



Ydinreaktorit

Mikko Nyysönen

OPINNÄYTETYÖ
Elokuu 2019

Biotuote- ja prosessitekniikka
Prosessitekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Biotuote- ja prosessitekniikka
Prosessitekniikka

NYYSSÖNEN, MIKKO SAMUEL:
Ydinreaktorit

Opinnäytetyö 58 sivua
Elokuu 2019.

Tämän opinnäytetyön taustalla on pitkäkestoinen mielenkiinto ydinvoimatekniikkaan sovelluksineen. Tutkimusmenetelmänä on kirjallisuustyö, ja materiaali on hankittu alan kirjoista ja internetistä. Tarkastelukohteiksi rajattiin perinteinen painevesireaktori- ja kiehutusvesireaktori tekniikka, sekä se, mitä ydinreaktorin kestävä ketjureaktio edellyttää ydinreaktorilta. Rajausta on sovellettu laajasti. Työn luonteen mukaisesti uusia tutkimustuloksia ei ole.

U-235 ydin virittyy lisäneutronin massan seurauksena, ja kun ytimen sisäisten ydinvoimien tasapaino järkkyy U-236 isotooppina, se hajoaa. Hajoamisen seurauksena syntyy uusi tasapaino pienempinä ytimenä, hiukkasina ja energiana.

Ydinvoimalan toimintaperiaate on ketjureaktiona tapahtuvien epävakaiden ytimien hajoamisesta syntyneen lämmön hallittu muuntaminen käyttökelpoiseksi energiaksi, tavallisesti sähköenergiaksi höyryturbiinien avulla. Painevesireaktoriassa lämmönsiirrossa käytetään kahta peräkkäistä jäähdytyskiertoa, joista jälkimmäinen höyrynä, ja ydinreaktio tapahtuu painekammiossa veden kiehumisen estämiseksi. Kiehutusvesireaktorissa tuotetaan suoraan vesihöyryä.

Johtopäätöksenä säteilyn ohella todellinen ydinvoiman vaaratekijä on jäähdytyksessä käytetty vesi, ja siksi ydinvoimatekniikassa tulisi siirtyä pois vanhasta höyrykattilatekniikasta, tai keskittää sen käyttö lähinnä alkuperäiseen laivojen käyttöön, koska laivoilla on poikkeuksetta käytettävissä jäähdytykseen vettä. Höyryn räjähdysmäisen laajenemisen välttämiseksi lämmönsiirrossa tulisi suosia materiaaleja, joiden kyky johtaa ja sitoa lämpöä on merkittävästi suurempi ja laajenemiskeroin on merkittävästi pienempi, tai negatiivinen, kuten käyttämällä sulasuola seoksia.

Asiasanat: ydinvoima, ydinreaktio, painevesireaktori, kiehutusvesireaktori, jäähdytys

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Bioproducts and Process Technology
Process Technology

NYSSÖNEN, MIKKO SAMUEL:
Nuclear reactors

Bachelor's thesis 58 pages
August 2019.

The background of this thesis is interest to nuclear technology and its various applications. The research method was a literary review. The subject of the review was conventional pressurized water reactor technology and boiling water reactor technology, as well as what a lasting chain reaction requires from a nuclear reactor.

The fission occurs as a result of an excess of atomic nucleus neutrons, resulting in a disruption of the nucleus nuclear force balance. Fission results a new balance of lighter atomic nuclei, particles and energy. The operating principle of a nuclear power plant is the controlled conversion of heat from fission chain reaction of unstable nuclei into usable energy, usually by steam turbines. In the pressurized water reactor, two consecutive cooling cycles are used, the latter being steam, and the nuclear reaction takes place in the pressure chamber to control the boiling of water. In the boiling water reactor the nuclear reactor produces directly steam.

To conclude, the danger factor for nuclear power is the water used for cooling, nuclear technology must move forward from the old steam boiler technology, or divert the use of steam technology mainly to the original use of ships, because light water is invariably available on ships.

To avoid vapor explosion, materials with a significantly higher thermal capacity and a negligible or significantly lower expansion should be preferred for heat transfer, for example using mixed melted salts.

Key words: nuclear power, nuclear reaction, pressurized water reactor, boiling water reactor, cooling

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	MIHIN YDINENERGIA PERUSTUU?	8
	2.1 Fissionperiaate	8
	2.2 Hallittu ketjureaktio	9
	2.3 Reaktorin kriittisyys	11
	2.4 Ketjureaktion reaktiivisuuden säätö	12
3	YDINVOIMATEKNIKKAA	14
	3.1 Ydinvoimalan teholuokitus	14
	3.2 Reaktori	15
	3.2.1 Säätösauvat	16
	3.2.2 Moderaattori eli hidastin	16
	3.3 Paineastia	18
	3.4 Lämmönvaihtimet ja lämmönsiirtomateriaalit	18
	3.4.1 Raskas vesi ja vesi	19
	3.4.2 Helium	19
	3.4.3 Hiilidioksidi	20
	3.4.4 Natrium	20
	3.4.5 Lyijy tai eutektinen lyijy-vismutti	20
	3.4.6 Fluorisuolat	21
	3.4.7 Kloridisuolat	22
	3.5 Passiivinen hajoamislämpö	22
4	YDINPOLTTOAINE	24
	4.1 Ydinpolttoaineen tankkaus ja vaihtaminen	25
	4.2 Polttoainemyrkyt	26
	4.3 Uraanin tuotantoprosessi	27
5	REAKTORITYYPIT	29
	5.1 Painevesireaktori (PWR)	30
	5.2 Kiehumusvesireaktori (BWR)	33
	5.3 Paineistettu raskasvesireaktori (PHWR) CANDU	34
	5.4 Kehittyneet kaasujäähdytteiset reaktorit (AGR)	36
	5.5 Grafiittimoderoitu kevytvesireaktori (RBMK)	37
	5.5.1 Polttoaine (RBMK)	39
	5.5.2 Reaktorin paineputket (RBMK)	39
	5.5.3 Reaktorin ydinpolttoaineen vaihto (RBMK)	39
	5.5.4 Moderaattori grafiitti (RBMK)	39
	5.5.5 Säätösauvat (RBMK)	40

5.5.6	Jäähdytin (RBMK)	40
5.5.7	Höyrynerottimet (RBMK).....	40
5.5.8	Suojaus (RBMK).....	41
5.5.9	Positiivinen tyhjiökerroin (RBMK)	41
5.6	Kehittyneet ydinreaktorit.....	43
6	YDINENERGIAN HISTORIAA	44
6.1	Atomin luonteen löytäminen	44
6.2	Ydinfission valjastaminen	46
6.3	Atomipommin luominen	47
6.4	Käsitteiden kehittäminen	48
6.5	Ydinkattilan herätys.....	50
6.6	Kaupallinen ydinvoima	52
6.7	Ydinvoiman synkkä aika ja uusi herääminen.....	54
7	POHDINTA	55
	LÄHTEET	58

LYHENTEET JA TERMIT

AHTR	Kehittynyt korkealämpötilareaktori
AGR	Kehittynyt kaasujäähdytteinen reaktori
ABWR	Kehittynyt kiehutusvesireaktori
BWR	Kiehutusvesireaktori
Brutto MWe	Bruttomääräinen höyryturbiinin ja generaattorin tuotama teho, jossa on huomioitu myös lauhdutuspiirin ympäristön lämpötila.
EPR	Eurooppalainen painevesireaktori
FHR	Fluorisuola jäähdytetty korkealämpötila reaktori
FNR	Nopeaneutronireaktori
Lämpötehokkuus-%	Bruttotehon ja lämpötehon suhde prosentteina.
MWt	Terminen lämmöntuotanto
MSR	Sulasuolareaktori.
Magnox-reaktori	Kaasujäähdytteinen grafiittihidastettu reaktori metallisella rikastamattomalla uraanipolttoaineella.
Moderaattori	Uraania kevyempi ydin, jonka neutronin absorboimisen pinta-ala on pieni, ja joka sopii täten neutronien kineettisen energiatason laskemiseen.
Netto MWe	Teho, joka voidaan lähettää sähköverkkoon, kun laitoksen oma käyttöteho on vähennetty.
Nettotehokkuus-%	Netto MWe:n ja termisen MWt:n välinen suhde prosentteina
LWR	Kevytvesireaktori
LWGR	Grafiitti hidastettu kevytvesireaktori
Palaminen	Ydinpolttoaineen palaminen ei tarkoita palamista reaktiona, vaan uraanin isotooppien U-235 ja U-238, tai muun fission kykenevän ytimen kulumista fissioiden kautta.
PWR, VVER	Painevesireaktori
PHWR, CANDU	Paineistettu raskasvesireaktori
RBMK, ABWR	Kevytvesigrafiittihidastettureaktori

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on vakiintunut ydinvoima ja opinnäytetyön painopiste on vakiintunut PWR- ja BWR-tekniikka ja työn muotona on kirjallisuustyö. Työn tarkoituksena on tutustua ydinvoimatekniikkaan, erilaisiin reaktorityyppeihin ja reaktorien toteutustapoihin. Tarkasteltavana on myös reaktoritekniikan teorian kehityksen historiaa, niiltä osin kuin kehitystyö on johtanut ydinvoiman kehittymiseen.

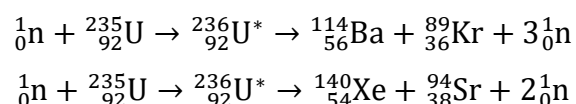
Tavoitteena on tutustua fission vaatimuksiin ja syntymiseen, ketjureaktioon ja menetelmiin ketjureaktion ylläpitämiseksi, kuten myös erilaisiin primääri- ja sekundääri jäähdytyskiertoissa käytettyihin materiaaleihin ja menetelmiin. Tarkastelukohteena on myös kiina-ilmiönä tunnettu reaktorin sulaminen ja Tšernobylin onnettomuuteen johtanut positiivinen tyhjiökerroin.

2 MIHIN YDINENERGIA PERUSTUU?

Ydinreaktorin toimintaperiaate muistuttaa läheisesti perinteistä höyrykoneen eli höyryvoimalaitoksen paineastiaa, jonka lämmönlähteenä toimii uraanin hajoamistuotteista syntyvä lämpöenergia. Vakaasti toimivassa ydinreaktorissa on uraanin hajoamisen seurauksena vapautuvia neutroneja juuri sopiva määrä pitämään yllä ketjureaktiota. Liian pienen määrän seurauksena on uraanin hajoamiseen johtavan reaktion hiipuminen ja liian suuri määrä johtaa hallitsemattomaan ylikuumenemiseen.

2.1 Fissionperiaate

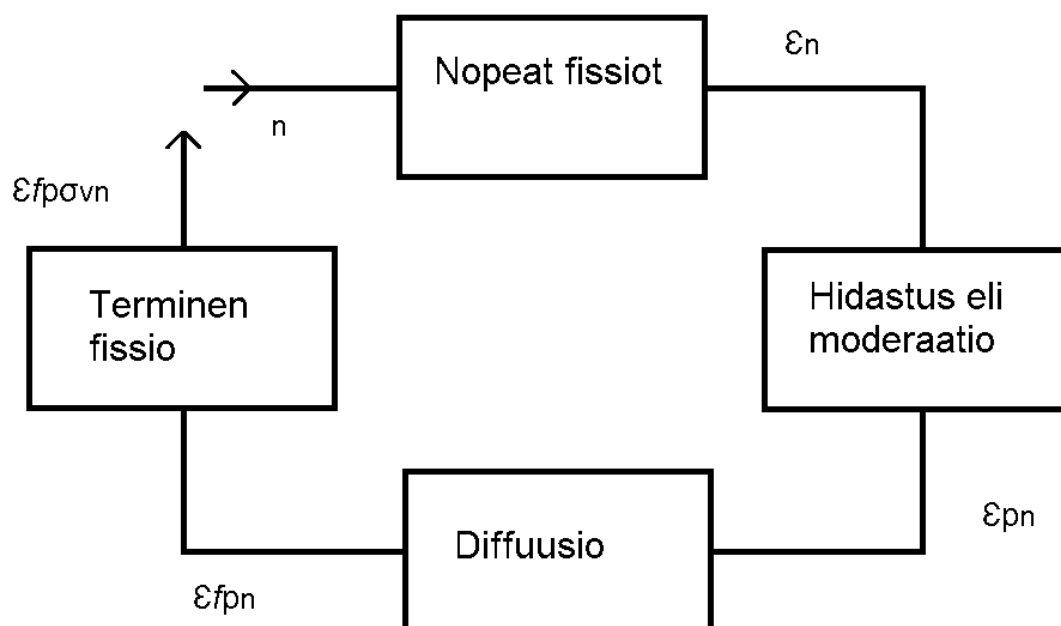
Ihmisen nykyään tuottama ydinenergia perustuu fission. Uraanin isotooppi U-235 on ainoa luonnosta löytyvä juuri sopivan kokoinen nuklidi, jolla atomimassa ja ydinvoimat ovat juuri oikean suuruiset kaappaamaan ylimääräisen neutronin ja voidakseen virittyä epävakaaksi isotoopiksi U-236. Virittynyt uraani 236 nuklidi hajoaa neutroneiksi, heliumytimiksi ja energiaksi. U-235 menettää sisäisten ydinvoimiensa tasapainon kaappaamalla neutronin ja virittymällä U-236 isotoopiksi. Epävakaa virittynyt U-236* ydin pyrkii saavuttamaan sisäisen tasapainon, ja saavuttaa kevyempänä hajoamistuotteena uuden tasapainotilan. U-236 hajoaa tytärhiukkasiksi Ba-114 ja Kr-89 tai Xe-140 ja Sr-94, ja samalla vapautuu gammasäteilyä eli energiaa ja neutroneita. Fissiohajoamisen yhteydessä syntyy myös alfasäteilynä tunnettuja heliumatomeja. (Inkinen, Manninen & Tuohi 2012, 546.)



osuus ilmoitetaan resonanssin välttämisen todennäköisyytenä (p). Hidastettujen termisten neutronien lukumäärä on $\mathcal{E}pn$. (Marttila ym. 1971, 154.)

Jos reaktorin p on 0,8–0,9 välillä, vain tietty osa (f) hidastuneista neutroneista absorboituu isotoopilla U-235. Absorboitunut osa (f) merkitsee termistä käytösuhdetta. Diffuusio U-235 absorboituvien neutronien määrä on $\mathcal{E}fpn$. (Marttila ym. 1971, 155.)

Fission johtava osuus absorptioista lasketaan vaikutusalan σ avulla, jolloin fissioiden lukumäärä on $\mathcal{E}fp\sigma n$. Fissiota kohti saatavien neutronien määrä on ν . Uusien neutronien määrä on siten $\mathcal{E}fp\sigma\nu n$. Uusien nopeiden neutronien lukumäärän suhde alkuperäiseen neutronimäärään on neljän tekijän kaava k (KUVIO 1). (Marttila ym. 1971, 155.)



KUVIO 1. Neutronien kiertokulku äärettömässä reaktorissa

ϵ = nopea fissiotekijä

n = nopeiden fissioista syntyneiden neutronien lukumäärä

p = U-238 kaappausresonanssin välttämistodennäköisyys

f = termien käyttösuhde

σ = vaikutusala eli poikkileikkauksen pinta-ala

v = fissiota kohti saatavilla olevien neutronien määrä

k = kasvutekijä eli uusien nopeiden neutronien määrän suhde alkuperäiseen neutronimäärään

$$p = \epsilon n \quad \text{nopeiden neutronien lisämäärä} \quad (1)$$

$$f = \epsilon p n \quad \text{termisten neutronien määrä hidastamisen jälkeen} \quad (2)$$

$$V = \epsilon f p n \quad \text{diffuusio (absorboituneiden neutronien määrä)} \quad (3)$$

$$v = \epsilon f p \sigma n \quad \text{fissioiden lukumäärä} \quad (4)$$

$$\epsilon f p \sigma v n \quad \text{uusien neutronien määrä} \quad (5)$$

$$\frac{\epsilon f p \sigma v n}{n} = \epsilon f p \eta = k \quad (6)$$

Neljän tekijän kaavalla (6) (KUVIO 1) kuvataan neutronien kiertoa äärettömän suuressa reaktorissa. Verrattuna äärelliseen reaktoriin erona on neutronien vuotaminen rajapintojen läpi. Äärellisen reaktorin neutronien vuotoa tapahtuu hidastumis- ja diffuusiovaiheessa. Vuodon rajoittamiseksi reaktorisydän koteloidaan tehokkaalla heijastimella kuten vedellä tai grafiitilla. (Marttila ym. 1971, 155.)

