

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Shippingport – ensimmäinen painevesireaktori sähköntuotannossa

Shippingport – the First Pressurized Water Reactor in Electricity Generation

Työn tarkastaja: Dr. Arto Ylönen

Työn ohjaaja: Dr. Arto Ylönen

Lappeenranta 12.12.2015

Mikko Tirola

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Mikko Tirola

Opinnäytteen nimi: Shippingport – ensimmäinen painevesireaktori sähköntuotannossa

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2015

34 sivua, 10 kuvaa ja 1 taulukko

Hakusanat: Shippingport, painevesireaktori, ydinvoima

Tässä kandidaatintyössä käydään kirjallisuuden perusteella läpi Shippingportin ydinvoimalan vaiheet suunnittelusta käytöstäpoistoon. Samalla käydään läpi voimalan rakenne, jota verrataan nykyaikaisen painevesireaktorin rakenteeseen. Lisäksi voimalaa taustoitetaan pikaisella katsauksella ydinenergian käyttöön yleisesti sähköntuotannossa sekä 1940- ja 1950-lukujen ydinohjelmiin niin Yhdysvalloissa kuin muuallakin maailmassa.

Shippingportin ydinvoimala oli ensimmäinen nimenomaan sähköntuotantoon rakennettu teollisen mittaluokan ydinvoimala. Samalla se oli ensimmäinen painevesireaktori, jota käytettiin tuottamaan sähköä yleiseen verkkoon. Voimalalla oli suuri merkitys ydinvoiman kehityksessä, sillä sieltä saatiin runsaasti kokemusta ydinvoiman käytöstä sähköntuotannossa.

Voimala oli käytössä vuodesta 1957 aina vuoteen 1982. Etenkin aluksi sitä käytettiin pelkän sähköntuotannon lisäksi tutkimukseen ja koulutukseen. Vuodesta 1974 voimalaa käytettiin kevytvesiyötöreaktorin testivoimalana. Myös käytöstä poistettaessa voimalalla oli prototyypitehtävä, sillä tarkoituksena oli osoittaa, että ydinvoimala voitiin purkaa 1980-luvun tekniikoilla kohtuullisin kustannuksin ja aikataulussa.

SISÄLLYSLUETTELO

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
1 Johdanto	4
2 Sähkön tuottaminen ydinvoimalla	5
2.1 Fissio	5
2.2 Reaktorin yleinen rakenne ja materiaalit	6
2.3 Reaktorityyppejä	6
2.3.1 Painevesireaktori	6
2.3.2 Kiehumisvesireaktori	7
2.3.3 Muita varhaisia reaktorityyppejä	9
3 Ydinvoiman kehitys maailmalla	10
3.1 Ensimmäiset ydinvoimalat maailmalla	10
3.1.1 Neuvostoliitto	10
3.1.2 Yhdistynyt kuningaskunta	11
3.2 Yhdysvaltain ydinohjelma	12
4 Shippingportin voimala	15
4.1 Suunnittelu	15
4.1.1 Projektin alku	16
4.1.2 Seed-blanket -sydän	17
4.1.3 Turvallisuusnäkökohtia	18
4.2 Voimalan rakenne ja järjestelmät	20
4.3 Voimalan rakentaminen	23
4.4 Vertailu nykyaikaiseen painevesireaktoriin	24
5 Voimalaitoksen käyttö	26
5.1 Ensimmäinen sydän	26
5.1.1 Polttoaineenlataukset	26
5.1.2 Säteilysuojelu	27
5.1.3 Voimalaitoksen toiminta	29
5.2 Toinen sydän	29
5.3 Kevytvesihyötöreaktori	30
5.4 Käytöstäpoisto	32
6 Yhteenveto	34
Lähdeluettelo	35

1 JOHDANTO

Tämä kandidaatintyö on tehty osana Lappeenrannan teknillisen yliopiston kurssia BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari. Työssä selvitetään kirjallisuuden pohjalta Shippingportin ydinvoimalan vaiheita ja vaikutuksia ydinvoimatekniikan kehityksen alkuvaiheessa.

Shippingportin ydinvoimala oli ensimmäinen puhtaasti siviilikäyttöön tarkoitettu reaktori, jota käytettiin tuottamaan sähköä verkkoon. Se kytkettiin verkkoon joulukuussa 1957, ja se jatkoi toiminnassa lähes 25 vuotta aina vuoteen 1982 asti. Laitos oli tärkeä prototyyppi, josta saatiin kokemusta painevesireaktoreista sekä sähköntuotantoreaktoreista ylipäänsä. Viimeisinä vuosinaan voimalaa käytettiin kevytvesihyötöreaktorin kokeiluun. Tässä työssä käydään läpi kaikki voimalan vaiheet suunnittelusta ja rakentamisesta käytöstäpoistoon. Huomiota kiinnitetään voimalan järjestelmiin ja niiden eroihin uudempaan tekniikkaan verrattuna. Lisäksi voimalaitosprojektia taustoitetaan katsauksella muihin varhaisiin ydinenergiaohjelmiin.

2 SÄHKÖN TUOTTAMINEN YDINVOIMALLA

Sähköntuotanto ydinvoimalassa perustuu samaan Rankine-kiertoon, jota käytetään myös esimerkiksi hiilivoimaloissa. Yksinkertaistettuna tarvitaan lämmönlähde, joka ydinvoimalassa on polttoaineen fissio reaktorissa. Lämmöllä höyrystetään vettä, joka johdetaan turbiiniin. Höyry paisuu ja saa turbiinin siivet pyörimään. Turbiinilla pyöritetään sähköä tuottavaa generaattoria. Luovutettuaan energiaansa turbiinissa höyry lauhdutetaan vedeksi ja pumpataan takaisin kiertoon. Tässä luvussa käydään yleisellä tasolla läpi ydinsähkön peruseriaatteita, sekä joitain varhaisia ydinreaktorityyppejä.

2.1 Fissio

Fissio on ydinreaktio, jossa raskas atomiydin halkeaa pienemmiksi ytimiksi vapauttaen samalla neutroneita ja energiaa gammasäteilynä sekä fissiotuotteiden liike-energiana. Tietyissä isotoopeissa, kuten ^{235}U ja ^{239}Pu , fissio voidaan aiheuttaa absorboimalla kyseiseen ytimeen neutroni. Koska fissiossa vapautuu lisää neutroneita, on mahdollista synnyttää ketjureaktio, jossa yksi fissiotapahtuma aiheuttaa toistenkin ytimien fission. Vapautunut energia siirtyy ydinreaktorissa jäähdytteeseen. (Murray 1988, 57.)

Jokaisessa ^{235}U fissiossa vapautuu noin 200 MeV energiaa ja 2–3 neutronia. Näillä neutroneilla on suuri kineettinen energia, keskimäärin 2 MeV, joten niitä kutsutaan nopeiksi neutroneiksi. ^{235}U -ytimet absorboivat kuitenkin helpoiten neutroneja, joiden kineettinen energia on pieni. Tästä syystä neutronit kannattaa hidastaa termisiksi neutroneiksi, joiden kineettinen energia on vain 0,025 eV:n luokkaa. Tämän vuoksi ydinreaktoreissa on yleensä hidastin, jonka ytimiin törmäilemällä neutronit hidastuvat. (Murray 1988, 59–61.)

Vaikka fissiota kohti vapautuukin 2–3 neutronia, se ei välttämättä riitä ketjureaktion aikaansaamiseen, sillä osa neutroneista hukataan loiskaappauksissa rakenteisiin ja polttoaineeseen ilman, että ne aiheuttavat fissioita. Pienintä massaa, joka tarvitaan ketjureaktion ylläpitoon, sanotaan kriittiseksi massaksi. Sen suuruus riippuu useista tekijöistä, kuten polttoaineen väkevöimisasteesta, hidastinaineesta ja geometrisista tekijöistä, jotka vaikuttavat polttoaineesta pakenevien neutronien määrään. (Glasstone & Sesonske 1981, 18.)

2.2 Reaktorin yleinen rakenne ja materiaalit

Ydinreaktorin tarkoitus on luoda ympäristö, jossa ydinpolttoaineen fissiilien isotooppien ytimet voivat fissioitua hallitusti siten, että vapautuva energia saadaan hyödynnettäväksi. Reaktorin tärkeimmät komponentit ovat polttoaine, hidastin, jäähdyte ja säätömekanismit, jotka ovat teräksisessä astiassa säteilysuojien ympäröimänä. Polttoaineessa tarvitaan riittävästi raskaita fissiilejä isotooppeja, kuten ^{235}U :ä, jotta reaktio voidaan pitää käynnissä. Polttoaine on yleensä uraanidioksidia, jossa ^{235}U :n pitoisuus on väkevöity muutamaan prosenttiin. Jotta jäähdytteeseen ei leviä fissiotuotteita, polttoaine suojataan esimerkiksi zirkoniumseoksilla (zircaloy). Jäähdyte pitää polttoaineen sopivassa lämpötilassa ja kuljettaa syntyvän lämmön hyödynnettäväksi sähköntuotannossa. Jäähdytteenä käytetään yleensä vettä, mutta myös kaasut ovat mahdollisia. Hidastimen tehtävä on hidastaa neutronit termisiksi, jotta ne aiheuttavat tehokkaammin fissioita. On myös olemassa nopeita reaktoreita, joissa ei ole hidastinta. Hidastinaineena voidaan käyttää kevyttä tai raskasta vettä tai grafiittia. Vettä käytettäessä se toimii samalla jäähdyttimenä. Reaktoria hallitaan säätämällä neutronien määrää. Tähän tarkoitukseen soveltuvat säätösauvat ja palavat reaktiivisuusmyrkyt. Boori, hafnium, gadolinium ja kadmium ovat näihin sopivia materiaaleja, sillä ne absorboivat hyvin neutroneita. (Lamarsh & Baratta 2014, 107, 134–135.)

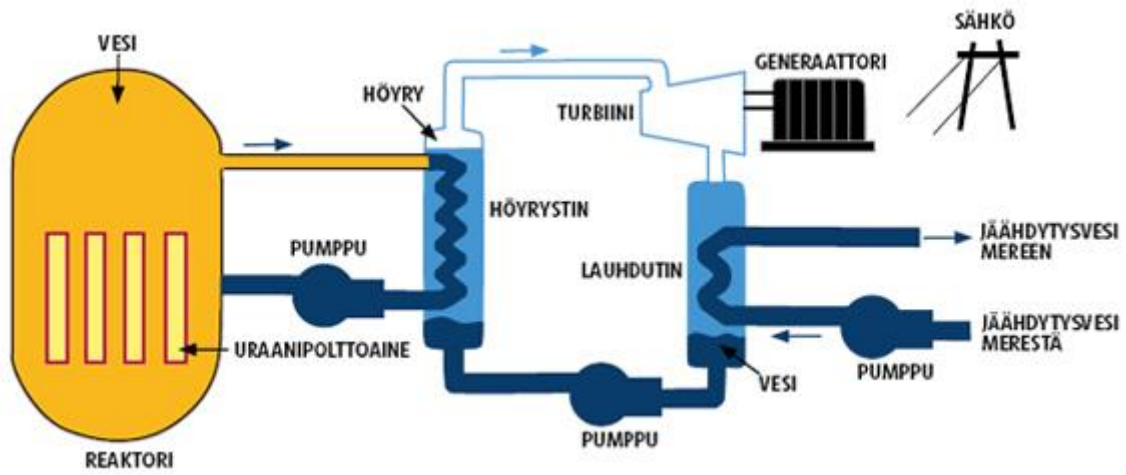
2.3 Reaktorityyppejä

Tässä kappaleessa käsitellään erilaisia sähköntuotantoon käytettäviä reaktoreita.

2.3.1 Painevesireaktori

Painevesireaktori (esitetty kuvassa 2.1) on yleisimmin käytetty reaktorityyppi sähköntuotannossa. Se on kevytvesireaktori, eli siinä käytetään tavallista vettä sekä jäähdyttimenä että hidastimena. Reaktorin nimen mukaisesti jäähdytysvesi pidetään kovassa paineessa. Näin estetään veden kiehumisen reaktorisydämen yli $300\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa. Tämän takia reaktorisydän, säätösauvat ja muu tarvittava laitteisto sijoitetaan paineastiaan, jonka täytyy kestää jopa 170 barin suuruinen paine. Paineastia on suuri, esimerkiksi se voi olla halkaisijaltaan 4 m ja korkeudeltaan 12 m. Sydäntä jäähdytetään primäärikiertopiirin vedellä, joka johdetaan höyrystimeen höyrystämään

sekundaarikierron vettä. Tällä höyryllä käytetään turbiineja samoin kuin tavanomaisissa Rankine-kierron voimaloissa. (Nero 1979, 77 – 80.)



Kuva 2.1: Painevesilaitoksen kaaviokuva. (Fortum 2015.)

