

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU
Merenkulun koulutusohjelma/ merenkulkualan insinööri

Tatu Rahja

YDINVOIMA LAIVAN ENERGIANLÄHTEENÄ

Opinnäytetyö 2013

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Merenkulku

Rahja, Tatu	Ydinvoima laivan energianlähteenä
Opinnäytetyö	76 sivua
Työn ohjaaja	Lehtori Ari Helle
Toimeksiantaja	KymiTechnology
Marraskuu 2013	
Avainsanat	ydinenergia, ydinpolttoaineet, lämpövoimakoneet, merenkulku

Opinnäytetyössä tarkastellaan ydinvoiman hyödyntämistä laivan energianlähteenä. Työssä käydään läpi ydinvoiman alkuhistoria, ydinvoiman sotilaallisen käytön historia merenkulussa ja ydinvoiman siviilisovellusten historia merenkulussa.

Työssä käsitellään merenkulun osalta reaktorin perusvaatimukset merikäytössä ja aluksen turvallisuusvaatimukset sekä säteilysuojauksen vaatimukset. Ydintekniikasta selvitetään ydinpolttoaineksi soveltuvat alkuaineet, alkuaineiden kaivausmenetelmät, mahdolliset ydinpolttoaineet, fissiotuotteet, syntyvä ydinjäte ja reaktorityypit. Lämpövoimakoneista on käsitelty aluskäyttöön soveltuvat konetyypit ja niiden voimakone-ratkaisut. Työssä on vertailtu ydinvoiman etuja ja haittoja verrattaessa perinteisiin voimaratkaisuihin.

Työn ensimmäisenä tavoitteena oli koota yhteen ydintekniikan perustiedot. Toisena tavoitteena oli selvittää ydintekniikan hyödyntämiseltä merenkulussa vaadittavat ominaisuudet ja koota ne yhteen. Kolmantena tavoitteena oli tuoda esille ydintekniikan vaihtoehtoisia reaktorityyppejä ja polttoaineita. Neljäntenä tavoitteena oli tuoda esille suljettuun kaasuturbiinitekniikkaan perustuva voimaratkaisu.

Työ on toteutettu, keräämällä tietoa kirjoista, lehdistä ja internetistä. Työssä pyrittiin käyttämään tieteellisiä ja ajan tasalla olevia julkaisuja. Tietoihin viittaavat artikkelit on asioiden paikkansa pitävyyden varmistamiseksi tarkistettu mahdollisuuksien mukaan muista lähteistä.

Työssä toteutuu tekijän mielestä sille asetetut tavoitteet. Tiedonhaku työhön kirjojen ja lehtien kautta oli vaikeaa relevantin materiaalin vähäisyyden vuoksi. Työssä käytetty materiaali oli pääosin englanninkielistä.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Marine Technology

Rahja, Tatu

Nuclear Energy as Ship's Energy Source

Bachelor's Thesis

76 pages

Supervisor

Ari Helle, Lecturer

Commissioned by

KymiTechnology

November 2013

Keywords

nuclear energy, nuclear fuels, thermal power equipment,
maritime

The topic of this bachelor's thesis is the usage of nuclear energy as ship's source of energy. The main emphasis is on the nuclear fuel possibilities and the requirements that seafaring sets on the reactors and ship's designs. The thesis also contains depiction of the history of nuclear energy and the history of the civilian and military utilization of nuclear power in nuclear vessels.

The first objective of the thesis was to summarize the basic knowledge of nuclear technology and requirements that are demanded from nuclear technology in seafaring environment. The second objective was to study different kinds of nuclear reactor designs and nuclear fuel possibilities that are not fully utilized in current nuclear industry.

The research for this thesis was done by studying literature, magazines and the internet. The articles were confirmed to be valid from other sources when it was possible.

The research for this thesis was quite problematic because of the lack of available relative information in the libraries and in the internet. However, this thesis reached the objectives that were set for it. The basic knowledge was summarized and most of the different nuclear technologies were studied.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	7
2	YDIENERGIAN HISTORIA	8
	2.1 Sotilaskäyttö merenkulussa	9
	2.2 Siviilikäyttö	10
	2.2.1 Kauppa-alukset	10
	2.2.2 Jäänmurtajat	14
3	VAATIMUKSET LAIVAKÄYTÖSSÄ	16
	3.1 Reaktori	16
	3.2 Laiva	16
	3.3 Säteilysuojaus	17
	3.4 Kansainvälinen lainsäädäntö	19
	3.5 Satamakäynnin määräykset	20
4	TURVALLISUUS	22
	4.1 Turvallisuus	22
	4.1.1 Karilleajo	22
	4.1.2 Yhteentörmäys	22
	4.1.3 Kaatuminen ja uppoaminen	23
	4.1.4 Tulipalo	23
	4.1.5 Terrorismi	23
	4.1.6 Hätäsulut	23
	4.2 Reaktorin pelastus	24
5	POLTTOAINEET	24
	5.1 Alkuaineet	24
	5.1.1 Uraani	24
	5.1.2 Plutonium	25
	5.1.3 Torium	26

5.2	Kaivostyö	27
5.2.1	Uraani	27
5.2.2	Plutonium	28
5.2.3	Torium	29
5.3	Fissioreaktiot	30
5.3.1	Uraani-233	30
5.3.2	Uraani-235	30
5.3.3	Plutonium-239	30
5.3.4	Plutonium-241	31
5.3.5	Fissiotuotteet	32
5.4	Puhdistus ja väkevöinti	35
5.4.1	Uraani	35
5.4.2	Plutonium	36
5.4.3	Torium	36
5.5	Polttoaineet	37
5.5.1	Oksidit	37
5.5.1.1	UOX	37
5.5.1.2	MOX	37
5.5.2	Keraamit	37
5.5.2.1	Uraanikarbidi	37
5.5.2.2	Uraaninitridi	37
5.5.3	Metallit	38
5.5.3.1	TRIGA	38
5.5.4	Nesteet	38
5.5.4.1	Sulasuolat	39
5.6	Ydinjätehuolto	39
5.6.1	Keski- ja matala-aktiivisen jätteen käsittely	40
5.6.2	Korkea-aktiivisen jätteen käsittely	40
5.6.3	Aluksen tuottaman radioaktiivisen jätteen käsittely	41
6	REAKTORIT	41
6.1	Tähänastiset merireaktorit	41
6.2	Reaktoriyyypit	42

6.2.1	Vesijäähdytteiset reaktorit	43
6.2.1.1	Painevesireaktori	43
6.2.1.2	Kiehutusvesireaktori	44
6.2.1.3	Raskasvesireaktori	45
6.2.1.4	Grafiittihidasteinen kanavatyyppinen reaktori	46
6.2.1.5	Ylikriittisellä vedellä jäähdytetty reaktori	47
6.2.2	Kaasujäähdytteiset reaktorit	48
6.2.2.1	Kaasujäähdytteinen luonnonuraanireaktori	48
6.2.2.2	AGR-reaktori	49
6.2.2.3	Kuulareaktori ja prismaattinen-lohko reaktori	49
6.2.2.4	Kaasujäähdytteinen nopeareaktori	52
6.2.3	Nestemäisellä metallilla jäähdytetyt reaktorit	53
6.2.3.1	Lyijyllä jäähdytetty reaktori	53
6.2.4	Sulasuoloilla jäähdytetyt reaktorit	54
6.2.4.1	LFTR-reaktori	54
6.3	Reaktorien soveltuvuus merikäyttöön	56
7	LÄMPÖVOIMAKONEET	57
7.1	Höryturbiini	57
7.2	Kaasuturbiini	59
7.3	Stirlingmoottori	61
7.4	Lämpövoimakoneiden soveltuvuus merikäyttöön	63
8	APULAITTEISTOVAATIMUKSET	64
9	HAITAT JA EDUT VERRATTUNA PERINTEISIIN VOIMARATKAISUIHIN	65
10	YHTEENVETO	66
	LÄHTEET	67
	KUVALÄHTEET	73
	TAULUKKOLÄHTEET	76

1 JOHDANTO

Perinteisten merenkulussa käytettyjen polttoaineiden hinnannousu ja kiristyvät päästövaatimukset asettavat konventionaaliselle voimatekniikalle jatkuvaa kustannusten nousua. Tämän takia on syntynyt vaihtoehtoisia polttoainetekniikoita, kuten maakaasun hyödyntäminen polttoaineena tai polttokennoilla tuotettu sähkö.

Vaihtoehtoisista energianlähteistä suuritehoisin on ydinvoima, mutta sen käytöstä syntyvä ydinjäte ja mahdollisista onnettomuuksista syntyvä ydinonnettomuuden vaara ovat rajoittaneet sen käyttöä merenkulussa.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on lisätä tietoa erityyppisistä ydintekniikoista ja käsitellä niiden hyödyntämistä merenkulussa. Työssä keskitytään reaktorilta ja lämpövoimakoneelta vaadittaviin ominaisuuksiin sekä käydään läpi erilaiset polttoaineet ja niiden tyypit.

2 YDIENERGIAN HISTORIA

Ensimmäinen tiedetty fissioreaktio maapalolla tapahtui Gabonissa Olkon uraani esiintymässä. Luonnonreaktorit havaittiin vuonna 1972, kun ranskalaisen ydinpolttoaineen prosessointilaitoksen näytteessä havaittiin normaalia pienempi määrä uraanin isotooppia uraani-235:tä. Luonnonreaktorit olivat kuluttaneet toimiessaan 200 kilogrammaa uraani-235:tä tuottaen yhteensä 15 MW-vuoden edestä lämpötehoa satojen tuhansien vuosien aikana. (1)

Muinais-Kreikan filosofit teorioivat ensimmäisenä aineen koostuvan näkymättömistä partikkeleista. Sana ”atomi” tulee kreikankielen sanasta ”atomos”, joka tarkoittaa näkymätöntä. (2:3)

Vuonna 1896 Antoine Henri Becquerelin kokeet uraanisuoloilla ja lasinegatiivilla antoivat ensimmäiset vihjeet atomin sisällä tapahtuvista reaktioista. (3)

Atomiytimen käsitteen teorian esitti ensimmäisenä Ernest Rutherford vuonna 1910. Alfa-hiukkasten sironta tutkimuksissa, johti päätelmään, että suurin osa atomin massasta ja positiivisesta varauksesta sijaitsee atomin ytimessä. Vuonna 1919 Rutherford havaitsi tiettyjen kevyiden alkuaineiden ytimien, kuten typen, hajoavan kun ytimiä pommitettiin alfa-säteilyllä.(4)

Vuonna 1932 James Chadwick todisti neutronien olemassaolon. Neutronien sähköinen neutraalius mahdollisti raskaimpien alkuaineiden ytimien halkaisun. (5)

Vuonna 1934 Enrico Fermi pommitti uraania neutroneilla ja havaitsi että syntyvät aineet olivat odotettua hieman kevyempiä. Vuonna 1938 Otto Hahn ja Fritz Strassman toteuttivat kokeen, jossa uraania pommitettiin radiumia ja berylliumia sisältävän neutronilähteen neutroneilla. Kokeessa syntyneiden aineiden atomimassa oli noin puolet uraanin atomimassasta. Hahn ja Strassman kertoivat tutkimustuloksistaan Lise Meitnerille. Meitner laski atomimassat yhteen ja havaitsi niiden summan olevan hieman pienempi kuin uraanin atomimassan. Meitner osoitti puuttuvan massan muuttuneen energiaksi käyttäen Albert Einsteinin matemaattista kaavaa $E=mc^2$. Tämä osoitti, että kokeessa oli tapahtunut fissio. (2: 4-5)

Vuonna 1941 Enrico Fermi ja Leo Szilard ehdottivat ensimmäisen reaktorin rakentamista suunnittelemansa reaktorimallin pohjalta. Reaktorimallissa uraania ja grafiittia koottaisiin neliönmuotoiseksi kasaksi, jonka neutronitaloutta säädeltäisiin kadmiumsauvoilla. Vuoden 1942 alussa joukko Fermin johtamia tiedemiehiä kokoontui Chicagon Yliopistoon kehittämään reaktorimallia ja teoriaa. Fermin ryhmä rakensi kehitystyönsä pohjalta Chicago Pile-1 reaktorin, joka meni kriittiseksi 2. joulukuuta 1942 klo 15.25. (2:6-7)

Ensimmäinen sähköntuotantoon tarkoitettu reaktori rakennettiin Idahoon. Reaktorin nimi oli EBR-1 (Experimental Breeder Reactor 1). Se tuotti sähköä ensimmäisen kerran 20. joulukuuta 1951. (2:8)

2.1 Sotilaskäyttö merenkulussa

Ensimmäisen merenkulkuun tarkoitetun reaktorin suunnittelu alkoi Yhdysvalloissa kongressin hyväksynnästä heinäkuussa 1951. Suunnittelutyön toteutti Atomic Energy komission Naval Reactors -osasto, jota johti amiraali Hyman G. Rickover. Ensimmäinen prototyyppipainevesireaktori valmistui vuonna 1953. Reaktoryyppiä käytettiin vuonna 1955 vesille lasketussa USS Nautiliuksessa. Vuonna 1960 USS Nautiliuksen pohjalta rakennettiin Skate-luokan ydinsukellusveneitä ja lentotukialus USS Enterprise. USS Long Beach -risteilijä valmistui vuonna 1961. (6)(7)

Myös Neuvostoliitossa kehitettiin merenkulkuun sopivia reaktoreita. Kehitetyt reaktoryypit olivat painevesireaktori ja lyijy-vismuttijäähdytteinen reaktori. Painevesireaktorista tuli standardi molemmille maille. (7)

Yhdysvaltojen merireaktoriturvallisuustilasto on erinomainen. Yhtään reaktorionnettomuutta ei ole tapahtunut 526 reaktorissa 6 200 reaktorivuoden toiminta-aikana. (7)

2.2 Siviilikäyttö

2.2.1 Kauppa-alukset

Kauppa-aluksissa ydinvoimaa ei ole käytetty muutamaa koealusta lukuun ottamatta.

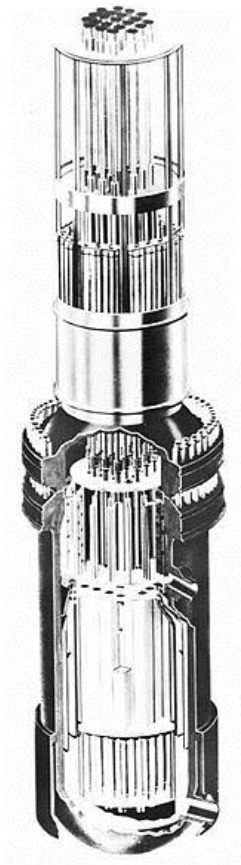
Vuonna 1955 Yhdysvaltojen presidentti Dwight D. Eisenhower ehdotti ydinkäyttöisen kauppa-aluksen rakentamista osana hänen kansainvälistä "Atoms for Peace"-aloitettaan. Seuraavana vuonna Yhdysvaltojen kongressi valtuutti NS Savannah hankkeen (Kuva 1). Alus valmistui joulukuussa 1962. Sen hinnaksi tuli 46,9 miljoonaa dollaria, mistä 28,3 miljoonaa meni reaktoriin ja polttoaineeseen. (8)



Kuva 1. NS Savannah

Eisenhower halusi aluksen toimivan rauhanaluksena, joka toimisi rauhanomaisen atomivoiman lähettiläänä. Alukselta ei odotettu kaupallista arvoa tai todellista lastinkuljetusta. Alkuperäisenä suunnitelmana oli käyttää kopiota ydinsukellusvene NSS Nautiluksen reaktorista, mutta suunnitelmia muutettiin. Projektia ei haluttu rinnastaa millään sotilaallisiin ohjelmiin. (8)

Reaktori (Kuva 2) suunniteltiin silloisten siviilivoimaloiden standardien mukaan. Reaktori oli 74 MW painevesireaktori. Se käytti polttoaineenaan matalasti väkevöityä uraania. Reaktorin suunnittelussa keskityttiin luotettavuuteen ja turvallisuuteen toisin kuin silloisissa sotilassovelluksissa, joissa keskityttiin reaktorin iskunkestävyyteen ja kompaktiin kokoon. (8)



Kuva 2. NS Savannahin reaktori

Rakenteeltaan alus muistutti luksusristeilijää. Siinä oli 30 ilmastoitua hyttiä, ruokailutilat 100 matkustajalle, veranta, uima-allas, kirjasto ja oleskelutila, joka toimi myös elokuvateatterina. Alus käytti evävakaimia matkustajien mukavuuden ja reaktoriturvallisuuden takia. Aluksessa oli 7 lastiruumaa, joiden tilavuus oli 18 500 m³. (8)

NS Savannah hinattiin vuonna 2007 Newport Newsin satamaan, jossa siitä purettiin kaikki ydinkäyttöisyyteen liittyvät laitteet. Vuonna 2008 alus hinattiin Baltiomoreen sataman laituriin 13, jossa se toimii historiallisesti merkittävänä nähtävyytenä. (8)(9)

Saksalaisten valmistama rahti- ja koealus NS Otto Hahn (Kuva 3) valmistui vuonna 1964 ja se aloitti kaupallisen toimintansa vuonna 1968. Alus nimettiin professori Otto Hahnin mukaan. Siihen vaihdettiin uudet uraanielementit vuonna 1972, ja tähän mennessä aluksella oli purjehdittu 463 000 kilometriä. Vuonna 1979 aluksesta poistettiin ydinreaktori ja se korvattiin kustannussyistä dieselmoneistolla. Yhdeksän vuoden aikana alus oli purjehtinut ilman ongelmia 1 200 000 kilometriä ja vierailut 33 satamassa 22 maassa. (10)



Kuva 3. NS Otto Hahn

Japanilaisten valmistama NS Mutsu (Kuva 4) laskettiin vesille 12. kesäkuuta 1970 ja sen reaktori ladattiin 4. syyskuuta 1972. Aluksen reaktorin säteilysuojassa havaittiin pieni vuoto gamma- ja neutronisäteilyä ensimmäisen merimatkan aikana. Reaktorin valmistaja Westinghouse oli tarkistanut suunnitelmia ja varoittanut vuodon mahdollisuudesta etukäteen, mutta reaktoriosastoon ei tehty rakennusvaiheessa tarvittavia korjauksia. Aluksen palatessa satamaan paikalliset kalastusalukset estivät sen pääsyn satamaan. Alus pääsi rantautumaan 15. lokakuuta 1972. Vuosien 1978 ja 1991 välillä alusta kunnostettiin ja se lähti koeajolle helmikuussa 1991. Sinällään onnistuneen 82 000 kilometrin merikoeajon jälkeen alus telakoitiin. Mutsun reaktori poistettiin vuonna 1995. Reaktorin poiston jälkeen alus varustettiin tavanomaisin koneistoin, ja se muunnettiin merentutkimusalukseksi, joka sai nimen MS Mirai.(11:30)



Kuva 4. NS Mutsu

NS Sevmorput (Kuva 5) on entisessä Neuvostoliitossa valmistettu arktisiin olosuhteisiin suunniteltu kauppalaiva. Alus luovutettiin palvelukseen vuonna 1988. Sitä operoi valtiollinen Rosatom-korporaatio. Alus on vahvistettu kulkemaan jäässä, ja se selviää ilman jäänmurtajan apua 1,2 m paksuisesta kiintojäädästä. Elokuussa 2007 Sevmorput vedettiin telakalle, jossa siitä on tarkoitus muokata maailman ensimmäinen ydinkäyttöinen öljynporausalus. Muutostöiden odotettiin kestävän 18 kuukautta. Muutostyö on viivästynyt rahoitusongelmien vuoksi. (12)



Kuva 5. NS Sevmorput

2.2.2 Jäänmurtaajat

Ydinkäyttöinen propulsiosysteemi on osoittautunut teknisesti ja taloudellisesti järkeväksi käyttövoimaksi jäänmurtaajissa, jotka toimivat Pohjoisen jäämeren alueella. Ydinvoima alukset pystyvät operoimaan vuosia ilman polttoainesauvojen uusimista.