2.3 Reaktorin kriittisyys

Neutronilla on keskimääräinen elinikä l . Kaava (7) ilmoittaa neutronin keskimääräisen eliniän aikaisen neutronien suhteellisen määrän muutoksen Δn , joten sitä kutsutaan reaktorin kasvutekijäksi. (Marttila ym. 1971, 155)

Neutronien lukumäärän muutos:

$$\Delta n = kn - n = n(k-1) \quad (7)$$

Neutronien keskimääräinen muutosnopeus ajalla t :

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{n(k-1)}{l} \quad (8)$$

Neutronien lukumäärä hetkellä t on:

$$n = n_0 e^{\frac{k-1}{l} \cdot t} \quad (9)$$

Kun $k < 1$ reaktori on alikriittinen ja neutronien määrä pienenee. Kriittisen reaktorin $k=1$ ja ylikriittisen reaktorin $k > 1$ (Marttila ym. 1971, 156).

Reaktorin tehon säätäminen tapahtuu muuttamalla kasvutekijän k arvoa. Tavallisesti säätö tapahtuu säätösauvojen avulla muuttamalla reaktion poikkipinta-alan arvoa σ . Yleensä säätösauvojen työntäminen reaktoriin pienentää kasvutekijää k ja poisveto kasvattaa sitä. Reaktorin ohjattavuuteen vaikuttavat oleellisesti uraain fissiotuotteista emittoituvat myöhästyneet neutronit. (Marttila ym. 1971, 156.)

2.4 Ketjureaktion reaktiivisuuden säätö

Kasvutekijä k vaikuttaa ratkaisevalla tavalla neutronitason eli tehotason muuttamiseen. Kasvutekijästä on johdettavissa reaktiivisuussuure ρ . Kriittisen reaktorin reaktiivisuus on 0 ja ylikriittisen reaktorin reaktiivisuus on positiivinen ja alikriittisen negatiivinen. (Marttila ym. 1971, 158.)

$$\frac{k-1}{k} = \rho \quad (10)$$

0,7 % neutroneista syntyy viivästyneenä, ja mahdollistaa reaktorin säädettävyyden. Termisien reaktoreiden neutronien keskimääräinen elinikä on 0,08 s. Sijoittamalla tämän kaavaan (9), tehon e-kertaiseen nousuun tarvittava aika on 8 s. (Marttila ym. 1971, 158.)

Nopeissa reaktoreissa neutronien elinikä on niin lyhyt, ettei siitä ole apua reaktorin hallinnassa. Nopean reaktorin säätö perustuu reaktiivisuuden ρ voimakkaaseen lämpötilariippuvaisuuteen. (Marttila ym. 1971, 158.)

$$\rho = \rho_0 + \alpha(T - T_0) \quad (11)$$

ρ = reaktiivisuus lämpötilassa T

ρ_0 = reaktiivisuus lämpötilassa T_0

α = reaktiivisuuden lämpötilakerroin

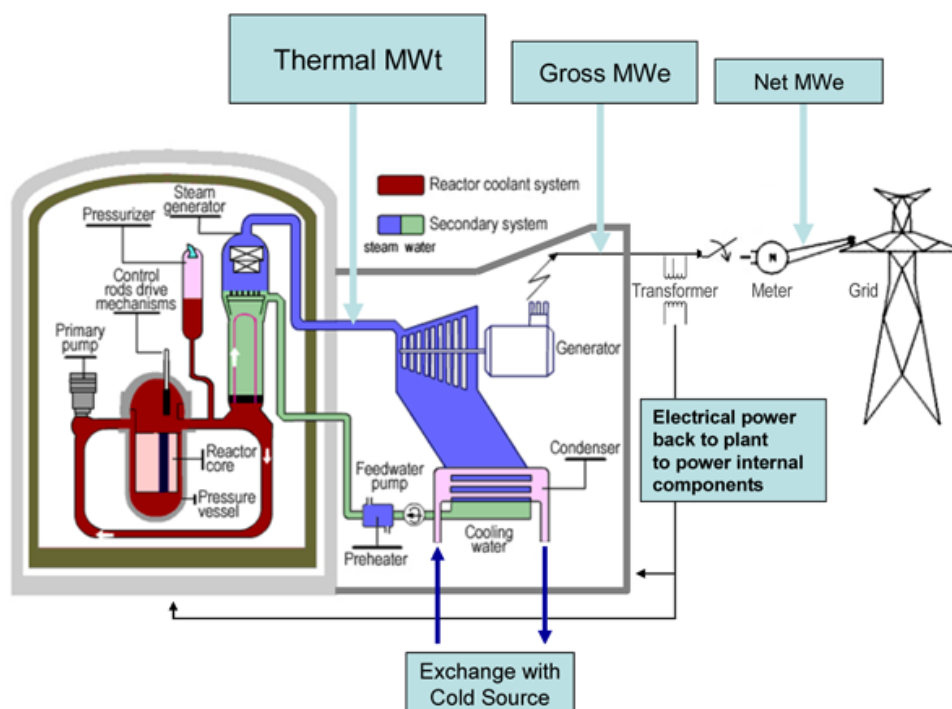
Silloin kun α :lla on kaikissa olosuhteissa negatiivinen arvo, reaktori on hallittavissa käyttämällä apuna mekaanisia säätösauvoja. Tämä itsesäätävä ominaisuus on tärkeä tekijä myös termisten reaktorien polttoaine-elementtien ylikuumenemisen estämisessä. (Marttila ym. 1971, 159.)

On hyvin tärkeää, että reaktiivisuus alenee ytimen lämpötilan noustessa, niin että ytimen lämpötila on vakaa pienien reaktiivisuuden vaihteluiden aikana. Termisessä reaktorissa tämä tulee U-238 kaappausresonanssin laajenemisen seurauksena, joka lisää lämpötilaa. U-238 ytimen värähtelyn keskimääräinen nopeus on verrannollinen uraaniatomien lämpötilaan. Viritettyyn U-239 -tilaan tarvittava neutronin energia riippuu neutronin suhteellisesta nopeudesta ja U-238 ytimestä, kuten myös kaappausresonanssin laajeneman muutoksesta Δ , joka kasvaa yhdessä lämpötilan nousun kanssa. Tämä vaikuttaa neutronien lisääntyneenä absorptiona. (Andrews & Jelley 2017, 338.)

3 YDINVOIMATEKNIKKAA

3.1 Ydinvoimalan teholuokitus

Ydinvoimareaktorin tehontuotanto on määritelty kolmella tavalla (KUVIO 2.). Terminen lämpöteho MWt riippuu itse varsinaisesta ydinreaktorista, ja on suhteessa tuotetun höyryn laatuun ja ominaisuuksiin. Bruttomääräinen MWe ilmaisee höyryturbiinin ja generaattorin tuottaman sähkötehon, huomioiden myös lauhdutuspiirin ympäristön lämpötilan. Bruttotehon määrittäminen edellyttää tunnettuja olosuhteita jäähdyttimeltä ja lämmittimeltä. Netto sähköteho MWe on se teho, joka voidaan lähettää sähköverkkoon, kun laitoksen omakäyttöteho on vähennetty. Lämpötehokkuus-% on bruttotehon ja lämpötehon suhde prosentteina. Nettotehokkuus-%, on laitoksen toiminnasta ja olosuhteista riippuvainen netto MWe:n ja terminen MWt:n välinen suhde prosentteina. (WNA. 6.2019.)



KUVIO 2. Voimalan tehoarvot (terminen lämpöteho, brutto- ja netto-sähköteho) (WNA. 6.2019.)

3.2 Reaktori

Ydinreaktorissa reaktoriytimessä sijaitsevan uraanin ja uraanin hajoamistuotteiden tuottama lämpöenergia siirretään hallitusti sähköntuotantoon tai sellaisenaan esimerkiksi prosessienergiaksi tai energiana jakeluverkkoon.

Hitaassa termisessä reaktorissa käytetään hyväksi U-235 isotoopin kykyä emittoida neutroni, virittyä epävakaaaksi ja hajota pienemmiksi ytimiksi, hiukkasiksi ja energiaksi.

Reaktorissa on ainakin seuraavat osat: Paineastia, jossa on reaktoriydin, polttoaine ja neutronien liike-energiaa säättävä moderaattori eli hidastin. Paineastia on osa PWR reaktorin primäärikiertoa ja sekundäärikierron yhteydessä sijaitsee höyrystin sekä turbiini/lauhdutin, joiden tehtävänä on siirtää fissiossa syntynyt lämpöenergia hallitusti varsinaisen reaktorin ulkopuolelle.

Kevytvesireaktoreissa käytettävä polttoaine on muutaman prosentin U-235 rikastettua uraania ja perinteisissä reaktoreissa tavallisesti uraanioksidin muodossa. Uraanioksidi (KUVA 1) on puristettu pelleteiksi ja koottu polttoainesauvoihin, joita käsitellään polttoainenippuina.



KUVA 1. CANDU-reaktorin uraanioksidia jauheena ja pelletteinä (WNA. 6.2019.)

3.2.1 Säätosauvat

Säätosauvojen käyttötarkoitus on reaktion hidastaminen tai pysäyttäminen. Ne valmistetaan neutroneja absorboivasta materiaalista ja sijoitetaan painevesireaktoriin reaktorin yläpuolelta ja kiehutusreaktoriin reaktorin alapuolelta. Tavallisimpia säätosauvojen valmistusmateriaaleja ovat kadmium, hafnium ja boori. Joissakin painevesireaktoreissa käytetään hallintasauvoja, jotka on erityisesti tarkoitettu ylläpitämään ytimen alhaista tehoa. (WNA. 6.2019,)

3.2.2 Moderaattori eli hidastin

Termisillä reaktoreilla moderaattorin tarkoituksena on pienentää virittyneessä tilassa olleen U-236 isotoopin hajoamisessa syntyneiden neutronien keskimääräistä liike-energiaa sirontatörmäyksillä kevyempien ytimien kanssa, jotta haluttu määrä sopivan energisiä neutroneja ei absorboitu isotooppi U-238:n kanssa, vaan absorboituu sen sijaan U-235 isotoopin kanssa, virittäen sen ytimen epävakaaaksi isotoopiksi U-236. Eli hidastaa fissiossa muodostuvien neutronien keskimääräistä liike-energiaa juuri sopivasti, niin että neutronin nopeus on oikea osuakseen parhaalla tavalla polttoaineessa hajoamiskelpoisen uraanin isotooppi U-235:n kanssa.

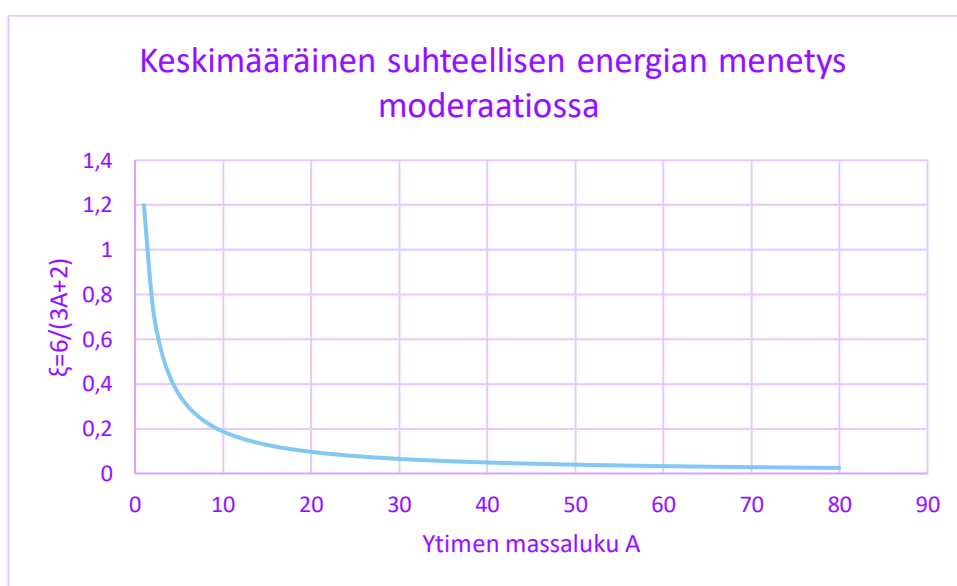
Tavallisesti moderaattorina toimiva materiaali on massaltaan kevyttä kuten grafiittia ja kevyttä tai raskasta vettä, mutta myös muita materiaaleja käytetään. Luonnonuraani vaatii normaalin U-235 isotoopin määrän vuoksi ketjureaktion ylläpitämiseen hidastavan raskaan tritiumveden, mutta pienellä 2–3 % uraani U-235 isotoopin rikastuksella on mahdollista käyttää myös tavallista vettä. (WNA. 6.2019,)

Neutronin pehmeistä sirontaosumista moderaattorin ytimiin seuraa energiamuutos, joka on riittävän suuri, jotta kaappauksen todennäköisyys U-238 ytimeen on merkittävästi pienempi. Kun neutroni tekee pehmeän sirontaosuman ytimeen, jonka massa on M se menettää hiukan kineettistä energiaa ΔE , määrä riippuu

sirontakulmasta ja massasta M . Mitä suurempi ytimen massa M , sitä pienempi kineettisen energian menetys ΔE . (Andrews & Jelley 2017, 332.)

Sen sijaan että käytetään energiasta E riippuvaista energiamuutosta ΔE , A-massaisen materiaalin moderointiteho (KUVIO 3.) voidaan saada logaritmisesta vähenemästä ξ , joka pienillä energiamuutoksilla ΔE vastaa keskimääräistä suhteellista energian menetystä $\Delta E/E$. Kun $A > 1$, ξ pystytään arvioimaan kaavasta (12) (Andrews & Jelley 2017, 332.).

$$\xi = 6/(3A + 2) \quad (12)$$



KUVIO 3. Keskimääräisen suhteellisen energian menetys moderaattorilla

Jos $A=1$, $\xi = 1$, voi nähdä miksi luonnonuraanissa on vain pieni mahdollisuus neutronien hidastumiseen sironnalla uraaniytimistä, ja että niitä ei kaapata U-238 resonansseihin. Resonanssialueen alapuolella, indusoidun fission todennäköisyys on suuri, ja ketjureaktiota pystytään ylläpitämään neutroneilla, joiden energia on noin 0,05 eV. Tämän energiaisista neutroneja kutsutaan termisiksi neutroneiksi, koska niiden värähtelyn ”lämpötila” on sama kuin uraanipolttoaineella. (Andrews & Jelley 2017, 332–333.)

3.3 Paineastia

Paineastia on usein valmistettu vahvistetusta teräksestä. Paineastiaan kuuluu reaktoriydin, neutroneja hidastava osa eli moderaattori ja jäähdytin. Paineastian rakenne voi olla myös polttoainetta täynnä oleva sarja putkia, jossa jäähdytin kulkee ympäröivän hidastimen keskellä tai sisällä (WNA. 6.2019,). BWR-reaktorissa (KUVIO 5.) paineastia on osa lauhdutuspiiriä, kun taas PWR-reaktoreissa (KUVIO 4.) se on erotettu osaksi primääripiiriä, josta lämpöenergia siirtyy sekundääriseen lauhdutuspiiriin.

3.4 Lämmönvaihtimet ja lämmönsiirtomateriaalit

Jäähdytintä käytetään osana reaktorin tehonsäätöä. Useimmiten jäähdytin on reaktoriytimen läpi kulkevaa nestettä, jonka tehtävänä on sitoa ja kuljettaa lämpöä. Kevytvesireaktoreissa käytetään vettä sekä hidastajana, absorboijana että jäähdyttimenä (katso kappale 5.5 RBVR (KUVIO 8.).