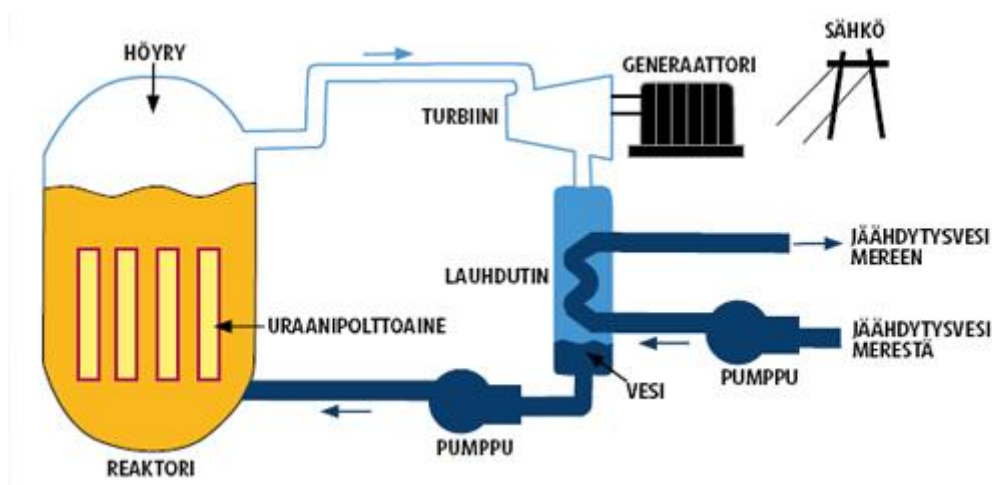
Reaktorissa käytetään polttoaineena uraanidioksidia, joka on pelletteinä zircaloy-suojakuoren sisällä polttoainesauvoissa. Polttoaineen väkevöimisaste on reaktorista riippuen muutamia prosentteja. Sauvoista tehdään nippuja, joissa on esimerkiksi neliölliseen hilaan sijoitettuna 17×17 polttoainesauvaa ja tila hafniumiselle säätösauvalle. Kaikissa nipuissa ei kuitenkaan ole säätösauvaa, vaan niissä voi olla neutronilähde käynnistystä varten tai palavaa reaktiivisuusmyrkkyä ylijäämäreaktiivisuuden kompensoimiseksi. Säätösauvojen hallinta tapahtuu ylhäältä, ja tarvittaessa ne putoavat painovoimalla reaktoriin sammuttamaan sen. Toinen säätökeino on reaktiivisuusmyrkyn, kuten boorihapon, lisääminen jäähdytysveteen. Tärkeitä painevesireaktorioiden valmistajia ovat Westinghouse (nykyään Toshiba omistuksessa), Areva sekä Mitsubishi Heavy Industries. (Kok 2009, 12–13, 20–27.)

2.3.2 Kiehumusvesireaktori

Toiseksi yleisin reaktorityyppi sähköntuotannossa on kiehumusvesireaktori, jollainen on esitetty kuvassa 2.2. Sekin on kevytvesireaktori ja muistuttaa melko paljon painevesireaktoria, mutta siinä veden annetaan kiehua reaktorin sydämessä. Polttoaineena käytetään jokseenkin samanlaista uraanidioksidia kuin painevesireaktoreissakin, joka on sijoitettuna polttoainesauvoihin pelletteinä. Sauvoissa on yleensä myös

reaktiivisuusmyrkyä ylijäämäreaktiivisuuden vuoksi. Sauvat kootaan esimerkiksi 10×10-kokoisiin nippuihin. Nippujen ympärillä on jäähdytekanava veden virtauksen ohjaamiseksi. Säätosauvat sijaitsevat ristinmuotoisissa elementeissä, joista kunkin ympärillä on neljä polttoainennippua. Koska hidastimena käytettävä vesi kiehuu reaktorissa, sen tiheys ja samalla neutronien hidastuskyky heikkenee reaktorin yläosassa. Jotta reaktorissa saadaan pidettyä tasainen tehotiheys, täytyy säätosauvoilla kompensoida höyrystymisen vaikutus. (Kok 2009, 109–112.)

Kiehutusvesireaktorin paineastia on suurempi kuin painevesireaktorin. Sen halkaisija voi olla esimerkiksi 6 m ja korkeus 22 m. Astiassa vallitseva paine on painevesireaktoria pienempi noin 70 bar. Tässä paineessa vesi kiehuu 285 °C:n lämpötilassa. Paineastian yläosassa on laitteisto veden erottamiseksi höyrystä, sillä vain noin 13 % reaktorisydäimestä poistuvasta vedestä on höyrystynyt. Loput vedestä pumpataan takaisin reaktorin alaosaan kiertämään sydämen läpi uudestaan. Kuivattu höyry johdetaan pyörittämään turbiineja. (Nero 1979, 97–101.)



Kuva 2.2: Kiehutusvesilaitoksen kaaviokuva. (Fortum 2015.)

Säätosauvojen lisäksi jäähdytysveden määrää voidaan käyttää tehon säätämiseen. Kun veden määrää vähennetään, suurempi osa siitä höyrystyy reaktorisydämessä, jolloin sen kyky hidastaa neutroneja heikkenee. Tällöin harvempi uraaniydin halkeaa, ja reaktorin teho laskee. Toisin kuin painevesireaktorissa, säätosauvat on asennettava tulemaan reaktoriin alhaaltapäin, sillä reaktorin yläosaan tarvitaan tilaa vievä

höyrynkuivauslaitteisto. Tästä syystä hätätilanteessa ei voida luottaa sauvojen putoavan reaktoriin painovoiman avulla, vaan tarvitaan varmatoimisia jousimekanismeja, joilla säätösauvat voidaan syöttää reaktorisydämeen nopeasti. Tärkeitä kiehutusvesireaktorien valmistajia ovat olleet General Electric, Kraftwerk Union sekä Hitachi (Kok 2009, 85.). (Nero 1979, 100.)

2.3.3 Muita varhaisia reaktorityyppejä

Kevyen veden sijaan reaktorissa voidaan käyttää hidastimena raskasta vettä. Se absorboi vähemmän neutroneja, jolloin sen avulla on mahdollista rakentaa reaktori, joka käyttää polttoaineenaan luonnonuraania. Kanadalainen CANDU-reaktori (**C**anadian **d**euterium-**u**ranium reactor) on teollisen mittakaavan sovellus tästä. Se muistuttaa tavallista painevesireaktoria, mutta siinä paineistettu jäähdytysvesi kulkee paineputkissa paineistamattoman raskasvesitankin, eli Calandrian, läpi. Reaktorin huonoja puolia ovat suuri koko ja raskaan veden hinta. (Nero 1979, 109–110.)

Toinen mahdollisuus rakentaa luonnonuraania polttoaineena käyttävä reaktori on käyttää grafiittia hidastimena. Tällöin voidaan käyttää jäähdytteenä kaasua, vettä tai suolasulaa. Etenkin Britanniassa hiilidioksidijäähdytetyt ja grafiittihidasteiset Magnox-reaktorit olivat pitkään suosittuja. Venäläiset puolestaan ovat suunnitelleet grafiittihidasteisia vesijäähdytettyjä reaktoreita. (Nero 1979, 120–121.)

Jo varhaisessa vaiheessa ydintekniikan historiassa suunniteltiin hyötöreaktoreita. Niissä tarkoituksena on tehdä ("hyötää") käytön aikana enemmän polttoainetta, kuin mitä reaktori käyttää, minkä hyödyt polttoaineen käytön suhteen ovat ilmeiset. Hyötäminen onnistuu neutronikaappauksilla. ^{238}U -ytimen kaapatessa neutronin muodostuu ^{239}U -ydin, joka beetahajoamisen seurauksena muuttuu fissiiliksi ^{239}Pu :ksi. Toinen vaihtoehto on ^{232}Th , josta saadaan fissiiliä ^{233}U :a. Hyötöreaktori voidaan toteuttaa nopeana (ilman neutronien hidastusta) tai termisenä reaktorina. Reaktorin haittapuolena se tarvitsee suhteellisen pitkälle rikastettua polttoainetta. (Nero 1979, 203, 220–221.)

3 YDINVOIMAN KEHITYS MAAILMALLA

Tässä luvussa käsitellään Shippingportin ydinvoimalan historiallista taustaa, eri maiden varhaisia ydinohjelmia ja ensimmäisiä ydinvoimaloita maailmalla.

3.1 Ensimmäiset ydinvoimalat maailmalla

Ydintekniikan kehityksen alku voidaan ajoittaa 1800- ja 1900-lukujen taitteeseen, jolloin röntgensäteilyn löytymisen jälkeen tehtiin muita vastaavia perustavanlaatuisia löytöjä. Energiatekniikan sovellusten kannalta käänteentekevää oli fissioreaktion löytäminen Saksassa 1939. Samana vuonna alkanut toinen maailmansota kiinnitti suurvaltojen huomion ydinenergian valjastamiseen armeijoiden käyttöön, mutta nopeasti sodan jälkeen myös rauhanomaiset sovellukset huomioitiin. Niillä voitiin tyydyttää alati kasvavaa energiantarvetta sekä saavuttaa propagandatuudessa kylmän sodan ilmapiirissä.

3.1.1 Neuvostoliitto

Neuvostoliitossakin tehtiin jo ennen toista maailmansotaa ydintutkimusta muuan muassa Igor Kurtšatovin johdolla. Sodan aikana Neuvostoliitto sai vakoilutoimintansa ansiosta tietoja Yhdysvaltain ydinohjelmasta, mikä nopeutti Neuvostoliiton ohjelmaa sodan jälkeen. Maan ensimmäinen ydinasekoe tehtiin elokuussa 1949. Aseohjelman takia Neuvostoliitossa oli uraanin väkevöimiseen tarvittavaa infrastruktuuria, ja uraania oli saatavilla myös energiaohjelmaan. (Leclercq 1986, 32.)

Ensimmäisen kerran maailmassa ydinvoimala kytkettiin sähköverkkoon 27.6.1954 Obninskissa Moskovan lounaispuolella. Reaktorin teho oli 5 MW, ja se käytti polttoaineena 5 %:ksi väkevöityä uraania. Hidastimena käytettiin grafiittia ja jäähdytteenä vettä, joka kiersi polttoaine-elementtien sisällä. Reaktorin pohjalta kehitettiin myöhemmin RBMK- ja VVER-reaktorit. Vaikka Obninskin reaktori olikin teollisessa mittakaavassa hyvin pieni, se oli Neuvostoliitolle tärkeä propagandavoitto, sillä sen perusteella Neuvostoliitto kykeni esiintymään ydinenergian rauhanomaisen käytön pioneerina. (Rahn et al. 1984, 19–20.)

3.1.2 Yhdistynyt kuningaskunta

Huolimatta britti-tutkijoiden osallistumisesta Yhdysvaltain toisen maailmansodan aikaiseen Manhattan-ohjelmaan, sodan jälkeen Yhdysvallat ei luovuttanut saavutettuja tutkimustuloksia briteille. Ydinaseiden hankkiminen oli kuitenkin hiipuvalla britti-imperiumille tärkeä tavoite. Koska uraanin väkevöintiin tarvittava kaasudiffuusiolaitos katsottiin kalliiksi ja vaikeaksi toteuttaa, britit keskittyivät plutoniumin tuotantoon. Tähän tarkoitukseen rakennettiin Windscaleen kaksi luonnonuraania polttoaineena käyttävää, grafiittihidasteista ja ilmalla jäähdytettyä reaktoria. Reaktorit olivat rakenteeltaan alkeellisia, ja toinen niistä vaurioitui pahoin tulipalossa vuonna 1957. Kuitenkin niissä tuotetun plutoniumin avulla britit koeräjäyttivät ensimmäisen ydinaseensa lokakuussa 1952. (Leclercq 1986, 32.)

Windscaleen reaktoreista saadun kokemuksen perusteella britit käynnistivät hankkeen plutoniumia ja sähköä tuottavan ydinvoimalan rakentamiseksi. Tuloksena oli Magnox-reaktori. Siinä käytettiin polttoaineena metallista luonnonuraania, joka päällystettiin reaktorin nimen mukaisesti magnesiumoksidilla. Hidastimena käytettiin grafiittia ja jäähdytysaineena hiilidioksidikaasua. Kuumalla hiilidioksidilla höyrystettiin vettä, joka johdettiin turbiineihin. Grafiitin hidastinomaisuuksien vuoksi reaktorissa tarvittiin paljon grafiittia polttoaineeseen nähden, jolloin se oli kooltaan suuri ja tehoteheydeltään pieni. Tarvittavan koon vuoksi reaktoriastiaa ei voitu kuljettaa tehtaalta voimalan rakennustyömaalle, vaan se oli hitsattava kokoon paikanpäällä, mikä hankaloitti voimalan rakentamista. Lisäksi polttoaineen metallinen olomuoto sekä magnesiumoksidipäällyste rajoittivat polttoaine-elementtien ulkolämpötilan 420 °C:een, jolloin tuotetun höyryn lämpötila ja saatava sähköteho jäivät alhaisiksi. Lisäksi tarvittiin tehokkaat puhaltimet kierrättämään riittävä määrä hiilidioksidia reaktorisydämen läpi. Ensimmäinen Magnox-reaktori avattiin Calder Hallissa Windscaleen lähistöllä 17.10.1956, jolloin se oli maailman ensimmäinen teollisen mittakaavan ydinvoimalaitos 50 MW:n teholla. Tämän jälkeen reaktoryyppi kävi läpi useita parannuksia, ja vuonna 1971 käyttöön otetut reaktorit Wylfassa olivat sähköteholtaan 590 MW. (Rahn et al. 1984, 547, 18; Leclercq 1986 82.)

