestäämään paisuvaan ja jäähtyvään höyryyn muodostuvien vesipisaroiden aiheuttama eroosio. (Bukalov & Nursbayev 1964, 260.)

Turbiinin ja työntövoimaa tuottavan potkurin tai potkureiden välille on olemassa useita erilaisia kytkentöjä. Turbiini koneistoinen sijoitetaan ydinreaktorin taakse ydinsukellusveneen takapäähän.

Turbiini ja potkuri voivat olla mekaanisesti yhteydessä toisiinsa. Näissä kytkennöissä sähköntuottoa varten generaattori voi olla myös samalla akselilla kuin turbiini tai sähköntuottoon voi olla oma pienempi erillisellä akselilla oleva turbiini. Tällaisessa kytkennässä turbiinin ja potkurin välissä voi olla potkurin pyörimisnopeutta alentava alennusvaihteisto. Alennusvaihteisto tuottaa melua, jonka takia turbiinit voidaan suunnitella hitaasti pyöriviksi, jolloin alennusvaihteistoa ei tarvita ja potkuri on samalla akselilla kuin turbiini. Hitaasti pyörivän turbiinin ongelmana on sen suuri koko, jotta se saadaan pyörittämään potkurin akselia riittävällä hyötysuhteella. (Ragheb 2012, 11.)

Turbosähköisessä kytkennässä turbiini pyörittää generaattoria tuottaen sähköä ja erillisellä akselilla oleva sähkömoottori pyörittää potkuria. Tällainen kytkentä luonnollisesti kasvattaa järjestelmän kokoa ja painoa. (Bukalov & Nursbayev 1964, 243.)

## 4.7 Lauhdutin

Ydinsukellusveneiden lauhduttimen vaaditaan kestävän meriveden korkea paine muutamman sadan metrin sukellussyvyudessa. Myös suolaisen meriveden aiheuttama korrosio on huomioitava lauhduttimen suunnittelussa. Meriveden lämpötila on matalahko, jolloin meriveden lämpötilan puolesta turbiinin sallitaan paisuttavan höyryn hyvin pienelle alipaineelle asti. Mutta koska lauhduttimen osat ovat paksuja vaadittavan suuren paineen- ja korroosionkeston vuoksi, mikä heikentää lämmönjohtumista osien läpi, ei ydinsukellusveneiden lauhduttimissa päästä yhtä pieneen alipaineeseen kuin voimalaitosten lauhduttimissa. Suurempi lauhduttimen paine nostaa vesihöyryn tiivistyslämpötilaa ja alentaa reaktorin hyötysuhdetta. (Bukalov & Nursbayev 1964, 262.)

## 4.8 Kokoluokka

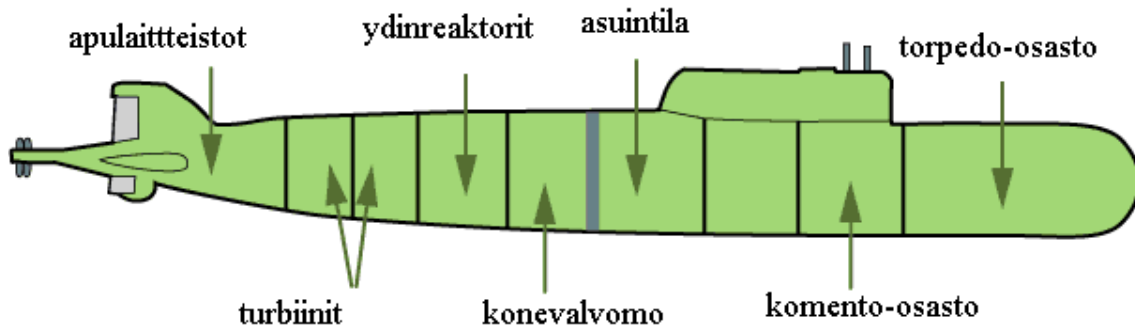
Kokoluokaltaan sukellusvenereaktorit eroavat voimalaitosreaktoreista olemalla huomattavasti pienempiä ulkomitoiltaan ja teholtaan. Esimerkiksi Yhdysvaltalaisen noin 70 megawatin lämpötehoisen S5W painevesireaktorin painesäiliön halkaisija on vain 2,45 metriä ja korkeus 5,5 metriä. (Bukalov & Nursbayev 1964, 241). Keskimäärin sukellusvenereaktorit ovat reilun sadan megawatin suuruusluokkaa lämpöteholtaan. (Ma & Von Hippel 2001, 91). Isoimmissa ydinsukellusveneissä reaktoreita voi olla kaksi kappaletta. Sukellusvenereaktorit ovat teholtaan hyvin pieniä verrattuna voimalaitosreaktoreihin, jotka ovat lämpöteholtaan yleensä noin 3000 megawatin luokkaa. (Ragheb 2012, 14.)

Maailman suurimmassa, Neuvostoliitossa valmistetussa, projekti 941 Typhoon-luokan ydinsukellusveneessä on kaksi kappaletta 190 megawatin lämpötehoista painevesireaktoria ja kaksi eri akseleilla olevaa 37 megawatin tehoista höyryturbiinia. Näillä arvoilla reaktorin hyötysuhde täydellä teholla on vain noin 20 %. (Ma & Von Hippel 2001, 91.)