Painevesireaktoreissa (KUVIO 4.) käytetään kahta pääasiallista vesikiertoa, primääristä ja sekundääristä. Painevesireaktoreissa primäärisen suljetun jäähdytyskierron tehtävänä on tasata reaktorin tuottamaa lämpöä ja kuljettaa lämpöä pois itse reaktorista. Lämpö johdetaan lämmönvaihtimen avulla edelleen sekundäärikiertoon. Sekundäärikierron paine on alhaisempi kuin primäärikierrossa, ja sen tarkoituksena on luoda optimaaliset turvalliset olosuhteet vesihöyryn tuotantoa ajatellen. Tuotettu vesihöyry ajetaan höyryturbiinin läpi ja lauhduneena takaisin lämmönvaihtimeen.

Kiehutusreaktorissa BWR (KUVIO 5.) polttoainesauvat sijaitsevat reaktorisäiliössä, ja säiliön jäähdyttimenä toimiva vesi kiehuu suoraan vesihöyryksi sopivassa paineessa, ja johdetaan sellaisenaan höyryturbiinille ja edelleen lauhduttimien jälkeen takaisin reaktorisäiliöön.

Jäähdyttimenä ja lämpöenergian siirtoon voidaan käyttää myös erilaisia sulia suolaseoksia. Suolaseoksien etuihin kuuluu erityisesti alhainen jopa negatiivinen laajenemiskerroin, eli kyky sitoa suuria määriä lämpöenergiaa ilman räjähdysmäisen laajenemisen pelkoa. Eri suolaseoksia käyttämällä saadaan nestemäisen sulasuolan lämpötila säädettyä halutulle tasolle lähellä normaalia ilmakehän painetta.

3.4.1 Raskas vesi ja vesi

Raskas vesi mahdollistaa luonnonuraanin polttoainekäytön. Se sisältää vedyn keinotekoisista raskasta isotooppia, jota valmistetaan litiumista. Nykyisissä reaktoreissa raskasta vettä pitää ylläpitää erittäin korkeassa (7-15 MPa) paineessa, jotta se on käytettävissä 100 °C-345 °C lämpötilavälillä. Tällä on suuri vaikutus reaktorin suunnitteluun. Kuitenkin 25 MPa ympärillä superkriittinen vesi kykenee antamaan 45 %:n lämpötehokkuuden. (WNA. 6.2019,)

3.4.2 Helium

Heliumia käytetään korkeapaineisissa kaasureaktoreissa HTGR. Tällöin reaktoria jäähdyttävän kaasun kineettisen energian noustessa kasvaa samalla myös paine. Lämmennyt paineistettu helium johdetaan kaasuturbiinin kautta suurempaan tilavuuteen ja pumpataan jäähtymisen jälkeen takaisin reaktoriin. Heliumin käyttö mahdollistaa suuremmat paine-erot eli suuremman turbiinipaineen kuin vesihöyry.

Tehokas heliumin käyttö vaatii sopivan tiheyden 7-14 MPa:n paineella. Korkea paine tuottaa vaatimuksia, mutta heliumilla voidaan ajaa turbiinia suoraan Braytonin syklillä. (WNA. 6.2019,)

3.4.3 Hiilidioksidi

Hiilidioksidia käytetään lähinnä brittiläisissä AGR-reaktoreissa, joiden toimintalämpötila on korkeampi kuin kevytvesireaktoreissa. Hiilidioksidin tiheys on suurempi kuin heliumin, ja se antaa paremman lämmönsiirtotehokkuuden kuin helium. Se ei myöskään vuoda ulos järjestelmästä kuten helium. On olemassa mielenkiintoa Braytonin syklin ja superkriittisen hiilidioksidin sovellukselle. (WNA. 6.2019,)

3.4.4 Natrium

Natriumia käytetään yleensä nopeaneutronireaktoreissa noin 550 °C:ssa. Ilmakehän paineessa natrium sulaa 98 °C:ssa ja kiehuu 883 °C:n lämpötilassa. Natriumilla on korkea lämmönjohtokyky, ja sen lämpökapasiteetti on noin 1000 kJ/m³ kahden ilmakehän paineessa. Natrium ei syövytä ydinpolttoaineen päällysteessä tai primäärikierrrossa käytettäviä metalleja, mutta se on hyvin yleisreaktiivinen. Erityisesti natrium reagoi eksotermisesti veden tai höyryn kanssa ja tuottaa vetyä. Natrium palaa ilman vaikutuksessa, mutta ei yhtä voimakkaasti kuin vedessä. Natriumilla on alhainen neutronin kaappaamisen poikkipinta-ala. Säteilysuojaus on tarpeellinen, koska osasta Na-23:ta emittoituu Na-24:ta, joka on hyvin gamma-aktiivinen isotooppi 15 tunnin puoliutumisajalla. Isokokoisessa reaktorissa, jossa käytetään 5000 tonnia natriumia GWe:ta kohti, Na-24 aktiivisuus tuottaa 1 TBq/kg vastaavan säteilyn. Mikäli reaktoria ajetaan alas toistuvasti, voidaan jäähdyttimenä käyttää eutektista NaK:ta, joka on huonelämpötilassa nestemäistä, mutta kaliumin hydrofobisuus lisää alttiutta vahingoille. (WNA. 6.2019,)

3.4.5 Lyijy tai eutektinen lyijy-vismutti

Seos on eutektinen, kun seoksen osien yhteinen sulamispiste on mahdollisimman alhainen. Nopea neutroni reaktoreilla lyijy tai eutektinen lyijy-vismutti voivat olla toimintakykyisiä korkeammassa lämpötilassa normaalissa ilmakehän paineessa. Pb-Bi ovat läpinäkyviä neutroneille, mikä parantaa tehokkuutta, koska

suurempi polttoainesauvojen välinen etäisyys tekee mahdolliseksi konvektion jäähdyttimen virtauksen ja polttoainesauvojen välillä, tehden jälkilämmön poistumisen mahdolliseksi. Koska kemiallista reaktiota veden kanssa ei ole, lämmönvaihtimen liitântä on turvallisempi. (WNA. 6.2019,)

Lyijy ja lyijy-vismutti eivät reagoi ilma-altistuksessa, mutta ne aiheuttavat korroosiota ydinpolttoaineen verhoukselle ja teräkselle. Aluksi lämpötilaraja rajoittui 550 °C:een, mutta nykyisillä materiaaleilla saavutetaan 650 °C, ja tulevaisuudessa 800 °C neljännen sukupolven reaktorien kehitystyön yhteydessä käyttämällä oksididisersiolla vahvistettuja teräksiä. Lyijyllä ja Pb-Bi:lla on paljon vettä korkeampi lämmönjohtavuus, mutta lämmönjohtavuus on kuitenkin alhaisempi kuin natriumilla. (WNA. 6.2019,)

Vaikka lyijy aktivoituu rajoitetusti neutroneista, Pb-Bi:n ongelmana on sen tuottama myrkyllinen poloniumin (Po-210) aktivointituote, α -emittorija, jonka puoliintumisaika on 138 päivää. Eutektisen Pb-Bi:n sulamispiste on suhteellisen alhainen 125 °C ja kiehumispiste 1670 °C. Lyijyn sulamispiste on 327 °C ja kiehumispiste 1737 °C, mutta lyijy on paljon yleisempää ja halvempaa kuin vismutti. Pb-Bi -jäähdytteisten nopeaneutronireaktorien kehitystyö rajautuu luultavasti pieniin reaktoreihin. Neljännen sukupolven moduulireaktorit käyttävät eutektista lyijy-vismuttia, jossa on 45 % Pb:a ja 55 % Bi:a, ja todennäköisesti toisiopiirissä käytetään höyryä. (WNA. 6.2019,)

3.4.6 Fluorisuolat

Suola on eutektinen, kun sen osien yhteinen sulamispiste on mahdollisimman alhainen. Fluorin suoloilla on jopa punahehkuisina hyvin korkea kiehumislämpötila ja erittäin korkea tilavuuslämpökapasiteetti. FLiBe:n (LiF-BeF_2) tilavuuslämpökapasiteetti on 4670kJ/m^3 , joka on korkeampi kuin vedellä 7,5 MPa:n paineessa. FLiBe:lla on hyvä lämmönjohtavuus ja alhainen neutroniabsorptio, joten se toimii hyvin moderaattorina eikä FLiBe vahingoitu säteilyn vaikutuksesta. FLiBe on hyvin vakaata kemiallisesti, se absorboi hyvin kaikki fissiotuotteet, eikä reagoi voimakkaasti ilman tai veden kanssa. FLiBe ja grafiitti ovat yhteensopivia ja FLiBe on inertti joidenkin yleisten rakennemateriaalien kanssa.

Neutronikaappauksen yhteydessä muodostuu hiukan gamma-aktiivista F-20:a, jonka puoliintumisaika on 11 sekuntia. (WNA. 6.2019,)

Litium-beryllium fluoridi Li_2BeF_4 suolan ($2\text{LiF} + \text{BeF}_2$) eutektinen versio LiF kiinteytyy $459\text{ }^\circ\text{C}$:ssa ja kiehuu $1430\text{ }^\circ\text{C}$:ssa, ja sitä suositaan MSR ja AHTR/FHR primääripiirin jäähdytyksessä ja puhtaana saastumattomana sen korroosiovaikutus on pieni. Ilman myrkyllistä berylliumia LiF kiinteytyy noin $500\text{ }^\circ\text{C}$:ssa ja kiehuu noin $1200\text{ }^\circ\text{C}$:ssa. FLiNaK (LiF-NaF-KF) on myös eutektista ja se kiinteytyy $454\text{ }^\circ\text{C}$:ssa ja kiehuu $1570\text{ }^\circ\text{C}$:ssa. Sillä on suurempi neutronin sieppauspoikkipinta-ala kuin FLiBe tai LiF mutta sitä voi käyttää välijäähdytyksen kierrossa. (WNA. 6.2019,)

3.4.7 Kloridisuolat

Nopean spektrin sulasuolareaktoreissa kloorisuoloilla on etuna suurempi liukoisuus aktinoidien kuin fluoridien kanssa, mahdollistaen aktiniditrikloridien lisäämisen. Vaikka NaCl:n reaktoriydin ominaisuudet, kemialliset ominaisuudet ja fyysiset ominaisuudet ovat hyvät, suolan korkean sulamispisteen seurauksena se on seostettava mieluiten eutektisena MgCl_2 :n ja CaCl_2 :n kanssa. Pääasiallinen kloorin isotooppi Cl-35 aktivoituu isotoopiksi Cl-36, joten Cl-37 on paljon edullisempaa reaktorissa. Termisessä reaktorissa klorideja tarjotaan vain sekundääripiirin jäähdytyskiertoon. (WNA. 6.2019,)

3.5 Passiivinen hajoamislämpö

Passiivinen hajoamislämpö on seurausta polttoaine uraanin hajoamistuotteiden viivästyneestä emittoitumisesta, ja ilmiö on elintärkeä ketjureaktion hallinnan kannalta. Passiivisen hajoamislämmön poisto on elintärkeä ominaisuus primäärijäähdytyspiirissä. Kun fissioprosessi loppuu, fissiotuotteiden hajoaminen jatkuu ja ydin saa huomattavan määrän lisälämpöä. Alasajon hetkellä se on noin 6,5 % täydestä tehotasosta, mutta tunnissa se tippuu 1,5 % lyhytikäisten fissiotuotteiden hajotessa. Päivän kuluttua hajoaminen alenee 0,4 %:iin ja viikon

kuluttua jäljellä on enää 0,2 %. Syntyvä hajoamislämpö kykenee sulattamaan kevytvesireaktorin ytimen ilman luotettavaa jäähdytystä. Fukushima tuotti vielä 1,5 % jälkilämpöä, kun tsunami poisti laitoksen jäähdytyksen. (WNA. 6.2019,)

Vesijäähdytteisissä reaktoreissa reaktoriytimen läpi virtaavassa jäähdytysvedessä on hieman radioaktiivisuutta. Kun happi kaappaa neutronin, aktivoitumisen seurauksena muodostuu pääasiassa N-16:ta. N-16:n puoliintumisaika on 7 sekuntia, mutta se tuottaa hajotessaan gammasäteilyä. Tästä syystä BWR-kiehutusreaktorien turbiinihalli on suljettu käytön aikana. (WNA. 6.2019,)

4 YDINPOLTTOAINE

Fission perustuvassa ydinreaktorissa käytetään hyväksi uraanin isotooppi U-235:n kykyä kaapata ytimeensä sopivalla liike-energialla oleva neutroni. Neutronin kaappaaminen saa ytimen virittyneeseen tilaan, jossa U-236 ytimellä on liikaa neutroneja pysyäkseen vakana ja tilanne on liikaa ytimen sidosvoimille. Virittymisen seurauksena ydin hajoaa kahdeksi pienemmäksi atomiksi, hajoamistuotteiksi, energiaksi ja vapaiksi neutroneiksi.

Luonnonuraanissa on luonnostaan uraanin yleistä isotooppia U-238 noin 99,3 % ja harvinaisempaa isotooppia U-235 on noin 0,7 %. Uraanin isotooppien suhde luonnossa on luonnostaan vakaa, koska korkeampi suhteellinen määrä U-235:ta tuottaa riittävän U-235 neutronikappauksen poikkipinta-alan ketjureaktiota varten. Sopivasti energisellä neutronilla on juuri riittävästi liike-energiaa eli nopeutta, jotta se ei pääse jatkamaan matkaan, vaan absorboituu osaksi U-235 ydintä tai U-238 ydintä. Jos uraanin isotooppi U-235:n suhteellista osuutta lisätään käytettävässä ydinpolttoaineessa, U-236:n neutroniperäinen fissio, eli neutronin kaappaus todennäköisyys U-235:a kasvaa. (WNA. 6.2019,)

Ydinvoimalaitoksissa käytettävä uraani voi olla joko rikastamatonta luonnonuraania tai rikastettua uraania, jossa U-235:n suhteellista pitoisuutta on nostettu noin 3 prosenttiin. Rikastamaton luonnonuraani sopii ydinpolttoaineeksi, mutta hajoamisen ketjureaktion ylläpitäminen vaatii, että neutronien nopeuden hidastamiseen käytetään tehokkaampaa raskasta vettä tavallisen veden sijaan. Raskas vesi sisältää vedyn keinotekoisista raskasta isotooppia, jota valmistetaan litiumista. (WNA. 6.2019,)

Useimmiten ydinpolttoaine valmistetaan uraanioksidiksi. UO_2 puristetaan pyöreiksi pieniksi pellettimäisiksi sylintereiksi, jotka sijoitetaan isomman polttoainesauvan sisälle. Mikäli polttoainesauvan vaihtaminen on vaikeaa tai harvinaista, sauvoissa voi olla mukana ainesosia, kuluvia hidastimia ja aktivoijia eli lyhytikäisiä fissiotuotteita aktinoideja, joiden tehtävänä on tasata reaktorin neutronivuon intensiteettiä sopivalle tasolle ydinpolttoaineen hajoamisen vaiheen mukaan, tai sen mukaan miten reaktoria halutaan säätää. (WNA. 6.2019,)

4.1 Ydinpolttoaineen tankkaus ja vaihtaminen

Useimmat ydinreaktorit täytyy ajaa alas ydinpolttoaineen täydennyksen ajaksi, jotta reaktoriastia voidaan avata. Tällaisissa tapauksissa ydinpolttoaineen vaihto tapahtuu 12, 18 ja 24 kuukauden välein, jolloin neljäsosa tai kolmasosa polttoainekimpusta vaihdetaan tuoreisiin. CANDY- ja RMBK-tyyppisissä reaktoreissa käytetään paineastian sijasta paineputkia reaktoriytimen sulkemiseen, ja se mahdollistaa kuormituksen aikaisen lataamisen sulkemalla yksittäisiä paineputkia. (WNA. 6.2019,)

Rikastetun uraanin sijaan on mahdollista käyttää luonnollista uraania käyttämällä moderaattorina grafiittia tai raskasta vettä. Luonnollisella uraanilla on sama koostumus kuin louhintahetkellä (0,7 % U-235, yli 99,2 % U-238). Rikastetussa uraanissa halkeamiskykyisen uraanin isotoopin U-235 osuus on noin 3,5–5,0 %. Rikastettua polttoainetta käyttävällä kevytvesireaktorissa käytetään moderaattorina tavallista kevyttä vettä. Kevyt vesi ei ole yhtä tehokas moderaattori kuin raskas vesi tai grafiitti, koska kevyt vesi absorboi ja hidastaa neutroneja yhtä hyvin. Tapahtumassa osa U-238 isotoopeista muuntuu plutoniumiksi ja Pu-239 tuottaa noin kolmanneksen ydinpolttoaineen energiasta. (WNA. 6.2019,)

Useimmissa reaktoreissa polttoaine on keraamista rikastettua uraanioksidia, jonka sulamispiste on 2800 °C. Polttoainepelletit, joiden halkaisija on yleensä 1 cm ja pituus 1,5 cm, ovat tyypillisesti järjestettynä pitkiksi zirkoniumseosputkiksi ja muodostavat sauvan. Zirkonium on kovaa, ruosteenkestävää ja läpäisee neutronit, ollen tavallaan näkymätöntä neutroneille. Monta sauvaa muodostaa polttoainepun, avoimen ristikon, joka voidaan nostaa reaktorin ytimeen ja pois ytimestä. Useimmissa tavanomaisissa reaktoreissa polttoainesauvat ovat noin neljä metriä pitkiä. BWR-polttoainepun voi painaa noin 320 kg ja PWR-nippu 655 kg. Tällöin niissä on 183 kg tai 460 kg uraania. Kummassakin tapauksessa käytetään 100 kg zirkoniumia. (WNA. 6.2019,)

Zirkoniumkauppaa valvotaan, koska mineraalin pääasiallinen käyttökohde on ydinvoimateollisuudessa. Zirkonium on normaalisti yhdessä neutroneja absorboivan hafniumin kanssa, joten ydinlaatuudesta erittäin puhtaasta zirkoniumista valmistetaan sellaista zirkonium-seosta, jossa on 98 % zirkoniumia ja noin 1,5 % tinaa, rautaa, kromia ja nikkeliä materiaalin vahvuuden parantamiseksi. (WNA. 6.2019,)

Teollisuuden tavoitteena on kehittää vahinkosietoisia ydinpolttoaineita, jotka ovat ydinonnettomuutta vastaavissa olosuhteissa vastustuskykyisempiä sulamiselle, ja vastustuskykyisempiä hyvin korkeassa lämpötilassa vetytuotannon aiheuttamalle hapettumiselle (WNA. 6.2019,).