3.2 Yhdysvaltain ydinohjelma

Yhdysvaltain ydinohjelman voidaan katsoa alkaneen Albert Einsteinin kirjeestä presidentti Rooseveltille elokuussa 1939. Kirjeessä Einstein toi esille viimeaikaiset edistymiset ydintekniikassa ja niiden avaamat mahdollisuudet uraanin käyttämiseen energiantuotannossa tai pommissa. Hän kehotti presidenttiä varmistamaan uraanimalmin saatavuuden ja ohjaamaan varoja tutkimukseen. Roosevelt noudatti kehotusta, ja siviileistä sekä sotilaista koottu ”Advisory Committee on Uranium” kokoontui ensimmäisen kerran lokakuun lopulla. Laivasto oli jo tässä vaiheessa kiinnostunut ydinvoiman käyttöpotentiaalista sukellusveneiden voimanlähteenä, joten se rahoitti alustavat 50 tonnia uraanioksidia ja 4 tonnia grafiittia, jonka tiedettiin soveltuvan hidastimeksi. (Rahn et al. 1984, 2–6.)

Luonnonuraanista 99,3 % on isotooppia ^{238}U ja vain 0,7 % on fissiiliä isotooppia ^{235}U . ^{235}U :n erottaminen on vaikeaa, koska kemiallisesti kyseessä on sama aine. Ainoa ero isotooppien välillä on 3 atomimassayksikön massaero. Erotukseen kokeiltiin erilaisia keinoja, joista parhaimmiksi todettiin kaasudiffuusio ja sähkömagneettinen erotus. Toisaalta vuonna 1940 löydettiin uusi alkuaine plutonium, jonka isotooppi ^{239}Pu todettiin fissiiliksi. Sitä voitiin valmistaa uraanista grafiittihidasteisessa ”miilussa”, joten siitä saatiin toinen mahdollinen reitti ydinaseen valmistamiseksi. Vuonna 1942 ydinaseohjelma siirrettiin armeijan alaisuuteen ja nimettiin Manhattan-projektiksi. Sen tärkeimmät laitokset olivat uraaninväkevöintilaitos Oak Ridgessä, plutoniumintuotantolaitos Hanfordissa ja ydinaseen valmistuslaitos Los Alamosissa. (Dennis 1984, 24–27.)

Tärkeä käytännöllinen läpimurto saavutettiin joulukuussa 1942, kun Enrico Fermi johdolla rakennettu maailman ensimmäinen ydinreaktori, Chicago Pile-1, saavutti kriittisyyden. Reaktori oli rakennettu Chicagon yliopiston urheilustadionin katsomoiden alle entiselle squash-kentälle. Se oli käytännössä kasa, jossa oli 6 tonnia uraanimetallia ja 24 tonnia uraanioksidia aseteltuna hidastimina toimivien grafiittikappaleiden sekaan. Säätosauvat olivat kadmiumia, ja ne roikkuivat köysillä rakennelman päällä. Hätätilassa köydet oli tarkoitus katkaista kirveellä säätosauvojen pudottamiseksi. Reaktorin merkitys oli ketjureaktion käytännöllisen toimivuuden todistamisessa. Sähköä sillä ei voitu tuottaa. (Rahn et al. 1984, 6–8.)

Manhattan-projekti saavutti tavoitteensa, kun maailman ensimmäinen ydinase räjäytettiin Alamogordossa 16.7.1945. Seuraavassa kuussa Hiroshiman ja Nagasakin ydinpommitukset lopettivat toisen maailmansodan. Vaikka ydinaseen rakentaminen oli ollut sodan aikana tutkijoiden päätavoitteena, myös erilaisia reaktorikonsepteja sähköntuotantoa varten oli mietitty. Vuonna 1944 suunnitelmissa oli viisi eri ydinvoimalakonseptia, joista myöhemmin rakennettiin testilaitokset. Erityisen kiinnostavana pidettiin hyötöreaktoria, sillä sen avulla voitiin muuttaa ^{238}U :aa plutoniumiksi. Testireaktori EBR-1 (Experimental Breeder Reactor) rakennettiin Idahoon, ja se oli ensimmäinen ydinreaktori, jolla tuotettiin sähköä, tosin vain 100 kW:n teholla. Vuonna 1946 säädettiin atomienergialaki, joka siirsi Yhdysvaltain ydinohjelman pois asevoimilta Atomienergiakomissiolle (Atomic Energy Commission, AEC). Ydinenergiatekniikka pidettiin kuitenkin edelleen salaisena, jolloin yksityisyrittäjille ei annettu mahdollisuutta kehittää ydinenergiasta taloudellista voimanlähdettä. Yksityissektorin roolina oli olla vain AEC:n alihankkija. (Rahn et al. 1984, 9–11; Leclercq 1986, 28.)

Yhdysvaltain ydinpolitiikkaan tuli muutos 1950-luvun alussa Britannian ja Neuvostoliiton ydinohjelmien sekä kotimaan teollisuuden vaikutuksesta. Presidentti Eisenhowerin ”Atoms for Peace” –puhe YK:n yleiskokouksessa 1953 kuvasi muuttuneita asenteita, jotka kirjattiin uuteen atomienergialakiin 1954. Teollisuus pääsi nyt mukaan ydinenergia-alalle, sillä uusi laki salli yksityisen omistuksen ydinvoimaloille ja antoi yrityksille pääsyn aikaisemmin salassa pidettyihin tietoihin. Varsinainen ydinpolttoaine jäi edelleen AEC:n omistukseen, mutta se saattoi antaa sitä yritysten käyttöön (Dennis 1984, 70). Samana vuonna AEC käynnisti ohjelman, jossa oli tarkoitus rakentaa viidessä vuodessa viisi erilaista reaktoria. Ohjelman reaktorityypit olivat painevesireaktori, kiehutusvesireaktori, sulalla natriumilla jäähdytetty SRE (Sodium Reactor Experiment) sekä kehitetyt versiot homogeenisestä reaktorista ja hyötöreaktorista. Neljä reaktoreista oli pieniä koelaitoksia, mutta Shippingporttiin rakennettu painevesireaktori oli ensimmäinen teollinen laitos. Kiehutusvesireaktorista tuli myöhemmin painevesireaktorin rinnalla toiseksi suosituin reaktorityyppi. (Buck 1983, 3.)

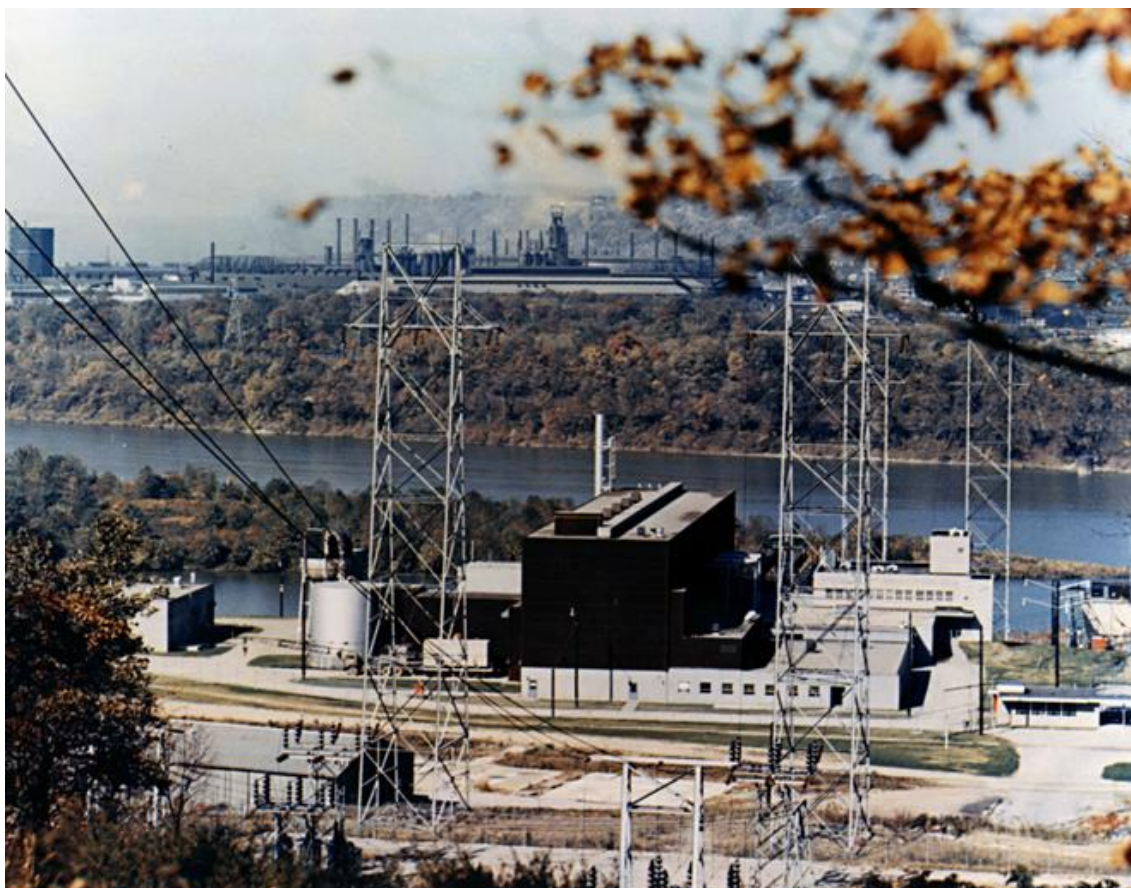
Painevesireaktori ei valikoitunut sattumalta ensimmäisen teollisen mittakaavan voimalaitoksen reaktorityypiksi. Vuonna 1946 laivasto asetti kahdeksanhenkisen

työryhmän tutkimaan mahdollisuutta ydinvoiman hyödyntämiseksi sukellusveneissä. Ryhmän merkittävimmäksi jäseneksi nousi silloinen kommodori Hyman Rickover, tuleva ydinkäyttöisen laivaston isä. Alun perin ryhmä oli kiinnostunut kaasujäähdytteisestä reaktorista, mutta painevesireaktori sai ryhmän vakuuttuneeksi. Westinghousella rakennutettiin täysikokoinen prototyypireaktori sukellusveneeseen runkoa vastaaviin oloihin Idahaan. Sillä simuloitiin onnistuneesti matka Atlantin alitse. Samanlainen reaktori asennettiin USS Nautilus–sukellusveneeseen, joka lähti telakalta tammikuussa 1955 maailman ensimmäisenä ydinkäyttöisenä sukellusveneenä. Nautiluksen kehityksen aikana ratkaistiin tärkeitä painevesireaktoriin liittyviä ongelmia, esimerkiksi kehitettiin paineastioiden rakentamista ja zirkoniumseokset polttoaineen korroosiota kestäväksi ja neutroneita kaappaamattomaksi suojakuorimateriaaliksi. Samaan aikaan myös Yhdysvaltain uraaninväkevöimiskapasiteettia kasvatettiin asevoimia varten, joten väkevöityä polttoainetta oli saatavilla. Painevesireaktori oli siis jo laivaston avulla todistettu käyttökelpoiseksi, joten sen pohjalta pystyttiin rakentamaan teollinen voimalaitos. (Rahn et al. 1984, 13–15.)

Vuonna 1955 AEC käynnisti ohjelman, jonka tarkoituksena oli sähköyhtiöiden houkuttelu ydinalalle lupauksilla antaa polttoainetta käyttöön ilmaiseksi ja maksaa osa kehityskustannuksista. Ohjelman tuloksena oli viisi voimalaitosta, joista kolme rakennettiin lopulta ilman valtion tukea. Tärkeimmät olivat Yankee Atomic Electric Companyn 180 MW:n painevesilaitos Yankee Rowe sekä Commonwealth Edisonin 180 MW:n kiehutusvesilaitos Dresden 1. Vastaavia ohjelmia, joiden tarkoitus oli löytää taloudellisesti paras reaktorikonsepti, seurasi. Westinghousen ja laivaston kehittämän painevesireaktorin sekä General Electricin kehittämän kiehutusvesireaktorin etumatka muihin reaktorikonsepteihin tuli ilmeiseksi. Varhainen etumatka onkin pitkälti turvannut niille paikan suosituimpina reaktorityypeinä. Taloudelliselta kannalta läpimurron Yhdysvalloissa aiheutti Jersey Central Power & Light Co. julkaisemalla 1963 Oyster Creek –raportin. Siinä verrattiin ydinvoimalan kustannuksia hiilivoimalaan, ja tultiin ensimmäistä kertaa siihen tulokseen, että ydinvoimala oli taloudellisesti kannattavampi vaihtoehto. Monet muutkin sähköyhtiöt seurasivat perässä ja vuoteen 1969 mennessä sähköyhtiöt olivat Yhdysvalloissa tilanneet jo 91 ydinvoimalaa. (Rahn et al. 1984, 16–17.)

4 SHIPPINGPORTIN VOIMALA

Tässä luvussa käydään läpi Shippingportin voimalan (kuvassa 4.1) suunnittelu- ja rakentamisvaiheet. Lisäksi käydään läpi voimalan rakennetta, jota verrataan nykyaikaiseen painevesilaitokseen.