## 4.9 Reaktorin suojarakennelmat

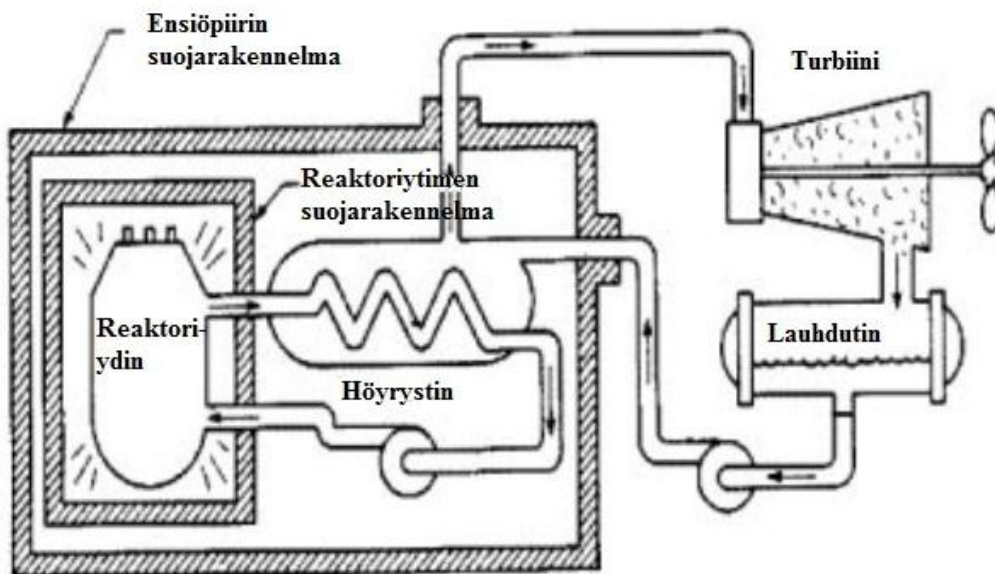
Sukellusvenereaktorin lämmönlähteenä toimiva fissioreaktio tuottaa säteilyä, jolta miehistö ja monet laitteistot on suojattava. Erityisesti gamma- ja neutronisäteily ovat miehistölle ja laitteistolle uhkia. Säteilysuojelun avainsanat ovat aika, suojaus ja etäisyys. Sukellusveneessä etäisyys on ongelma sukellusveneeseen suhteellisen pienen koon vuoksi ja matkat aluksella voivat ajallisesti kestää kuukausia, minkä takia reaktorin suojaukseen on panostettava kovasti.

Reaktori suojataan raskailla suojarakennelmilla ja suojarakennelmat eristetään muusta sukellusveneestä paineenkestävillä vesi- ja ilmatiiveillä osastoilla. Nämä tiiviit osastot estävät onnettomuuksissa radioaktiivisten kaasujen leviämisen muualle sukellusveneeseen tai ulos sukellusveneestä. Suojarakennelmat voivat yhteensä painaa jopa tuhansia tonneja, josta suurin osa tulee lyijy- ja teräsrakenteista. Suojarakennelmien painon ja sukellusveneeseen painojakauman takia suojarakennelmat ja reaktori rakennetaan sukellusveneeseen keskikohdan läheisyyteen. Painonlisäystä pyritään säästämään suuntaamalla suojarakennelmat, eli tekemällä rakennelmista paksumpia sukellusveneeseen etuosaan päin, jossa miehistö ja suurin osa laitteistoista ovat, ja ohuempia sukellusveneeseen sivuille ja taaksepäin. Myös miehistön oleskelua reaktorin läheisyydessä rajoitetaan ajallisesti. (Bukalov & Nursbayev 1964, 256.) Kuvassa 12 on piirros K-141 Kursk ydinsukellusveneeseen osastoista.



**Kuva 12.** Kursk ydinsukellusveneen osastot. Lähde: Wikimedia Commons.

Ydinsukellusveneen reaktorilla on kaksi suojarakennelmaa, reaktoriytimen suojarakennelma ja ensiöpiirin suojarakennelma. Kuvassa 13 on esitetty reaktorin suojarakennelmat.



**Kuva 13.** Reaktorin suojarakennelmat. Lähde: Ma & Von Hippel 2001.

Reaktoriytimen suojarakennelman on tarkoitus vähentää reaktorissa syntyvä gammasäteily minimiin ja estää nopeiden neutronien vuo ulos reaktorista, jotta toisiopiirin vesi ei pääse aktivoitumaan ja levittämään säteilyä. Reaktorin suojarakennelma koostuu

lyijyllä päällystetystä teräksisestä vesitankista, jonka sisälle reaktoriydin on sijoitettu. Lyijy- ja teräsrakenteet suojaavat läpätunkevalta gammasäteilyltä. Vesitankin vesi suojaaa neutronisäteilyltä hidastamalla ja kaappaamalla neutroneita samalla tavalla kuin hidastinaineena toimiessaan. (Ibid, 257 - 259.)