4.2 Polttoainemyrkyt

Reaktorin tehon tasaamiseen käytetään usein kuluvia myrkkijä tuoreen ydinpolttoaineen lataamisen yhteydessä ydinpolttoaineessa tai jäähdyttimessä. Myrkyt toimivat neutroniabsorbereina rapautuen ja hajoten neutronien vaikutuksesta, ja kompensoivat myöhemmin ydinpolttoaineen hajoamisreaktioiden seurauksena syntyviä neutroniabsorbentteja. Gadolinium on parhaiten tunnettu neutronien absorberi ja välttämätön lisäaine laivaston ydinreaktorien toiminnalle. Koska tuoreen ydinpolttoaineen lisääminen voi olla hyvin hankalaa, laivaston reaktorit suunnitellaan toimimaan yli vuosikymmenen kestäväällä ydinpolttoaineen vaihtovälillä ja gadoliniumia yhdistetään keraamisiin polttoainepelleteihin. Vaihtoehtona on ydinpolttoaineen polttoabsorberi, joka sisältää zirkoniumdiboridia ja käytetään ohkaisena peitteenä normaaleille pelleteille. (WNA. 6.2019,)

Gadolinium, jota on yleensä 3 g oksidina polttoainekiloa kohti, vaatii hieman korkeamman ydinpolttoaineen rikastusasteen kompensoituakseen. Noin 17 GWd polton jälkeen gadoliniumin absorboiva vaikutus tasaantuu ollen noin 4 %. ZrB_2 palaa vakaammin ja täydellisesti, eikä sillä ole vaikutusta polttoainepellettien ominaisuuksiin. Gadoliniumia käytetään useimmissa yhdysvaltalaisissa reaktoreissa ja muutamassa aasialaisessa reaktorissa, ja Kiina käyttää tekniikkaa AP1000-reaktoreissaan. (WNA. 6.2019,)

Poltettavat myrkyt sisältävät ytimen, jolla on hyvin suuri terminen absorptio poikileikkauspinta-ala, kuten gadoliini (Gd_2O_2) tai erbia (Er_2O_3), joita on lisätty joihinkin polttoainesauvoihin. Niiden ensisijainen tehtävä on absorboida riittävästi neutroneja, jotta k (KAAVA 6) lähenee yhtä. (Andrews & Jelley 2017, 337.)

4.3 Uraanin tuotantoprosessi

Uraanin tuotantoprosessi tapahtuu usein joko itse kaivosten yhteydessä tai läheisissä rikastamoissa. Raakauraani kuljetetaan seuraavaan jalostusvaiheeseen konversiolaitokselle. (TVO. 23.5.2019,)

Konversiossa raakauraani puhdistetaan kemiallisesti epäpuhtauksista ja muutetaan kemialliselta koostumukseltaan uraaniheksafluoridiksi UF_6 :ksi. Konversiossa ei tapahdu U-235 isotoopin rikastumista. Konversiolaitoksessa uraaniheksafluoridi pakataan viranomaisvaatimukset täyttäviin kuljetussäiliöihin ja siirretään väkevöintilaitokselle. (TVO. 23.5.2019,)

Väkevöinnissä eli isotooppirikastuksessa uraanin U-235-isotooppipitoisuus nostetaan 0,7 %:sta polttoaineessa tarvittavaan 3-4 %:iin. Väkevöity uraani on edelleen uraaniheksafluoridin muodossa. Luonnonuraania tarvitaan kuusi tonnia yhtä kolmiprosenttiseksi väkevöityä uraanitonnia kohti. Väkevöity uraani kuljetetaan paineistettuna erityisvalmisteisessa painesäiliössä ja suojapakkauksessa polttoainetehtaalle. (TVO. 23.5.2019,)

Ydinpolttoaineen valmistuksen aikana uraaniheksafluoridi muutetaan jauhemaiseksi uraanioksidiksi, jauhe puristetaan tabletkiksi ja tiivistetään sintraamalla 1700 °C:n lämpötilassa. Tämän jälkeen polttoainepelletit, joiden halkaisija on 1 cm, ladotaan zirkoniumseoksesta valmistettuihin polttoainesauvoihin. Sauvat kootaan polttoaine-elementeiksi, joiden geometrinen rakenne riippuu polttoainetyypistä. Polttoaine kuljetetaan voimalaitokselle elementteinä. Tuoreen polttoaineen aktiivisuus on vähäistä, eikä se vaadi erityisiä säteilysuojauksia. (TVO. 23.5.2019,)

Noin 48 % TVO:n uraanista saadaan liuottamalla uraani paikan päällä esiintymästä, ja noin 46 % tuotetaan tavanomaisella kaivostekniikalla maanalaisissa kaivoksissa, louhoksissa sekä avolouhoksilla. Loput noin 6 % kertyy muun kaivostoiminnan sivutuotteena. Maailman ydinvoimaloiden uraanitarpeesta primäärituotanto kattaa 85-90 % ja loppuosa, 10-15 %, on peräisin erilaisista varastoista tai kierrätyksestä. (TVO. 23.5.2019,)

Vuonna 2015 uraanin suurimpia tuottajamaita olivat Kazakstan, Kanada, Australia, Nigeria ja Venäjä, joiden yhteistuotanto vastaa 80 % koko maailman tuotannosta. Uraanintuottajat ovat pääsääntöisesti suuria kansainvälisiä yrityksiä. Yhdeksän suurimman tuotantoyhtiön hallussa oli 86 % tuotannosta ja yhdeksän suurinta kaivosta tuotti noin puolet kaikesta uraanista. (TVO. 23.5.2019,)

5 REAKTORITYYPIT

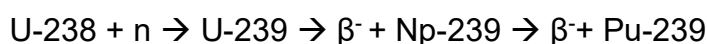
Reaktorin sydämessä olevat kevyet aineet kuten vesi, grafiitti, beryllium tai zirkonium hidastavat (moderoivat) neutroneja, kunnes syntyy terminen tasapaino keveiden hidastusaineiden (moderaattorin) kanssa, ja muodostavat termisen neutronispektrin. Huoneen lämpötilassa todennäköisin nopeus termisen spektrin neutronille on 2200 m/s ja se vastaa energiaa 0,025 eV. Vesireaktoreita ja kaasureaktoreita kutsutaan termisiksi reaktoreiksi. Termiseksi reaktoriksi kutsutaan reaktoria, jossa valtaosa fissioista tapahtuu hitailla termisillä neutroneilla. Suurin osa käytössä olevista reaktoreista on termisiä reaktoreita. Vesireaktorit jakautuvat raskasvesi reaktoreihin ja kevytvesi reaktoreihin. Raskasvesireaktorissa käytetään moderointiin eli hidastimena deuterium (D, ^2H tai H-2) -pitoisuudeltaan rikastettua vettä. Vesireaktorit jaotellaan kiehumisen perusteella kiehutusvesireaktoreihin ja painevesireaktoreihin. (Marttila ym. 1971, 156.)

Kaupalliset ydinvoimalat käyttävät muutamilla U-235 prosenteilla rikastettua polttoainetta, ja termisiä neutroneja, jotka on hidastettu moderaattorilla. Tämän seurauksena ketjureaktio on mahdollinen. Koska kahden neutronilla tuotetun fission välinen aika on tyypillisesti vain 0,1 ms, ketjureaktio voisi olla hallitsematon ilman vapautuneita beta-viivästyneitä neutroneja vaikutuksineen. Näiden neutronien 13 s keskimääräinen viiveaika mahdollistaa riittävän ajan ketjureaktion hallitsemiseen mekaanisesti säätösauvoilla. Säätösauvoissa on ytimiä, joilla on hyvin korkea neutronien absorptio poikkileikkauksen pinta-ala, kuten B-10 ja Cd-113, ja reaktorin sisältämää neutronien kokonaismäärää voidaan hallita säätämällä säätösauvojen syvyyttä reaktoriytimessä. (Andrews & Jelley 2017, 332.-333.)

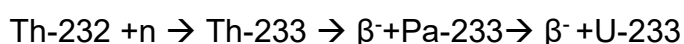
Nopean spektrin neutroneilla (nopeilla neutroneilla) pystytään tuottamaan fissioita, mutta nopean spektrin vaikutusala eli poikkileikkauksen pinta-ala suhteessa isotooppiin U-235 ja ytimeen Pu-239 on hyvin pieni, ja neutronit hidastuvat ennen fissiota niiden kanssa. Kriittisyyden edellytyksenä on tällöin huomattavasti korkeampi U-235 rikastusaste. (Marttila ym. 1971, 157.)

Reaktoria, jossa pääosa fissioista tuotetaan nopeilla neutroneilla, kutsutaan nopeaksi reaktoriksi. Nopeista reaktoreista kehitettiin kahta päätyyppiä, sulaa metallista (natriumia) ja kaasua käyttävä tyyppi. Nopeita reaktoreita voidaan energiantuotannon lisäksi käyttää uuden ydinpolttoaineen tuotantoon, jopa oman kulutuksen ylittäen. Tällöin puhutaan hyötämisestä (breeding). Hyötäminen tapahtuu pitkälle rikastetussa sydämen ulkopuolelle asetetussa hyötövaipassa, missä uraanin isotooppi U-238 muuttuu neutronin absorptioon kautta plutoniumiksi Pu-239. Vaihtoehtoisesti voidaan myös toriumia Th-232 hyötää fissiokelpoiseksi U-233:si. (Marttila ym. 1971, 157.-158.)

U-238 hyötäminen Pu-239:ksi:



Th-232 hyötäminen U-233:ksi:



5.1 Painevesireaktori (PWR)

Vuonna 2016 noin 64 % kaupallisista ydinreaktoreista oli PWR-reaktoreita (KUVIO 4.). PWR kehitettiin sukellusveneille, koska ne hyötyvät happivapaasta energiasta pidempänä toiminta-aikana. Reaktorilämpö tuottaa turbiinin läpi ajettavaa höyryä, ja suhteellisen pienikokoinen ydin on teholtaan taloudellisesti skaalattavissa 1 GW:iin saakka. Ensimmäinen prototyyppi aloitti toimintansa 1953. Reaktorin polttoaine on sauvojen muodossa, joten käytetty ydinpolttoaine on helppoa vaihtaa uuteen. (Andrews & Jelley 2017, 333.)

PWR-reaktorissa on käytössä vertikaalisesti ytimeen aseteltuna polttoainenippuja, joissa on kussakin 200-300 ydinpolttoainesauvaa. Suuressa reaktorissa voi olla noin 150-250 polttoainenippu sarjaa, joissa on 80-100 tonnia uraania. (WNA. 6.2019,)

Reaktoriytimen vesi toimii noin 325 °C:een lämpötilassa, ja vesi tulee pitää 15 MPa:n paineessa kiehumisen ehkäisemiseksi. Painesäiliön höyry ylläpitää painetta. PWR-reaktorin primäärijäähdytyskierrossa vesi toimii samanaikaisesti moderaattorina, ja jos primäärikierron vedestä höyrystyy yhtään, täytyy fissioreaktio ajaa alas. Tämä negatiivinen takaisinkytkentä toimii yhtenä reaktorityypin turvaominaisuuksista. Toissijainen alasajojärjestelmä perustuu primääripiiriin liittävään booriin. Sekundääripiirin paine on alhaisempi ja kierron vesi kiehuu lämmönvaihtimissa, jotka toimivat höyrygeneraattoreina. Sähköä tuottava generaattori saa voimansa höyryturbiinista. (WNA. 6.2019,)

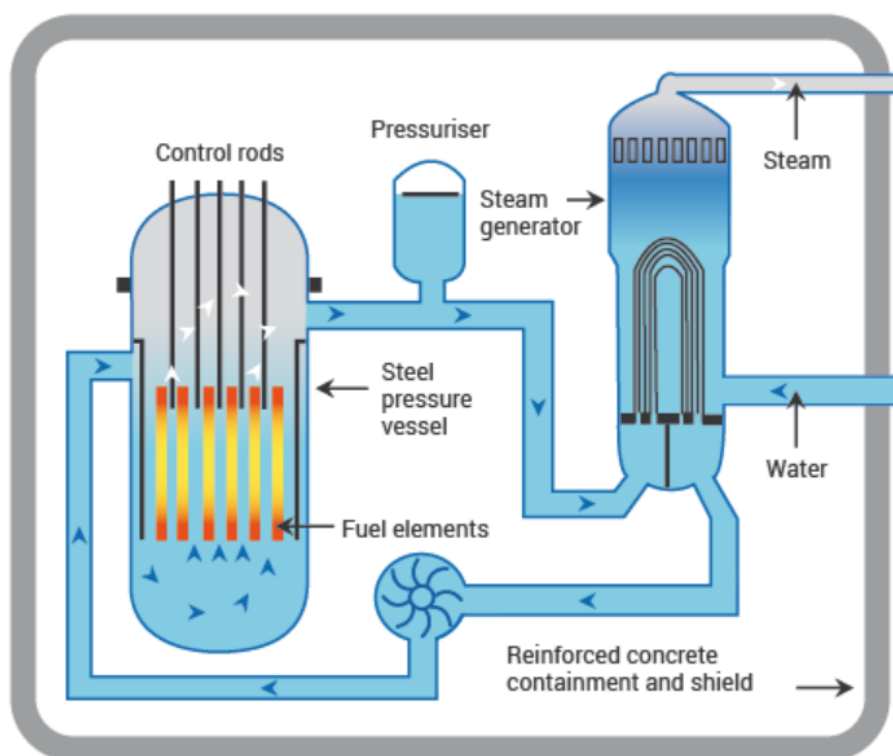
Vesi toimii PWR-reaktorin moderaattorina ja jäähdyttimenä ja se myös absorboi neutroneja. Mikäli primäärikierron paine laskee ja vesi alkaa kiehua, kuplien tuottaminen mitätöi neutronien hidastumista ja absorptiota, ja tällöin ketjureaktio pysähtyy eikä reaktori ei ole enää kriittinen. Neutronien moderaatio vähenee myös ytimen lämpötilan noustessa, koska lämpötilan nousu lisää U-238 resonanssien Dobler-laajenemista, alentaen neutronin todennäköisyyttä paeta U-238 resonanssista. Isotooppi U-238 lämpötilan nousu laajentaa U-238:n värähtelevää kaappauspinta-alaa. Tällöin reaktiivisuudella on negatiivinen lämpötilakerroin, joka stabiloi tehontuotantoa, koska tehon lisäyksen seurauksena lämpötila nousee ja reaktiivisuus laskee. Kuten myös toisinpäin. (Andrews & Jelley 2017, 334.)