Kuva 4.1: Shippingportin voimala. (Wikimedia Commons)

4.1 Suunnittelu

Shippingportin voimalan suunnittelun lähtökohtana oli perustusten luominen myöhemmille ydinvoimalaprojekteille. Projektin aikana tuli kehittää keinot, joilla sähköä kyettiin tuottamaan yleiseen sähköverkkoon turvallisesti lähellä asutuskeskuksia. Tavoitteissa pysymiseksi AEC esitti heti projektin alussa kesällä 1953 12 vaatimusta voimalalle. Näissä vaatimuksissa määrättiin muuan muassa reaktorityypiksi painevesireaktori, 60 MW:n sähköteho sekä tuotettavan höyryn ominaisuudet. Muut

vaatimukset koskivat lähinnä projektin pitämistä mahdollisimman taloudellisena ja yksinkertaisena. (The Shippingport Pressurized Water Reactor, 3–7.)

4.1.1 Projektin alku

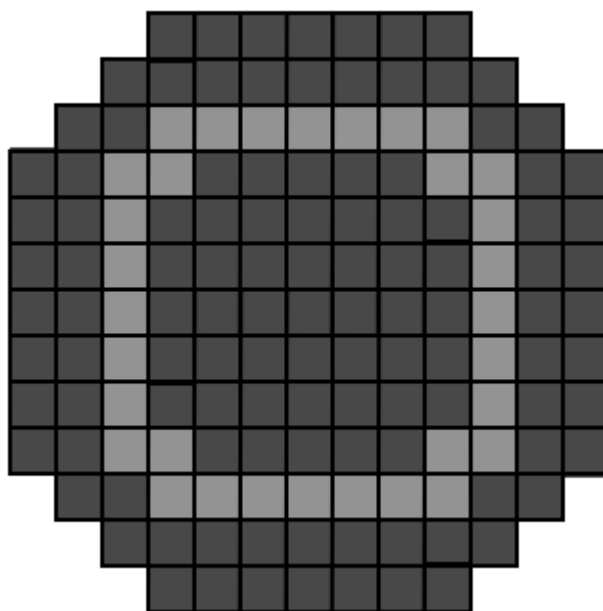
Shippingportin voimalaprojektin juuret löytyvät Yhdysvaltain laivaston ydinenergiaohjelmasta (Division of Naval Reactors, laivastoreaktorien osasto). Samaan aikaan sukellusvenereaktorin kehittämisen kanssa laivasto alkoi vuonna 1951 kehittää reaktoria lentotukialusten voimanlähteeksi. Lähtökohdaksi valittiin laivastoreaktorien johtajan kommodori Hyman Rickoverin suosikki eli sukellusvenereaktoria vastaava painevesireaktori. Projekti kuitenkin lakkautettiin budjettisyistä vuonna 1953. Reaktoria kehittänyt Westinghouse oli kuitenkin saanut projektin aikana arvokasta tietotaitoa, jota AEC ei halunnut heittää hukkaan. Lisäksi samaan aikaan Yhdysvallat halusi esiintyä ydinvoiman rauhanomaisen käytön edelläkävijänä osittain vastavetona Neuvostoliiton ydinkokeisiin. Painevesireaktori oli pisimmälle kehitetty reaktorikonsepti, joten siihen pohjautuva voimala kyettiin rakentamaan suhteellisen nopeasti, vaikka eräitä muita konsepteja pidettiinkin sähköntuotannon taloudellisuuden kannalta houkuttelevampina. Näin ollen Westinghouse ja Rickover jatkoivat painevesireaktorin kehittämistä siviilikäyttöön suunnattuna projektina. (Allen 1977, 28–30)

Jotta voimala voitiin rakentaa, mukaan tarvittiin sähköyhtiö, joka kustantaisi osan projektista. Helmikuuhun 1954 mennessä AEC sai yhdeksältä yhtiöltä tarjoukset. Näistä Duquesne Light Companyn tarjous oli selvästi muita parempi. Yhtiö oli pienehkö, ja se toimi läntisessä Pennsylvaniassa Pittsburghin ympäristössä. Samalla alueella sijaitsivat myös reaktoritoimittaja Westinghouse sekä laivaston kehityslaboratorio Bettis Atomic Power Laboratory. Tarjouksessaan Duquesne Light ehdotti järjestelyä, jossa AEC omisti itse reaktorin, mutta yhtiö ostaisi sillä tuotetun höyryn käytettäväksi omistamassaan turbiinilaitoksessaan markkinahintaa kalliimmalla. Lisäksi yhtiö osallistuisi 5 miljoonalla dollarilla reaktorin kehityskuluihin ja tarjoaisi voimalle tontin Shippingportista Ohio-joen rannalta. Kaiken kaikkiaan Duquesne Light sijoittaisi projektiin yli 30 miljoonaa dollaria viiden vuoden aikana. Yhtiön kannalta valtion tukema projekti oli ainoa keino päästä osalliseksi ydinvoima-alasta ja sen tuomasta julkisuudesta. Valtion kannalta sopimus oli hyvin edullinen. Projektissa oli siis kolme osapuolta: reaktoritoimittaja Westinghouse, sähköyhtiö Duquesne Light, joka rakentaisi sähköntuotantolaitoksen ja operoisi

voimalaa, sekä valtio AEC:n muodossa. Projektin johtoon asetettiin amiraaliksi ylennetty Rickover. (Hewlett & Duncan 1974, 238–239.)

4.1.2 Seed-blanket -sydän

Shippingportin reaktorisydän erosi merkittävästi myöhempien painevesireaktorien sydämestä. Toisin kuin myöhemmissä malleissa, Shippingportissa polttoaine ei ollut samanlaista matalarikasteista uraanidioksidia kaikkialla, vaan sydän muodostui kahdesta alueesta, joiden sijoittelu selviää kuvasta 4.2. Varsinaisessa sydämessä (seed) polttoaine oli pitkälle väkevöityä (93 %) metallista urania seoksena zirkoniumin kanssa. Sitä ympäröivässä vaipassa (blanket) polttoaineena oli luonnonuraania uraanidioksidissa. Ainoastaan varsinainen sydän oli kriittinen. Vaipan tarkoituksena oli absorboida varsinaisesta sydäimestä karkaavia neutroneja, hyötää ^{238}U :sta fissiiliä ^{239}Pu :ta ja tuottaa energiaa plutoniumin ja uraanin fissioilla. Konseptin kehitti laivastoreaktoriohjelman pääfyysikko Alvin Radkowsky. (Historic American Engineering Record, 9; The Shippingport Pressurized Water Reactor, 159.)



Kuva 4.2: Polttoaine-elementtien sijainti reaktorisydämessä. Vaaleanharmaalla varsinaisen sydämen 32 polttoaine-elementtiä ja tummanharmaalla 113 vaippaelementtiä. (Coleman 2009.)

Seed-blanket –sydämeen päädyttiin useista syistä. Matalarikasteista polttoainetta käyttävää reaktoria ei ollut aikaisemmin rakennettu, ja toisaalta suunnittelijoilla oli

kokemusta korkearikasteista polttoainetta käyttävistä sukellusvenereaktoreista. Tätä kokemusta pystyttiin hyödyntämään varsinaisen sydämen suunnittelussa. Väkevöityä uraania oli myös niukasti saatavilla, joten sitä haluttiin käyttää säästeliäästi. Vaipan polttoaine voisi olla reaktorissa pitkään ja vain varsinaisen sydämen polttoaine tarvitsisi vaihtaa uudelleenlatauksissa. Silti vaipasta saataisiin noin puolet reaktorin tuottamasta energiasta. Lisäksi säätösauvoja tarvittiin vain varsinaisen sydämen alueella, joten reaktorin hallinta voitiin tehdä yksinkertaisesti. (Historic American Engineering Record, 9.)

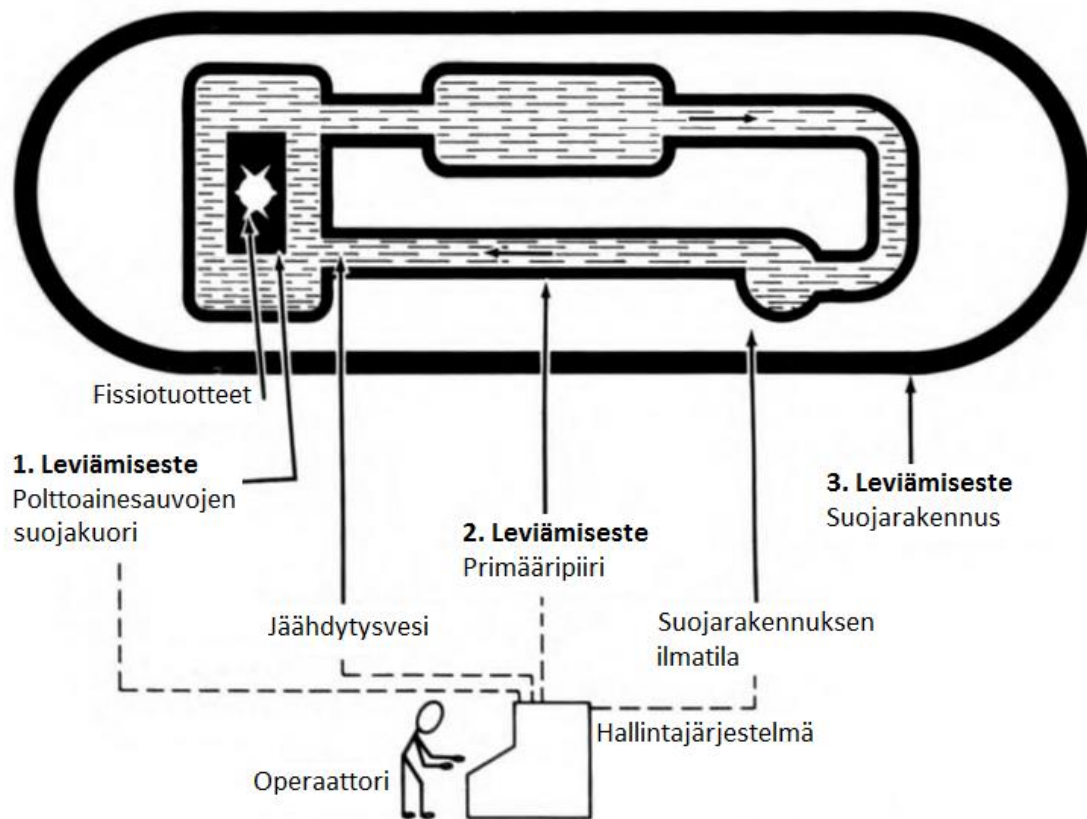
4.1.3 Turvallisuusnäkökohtia

Kuten myöhemmissä voimalaitosprojekteissa, myös Shippingportin laitosta suunniteltaessa turvallisuus ja luotettavuus otettiin heti aluksi suunnittelun prioriteetiksi. Reaktoriin rakennettiin neljä jäähdytyspiiriä, vaikka kolme riitti reaktorin jäähdyttämiseen, jotta yksi voisi olla huollossa ilman, että voimalaitos täytyi ajaa alas. Jäähdytteen kanssa kosketuksissa olevat osat rakennettiin korroosionkestävistä materiaaleista, ja reaktori suunniteltiin siten, että sitä voitiin käyttää, vaikka 1 %:ssa vaipan polttoainesauvoja zircaloy-kuori rikkoontuisi ja niistä pääsisi radioaktiivisia aineita jäähdytysveteen. (Historic American Engineering Record, 7–8.)

Varhaiset ydinlaitokset Yhdysvalloissa rakennettiin turvallisuussyistä kauas asutuskeskuksista. Shippingportin voimalakin rakennettiin jokseenkin syrjäiselle alueelle noin 30 kilometrin päähän Pittsburghin kaupungista. AEC:n 1950-luvulla käyttämän nyrkkisäännön perusteella se olisi tarvinnut ympärilleen 7,5 kilometrin suojavyöhykkeen. Alueella oli kuitenkin liikaa asutusta, jotta tämä olisi ollut mahdollista. Tästä syystä voimalaan rakennettiin suojarakennus. Laivaston suunnittelulähtökohdista periytyen turvallisuussuunnittelun tärkein tavoite oli onnettomuuksien ehkäiseminen, joten järjestelmät rakennettiin siten, että niillä oli suuret turvamarginaalit. (Haskin et al. 2002, 1.1 1–2.)

Suojauksen tärkein tavoite oli estää radioaktiivisten fissiotuotteiden pääsy ulos reaktorisydäimestä kaikissa ennakoitavissa onnettomuustilanteissa. Tätä tarkoitusta varten reaktoriin suunniteltiin kolme erillistä leviämistä (kuva 4.3). Ensimmäisenä esteenä toimi polttoainesauvojen korroosionkestävä zircaloy-suojakuori. Toisen esteen muodosti

teräksinen jäähdytysveden primääripiiri, joka pystyi pitämään sisällään rikkoutuneista polttoainesauvoista irronneet aineet. Jäähdytysveden aktiivisuutta tarkkailtiin jatkuvasti, jotta mahdollisesti rikkoontuneet polttoainesauvat voitiin paikantaa ja poistaa. Kolmas este oli suojarakennus, jonka sisällä olivat kaikki voimalaitoksen osat, joissa jäähdytysvesi kiersi. Suojarakennus oli hitsattu kokoon, jotta siitä saatiin hermeettisesti suljettu. (The Shippingport Pressurized Water Reactor, 353–354.)



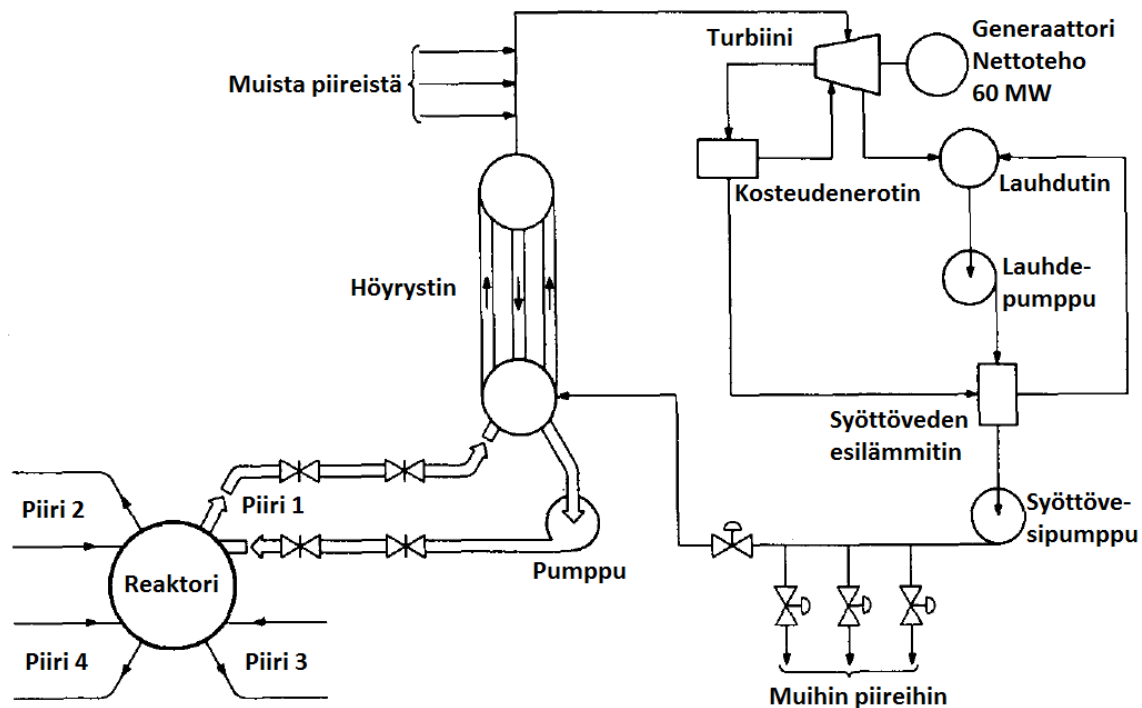
Kuva 4.3: Fissionituotteiden leviämisesteet. (The Shippingport Pressurized Water Reactor, 8, suomennettu.)

Kaksi onnettomuuksien kannalta tärkeää järjestelmää oli jälkilämmönpoistojärjestelmä (Decay heat removal system) sekä hätäjäähdytysjärjestelmä (Safety injection system). Jälkilämmönpoistojärjestelmän tarkoitus oli pitää reaktorisydämen lämpötila riittävän alhaisena hätäpysäytyksen jälkeen tilanteessa, jossa ulkoinen sähkönsaanti oli katkennut. Se kykeni poistamaan lämpöä 7 MW:n teholla. Sen toimiessa primääripiirissä vesi kiersi tarvittaessa luonnonkierrolla. Höyrystimissä primäärikierron vesi höyrysti sekundaaripuolen vettä, joka ohjattiin ilmakehään. Koska sekundaaripuoli menetti

jatkuvasti vettä, sinne täytyi lisätä sitä varadieselgeneraattorin käyttämällä pumpulla. Järjestelmän oli tarkoitus kyetä toimimaan 8 tuntia ilman ulkopuolista sähköä. Häätäjäähdytysjärjestelmän tarkoitus puolestaan oli syöttää reaktoriin jäähdytysvettä jäähdytteenmenetys onnettomuudessa, esimerkiksi jos primääripiirin putkistossa tapahtui vakava repeämä. Tätä tarkoitusta varten voimalaitoksella tuli olla kokoajan eri säiliöissä 333 m³ vettä. Järjestelmä käynnistyi automaattisesti, jos reaktorin paine laski liian matalaksi. Tällöin molemmat sekundaaripuolen syöttövesipumput ohjattiin pumppaamaan vettä varastosäiliöistä primääripiiriin. Häätäjäähdytysjärjestelmä kykeni peittämään reaktorisydämen vedellä nopeasti, jos putkiston repeämä tapahtui sydämen yläpuolella. Jos repeämä oli riittävän paha ja tapahtui sydämen alapuolella, sydämen peittämiseen kului useita kymmeniä minutteja, minkä oletettiin johtavan polttoaineen osittaiseen sulamiseen. Suunnittelussa oletettiin myös, ettei ulkoista sähkönsyöttöä ja jäähdytettä menetettäisi yhtä aikaa. Ilman ulkoista sähköä järjestelmä ei olisi toiminut suunnitellusti. (The Shippingport Pressurized Water Reactor, 360–361, 246–256.)

4.2 Voimalan rakenne ja järjestelmät

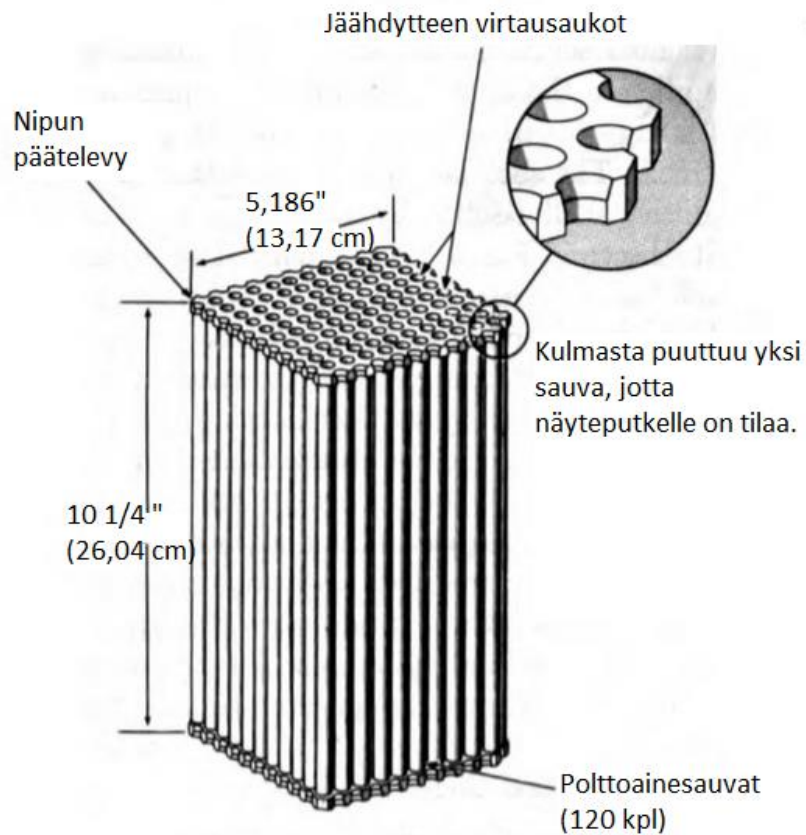
Reaktorin jäähdytysjärjestelmä (kuvassa 4.4) koostui primääripuolella neljästä erillisestä piiristä, joista kolmea tarvittiin täydellä teholla ajoin. Ylimääräistä piiriä voitiin huoltaa laitoksen käydessä normaalisti. Kaikissa piireissä oli kattavat mittalaitteistot, sekä oma kiertopumppu ja höyrystin. Höyrystimissä käytettiin kahta tyyppiä, jotta saatiin kokemusta molemmista. Kahdessa piirissä käytettiin Foster Wheelerin suoraputkisia lämmönsiirtimiä ja kahdessa muussa Babcock & Wilcoxin U-putkilämmönsiirtimiä. Tästä syystä piirien sijoittelut erosivat toisistaan hieman. Sekundaaripuolella kaikkein piirien kehittämä höyry johdettiin yhteiseen turbiiniin. (The Shippingport Pressurized Water Reactor, 27, 450–452.)



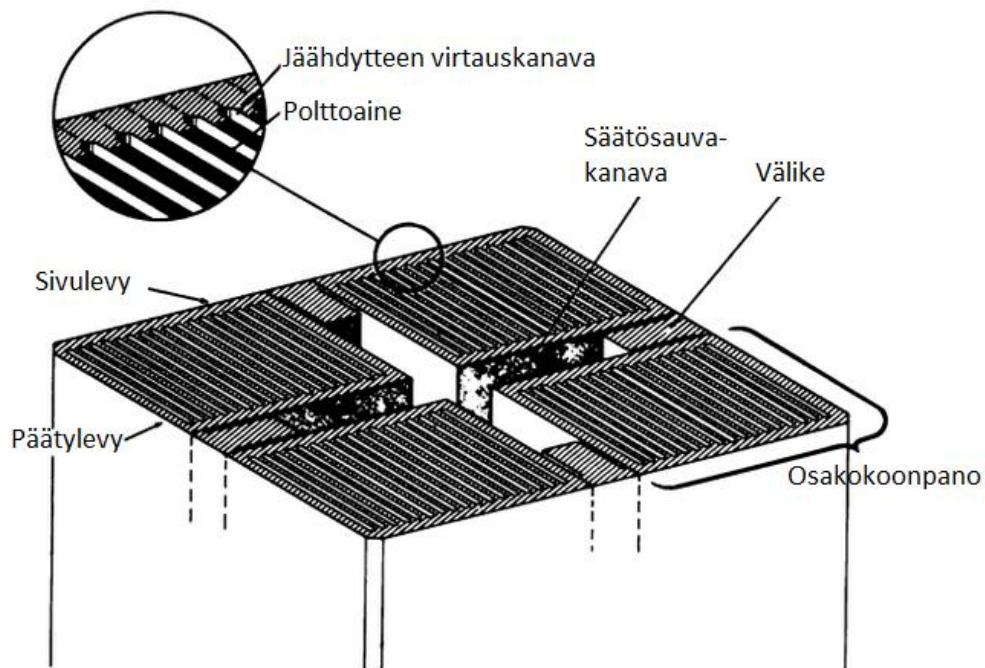
Kuva 4.4: Kaaviokuva voimalan jäähdytyspiireistä. (Feinroth et al. 1963, 218, suomennettu.)

Reaktorin paine-astia oli noin 10 metriä korkea ja vajaa 4 metriä leveä lieriö. Sen seinämien nimellispaksuus oli 21,3 cm ja se oli valmistettu magnaani-molybdeeni hiiliteräksestä. Jäähdytysvesi johdettiin sisään paineastiaan sydämen alapuolelta ja ulos sydämen yläpuolelta. (The Shippingport Pressurized Water Reactor, 63–64.)

Sydämessä vaippa-alueella uraanidioksidipolttoaine oli 26 cm pitkinä zircaloy-päällysteisinä sauvoina, jotka oli koottu 11×11-sauvan kokoiseen nippuun (bundle), jollainen on kuvassa 4.5. Seitsemän nippua kasattiin päällekkäin kokoonpanoksi (assembly), joka ympäröitiin zircaloy-kanavalla. Kanavan tarkoitus oli tukea polttoainenippuja ja ohjata jäähdytysveden kulkua. Varsinaisessa sydämessä puolestaan pitkälle väkevöity metallinen uraanipolttoaine oli seostettuna zircaloy'n kanssa levymäisiin elementteihin, jotka oli vielä päällystetty zircaloy-kuorella. Yhteensä 11 elementtiä hitsattiin yhteen osakokoonpanoksi (subassembly), ja neljä sellaista yhdistettiin yhdeksi kokoonpanoksi (assembly, kuvassa 4.6), jossa oli keskellä ristinmuotoinen tila säätösauvalle. (The Shippingport Pressurized Water Reactor, 78–86.)



Kuva 4.5: Vaipan polttoainenippu. Näyteputki on osa järjestelmää, jolla tarkkaillaan onko jäähdytteeseen päässyt radioaktiivisia aineita. (The Shippingport Pressurized Water Reactor, 81, suomennettu.)



Kuva 4.6: Varsinaisen sydämen polttoainekokoonpano. (The Shippingport Pressurized Water Reactor, 86, suomennettu.)

Lisäksi voimalaitoksella jätteidenkäsittelyjärjestelmä syntyvien radioaktiivisten jätteiden hoitamiseksi, sekä erilaisia apujärjestelmiä, jotka huolehtivat esimerkiksi jäähdytysveden kemiallisesta koostumuksesta ja paineesta, sekä mittalaitteista ja automaattiventtiileistä. (The Shippingport Pressurized Water Reactor, 205, 331–333.)

4.3 Voimalan rakentaminen

Rakennustyöt Shippingportissa aloitti virallisesti presidentti Eisenhower 6.9.1954. Varsinaiset rakennustyöt alkoivat kuitenkin vasta seuraavan vuoden toukokuussa. Tavoitteena oli voimalaitoksen rakennusten valmistuminen maaliskuuhun 1957 mennessä, jotta se voitiin ottaa käyttöön ennen vuoden loppua. Aikataulu oli tiukka, ja urakoitsijoita tarvittiin paljon, mikä johti suhteellisen mutkikkaaseen hallintoon työmaalla. Duquesne Light Companyn vastuulla ollut turbiini- ja generaattorirakennuksen rakentaminen annettiin Burns and Roe Inc.:n tehtäväksi. Atomienergiakomission pääurakoitsijana toimi Westinghouse, jolla oli päävastuu koko työmaasta. Sen alihankkijoina olivat Stone & Webster, joka hoiti rakennussuunnittelun ja tarkastukset, sekä Dravo Corporation ja Crump Incorporated, joiden tehtävänä oli rakentaminen. Työn etenemistä koordinoitiin viikoittaisissa ja kuukausittaisissa kokouksissa pääurakoitsijoiden kesken. (The Shippingport Pressurized Water Reactor, 503.)

Rakentaminen ei sujunut ilman viivytyksiä. Terästoimitukset myöhästyivät ja työtaistelut haittasivat paineastian ja turbogeneraattorin rakentamista. Viivästykset johtivat siihen, että kesällä 1956 amiraali Rickover joutui pyytämään AEC:lta yli 7 miljoonaa dollaria lisärahaa reaktoripuolen rakentamiseen. Tammikuussa 1957 Westinghouse totesi tarvitsevänsä vielä 10 miljoonaa lisää, jolloin ydinpuolen hinta nousi 55 miljoonaan dollariin. Viivästyksistä huolimatta reaktorisydän asennettiin 6. lokakuuta, ja 2. joulukuuta 1957 reaktori käynnistettiin ensimmäistä kertaa. (Hewlett & Duncan 1974, 247–256.)

4.4 Vertailu nykyaikaiseen painevesireaktoriin

Taulukossa 4.1 on verrattu Shippingportin voimalan ensimmäisen sydämen perustietoja Loviisa 2:n tietoihin. Loviisa 2 on painevesireaktori, joka otettiin käyttöön 1980. Se on venäläisvalmisteinen, joten kaikki tiedot eivät ole suoraan verrannollisia Shippingportiin.

Taulukko 4.1: Shippingportin ja Loviisa 2:n perustietojen vertailutaulukko. (The Shippingport Pressurized Water Reactor 583–588; Feinroth et al. 1963, 267; Kyrki-Rajamäki 2012, 140–141.)

	Shippingport	Loviisa 2 (VVER-400)
Reaktorin lämpöteho	225 MW	1500 MW
Nettosähköteho	60 MW	490 MW
Hyötysuhde	27 %	33 %
Tehotiheys	Varsinainen sydän 75 MW/m ³ Vaippa 25 MW/m ³	105 MW/m ³
Jäähdytteen paine	2000 psi (138 bar)	123 bar
Jäähdytteen lämpötila	523 °F (273 °C)	299 °C
Sydämen koko		
- halkaisija	6,8 ft (2,07 m)	2,7 m
- korkeus	6 ft (1,83 m)	2,4 m
Polttoaine		
- väkevöimisaste	Varsinaisessa sydämessä 93 % Vaipassa 0,7 %	Maksimi 3,6 %
- uraanin määrä	Varsinaisessa sydämessä 75 kg ²³⁵ U Vaipassa 14,2 t luonnonuraa	37,4 t
- polttoaine-elementit	32 varsinaisessa sydämessä 113 vaipassa	313 nippua, joissa 126 sauvaa
Jäähdytyspiirit	4	6

Taulukosta nähdään, että Loviisa 2:een verrattuna Shippingportin reaktorin teho oli hyvin pieni. Sen hyötysuhde ja tehotiheys jäivät myös uudemmassa voimalaitoksesta. Myös polttoaine on erilaista. Loviisa 2 ei ole seed-blanket –tyyppinen reaktori, vaan siellä polttoaine on kaikkialla lähes yhtä pitkälle väkevöityä uraanidioksidipolttainetta.

Turvallisuuden kannalta Loviisan ja Shippingportin laitoksilla käytettiin samantapaisia järjestelmiä, mutta Loviisassa on enemmän syvyysuuntaista puolustusta ja varajärjestelmiä. Reaktorin pikasulku toimi molemmissa laitoksissa periaatteessa samalla tavalla: säätösauvat putoavat reaktoriin nopeasti tarvittaessa omalla painollaan. Loviisassa on lisäksi hätäboorausjärjestelmä, jollaista ei Shippingportissa ollut. Primääripiirin painetta säädettiin molemmissa laitoksissa paineistimen avulla, ja

järjestelmissä oli varoventtiilit ylipaineen laskemista varten. Jälkilämmönpoistojärjestelmälle ja hätäjähdytysjärjestelmälle ei ollut Shippingportissa varajärjestelmiä toisinkuin Loviisassa. Sähkösaannin kannalta Loviisassa on yhteydet sähköverkkoon sekä erillinen linja Ahvenkosken vesivoimalalle. Lisäksi voimalaitoksella on kaasuturbiinilaitos ja molemmille reaktoreille neljä varadieselgeneraattoria. Shippingportin voimalassa oli normaalien sähkölinjojen lisäksi yksi 450 kW:n varadieselgeneraattori sekä varayhteys Duquesnen 23 kV:n sähkölinjaan. Näitä varajärjestelmiä ei voinut käyttää samaan aikaan (The Shippingport Pressurized Water Reactor, 441). Loviisassa reaktorin ympärillä on sekä teräksinen että betoninen suojarakennus, jotka on varustettu jäälauhdutusjärjestelmällä, painetta alentavilla ruiskutusjärjestelmillä sekä vedyn sytytysjärjestelmällä, jolla estetään vetyräjähdykset. Shippingportissa suojarakennuksena toimi neljä tiivistä paineastiaa, joiden sisällä oli reaktori sekä primäärijähdytyspiiri. Suojarakennus oli suunniteltu kestävään 3,64 barin paine, ja tarkoituksena oli, että se kestäisi kaiken reaktorissa olevan jäähdytteen höyrystymisen (The Shippingport Pressurized Water Reactor, 359). (Kyrki-Rajamäki 2012, 85–87.)

5 VOIMALAITOKSEN KÄYTTÖ

Shippingportin voimala otettiin käyttöön 2.12.1957 ja se saavutti täyden tehon 23.12.1957. Voimalaa käytettiin ensimmäisellä sydämellä helmikuuhun 1964. Seuraavan vuoden aikana voimalan asennettiin toinen sydän, joka oli jatkokehitetty versio ensimmäisestä, ja tehtiin tarvittavat muutostyöt. Voimala otettiin uudelleen käyttöön huhtikuussa 1965. Sitä käytettiin toisella sydämellä vajaa 9 vuotta helmikuuhun 1974. Tässä vaiheessa oli tehty päätös asentaa Shippingportiin kevytvesihyötöreaktorin (Light Water Breeder Reactor, LWBR) prototyyppi, jota käytettiin syyskuusta 1977 lokakuuhun 1982. Tämän jälkeen voimala poistettiin käytöstä ja purettiin. Purkutytöt saatiin valmiiksi joulukuussa 1989. (Clayton 1993, 3–6.)

5.1 Ensimmäinen sydän

Shippingportin voimalaa käytettiin ensimmäisellä sydämellä joulukuusta 1957 helmikuuhun 1964. Sydän oli seed-blanket -tyyppinen, ja se tuotti 60 MW nettosähkötehoa. Ensimmäiseen sydämeen ladattiin polttoainetta alkulatauksen jälkeen 3 kertaa. Voimala tuotti pääasiassa peruskuormaa, mutta sitä käytettiin myös jonkin verran säätövoiman tuotantoon testauksen, koulutuksen ja energiantarpeen mukaan. Voimala soveltui säätövoimalaksi, sillä se kyettiin ajamaan ylös ja alas nopeammin kuin Duquesne Lightin hiilivoimalat. Laitosta käytettiin etenkin aluksi myös perustutkimuksen tekemiseen painevesireaktoreista sekä henkilöstön koulutukseen. Tämän takia alkulataukselle käyttöaste jäi 37 %:iin, mutta jo toisella latauksella käyttöaste nousi 70 %:iin (O'Hara & Kemmet 1963, I-1). (Feinroth et al. 1963, 217–221.)

5.1.1 Polttoaineenlataukset

Polttoaineenlatauksessa reaktorin varsinaisen sydämen 32 käytettyä polttoelementtiä vaihdettiin uusiin. Vaipan polttoainenuippuja ei vaihdettu. Elementit vaihdettiin yksi kerrallaan reaktoriastian yläosan kautta nosturijärjestelmällä. Operaatio tehtiin polttoainekanavassa veden alla, mikä tarjosi riittävän säteilysuojan. Jotta nippuihin päästiin käsiksi, täytyi säätösauvojen ohjausmekanismit ja reaktorin instrumentaatio reaktoriastian yläosasta poistaa. Tämä poisto ja uudelleenasetus latauksen jälkeen lisäsivät operaation kokonaiskestoa. (Feinroth et al. 1963, 222.)

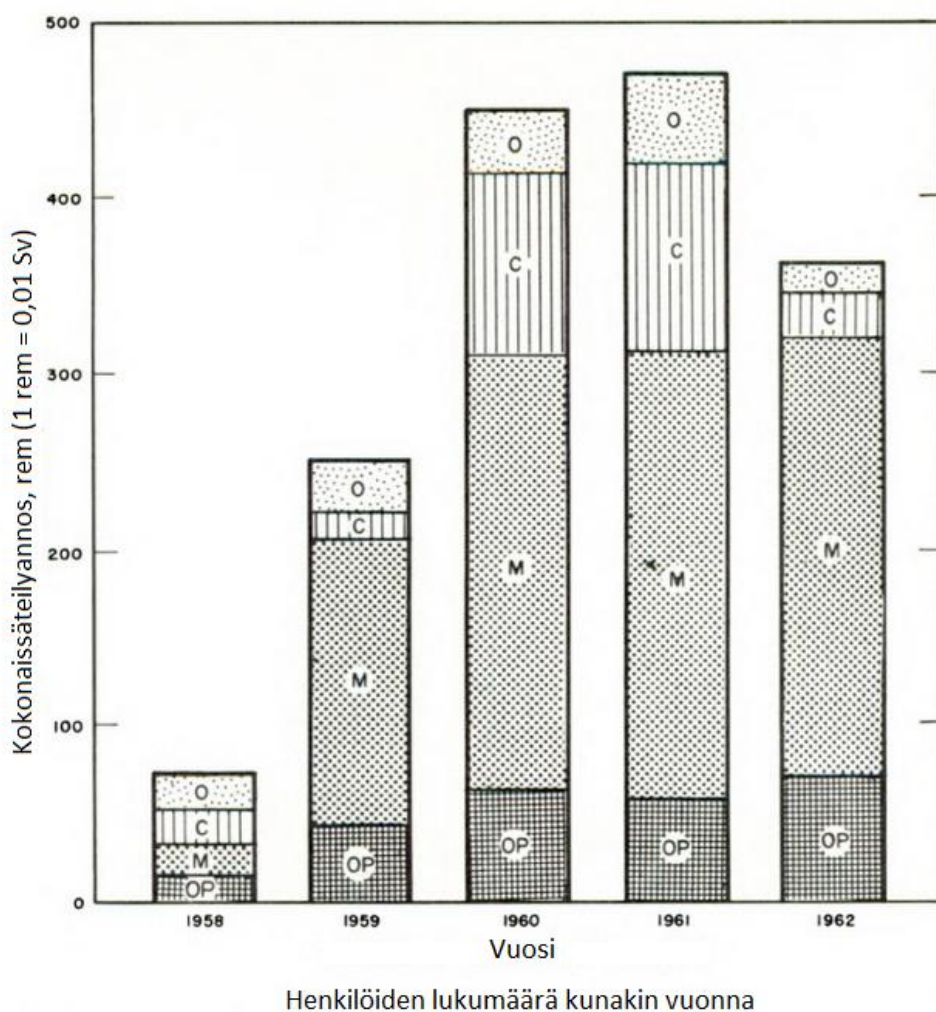
Ensimmäistä kertaa polttoainetta ladattiin uudelleen kahden vuoden käytön jälkeen. Operaatio aloitettiin marraskuussa 1959, ja se kesti noin viisi kuukautta. Lisäksi tarvittiin vielä kuukausi tarkastuksiin, jonka jälkeen täysi kuorma saavutettiin 7.5.1960. Toinen uudelleenlataus aloitettiin elokuussa 1961, ja se kesti 44 päivää. Viimeisen kerran polttoainetta ladattiin marraskuussa 1962, jolloin operaatioon tarvittiin 32 päivää. Polttoaineenlataukset nopeutuivat, koska jokaisesta kerrasta saatiin lisää kokemusta. Ensimmäisellä kerralla työtä hidasti kokemuksen puutteen lisäksi se, että samalla muokattiin reaktoriastian pään instrumentointia. Ensimmäisen uudelleenlatauksen jälkeen Duquesne Light ja Bettis Laboratory kehittivät 113 toimenpidettä latausten suorittamiseksi ja paransivat käytettäviä työkaluja. Lisäksi myös koulutusta, aikataulutusta ja suunnittelua kehitettiin. Tarvittavat ajat lyhenivätkin huomattavasti, ja kolmanteen uudelleenlataukseen käytetyt 32 työpäivää vastasivat saman aikakauden suuren tavanomaisen voimalaitoksen huoltoseisokkia. Turvallisuus oli tärkeimpänä huomiona kaikissa operaatioissa, eikä kukaan työntekijöistä saanut sallittua suurempaa säteilyannosta. (Feinroth et al. 1963, 222–225.)

5.1.2 Säteilysuojelu

Shippingportin voimala auttoi säteilysuojelun kehittämisessä, sillä sieltä saatiin käytännön tuloksia erilaisten suojelukeinojen toimivuudesta. Tärkeimmät henkilökunnan säteilynsaantia rajoittavat keinot liittyivät pääsyn estoon säteileville alueille, säteilytasojen tarkkailuun kaikissa tiloissa, sekä henkilöstön saaman säteilyn tarkkailuun. Suuri osa henkilöstön saamasta säteilystä oli peräisin reaktorista jäähdytysjärjestelmään liuenneista materiaaleista, joita kertyi järjestelmään käytön aikana, sekä tritiumista. Järjestelmästä vuoti venttiilien kautta noin 150 litraa vettä tunnissa. Vesi kerättiin vuotosäiliöön ja siitä edelleen jätteenkäsittelyyn. Toisen uudelleenlatauksen yhteydessä venttiilit huollettiin, jonka jälkeen vuoto pieneni noin 30 litraan tunnissa. (Feinroth et al. 1963, 224–229.)

Kuvassa 5.1 on esitetty eri henkilöstöryhmien saamat kokonaissäteilymäärät voimalan ensimmäisinä vuosina. Kuvasta voidaan laskea, että esimerkiksi vuonna 1960 keskimääräinen säteilyannos oli noin 7,5 mSv henkilöä kohti. Suomessa säteilytyöntekijöiden vuosittainen efektiivinen annos viiden vuoden keskiarvona ei saa ylittää 20 mSv:ä (A 20.12.1991/1512, Säteilyasetus). Huomattavaa kuitenkin on, että

huoltoseisokkien yhteydessä saadut säteilyannokset olivat suurempia. Esimerkiksi kolmannen polttoaineenuudelleenlatausseinä, joka kesti 32 päivää, yhteydessä saadut säteilyannokset olivat sähkömekaanikoilla keskimäärin lähes 24 mSv. Neljännesvuosittainen säteilyannosraja oli 30 mSv. (O'Hara & Kemmet 1963, VI-41, VI-47)



Kuva 5.1: Henkilöstön saama kokonaissäteilyannos vuosina 1958–1962. (O'Hara & Kemmet 1963, I-39, suomennettu.)

Myös voimalaitoksen ympäristöä valvottiin jatkuvasti, eikä sielläkään havaittu lisääntyneitä säteilyä. Pennsylvanian osavaltion lupien mukaan laitokselta sai päästä Ohio-jokeen keskimäärin 85,8 MBq säteilyä päivässä. Myöhemmin osavaltion

lainsäädäntöä muutettiin siten, että kymmenkertaiset päästöt sallittiin, mutta voimalaitoksella pitäydyttiin silti tiukemmissa rajoissa. Vedyn isotooppi tritiumille oli myös oma rajoituksensa, joka oli 0,37 TBq päivässä. Sitä syntyi pääasiassa jäähdytysveden happamuuden säätelyyn käytetyn litiumhydroksidin litium-6 isotoopeista. Kun käytettävä litium vaihdettiin isotooppipuhdistettuun litium-7:än, tritiumtasot putosivat huomattavasti. Vertailuna Suomessa Loviisan voimalaitokselle sallitaan vuosittain 150 TBq:n tritiumpäästöt ja 0,89 TBq:n muut päästöt veteen (Isolankila et al. 2004, 94). Jäähdytysveden fissiotuotetasot olivat huomattavasti pienemmät, kuin mihin jätteenkäsittelylaitos oli voimalaitoksella mitoitettu. Mitoitusperusteena oli 1000 rikkoutunutta vaipan polttoainesauvaa. Uudelleenlatauksien aikana löydettiin useita lievästi vaurioituneita polttoainesauvoja, jotka vaihdettiin, mutta silti fissiotuotteita oli jäähdytysvedessä niin vähän, että niiden voitiin olettaa johtuneen zircaloy-suojakuoren epäpuhtautena olevasta uraanista. (Feinroth et al. 1963, 229–230.)

5.1.3 Voimalaitoksen toiminta

Seed-blanket -reaktorikonseptin kannalta vaipan tuottama energia oli mielenkiinnon kohteena ensimmäisessä sydämessä. Kaiken kaikkiaan kolmen ensimmäisen polttoainelatauksen aikana peittoalueelta saatiin noin 54 % reaktorin tuottamasta energiasta. Puolet tästä energiasta syntyi hyödetyn plutoniumin fissioitumisesta, noin 8 % ^{238}U :n suorasta fissiosta ja loput peittoalueella olleen ^{235}U :n fissiosta. (Feinroth et al. 1963, 236–237.)

Ensimmäisen sydämen aikana itse reaktori toimi hyvin. Suurin ongelma oli epätasainen tehonjakauma, joka vaihteli 24 tunnin jaksoissa. Se ilmeni, kun reaktoria ajettiin pitkään täydellä teholla, ja ksenoninpoistokokeissa. Ongelma pystyttiin korjaamaan säätösauvojen asettelulla (Feinroth et al. 1963, 240–241). Muualla voimalassa suurimmat ongelmat olivat kolmen jäähdytyspumpun rikkoontuminen sekä höyrystimien muokkaustarve (Historic American Engineering Record 14–15).

5.2 Toinen sydän

Ensimmäisen sydämen käytöstäpoiston jälkeen Shippingportin laitoksella tehtiin laajamittainen dekontaminaatio, sillä reaktorin paine-astiaan ja jäähdytyspiireihin oli

kertynyt säteileviä korroosiotuotteita. Näin helpotettiin uuden sydämen asennusta, sekä muita laitokselle tarvittavia muutostöitä, kuten pääkiertopumppujen ja höyrystimien vaihtoa. Kyseessä oli ensimmäinen kerta, kun ydinvoimalalle tehtiin laajamittainen puhdistus. (Historic American Engineering Record, 15.)

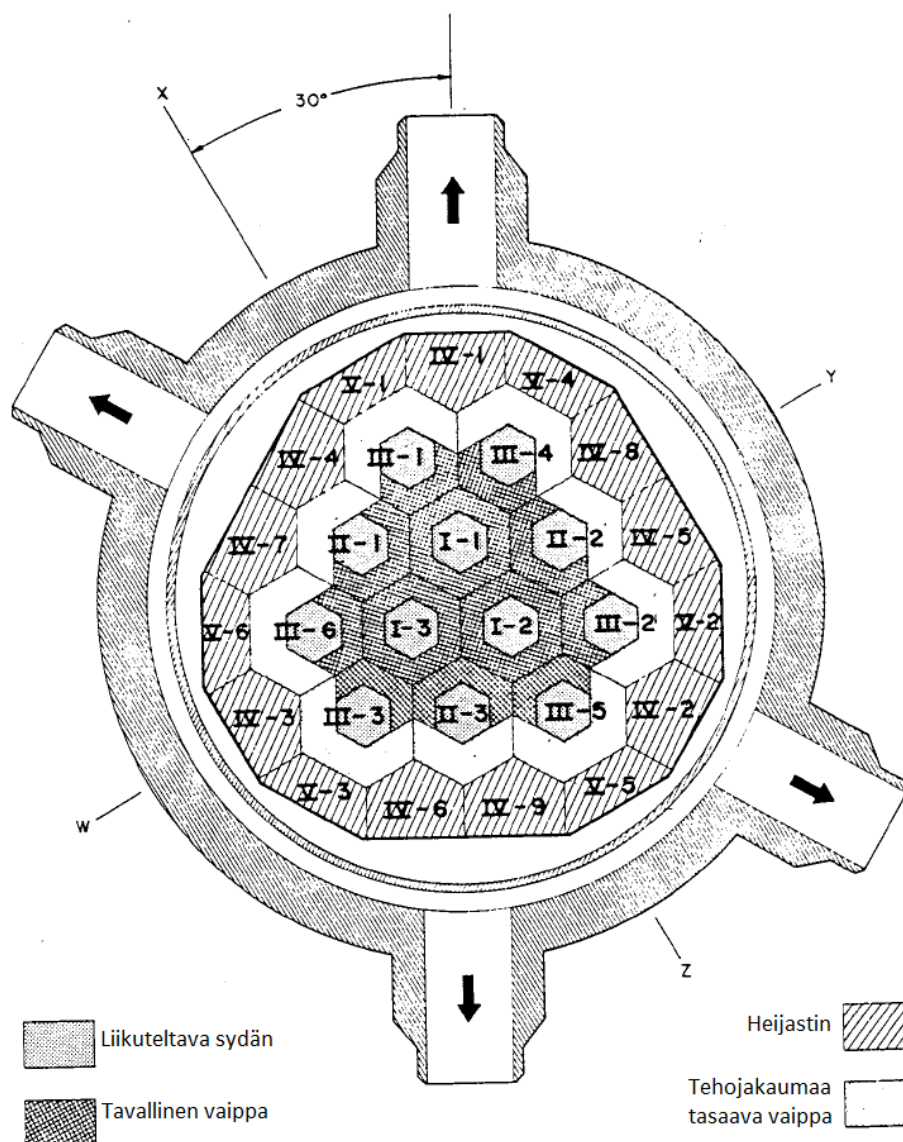
Uusi sydän oli pidemmälle kehitetty versio seed-blanket -konseptista. Sydän kykeni tuottamaan 150 MW sähkötehoa, joten laitoksen turbogeneraattori uudistettiin 108 MW tehoiseksi. Täydellä teholla ajoa varten laitokselle asennettiin lämpönielu. Uuden sydämen tehotiheys oli varsinaisessa sydämessä 157 MW/m³ ja vaipassa 33 MW/m³. Lisäksi se oli suunniteltu pitkäikäisemmäksi kuin ensimmäinen sydän. Sydän otettiin käyttöön huhtikuussa 1965, ja sitä käytettiin helmikuuhun 1974, jolloin turbiinin hajoaminen pakotti sammuttamaan laitoksen (Beaver 1987, 354.). Tällä aikavälillä varsinaisen sydämen polttoaine vaihdettiin kerran. (Clayton 1993, 4)

Sydän koostui 20:stä varsinaisen sydämen polttoaine-elementistä, jotka oli aseteltu vastaavalla tavalla ympyrämaisesti 77 vaippa-elementin sekaan kuin ensimmäisessä sydämessä. Polttoaineena käytettiin uraanidioksidia, johon oli varsinaisessa sydämessä lisätty zirkoniumdioksidia. Polttoaine ei ollut sauvoina, vaan levyinä, joissa oli zircaloy-4 -suojakuori. Levyihin päädyttiin niiden lämmönsiirto-ominaisuuksien vuoksi. Polttoainelevyt koottiin ensimmäisen sydämen varsinaisen sydämen polttoainekokoonpanoja muistuttaviin nelikulmaisiin elementteihin. Koska varsinaisessa sydämessä oli ylijäämäreaktiivisuutta, sen polttoaine-elementit varustettiin palavalla reaktiivisuusmyrkyllä. (Fenroth 1963, 256–268.)

5.3 Kevytvesihyötöreaktori

AEC oli käynnistänyt kevytvesihyötöreaktoriprojektin (Light Water Breeder Reactor, LWBR) vuonna 1965. Tarkoituksena oli kehittää kevytvesireaktoritekniikkaa ja torium-polttoainekiertoa hyödyntävä reaktori. Torium on luonnossa urania yleisempi alkuaine, ja sen isotoopista ²³²Th voidaan hyötää fissiiliä ²³³U:ta. Näin olisi mahdollista laajentaa käyttöön kelpaavia polttoainevarantoja. Kehityksen tuotoksena suunniteltu reaktorisydän asennettiin Shippingportin laitokselle, jossa sitä käytettiin syyskuusta 1977 lokakuuhun 1982. (Budd 1986, 1-1 – 1-2.)

Reaktorissa oli 12 kuusikulmaista polttoainemoduulia, jotka koostuivat liikuteltavasta sydäimestä ja sitä ympäröivästä vaipasta (kuva 5.2). Näiden moduulien ympärillä oli vielä 15 heijastinmoduulia. Polttoaineena sydämissä ja vaipoissa käytettiin uraanidioksidia ja toriumdioksidia, jotka olivat polttoainesauvoissa. Heijastimessa oli aluksi pelkästään toriumdioksidia. Polttoainemoduuleissa oli kahdenlaisia vaippa-alueita. Tehojakaumaa tasaavat alueet olivat vähän tavallisia vaippa-alueita suurempia ja niissä oli hieman enemmän ^{233}U :a, jotta sydämen tehojakauma vastaisi paremmin suuremman reaktorin tehojakaumaa. Kaiken kaikkiaan sydämessä oli 42,6 tonnia uraania ja toriumia (Budd 1986, A-2). (Olson et al. 2002, 2-1 – 2-5.)



Kuva 5.2: Kevytvesiyötöreaktorin sydän. Roomalaiset numerot viittaavat polttoainemoduulin tyyppiin. (Olson et al. 2002, 2-4, suomennettu.)

Neutronihukan minimointi on hyötöreaktorin suunnittelussa erityisen tärkeää. Siksi reaktorissa ei ollut edes neutroneja absorboivia säätösauvoja tai jäädytteesen liuotettavia reaktiivisuusmyrkkyjä. Sen sijaan tehonsäätö toteutettiin liikuteltavilla sydämillä. Normaalikäytössä sydämet nostettiin alhaalta vaippamoduulien keskelle, siten että polttoaine-alueet olivat kohdakkain. Reaktori sammutettiin laskemalla sydämet takaisin alas. (Budd 1986, 2-3.)

Uuden sydämen lämpöteho oli 236,6 MW, jolloin voimalaitoksen nettosähköteho oli 60 MW. Vuonna 1980 teho kuitenkin rajoitettiin 80 prosenttiin, jotta reaktoria voitiin käyttää pidempään, kuin mitä alun perin oli suunniteltu (Budd 1986, 1-21, 3-2). Käytöstäpoiston jälkeen polttoainesauvoille tehtiin kokeita, joiden perusteella reaktorissa oli suljettaessa 1,39 % enemmän fissiiliä materiaalia kuin aluksi (Clayton 1993, 6).

5.4 Käytöstäpoisto

Kevytvesihyötöreaktorivaiheen jälkeen Shippingportin voimala suljettiin. Seuraavien vuosien aikana siellä tehtiin käytönjälkeisiä kokeita ja reaktorista poistettiin polttoaine. Vuonna 1984 energiainisteriössä katsottiin, että voimalan kanssa voitaisiin menetellä neljällä tavalla. Voimala voitaisiin olla purkamatta ja pitää se entisenlaisen valvonnan alaisena, eli olla tekemättä mitään. Toisaalta voimala voitaisiin asettaa ”turvalliseen säilytykseen”, jossa se pidettäisiin ympäristölle turvallisessa kunnossa ja purettaisiin 90 vuoden kuluttua. Kolmas vaihtoehto oli voimalan hautaaminen säteilyeristeen alle odottamaan säteilytasojen laskemista turvalliselle tasolle. Viimeinen vaihtoehto oli voimalan välitön purkaminen ja radioaktiivisten osien ja jätteiden poistaminen. Näistä vaihtoehtoista valittiin välitön purkaminen useista syistä. Se arvioitiin hautaamista tai viivytettyä purkamista halvemmaksi ja turvallisemmaksi, sillä mahdollisilta säilytyksen aikaisilta säteilyvuodoilta vältyttiin. Lisäksi saatavilla oli vielä voimalan käyttöhenkilökunnan tietotaitoa ja projektilla voitiin osoittaa muille lähitulevaisuudessa käytöstäpoistettaville ydinvoimaloille, että käytöstäpoisto voitiin tehdä olemassa olevalla teknologialla taloudellisesti ja ajallaan. Myös tonttimaan vapauttaminen oli tärkeä tekijä, sillä alueen vuokrasopimus loppui vuonna 1994. (Coffman 1984, 3–6.)

Purkutyöt aloitettiin syyskuussa 1985. Ensimmäisenä rakenteista poistettiin asbestieristeeet. Tämän jälkeen voitiin aloittaa putkistojen ja laitteiden poisto sekä

dekontaminaatio. Viimeisinä purettiin betonirakenteet ja itse reaktoriastia. Reaktorin paineastia ja sen suojat poistettiin yhtenä kappaleena, kuten myös neljä höyrystintä. Ne kuljetettiin vesitse Hanfordiin, jossa ne haudattiin maahan. Osa materiaaleista dekontaminoitiin, jotta ne voitiin hävittää tavallisena jätteenä. Yli 0,9 m syvyydessä olevat rakenteet jätettiin paikoilleen, ja ne peitettiin puhtaalla maa-aineksella. (Delaney 1985, 31–32)

Projekti saatiin valmiiksi joulukuussa 1989, neljä kuukautta etuajassa arvioidusta päätöksestä. Lisäksi budjetti alitettiin 7 miljoonalla dollarilla. Rahaa käytettiin lopulta 91,3 miljoonaa dollaria. Reaktoriastian poisto yhtenä kappaleena auttoi pitämään budjetin aisoissa. Se voitiin tehdä, koska reaktori oli verraten pieni. Käytetty polttoaine siirrettiin energiaministeriön Idahon kansalliseen tutkimuslaboratorioon (INEL) odottamaan loppusijoitusta. Koska matala-aktiiviset jätteet hävitettiin valtion laitoksessa Hanfordissa, prosessiin kului huomattavasti vähemmän rahaa, kuin puhtaasti kaupallisessa voimalassa. Käytöstäpoistoprosessin demonstraatioluonteen vuoksi projektilla oli suuri hallintorakenne. Budjetista 30 % meni voimalaitoksen fyysiseen purkamiseen ja 70 % erilaisiin hallinta-, valvonta- ja jätteidenhävitystöihin. (Rezendes 1990, 2–6.)

Shippingportin käytöstäpoistoprojektista saadut kokemukset eivät olleet suoraan hyödyllisiä kaupallisten ydinvoimaloiden vastaaville prosesseille. Uusia tekniikoita ei kehitetty, koska projektin tarkoituksena oli osoittaa ydinvoimalan purkamisen olevan mahdollista olemassa olevalla teknologialla. Lisäksi paineastian poistaminen yhtenä kappaleena ei ole koon vuoksi mahdollista useilla kaupallisilla voimalaitoksilla. Teknologian kehitys myös vanhensi saadut kokemukset nopeasti. Projektin katsottiin kuitenkin hyödyttäneen kaupallisia toimijoita suunnittelun, aikataulutuksen ja haitallisten aineiden poiston alueilla. (Rezendes 1990, 7, 18.)

6 YHTEENVETO

Shippingportin ydinvoimala oli tärkeä demonstraatio, joka osoitti painevesireaktorin toimivaksi. Vaikka se erosikin huomattavasti moderneista painevesireaktoreista, se oli osaltaan mukana tekemässä painevesireaktoreista suosituimman reaktorityypin sähköntuotannossa. Se syntyi laivaston kehitystyön pohjalta kylmän sodan ilmapiirissä, jossa tekniikka oli tärkeä osa-alue suurvaltojen välisessä valtapelissä.

Käyttöaikanaan voimala toimi hyvin ilman suurempia ongelmia. Sitä käytettiin niin peruskuorman ajoon kuin säätövoimalanakin. Lisäksi siellä tehtiin tutkimusta voimalan käytöstä ja koulutettiin henkilöstöä muihin voimaloihin. Säteilysuojelun osalta se täytti oman aikansa vaatimukset.

Nykyaikaiseen painevesireaktoriin verrattuna Shippingportin voimala oli teholtaan pieni. Lisäksi sen turvallisuusjärjestelmistä puuttui nykyaikaisten voimaloiden rinnakkaisuusajattelua, sillä varajärjestelmiä oli vähän.

LÄHDELUETTELO

Allen, Wendy. 1977. Nuclear Reactors for Generating Electricity: US Development from 1946 to 1963. Santa Monica: RAND Corporation. 81 s. Saatavissa: <http://www.rand.org/pubs/reports/R2116.html>

Beaver, William. 1987. Duquesne Light and Shippingport: Nuclear Power Is Born in Western Pennsylvania. The Western Pennsylvania Historical Magazine, Volume 70, Number 4, October 1987. s 339.

Buck, Alice L. 1983. A History of the Atomic Energy Commission. Washington D. C.: U. S. Department of Energy. 26 s.

Budd, W. A. 1986. Shippingport operations with the Light Water Breeder Reactor core. (LWBR Development Program). West Mifflin: Westinghouse Electric Corporation Bettis Atomic Power Laboratory. 280 s. Saatavissa: <http://www.osti.gov/scitech/biblio/5914091-shippingport-operations-light-water-breeder-reactor-core-lwbr-development-program>

Coffman, Frank E. 1984. Shippingport Station Decommissioning Project Overview and Justification. [Yhdysvaltain energiaministeriön www-sivuilta]. [viitattu 18.8.2015]. Saatavissa: <http://www.osti.gov/scitech/biblio/6021025-shippingport-station-decommissioning-project-overview-justification>

Clayton, J. C. 1993. The Shippingport Pressurized Water Reactor and Light Water Breeder Reactor. West Mifflin: Westinghouse Electric Corporation Bettis Atomic Power Laboratory. 7 s. Saatavissa: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/25/025/25025940.pdf>

Coleman, Aaron. 2009. The Shippingport Atomic Power Station. [Kursesityö Stanfordin yliopiston www-sivuilla]. Päivitetty 11.12.2009. [viitattu 5.11.2015]. Saatavissa: <http://large.stanford.edu/courses/2009/ph204/coleman1/>

Delaney, Edward G. 1985. Decommissioning of US DOE nuclear facilities. IAEA Bulletin, winter 1985. Saatavissa: <https://www.iaea.org/sites/default/files/27405093034.pdf>

Dennis, Jack (toim.). 1984. The Nuclear Almanac: Confronting the Atom in War and Peace. Reading: Addison-Wesley Publishing Company. 546 s. ISBN 0-201-05331-4.

Feinroth, H.; Oldham, G. M.; Stiefel, J. T. 1963. Shippingport Atomic Power Station: Operating Experience, Developments and Future Plans. Teoksessa: IAEA, Operating Experience with Power Reactors: Proceedings of the Conference on Operating Experience with Power Reactors Held by the International Atomic Energy Agency at Vienna, 4-8 June 1963 vol. I. Wien: IAEA. 526 s.

Fortum. Kevytvesireaktorit. [Fortumin www-sivuilla]. Päivitetty 12.5.2015. [viitattu 17.11.2015]. Saatavissa: <http://www.fortum.com/fi/energiantuotanto/ydinvoima/ydinvoima/kevytvesireaktorit/pages/default.aspx>

Glasstone, Samuel; Sesonske, Alexander. 1981. Nuclear Reactor Engineering. 3. painos. New York: Van Nostrand Reinhold. 805 s. ISBN 0-442-20057-9.

Haskin, F. E.; Camp, A. L.; Hodge, S. A.; Powers, D. A. 2002. Perspectives on Reactor Safety. 2. painos. Washington D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission. Saatavissa: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6042/#pub-info>

Hewlett, Richard G.; Duncan, Francis. 1974. Nuclear Navy, 1946 – 1962. Chicago: University of Chicago Press. 477 s. Saatavissa: <http://www.energy.gov/management/downloads/hewlett-and-duncan-nuclear-navy-1946-1962>

Historic American Engineering Record. Shippingport Atomic Power Station, On Ohio River, 25 miles Northwest of Pittsburgh, Shippingport, Beaver County, PA. [Library of Congress www-sivuilta]. [viitattu 3.11.2015]. Saatavissa: <http://www.loc.gov/pictures/item/pa1658/>

Isolankila, Arto; Järvinen, Marja-Leena; Keskinen, Rauli; Niemelä, Ilkka; Ojanen, Matti; Rantala, Rainer; Sandberg, Jorma. 2004. Ydinturvallisuuden varmistaminen. Teoksessa: Sandberg, Jorma (toim.), Ydinturvallisuus. Helsinki: STUK. Osa 5 kirjasarjasta Säteily- ja ydinturvallisuus. ISBN 951-712-507-0.

Kok, Kenneth D (toim.). 2009. Nuclear Engineering Handbook. Boca Raton: CRC press. 768 s. ISBN 978-1-4200-5390-6.

Lamarsh, John R.; Baratta, Anthony J. 2014. Introduction to Nuclear Engineering. 3. painos. Harlow: Pearson Education. 740 s. ISBN 1-29202-581-6.

Kyrki-Rajamäki, Riitta. 2012. Reaktorimateriaalit ja yleisimmät reaktoriyyypit. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 163 s. Ydinvoimatekniikka I -kurssin kurssimateriaali.

Leclercq, Jacques. 1986. The Nuclear Age. Michel Durr. Sodel: Le Chêne. 414 s. ISBN 2-85108-439-9.

Murray, Raymond L. 1988. Nuclear Energy. 3. Painos. Oxford: Pergamon Press. 392 s. ISBN 0-08-031629-8.

Nero, Anthony V. 1979. A Guidebook to Nuclear Reactors. Berkeley: University of California Press. 289 s. ISBN 0-520-03661-1.

O'Hara, R. D. (toim.); Kemmet, L. H. (toim.). 1963. Shippingport operations: from power operation after second refueling to power operation after third refueling, October 24, 1961 to January 30, 1963. Pittsburgh: Duquesne Light Co. Saatavissa: <http://catalog.hathitrust.org/Record/100610586/Home>

Olson, Gail Lynn; McCardell, Richard Keith; Illum, Douglas Brent. 2002. Fuel Summary Report: Shippingport Light Water Breeder Reactor. 2. painos. Idaho Falls: Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. 367 s. Saatavissa:

<http://www.osti.gov/scitech/biblio/910649-fuel-summary-report-shippingport-light-water-breeder-reactor-rev>

Rahn, Frank J.; Adamantiades, Achilles G.; Kenton, John E.; Braun, Chaim. 1984. A Guidebook to Nuclear Power Technology. New York: John Wiley & Sons, Inc. 985 s. ISBN 0-471-88914-8.

Rezendes, Victor S. 1990. Nuclear Research and Development: Shippingport Decommissioning – How Applicable Are the Lessons Learned?. [U.S. Government Accountability Officeen [www-sivuilta](http://www.sivuilta)]. [viitattu: 18.8.2015]. Saatavissa: <http://www.gao.gov/products/RCED-90-208>

The Shippingport Pressurized Water Reactor, written by personnel of the Naval Reactors Branch, Division of Reactor Development, United States Atomic Energy Commission, Westinghouse Electric Corporation, Bettis Plant [and] Duquesne Light Company. 1958. Reading: Addison-Wesley Pub. Co. 588 s. Saatavissa: <http://catalog.hathitrust.org/Record/001616912>