Vuonna 1959 Neuvostoliitossa valmistettu jäänmurtaaja NS Lenin (Kuva 6) oli maailman ensimmäinen ydinvoimalla toimiva pinta-alus. Se pysyi toiminnassa vuoteen 1989 asti. Aluksella tapahtui kaksi vakavaa säteilyonnettomuutta. Ensimmäinen onnettomuus tapahtui helmikuussa 1965. Onnettomuuden syynä oli reaktorin jäähdytysveden puuttuminen, mikä aiheutti polttoaineen osittaisen sulamisen ja epämuodostumisen. Toinen onnettomuus tapahtui vuonna 1967, kun reaktorin jäähdytysjärjestelmässä sattui vuoto. Vuodon etsinnästä aiheutuneet vahingot todettiin niin suuriksi, että koko reaktorijärjestelmän kolme OK-150-reaktoria vaihdettiin kahteen tehokkaampaan OK-900-reaktoriin. Korjaukset toteutettiin Zvezdochka telakalla joulukuun 1967 ja toukokuun 1970 välisenä aikana. Alus toimii nykyään museoaluksena Muurmanskin satamassa.(13)



Kuva 6. NS Lenin

NS Leninistä saadut kokemukset johtivat 23 500 tonnia painavien Arktika-luokan alusten rakentamiseen (Kuva 7). Näistä ensimmäinen NS Arktika luovutettiin käyttöön vuonna 1975. Se oli ensimmäinen pohjoisnavan saavuttanut pinta-alus. Kuudesta aluksesta neljä on käytössä ja ne omistaa Rosatom-korporaatio. Arktika-luokan aluk-

sisä on kaksi OK-900-reaktoria, jotka tuottavat kukin 171 MW lämpötehoa. Akseliteho on 52 MW.(7)(14)



Kuva 7. NS Jamal Arktika-luokan jäänmurtaja

Jokiin ja muihin mataliin vesialueisiin Neuvostoliitto suunnitteli Taimyr-luokan (Kuva 8). Aluksia rakennettiin kaksi kappaletta. Aluksen rungot koottiin Wärtsilä Meriteollisuuden Helsingin telakalla 1989. Valmiisiin runkoihin asennettiin ydinreaktorit Baltijski zavodin telakalla Pietarissa. Alukset omistaa Rosatom-korporaatio. Niissä on yksi KLT-40M-reaktori, jonka teho on 135 MW. Akseliteho on 38 MW.(7)(15)



Kuva 8. NS Taimyr

3 VAATIMUKSET LAIVAKÄYTÖSSÄ

3.1 Reaktori

Alukselle sijoitetun reaktorin tulee selviytyä ankarista olosuhteista, joita meriympäristöltä voidaan odottaa. Nämä olosuhteet ja niiden aiheuttamat vaatimukset on annettu AES platform [2005] sisäisessä raportissa.(16:19)

Kaikkien laitteistojen tulee kestää:

- Jatkuva 15-asteinen kallistuma ja 5-asteinen trimmi
- 22,5-asteinen kallistuma-amplitudi puolelta toiselle ja 10-asteinen trimmi-amplitudi. Nämä kallistumat 0,6 g kiihtyvyydellä yli 90 metriä pitkissä aluksissa
- Konehuoneen lämpötila 0-45 °C
- 96 %:n ilmankosteus
- Ilman suolapitoisuus 1mg/ m³
- Öljykontaminaatio (rasvaiset kädet, öljysumu ja voiteluöljyt)
- Ulkolämpötilat -30 °C ... +50 °C
- Merivesijäähdytysjärjestelmän on pystyttävä toimimaan meriveden lämpötilan ollessa +32 °C ... -2 °C
- 110 dB:n melusaaste

3.2 Laiva

Aluksen suunnittelussa tulee ottaa huomioon ydinreaktorin asettamat erityispiirteet sen lisäksi, että alus vastaa muita annettuja lainsäädäntöjä. Tietyn toiminta-ajanjakson jälkeen ydinreaktori on joko vaihdettava tai ladattava uudella ydinpolttoaineella. Tästä johtuen reaktorin on oltava joko laivasta irrotettava tai helposti huollettavassa paikas-

sa. Reaktorin täytyy selviytyä karilleajosta tai törmäyksestä toisen laivan kanssa. Reaktorin tulee olla pelastettavissa ja pysyä ehyenä, jos laiva uppoaa tai tuhoutuu tulipalossa. (16:19)

3.3 Säteilysuojaus

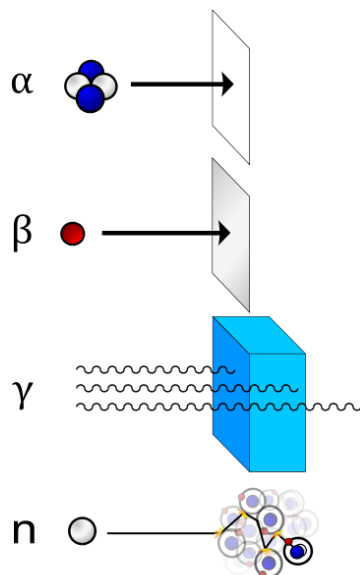
Säteilysuojaus voidaan toteuttaa monella tapaa. Esimerkiksi:

- Rajoittamalla säteilyaltistus aikaa
- Kasvattamalla etäisyyttä säteilylähteeseen. Saatu annos putoaa käänteisenä etäisyyden neliönä.
- Koteloimalla säteilylähde väliaineeseen.

Altistumisaikaa voidaan vähentää vähentämällä huollon ja tarkastusten tekemistä säteilyalueilla ja lisäämällä etävalvontaa ja etäkäyttöä.

Etäisyyttä säteilylähteeseen saadaan sijoittamalla reaktori mahdollisimman kauas työskentely- ja vapaa-ajan tiloista.

Reaktorin koteloinnissa on erityisesti pyrittävä rajoittamaan neutronisäteilyä ja gammasäteilyä. Kuten kuvasta 9 ilmenee, alfa- ja beetasäteily ovat hiukkassäteilyä eivätkä ne läpäise ainetta kovin tehokkaasti atomiydinten elektromagneettisten vastavoimien takia. Neutronit ovat neutraaleja ja näin ollen ne reagoivat ainoastaan törmäysten seurauksena. Gammasäteily on ionisoivaa sähkömagneettista säteilyä. Pienen aallonpituutensa vuoksi gammakvantin keskimääräinen vapaamatka väliaineessa on suuri, ja siksi se on hyvin läpitunkevaa. (16:19–20)



Kuva 9. Säteilyn läpäisevyys.

Gammasuojaus voidaan toteuttaa monella väliaineella. Väliaineiden tehokkuus vaihtelee. Tehokkuutta kuvaa gammasäteilyn puolittamiseen tarvittava syvyys. Esimerkiksi:

- 9 cm tiivistä maa-ainesta
- 6 cm betonia
- 1 cm lyijyä
- 0,2 cm köyhdytettyä uraania
- 150 m ilmaa

Gammasäteilyltä suojaus on riippuvainen väliaineen tiheydestä. Neutronisäteilyltä suojautumiseen ei päde sama logiikka. Neutronisäteilyn osuessa väliaineeseen vapautuu lisää gammasäteilyä, ja siksi neutronisäteilyltä tulee suojautua ensin. Suojautumiseen käytetään väliainetta, joka sisältää paljon vetyä, koska keveät alkuaineet absorboivat neutroneja parhaiten. Neutronisäteilyltä suojaudutaan yleensä suurella määrällä vettä, polyeteeniä, parafiinivahaa tai betonia. (16:20)(17)

3.4 Kansainvälinen lainsäädäntö

Ydinkäyttöisiä koealuksia ja jäänmurtajia varten luotiin kansainvälisiä sääntöjä ja suosituksia entisen IMCO:n (Inter-Governmental Maritime Consultative Organization) toimesta, tunnetaan nykyään IMO:na (International Maritime Organization). Säännöt ja suositukset on annettu SOLAS-sopimuksen (Safety of Life at Sea) kappaleessa VIII:Nuclear Ships, jota täydentää päätöslauselma Code of Safety for Nuclear Merchant Ships (resolution A.491(XII)). Nämä säännöt ja suositukset on luotu painevesi-reaktoreita käyttäviä aluksia varten.(16:21)

IMO määrittelee 4 eri tilannetta, joihin koodin laitosprosessiehdot pätevät.

- Normaalit operointitilanteet, kuten käynnistysvaiheen toiminta, tehoajo ja ohjailu.
- Harvoin tapahtuvat suunnittemattomat tilanteet tai erityisoperaatiot, kuten äkillinen muutos turbiiniprosessissa, säätösauvan nostovirhe ja väliaikainen sähkön menetys.
- Suunnittemattomat epätodennäköiset tilanteet, kuten radioaktiivisten aineiden karkaus primääripiiristä ja siitä johtuva sammuminen tai törmäystä seuraavaa vuoto reaktorin viereisissä vedenpitävissä laipioissa.
- Todella epätodennäköiset tilanteet, kuten jäähdytysaineen menetys, lämmönvaihtimien menetys, karilleajo, törmäys ja jopa kaatuminen ja uppoaminen.

Päätöslauselman alaluvut 2.7.5 ja 2.7.7 mainitsevat, että laivan tulee selviytyä esimerkiksi helikopterin kannelle putoamisesta tai lämpövoimakoneen räjähdyksestä aiheutuvasta paineaallosta ja siitä sinkoavista osista, eikä näitä tilanteita seuraavasta mahdollisesta tulipalosta tulisi aiheutua uhkaa säteilyturvallisuudelle. (16:21)

Päätöslauselman luvussa 3 on määrätty, että reaktoritila tulee eristää lastista ilma- ja vesitiiviillä kofferidameilla tai laipioilla, jotka ylettyvät tuplapohjasta laipiokansiin. Reaktoritilan tulee myös olla sijoitettu tai suojattu vahinkojen minimoimiseksi vaaratilanteissa. (16:21)

Kansainväliset luokituslaitokset eivät ole antaneet ydinaluksia koskevia säännöksiä.

3.5 Satamakäynnin määräykset

Vuoden 1979 toukokuussa IAEA (International Atomic Energy Agency) ja entinen IMCO muodostivat yhteisen komitean, joka laati satamaanpääsyvaatimukset kauppamerenkulun ydinaluksille. Päävaatimukset satamalta ovat seuraavanlaiset:

- Laituri paikan tulee tarjota palo- ja pelastuspalveluille helppo pääsy ydinaluksen viereen.
- Laituri paikalla tulee olla riittävä valaistus turvallisuuden valvontaa ja turvallisuutta varten
- Lähettyvillä tulee olla paloposteja, joista saadaan vettä palonsammutukseen tai muuhun hätätilanteeseen. Aluksen ja maakytkennän välinen liitoskappale on oltava saatavilla.
- Maasähköliitännän tulee olla saatavilla aluksen sähköjärjestelmiä varten.
- Sopivat viestintävälineet aluksen ja satamaviranomaisten välille.
- Terveystutkimuslaitteiden ja puhdistamispalvelujen tulisi olla saatavilla välittömästi satama-alueella.
- Jos nestemäisen tai kiinteän radioaktiivisen jätteen hävittäminen tai radioaktiivisten aineiden tankkaus vierailevalle alukselle on sallittua isäntävaltion puolesta, on siihen tarjottavat sopivat tilat satamassa.
- Laituri paikan taustasäteilyä tulee seurata ja kirjata aluksen lähdettyä laiturista. Nämä tiedot tulee arkistoida.
- Ennen lastinkäsittelyä ja sen jälkeen tulee radioaktiivisuus mitata ruumasta.

- Ydinaluksille tulee olla hätäankkurointipaikka, joka on riittävän kaukana asutuksesta ja yleisistä laivaväylistä. Hätätapauksessa tai radioaktiivisten aineiden vapauduttua alus tulisi hinata tähän alueella.
- Menettely- ja pelastussuunnitelmien olisi oltava valmiina, ennen kuin ydinvoima-alus saapuu satamaan.

Laivan henkilökunnalta vaaditaan seuraavaa:

- Päälystön jäsenen tulee olla jatkuvasti tavoitettavissa alukselta.
- Laivalla tulee olla riittävä miehitys, jotta kaikki hätätoiminnot voidaan toteuttaa onnettomuuden sattuessa.
- Laivalla tulee pitää palovahtia.
- Jos reaktorissa on polttoainetta, tulee sitä vahtia reaktorinhallintahuoneessa tähän pätevästi henkilö
- Säteilysuojauksesta vastaavien henkilöiden tulee olla laivalla jatkuvasti

(16:22–23)

4 TURVALLISUUS

4.1 Turvallisuus

4.1.1 Karilleajo

Karilleajo vahingoittaa ja muuttaa laivan rungon muotoa, mikä vahingoittaa myös reaktoria, jos se on kiinnitetty suoraan laivanrunkoon. Reaktori ja primääripiiri tulisi sijoittaa alustoille, jotka antavat periksi, ennen kuin reaktorirakenteen tai primääripiirin myötölujuus ylittyy, ja estävät näin vaurioiden syntymisen radioaktiivista ainetta sisältäville rakenteille.(16:49)

4.1.2 Yhteentörmäys

Yhteentörmäystilanne on reaktorille vaarallinen, jos osumapiste on reaktoriosaston kohdalla.

PNTL (Pacific Nuclear Transport Limited) -yhtiö on erikoistunut radioaktiivisen materiaalin kuljetuksiin. Yhtiön kolmessa aluksessa (kuva 10) on tuplapohjan lisäksi vahvistetut tuplakyljet. Ydinaluksessa tuplarakenteen tarvitsisi ympäröidä ainoastaan reaktoriosastoa ja muita mahdollisia radioaktiivisia tiloja. (16:49)



Kuva 10. PNTL:n Pacific Heron

4.1.3 Kaatuminen ja uppoaminen

Aluksen kaatuessa tai upotessa aluksen reaktoriosasto täytyy mitä todennäköisimmin täyttymään merivedestä. Reaktorin ja primääripiirin tulee kestää ulkoisen vedenpaineen aiheuttama rasitus sekä meriveden aiheuttamat korroosiovauriot, kunnes reaktori voidaan pelastaa hylystä.(16:49)

4.1.4 Tulipalo

Tulipalon sattuessa reaktoriosaston tulee kestää korkeita lämpötiloja ilman että siihen tulisi suurempia rakenteellisia muutoksia. Reaktoriosaston voisi myös pitää jatkuvasti inerttinä tai varustaa CO₂-sammuusjärjestelmällä.(16:49)

4.1.5 Terrorismi

Terrorismi voi vaihdella raketinheitiniskusta räjähteisiin tai henkilöstön ja aluksen kaappaamiseen. Tuplakyljet ja säteily suoja antavat hyvän suojan raketinheitinien onteloräjähteitä vastaan. Pääsy säteily suojan lähelle täytyy tehdä mahdollisimman aikaa vieväksi, jotta ulkopuolinen taho voisi estää mahdollisen sijoitetun räjähteen räjäyttämisen. Reaktorin turvarajojen ja laitteiden pitää olla toteutettu siten, että niihin kohdistuva sabotaasi aiheuttaa reaktorin alasajon ja estää kiinteiden polttoaineiden sulamisen. Aluksille voitaisiin myös sijoittaa aseistetut vartijat, kun operoidaan vaarallisilla alueilla.(16:50)

4.1.6 Hätäsulut

Kaikissa edellä mainituissa tapauksissa reaktori olisi hyvä ajaa alas ja estää radioaktiivisten aineiden leviäminen ympäristöön. Alasajon ja hätä sulujen tulisi olla mahdollisia toteuttaa manuaalisesti ja automaattisesti, kun tietyt turvakriteerit ylittyvät. Turvakriteerejä voisivat olla reaktorin ja reaktoriosaston lämpötila, aluksen kallistuma ja trimmi, paine reaktorissa, paine sekundääripiirissä, epänormaalit kiihtyvyysoimat ja säteilyarvojen muutos laivassa. Hätä sulkuventtiilien tulisi estää radioaktiivisten aineiden pääsy reaktoriosaston ulkopuolelle tai päästää radioaktiivinen aine alikriittisiin absorbointiastioihin reaktorityypistä riippuen. (16:50)

4.2 Reaktorin pelastus

Reaktori tulee pelastaa aluksen hylystä, koska pitkäaikainen altistus merivedelle ja kovalle ulkopuoliselle paineelle voi vahingoittaa reaktorin tiiveyttä. Pelastus voisi tapahtua irrottamalla reaktori laivasta sen ollessa pohjassa tai sijoittamalla pieniä räjähteitä kriittisiin hitsausaumoihin ja tekemällä reaktoriosastosta todella hyvin kelluvan ja laivan muusta rakenteesta irtoavan. (16:50)

5 POLTTOAINEET

5.1 Alkuaineet

5.1.1 Uraani

Uraani (Kuva 11) on luonnossa esiintyvistä alkuaineista raskain. Se on lievästi radioaktiivinen myrkyllinen raskasmetalli. Jaksollisessa järjestelmässä sen kemiallinen merkki on U ja järjestysluku 92. Uraanin sulamispiste on $1\,132\text{ °C}$ ja tiheys $19\,050\text{ kg/m}^3$. (18)



Kuva 11. Uraanin isotooppia 235

Uraanin kaikki isotoopit ovat radioaktiivisia. Luonnonuraani koostuu pääosin uraanin isotoopeista uraani-234, uraani-235 ja uraani-238. Uraani-234:ää luonnonuraanissa on $0,0057\%$, uraani-235:tä $0,72\%$ ja uraani-238:aa $99,72\%$. (19)

Uraani-235 on ainoa luonnossa esiintyvä fissiili aine, eli se kykenee ylläpitämään fissioiden ketjureaktiota. Uraani-235 on ainoa suoraan ydinpolttoaineeksi sopiva aine. Uraani-238:sta tuotetaan ydinpolttoainetta pommittamalla sitä neutroneilla. Absorboidessaan neutronin se muodostaa radioaktiivisen, fissiokelpoisen plutonium-239 isotoopin. Fissioituva on myös keinotekoinen isotooppi uraani-233, jota tuotetaan pommittamalla luonnossa esiintyvää toriumin isotooppia torium-232:ta neutroneilla. (18)

5.1.2 Plutonium

Plutonium (Kuva 12) on radioaktiivinen ja myrkyllinen raskasmetalli. Sen kemiallinen merkki on Pu, järjestysluku 94. Plutoniumin sulamispiste on 639,4 °C ja tiheys 19816 kg/m³. (20)



Kuva 12. Plutoniumia.