Ensiöpiirin suojarakennelma pienentää yhä entisestään neutronivuon ja gammasäteilyn pääsyä ulos reaktorista ja estää ilman radioaktiivisen saastumisen. Ensiöpiirin suojarakennelma suojaa ja ympäröi reaktorissa aktivoituvan veden kanssa tekemisissä olevat osat kuten paineistimen, pumput ja höyrystimen. Ensiöpiirin suojarakennelma voi olla tehty lyijystä, teräksestä, betonista ja polyetyleenimuovista. Ensiöpiirin suojarakenne on monta kertaa painavampi kuin reaktorin suojarakennelma. (Ibid.)

#### **4.10 Ydinenergian mahdollistamat muut toiminnot**

Ydinsukellusveneiden reaktori tuottaa propulsioon tarvittavan energian lisäksi paljon sähköenergiaa muuhun käyttöön, kuten ase- ja navigaatiojärjestelmiin, miehistön tarpeisiin ja akkujen lataamiseen.

Koska ydinsukellusveneissä ei ole pulaa sähköstä kuin veden alla akuilla toimivissa dieselsähköisissä sukellusveneissä, monet toiminnot tuotetaan sähköllä kemiallisten reaktioiden ja varastoinnin sijasta. Tuotettua sähköenergiaa käytetään suolanpoistoon merivedestä, jotta saadaan miehistölle juomakelpoista vettä ja puhdistettua vettä reaktorin vesipiireihin. Tuotetulla sähköenergialla puhdistetaan myös epäpuhtaudet pois miehistön hengitysilmaasta ja tuotetaan happea. Pienemmissä ja vanhemmissa ydinsukellusveneissä hengitysilman tuotto ja puhdistus voivat perustua kemiallisiin reaktioihin. Myös ydinsukellusveneiden lämmitys, ilmastointi ja erilaiset mukavuudet ovat sähkötoimisia. Koska ydinsukellusvene pystyy tuottamaan miehistölle tarvittavan veden ja hengitysilman, operaatioiden pituutta rajoittaa teoriassa vain sukellusveneiden ruokavarastojen riittävyys ja miehistön kestävyys. (Ragheb 2012, 1.)

## 5 ONNETTOMUUDET

Ydinsukellusveneet rakennetaan hyvin kestäviksi ja niiden miehistö on koulutettu kaikenlaisiin tilanteisiin. Silti ydinsukellusveneille on tapahtunut erilaisia onnettomuuksia kuten törmäyksiä, tulipaloja, aseonnettomuuksia, järjestelmävikoja, vuotoja ja reaktorionnettomuuksia. Useita ydinsukellusveneitä on uponnut onnettomuuksien seurauksena ja aina uppoamisen syy ei ole varmistunut. Tilastollisesti Yhdysvaltain ydinsukellusveneet ovat turvallisempia kuin Neuvostoliiton ja Venäjän ydinsukellusveneet. (Ragheb 2012, 55 & 64.)

### 5.1 Reaktorionnettomuudet

Yhdysvaltalaisille ydinsukellusveneille ei ole koskaan tapahtunut reaktorionnettomuuksia, vaikka ydinsukellusveneitä on vaurioitunut muissa onnettomuuksissa. Yhdysvallat on menettänyt kaksi ydinsukellusvenettä reaktoriin liittymättömissä onnettomuuksissa. (NNBE 2003, 12.)

Neuvostoliiton ydinsukellusveneille on tapahtunut useita vakavia reaktorionnettomuuksia, joissa on jopa päässyt vapautumaan säteilyä sukellusveneeseen ulkopuolelle. Venäläisiä ydinsukellusveneitä on uponnut, mutta reaktorionnettomuuksia ei ole tapahtunut. Reaktorionnettomuudet ovat joko kriittisysonnettomuuksia tai jäähdytteenmenetysonnettomuuksia. Kriittisysonnettomuuksissa reaktorin hallinta on menetetty ja reaktorin teho on päässyt karkaamaan liian suureksi. Jäähdytteenmenetysonnettomuuksissa reaktorin jäähdytys on epäonnistunut. Neuvostoliiton nestemäisellä metallilla jäähdytetyllä reaktorilla varustetut ydinsukellusveneet esiintyvät onnettomuustilastoissa usein pienestä valmistusmäärästä huolimatta. Alla on kerrottu tunnetuimpia ydinsukellusveneiden reaktorionnettomuuksia. (Bellona, 1997.)

Neuvostoliittolainen ydinsukellusvene K-19 vuonna 1961. Pohjois-Atlantilla harjoituksissa painevesireaktoreiden jäähdytysjärjestelmään tuli suuri vuoto paikkaan, joka oli



miehistön tavoittamattomissa. Vuodon aiheuttaman paineenlaskun seurauksena jäähdytuspumput pysähtyivät ja reaktoreiden hätäpysäytysjärjestelmät katkaisivat ketjureaktiot reaktoreissa. Reaktoreiden lämpötila lähti nopeasti nousuun jäähdytteen kierron loputtua, koska ydinreaktorit tuottavat jälkilämpöä ketjureaktion pysähtymisestä huolimatta. Suunnittelijoiden vaatimuksista huolimatta ydinreaktoreiden varajäähdytysjärjestelmää ei ollut asennettu. Osa miehistön jäsenistä joutui rakentamaan improvisoitua jäähdytysjärjestelmää, jota rakennettaessa koko miehistö sai suuren säteilyannoksen. Järjestelmän rakentajat ja osa miehistöstä kuoli pian onnettomuuden jälkeen saamansa suuren säteilyannoksen takia. K-19 saatiin hinattua huoltoon ja siihen asennettiin uudet reaktorit ennen sukellusveneen palauttamista takaisin palvelukseen. (Ibid.)