PWR-reaktorissa primäärikierron vesi kiertää korkeassa 15 MPa:n paineessa polttoainesauvojen ohi, ja paineen tarkoitus on pitää vesi nestemäisenä noin 315 °C lämpötilassa. Lämpö johdetaan lämmönvaihtimella noin 5 MPa sekundäärikierrolle, jolla tuotetaan vesihöyryä turbiinille. Jäähdytynyt höyry lauhdutetaan ja palautetaan lämmönvaihtimeen. (Andrews & Jelley 2017, 333.-334.)

Ytimen korkea neutronivuo aktivoi reaktorin primäärikierron jäähdytysvettä tehden siitä radioaktiivista. Radioaktiivisuus pidetään primäärikierrossa ja suojakuoren sisällä. Tyypillisesti PWR-reaktorin lämpöhyötysuhde on noin 33 %. (Andrews & Jelley 2017, 334.)

Pitkällä aikavälillä korkea neutronivuo aiheuttaa reaktoriastian haurastumista, koska metallista tulee vähemmän sitkeää, ja se rajoittaa reaktorin käyttöikä. On tarkkailtava myös höyryntuotannon putkien korroosiota. (Andrews & Jelley 2017, 334.)

Pieni todennäköisyys primääripiirin jäähdytyksen menettämisestä vaatii varsinaisen jäähdytyksen lisäksi saataville hätäjähdytysjärjestelmän. Vaikka ydin ei enää olisi kriittinen, polttoainesauvojen fission hajoamistuotteiden hajoaminen voi saada ytimen sulamaan. Tätä mahdollisuutta kutsutaan kiina-ilmiöksi, China syndrome. (Andrews & Jelley 2017, 334.)



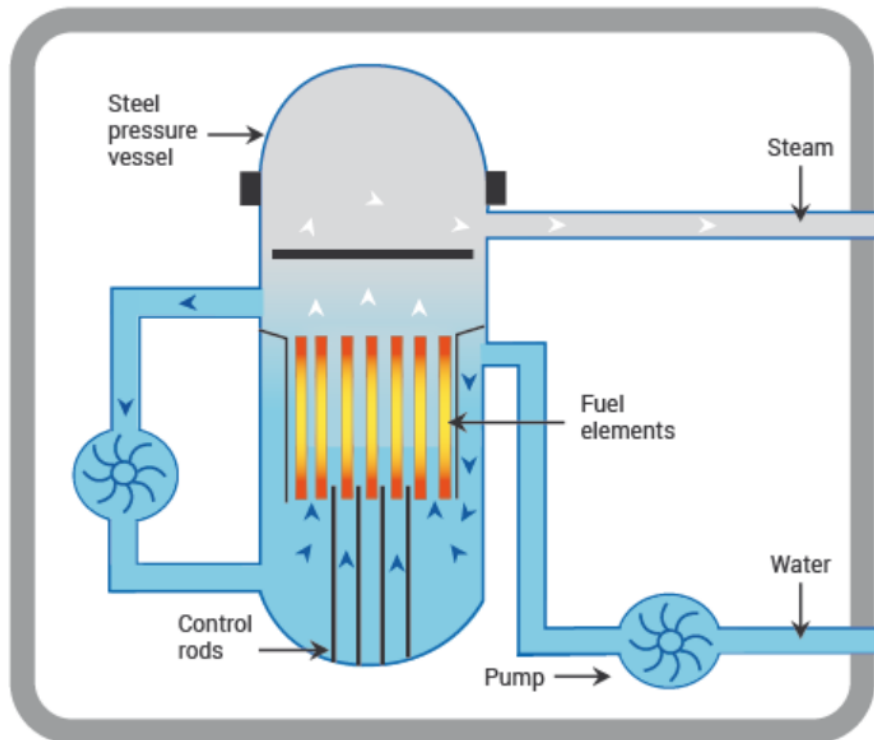
KUVIO 4. Painevesireaktori PWR (WNA. 6.2019,)

5.2 Kiehumusvesireaktori (BWR)

Malli on hyvin samankaltainen painevesireaktorin (PWR) kanssa, pääasiallisena erona reaktorissa käytetään vain yhtä jäähdytyskiertoa. Kyseisen kierron paine on noin 7,6 MPa, jolla vesi kiehuu ytimessä 285 °C lämpötilassa. Reaktori on suunniteltu toimimaan siten, että vedestä noin 12-15 % on höyrynä ytimen yläpuolella, ja seurauksena pienemmällä moderaattorin vaikutuksella saadaan suurempi teho. BWR-reaktorit (KUVIO 5.) voivat toimia PWR-reaktoreita tehokkaammin verkon kuormitusta seuraavissa tilanteissa. (WNA. 6.2019,)

Höyry läpäisee kuivauslevyt eli höyryn erottajat ytimen yläpuolella ja suuntaa suoraan turbiineille, jotka ovat osa reaktorikiertoa. Koska ytimen ympärillä olevassa vedessä on fissiotuotteiden jäämiä, se merkitsee suojattua turbiinia ja ylläpidon aikaista radioaktiivisuudelta suojautumista. Seurauksena on harkittu tasapaino säästämisen ja yksinkertaisemman reaktorimallin välillä. Suurin osa veden radioaktiivisuudesta on hyvin lyhytikäistä, joten kun reaktori on alas ajettu reaktorihallissa on turvallista. Suurimmaksi osaksi fissiotuotteet ovat N-16:sta, jolla on 7 s puoliintumisaika. (WNA. 6.2019,)

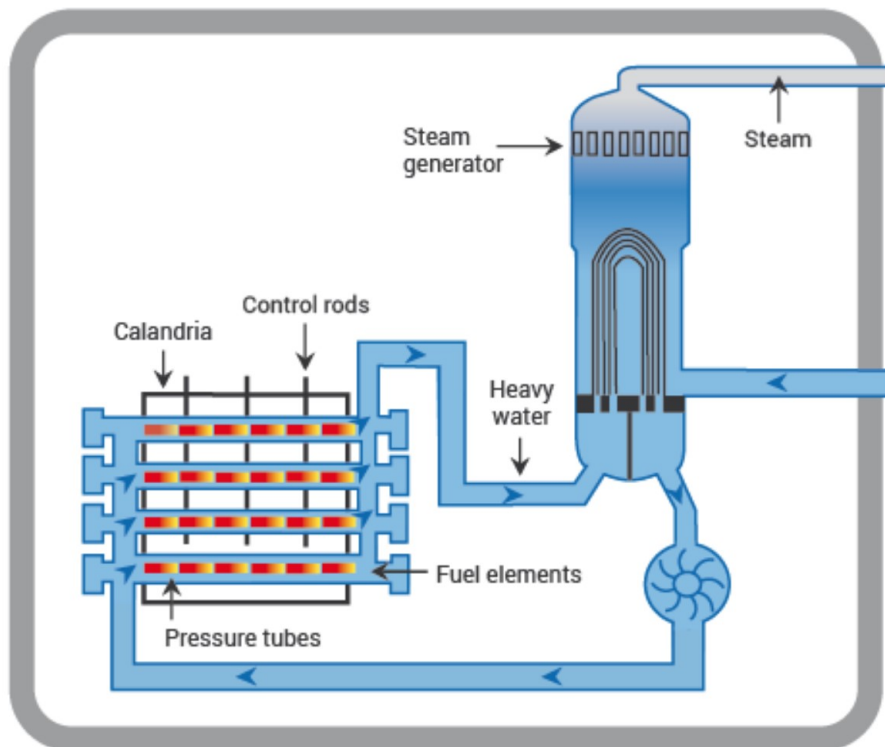
BWR-polttoainenippu sisältää jopa 90-100 polttoainesauvaa, reaktorisydämessä voi olla jopa 750 kokoonpanoa ja 140 tonnia uraania. Toissijainen hallintajärjestelmä sisältää veden virtauksen rajoittamisen ytimen läpi niin, että höyryn ylimäärä yläosassa rajoittaa moderaattorin toimintaa. WNA. 6.2019,)



KUVIO 5. Kiehutavesireaktori BWR (WNA. 6.2019,)

5.3 Paineistettu raskasvesireaktori (PHWR) CANDU

Näitä reaktoreita on kehitetty 1950-luvulta lähtien Kanadassa, ja 1980-luvulla tyyppin kehitystyö aloitettiin myös Intiassa. Yleensä PHWR-reaktori (KUVIO 6.) käyttää rikastamatonta luonnonuraania, jossa on tavanomainen 0,7 %:n pitoisuus U-235 isotooppia. PHWR käyttää neutronien hidastamisessa moderaattorina raskasta vettä D_2O . PHWR-reaktorin tuottama energia uraanikiloa kohti on suurempi kuin muilla reaktorimalleilla, ja se myös käyttää ydinpolttoaineen tehokkaammin kuin muut reaktorit. (WNA. 6.2019,)



KUVIO 6. Paineisteturaskasvesireaktori PHWR/CANDU (WNA. 6.2019,)

Moderattorina toimii calandriaksi kutsuttu suuri säiliö, joka on läpäisty useilla sadoilla vaakatasoisilla paineputkilla, jotka muodostavat ydinpolttoainekanavia. Reaktorin pääasiallinen jäähdytys tapahtuu virtaavalla raskaalla vedellä korkeassa 10,1 MPa:n paineessa ja tavallisesti reaktorilämpötila on 290 °C. Kuten painevesireaktorissa, raskasvesipainereaktori PHWR tuottaa höyryn ja sähköenergian sekundaarikierrossa. Paineistettu putkimalli tekee mahdolliseksi reaktorin ydinpolttoaineen reaaliaikaisen täydentämisen, haluttu paineputki yksinkertaisesti eristetään jäähdytyskierrosta, ilman koko reaktorin sammuttamista. Isokokoiset paineastia mallit ovat halvempia suunnitella, mutta paineputkien kestävyyttä pitää kehittää. (WNA. 6.2019,)

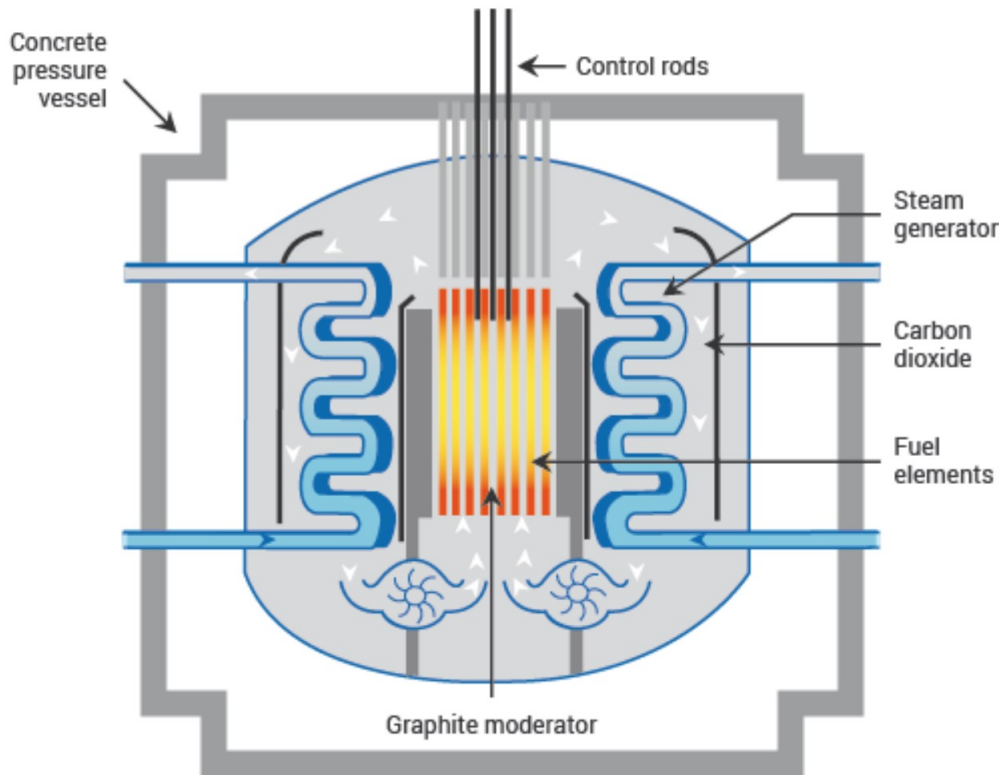
CANDU-reaktorin polttoainekokoonpano koostuu 37 kappaleen nipuista puoli metriä pitkiä polttoainesauvoja, keraamisia zirkoniumseosputkia, joissa on keraamisia polttoainepellettejä, ja tukirakenteesta, jossa 12 nippua makaa polttoainekanavan lopussa. Ohjaussauvat läpäisevät calandrian pystysuunnassa ja toissijaisen alasajon järjestelmä sisältää moderaattoriin lisättävän gadoliniumin. Myös calandrian säiliön rungon läpi kiertävä raskasvesi moderaattori tuottaa hiukan lämpöä. (WNA. 6.2019,)

CANDU-reaktorit pystyvät toimimaan erilaisilla polttoaineilla. Niitä voi ajaa LWR-reaktorien käyttämällä kierrätyspolttoaineella, tai sen seoksella ja rikastamalla jääneellä köyhdytetyllä uraanilla. Sellaisen PWR reaktorin käytetyn polttoaineen U-235 köyhtyneestä uraanista, jonka kapasiteetti on 4000 MWe voidaan tuottaa ydinpolttoaine 1000 MWe:n kapasiteettiselle CANDU-reaktorille. (WNA. 6.2019,)

5.4 Kehittyneet kaasujäähdytteiset reaktorit (AGR)

Brittiläisissä toisen sukupolven kaasujäähdytetyissä reaktoreissa käytettiin moderaattorina grafiittia ja pääasiallisena jäähdyttimenä hiilidioksidia. Ydinpolttoaineena käytettiin ruostumattomia teräsputkia, jotka oli täytetty uraanioksidipelleteillä, joiden U-235 pitoisuus oli 2,5-3,5 %. Reaktorin malli on kiinteä ja hiilidioksidi kiertää paineastian ja betonin sisällä. Hiilidioksidi kiertää ytimen läpi ja sen jälkeen se siirtyy ytimen ulkopuolella olevan höyrygeneraattorin. Ohjauksavat läpäisevät moderaattorin, ja ytimen toissijainen sammutusjärjestelmä perustuu typen lisäämiseen jäähdyttimenä toimivaan kaasuun. (WNA. 6.2019,)

AGR (KUVIO 7.) on kehitetty Magnox-reaktorista. Magnox-reaktorissa käytetään moderaattorina grafiittia ja se on CO₂ jäähdytteinen. Reaktori käyttää metallista luonnollista uraania ja sekundäärisenä jäähdyttimenä vettä. Yhdistyneen kuningaskunnan viimeinen Magnox-reaktori suljettiin vuonna 2015. (WNA. 6.2019,)