Plutoniumia esiintyy luonnossa hyvin pieninä määrinä uraaniesiintymissä. Plutoniumin isotooppia plutonium-238:aa käytetään energianlähteenä avaruusluotaimissa. Isotooppi plutonium-239 on fissiili aine, jota käytetään ydinpolttoaineena. (20)

5.1.3 Torium

Torium (Kuva 13) on alkuaine, jonka kemiallinen merkki on Th ja järjestysluku 90. Toriumia esiintyy luonnossa matalaradioaktiivisena metallina. Toriumin sulamispiste on $1\,750\text{ °C}$ ja tiheys $11\,700\text{ kg/m}^3$ (21)



Kuva 13. Torium

Toriumin isotoopin torium-232:n puoliintumisaika on yli 14 miljardia vuotta. Luonnossa esiintyvä torium on lähes kokonaisuudessaan torium-232:ta. Muita toriumin isotooppeja esiintyy radioaktiivisissa mineraaleissa vain pieninä määrinä, ja ne ovat syntyneet joko torium-232:sta tai uraanin isotoopeista uraani-235:stä ja uraani-235:stä. (22)

5.2 Kaivostyö

5.2.1 Uraani

Maailmanlaajuisesti uraanin tuotanto oli vuonna 2012 58 394 tonnia, josta 21 317 tonnia tuotettiin Kazakstanissa. Tällä hetkellä kaivostoiminta edellyttää vähintään 1000 ppm pitoisuutta uraania malmissa, jotta sen hyödyntäminen olisi kannattavaa. Tällaisia pitoisuuksia sisältävät suonimaiset uraaniesiintymät, pegmatiitit, inkonformiteettiesiintymät, alluviumkivettymät ja hiekkakivet. Näissä esiintymissä on maankuorressa arviolta 90 miljoonaa tonnia uraania.(23)(24)

Uraanimalmia tuotetaan kolmella eri menetelmällä. Uraanimalmia saadaan myös muiden metallien sivu- ja rinnakkaistuotteena. Uraanimalmista 45 % tuotetaan ISL-menetelmällä, 28 % maanalaisissa kaivoksissa, 20 % avolouhoksissa ja loput 7 % saadaan muiden metallien kaivauksien sivutuotteena. (19:23)

Uraanimalmin kaivostoiminnassa tulee käyttää pölysidontamenetelmiä ja kauko-ohjattavia kaivuskoneita, kun uraanimalmin pitoisuus louhittavassa kallioperässä on suuri. Uraaniesiintymiä voidaan kartoittaa ilmasta käsin säteilyarvoja seuraamalla.(23)

Avolouhosmenetelmää käytetään, kun uraanimalmiesiintymä on lähellä maanpintaa. Menetelmässä irtomaa poistetaan poraamalla ja räjäyttämällä malmiesiintymän päältä, minkä jälkeen uraanimalmi louhitaan louheautoihin.(19:25)(23)

Maanalaisista kaivosmenetelmää käytetään korkeapitoisen uraanimalmiesiintymän ollessa syvällä maanpinnan alla. Menetelmässä malmiesiintymää seurataan kalliossa poraamalla ja räjäyttämällä tunneli. Poraus tehdään pyörillä tai teloilla kulkevalla porauskalustolla, joka voi toimia myös osittain automatisoituna. Kaivosmenetelmästä tulee vähemmän hukkamateriaalia. Menetelmä altistaa työntekijät suurille määrille radonkaasua, jota syntyy uraanin hajoamisesta.(19:24)(23)

ISL-menetelmässä (In Situ Leaching) maata ei siirretä ollenkaan eikä kaivoksessa tarvita myöskään tunneleita. Maahan porataan pystysuuntaisia kaivoja, joista osaa käytetään mineraalin erottavan hapon tai karbonaatin pumppaamiseen maahan, osa taas saman liuoksen keräämiseen pois. Menetelmässä ei synny hukkamateriaalia. Menetelmä

on nopea ja kustannustehokas, mutta soveltuu ainoastaan hiekkakivittyypisiin uraanimalmiesiintymiin. Menetelmä ei sovi myöskään pohjavesialueille. (19:26)(23)

Uraania esiintyy myös merivedessä. Sen määrä kuutiometrissä vettä on noin 3,3 milligrammaa. Kaikkiaan merivedessä arvellaan olevan 4,5 miljardia tonnia uraania, mikä riittäisi nykyisille reaktoreille noin 6 500 vuoden ajaksi. Uraanin talteen ottamiseksi merivedestä tehtiin tutkimus- ja kehitystyötä 1960-luvulla varsinkin Japanissa. Japanilaiset kehittivät synteettiseen absorptioaineeseen, joka sitoo raskasmetalleja amidoksiimiryhmän avulla. Absorptioaine on kiinni muovikuiduissa, jotka on punottu matoksi. Matot sijoitetaan 200 metrin syvyyteen, jossa niiden annetaan sitoa raskasmetalleja itseensä. Yhdysvaltain energiaministeriön alaiset laboratoriot ovat pudottaneet uudella absorptioaineella uraanikilon eristyshinnan 1 230 dollarista 660 dollariin. (25)(26)

5.2.2 Plutonium

Vuosittain maailman ydinreaktoreissa syntyy 70 tonnia plutoniumia, kun polttoaineen sisältämä ei fissiilinen uraani-238 kaappaa neutronin ja muuttuu hajoamisketjun kautta plutoniumin fissiiliksi isotoopiksi plutonium-239:ksi. Ydinjätteen sisältämä plutonium koostuu plutoniumin isotoopeista plutonium-239:sta (53 %), plutonium-240:sta (25 %), plutonium-241:sta (15 %), plutonium-242:sta (5 %) ja plutonium-238 (2 %):sta. (27)

Plutoniumia on tuotettu maailmassa yhteensä 1 300 tonnia, josta noin 370 tonnia on erotettu ydinjätteestä. Noin 130 tonnia tästä erotetusta plutoniumista on käytetty MOX-polttoaineen valmistamiseen. MOX-polttoaine on uraanioksidin ja plutoniumoksidin sekoitus. Vuosittain MOX-polttoaineessa käytetään 8 -10 tonnia plutoniumia. Plutoniumia tulee markkinoille myös ydinaseriisunnan tuloksena noin 150–200 tonnia vuodessa. (27)

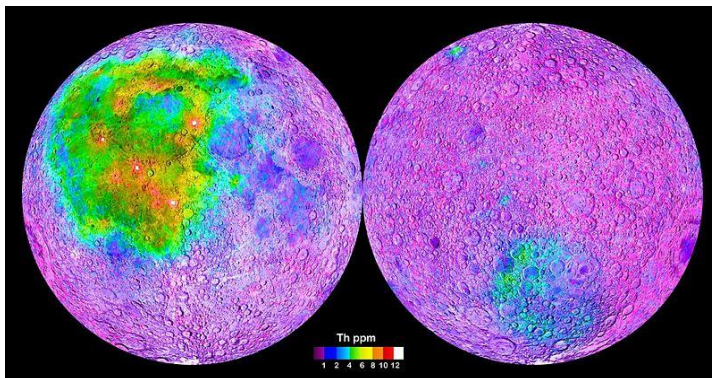
5.2.3 Torium

Toriumia esiintyy pienenä määränä useimmissa kivissä ja maa-aineksissa. Keskimääräinen maaperän toriumpitoisuus on 6 miljoonasosaa. Toriumia esiintyy useissa mineraaleissa kuten toriitissa (ThSiO_4), torianiitissa ($\text{ThO}_2 + \text{UO}_2$) ja monatsiitissa (Kuva 14). Monatsiitissa toriumoksidia saattaa olla jopa 12 %, mutta keskimääräinen pitoisuus on 6 - 7 %. Toriumia sisältäviä mineraaleja esiintyy jokaisella mantereella. Toriumia esiintyy maankuoressa monta kertaa enemmän kuin kaikkia uraanin isotooppeja yhteensä. Torium-232:n puolittumisaika on noin 14 miljardia vuotta. Muut toriumin isotoopit ovat hajoamisketjujen jäseniä, jotka puoliutuvat nopeasti. (22)



Kuva 14. Monatsiittia

Toriumesiintymät voidaan kartoittaa käyttämällä gammasädespektrometriaa. Samaa menetelmää on käytetty Kuun pinnan mineraalikonsentraatioiden tutkimiseen (Kuva 15). Myös Marsin toriumesiintymät on kartoitettu vuonna 2001 Mars Odyssey -luotaimen toimesta. (28)



Kuva 15. Kartoitetut toriumin esiintymät Kuussa.

5.3 Fissioreaktiot

Ydinvoiman toimintaperiaate perustuu ydinreaktorin reaktorisydämessä tapahtuvaan hallittuun fissioiden ketjureaktioon. Fissioreaktiossa vapautuu lämpöä, joka kuljetetaan reaktorisydäimestä jäähdyttimelle tai lämpövoimakoneelle. (29:26)

5.3.1 Uraani-233

Uraani-233 syntyy kun luonnossa esiintyvä torium-232 kaappaa neutronin ja muuttuu torium-233:ksi. Torium-232 beetahajoaa 21,83 minuutissa protaktinium-233:ksi, joka beetahajoaa 26,975 päivässä uraani-233:ksi. Uraani-233 on fissiiliä ainetta, jota voidaan käyttää reaktoreissa polttoaineena.(30)

Reaktorissa uraani-233 kaapattuaan neutronin fissioituu suuremmalla todennäköisyydellä kuin muut fissiilit materiaalit ja muussa tapauksessa muuttuu uraani-234:ksi. Fissio tuottaa fissiotuotteita, samalla vapautuu 2,49 neutronia ja 81,95 terajoulea energiaa yhtä kilogramma kohden.(30,31,32)

5.3.2 Uraani-235

Fissiileistä aineista luonnossa esiintyy merkittäviä määriä ainoastaan uraanin isotooppia uraani-235:stä. Reaktorityypistä riippuen uraani-235 voidaan joutua erottamaan neutroneja mahdollisesti kaappaavasta uraani-238:sta, jotta ydinreaktio reaktorissa saataisiin pysymään kriittisenä. Uraani-235:tä syntyy myös keinotekoisesti, kun uraani-234 kaappaa neutronin. (30)

Reaktorissa uraani-235 kaapattuaan neutronin 82 %:n mahdollisuudella fissioituu ja muussa tapauksessa muuttuu uraani-236:ksi. Fissiossa syntyy fissiotuotteita, vapautuu 2,87 neutronia ja 83,14 terajoulea energiaa yhtä kilogramma kohden. (30,31,32)

5.3.3 Plutonium-239

Plutonium-239:ää syntyy, kun luonnossa esiintyvä uraani-238 kaappaa neutronin ja muuttuu uraani-239:ksi. Uraani-239 beetahajoaa 23,45 minuutissa neptunium-239:ksi, joka beetahajoaa 2,356 päivässä plutonium-239:ksi. (30)

Reaktorissa plutonium-239 kaapattuaan neutronin 73 %:n mahdollisuudella fissioituu ja muussa tapauksessa muuttuu plutonium-240:ksi. Fissiossa syntyy fissiotuotteita, vapautuu 2,42 neutronia ja 83,61terajoulea energiaa yhtä kilogrammaa kohden.
(30,31,32)

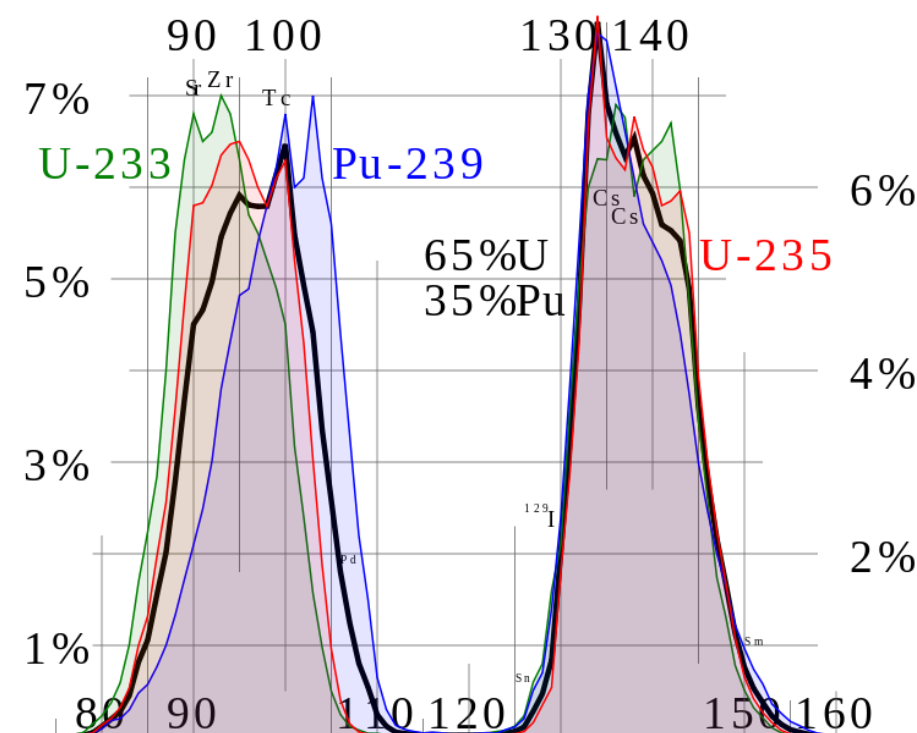
5.3.4 Plutonium-241

Plutonium-241:stä syntyy, kun plutonium-240 kaappaa neutronin. (30)

Reaktorissa plutonium-241 kaapattuaan neutronin 73 %:n mahdollisuudella fissioituu ja muussa tapauksessa muuttuu plutonium-242:ksi. Fissiossa syntyy fissiotuotteita, vapautuu 2,93 neutronia ja 83,14 terajoulea energiaa yhtä kilogrammaa kohden.
(30,31,32)

5.3.5 Fissionituotteet

Fissionituotteet syntyvät ydinpolttoaineiden fissionuessa. Vaikka fissionituotteet ovat jokainen elementti sinkistä lantanideihin, suurin osa fissionituotteista esiintyy kahdessa huipussa (Kuva 16). Yksi huippu saavutetaan noin strontiumin ja ruteniumin välillä, kun taas toinen huippu on noin telluurin ja neodyymien välillä. Fissionituotteiden saanto on jonkin verran riippuvainen emo-atomista ja fission aloittavan neutronin energiasta. Fissionituotteet ovat usein epävakaita, koska ne sisältävät suhteellisen paljon neutroneita järjestyslukuunsa nähden. Fissionituotteista 54,4478 % beetahajoaa alle vuodessa stabiileiksi, ei radioaktiivisiksi aineiksi. (29:148)(30:13–16)



Kuva 16. Termisen neutronin aiheuttaman fission fissionituotteiden saanto emo-atomia kohti. Alarivissä atomimassa ja pystyrivissä prosentuaalinen määrä.

Fissionista syntyvien fissionituotteiden yhteen laskettu atomimassa on aina pienempi kuin fissionoituvan atomin, koska fissionissa syntyy vapaita neutroneita ja vapautuu energiaa. Monet fissionituotteet beetahajoavat hyvin lyhyessä ajassa ja samalla vapauttavat anti-neutroneita, gamma- ja beetasäteilyä. Tästä johtuen fissionireaktiossa vapautuu epäsuorasti beetasäteilyä ja antineutroneita, vaikkei niitä itse fissionireaktiossa esiinny. (29:148)(30:13–16)

Fissionituotteiden on puoliintumisaika 90 vuotta tai vähemmän, lukuun ottamatta seitsemää pitkäikäistä fissionituotetta. Nämä seitsemän fissionituotetta ja niiden puoliintumisaikat ovat:

- Jodi-129, puoliintumisaika 15,7 miljoonaa vuotta
- Palladium-107, puoliintumisaika 6,5 miljoonaa vuotta
- Cesium-135, puoliintumisaika 2,3 miljoonaa vuotta
- Zirkonium-93, puoliintumisaika 1,53 miljoonaa vuotta
- Seleen-79, puoliintumisaika 327 000 vuotta
- Titaani-126, puoliintumisaika 230 000 vuotta
- Teknetium-99, puoliintumisaika 211 000 vuotta

(33:2808)

Fissionituotteiden kulkeutumisessa osaksi organismeja, nieleminen on tärkein reitti.