Neuvostoliittolainen ydinsukellusvene K-27 vuonna 1968. Toisen nestemäisellä metallilla jäähdytetyn reaktorin teho laski yllättäen johtuen jäähdytteen kierron häiriöstä. Osa polttoaineesta vaurioitui ylikuumentuessaan ja radioaktiivisia fissiotuotekaasuja vapautui reaktorista koko sukellusveneeseen. Huonosti koulutettu miehistö ei ymmärtänyt osan reaktorista olevan vaurioitunut ja yrityksissä korjata reaktori merellä yhdeksän miehistön jäsentä sai kuolettavan annoksen säteilyä. K-27 pääsi takaisin satamaan toisella ydinreaktorillaan. (Ibid.)

Neuvostoliittolainen ydinsukellusvene K-123 vuonna 1982. Alfa-luokan ydinsukellusveneen lyijy-vismutti-seoksella jäähdytetyn reaktorin höyrytimeen tuli vuoto. Noin kaksi tonnia jäähdytettä vuoti höyrytimeestä ja reaktori vaurioitui pahasti. (Ibid.)

Neuvostoliittolainen ydinsukellusvene K-431 vuonna 1985. Ladatessa uutta polttoainetta reaktoriin tapahtui onnettomuus, jossa säätösauvat pääsivät nousemaan reaktorin painesäiliön kantta avatessa kannen mukana liian ylös. Ilman säätösauvojen vaikutusta reaktorin teho pääsi nousemaan hallitsemattomasti, josta seurasi reaktorin ylikuumentuminen ja höyryräjähdys. Räjähdyksessä levitti osan reaktoriin ladatusta tuoreesta polttoaineesta ympäristöön ja vapautti pilven radioaktiivisia kaasuja. Kaksi neliökilometriä metsää saastui vapautuneesta radioaktiivisesta pilvestä. Paikallaolijat ja sammuttamaan tulleet palomiehet saivat suuria säteilyannoksia ja osa kuoli höyryräjähdyksessä. (Ibid.)

## 6 KÄYTÖSTÄ POISTO

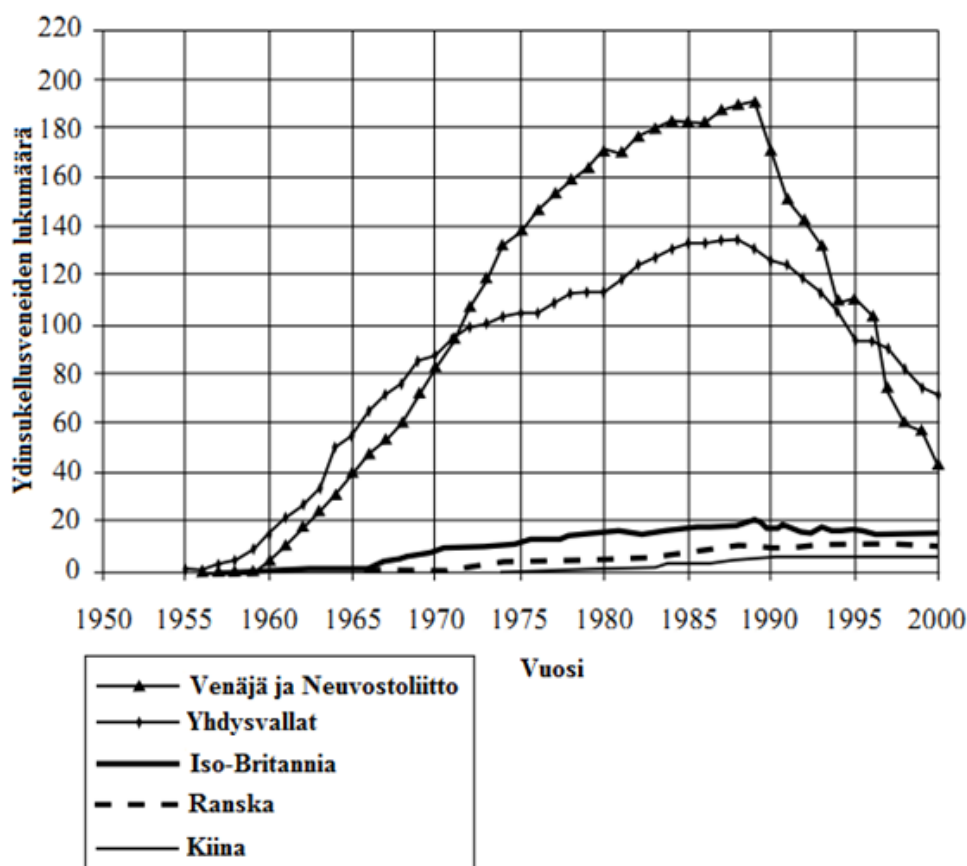
Sukellusvene ikääntyy kuten muutkin mekaaniset laitteet ja palveltuaan käyttöikänsä loppuun poistetaan se käytöstä. Iän lisäksi muita syitä käytöstä poistoon ovat korjauskelvottomaksi vaurioituminen, ydinaseiden rajoitussopimukset ja kylmän sodan jälkeen rauhoittuneen asevarustelun aiheuttamat leikkaukset armeijoiden budjetteihin. Erityisesti Venäjän vanhentuneiden ydinsukellusveneiden käytöstä poistoa vaivaa rahoituksen puute, joka herättää huolta mahdollisista onnettomuuksista ja ympäristöongelmista. (Bukharin & Handler 1995, 245). Kuvassa 14 on kaksi käytöstä poistettua venäläistä ydinsukellusvenettä matkalla purettavaksi.