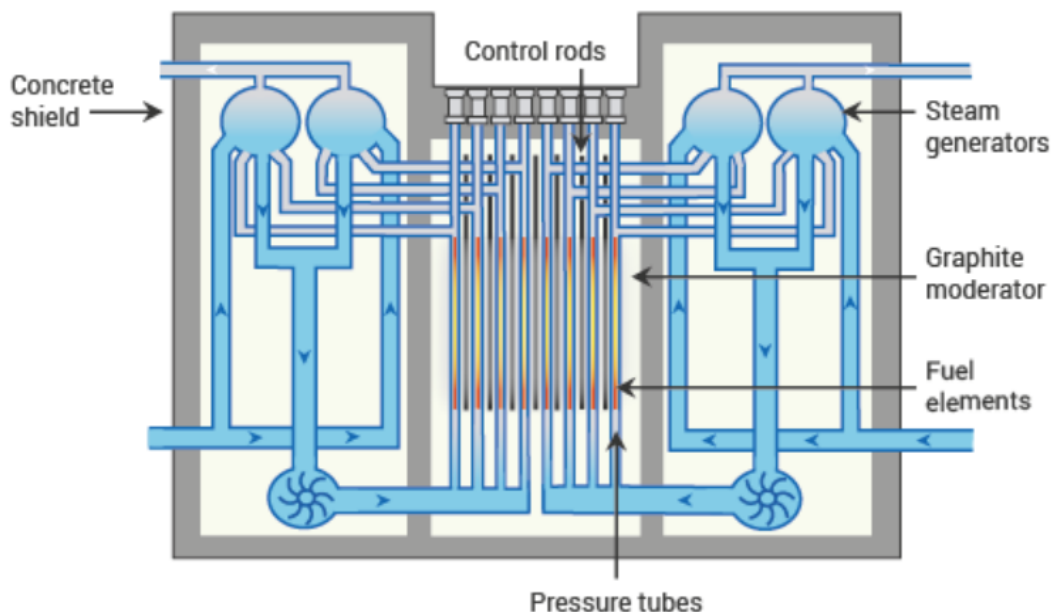


KUVIO 7. Kehittynyt kaasujäähdytteinen reaktori (WNA. 6.2019,)

5.5 Grafiittimoderoitu kevytvesireaktori (RBMK)

RBMK on neuvostoliittolainen plutoniumin tuotantoon kehitetty reaktori. RBMK-reaktorissa käytetään seitsemän metriä pitkiä pystysuoria paineputkia, jotka kulkevat grafiittisen moderaattorin lävitse (KUVIO 8.). Reaktori on vesijäähdytteinen, ja vesi kiehuu reaktoriytimessä 290 °C lämpötilassa. Polttoaine on matalarikasteista uraanioksidia, 3,5 metrisinä polttoainenuppuina. Koska moderaatio perustuu laajalti muokattuun grafiittiin, jatkuvaa kiehumista yksinkertaisesti pienennetään ilman varsinaisen fissioreaktion hidastamista moderoimalla neutronien absorptiota, jolloin positiivinen palautekerroin voi nousta ongelmaksi. Tätä reaktortyyppiä ei ole rakennettu koskaan Neuvostoliiton ulkopuolelle. (WNA. 6.2019,)

A Light Water Graphite-moderated Reactor (LWGR/RBMK)



KUVIO 8. Kevytvesi Grafiitti-moderoitu reaktori (WNA. 6.2019.)

Neuvostomallinen korkeatehoinen kanavareaktori RBMK on vesijäähdytteinen, ja jäähdytys tapahtuu yksikkökohtaisesti kullekin polttoainekanavalle, yksilöllisellä sauvajäähdytyksellä, vesijäähdytyksellä, ja käyttämällä moderaattorina grafiittia. Reaktorityyppi tunnetaan myös kevytvesigrafiittireaktorina (LWGR). Aivan kuten kiehusreaktorissa (BWR), vesi kiehuu polttoainekanavissa noin 6,9 MPa:n paineessa ja höyryn erotus tapahtuu niiden yläpuolella yhdessä kierrossa. RBMK poikkeaa muista reaktorityypeistä, koska reaktori suunniteltiin alunperin plutoniumin tuotantoreaktoriksi. Reaktori on tarkoitettu ja sitä on käytetty Venäjällä sekä plutoniumin että energian tuotantoon. (WNA. 6.2019.)

Grafiittimoderaattorin ja kevytvesijäähdytyksen yhdistelmää ei löydy muista maailman tehoreaktoreista. Tšernobylin onnettomuus osoitti useat RBMK-mallin ominaisuuksista turvattomiksi, kuten säätösauvan muoto ja positiivinen tyhjiökerroin. Suuri määrä merkittäviä mallin muutoksia on tehty sen jälkeen, kun Tšernobylin onnettomuus toi nämä ongelmat esille. (WNA. 6.2019.)

5.5.1 Polttoaine (RBMK)

Polttoaine on kevyesti rikastettuja uraanioksidipellettejä 3,65 m pitkässä zirkoniumseosputkessa. Jokaisessa paineputkessa on kaksi polttoainevaunua, ja vaunussa oleva polttoainekokoonpano koostuu 18:sta sylinterimuotoon järjestetystä polttoainesauvasta. (WNA. 6.2019,)

5.5.2 Reaktorin paineputket (RBMK)

Reaktorin jokainen polttoainekokoonpano on sijoitettu omaan pystysuuntaiseen noin 7 metriä pitkään paineputkeen tai kanavaan. Jokainen kanava jäähdytetään yksilöllisesti paineistetulla vedellä, ja vesi kiehuu paineputkessa noin 290 °C:een lämpötilassa. (WNA. 6.2019,)

5.5.3 Reaktorin ydinpolttoaineen vaihto (RBMK)

Polttoainevaihto perustuu yksilöllisiin polttoaineen kokoonpanoihin, jotka asetettiin vaunuina omiin kanaviinsa. Koska polttoaineen kokoonpanot ovat eristettyjä, kokoonpanoja voidaan laskea ja nostaa reaktoriin ja pois reaktorista. RBMK-reaktori on alun perin suunniteltu plutoniumin tuotantoon, ja reaktorityypin siviilikäyttö alkoi poliittisena eleenä, "Rauhan atomina". (WNA. 6.2019,)

5.5.4 Moderaattori grafiitti (RBMK)

Sarja grafiittilohkoja erottaa paineputket toisistaan ja ympäröi niitä. Ne toimivat moderaattorina hidastaen fission vapautuneita nopeita neutroneja, niin että jatkuva fission ketjureaktio pystytään ylläpitämään. Lämmön siirtymistä lohkojen välillä tehostetaan heliumin ja typen kaasuseoksella. (WNA. 6.2019,)

5.5.5 Säätosauvat (RBMK)

Fission tasoa hallitaan neutroneja absorboivilla boorikarbidi-hallintasauvoilla. Muutama pienikokoinen reaktorin tehoa tasaava sauva sijoitetaan alhaalta ylös reaktoriyttimeen. Automaattinen säätö, manuaalinen säätö tai hätätiläsäätö asettaa pääasialliset hallintasauvat vertikaalisesti ylhäältä alas. Automaattiset sauvat säätyvät ytimen sisäisien fissiolämpöä tarkkailevien ilmaisimien palautteen mukaan. Jos esiintyy poikkeamaa normaaleista toimintaparametreista, kuten reaktorin noussut tehotaso, sauvat voidaan pudottaa ytimeen alentamaan tai pysäyttämään reaktorin aktiivisuus. Toiminnan aikana ytimessä on useita säätosauvoja. (WNA. 6.2019,)

5.5.6 Jäähdytin (RBMK)

Suurimman fissiolämmön poistamiseksi paineputkien läpi kierrätetään vettä kahden erillisen jäähdytyskierron kautta, joissa kummassakin on kaksi pumppua. Jos jompikumpi jäähdytyskierto on häiriintynyt, ytimen hätätilajäähdytysjärjestelmä alkaa toimia. (WNA. 6.2019,)

5.5.7 Hörynerottimet (RBMK)

Kummassakin kahdesta kierrosta on kaksi höyryrumpua, höyrykalvoa tai höyrynerotinta, joilla höyryturbiinille syötetään höyryä sähkön tuottamiseksi ja jokaisessa syötössä on höyrygeneraattori. Lauhde johdetaan takaisin osaksi jäähdytyskiertoa. (WNA. 6.2019,)

5.5.8 Suojaus (RBMK)

Läntisessä mielessä hyväksyttävää suojausta ei ole. Reaktoriydin on sijoitettu kammioon, joka on vahvistettua betonia ja toimii kuten säteilykilpi. Ydin on raskaan teräslevyn päällä, ja kaikkein päällimmäisenä on 1000 tonnin teräslevy. Hitsatut polttoainekanavien laajennukset läpäisevät alemman ja ylemmän levyn. Jäähdytysjärjestelmän höyrynerottimilla on omat betonikilpensä. (WNA. 6.2019,)

5.5.9 Positiivinen tyhjiökerroin (RBMK)

Reaktoriydin, joka jäähdytetään kiehuvalle vedelle, sisältää paljon höyryä. Koska vesi on tehokkaampi jäähdytin ja neutronien absorboija kuin höyry, höyrykuplien osuuden muutos jäähdytysvedessä johtaa ytimen reaktiivisuuden muutokseen. Tätä suhdetta kutsutaan tyhjiöreaktiivisuuskertoimeksi. Negatiivisella tyhjiökertoimella ytimen höyrytilavuuden kasvu johtaa alentuneeseen reaktiivisuuteen. Niissä reaktoreissa, joissa vesi toimii neutroneja hidastavana moderaattorina ja jäähdyttimenä, höyrytilavuuden kasvu vähentää ketjureaktion ylläpitoon vaadittujen neutronien moderaatiota, jonka seurauksena tehon aleneminen on perusominaisuus länsimaisissa reaktoreissa. (WNA. 6.2019,)

Reaktorimalleissa, joissa moderointi ja jäähdytys tapahtuu eri materiaaleilla, höyryn ylimäärä alentaa reaktorin jäähdytystä, mutta ulkopuolisen moderaation seurauksena ketjureaktio jatkuu. RBMK-reaktorissa jäähdytysveden neutronien absorptio on merkittävin tekijä, ja neutronien absorption väheneminen reaktorissa höyryn tilavuuden kasvaessa lisää neutronien kokonaismäärää ja ketjureaktiota, jolloin järjestelmän reaktiivisuus lisääntyy. (WNA. 6.2019,)

Tyhjiökerroin on yksi reaktiivisuuden kokonaistehokertoimen tekijöistä, mutta RBMK-reaktoreissa tyhjiökerroin on hallitseva tekijä ja heijastaa reaktiivisuuden riippuvuutta reaktoriytimen höyrypitoisuudesta. Tšernobylin onnettomuudessa tyhjiöreaktiivisuuskerroin oli niin suuri, että se ylitti kaikki muut reaktiivisuuteen vaikuttavat tekijät. Tehon kasvaminen tuotti lisää höyryä lisäten tehon kasvua. Ylimääräinen lämpö nosti jäähdytyspiirin lämpötilaa lisäten höyryntuotantoa ja vähentäen jäähdytystä ja neutronien absorptiota, minkä seurauksena oli tehon jyrkkä kasvu tehon tasoon, joka oli lopulta sata kertaa reaktorin nimelliskapasiteetti. (WNA. 6.2019,)

RBMK-reaktorissa tyhjiökerroin määräytyy reaktioytimen konfiguraatiolla, johon vaikutetaan säädettävällä toiminnallisuusmarginaalilla, ja epätasaisesti määriteltynä käytönaikainen reaktiivisuusmarginaali (ORM) vastaa reaktoriin jääviä omaa nimellisarvoaan vastaavien säätösauvojen lukumäärää. Vaikuttaa siltä, että Tšernobylin operaattorit luottivat säädetyin minimimäärän, 15 säätösauvan riittävän riippumatta reaktorisydämen kulloisestakin kokoonpanosta. Operaattorit eivät olleet tietoisia, että reaktorin hätäsulkujärjestelmä vaikutti tosiasiasa reaktorin toimintaan sitä kiihdyttävästi, joten hallintasauvan lisääminen tosiasiasa lisäsi aktiivisuutta ytimen alaisiin reaktioihin. (WNA. 6.2019,)

Onnettomuuden aikaan 15 säätösauvan vaikutus muuttui tavallista korkeammin rikastetun ydinpolttoaineen käytön seurauksena. Hallitsemattoman suuret vaikutukset tyhjiökertoimeen pyrittiin ehkäisemään lisäämällä ydinpolttoaineeseen absorberia lisääntyneen rikastusasteen myötä. Nämä absorberit olisivat poistuneet palamisen seurauksena, siirtäen positiivista tyhjiötekijää edelleen positiivisen suuntaan lisäten herkkyyttä säätösauvoille ja suojasauvoille. (WNA. 6.2019,)

5.6 Kehittyneet ydinreaktorit

Reaktorit erotellaan yleisesti useisiin sukupolviin. Ensimmäisen sukupolven reaktorit kehitettiin 1950-1960 luvulla, ja viimeinen niistä suljettiin vuoden 2015 lopulla. Ydinpolttoaineena niissä käytettiin usein luonnollista uraania ja moderaattorina grafiittia. Toisen sukupolven reaktorit käyttävät tyypillisesti rikastettua polttoainetta ja ne jäähdytetään ja moderoidaan vedellä. Kolmannen sukupolven kehittyneet reaktorit kehitettiin näistä reaktoreista. Ensimmäiset aloittivat toimintansa Japanissa 2018, Kiinassa ja yhdistyneissä arabiemiraateissa. Muut ovat rakenteilla ja valmiita tilattavaksi. Ne ovat toisen polven kehitelmiä, joissa on paranneltu turvallisuutta. Toisen ja kolmannen sukupolven reaktoreiden välillä ei ole selkeää eroa. (WNA. 6.2019,)

Neljännän sukupolven mallit ovat vielä piirtopöydällä ja niissä oletetaan olevan suljettu polttoaineen kierto ja kyky polttaa pitkäikäisiä aktinoideja, joita nykyään muodostuu käytetyn polttoaineen osana, niin että hajoamistuotteet ovat korkeasteista jätettä. Kehitteillä on seitsemän reaktorimallia, joista viisi tulee olemaan nopeaneutronireaktoreita. Neljä tulee käyttämään jäähdytykseen fluoridi- tai nesiummetalli jäähdytintä/jäähdytystä, eli ne toimivat alhaisessa paineessa. Kaksi tulee olemaan kaasujäähdytteisiä. Useimmat tulevat toimimaan paljon korkeammassa lämpötiloissa kuin nykyiset vesijäähdytteiset reaktorit. (WNA. 6.2019,)

6 YDINENERGIAN HISTORIAA

Maailman ensimmäinen tunnettu ydinreaktori toimi nykyisen Etelä-Afrikan alueella Oklossa luonnollisessa uraaniesiintymässä noin kaksi miljoonaa vuotta sitten. Kyseessä oli luonnollinen rikas uraanimalmio ja reaktorin hidastimena toimi sadevesi. Maailman ensimmäinen tunnettu ihmisen ohjaama itseään ylläpitävä ketjureaktio toteutettiin grafiittihidasteisesti luonnonuraanilla vuonna 1942 Yhdysvalloissa. Kyseinen ketjureaktio tapahtui Enrico Fernin ohjauksessa (WNA. 6.2019,).

Nykyisin käytetyt tavanomaiset ydinreaktorit on kehitetty laivaston käyttöön, jonka seurauksena niiden jäähtytyksessä ja energian välityksessä käytetään vettä ja vesihöyryä. Ydinvoimalat ovat yhä perustaltaan höyrykoneita painekattiloineen.