Liukenemattomat fissionituotteet eivät imeydy suolistoon ja aiheuttavat vain paikallista säteilyä, ennen kuin ne erittyvät organismista. Liukenevat tuotteet osoittavat kuitenkin monenasteista imeytymistä, mikä on esitetty taulukossa 1.(34:43)

Taulukko 1. Fissionituotteiden imeytyminen osaksi organismeja.(1:43)

Isotooppi	Säteilymuoto	Puoliutumisaika	Prosentuaalinen imeytyminen ruuansulatuksen kautta
Strontium-90 Yttrium-90	Beeta	28 vuotta	30 %
Cesium-137	Beeta, gamma	30 vuotta	100 %
Prometium-147	Beeta	2.6 vuotta	0.01 %
Cerium-144	Beeta, gamma	285 päivää	0.01 %
Rodium-106 Rutenium-106	Beeta, gamma	1 vuosi	0.03 %
Zirkonium-95	Beeta, gamma	65 päivää	0.01 %
Strontium-89	Beeta	51 päivää	30 %
Rutenium-103	Beeta, gamma	39.7 päivää	0.03 %
Niobium-95	Beeta, gamma	35 päivää	0.01 %
Cerium-141	Beeta, gamma	33 päivää	0.01 %
Barium-140 Lantaani-140	Beeta, gamma	12.8 päivää	5 %
Jodi-131	Beeta, gamma	8.05 päivää	100 %
Tritium	Beeta	13 vuotta	100 %, tritium imeytyy myös ihon kautta

5.4 Puhdistus ja väkevöinti

5.4.1 Uraani

Louhinnan jälkeen uraanimalmi hienonnetaan ja sekoitetaan happoliuokseen. Liuoksessa uraani sitoutuu suolaksi, joka puhdistetaan ionivaihtojärjestelmässä. Lopputuoksena uraani on U_3O_8 -muodossa, joka tunnetaan ”yellow cake”-nimisenä välituotteena. Rikastetta käsitellään lisää erinäisillä kemiallisilla puhdistus- ja konversiomenetelmillä, jolloin epäpuhtauksien määrä rikasteessa putoaa alle miljoonasosaan. Lopputuotteena saadaan uraaniheksafluoridia (UF_6) tai uraanioksidia (UO_2) menetelmästä riippuen. (29:80)

Luonnonuraani koostuu keskimäärin uraanin isotoopeista uraani-238:sta (99,72 %) ja uraani-235 (0,72 %). Reaktorissa käytettävän uraanin tulee sisältää reaktorityypistä riippuen 0,9 - 5 prosenttia isotooppia uraani-235:tä. Uraani-235:n määrän kasvattamiseksi uraani tulee isotooppirikastaa eli väkevöidä. (19)(29:80)

Väkevöintiin on olemassa monta eri menetelmää, mutta tässä työssä käydään niistä läpi vain kaksi yleisintä kaupallisessa käytössä olevaa menetelmää, jotka ovat kaasudifфуusio ja kaasusentrifugi. Molemmissa menetelmissä uraanioksidi muutetaan uraaniheksafluoridiksi. (29:80–81)

Kaasudifфуusiossa uraaniheksafluoridi pakotetaan kaasumuodossa puoliläpäisevien kalvojen läpi, tämä aiheuttaa pienen erotuksen uraani-235- ja uraani-238-isotooppien välille. Vuonna 2010 tällä menetelmällä valmistettiin 25 % väkevöidystä uraanista. Menetelmä on vanhentunut ja difфуusiolaitosten vanhentuessa ne korvataan uudempia menetelmiä käyttävillä laitoksilla. (29:80–82)(35)

Kaasusentrifugiprosessissa käytetään useita pyörivien sylinterien sarjoja ja rinnakkaisia muodostelmia. Jokaisen sylinterin pyörimisen aikaan saama voimakas keskipakovoima pakottaa raskaammat kaasumolekyylit, jotka ovat uraani-238:aa, siirtymään kohti sylinterin ulkoreunaa ja kevyemmät kaasumolekyylit siirtymään sylinterin keskusta, josta ne voidaan ottaa talteen. Menetelmä vaatii paljon vähemmän energiaa kuin difфуusiossa ja se on suurelta osin korvannut sen. Vuonna 2010 kaasusentrifugiprosessit tuottivat noin 65 % maailman uraanista. (29:80–82)(35)

Rikastamisen jälkeen uraaniheksfluoridi muunnetaan takaisin uraanioksidiksi ja pu-
ristetaan pelletiksi. Polttoainepelletit pinotaan zirkoniumsauvoihin, jotka hitsataan
umpinaisiksi ja kootaan nipuiksi. (29:80–82)(35)

5.4.2 Plutonium

Kevytvesireaktoreiden ydinjäte sisältää plutoniumia, joka on isotooppien 242, 240,
239 ja 238 sekoitusta. Uraani, plutonium ja fissiotuotteet erotellaan toisistaan kemial-
lisesti tributyylifosfaatin ja kerosiinin seoksella. Saatu uraani ja plutonium käytetään
uuden ydinpolttoaineen valmistuksessa. Plutoniumia ei tarvitse rikastaa polttoaine
käytössä. (36)

5.4.3 Torium

Toriumia on rikastettu pääasiassa monatsiitista. Monatsiitin krakkaukseen on olemas-
sa kaksi eri menetelmää. (37)

Vanhemmassa menetelmässä monatsiitti lisätään 120 – 150-asteiseen (°C) väkevään
98-prosenttiseen rikkihappoliuokseen, minkä jälkeen seosta pidetään tässä lämmössä
useita tunteja. Käsittelystä jäljelle jäävä muta altistetaan kylmälle vedelle. Tässä vai-
heessa monatsiitin sisältämät lantanoidit jäävät sulfidiin sitoutuneena mutana jäljelle
ja torium pysyy liuoksessa. Menetelmän haittana on huomattava happojätteen määrä.
(37)

Uudemmassa menetelmässä monatsiitti lisätään 73-prosenttiseen natriumhydroksidi-
liuokseen, jonka lämpötila on noin 140 °C. Liuoksesta jäljelle jäävään mutaan lisätään
kylmää vettä jolloin siitä erottuvat liuoksen muodossa hydroksidi, vetyfosfaatti, fos-
faatti ja ortosilikaatti. Jäljelle jäävä muta sekoitetaan suolahappoon ja liuoksen hap-
pamuus eli pH lasketaan 3:n ja 4:n välille. Jäljelle jäävä muta sisältää toriumoksidia,
titaanioksidia ja zirkoniumsilikaattia. (37)

5.5 Polttoaineet

5.5.1 Oksidit

5.5.1.1 UOX

Uraanidioksidi on musta puolijohtava ja kiinteä aine. Uraanioksidin etuna ovat korkea lämmönkestävyys (sulamispiste 2800 °C) ja hyvä korroosion- ja säteilynkestävyys. Uraanidioksidin lämmönjohtavuus on hyvin alhainen verrattuna että zirkoniummetalliin, ja se menee vielä huonommaksi kuin lämpötila nousee. (38:113)(39)

5.5.1.2 MOX

MOX nimitys tulee englanninkielen sanoista Mixed OXides eli sekoitetut oksidit. MOX on plutoniumin ja uraanin seos. MOX käyttäytyy hyvin samanlaisesti kuin uraanidioksidipelletit, koska MOX koostuu pääasiallisesti uraanidioksidista. (38:114)(39)

5.5.2 Keraamit

5.5.2.1 Uraanikarbidi

Uraanikarbidin etuna on hyvä lämmönkestävyys (sulamispiste 2400 °C), hyvä säteilynkestävyys ja oksideihin verrattuna hyvä lämmönjohtavuus. Huono korroosionkestävyys vedessä on ainoa haitta uraanikarbidissa. (38:114)

5.5.2.2 Uraaninitridi

Uraanimononitridi on potentiaalinen polttoaine neljännen sukupolven ydinvoimaloihin. Sitä on myös ehdotettu käytettäväksi nopeiden neutronien testireaktoreissa. (38:112)

5.5.3 Metallit

Metallipolttoaineiden etuna on erittäin hyvä lämmönjohtavuus verrattuna oksideihin ja haittana huono lämmön- ja korroosionkestävyys. Yleensä metallipolttoaineet ovat seosmetalleja, mutta niitä on tehty myös puhtaasta uraanista. Seosaineina uraanin kanssa käytetään alumiinia, zirkoniumia, piitä, molybdeenia ja zirkoniumhydridiä. Kaikkiin seoksiin voidaan myös lisätä plutoniumia ja muita aktinideja. (38:113)

5.5.3.1 TRIGA

Polttoaineen nimi TRIGA tulee sitä käyttävistä TRIGA (Training, Research, Isotopes, General Atomics) koereaktoreista. TRIGA-reaktori käyttää uraani-zirkonium- hydridi- (UZrH) polttoainetta, jonka lämpökerroin on negatiivinen, mikä tarkoittaa sitä että reaktorin lämpiötilan noustessa polttoaineen reaktiivisuus laskee. Kaikkiaan on toiminnassa 70 TRIGA-reaktoria, joista 35 on Yhdysvaltojen mantereella.(40)

5.5.4 Nesteet

Nestemäiset polttoaineet ovat nesteitä, joihin on liuotettu ydinpolttoainetta. Tämän tyyppisillä polttoaineilla on osoitettu olevan lukuisia toiminnallisia etuja verrattuna perinteisiin kiinteisiin polttoaineisiin.

Nestemäisen polttoaineen reaktorit tarjoavat merkittäviä turvallisuusetuja, koska niissä on itsesäätyvä reaktoridynamiikka. Polttoaineneesten kuumetessa sen neutronien hidastuskyky heikkenee ja kriittisyys vähenee. (41)

Toinen merkittävä etu on mahdollisuus tyhjentää reaktori nopeasti passiivisiin varastotankkeihin. Tämä etu todistettiin toistuvasti osana 4 vuotta kestäneen ORNL MRSE (Oak Ridge National Laboratory Molten-Salt Reactor Experiment) -ohjelman viikoittaista alasajoa (41)

Kaikista suurin etu on nestemäisen ytimen mahdollisuus vapauttaa syntyvä ksenonkaasu, joka toimii neutronin absorboijana ja aiheuttaa kiinteissä polttoaineissa rakennemuutoksia. Nämä rakennemuutokset aiheuttavat sen, että polttoaine-elementit joudutaan vaihtamaan, vaikka niiden sisältämästä polttoaineesta ei olisi käytetty kaikkea.(41)

5.5.4.1 Sulasuolat

Sulasuolapolttoaineissa ydinpolttoaine on sidottu suolaan. Suola pidetään sulassa muodossa joko lämmittämällä reaktorihuonetta tai putkistoa. Sulasuolapolttoainetta käytettiin LTFR (Liquid Fluoride Thorium Reactor) -reaktorissa, josta käytetään myös nimitystä MSRE-reaktori (Molten Salt Reactor Experiment). Tämän reaktorin käyttämä sulasuolapolttoaine koostui vuonna 1964 litiumfluoridista 63 mol %, berylliumdifluoridista 36,6 mol % ja uraanitetrafluoridista 0,4 mol %. (41)(42:4)

5.6 Ydinjätehuolto

Ydinjätteellä tarkoitetaan uusiokäyttöön sopimatonta radioaktiivista materiaalia, esinettä tai rakennetta. Ydinjätettä syntyy ydinasetuotannosta, kaivostoiminnasta, teollisuudesta, terveydenhuollosta, tutkimustoiminnasta ja ydinvoimaloista. Ydinjätettä ei voida hävittää tavallisen jätteen tapaan, vaan se täytyy eristää ympäristöstä. Ydinjätteen radioaktiivisuus vähenee radioaktiivisen hajoamisen kautta. (29:270)

Ydinjätteen radionuklidit voidaan jakaa kolmeen: aktivoitumistuotteet, fissiotuotteet ja luonnon radioaktiiviset aineet. Aktivoitumistuotteet ovat keinotekoisia radionuklideja, jotka ovat syntyneet hiukkassäteilystä. Aktivoitumistuotteita ovat esim. käytöstä poistetut säteilylähteet. Fissiotuotteet syntyvät fissioketjureaktiosta, kun fissiili polttoaine hajoaa. Luonnon radioaktiiviset aineet ovat kaivostoiminnasta ja raaka-aineiden jalostuksesta syntyviä radioaktiivisia aineita, jotka ovat uraanin ja toriumin hajoamissarjoihin kuuluvia radionuklideja. (29:270)

Ydinjätteestä merkittävä osa tulee ydinvoimaloista. Niiden käytetystä polttoaineesta 97 % voidaan palauttaa polttoainekiertoon jälleenkäsittelyn jälkeen MOX-polttoaineena.(43)

Käsiteltävät ja valvotusti varastoidut ydinjätteet luokitellaan niiden radioaktiivisuuden perusteella korkea-aktiiviseen lämpöä kehittävään jätteeseen, pitkäikäisiin keski- ja matala-aktiivisiin jätteisiin, lyhytikäisiin keski- ja matala-aktiivisiin jätteisiin ja kolmeita luonnon radioaktiivisuuspitoisuuksia sisältävään jätteeseen. (29:276–277)

5.6.1 Keski- ja matala-aktiivisen jätteen käsittely

Keski- ja matala-aktiivisiin jätteisiin kuuluvat muun muassa heikosti radioaktiiviset aineet tai aktiivisten aineiden tahrimat työvaatteet, suojavarusteet, työvälineet, laitteet, osat sekä suodattimet ja suodatusjätteet. Näitä on määrällisesti suurin osa ydinjättees- tä, mutta niiden sisältämä radioaktiivisten aineiden määrä on vähäinen, ja siten ne ei- vät ole suuri uhka turvallisuudelle (43)

Keski- ja matala-aktiivisen jätteen käsittely jaetaan kolmeen vaiheeseen esikäsittely, tilavuuden pienennys ja loppukäsittely. Esikäsittelyssä jätteet lajitellaan niiden radio- aktiivisuuden mukaan. Tilavuuden pienennyksessä jäte poltetaan, haihdutetaan tai pu- ristetaan kasaan aineen olomuodosta ja radioaktiivisuudesta riippuen. Loppukäsittelys- sä jäte pakataan säiliöihin ja nestemäinen tai hienojakoinen jäte kiinteitetään esim. be- toniin tai bitumiin. Ennen loppusijoitusta jätepakkaukset lajitellaan radiologisten ja muiden tärkeiden ominaisuuksien mukaan. (29:279–281)

5.6.2 Korkea-aktiivisen jätteen käsittely

Korkea-aktiivinen ydinjäte on pääasiassa käytettyä ydinpolttoainetta. Sen määrä on selvästi pienempi kuin matala- ja keskiaktiivisen jätteen, mutta se sisältää pääosan ydinvoimalan tuottamasta kaikesta radioaktiivisuudesta (95 %).(43)

Ydinpolttoaine voidaan jälleenkäsitellä, jolloin vain noin 3 % polttoainesta on loppu- sijoitettava. Jälleenkäsittely ei ole taloudellisesti kannattavaa maalle, jolla ei ole omaa jälleenkäsittelylaitosta; tällöin koko käytetty ydinpolttoaine loppusijoitetaan. (29:285– 290)(43)

Loppusijoitus tapahtuu pakkaamalla korkea-aktiivinen jäte korrosiota ja iskuja kestä- vään kapseliin. Kapselit sijoitetaan kallioperään kaivettaviin luolastoihin tai maan päällä sijaitseviin bunkkereihin. Loppusijoituspaikaksi on ehdotettu myös avaruutta ja merisedimentteihin hautaamista, mutta nämä menetelmät ovat jääneet esitysasteelle. Tiettyjen korkea-aktiivisten jätteiden hävittämistä transmutaatiotekniikan avulla tutki- taan parhaillaan. (29:285–290)(43)

5.6.3 Aluksen tuottaman radioaktiivisen jätteen käsittely

Aluksien tuottaman ydinjätteen radioaktiivisuus riippuu aluksessa käytettävästä reaktorista. Aluksen ydinjäte ei eroa ydinvoimaloiden ydinjätteestä. Polttoaineen rikkausasteen ollessa suurempi kierrätettävän ydinmateriaalin määrä käytetyssä polttoaineessa on pienempi ja fissiotuotteiden määrä suurempi, mikä tulee huomioida polttoaineen jälleenkäsittelyssä. Aluksien tuottama ydinjäte voitaisiin siirtää jo käytössä oleviin ja tuleviin jätteenkäsittelykiertoihin käsittelykuluja vastaan.

6 REAKTORIT

Merireaktorit eroavat maalla käytettävistä reaktoreista monella tavalla. Maakäytössä olevat reaktorit tuottavat tuhansia megawatteja tehoa, kun taas laivakäyttöiset tuottavat korkeintaan muutaman sadan megawatin verran tehoa. Tilaseikat edellyttävät, että merireaktorin on oltava fyysisesti pieni, joten sen on tuotettava enemmän tehoa tilayksikköä kohti kuin maareaktorin. Tämä tarkoittaa sitä, että merireaktorien komponentit altistuvat suuremmille kuormille verrattuna maalla käytettäviin reaktoreihin. Reaktorin mekaanisten systemien tulee toimia moitteettomasti vaihtelevissa meriolosuhteissa, tärinässä ja heiluvassa laivassa. Merireaktorin sammutusmekanismi ei voi perustua painovoiman vaikutuksesta laskeutuviin säätösauvoihin. Suolaveden korroosio aiheuttaa myös huollollisia hankaluuksiaan merireaktoreille. (7)

6.1 Tähänastiset merireaktorit

Merireaktorit ovat tähän asti olleet painevesireaktoreita, lukuun ottamatta muutamaa poikkeusta. Venäläisten Alfa-luokan sukellusveneissä käytettiin nestemäisellä metallilla jäähdytettyjä LMR-reaktoreita. Näissä LMR-reaktoreissa oli ongelmia pitää metalli nesteenä, kun reaktori sammutettiin. Amerikkalaisten USS Seawolf ydinsukellusveneessä, joka rakennettiin USS Nautiluksen jälkeen, käytettiin natriumjäähdytteistä reaktoria. Reaktorin haittana oli jäähdytysaineen lämmön ylläpito ja jäähdytysaineen korkea radioaktiivisuus. (7)

Suurin osa merikäytössä olevista painevesireaktoreista käyttää polttoaineenaan korkeasti rikastettua uraania. Amerikkalaisissa sukellusveneissä käytetään 93-prosenttista

U-235:tä sisältävää polttoainetta, muissa länsimaalaisissa aluksissa 20–25-prosenttista, venäläisten ensimmäisen ja toisen sukupolvenreaktoreissa käytettiin 20-prosenttista vuoteen 1981 asti, kolmannen sukupolven reaktoreissa väkevyys vaihtelee 21-prosentin ja 45-prosentin välillä. Polttoaineet eivät ole näissä reaktoreissa uraanioksidia vaan uraani-zirkoniumia, uraani-alumiiniseosta tai keraamia. Korkeasta rikastusasteesta johtuen reaktorien uudelleenlatausväli on ollut yli 10 vuotta ja uudet reaktorit on suunniteltu kestäväksi 50 vuotta ilman uudelleenlatausta lentotukialuksissa ja 30–40 vuotta sukellusveneissä. (7)

Ranskan laivasto on alkanut käyttää reaktoreissaan 7,5-prosenttista U-235:tä sisältävää polttoainetta, joka vaihdetaan 10 vuoden välein. Merireaktoreiden hyötysuhde on huonompi verrattaessa maakäytössä oleviin, mikä johtuu merireaktoreilta vaadittavasta tehonkäytön joustavuudesta ja tilanpuutteen aiheuttamista rajoitteista höyryjärjestelmissä. (7)

6.2 Reaktortyytit

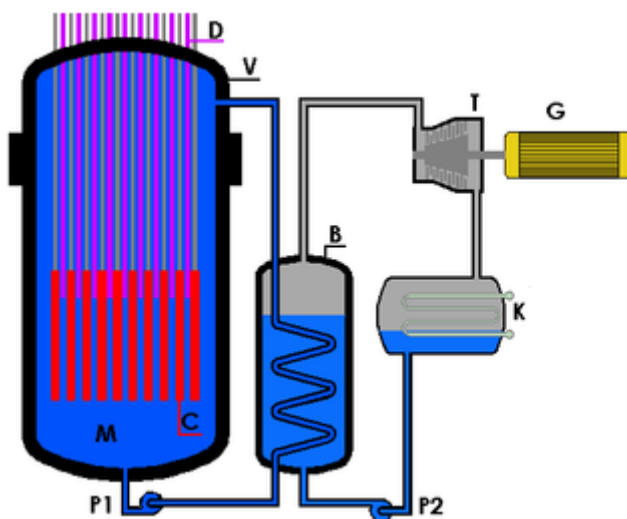
Ydinreaktoreita voidaan jaotella monella eri tavalla. Yksi tapa on jakaa käyttötarkoituksen mukaan tutkimusreaktoreihin, lääketieteellisiin reaktoreihin, isotooppien tuotantoreaktoreihin, voimalaitosreaktoreihin, merireaktoreihin, avaruusreaktoreihin jne. Toinen tapa jakaa on neutronien nopeuden mukaan hitaisiin ja nopeisiin reaktoreihin. Suurimmassa osassa reaktoreita fissioissa syntyviä neutroneita täytyy jarruttaa hidastinaineella, etteivät liian monet karkaa reaktorista synnyttämättä uusia fissioita. Nopeissa reaktoreissa hidastamista ei tehdä, vaan reaktion jatkuminen varmistetaan muuten, esimerkiksi käyttämällä väkevämpää polttoainetta. Kolmas tapa jaotella reaktoreita onkin hidastinaineen mukaan lähinnä kevytvesireaktoreihin, raskasvesireaktoreihin ja grafiittihidasteisiin reaktoreihin. Neljäs tapa jaotella reaktoreita on jäähdytyksen mukaan muun muassa kaasujäähdytteisiin ja kiehutus- ja painevesireaktoreihin. Suurin osa maailman voimalaitosreaktoreita on kevytvesireaktoreita, joko painevesi- tai kiehutusvesityyppejä. Tässä työssä reaktorit on jaoteltu jäähdytysaineen mukaan. (38)

6.2.1 Vesijäähdytteiset reaktorit

Vesijäähdytteisissä reaktoreissa jäähdytinaineena toimii vesi, joka on joko kevyttä vettä tai raskasta vettä. Raskas vesi on raskaan vedyn (deuterium) ja hapen yhdiste eli di-deuteriumoksidi (D_2O). Siinä tavallisen vesimolekyylin molemmat vetyatomit ovat isotooppia $2H$, jolla on myös nimi deuterium. (38)

6.2.1.1 Painevesireaktori

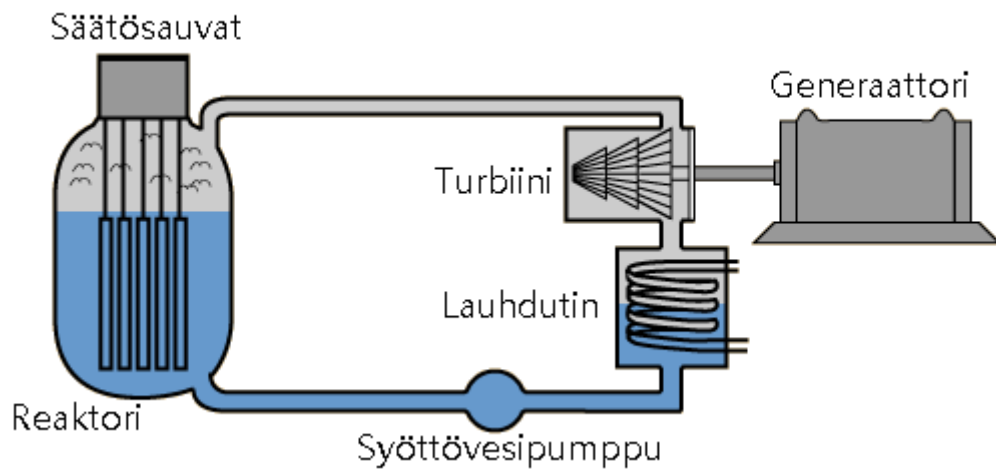
Painevesireaktorit (Kuva 17) käyttävät kahta erillistä vesipiiriä. Ensio- eli primääripiirissä (P1) kiertävä vesi jäähdyttää reaktoria (M), josta kuumentunut jäähdytysvesi johdetaan höyrystimeen (B). Höyrystimessä ensiopiirin kuuma vesi höyrystää sekundääripiirin (P2) vettä. Höyrystimen jälkeen jäähtynyt ensiopiirin vesi palaa takaisin reaktoriin uudelleen kuumennettavaksi ja sekundääripiirin puolella syntynyt höyry johdetaan turbiiniin (T), joka pyörittää generaattoria (G). Turbiinilta tuleva höyry johdetaan lauhduttimeen (K), missä se lauhtuu vedeksi. Painevesireaktoria säädetään säätösauvakoneiston (D) avulla. Säätösauvojen lisääminen reaktoriin hillitsee reaktiota (C) ja niiden poistaminen kiihdyttää sitä. (44:237–238)



Kuva 17. Painevesireaktorin periaatekuva

6.2.1.2 Kiehutusvesireaktori

Kiehutusvesireaktori (Kuva 18) eroaa painevesireaktorista siinä, että jäähdytysvesi höyrystyy itse reaktorissa, josta se johdetaan kuivatuslevyjen kautta suoraan turbiinille. Koska reaktorin ympärillä oleva vesi on aina saastunut radionuklideista, on turbiini eristettävä huollon aikana säteilysojalla. Nämä kustannukset yleensä kompensoituvat yksinkertaisemman rakenteen eduilla. Suurin osa radioaktiivisuudesta vedessä on erittäin lyhytaikaista, pääasiassa typen isotooppia typpi-16:ta, jolla on 7 sekunnin puoliintumisaika, joten turbiinihalliin voidaan mennä pian reaktorin sammuttamisen jälkeen.(44:238)

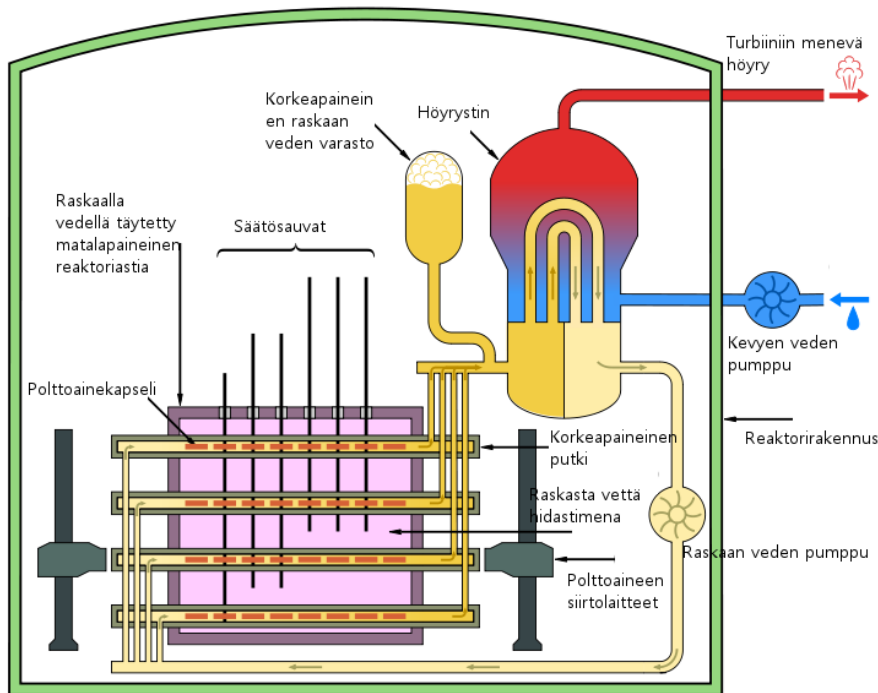


Kuva 18. Kiehutusvesireaktorin periaatekuva.

6.2.1.3 Raskasvesireaktori

Raskasvesireaktori (Kuva 19) on rakenteeltaan hyvin samankaltainen kuin painevesireaktori. Raskasvesireaktorissa primääripiirissä kiertää raskasvesi. Raskasvesi on huomattavasti kalliimpaa kuin kevytvesi, mutta raskasvedellä saavutetaan parempi neutronitalous, mikä mahdollistaa rikastamattoman luonnonuraanin käytön polttoaineena. (44:238)

Eräs raskasvesireaktorityyppi on nimeltään CANDU (CANadian Deuterium Uranium Reactor), jota kuva 20 esittää. CANDU-reaktorin polttoaine voidaan vaihtaa käytön aikana. (44:238)



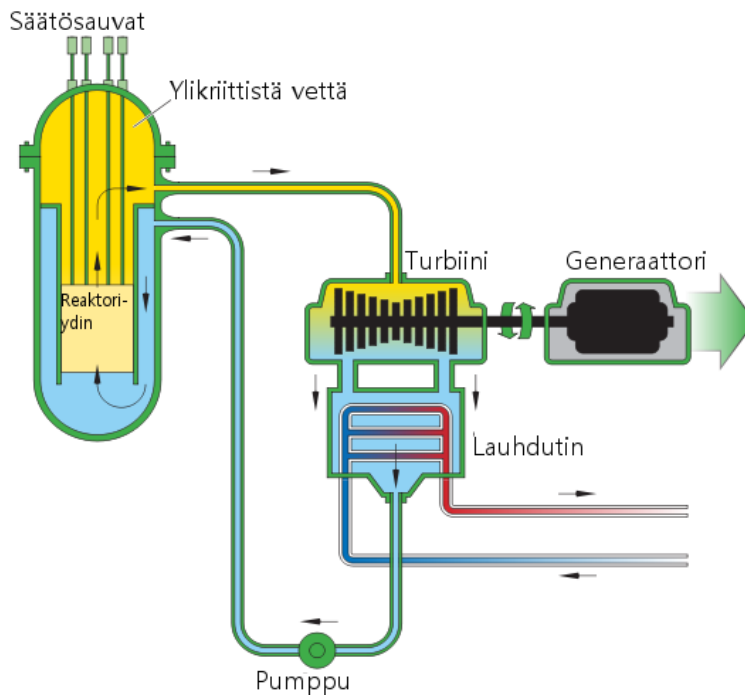
Kuva 19. CANDU reaktorin periaatekuva.

6.2.1.4 Grafiittihidasteinen kanavatyypinen reaktori

Grafiittihidasteinen kanavatyypinen reaktori eli RBMK (ven. Реактор Большой Мощности Канальный, Reaktor Bolšoi Moštšnosti Kanalnyi) on vesijäähdytteinen ja grafiittihidasteinen ydinreaktori. Reaktorityyppi tunnetaan laajimmin Tšernobylin ydinvoimalan onnettomuusreaktorina. Reaktorin polttoainetta voidaan vaihtaa käytön aikana kuten CANDU-reaktorissa. Reaktorin hidastinaine grafiitti eli alkuaine hiili voi vakavassa onnettomuudessa syttyä palamaan, mikä mahdollisti yhdessä muiden suunnitteluvikojen kanssa Tšernobylin onnettomuuden massiivisen päästön. Reaktori on suunnittelultaan riskialtis eikä siksi sovellu merireaktoriksi. (30:93–94)

6.2.1.5 Ylikriittisellä vedellä jäähdytetty reaktori

Ylikriittisellä vedellä jäähdytetty reaktori tunnetaan myös SCWR-reaktorina (Supercritical-Water-Cooled Reactor) (Kuva 20). Tyypiltään SCWR-reaktori on kevytvesireaktori. Nykyisistä painevesireaktoreista ja kiehumusvesireaktoreista SCWR-reaktori poikkeaa siinä, että reaktoriastiassa paine on veden kriittistä painetta suurempi, jolloin kiehumista ei tapahdu. Jäähdytvesi voidaan lämmittää huomattavasti korkeampaan lämpötilaan kuin nykyisissä ydinreaktoreissa, mikä nostaa reaktorin hyötysuhdetta merkittävästi. Reaktorista ulosvirtaavan veden lämpötila on n. 510...550 °C:n luokkaa. Ylikriittisestä paineesta huolimatta reaktorista ulostuleva kuuma vesi on kaasumaista, jolloin se voidaan viedä suoraan turbiinilaitokselle, joka toimii aivan samoin kuin tavanomaisissa kiehumusvesireaktoreissakin. (45)



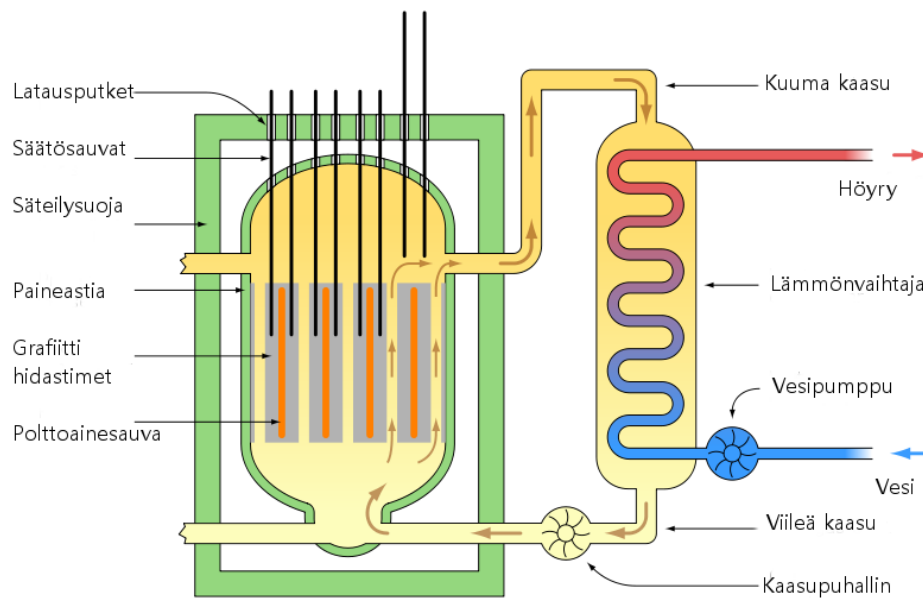
Kuva 20. Ylikriittisellä vedellä jäähdytetyn reaktorin periaatekuva.

6.2.2 Kaasujäähdytteiset reaktorit

Kaasujäähdytteinen reaktori on ydinreaktori, jota jäähdytetään kaasulla ja jossa hidastinaineena on yleensä grafiitti. Kaasujäähdytteiset reaktorit ovat yleisimpiä Britanniassa. (44:236–237)

6.2.2.1 Kaasujäähdytteinen luonnonuraanireaktori

Britannian vanhimmat ydinvoimalareaktorit ovat Magnox-tyyppiä (Kuva 21). Tyypin nimi tulee luonnonuraanipolttoaineen magnesiumlejeerinkikuoresta. Hidastinaineena on grafiitti eli hiili ja jäähdytinaineena korkeapaineinen hiilidioksidi. Polttoainetta vaihdetaan jatkuvasti latausputkia pitkin. Kaasulla höyrystetään vettä, joka johdetaan turbiiniin ja lauhduttimeen. (44:236)



Kuva 21. Magnox-tyypisen kaasujäähdytteisen reaktorin periaatekuva

6.2.2.2 AGR-reaktori

Magnoxin pohjalta on kehitetty edistyneempi AGR-reaktori (Advanced Gas-Cooled Reactor). Polttoaineena on noin 2-3 %:iin väkevöity uraani, jonka suojakuorena on ruostumaton teräs. Korkeampi lämpötila antaa reaktorille paremman lämpöhyötysuhteen. Reaktorin toimintaperiaate on sama kuin Magnox-tyypin reaktoreissa, mutta rakenteeltaan ne eroavat siinä että lämmönvaihtajat on sijoitettu säteilysuojana ja paineastiana toimivan reaktorin teräsbetonirakenteen sisään. (44:237)

6.2.2.3 Kuulareaktori ja prismaattinen-lohko reaktori

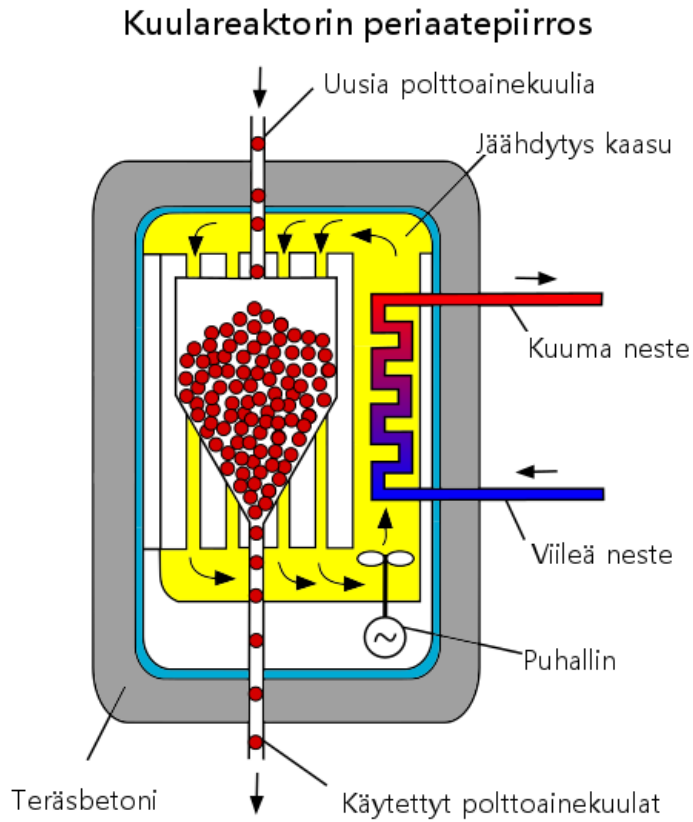
Kuulareaktori tunnetaan maailmalla PBR-reaktorina (Pebble-Bed Reactor). Reaktorin rakenne eroaa muista kaasujäähdytteisistä reaktoreista polttoaineelementtiensä puolesta. Reaktorin polttoaine on tennispallon kokoisissa polttoainekuulissa. Kuulat (Kuva 22) koostuvat pyrolyyttisestä grafiitista, joka toimii hidastinaineena, ja TIRSO-polttoainepartikkeleista. TIRSO-polttoainepartikkelit koostuvat fissioistuvasta materiaalista ja sitä ympäröivästä silikonikarbidikuoresta, jonka tehtävä on pitää fissiotuotteet sisällään. (46:334–337)



Kuva 22. Polttoainekuula

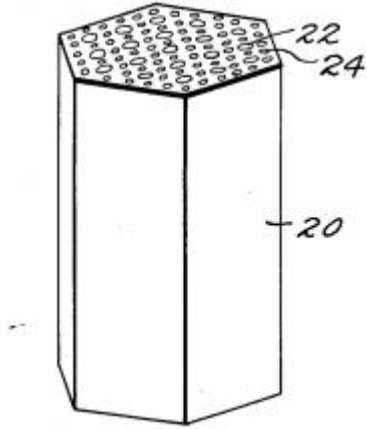
Kuulareaktorissa (Kuva 23) näitä polttoainekuulia on tuhansia reaktoriytimessä. Jäähdytys toteutetaan polttoaineeseen reagoimattomalla kaasulla, kuten heliumilla, tyrellä

tai hiilidioksidilla. Reaktorin väitetään olevan passiivisesti turvallinen, ja siksi aktiivisia turvajärjestelmiä ei tarvittaisi. (46:334–337)



Kuva 23. Kuulareaktorin periaatekuva

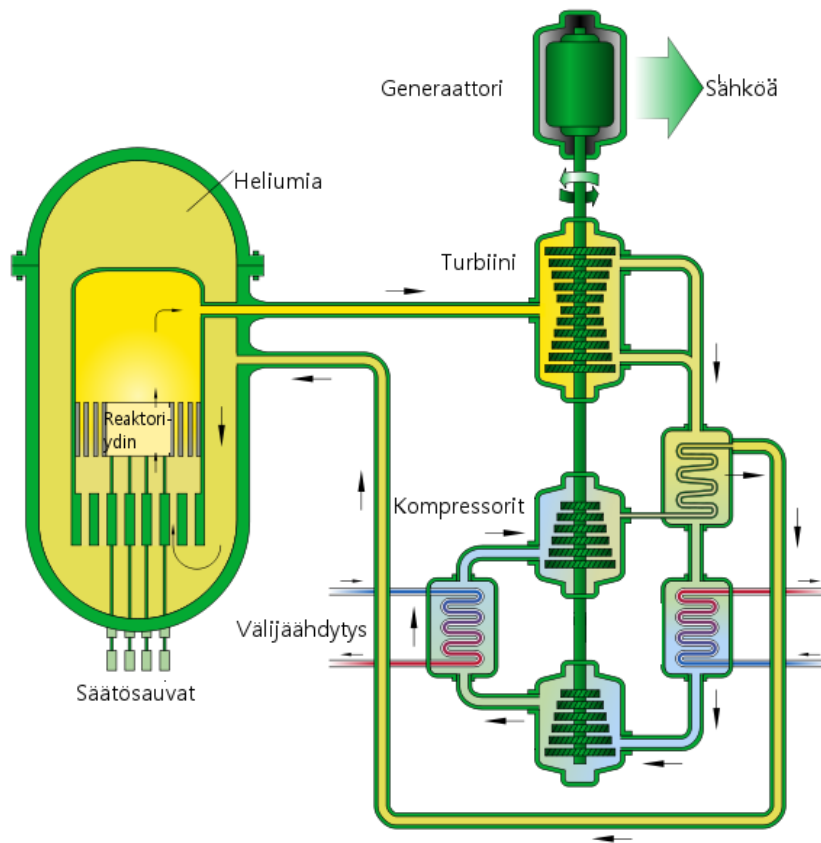
Prismaattinen-lohko reaktori eli PBR-reaktori (Prismatic-Block Reactor) on toimintaperiaatteeltaan samanlainen kuin kuulareaktori, mutta eroaa siitä polttoaine-elementtien rakenteella. Jauhettu TIRSO-polttoaine on tiiviissä prismaattisissa lohkoissa (Kuva 24), mikä tekee reaktorista rakenteeltaan tiiviimmän. (47)



Kuva 24. Prismaattinen polttoaine-elementtilohko

6.2.2.4 Kaasujäähdytteinen nopeareaktori

Kaasujäähdytteinen nopeareaktori tunnetaan GFR-reaktorina (Gas-Cooled Fast Reactor). GFR-reaktori on kehitteillä oleva nopeita neutroneita käyttävä reaktorityyppi. Referenssireaktorissa (Kuva 25) jäähdytysaineena toimii helium, joka poistuu reaktorista 850 °C lämpöisenä. Reaktorissa ei ole hidastinainetta, mikä tarkoittaa sitä, että reaktorilla voidaan sen käytön aikana valmistaa fissioistuvaa polttoainetta toriumista ja luonnonuraanista. Reaktori on siis hyötyreaktori. Hyötyreaktorit tuottavat uutta fissiiliä ydinpolttoainetta enemmän kuin ketjureaktion ylläpitämiseen kuluu. (38:67)(48)



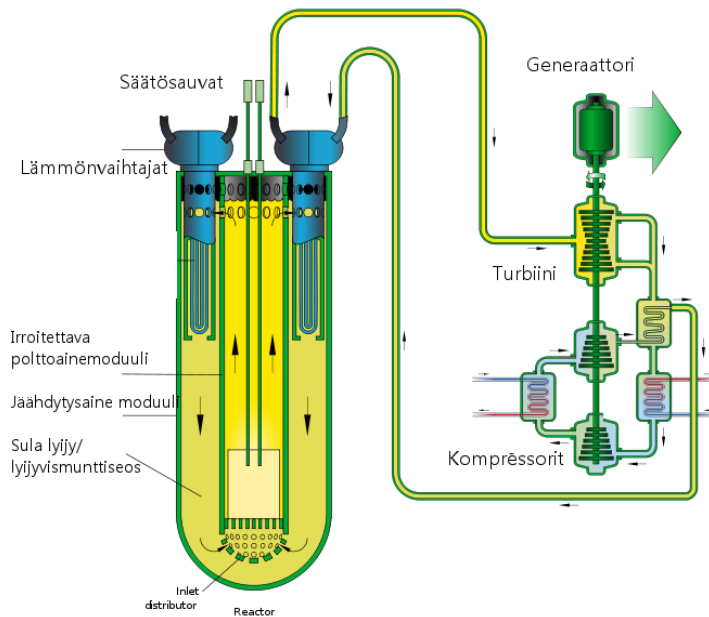
Kuva 25. Kaasujäähdytteisen nopeareaktorin periaatekuva.

6.2.3 Nestemäisellä metallilla jäähdytetyt reaktorit

Ensimmäiset nestemäisellä metallilla jäähdytetyt reaktorit on suunniteltu sukellusvenekäyttöön. Jäähdytysaineena toimii metalli, jonka sulamispiste on alhainen ja lämmönsiirtokyky hyvä. Jäähdytysaineina on käytetty elohopeaa, natriumia, lyijyä, tinaa ja lyijyvismuttiseosta. Kaikki nestemäisellä metallilla jäähdytetyt reaktorit ylläpitävät ketjureaktiota nopeiden neutronien avulla. Etuna nestemäisellä metallilla jäähdytetyissä reaktoreissa on niiden jäähdytysnesteen oleminen normaalissa ilmanpaineessa. Haittana reaktoreissa on huollon ja tarkastusten vaikea toteuttaminen läpinäkymättömän jäähdytysaineen takia sekä tiettyjen jäähdytysaineiden aiheuttama korrosio ja reagointi ilman, kosteuden ja hajoamistuotteiden kanssa. (38:69)

6.2.3.1 Lyijyllä jäähdytetty reaktori

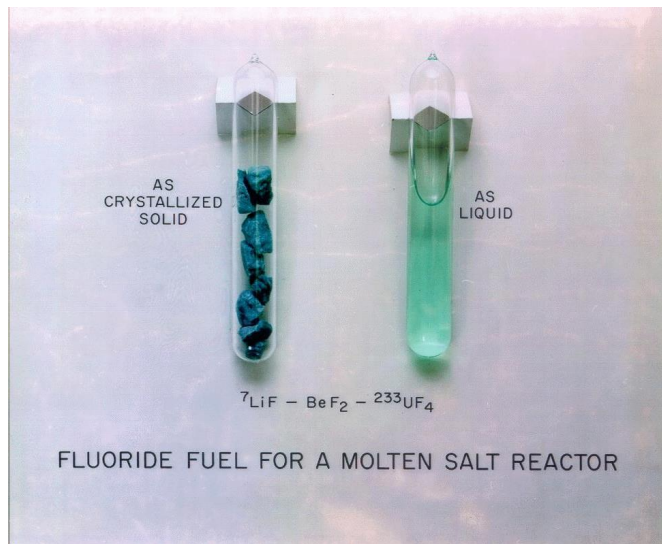
Lyijyllä jäähdytetyissä reaktorissa (Kuva 26) jäähdytysaineena toimii lyijy tai eutektinen lyijyvismuttiseos. Lyijy ja vismutti absorboivat neutroneita hyvin vähän ja niillä on alhainen sulamispiste. Siksi ne soveltuvat hyvin nopeita neutroneita hyödyntävään reaktoriin. Jäähdytysaine toimii myös neutroniheijastimena ohjaten osan neutroneista takaisin ytimeen. (49)



Kuva 26. Lyijyllä jäähdytetyn reaktorin periaatekuva

6.2.4 Sulasuoloilla jäähdytetyt reaktorit

Sulasuoloilla jäähdytetyissä reaktoreissa jäähdytysaine on sulasuolaseos. Reaktori toimii korkeissa lämpötiloissa ja alhaisessa paineessa, kuten nestemäisellä metallilla jäähdytetyt reaktorit. Polttoaine voi olla joko kiinteässä muodossa tai liuotettuna jäähdytysaineen sekaan (Kuva 27).(41)

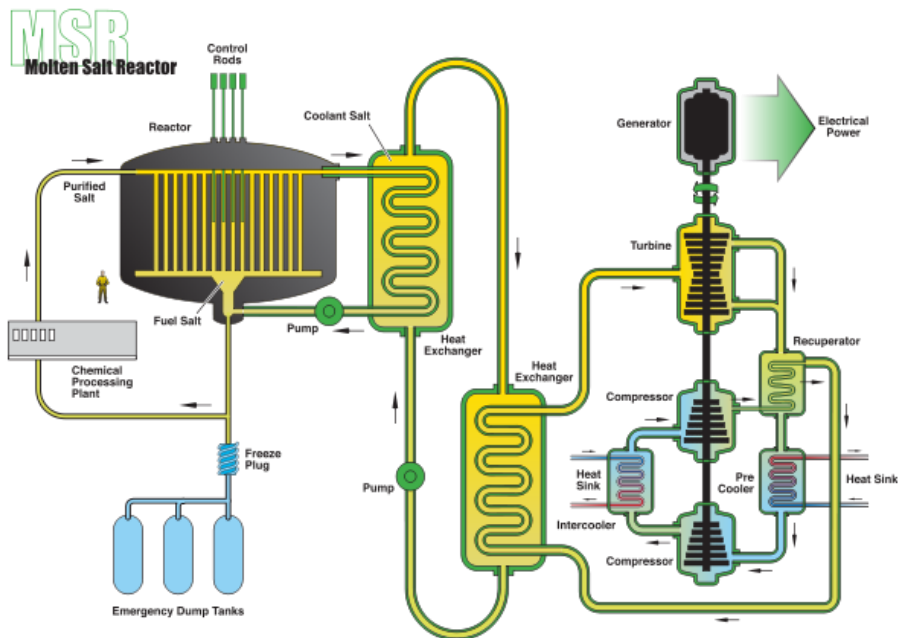


Kuva 27. Fluoridisuolapolttoaine nestemäisessä ja kiinteässä muodossa.

6.2.4.1 LFTR-reaktori

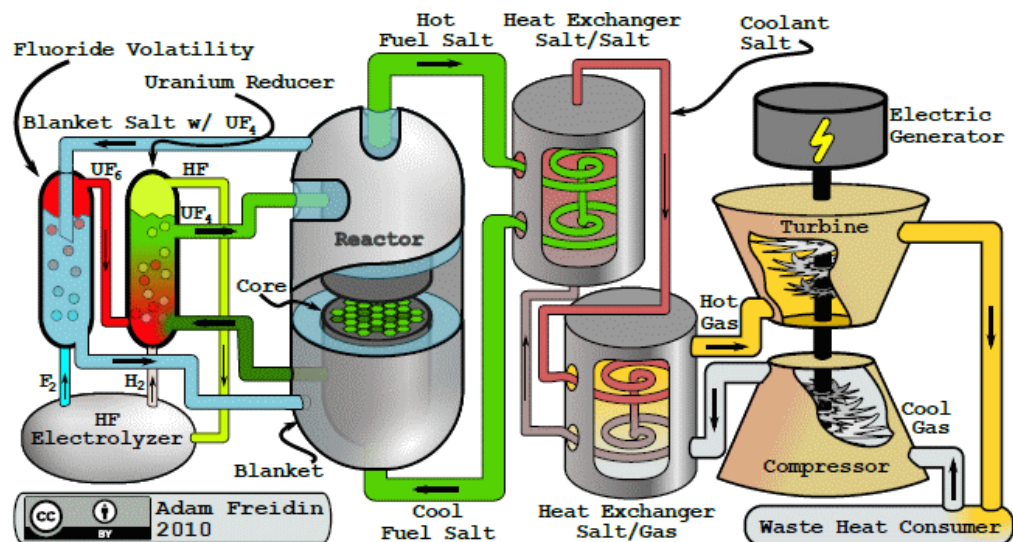
LFTR-reaktori (Liquid Fluoride Thorium Reactor) on terminen hyötyreaktori. LFTR-reaktori käyttää hyväkseen torium-polttoainekiertoa. Polttoaineena ja jäähdytysaineena toimii U-233:a sisältävä fluoridiin pohjautuva sula suola. Reaktori toimii korkeassa lämpötilassa ja ilmanpaineessa. (41)

Polttoainetta pumpataan kriittisen ytimen ja lämmönvaihtajan välillä. Lämmönvaihtajassa polttoaineen lämpö siirtyy sekundääriseen piiriin, jossa kiertää ei fissiilinen sula suola. LFTR-reaktorin U-233:n tuottaminen Th-232:sta voidaan toteuttaa kahdella tavalla. Ensimmäinen tapa (Kuva 28) on lisätä toriumia, fluoridiin sidottuna suolana, suoraan primäärikiertoon, jolloin se kaappaa neutronin ja hajoaa 22 minuutissa protaktinium-233:ksi, joka hajoaa noin 27 päivässä U-233:ksi. (42)



Kuva 28. LFTR-reaktori ilman erillistä toriumvaippaa

Toinen tapa (Kuva 29) on laittaa torium suolaytimen ympärille erilliseen vaippaan, missä torium voi kaapata neutronin. Toriumin laittaminen erilliseen vaippaan helpottaa lantanidien eli hajoamistuotteiden poistoa polttoainesuolasta. Vaipparakenne tekee myös reaktorista pienemmän ja soveltuvamman laivakäyttöön. (42)



Kuva 29. LFTR-reaktori toriumvaipalla

6.3 Reaktorien soveltuvuus merikäyttöön

Merikäyttöön soveltuvilta reaktoreilta vaaditaan, että ne eivät sisältäisi vapaita neste-pintoja tai irrallaan olevia polttoaine-elementtejä, koska tämä aiheuttaisi vakavuusongelmia ja huomattavaa vaaraa reaktoriturvallisuudelle meriolosuhteissa. Tämä estää kiehutusvesireaktorin ja kuulareaktorin turvallisen käytön merireaktorina.

Merireaktorin tulee olla myös kompakti ja tehokas. Yksivaippainen sulasuolareaktori on kooltaan suhteellisen suuri ja sopimaton laivakäyttöön, jos sillä aiotaan samalla tuottaa toriumista uraani-233:a.

Merireaktorin tulee myös olla turvallinen, joten grafiittihidasteinen kanavatyyppinen reaktori ei siihen tehtävään sovellu heikon käyttöturvallisuuden takia.

Merireaktoriksi sopivimmat reaktorityypit vesijäähdytteisistä reaktoreista ovat jo käytössä oleva painevesireaktori ja halpaa ja monipuolista polttoainetta käyttävä raskasvesireaktori.

Kaasujäähdytteisistä ja nestemäisellä metallilla jäähdytetyistä reaktoreista kaikki paitsi kuulareaktori ja vanhentunut Magnox-reaktori sopivat merikäyttöön rakenteeltaan.

Sulasuolareaktoreista kaksivaippaista menetelmää käyttävä LFTR-reaktori sopisi merikäyttöön, jos käsitellystä toriumista syntyvän uraani-233:n kemiallinen erotus saataisiin tehtyä kompaktisti ja automaattisesti.

7 LÄMPÖVOIMAKONEET

Ydinreaktorin lämpöenergia tulee muuttua mekaaniseksi energiaksi, jolla pyöritetään potkuriakselia tai sähkögeneraattoria. Mahdollisten vuotojen minimoimiseksi ja huollon helpottamiseksi lämpövoimakonepiirien tulee olla suljettuja ydinreaktorikäytössä.

7.1 Höyryturbiini

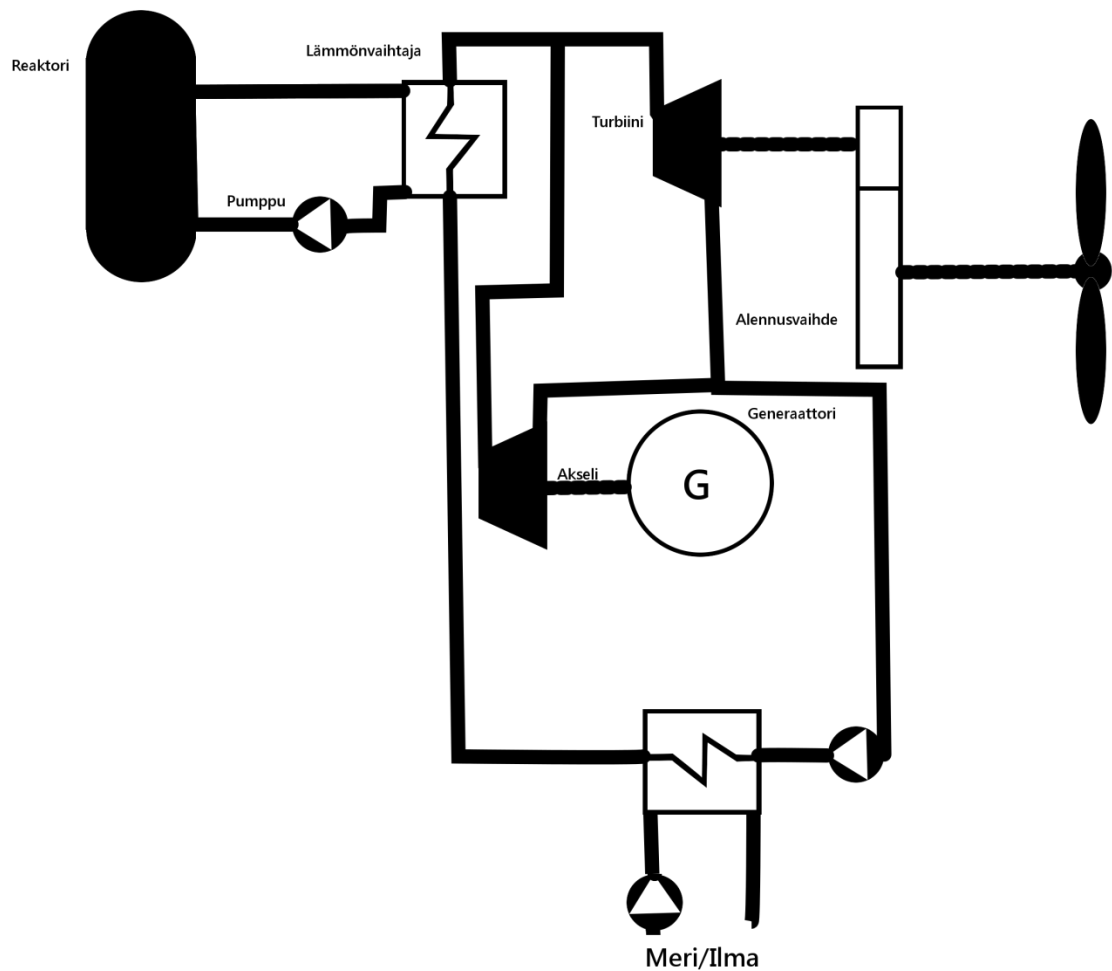
Höyryturbiini on lämpövoimakone, jolla korkeapaineisen vesihöyryn kokonaisentalpia muunnetaan mekaaniseksi energiaksi. (50:3)

Jokainen käytössä oleva ja käytössä ollut ydinkäyttöinen alus muuntaa reaktorin lämpöenergian mekaaniseksi tai sähköiseksi energiaksi höyryturbiinin avulla. Myös maakäytössä höyryturbiini on yleisin tapa muuttaa lämpöenergia sähköksi. (44:236-239)

Vesijähdytteisiä reaktoreita käyttävissä ydinvoimalaitoksissa ei voida tuottaa tulistettua höyryä. Höyrynpaine on pieni konventionaalisiin voimalaitoksiin verrattuna (30–60 bar), minkä takia massavirran on oltava suuri jotta turbiinista saataisiin irti vastaava määrä tehoa. (50:16)

Ensimmäiset ydinvoimassa käytetyt höyryturbiinit pohjautuivat lauhdevoimalaitoksissa käytettyihin turbiineihin. Pienillä tehoilla (alle 100 MW) kosteuspitoisuus turbiineissa pysyi pienenä, mutta tehojen kasvaessa höyryn paisunta turbiinissa siirtyi yhä enemmän kostean höyryn alueelle. Liiallinen kosteus turbiinisivistössä aiheuttaa voimakasta korroosiota. KP ja MP turbiinien väliin laitettiin välitulistin, jota lämmitetään tuorehöyryllä. (50:17)

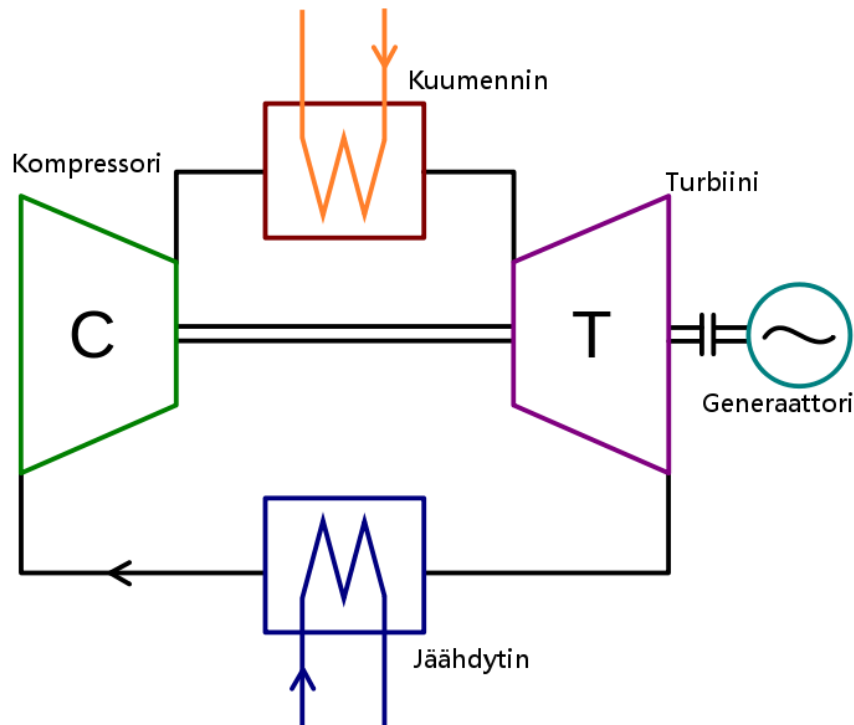
Kuvassa 30 on esimerkki höyryturbiinin käytöstä aluksen voimaratkaisussa. Alennusvaihteeseen voitaisiin myös liittää generaattori, jolloin toista turbiinia ei tarvittaisi. Alennusvaihteen generaattoria voitaisiin myös pyörittää hätätilanteessa apukoneiden teholla, jolloin generaattori toimisi sähkömoottorina.



Kuva 30. Höyryturbiiniratkaisu.

7.2 Kaasuturbiini

Kaasuturbiini on lämpövoimakone, jossa kaasu- tai nestemäistä polttoainetta polttokammiossa polttamalla käytetään turbiinia, joka on yhdistetty akselilla ilmaa polttokammioon puristavaan ahtimeen. Polttokammio voidaan korvata lämmönvaihtimella, tällöin puhutaan suljetusta kaasuturbiinista (Kuva 31). (44:207)

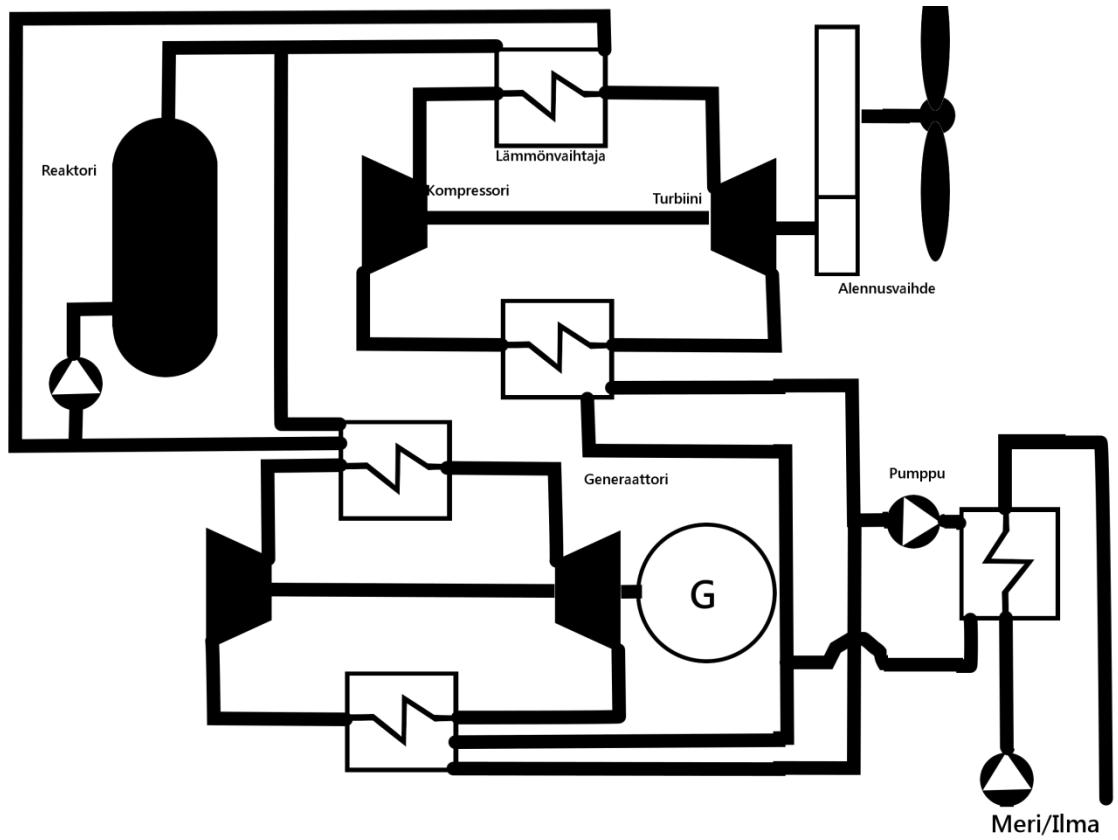


Kuva 31. Suljetun kaasuturbiinin periaatekuva.

Suljetussa kaasuturbiiniprosessissa sama kaasu (ilma tai muu kaasu, esimerkiksi helium, typpi, argon) kiertää jatkuvasti suljetussa järjestelmässä. Lämpö tuodaan järjestelmään ulkoapäin, esimerkiksi ydinreaktorin lämmönvaihtimesta. Suljetun prosessin ansiosta systeemi pysyy puhtana epäpuhtauksista, mikä pidentää turbiinin ja kompressorin käyttöikää verrattuna avoimiin kaasuturbiineihin. (44:207)

Kuumennin tilalle voitaisiin myös sijoittaa suoraan kaasujäähdytteinen ydinreaktori, jota jäähdyttävä kaasu kuumentuisi ja pyörittäisi suoraan turbiinia. Vaihtoehtoisesti jäähdyttimen tilalle voitaisiin sijoittaa höyrynkehitin, jonka tuottamalla höyryllä pyörittäisiin höyryturbiinia.

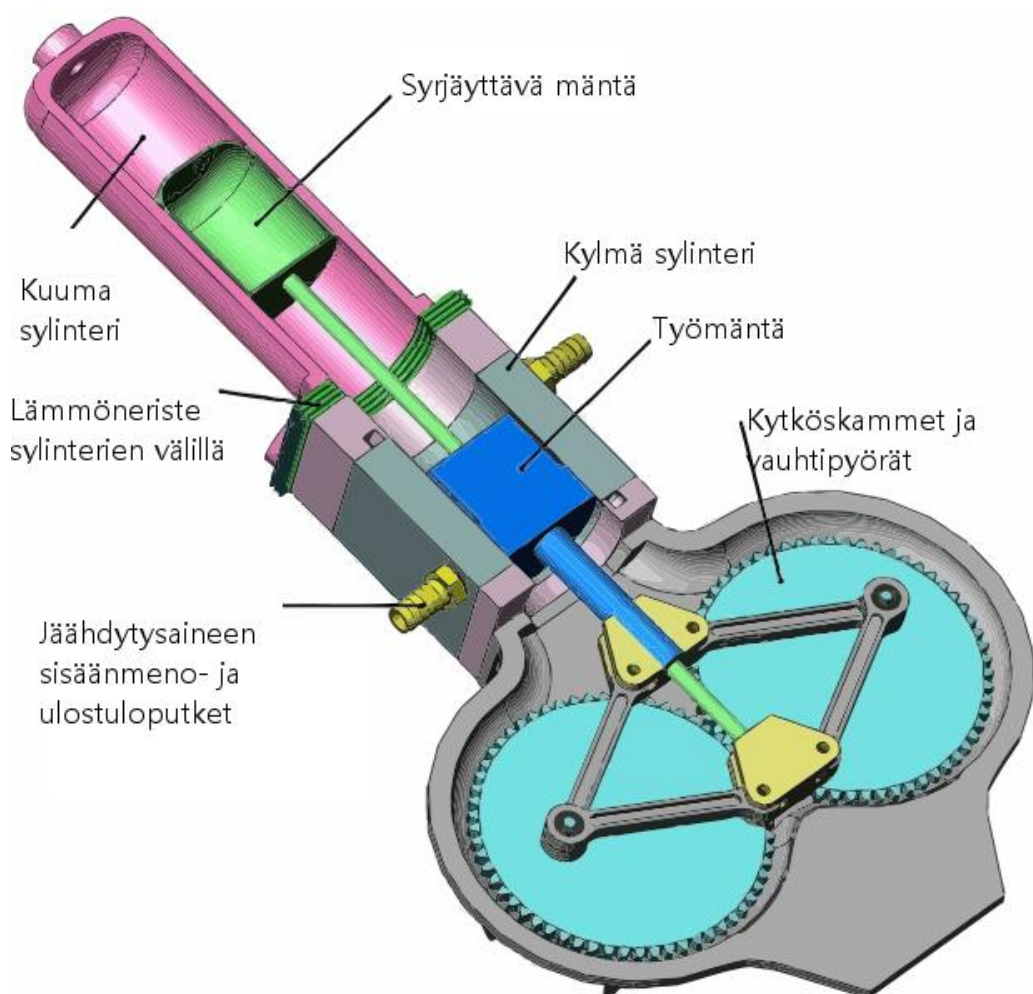
Kuvan 32 voimaratkaisussa lämpövoimakoneena on käytetty suljettua kaasuturbiinia. Tässäkin ratkaisussa alennusvaihteeseen sijoitettavalla akseligenaattorilla voitaisiin korvata toinen turbiini ja generaattori.



Kuva 32. Kaasuturbiiniratkaisu.

7.3 Stirlingmoottori

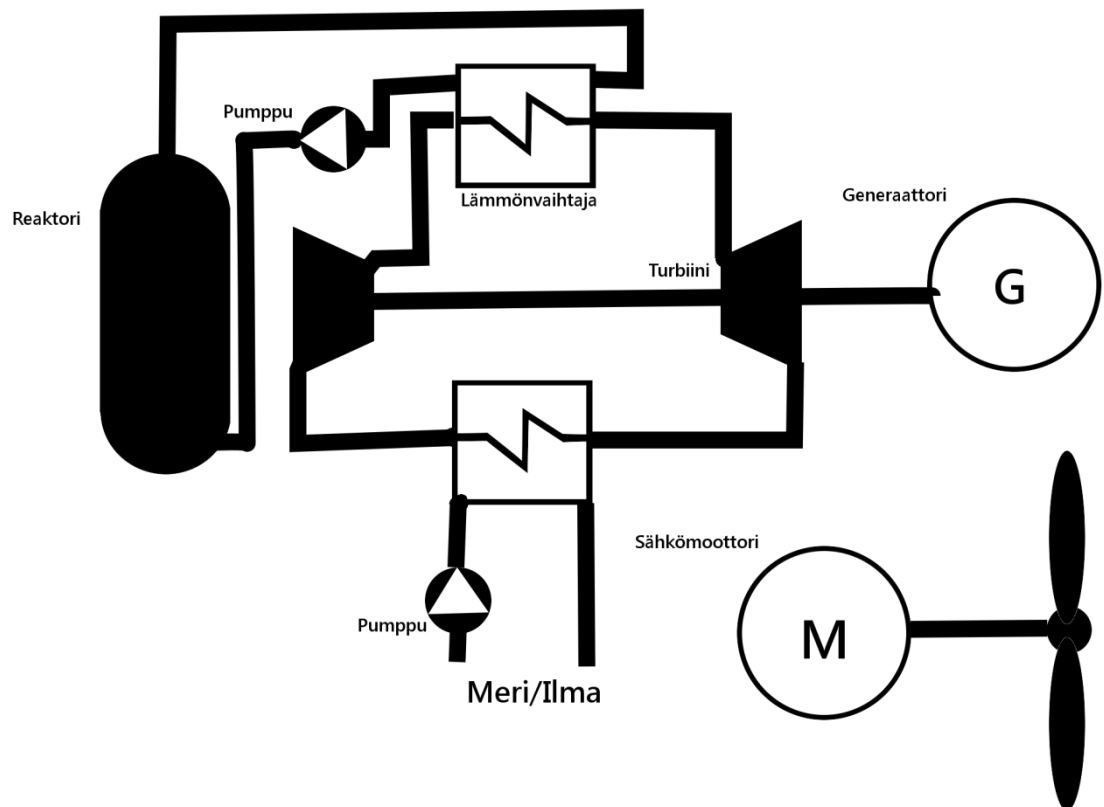
Stirlingmoottori (Kuva 33) on lämpövoimakone, jonka käyttöaineena on kaasu. Stirlingmoottori tuottaa mekaanista energiaa lämpötilaerojen avulla. Yksinkertaistetusti moottorissa on lämmin ja kylmä ”pää”, joiden välillä moottorin sisällä olevaa kaasua (esimerkiksi ilma tai helium) liikkuu vuoron perään jäähtyen ja lämmiten. Kaasun lämpölaajenemisen ja moottorin tiiviydyn johdosta syntyy paineen jaksoittainen vaihtelu. Painevaihtelu muutetaan mekaaniseksi työksi männän ja sylinterin avulla, mistä syntyvä liike samalla liikuttaa koneistoa, joka saa aikaan kaasun liikkumisen kylmän ja lämpimän pään välillä. (51:4-6)



Kuva 33. Rombista systeemiä käyttävä stirlingmoottori.

Tehokkaimmissa stirlingmoottoreissa koneen sisällä oleva kaasu on paineistettu. Tällöin yhden moottorin kierroksen aikana käsitellään enemmän kaasua, mikä nostaa koneen tehoa. (51)

Kuvassa 34 on esitetty kaasuturbiinin voimaratkaisu sähköisessä propulsiossa, mutta kaasuturbiinin tilalle voitaisiin sijoittaa suoraan stirlingmoottori liittämällä kuumennin kuumaan sylinteriin ja jäähdytin kylmään sylinteriin.



Kuva 34. Sähkömoottoriratkaisu.

7.4 Lämpövoimakoneiden soveltuvuus merikäyttöön

Lämpövoimakoneelta laivakäytössä vaaditaan kompaktia kokoa, luotettavuutta ja huollettavuutta.

Höyryturbiineilla on pitkä käyttöhistoria laivakäytössä ja ydinvoimaloissa lämpövoimakoneena. Huonona puolena höyryturbiinin käytölle on tulistetun höyryn puute, kun käytetään vesijäähdytteisiä reaktoreita. Tämä saattaa aiheuttaa faasimuutoksen jo turbiinin sisällä, mikä aiheuttaa korroosiota siivistölle.

Suljettu kaasuturbiini eroaa edukseen höyryturbiinista siinä, että se on rakenteeltaan kevyempi eikä kiertävässä aineessa tapahdu faasimuutosta. Suljetun kaasuturbiinin kuumennin voi olla myös suoraan kaasujäähdytteinen reaktori, mutta tällöin turbiini on sijoitettava säteilysuojaan ja turbiinin huolto vaikeutuu.

Stirlingmoottori on vaihtoehtoista kookkain, mutta hyötysuhteeltaan paras. Ruotsalaisten Gotland-luokan sukellusveneissä käytetään kahta nestemäisellä hapella ja diesellillä lämmitettyä stirlingmoottoria voimanlähteenä, kun alus on sukelluksissa.

Valittavaan lämpövoimakoneeseen vaikuttaa aluksen koko ja käytettävä reaktorityyppi. Stirlingmoottori on paras vaihtoehto kun aluksen koko ja vaadittu konetehto on pieni.

Suljettua kaasuturbiinia ja höyryturbiinia olisi viisainta käyttää yhdessä, kun reaktorina on kaasua, sulaa suolaa tai nestemäistä metallia jäähdytinaineena käytävä korkea-lämpöinen reaktori. Vesijäähdytteisten reaktorien kanssa höyryturbiini on paras vaihtoehto, koska matalan lämpötilan takia vaaditaan suurta massavirtaa.

8 APULAITTEISTOVAATIMUKSET

Ydinalus vaatii apulaitteistokseen samat apulaitteet kuin perinteiset alukset, esim. henkilöstön, lämpövoimakoneen ja lastin vaatimat apulaitteet, mutta näiden lisäksi ydinalus tarvitsee reaktoriturvallisuuden takaamiseksi muutamia lisäapulaitteita.(44:245)

Sulaa suolaa ja nestemäistä metallia jäähdytysaineena käyttävien reaktorien lämpötilaa on pidettävä yllä, jotta jäähdytysaine ei kiinteydy. Tätä varten aluksessa tulee olla riittävästi apukoneita, jotka tuottavat sähköä lämmitysvastuksille, tai apukattiloita, jotka tuottavat lämmityshöyryä. Yksinkertaisin tapa lämmittää jäähdytysnestettä on pitää koko reaktoritila tarvittavassa lämpötilassa, mikä takaa lämmön tasaisen jakautumisen jäähdytysnesteeseen.

Reaktori tarvitsee myös hätäjäähdytysjärjestelmän, ja tähän kuuluvien pumppujen tulee toimia hätägeneraattorin virralla, joten hätägeneraattori tulee mitoittaa siten, että sen teho kattaa tämän lisäkuorman.(44:245)

Reaktorin ja lämpövoimakoneiden väliset lämmönvaihtimet ja lämpövoimakoneen ja meren tai ilman väliset lämmönvaihtimet tulee olla kahdennettuja. Hätäjäähdytysjärjestelmien tulee olla kahdennettu samoin reaktorioperoinnin kaapelien.

Säteilytasojen mittaamiseen aluksen kone- ja asuintiloissa tulee olla jatkuvasti näytettä ottava järjestelmä. Lastin säteilytason tarkkailuun lastauksen ja purkamisen vaiheessa tulee olla järjestelmä.

9 HAITAT JA EDUT VERRATTUNA PERINTEISIIN VOIMARATKAISUIHIN

Ydinvoiman etuna perinteiseen voimaratkaisuun on polttoaineen suuri energiatiheys, mikä vähentää polttoaineen viemää lastitilaa. Etuna on myös suuri saatu teho pienelläkin ydinvoimaratkaisulla. Polttoaine on myös suhteellisen halpaa verrattuna siitä saatavaan energiamäärään ja sitä on saatavilla runsaasti, jos nykyisten kaivotekniikoiden lisäksi uraania eristettäisiin merivedestä tai reaktoreissa käytettäisiin toriumia. Ydinvoiman etuna on myös aluksen suuri toimintasäde ja polttoainetäydennysten suuri väli-aika. Ydinaluksen kasvihuonekaasupäästöt ovat myös pienet, ainoastaan apukoneista ja hätäkoneista tulee kaasupäästöjä.

Ydinvoiman haittapuolena ovat aluksen suuret rakennuskustannukset reaktorin osalta, vaikkakin tämä tilanne paranisi, jos aluskanta olisi suurempi ja käytettäisiin standardeoituja reaktoreita. Ydinaluksen miehistökustannukset ovat myös suuremmat, koska miehistöä tarvitaan hieman enemmän reaktoriturvallisuuden takaamiseksi. Myös nykyisten ydinaluksien vaatiman satamainfrastruktuurin puuttuminen lisää kustannuksia. Ydinvoiman ympäristöhaittana on siitä syntyvä ydinjäte, jos polttoainetta ei jälleenkäsitellä tai käytetä hyötyreaktorissa. Myös mahdollisen onnettomuuden aiheuttama ydinonnettomuuden riski on haittapuolena. Aluksen käyttöään lopussa tulee reaktorista ydinjätettä, joka on loppusijoitettava ydinjätteen kanssa, ellei sitä uusiokäytetä uudessa aluksessa.

10 YHTEENVETO

Ydinvoimankäytöllä laivojen energianlähteenä on lähes yhtä pitkä historia kuin ydinvoimakäytöllä voimalaitoksissa. Merenkulussa ydinvoimankäytöllä on hyvin sotilaallinen historia jäänmurtajia ja neljää koe kauppa-alusta lukuun ottamatta.

Meriolosuhteet asettavat ydinreaktorille monia vaatimuksia, kuten reaktorin kallistuminen ja aaltojen aiheuttamat iskut. Kansainvälinen lainsäädäntö ydinalusten osalta pohjautuu nykyisin lähinnä NS Savannahia ja NS Otto Hahnia varten tehtyihin lakeihin.

Ydinaluksen turvallisuuden takaamiseksi sen rungolta vaaditaan enemmän kuin perinteisiltä aluksilta, kuten tuplakylkiä reaktorin kohdalle ja kelluvaa irtoavaa reaktori-osastoa.

Ydinpolttoaineen pohjaksi soveltuvat luonnossa esiintyvät mineraalit ovat uraani ja torium. Näiden luonnonaineiden eristämiseksi maasta ja merestä on useita keinoja, joista kaikkia ei ole vielä teollisella tasolla hyödynnetty. Ydinpolttoaineiden kirjo on yhtä suuri kuin reaktorien, koska polttoaineet suunnitellaan yleensä toimimaan tietyissä lämmöissä tietyn lämmönvälittäjäaineen kanssa.

Ydinvoimasta syntyvän ydinjätteen määrä on nykyään suurempi mitä se voisi olla, jos käytetty polttoaine jälleenkäsiteltäisiin tai hyödynnettäisiin hyötyreaktoreissa.

Reaktorityyppinä on useita mutta niistä harvaa hyödynnetään paine- ja kiehumisvesireaktoria lukuun ottamatta. Merenkulussa ainoastaan painevesireaktoreita on nykyään käytössä, mutta painevesireaktori ei ole turvallisin ja tehokkain ratkaisu. Lämpövoimakoneista ainoastaan höyryturbiinia käytetään ydinaluksissa, mikä on loogista käytössä olevien painevesireaktoriensa takia.

Ydinreaktorilta vaaditaan merikäytössä samat turvalaitteet kuin maakäytössäkin, ja aluksen muut turvalaitteet tulee mitoittaa niin, että ne kestävät näistä aiheutuvan lisäkuorman. Miehistön terveyden turvaamiseksi ydinaluksilla tulee tarkkailla myös ympäristön säteilytasoja.

LÄHTEET

- (1) Scientific America. Alex P. Meshik. The Workings of an Ancient Nuclear Reactor. 2009. Saatavissa:
<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=ancient-nuclear-reactor&page=2> [Viitattu: 1.12.2013]
- (2) The Office of Nuclear Energy. The history of nuclear energy. Saatavissa:
http://energy.gov/sites/prod/files/The%20History%20of%20Nuclear%20Energy_0.pdf [Viitattu: 4.12.2013]
- (3) Nobelprize.org. Henri Becquerel – Biographical. Saatavissa:
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/becquerel-bio.html [Viitattu: 2.12.2013]
- (4) Nobelprize.org. Ernest Rutherford - Biographical. Saatavissa:
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1908/rutherford-bio.html [Viitattu: 2.12.2013]
- (5) Nobelprize.org. James Chadwick - Biographical. Saatavissa:
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1935/chadwick-bio.html [Viitattu: 3.12.2013]
- (6) Dartmouth Undergraduate Journal of Science. Shinri Kamei. Nuclear Marine Propulsion: The History of Nuclear Technology. 2013. Saatavissa:
<http://dujs.dartmouth.edu/uncategorized/nuclear-marine-propulsion-the-history-of-nuclear-technology#.Up9WgsRdVe9> [Viitattu: 4.12.2013]
- (7) World Nuclear Association. Nuclear-Powered Ships. Saatavissa:
<http://www.world-nuclear.org/info/Non-Power-Nuclear-Applications/Transport/Nuclear-Powered-Ships/> [Viitattu: 4.12.2013]
- (8) N.S Savannah. Saatavissa: <http://www.nssavannah.net/> [Viitattu: 25.11.2013]

- (9) Baltimore City Paper. Van Smith. Mothballed in mobtown. 13.4.2011. Saatavissa: <http://citypaper.com/news/mothballed-in-mobtown-1.1131459> [Viitattu: 4.12.2013]
- (10) Radiationworks. NS Otto Hahn. Saatavissa: <http://www.radiationworks.com/ships/nsottohahn.htm> [Viitattu: 4.12.2013]
- (11) OECD Nuclear Energy Agency. Investing in Trust : Nuclear Regulators and the Public. 2001. Saatavissa: <http://books.google.fi/books?id=zntOXdbpLiEC&pg=PA30&dq=mutsu&hl=fi#v=onepage&q=mutsu&f=false> [Viitattu: 4.12.2013]
- (12) Wikipedia. Sevmorput. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Sevmorpu> [Viitattu: 26.11.2013]
- (13) Bellona. Nuclear icebreaker Lenin. Saatavissa: http://www.bellona.org/english_import_area/international/russia/civilian_nuclear_vessels/icebreakers/30131 [Viitattu: 26.11.2013]
- (14) Wikipedia. Arktika (icebreaker). Saatavissa: [http://en.wikipedia.org/wiki/Arktika_\(icebreaker\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Arktika_(icebreaker)) [Viitattu: 5.12.2013]
- (15) Bellona. Nuclear icebreakers. Saatavissa: http://bellona.org/english_import_area/international/russia/civilian_nuclear_vessels/icebreakers/30107 [Viitattu: 5.12.2013]
- (16) Jacobs, J.G.C.C. 2007. Nuclear Short Sea Shipping. Thesis. Saatavissa: http://www.janleenkloosterman.nl/reports/thesis_jacobs_2007.pdf [Viitattu: 5.12.2013]
- (17) United States Nuclear Regulatory Commission. Radiation Basics. Saatavissa: <http://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/health-effects/radiation-basics.html> [Viitattu: 5.12.2013]
- (18) Jefferson Lab. The Element Uranium. Saatavissa: <http://education.jlab.org/itselemental/ele092.html> [Viitattu: 5.12.2013]

- (19) Geologian tutkimuskeskus. Perustietoa uraanista. Esa Pohjolainen. 2013. Saatavissa: http://www.gtk.fi/export/sites/fi/geologia/luonnonvarat/uraani/Perustietoa_uranista.pdf [Viitattu: 5.12.2013]
- (20) Chemicool. Plutonium Element Facts. Saatavissa: <http://www.chemicool.com/elements/plutonium.html> [Viitattu: 5.12.2013]
- (21) Jefferson Lab. The Element Thorium. Saatavissa: <http://education.jlab.org/itselemental/ele090.html> [Viitattu: 5.12.2013]
- (22) World Nuclear Association. Thorium. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Thorium/> [Viitattu: 5.12.2013]
- (23) World Nuclear Association. Uranium Mining Overview. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Mining-of-Uranium/Uranium-Mining-Overview/> [Viitattu: 5.12.2013]
- (24) World Nuclear Association. World Uranium Mining Production. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Mining-of-Uranium/World-Uranium-Mining-Production/> [Viitattu: 5.12.2013]
- (25) Tekniikka & Talous. Yhdysvalloissa eristetään uraania merivedestä ennätystehokkaasti. Sofia Virtanen. 23.8.2012. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/innovaatiot/yhdysvalloissa+eristetaan+uraania+merivedesta+ennatystehokkaasti/a831074> [Viitattu: 6.12.2013]
- (26) Pacific Northwest National Laboratory. Fueling nuclear power with seawater. Saatavissa: <http://www.pnl.gov/news/release.aspx?id=938> [Viitattu: 6.12.2013]
- (27) World Nuclear Association. Plutonium. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Fuel-Recycling/Plutonium/> [Viitattu: 6.12.2013]

- (28) Lunar & Planetary Lab at The University of Arizona. 2008. Saatavissa: <http://grs.lpl.arizona.edu/latestresults.jsp?lrid=32> [Viitattu: 6.12.2013]
- (29) Sandberg Jorma. Ydinturvallisuus. 2004. Säteilyturvakeskus.
- (30) Elmer E. Lewis. Fundamentals of Nuclear Reactor Physics. 2008. Academic Press.
- (31) Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Average Light and Heavy Masses and Neutron Yields, T.R. England and B.F. Rider, ENDF-349, Table 1. Saatavissa: <http://ie.lbl.gov/fission/table1.pdf> [Viitattu: 26.11.2013]
- (32) Lawrence Berkeley National Laboratory. Table of Radioactive Isotopes. Saatavissa: <http://ie.lbl.gov/toi/nucSearch.asp> [Viitattu: 6.12.2013]
- (33) Attila Vértes, Sándor Nagy, Zoltán Klencsár, Rezső G.Lovas, Frank Rösch. 2011. Handbook of Nuclear Chemistry, Springer.
- (34) Edmond J. Baratta. Manual of Food Quality Control: Radionuclides in food. 1994. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- (35) World Nuclear Association. Uranium Enrichment. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Conversion-Enrichment-and-Fabrication/Uranium-Enrichment/> [Viitattu: 7.12.2013]
- (36) World Nuclear Association. Processing of Used Nuclear Fuel. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Fuel-Recycling/Processing-of-Used-Nuclear-Fuel/> [Viitattu: 7.12.2013]
- (37) Wikipedia. Monazite. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Monazite> [Viitattu: 7.12.2013]
- (38) Saastamoinen, Jaakko. Reaktoriteknikan perusteet. 1974. TKY. Toinen, tarkistettu painos.

- (39) World Nuclear Association. Nuclear Fuel Fabrication. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Conversion-Enrichment-and-Fabrication/Fuel-Fabrication/> [Viitattu: 7.12.2013]
- (40) General Atomics. TRIGA Fuels. Saatavissa: <http://www.ga.com/triga-fuels> [Viitattu: 7.12.2013]
- (41) APS Physics. Liquid Fuel Nuclear Reactors. Saatavissa: <http://www.aps.org/units/fps/newsletters/201101/hargraves.cfm> [Viitattu: 7.12.2013]
- (42) R. B. Briggs. Molten-salt Reactor Program Semiannual Progress Report. 1964, Oak Ridge National Laboratory. Raportti. Saatavissa: <http://www.energyfromthorium.com/pdf/ORNL-3708.pdf> [Viitattu: 7.12.2013]
- (43) World Nuclear Association. Waste Management Overview. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Waste-Management-Overview/> [Viitattu: 7.12.2013]
- (44) Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka, Edita.
- (45) Idaho National Laboratory. Supercritical Water-Cooled Reactor. Saatavissa: <http://www.inl.gov/research/supercritical-water-cooled-reactor/d/supercritical-water-cooled-reactor.pdf> [Viitattu: 8.12.2013]
- (46) Andrew C. Kadak. A future for nuclear energy: pebble bed reactors. 2005, Int. J. Critical Infrastructures, Vol. 1, No. 4. Saatavissa: http://web.mit.edu/pebble-bed/papers1_files/Future%20for%20Nuclear%20Energy.pdf [Viitattu: 8.12.2013]
- (47) IAEA. Prismatic HTR. Saatavissa: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/prismatic-htr.pdf> [Viitattu: 8.12.2013]

- (48) Idaho National Laboratory. Gas-Cooled Fast Reactor. Saatavissa:
<http://www.inl.gov/research/gas-cooled-fast-reactor/d/gas-cooled-fast-reactor.pdf> [Viitattu: 8.12.2013]
- (49) Idaho National Laboratory. Lead-Cooled Fast Reactor. Saatavissa:
<http://www.inl.gov/research/lead-cooled-fast-reactor/d/lead-cooled-fast-reactor.pdf> [Viitattu: 8.12.2013]
- (50) Heinonen, Mikko. 2000-luvun höyryturbiinit. 2010. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Saatavissa:
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/69180/nbnfi-fe201103301396.pdf?sequence=3> [Viitattu: 8.12.2013]
- (51) W.R. Martini. Stirling Engine Design Manual. 1983. Saatavissa:
http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19830022057_1983022057.pdf [Viitattu: 8.12.2013]

KUALÄHTEET

- (1) Wikipedia. NS Savannah, Saatavissa:
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:NSsavannah-1962.jpg> [Viitattu: 26.11.2013]
- (2) U.S. Maritime Administration, Virtual Office of Acquisition, Technical Press Info Photos, Saatavissa:
https://voa.marad.dot.gov/docs/Library/ns_savannah/Technical%20Press%20Info%20%20Photos%20and%20Attachments.pdf [Viitattu: 26.11.2013]
- (3) Badische-Zeitung. Saatavissa: <http://ais.badische-zeitung.de/piece/00/f3/64/da/15951066.jpg> [Viitattu: 26.11.2013]
- (4) Kobe Research. Saatavissa: <http://www.research.kobe-u.ac.jp/fmsc-energy/atom/atom.html> [Viitattu: 27.11.2013]
- (5) Wikipedia. Sevmorput. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sevmorput_croptight.jpg [Viitattu: 27.11.2013]
- (6) Wikipedia. NS Lenin. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lenin_icebreaker.JPG [Viitattu: 27.11.2013]
- (7) Wikipedia. NS Jamal. Saatavissa:
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:NSF_picture_of_Yamal.jpg [Viitattu: 27.11.2013]
- (8) Organisaatio-sanomat. Aker Arctic suunnittelee valtion uuden jäänmurtajan. Verkkojulkaisu. Saatavissa: <http://www.organisaatio-sanomat.fi/aker-arctic-suunnittelee-valuation-uuden-jaanmurtajan/> [Viitattu: 27.11.2013]
- (9) Wikipedia. Ionizing radiation. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Alfa_beta_gamma_neutron_radiation.svg [Viitattu: 27.11.2013]

- (10) Pacific Nuclear Transport Limited.Saatavissa:
<http://www.pntl.co.uk/category/image-library/> Viitattu: 27.11.2013]
- (11) Wikipedia. Enriched uranium. Saatavissa:
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:HEUraniumC.jpg> [Viitattu: 27.11.2013]
- (12) The Nuclear Weapon Archive. Saatavissa:
<http://nuclearweaponarchive.org/Library/Plutonium/Puingot.jpg> [Viitattu: 27.11.2013]
- (13) Jessie Gee Tech Writing. Saatavissa:
<http://sites.psu.edu/jgg5196/files/2013/10/thoriumInYourHand.gif> [Viitattu: 27.11.2013]
- (14) Wikipedia. Monazite. Saatavissa:
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:MonaziteUSGOV.jpg> [Viitattu: 27.11.2013]
- (15) NASA. Solar System Expoloration. Saatavissa:
http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/display.cfm?Category=Planets&IM_ID=13643 [Viitattu: 27.11.2013]
- (16) Wikipedia. Nuclear fission product. Saatavissa:
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:ThermalFissionYield.svg> [Viitattu: 27.11.2013]
- (17) Wikipedia. PWR. Saatavissa:
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PWR1.png> [Viitattu: 27.11.2013]
- (18) HyperPhysics. Muokattu. Saatavissa: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/reactor.html> [Viitattu: 27.11.2013]
- (19) Wikipedia. CANDU reactor. Muokattu. Saatavissa:
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CANDU_Reactor_Schematic.svg [Viitattu: 27.11.2013]

- (20) Wikipedia. Supercritical Water Reactor. Muokattu. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Supercritical-Water-Cooled_Reactor.svg
[Viitattu: 27.11.2013]
- (21) Wikipedia. Magnox. Muokattu. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Magnox_reactor_schematic.svg [Viitattu:
27.11.2013]
- (22) Wikipedia. Pebble-bed reactor. Muokattu. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Graphitkugel_fuer_Hochtemperaturreaktor.JPG
G [Viitattu: 27.11.2013]
- (23) Wikipedia. Pebble-bed reactor. Muokattu. Saatavissa:
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pebble_bed_reactor_scheme_\(English\).svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pebble_bed_reactor_scheme_(English).svg)
[Viitattu: 27.11.2013]
- (24) NUCLEARSTREET. Under The Hood With Duncan Williams - VHTR
- Prismatic Reactors. Saatavissa:
http://nuclearstreet.com/nuclear_power_industry_news/b/nuclear_power_news/archives/2009/12/02/under-the-hood-with-duncan-williams-vhtr-prismatic-reactors-12022.aspx#.UpXVasRdVe8 [Viitattu: 27.11.2013]
- (25) Wikipedia. Gas-Cooled Fast Reactor. Muokattu. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gas-Cooled_Fast_Reactor_Schemata.svg
[Viitattu: 27.11.2013]
- (26) Wikipedia. Lead-cooled fast reactor. Muokattu. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lead-Cooled_Fast_Reactor_Schemata.svg
[Viitattu: 27.11.2013]
- (27) ENERGY FROM THORIUM. About. Saatavissa:
<http://energyfromthorium.com/about/> [Viitattu: 27.11.2013]
- (28) Wikipedia. Molten salt reactor. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Molten_Salt_Reactor.svg [Viitattu:
27.11.2013]

(29) ENERGY FROM THORIUM. About. Saatavissa:
<http://energyfromthorium.com/about/> [Viitattu: 27.11.2013]

(31) Wikipedia. Closed-cycle gas turbine. Muokattu. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Schem_turb_gaz3_en-simple.svg [Viitattu: 27.11.2013]

(33) Wikipedia. Stirling engine. Muokattu. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/Closed-cycle_gas_turbine [Viitattu: 27.11.2013]

TAULUKKOLÄHTEET

- (1) Edmond J. Baratta. Manual of Food Quality Control: Radionuclides in food. 1994, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Saatavissa:
http://books.google.fi/books?id=4HOGwg0YqwMC&pg=PA35&dq=radioactive+fallout+particles+zirconium&lr=&num=50&as_brr=3&cd=29&redir_esc=y#v=onepage&q=radioactive%20fallout%20particles%20zirconium&f=false
[Viitattu: 11.12.2013]