**Kuva 14.** Ydinsukellusvenettä matkalla purettavaksi. Lähde: RIA Novosti.

Ydinsukellusvenettä operoivat valtiot ovat rakentaneet noin viisisataa ydinsukellusvenettä, joista noin puolet on poistettu käytöstä. Käytöstä poistettujen ydinsukellusvenneiden määrässä on huomioitava, että reaktoreita voi olla sukellusveneessä kaksi riippuen sukellusveneen tyypistä, eli käytöstä poistettavien reaktoreiden määrä on suurempi kuin käytöstä poistettavien ydinsukellusvenneiden. (Ibid.)

Kuvassa 15 on esitetty käytössä olevien ydinsukellusveneiden lukumäärä eri vuosina. Kuvasta puuttuvat Intiassa valmistetut ydinsukellusveneet, joita on olemassa vain muutama kappale. (Times of India 2012). Kuvasta näkee, että Neuvostoliitto on rakentanut enemmän ydinsukellusveneitä kuin muut valtiot yhteensä. Neuvostoliiton romahduksen ja kylmän sodan päättymisen vaikutus on selvästi havaittavissa ydinsukellusveneiden määrässä noin vuodesta 1989 eteenpäin.



**Kuva 15.** Ydinsukellusveneiden lukumäärä. Lähde Ma & Von Hippel 2001, 89.

Ydinsukellusveneiden käytöstä poistossa huomio keskittyy ydinreaktoriin ja muihin säteilyn kanssa tekemisissä olleisiin osiin. Tällaisia osia ovat reaktori sisältöinen ja suoja-

kuorineen, sekä reaktoripiirin nesteet, putkistot ja höyrystin. Hankaluutta lisää että nämä osat sijaitsevat sukellusveneeseen paineenkestävän rungon sisällä, jota ei ole suunniteltu helposti purettavaksi.

Sukellusveneeseen käytöstä poistaminen alkaa käytetyn polttoaineen, reaktorin nesteiden ja ydinaseiden poistolla. Reaktori eristetään muista ydinsukellusveneeseen osastoista ja polttoaine ja nesteet poistetaan reaktorista. Käytetty polttoaine siirretään uudelleenkäsitteilyyn tai varastoidaan loppusijoitusta odottamaan. Sukellusveneestä puretaan muut laitteistot ja reaktoriosasto leikataan irti muusta sukellusveneestä ja siirretään varastoon odottamaan loppusijoitusta. Reaktorin purkuvaihetta voi ydinsukellusvene joutua odottamaan jopa yli vuosikymmenen ajan. Loput osat sukellusveneestä, jotka eivät ole olleet tekemisissä radioaktiivisuuden kanssa, kierrätetään. (Bukharin & Handler 1995, 255.)

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Satojen sukellusvene- ja muiden laivastoreaktoreiden kehittäminen ja käyttäminen on tuonut valtavasti kokemustunteja lähes kuudenkymmenen vuoden käytön aikana. Sotateollisuus on ollut monissa teknologioissa edelläkävijä, eikä ydinvoiman hyödyntäminen ole poikkeus. Merkittävin sukellusvenereaktoreihin perustuva edistysaskel on sähköenergian tuotantoon valjastetun painevesireaktorin kehittäminen yhdysvaltalaisen ydinsukellusveneohtelmaan pohjalta. Sukellusvenereaktoreita kehittelevät armeijat ja yhtiöt ovat kouluttaneet ja työllistäneet lukuisia tutkijoita, suunnittelijoita ja käytön ammattilaisia. Näistä ammattilaisista moni on siirtynyt teollisuuteen töihin ja tuonut sukellusvenereaktoreista opittuja kokemuksia energiateollisuuden käyttöön.