6.1 Atomin luonteen löytäminen

Uraanin löytäjänä pidetään saksalaista kemistiä Martin Klaprothia. Hän löysi uraanin vuonna 1789 ja nimesi sen planeetta Uranuksen mukaan. Vuonna 1895 Wilhelm Röntgen löysi ionisoivan säteilyn johtamalla sähkövirtaa tyhjän lasiputkityhjiön läpi. Vuonna 1896 Henri Becquerel teki havainnon, että radiumia ja uraania sisältävä pilkemaalma aiheutti valokuvauslaatan tummenemisen. Hän osoitti asian johtuvan beetasäteilyn ja alfasäteilyn emittoitumisesta. Villard löysi pikivälkkeestä kolmannen säteilytyypin gammasäteet eli röntgensäteet. Vuonna 1896 Pierre ja Marie Curie antoivat ilmiölle nimen radioaktiivisuus ja vuonna 1898 he eristivät pikivälkkeestä poloniumin ja radiumin. Radiumia on käytetty aikoinaan lääketieteellisiin tarkoituksiin, sillä 1898 Samuel Prescott osoitti radioaktiivisuuden tuhoavan ruuan bakteereja. (WNA. 6.2019,)

Vuonna 1902 Ernest Rutherford osoitti, että spontaani radioaktiivisuus emittoi alpha- ja betahiukkasia ytimeistä luoden toisen alkuaineen. Vuonna 1919 hän ampui hiukkaslähteenään radium alfahiukkasia tyypen ja huomasi, että ytimessä tapahtui uudelleenjärjestymistä ja hapen muodostusta. Niels Bohr on toinen tiedemies, joka tutki 1940-luvulla elektronien järjestäytymisestä atomin ytimen ympärille. (WNA. 6.2019,)

Vuonna 1911 Frederick Soddy havaitsi kemiallisilta ominaisuuksiltaan samanlaiset luonnollisten alkuaineiden isotoopit. Samana vuonna George de Hevesy osoitti radioaktiivisten ytimien arvon merkkiaineina. (WNA. 6.2019,)

Vuonna 1932 James Chadwick löysi neutronin, ja Cockcroft ja Walton pommittivat atomeja kiihdytettyillä protoneilla tuottaen muutoksia atomiytimiin. Vuonna 1934 Irene Curie ja Frederic Joliot osoittivat, että jotkin näistä loivat keinotekoisia radionuklideja. Seuraavana vuonna 1935 Enrico Fermi teki havainnon, että käyttämällä neutroneja protonien sijaan syntyvien keinotekoisien nuklidien valikoima on monipuolisempi. (WNA. 6.2019,)

Fermin jatkamat kokeilut tuottivat pääasiassa tutkimuskohdetta raskaampia alkuaineita, mutta uraanilla hän sai aikaan myös joitakin tutkimuskohdetta paljon kevyempiä alkuaineita. Vuoden 1938 lopulla Berliinissä Otto Hahn ja Fritz Strassmann osoittivat kyseisen kevyemmän alkuaineen olevat bariumia ja että muut, joiden massa oli noin puolet uraanin massasta, olivat hajoamistuotteita. Nils Bohrin alaisuudessa tutkimusta tekevät Lise Meitner ja Otto Frisch selittivät ilmiön osoittamalla, että ydin oli kaapannut neutronin, josta aiheutui värähtelyä, jonka seurauksena ydin hajosi kahteen erikokoiseen osaan. Meitner ja Frisch laskivat, että tästä fissiosta vapautuva energia on noin 200 miljoonaa elektronivolttia. Tammikuussa 1939 Frisch varmisti asian kokeellisesti. Kyseessä on ensimmäinen kokeellinen vahvistus Albert Einsteinin aiemmin vuonna 1905 julkaistulle massan ja energian vastaavuuden yhtälölle. (WNA. 6.2019,)

6.2 Ydinfission valjastaminen

Nämä vuoden 1939 tutkimukset saivat aikaan aktiivisuutta useisiin laboratorioihin. Hahn ja Strassmann esittivät, että fissio ei vain vapauta runsaasti energiaa, vaan että vapautuu myös ylimääräisiä neutroneja, jotka voivat osumalla toisiin uraaniytimiin ylläpitää ketjureaktiota ja vapauttaa runsaasti energiaa. Oletus vahvistettiin kokeellisesti Joliotin ja kollegojen työllä Pariisissa ja Leo Szilardin ja Fermi työllä New Yorkissa. (WNA. 6.2019,)

Myöhemmin Bohr ehdotti, että fissio voisi esiintyä todennäköisemmin U-235 isotoopilla kuin U-238 isotoopilla, ja että fissio tapahtuu tehokkaammin hitailla kuin nopeilla neutroneilla. Myöhemmin Szilard ja Fermi vahvistivat asian, ja he suosittelivat moderaattoria hidastamaan emittoitavia neutroneja. Bohr ja Wheeler jatkoivat ajatusta luoden fissioprosessin klassisen analyysin, paperi julkaistiin vain kaksi päivää ennen toisen maailmansodan puhkeamista 1939. (WNA. 6.2019,)

Toinen tärkeä tekijä on, että luonnollisessa uraanissa tiedetään olevan vain 0,7 % U-235:ta, lopun 99,3 % isotooppia U-238, näillä isotoopeilla on samanlaiset kemialliset ominaisuudet. Puhtaan U-235:n rikastaminen kemiallisesti U-238:ta voisi olla vaikeaa, ja tulisi vaatimaan pienten fysikaalisten eroavuuksien hyväksi käyttämistä. Tavallisen U-235 isotoopin pitoisuuden ylittävä osa tunnetaan ”rikasteena”. (WNA. 6.2019,)

Vuonna 1939 Francis Perrin kehitti käsitteen ”uraanin kriittinen massa”, antaen samalla fissioon perustuvan atomipommin konseptin viimeisen puuttuvan osan. Uraani vaatii kriittisen massan kestävään energian tuotantoon. Rudolf Peierls Birminghamin yliopistosta jatkoi Perrinin teoriaa ja Peierls tuotti atomipommin kehitykselle merkityksellisiä laskelmia. Perrinin Pariisin ryhmä jatkoi tutkimusta osoittaen, että ketjureaktio voi olla kestävä sellaisessa uraani-vesiseoksessa, jossa ylimääräisiä neutroneja syötetään järjestelmään ja neutronit hidastetaan veden avulla. He esittivät myös ajatuksen ydinreaktion hallitsemisesta lisäämällä absorboivaa materiaalia neutronien lukumäärän rajoittamiseksi. Tämä on oleellinen ydinvoimalan toiminnan perusasia. (WNA. 6.2019,)

Peierls oli ollut Werner Heisenbergin oppilas. Heisenberg toimi huhtikuusta 1939 Saksan varustelutoimiston alaisuudessa Saksan ydinenergiaprojektin johtajana. Aluksi sotilaallisia ydinenergian sovelluksia oli suunnitteilla, mutta tavoite hylättiin epäkäytännöllisenä vuonna 1942. Saksan Uranverein-projektin olemassaolo oli tärkein kannustin Britannian ja USA:n atomipommin kehitykselle. (WNA. 6.2019,)

6.3 Atomipommin luominen

Brittiläiset tiedemiehet painostivat hallitustaan. Paenneet fyysikot Peierls ja Frisch, jotka jäivät Englantiin sodan puhkeamisen jälkeen, julkaisivat kolmisivuisen dokumentin "Frisch-Peierls muistion" antaen merkittävän sysäyksen atomipommin käsitteelle. Muistiossa he ennustivat, että noin 5 kg:sta puhdasta U-235:ta voi valmistaa hyvin voimakkaan atomipommin, joka on verrannollinen useaan tonniin dynamiittia. He ehdottivat menetelmää pommin räjäyttämiseksi, ja miten U-235 isotooppia voitaisiin tuottaa, ja spekulivat varsinaisen räjähdysvaikutuksen lisänä olevia mahdollisia säteilyvaikutuksia. Peierls ja Frisch ehdottivat lämpödiffuusiota menetelmänä U-235:n rikastamiseen. Julkaisuhetkellä muistio sai merkittävää vastakaikua Britanniassa, mutta vain pienen huomion Yhdysvalloissa. (WNA. 6.2019,)

MAUD-komitea, eli ryhmä Britanniaan asettuneita eteviä tiedemiehiä ohjasi tutkimusta Birminghamin, Bristolin, Cambridgen, Liverpoolin ja Oxfordin yliopistoissa. Birminghamin yliopiston ja Imperiumin kemiallisen teollisuuden (ICI) vastuualueella oli kaasumaisten ainesosien ja puhtaan metallisen uraanin tuottamisen kemialliset ongelmat. Vuonna 1940 tohtori Philip Baxter valmisti ensimmäisen pienen erän kaasumaista uraaniheksafluoridia professori James Chadwickille, ja myöhemmin samana vuonna ICI sai tulevaisuuden työskentelyä varten virallisen sopimuksen valmistaa 3 kg uraaniheksafluoridia. Useimpien muiden yliopistojen rahoitus tapahtui yliopiston sisäisesti (Brittiyliopistot ovat omavaraisia: kääntäjän huomio). (WNA. 6.2019,)

Cambridge tuotti työllään kaksi tärkeää dokumenttia. Ensimmäinen oli kokeellinen todistus, että ketjureaktio voidaan ylläpitää hitailla neutroneilla raskaan veden ja uraanin seoksessa, jolloin poistuvien neutronien määrä eli saanto on

suurempi kuin sisään syötetty määrä neutroneja. Toinen oli Bretcherin ja Featherin työ, joka perustui Harbalin ja Kowalskin työhön pian Berliinistä Pariisiin saapumisen jälkeen. Kun U-235 tai U-238 absorboi hitaita neutroneita, U-235 isotoopin fission todennäköisyys on paljon suurempi kuin U-238 isotoopilla. U-238 muodostaa mieluummin uuden isotoopin U-239, ja tämä isotooppi emittoi elektronin muodostaen uuden ytimen, jonka massaluku on 239 ja järjestysluku 93. Myös tämä ydin emittoi elektronin ja muodostaa uuden ytimen, jolla massa on 239 ja järjestysluku 94, ja paljon pidempi puoliintumisaika. Bletscher ja Feather väittivät teoreettisin perustein, että alkuaine 94 hajoaa helposti sekä nopealla että hitaalla neutronilla, ja että sillä on lisäetuna kemiallinen erilaisuus uraanin kanssa, joten ne ovat erotettavissa toisistaan. Vuonna 1940 tämä uusi kehitystyö vahvistettiin myös Yhdysvalloissa McMillanin ja Abelsonin riippumattomalla työllä. Cambridgen ryhmän Dr Kemmer ehdotti uudelle alkuaineelle 93 nimeä neptunium ja alkuaineelle 94 nimeä plutonium kahden Uranuksen takaisen uloimman planeetan analogiana. Onnekkaisesti amerikkalaiset ehdottivat sattumalta samoja nimiä. (WNA. 6.2019,)

6.4 Käsitteiden kehittäminen

Vuoden 1940 lopulla usea ryhmä MAUD-komitean koordinoimia tiedemiehiä sai suhteellisen pienillä kuluilla aikaan merkittävää edistymistä. Kiireellisyys ei ollut järkevää, ja kaikki työ pidettiin salaisena, kun Yhdysvalloista alkoi tulla useita julkaisuja 1940. (WNA. 6.2019,)

Maaliskuussa 1941 vahvistui yksi tärkeimmistä tiedon osista, eli U-235:n fission todennäköisyyden poikkipinta-ala. Vuonna 1940 Peierls ja Frisch olettivat, että melkein jokaisen neutronin törmäyksen seurauksena U-235 atomin kanssa voi olla fissio, ja että nopeat ja hitaat neutronit olisivat yhtä tehokkaita. Myöhemmin havaittiin, että hitaammat neutronit olivat huomattavasti tehokkaampia. Neutronien nopeudella on suuri merkitys ydinreaktorissa, mutta ei niinkään pommia ajatellen. Peierls totesi, että ei ole epäilystäkään, että pommi on toteutettavissa, kunhan saatavilla on riittävästi korkeasti rikastettua U-235:ta. Ennakoitava kriittinen koko pallomaiselle U-235 metallille oli 8 kg ja oletettiin määrän pienenevän käyttämällä neutronien heijastamiseen sopivaa materiaalia. Oli joka tapauksessa

tärkeää mitata U-235 tarkasti, ja britit aloittivat kiireisen muutaman mikrogramman tuotannon. (WNA. 6.2019,)

MAUD-komitean lopullisena tuloksena oli kaksi summaraporttia vuonna 1941. Ensimmäinen oli "Uraanin käyttäminen pommina" ja toinen oli "Uraanin käyttäminen voimanlähteenä". Ensimmäisen raportin yhteenveto oli, että pommi oli mahdollinen, ja että yksi noin 12 kg aktiivista materiaalia sisältävä pommi voisi olla verrattavissa 18000 tonniin TNT:ta. Pommi voisi vapauttaa suuria määriä radioaktiivisia aineita ja tehdä räjähdyspaikan pitkäksi aikaa vaaralliseksi ihmiselle. Oletettiin että laitos, joka tuottaisi 1 kg:n U-235:ta päivässä, voisi maksaa viisi miljoonaa puntaa ja vaatisi paljon taitavaa, korkeasti koulutettua, myös muuhun sotaponnisteluun tarvittavaa työvoimaa. Raportissa oletettiin, että myös Saksa voi työstää pommia. Raportissa suositeltiin korkealla tärkeysasteella työn jatkamista yhteistyössä Yhdysvaltojen kanssa, vaikka Yhdysvallat näytti keskittyvän uraanin tulevaisuuteen lähinnä laivaston käyttövoiman lähteenä. (WNA. 6.2019,)

Toinen MAUD-raportin tekemä yhteenveto oli, että hallittua uraanin fissiota, ja siitä muodostuvaa lämpöä voisi käyttää tuottamaan energiaa koneiden tarpeisiin, ja tuottamaan suuria määriä radiumin korvaavia radioisotooppeja. Raportti referoi raskaan veden ja grafiitin mahdollista käyttöä nopeiden neutronien hidastamiseen, ja että olisi mahdollista käyttää tavallista vettä, jos isotooppia U-235 rikastetaan. Raportin yhteenvedossa uraanipainekattila lupaa paljon tulevaisuudessa rauhanomaisessa käyttötarkoituksessa, mutta sanottiin että sitä ei kannattanut harkita, koska oli sotatila. (WNA. 6.2019,)

Komitea suositteli, että Halbanin ja Kovalskin tulisi siirtyä Yhdysvaltoihin, missä oli suunnitelmia valmistaa suuria määriä raskasta vettä. Raportissa mainittiin, että uusi alkuaine plutonium oli mahdollisesti käyttökelpoisempi kuin U-235, ja että tämän osa-alueen työstön tulisi jatkua Britanniassa. (WNA. 6.2019,)

Loppuraportin seurauksena oli pommia ja painekattilaa koskevan työn täydellinen uudelleen organisointi. On väitetty, että komitean työ oli nostanut Britit johtoasemaan, ja että komitea oli 15 kuukauden aikana todistanut itsensä yhdeksi

kaikkien aikojen tehokkaimmista olemassa olleista tieteellisistä komiteoista. Päätös pommiprojektin kriittisyydestä tehtiin henkilöstöpäällikön suostumuksella yhdessä pääministeri Winston Churchillin kanssa. (WNA. 6.2019,)

Raportti sai korkean tason huomiota Yhdysvalloissa, erityisesti Kansallisen tieteellisen akatemian puolelta ja ydinvoimaan keskittyen. Ennen Yhdysvaltojen suoraa sotatilaa, pommi sai vain vähän painoa. Japani hyökkäsi Pearl Harboriin 7. joulukuuta 1941, ja pommin kehittäminen sai varaukselta Yhdysvaltojen suunnattomat resurssit. (WNA. 6.2019,)

6.5 Ydinkattilan herätys

Toisen maailmansodan lopulla, Frisch-Peierls muistion määritelmät ja kuvaukset olivat osittain toteutuneet. Huomio kääntyi rauhanomaisiin, suoraan hyödynnettäviin ydinenergian sovelluksiin. Rautaesiripun kummallakin puolella sodanaikainen asekehittely jatkui, mutta uutena päämääränä oli valjastaa atomivoima höyryn ja sähkön tuotantoon. (WNA. 6.2019,)

Niin lännessä kuin Neuvostoliitossakin ydinaseiden kehitystyön alkuajat tuottivat kauaskantoista uutta teknologiaa, ja tiedemiehet ymmärsivät, että prosessissa tuotettu valtava lämpö voitaisiin käyttää sellaisenaan tai energian tuotantoon. Ydinvoima voisi mahdollistaa pienikokoisen ja pitkäkestoisen voimanlähteen muoilla sovelluksilla, erityisesti laivanrakennuksessa ja sukellusveneissä. (WNA. 6.2019,)

Ensimmäinen, hieman sähköä tuottava ydinreaktori, oli pieni kokeellinen jalostusreaktori (EBR-1). EBR-1 suunniteltiin ja toteutettiin Argonnen kansallisessa laboratoriossa ja rakennettiin Idahoon Yhdysvaltoihin. Reaktori käynnistettiin joulukuussa 1951. (WNA. 6.2019,)

Vuonna 1953 presidentti Eisenhower teki ehdotuksen "Atomit rauhalle" ohjelmasta, joka suuntasi kehitystyön sähkön tuotantoon, ja asetti Yhdysvalloissa tavoitteeksi tuottaa siviiliydinenergiaa (WNA. 6.2019,).