Monet tarkat sukellusvenereaktorin yksityiskohdat ovat tarkoin varjeltuja herkkiä ja arvokkaita sotilassalaisuuksia. Sotilassalaisuuksia eivät patentit pysty suojaamaan kopiointilta ja toisten valtioiden keksintöjä vakoillaan ja kopioidaan aktiivisesti. Esimerkiksi lähteenä käytetty Bukalovin ja Nursbayevin Neuvostoliiton Leningradissa kirjoittama kirja *Atomic-Powered Submarine Design* perustuu luultavasti vakoilemalla saatuun tietoon, sillä länsimaiden ja Neuvostoliiton välillä ei varmasti ollut minkäänlaista yhteistyötä ydinsukellusveneiden kehittämisessä. Ydinvoiman valjastaminen aluksen voimälähteeksi on monimutkainen ja vaativa prosessi, johon vain hyvin harva valtio on pystynyt, mutta useampi valtio on ilmaissut kiinnostuksensa. Viimeisimpänä ydinsukellusvenevaltioiden joukkoon liittyi Intia. Näistä tiedoista voi päätellä, että ydinsukellusveneitä operoivat valtiot haluavat pitää ydinsukellusveneohtelmansa salassa, jotta vieraat ja mahdollisesti vihamieliset valtiot pääse käyttämään sotakalustoissaan ydinenergian tuomia etuja. Erityisen varjeltuja salaisuuksia ydinsukellusveneissä ovat hiljaisuuteen ja siten huomaamattomuuteen liittyvät keksinnöt. Esimerkiksi sukellusvenereaktorin lauhduttimista tiedon löytäminen osoittautui vaikeaksi, koska voi päätellä lauhduttimen rakenteen olevan hyvin salattu sen takia, että sen läpi meriveden virratessa tuottaa virtausääntä ja lämpenevä merivesi jättää lämpöjäljen. Myös muun sukellusvenereaktorin rakenteeseen ja ominaisuuksiin liittyvän tiedon löytäminen osoittautui hankalaksi ja kunnollisia valokuvia sukellusvenereaktoreiden osista ei löytynyt. Monet työssä käytetyt

tiedot ovat peräisin vanhoista jo käytöstä poistetuista ydinsukellusveneistä ja tiedot eivät ole kovinkaan yksityiskohtaisia, vaan lähinnä periaatteellisia.

Ydinsukellusveneitä operoivilla valtioilla on hyvin vähän velvollisuuksia julkistaa tieto- ja ydinsukellusvenehjelmistään. Sukellusvenereaktoreita kehittävät toimijat joutuvat tasapainoilemaan mitä tietoja pidetään sotilassalaisuuksina ja mitä kannattaa julkistaa yleiseen tietoon. Monet kehitetyt teknologiat voivat olla ydinvoimateollisuudelle ja muille aloille hyödyllisiä, sekä yleisöä kiinnostavat ydinsukellusveneisiin liittyvät turvallisuus-, terveys- ja ympäristöasiat.

Ydinreaktorin käyttäminen sukellusveneen voimanlähteenä muutti merkittävästi sukellusveneen roolia sodankäynnissä. Ennen ydinsukellusveneen aikakautta sukellusveneen täytyi nousta pintaan säännöllisesti lataamaan akkujaan ja ne olivat hyvin riippuvaisia satamista rajoitetun polttoainemäärän takia. Nykyiset ydinsukellusveneet ovat hyvin riippumattomia satamien läheisyydestä, koska ydinreaktorin polttoaine ei lopu kesken operaation, ja käytännössä täysin riippumattomia ilmakehästä, jonka takia kesken operaatioiden niiden ei tarvitse nousta pintaan kertaakaan. Myös sukellusveneen aseistuksessa on tapahtunut suuria muutoksia. Ennen atomiaikaa sukellusveneen pääasiallisia aseita olivat torpedot ja miinat, kun nykyään ydinsukellusveneissä aseistuksen pääpaino on pinnan alta laukaistavissa ohjuksissa, jotka ovat yleensä ydinaseita. Myös monet perinteisillä voimalähteillä toimivat sukellusveneet pystyvät laukaisemaan ohjuksia. Näiden syiden takia sukellusveneen rooli erityisesti ydinsukellusveneen kohdalla muuttui laivoihin kohdistuvasta hyökkäysaseesta piilossa liikkuvaksi ohjusten laukaisualustaksi. Myös vakoilu on tärkeä osa ydinsukellusveneen toimintaa, ydinsukellusveneet seuraavat ja kuuntelevat eri alusten liikkeitä merillä. Ydinsukellusveneet ydinohjuksineen toimivat yhä merien syvyyksissä piileskellessään osana ydinasevaltioiden kauhun tasapainoa, vaikka kylmän sodan jälkeen ydinsukellusveneen ja ydinaseiden lukumäärä on laskenut.

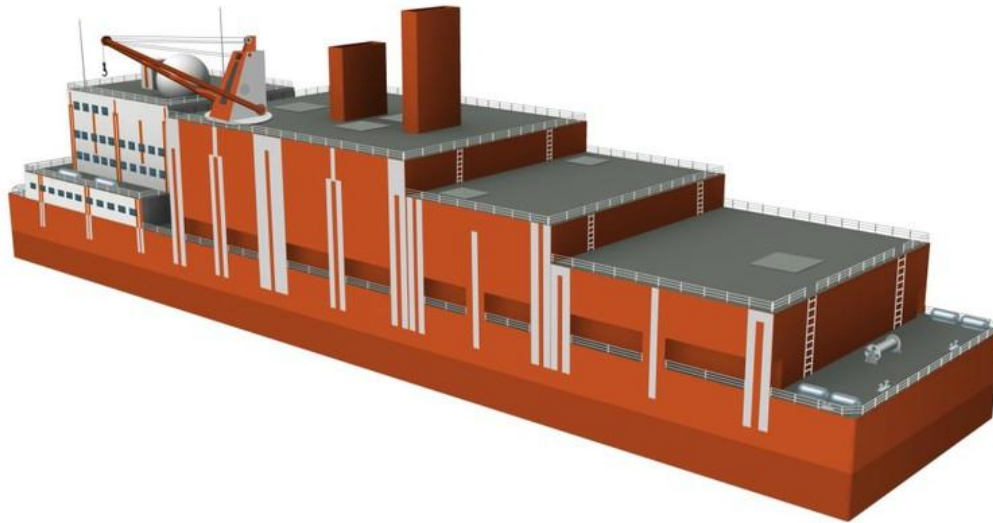
## 7.1 Tulevaisuuden konsepteja.

Tässä kappaleessa tutustutaan muutamaani eri konseptiin ydinsukellusveneiden ja sukellusvenereaktoreiden rauhanomaisista käyttötarkoituksista. Tässä työssä ei tutustuta laivareaktoreihin.

Sukellusvenereaktoreita on ehdotettu käytettävän sähkön- ja lämmöntuotantoon eristäytyneillä alueilla, joissa ei ole yhteyttä sähköverkkoon. Myös pelkkä sähkön tuotanto on mahdollista, mutta monet näistä eristäytyneistä alueista on niin kylmiä, että tuotettua lämpöä ei kannata hukata. Näille sähkön- ja lämmön tuottoon tarkoitetuille reaktoreille on tyypillistä helppo siirrettävyys.

Yhdysvallat käytti vuosien 1962 ja 1972 välisen ajan McMurdon tutkimusasemalla Etelämantereella pientä sukellusvenereaktoriin perustuvaa ydinreaktoria tuottamaan energiaa tutkimusaseman tarpeisiin. Tarkoituksena oli tuottaa sähköä, puhdistaa vettä ja vähentää dieselöljyn kallista kuljettamista ja varastoimista Etelämantereelelle. McMurdon reaktorilla tuotettu lämpö piti kovassakin pakkasessa tankkeihin säilötyn dieselin juoksevana. Reaktori oli niin kompakti, että se mahtui tarvittaessa Hercules-kuljetuskoneen kyytiin. Reaktoria vaivasivat erilaiset ongelmat ja se poistettiin käytöstä vain kymmenen vuoden käytön jälkeen. (Long 2011.)

Muiden muassa venäläinen sukellusveneitä suunnitteleva ja rakentava insinööritoimisto Rubin on ehdottanut kelluvia ydinvoimaloita, jotka käyttäisivät heidän suunnittelemaansa ydinsukellusvenereaktoreita sähköntuotantoon. Heidän suunnitelmassaan kelluva ydinvoimala hinataan ja ankkuroidaan rannikolle ja kytketään alueen sähköverkkoon ja mahdolliseen kaukolämpöverkkoon. Suunniteltu sähköteho on 95 megawattia. Myös suolanpoistoa ja vedenpuhdistusta on tutkittu kelluvan ydinvoimalan käyttötarkoitukseksi. Rubinin suunnitelmassaan kelluva ydinvoimala hinataan kotisatamaan isompaa huoltoa ja polttoaineen vaihtoa varten kymmenen vuoden välein. Kelluvan ydinvoimalan käyttöäksi on heidän suunnitelmassa arvioitu neljäkymmentä vuotta. Kuvassa 16 on Rubinin konsepti kelluvasta ydinvoimalasta. (Rubin.)



**Kuva 16.** Kelluva ydinvoimala. Lähde: Rubin.

Sama venäläinen insinööritoimisto, Rubin, on ehdottanut myös rauhanomaisia käyttötarkoituksia ydinsukellusveneille. Heidän suunnitelmansa on muuttaa maailman suurimpia Typhoon-luokan ydinsukellusveneitä vedenalaisiksi kaapelialuksiksi laskemaan kaapeleita merenkäynnistä huolimatta tai jään alle. Toinen ehdotus Rubinilta on muuttaa Typhoon-luokan ydinsukellusveneitä rahtisukellusveneiksi korvaamalla ydinasejärjestelmien viemät tilat rahtitiloilla. Näitä sukellusveneitä ehdotetaan käytettävän kuljettamaan rahtia jään alitse, esimerkiksi pohjoisnavan jääpeitteen alitse. Rubinin rahtisukellusvenekonseptissa ideana on, että ydinsukellusvene liikkuu jään alla huomattavasti nopeammin kuin jäänmurtaja pystyy murtamaan jäätä. Molemmissa suunnitelmissa on tarkoitus hyödyntää jo olemassa olevia ydinsukellusveneitä, jotka ovat Venäjän armeijan kannalta teknisesti vanhentumassa tai vanhentuneita. (Ibid.)

Sukellusvenerahdissa olisi ehkä mahdollisuuksia muuallakin kuin pohjoisilla jäätiköiden peittämällä vesialueilla. Ydinsukellusvene liikkuu veden alla nopeammin merenkäynnistä riippumatta, kuin moni muu alus pystyy pinnalla liikkumaan, jolloin ydinsukellusvenelle käyttöä voisi olla nopeassa rahdissa sellaiselle rahdille, jota ei voi lentokoneella lennättää. Sukellusveneen liikkussa pinnan alla ei aaltojen kitka aiheuta vastusta ja siten energiaa säästyy. (Ragheb 2012, 6).



Ydinsukellusvene sopii myös tutkimussukellusveneeksi. Etuina olisivat pitkät sukellusajat, riippumattomuus merenkäynnistä ja vain hyvin pieni riippuvuus tukialuksesta sukelluksen aikana. Yhdysvaltain laivasto käytti pientä ydinkäyttöistä *NR-1* sukellusvenettä lähes neljäkymmentä vuotta erilaisiin operaatioihin. *NR-1* on vain noin 45 metriä pitkä, joka on vain murto-osa maailman suurimpien noin 170 metriä pitkien ydinsukellusveneiden pituudesta. (Ragheb 2012, 47). Kuvasta 17 näkee *NR-1* tutkimussukellusveeneen kokoluokan verrattuna miehistön jäseniin.



**Kuva 17.** *NR-1* tutkimussukellusvene. Lähde: Wikimedia Commons.

Rauhanomaisissa käyttötarkoituksissa ongelmana ydinreaktorin taloudellisen kilpailukyvyyn lisäksi ovat siviilitoimijoita rajoittavat poliittiset ongelmat ja vastuut. Esimerkiksi ihmisten ydinvoimavastaisuus ja -pelko voivat estää ydinkäyttöisen aluksen pääsyn satamaan ja eräät kansalaisjärjestöt voisivat häiriköidä tällaisten alusten toimintaa. Myös korvausvastuut mahdollisissa ydinonnettomuuksissa voivat nousta yksityisille toimijoille ja monille valtioille liian suuriksi ja vakuutuksen saaminen näiden onnettomuuksien

varalta voi olla mahdotonta. Yleensä fossiilisten polttoaineiden käyttäminen on osoittautunut helpommaksi, kuin lähteä ratkomaan näitä ongelmia.

## LÄHDELUETTELO

Bellona. The Russian Northern Fleet Nuclear submarine accidents. [e-document]. Updated 10.5.1997[retrieved 10.4.2012]. From:

<http://spb.org.ru/bellona/ehome/russia/nfl/nfl8.htm#O5>

Bukalov V. M. & Nursbayev A.A., 1964. Atomic-Powered Submarine Design. Leningrad. Shipbuilding Publishing House. Academic Press. 282 pages.

Bukharin Oleg & Handler Joshua, 1995. Russian Nuclear-Powered Submarine Decommissioning. Science & Global Security 1995, Volume 5. Pages 245-271.

FAS Federation of American Scientists. Alfa class – Project 705. [e-document]. Updated 7.9.2000. [retrieved 3.4.2012]. From: [http://www.fas.org/man/dod-](http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/row/rus/705.htm)

[101/sys/ship/row/rus/705.htm](http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/row/rus/705.htm)

Lewis Elmer E. 2008. Fundamentals of Nuclear Reactor Physics. Academic Press. 280 pages. ISBN-13: 978-0123706317

Long Tony. 2011. Nuclear Age Comes to Antarctica. Wired [e-journal] [retrieved 12.4.2012]. From: <http://www.wired.com/thisdayintech/2011/03/0304antarctic-nuclear-plant-mcmurdo-sound/>

Ma Chunyan & Von Hippel Frank. 2001. Ending the Production of Highly Enriched Uranium for Naval Reactors. [e-document]. The Nonproliferation Review Spring 2001. [retrieved 14.4.2012] Pages 87-101. From:

[http://fissilematerials.org/ipfm/site\\_down/ma01.pdf](http://fissilematerials.org/ipfm/site_down/ma01.pdf)

Murray Raymond L, 2000. Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes (Fifth Edition). Raleigh, North Carolina. Butterworth-Heinemann. 490 pages. ISBN-13: 978-0750671361

NNBE Nasa/Navy Benchmarking Exchange 2003. Progress Report: Naval Reactors Safety Assurance (Volume III). [e-document] [retrieved 14.4.2012]. 68 pages. From: [http://www.nasa.gov/pdf/45608main\\_NNBE\\_Progress\\_Report2\\_7-15-03.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/45608main_NNBE_Progress_Report2_7-15-03.pdf)

Ragheb M. 2012. Nuclear Marine propulsion. [e-document] [retrieved 2.4.2012]. 87 pages. From:

<http://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20402%20ME%20405%20Nuclear%20Power%20Engineering/Nuclear%20Marine%20Propulsion.pdf>

Rubin Central Design Bureau for Marine Engineering. Other projects. [e-document] [retrieved 9.4.2012]. From: [http://www.ckb-rubin.ru/en/projects/other\\_projects/](http://www.ckb-rubin.ru/en/projects/other_projects/)

Shultis J. Kenneth and Faw Richard E. 2008. Fundamentals of Nuclear Science and Engineering (Second Edition). CRC Press. 591 pages. ISBN-13: 978-1-4200-5135-3

STUK Säteilyturvakeskus. Ydinvoimalaitokset. Säteilyturvakeskuksen www-sivuilla. Päivitetty 7.4.2010 [viitattu 30.3.2012]. Saatavilla:

[http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitokset/fi\\_FI/ydinvoimalaitokset/](http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitokset/fi_FI/ydinvoimalaitokset/)

Times of India. India to achieve Nuclear arm triad in February. [e-journal] Updated: 2.1.2012 [retrieved 14.4.2012]. From: [http://articles.timesofindia.indiatimes.com/2012-01-02/india/30580966\\_1\\_ins-arihant-first-indigenous-nuclear-submarine-akula-ii](http://articles.timesofindia.indiatimes.com/2012-01-02/india/30580966_1_ins-arihant-first-indigenous-nuclear-submarine-akula-ii)