Neuvostoliitossa valmiiden ja vielä kehitteillä olevien uusien reaktorien ja suunnitelmien kehitystyö ja suunnittelutyö tapahtui hajautetusti eri keskuksissa. Toukokuussa 1946 oli Obninskin kaupunkiin perustettu Fysiikan ja sähkötekniikan laitos (FEI) ydinvoiman kehitystyöhön. Tämä myöhemmin suljettu kaupunki sijaitsee sata kilometriä Moskovasta kaakkoon. (WNA. 6.2019,)

AM-1 (Rauhallinen atomi) oli vesijäähdytteinen ja grafiittimoderoitu reaktori, jonka suunniteltu kapasiteetti oli 30 MWt tai 5 MWe. Reaktori palveli prototyypinä muille grafiittikanava reaktori malleille. Reaktorin toimintaperiaate oli samankaltainen, kuin suljettujen sotilaskaupunkien plutoniumia tuottavat jalostusreaktorit, kuten myös Tšernobyl-tyyppinen korkeatehoinen kanavareaktori RBMK. AM-1 tuotti sähköä vuoteen 1959 saakka. Reaktori tuotti isotooppeja ja toimi tutkimusreaktorina vuoteen 2000. (WNA. 6.2019,)

1950-luvulla FEI kehitti Omskissa laivastolle nopeita jalostusreaktoreita (FBRS) ja lyijy-vismuttireaktoreita. Huhtikuussa 1955 BR-1 nopeaneutroni reaktori, aloitti toimintansa. BR-1 ei tuottanut energiaa, mutta kehitystyö johti suoraan malliin BR-5, joka aloitti 5 MWt:n kapasiteetilla toimintansa vuonna 1959. BR-5:tä käytettiin natriumjäähdytteiseen FBR-reaktoriin tarvittavaan perustutkimukseen. Reaktori päivitettiin ja modernisoitiin 1973 ja merkittävällä uudelleenrakennuksella siitä tuli reaktori BR-10, jonka kapasiteetti on 8 MWt. BR-10:n nykyinen käyttötarkoitus on ydinpolttoaineen kestävyuden tutkiminen, materiaalitutkimus ja isotooppien tuotanto. (WNA. 6.2019,)

Amiraali Hyman Rickover antoi alaisineen kehitystyön pääasiallisen panoksen Yhdysvalloissa. Rickover kehitti laivastolle sukellusvenekäyttöön paineistetun vesireaktorin (PWR), jossa käytettiin ydinpolttoaineena rikastettua uraanioksidia, ja neutronien hidastuksessa tavallista vettä. Laivaston prototyypireaktori Mark 1 käynnistyi Idahossa maaliskuussa 1953. Ensimmäinen täysiverinen ydinsukellusvene USS Nautilus aloitti toimintansa 1954. Sekä Yhdysvallat että Neuvostoliitto ottivat käyttöön ensimmäiset ydinkäyttöiset pinta-alukset vuonna 1959. Mark 1 reaktorin kehitys johti Yhdysvaltojen Atomienenergiakomission rakentamaan 60 MWe:n merenkulun satamaesittely PWR-reaktoriin Pennsylvaniassa. Se käynnistyi 1957 ja toimi vuoteen 1982. (WNA. 6.2019,)

Välttääkseen läntisen Yhdysvaltojen uraanin rikastamisen monopolin, brittiläinen kehitystyö muutti suuntaa, ja he tuottivat sarjan grafiittihidasteisia ja kaasujäähdytettyjä reaktoreita, joiden ydinpolttoaineena oli luonnollinen metallinen uraani. Ensimmäinen näistä 50 MWe:n Magnox-tyyppisistä reaktoreista Calder Hall 1 käynnistettiin 1956 ja se toimi vuoteen 2003. Näitä reaktoreita valmistettiin 26 yksikköä vuoteen 1963 saakka. Seuraavaksi Britannia suosi kehittynyttä kaasujäähdytteistä reaktoria (AGR), jossa ydinpolttoaineena on rikastettu uraanioksidi. Myöhemmin käytössä ovat olleet PWR-mallit. (WNA. 6.2019,)

6.6 Kaupallinen ydinvoima

Ensimmäinen Westinghousen Yhdysvalloissa suunnittelema täysin kaupallinen 250 MWe:n painevesireaktori (PWR) sai nimen Yankee Rowe. Reaktori käynnistyi ensimmäisen kerran 1960 ja toimi vuoteen 1992 saakka. Samaan aikaan Argonnen kansallisessa laboratoriossa kehitettiin kiehuvesireaktori (BWR), ja ensimmäinen, General Electricin suunnittelema BWR 250 MWe Dresden-1 aloitti toimintansa 1960. Prototyyppi BWR Vallecitos toimi vuodesta 1957 vuoteen 1963. 1960-luvun lopulla PWR ja BWR reaktoreita oli yli 1000 MWe:n edestä. (WNA. 6.2019,)

Kanadalaisen reaktorisuunnittelun ottama suunta oli käyttää rikastamatonta uraania ydinpolttoaineena ja raskasta vettä sekä moderaattorina että jäähdytyksessä. Ensimmäinen CANDU-yksikkö aloitti toimintansa 1962, ja tekniikan kehitystyö jatkuu edelleen. (WNA. 6.2019,)

Ranskalainen Magnox-tyyppinen kaasugrafiittireaktori aloitti toimintansa 1956 ja kaupalliset mallit ovat toimineet vuodesta 1959. Ranskalaiset ovat tuottaneet kustannustehokkaasti kolme sukupolvea standardisoituja painevesireaktoreita. (WNA. 6.2019,)

1964 tehtiin tilaus kahdesta neuvostovalmisteisesta ydinvoimalasta. Uralilla Belovarskissa aloitti toimintansa A 100 MW kiehuvavesigrafiittikanavareaktori (BLWR). Volgan alueella Novoronezhissa rakennettiin uusi PWR-reaktori, eli pieni 210 MW:n painevesireaktori VVER, eli vesijäähdytteinen energiareaktori. Vuonna 1973 ensimmäinen suurikokoinen RBMK, eli korkeatehoinen kanavareaktori (1000 MW) aloitti toimintansa Sosnovyiborissa lähellä Leningradia, myös maan arktisissa luoteisosissa aloitti toimintansa nimelliskapasiteetiltaan 440 MW:n VVER, myöhemmin reaktorin tyyppin nimelliskapasiteetiksi ja vallitsevaksi standardiksi vakioitui 1000 MW. (WNA. 6.2019,)

Vuonna 1972 Kazakstanissa aloitti toimintansa maailman ensimmäinen kaupallinen nopeaneutronireaktorin prototyyppi. Reaktorin nettokapasiteetti oli 135 MWe, ja reaktori tuotti sähköä ja lämpöä Kaspianmeren suolanpoistolaitokselle. Vuodesta 1959 lähtien Yhdysvalloissa, Yhdistyneessä kuningaskunnassa, Ranskassa ja Venäjällä oli lukuisia kokeellisia nopeaneutronireaktoreita, joista viimeinen suljettiin 2009. Venäjän BN-600 jäi ainoaksi kaupalliseksi nopean reaktorin malliksi ennen vuoden 2016 mallia BN-800. (WNA. 6.2019,)

Muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta valtiot ympäri maailmaa valitsivat ydinvoimaohjelmaansa kevytvesireaktorin. Nykyään 69 % maailman kapasiteetista on PWR- ja 20 % BWR-reaktoreita. (WNA. 6.2019,)

6.7 Ydinvoiman synkkä aika ja uusi herääminen

1970-luvun lopulta vuoteen 2002 ydinenergiateollisuus kärsi laskusta ja pysähtyneisyydestä. Tilattiin vain muutamia uusia reaktoreita. Vuoden 1980 jälkeen tilauksia oli hieman enemmän kuin käytöstä poistuvia reaktoreita. Reaktorikapasiteetti on kuitenkin lisääntynyt lähes kolmanneksella ja tuotto 60 %:a parantuneen kapasiteetin ja kuormitustekijöiden takia. 1980-luvun puolessa välissä ydinenergian keskimääräinen osuus oli 16-17 %. Monet 1970-luvulla tehdyt reaktoritilaukset peruttiin ja uraanin hinta laski. Kannattavuuden laskun syynä oli myös toimittajien lisääntyminen. Lopulta uraanimarkkinoille mukaan tulleet öljyntuottajat päättivät vetäytyä ja samalla tapahtui uraanintuottajien yhdistymisiä. (WNA. 6.2019,)

Myöhään 1990-luvulla tehtiin tilaus kolmannen sukupolven reaktorista. Kyseessä oli Japanin Kashiwazaki-Kariwa 6, 1350 MWe:n ABWR kehittynyt kiehutusvesireaktori. Tämä oli ensimmäinen merkki markkinoiden elpymisestä. Uuden vuosisadan aikana ydinvoimanäkymien elpymisessä yhdistyy useita tekijöitä. Sähkön kysynnän lisääntymistä koskeva ennuste toteutui maailmanlaajuisesti, ja erityisesti nopeasti kehittyvissä maissa. Tietoisuus energian toimitusvarmuudesta, ja huoli ilmastonmuutoksesta johtivat hiilipäästöjen rajoittamiseen. Näiden tekijöiden seurauksena uuden sukupolven ydinreaktorit johtivat siihen, että vuonna 2004 ensimmäinen kolmannen sukupolven loppupuolen reaktoreista tilattiin Suomeen. Kyseessä on 1600 MWe:n eurooppalainen PWR eli EPR. Kiina suunnittelee suurta ydinenergiakapasiteettiinsa lisäystä vuoteen 2030 mennessä, suunnitteilla on enemmän kuin sata ydinvoimalaa. (WNA. 6.2019,)

7 POHDINTA

Ydinvoima on yhä kiistelty tapa tuottaa energiaa ja ydinvoiman tekniikka ja kehitystyö on jakautunut monimutkaiseksi eri tekniikoiden puuksi. Samoja lähestymistapoja käytetään vaihtelevasti sen mukaan, mitä teknisiä ja poliittisia mahdollisuuksia on ollut tarjolla. Tarjolla olevat eri sukupolvien ydinreaktorityypit ovat eri lähestymistapojen yhdistelmiä. Tekniikka on oikein toteutettuna turvallista ja liian hyvää torjuttavaksi ja hylättäväksi.

Ydinreaktorin ketjureaktion ylläpitäminen on käytännössä neutronivuon hallitsemista. Tasaisen ketjureaktion edellytyksenä on, että reaktiutilavuudessa on riittävän paljon hajoamiskykyisiä ytimiä ja keskimäärin juuri oikean suuruusella kineettisellä energialla varustettuja neutroneja, jotta neutronien joukolla on tarpeeksi suuri todennäköisyys absorboitua ja virittää ydin epävakaaksi. Kriittisessä reaktorissa syntyy juuri sopiva määrä neutroneja, jotta syntyvien neutronien ja ytimiin absorboituvien neutronien suhde on vähintään kahden suhde yhteen. Termisissä hitaissa reaktoreissa todennäköisyyksiin vaikutetaan rikastamalla käytetyn ydinpolttoaineen isotooppia U-235 noin 2-3 % ja sovittamalla moderaattorien avulla neutronien keskimääräinen kineettinen energia tarvittavalle tasolle törmäystä ajatellen. Nopeaneutroni reaktoreissa osumien todennäköisyyttä parannetaan nostamalla käytetyn ydinpolttoaineen rikastussuhdetta kymmeniin prosentteihin.

Fukushiman onnettomuuden syynä nähdään reaktorin polttoaineen hajoamistuotteiden jälkilämpö, ja varasähkövirran katkeamisesta seurannut varajähdytysjärjestelmien pettäminen.

Venäläinen ydinvoimatekniikka rakennettiin ensisijaisesti plutoniumin tuotantoon ilman kanadalaisten siviiliserkkujensa laajamittaista raskaan veden käyttöä, eikä armeijan reaktoritekniikan kaikki tarvittava sotilastekninen pääoma enää periytynyt uusille siviilituotannon prosessinohitajien sukupolville ja päättäjille. Vanhojen ydinvoimaloiden tuli venyä aina vain pidemmälle, kunnes raja tuli vastaan ja soppa oli valmis. Tšernobylin onnettomuus aiheutui vanhenevan omaperäisen sotilastekniikan vajaasta ymmärryksestä, epäsovovasta uudesta tekniikasta ja polttoaineesta, ja rakenteellisesta voimalan tehon kasvattamisen seurauksena muodostuneesta ketjureaktion säätövaran pienenemisestä ja loppumisesta. Ketjureaktion neutronien määrää säätänyt absorboiva vesi höyrystyi vesihöyryksi lämpötilan ja tehon noustessa. Neutroneja absorboivan veden loppuessa mikään ei enää hillinnyt neutronivuon kasvua, ja pyrkimys neutronivuon kasvun hillitsemiseksi kasvatti neutronivuota, mikä johti räjähdykseen.

Työn rajausta painevesireaktoreihin ja kiehutusvesireaktoreihin on tulkittu laajasti. Ihminen ei aina valitse turvallisinta tapaa, vaan tavan, joka vakiintuneena tekniikkana hallitaan riittävän hyvin. Veden käyttäminen reaktorin lämmönsiirtoon on vanhaa perua, ja pieni todennäköisyys höyrykattilan höyryn hallitsemattomaan räjähdysmäiseen laajenemiseen ja tulipesäräjähdyksiin on ajat sitten hiljaisesti hyväksytty ja käytetty hyväksi. Vedetön ydinvoimalan lämmönsiirtotekniikka on kehitetty jo ennen ydinvoiman yleistymistä muun muassa sulasuolan ja kaasujen muodossa. Vakiintuneen höyrytekniikan helppous, laivaston ja armeijan tarpeet ja rooli tekniikan rahoittajana ja kehittäjänä, sekä laivaston painevesireaktorin jäähtytykseen käytettävissä olleet kevyenveden resurssit synnyttivät yhdessä varhaisen teknisen ajattelun, ja käytetyn ydinpolttoaineen vakiintumisen seurauksena nykymallisen ydinvoimalan. Nykyinen länsimainen ydinvoimala on maalle tuotua paranneltua laivaston höyryvoimatekniikkaa.

Mitä tulee työn luotettavuuteen, niin toteutuksessa on pyritty seuraamaan enemmän varsinkin käännöstyössä ymmärryksen mukaista ajatusta ja asiasisältöä, kuin täsmällistä ehdottoman tarkkaa käännoästä. Käytetyt lähteet valikoituivat totumuksen, saatavuuden, käytännöllisyyden, työn rajoitusten ja lähteen sisällön perusteella. Jokainen lähde ajaa omaa asiaansa ja omaa etuaan. Myös lukija tulkitsee asian omasta lähtökohdastaan, torjuu tai pyrkii liittämään asian osaksi omaa todellisuuttaan.

Historia on aina lähtökohtaisesti tulkittua ja sama pätee myös tähän työhön valittuun versioon ydinvoiman synnystä. Yhdistynyt kuningaskunta korostuu lähteenä toimivan säätiön brittiläisenä kotimaana. Historiikki antaa ymmärtää, että kaikki ei ole aina niin kuin se virallisesti kerrotaan.

Työn lopullisesta toteutuksesta jäi toteuttamatta sulasuolareaktoreiden ja uudemman teknologian tarkempi tarkastelu sekä paljon muuta. Kiitos kaikille tukijoille ja myötävaikuttaneille.

LÄHTEET

John Andrews & Nick Jelley. Energy Science: principles, technologies, and impacts: Oxford University Press 2017.

Pertti Inkinen, Reijo Manninen, Jukka Tuohi: Momentti II: Otava 2012.

Olli J. Marttila, Aulis Isola, Erik Spring, Antti Vuorinen: Säteily, sen käyttö ja valvonta: Tammi 1971.

Teollisuuden voima Oy (TVO. 23.5.2019,). Luettu 23.5.2019 www.tvoy.fi

World nuclear association (WNA). Luettu 6.2019 www.world-nuclear.org & www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx