

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Kuinka kiehutusvesireaktori todistettiin toimivaksi – yhteenveto BORAX-kokeista

Työn tarkastaja: Professori Juhani Hyvärinen

Työn ohjaaja: Vesa Tanskanen

Lappeenranta 17.12.2016

Ville Oinonen

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Ville Oinonen

Opinnäytteen nimi: Kuinka kiehutusvesireaktori todistettiin toimivaksi - yhteenveto BORAX-kokeista

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2016

33 sivua, 5 kuvaa

Hakusanat: Borax, kiehutusvesireaktori, Arco, Argonne National Laboratory, Walther Zinn,

Tämän työn tavoitteena on perehtyä 1950-luvulla suoritettuihin BORAX-kokeisiin. Borax-kokeet sisälsivät yhteensä viisi erillistä koesarjaa, joita tarkastellaan yksitellen. Jokaisesta koesarjasta perehdytään laitteistoon, suoritustapoihin sekä ongelmatilanteisiin. Lopuksi tehdään vielä vertailua nykyisiin reaktoreiden testausmenetelmiin pääasiallisesti turvallisuusnäkökohtien kannalta. Työn tavoitteena on antaa kattava kuva sekä tapahtumista kokeiden aikana että 1950-luvun menettelytavoista.

Kahdessa ensimmäisessä Borax-kokeessa selvitettiin kiehutusvesireaktoreiden soveltuvuutta energiantuotantoon ja määritettiin raja-arvoja, joiden puitteissa reaktoria voidaan ajaa. Borax 1 ja 2 -kokeiden onnistumisien myötä päätettiin rakentaa pysyvämpi Borax 3 -koereaktori, joka silloisen suurvaltapolitiikan ansiosta valjastettiin lopulta tuottamaan sähköä. Borax 3 oli historian ensimmäinen ydinvoimalaitos, josta saadulla energialla valaistiin kokonainen kaupunki.

Borax 4 -reaktorilla tutkittiin erilaisten polttoaine-elementtien ja uraanipitoisuuksien vaikutusta reaktorin käyttöön. Reaktoriin ladattiin myös vaurioituneita polttoaine-elementtejä. Tuorehöyrystä, turbiinista ja ympäristöstä otettujen näytteiden avulla varmistuttiin, että polttoaineen vaurioitumisella ei ole merkittävää vaikutusta säteilytasojen nousuun turbiinissa tai laitoksen ulkopuolella.

Borax 5 -reaktorilla kokeiltiin ensimmäistä kertaa historiassa tulistimen käyttöä ydinvoimalassa. Saadut tulokset olivat positiivisia, mutta kokeet jouduttiin lopulta lopettamaan taloudellisista syistä.

Borax-kokeet olivat aikansa suuri teknologinen taidonnäyte. Kokeet olivat myös suuri menestys, ja nykyisin kiehutusvesireaktoreita on rakennettu moniin maihin, ja ne ovat edelleen varteenotettava kilpailija painevesireaktoreille.

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	4
2 Borax-testejä edeltäneet tapahtumat	5
2.1 Ydinreaktoreiden kehitys	5
2.2 Onnettomuus Argonnen kansallisessa laboratoriossa	5
3 BORAX 1	6
3.1 Reaktori	6
3.2 Ensimmäinen BORAX-koee	8
3.3 Johtopäätökset	10
4 Borax 2	11
4.1 Stabiiliuskokeet	11
4.2 Borax 2 -reaktorin tuhoutumistesti	13
4.2.1 Valmistelut	13
4.2.2 Tuhoaminen	14
4.2.3 Tulokset ja siivoaminen	15
5 BORAX 3	17
5.1 Turbiinin ja generaattorin asennus	17
5.2 Booraus	19
5.3 Arcon valaiseminen	20
5.4 Geneven konferenssi	23
6 Borax 4	24
7 Borax 5	25
8 Vertailu nykypäivään	27
8.1 Säteilyturvallisuus	27
8.2 Ydinturvallisuus	28
8.3 Järjestelmät	29
9 Yhteenveto	31
Lähdeluettelo	32

1 JOHDANTO

Toisen maailmansodan loputtua Yhdysvaltojen ja Neuvostoliiton välinen kilpailu maailman johtavan suurvallan asemasta sai aikaan suuria tieteellisiä ja teknologisia saavutuksia. Ydinaseiden kilpavarustelu oli hyvin keskeinen osa tätä kylmän sodan aikaista vastakkainasettelua. Osittain ydinaseiden kehityksen myötä myös ydinvoiman rauhanomainen käyttö alkoi kiinnostaa suurvaltioita. Tuloksena syntyi sarja erilaisia koereaktoreita ja testejä, joissa testattiin uudenlaisia konsepteja ja innovaatioita. Yksi tällaisista koesarjoista oli Argonne National Laboratoryn tehtäväksi annettu Borax-testisarja. Tavoitteena oli osoittaa, että jäähdytteen kiehuminen reaktorisydämessä ei tee reaktorista epävakaata. (Haroldsen, R. 2008.)

Borax-kokeet suoritettiin sen ajan mukaisesti hyvin nopealla aikataululla ja pienellä miehityksellä, mikä antoi mahdollisuuden joustavuuteen ja nopeaan reagointiin erilaisissa ongelmatilanteissa, joita kokeiden aikana sattui useita. Koelaitteiston suunnitteluun ja koereaktoreiden käyttöä varten koottiin ryhmä Yhdysvaltojen johtavia ydinvoima-asiantuntijoita, ja projektin johtajaksi asetui Manhattan-projektissakin mukana ollut Walter Zinn. (Ibid)

Borax-kokeet aloitettiin alun perin pelkän spekulatiivisuuden pohjalta, mutta ne johtivat lopulta maailmanlaajuiseen kiehutusvesireaktoreiden käyttöön. Monet silloin keksityt reaktorin toimivuuteen ja turvallisuuteen liittyvät innovaatiot ovat vieläkin käytössä sellaisenaan. Borax-kokeet antoivat myös tietoa, jota ei ole enää nykyisin mahdollista saada tiukentuneiden turvallisuussäännösten ja ydinkieltosopimusten takia. (Ibid)

2 BORAX-TESTEJÄ EDELTÄNEET TAPAHTUMAT

BORAX-kokeet suoritettiin 1950-luvulla kylmän sodan aikaan. Suurvaltojen välinen kilpailu johtavasta asemasta teknologian alalla toimi osittain kokeiden motiivina ja vauhditti päätösten tekoa. Idea kiehutusvesireaktoreista saatiin alun perin sattumalta laboratoriossa sattuneen onnettomuuden seurauksena. (Ibid)

2.1 Ydinreaktoreiden kehitys

Ydinreaktoreiden historia alkaa vuodesta 1942. Tuolloin Enrico Fermin johtama Manhattan-projekti rakensi maailman ensimmäisen ydinreaktorin, joka saavutti kriittisyyden. Toisen maailmansodan aikana Yhdysvaltoihin rakennettiin paljon reaktoreita, joiden tarkoituksena oli tuottaa ydinaseisiin soveltuvaa plutoniumia. (Atomic Heritage Foundation. 2015)

Vuonna 1951 Walter Zinnin johtama Argonne National Laboratory rakensi maailman ensimmäisen energiantuotantoon soveltuvan reaktorin. Reaktori sai nimekseen EBR-1 (experimental breeder reactor). EBR-1 oli nestemetallijäähdytteinen nopea hyötöreaktori, jonka tarkoituksena oli todistaa teoria hyötöreaktorista myös käytännössä mahdolliseksi. Reaktorin tuottama lämpöteho oli 1 400 kW ja siitä saatu sähköteho 200 kW. (Argonne National Laboratory. 2016.)

Vuonna 1955 Yhdysvaltojen laivasto rakensi maailman ensimmäisen ydinvoimakäyttöisen sukellusveneen. USS Nautilusiksi nimetyssä sukellusveneessä oli Westinghousen S2W -painevesireaktori. Ydinreaktorin pidemmän toiminta-ajan ansiosta se rikkoi monia ennätyksiä, joihin ei dieselkäyttöisillä sukellusveneillä pystytty. (Argonne National Laboratory. 2016.)

2.2 Onnettomuus Argonnen kansallisessa laboratoriossa

Ennen vuotta 1952 uskottiin vesijäähdytteisen reaktorin jäähdytteen kiehumisen tekevän reaktorista epävakaa ja jopa aiheuttavan reaktorin vaurioitumisen. Nautilus-tyyppisessä kooreaktorissa sattuneen tahattoman tehonnousun seurauksena jäähdyte alkoi kiehua,

minkä seurauksena tapahtunut höyryräjähdys rikkoi osan laitteistosta ja altisti osan reaktorin käyttöhenkilökunnasta säteilylle. Vahingot olivat kuitenkin kokonaisuudessaan pieniä. Onnettomuuden tutkimuksista saatujen tulosten perusteella alettiin spekuloida kiehutusvesireaktorin soveltuvuudesta energiantuotantoon. Samuel Untermyer, yksi kokeisiin osallistuneista teknikoista, ehdotti, että kuplien muodostuminen reaktorissa voisi jopa auttaa reaktorin tasapainotuksessa (Argonne National Laboratory. 2016.). Tulosten pohjalta päätettiin rakentaa koereaktori Illinoisiin. Kokeen nimeksi annettiin BORAX (Boiling water reactor experiments). Testaus oli tarkoitus suorittaa loppuun kesän 1952 aikana ja jatkaa vain, jos tulokset ovat lupaavia. (Haroldsen, R. 2008.)

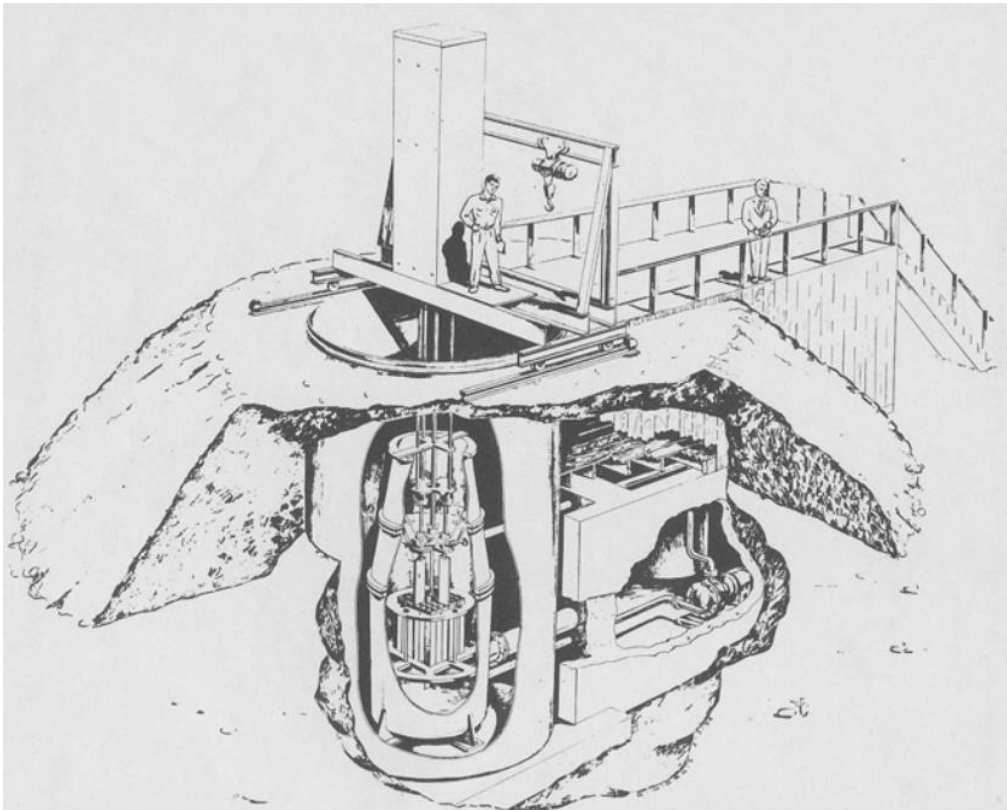
3 BORAX 1

BORAX 1 oli maailman ensimmäinen kiehutusvesireaktorin prototyyppi. Sen tarkoituksena oli määrittää raja-arvoja, joiden sisällä reaktoria olisi turvallista ja tehokasta ajaa. (Ibid)

3.1 Reaktori

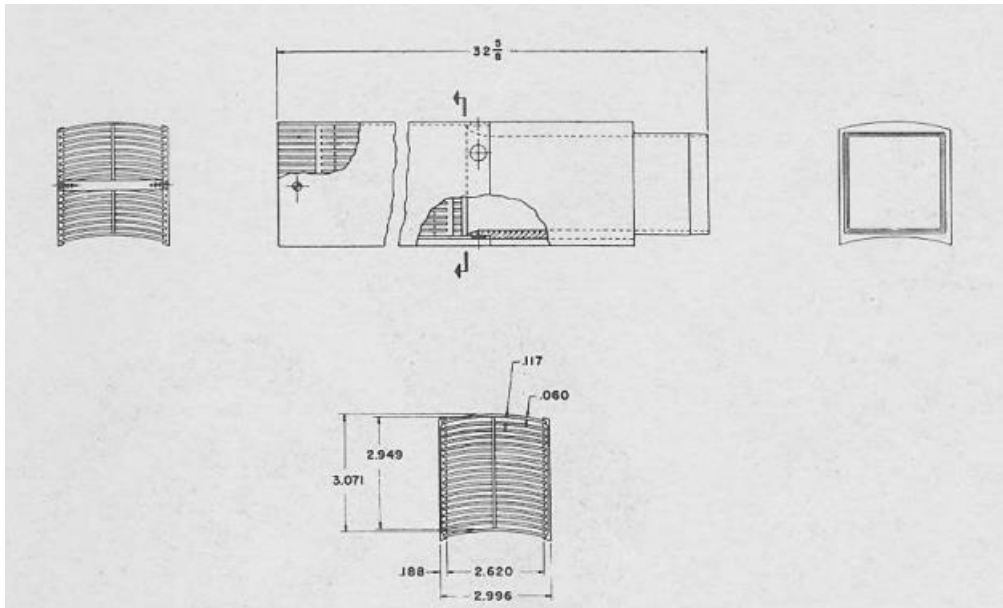
Koska testit oli tarkoitus saada päätökseen yhden kesän aikana, reaktori ja laitteistot rakennettiin valmiiksi Chicagossa. Paineastia, säätösauvakoneisto, valvomo ja pumput kuljetettiin rekoilla testauspaikalle Idahoon. Reaktoria varten kaivettiin kuoppa 830 metriä luoteeseen EBR-1 koereaktorista (A Green Road Journal. 2014). Kuoppa jaettiin betonisella seinällä kahteen osaan. Toiseen osaan sijoitettiin pumput ja toiseen reaktori. Reaktori koostui painesäiliöstä, jonka ympärillä oli suoja-astia. Reaktori oli vain noin puoliksi maanpinnan alapuolella, joten maata kasattiin reaktorin ympärille suojaksi ja tueksi, kuten kuvassa 1 on esitetty. Paineastiaan oli asennettu kansi, mutta sitä ei käytetty useimmissa kokeissa ollenkaan, vaan höyry pääsi purkautumaan suoraan ilmakehään. Suojarakennusta ei katsottu tarpeelliseksi rakentaa, koska testit oli tarkoitus suorittaa kesän aikana. (Haroldsen, R. 2008.)

Painesäiliö oli halkaisijaltaan n. 2.75 metriä ja korkeudeltaan 3.66 metriä. Se oli suunniteltu kestämään 2 MPa:n paine, vaikkakin testit suoritettiin pääosin painesäiliön kansi auki ilmakehän paineessa. (Ibid)



Kuva 1. BORAX 1 -laitteisto. (Haroldsen, R. 2008.)

Polttoaine oli peräisin läheiseltä materiaalien testausreaktorilta (MTR). Polttoaine koostui koverista alumiinilevyistä, joiden välissä uraani oli suojassa veden kemiallisilta vaikutuksilta. Levyjen välissä oli n. 1/8 tuuman (n. 3.20 mm) raot, jotka toimivat virtauskanavina jäähdytteenä toimivalle vedelle (kuva 2).



Kuva 2. BORAX 1 -testilaitteiston polttoaine-elementti. (Haroldsen, R. 2008.)

3.2 Ensimmäinen BORAX-koe

Reaktorin ja muiden testilaitteistojen kasaukseen osallistuivat Chicagossa laitteiden rakennuksessa mukana olleet teknikot sekä noin puolet EBR-1-koereaktorin henkilökunnasta. BORAX-reaktori rakennettiin EBR-1-reaktorialueen välittömään läheisyyteen, jotta voitiin käyttää hyödyksi mm. EBR-1:n syöttövesikaivoa sekä muuta valmista infrastruktuuria. Paikka oli myös turvallinen, koska lähellä ei sijainnut isoja kaupunkeja tai muuta asutusta. (Ibid)

Kokoamisen jälkeen reaktori täytettiin mineraaleista puhdistetulla vedellä. Puhdasta vettä käytetään ydinreaktoreissa, koska vedessä olevat mineraalit ja muut partikkelit aktivoituvat reaktorin neutronivuossa ja aiheuttavat säteilytason nousun. Reaktori oli kuitenkin avonainen, ja puhdistettua vettä käytettiin vain yhden kerran reaktorin täyttämiseen. Veteen päätyi kokeiden aikana pölyä ympäristöstä sekä mm. muurahaisia, jotka jouduttiin pudistamaan käsin aina ennen uusia testejä. Veteen päätyneestä liasta ei

kuitenkaan aiheutunut ongelmaa, koska käyttöjaksot olivat niin lyhyitä, että säteilytason nousua vedestä ei havaittu. (Ibid)

Reaktorin kriittisyys saavutettiin lisäämällä polttoaine-elementtejä yksi kerrallaan. Kun kriittisyys oli saavutettu, suoritettiin sarja perinteisiä testejä, joissa tarkastettiin mittalaitteiden ja operointiin tarvittavien toimilaitteiden toiminta. Testien jälkeen sekä reaktori että instrumentit todettiin toimiviksi ja vakaiksi. Seuraavaksi toteutettiin sarja tehonnostoja lähestyen veden kiehumispistettä. Tehonnostot pyrittiin pitämään mahdollisimman lyhyinä, jotta polttoaineen aktiivisuustasot eivät nousisi liian korkeiksi. Polttoaineen aktiivisuuden minimointi oli tärkeää, koska reaktorissa työskenneltiin koesarjojen välissä. Myös polttoainetta käsiteltiin käsin koesarjojen välissä, mikä oli mahdollista muutamia tunteja testiajon jälkeen. (Ibid)

Reaktori osoittautui stabiiliksi pienellä teholla kiehuessa. Tehoa nostettaessa reaktorin käyttäytyminen muuttui ennustamattomaksi ja veden liike sykkiväksi. Tehoa edelleen kasvatettaessa vesi alkoi syöksyä ulos reaktorista. Kun vesi poistui polttoaine-elementtien välistä, reaktio sammui. Veden valuttua takaisin reaktoriin se käynnistyi uudelleen. Reaktion käynnistymisestä ja sammumisesta johtuen havaittiin noin sekunnin välein toistuva veden purkaus ulos reaktorista. (Ibid)

Korkealla teholla ajoa jatkettiin niin kauan, että saatiin tarpeeksi tilastotietoa raja-arvojen määrittämiseksi. Saatujen tietojen perusteella onnistuttiin määrittämään raja-arvot teholle silloin, kun syöksähtelyä ei ollut ollenkaan ja kun syöksähtely oli vakaata. (Ibid)

Lopuksi ajettiin vielä pidempiä testijaksoja reaktorin kansi suljettuna. Myös paineistetuissa kokeissa reaktori saatiin stabiiliksi. Pidempien ajojaksojen takia reaktorin säteilytasot nousivat huomattavasti aikaisempaan verrattuna. BORAX 1 -reaktorilla tehtiin yhteensä 70 erillistä testiajtoa (Argonne National Laboratory. 2016.).

3.3 Johtopäätökset

Aikaisemmin oli ollut tiedossa, että veden poistuminen polttoaine-elementtien välistä sammuttaa reaktion, mutta ei ollut varmuutta, pysähtyisikö reaktio tarpeeksi nopeasti. Kesän 1952 BORAX-kokeet osoittivat, että kiehutusvesireaktori voi olla vakaa ja että jäähdytteen hävitessä reaktorin teho tippuu tarpeeksi nopeasti. Seuraavaksi piti selvittää, voiko kiehutusvesireaktoria soveltaa energiatuotantoon. Aikainen talvi kuitenkin keskeytti kokeet. Tulokset olivat kuitenkin niin lupaavia, että testaamista päätettiin jatkaa seuraavana kesänä. (Haroldsen, R. 2008.)

4 BORAX 2

BORAX 2 (kuva 3) -reaktorilla oli tarkoitus parantaa ymmärrystä siitä, kuinka reaktori käyttäytyy jäähtytteen kiehuessa. BORAX 2 -kokeissa kokeiltiin myös korkeampaa uraani-235:n rikastusastetta. BORAX 2 oli lämpöteholtaan 6,4 megawattia, ja sitä ei koskaan valjastettu sähkön tuotantoon. (Argonne National Laboratory. 2016.)

4.1 Stabiiliuskokeet

Talven 1953-1954 aikana BORAX 1 -laitteistoja päivitettiin, ja uutta päivitettyä reaktoria kutsuttiin nimellä BORAX 2. Suurin muutos oli uusi säätösauvakoneisto, joka mahdollisti säätösauvojen nopeamman liikuttelun. Nopeamman liikuttelun ansiosta saatiin aikaan nopeampia tehon muutoksia, jotka auttoivat määrittämään tarkemmin, kuinka kiehumisen vaikuttaa reaktorin stabiiliuteen. (Haroldsen, R. 2008.)

Keväällä 1954 polttoaineen aktiivisuus oli jo laskenut sen verran edellisestä kesästä, että polttoainetta pystyttiin käsittelemään käsin. (Ibid)

Alkukesästä reaktori oli valmis testattavaksi. Uusissa koesarjoissa reaktoria käytettiin suuremmalla teholla. Lopulta tehoa kasvatettiin niin suureksi, että vesi purkautui ulos reaktorista. Veden purkautumisen on kuvattu muistuttavan isoa geysiriä, joka näkyi yli kilometrin päähän. (Ibid)

Parhaimmillaan vesi purkautui voimalla, joka aiheutti uloimpien polttoaineinelevyjen vaurioitumisen. Polttoainelevyt olivat koveria kuten BORAX 1 -reaktorissakin (kuva 2), ja höyrypurkauksen voima sai ne vääntymään kuperiksi. Kuperä polttoainelevy saattoi pahimmillaan estää säätösauvaa liikkumasta ja aiheutti turvallisuusriskin. Vaurioituneet polttoainelevyt poistettiin reaktorista ja taivutettiin takaisin alkuperäiseen muotoonsa kokeiden välissä. Polttoainelevyjen muokkaaminen kestävämmiksi mahdollisti reaktorin pidon stabiilina suuremmilla tehoilla. (Ibid)

Borax 2 -stabiiliustestit saatiin päätökseen alkukesällä 1954. Viimeisessä testissä Borax 2 -reaktorilla oli tarkoitus selvittää, kuinka kiehutusvesireaktori käyttäytyy

onnettomuustilanteessa. Reaktorin tehoa oli tarkoitus kasvattaa aina sen tuhoutumiseen asti. (Ibid)



Kuva 3. BORAX 2 -testilaitteisto ennen tuhoutumistestiä (Haroldsen, R. 2008.).

4.2 Borax 2 -reaktorin tuhoutumistesti

Borax 1 - ja 2 - testien perusteella oli pystytty määrittämään raja-arvot reaktorin turvalliselle käytölle. Höyryn muodostumisen polttoaine-elementtien välissä havaittiin hidastavan reaktiota tarpeeksi, jotta reaktorin ylikuumentuminen voidaan välttää. Seuraavaksi oli tarkoitus selvittää, kuinka reaktori käyttäytyy, jos reaktiivisuus kasvaa hallitsemattomasti, ja mitkä ovat reaktorin tuhoutumisen seuraukset. (Haroldsen, R. 2008.)

4.2.1 Valmistelut

Reaktiivisuuden nostoa varten keskimmäiseen säätösauvaan rakennettiin mekanismi, jolla säätösauva voidaan poistaa reaktorista hetkessä. Mekanismi koostui jousesta ja sähkömagneetista. Sähkömagneetin sulkeutuessa jousi työntää maan painovoiman avustamana säätösauvan polttoaineen alapuolelle. Säätösauvan poistaminen tekee reaktorin ylikriittiseksi ja saa tehon nousemaan hallitsemattomasti. Kokemuksesta tiedettiin tehon nousevan, kunnes vesi poistuu reaktorista. (Ibid)

Reaktorin ylikriittiseksi ajamisen tarkkoja seurauksia ei tiedetty. Reaktorin sydämen ja painesäiliön uskottiin vaurioituvan. Säätösauvakoneiston kiinnityksiä oli vahvistettu, jotta purkautuva vesi ei nostaisi koneistoa pois paikoiltaan. Tapahtumaa kuvaamaan asennettiin suurnopeuskamera, joka kuvasi 1200 kuvaa sekunnissa. Myös suurinopeuksinen monikanavainen oskilloskooppi asennettiin keräämään tietoa tapahtumasta. (Ibid)

Olemassa olevat reaktorin tehonmittausinstrumentit eivät soveltuneet niin äkillisten ja suurien tehojen mittaukseen, kuin tuhoutumistestissä saattoi ilmaantua. Tehon mittaamista varten reaktoriin sijoitettiin ohuita kultaisia kalvoja, joita voitaisiin analysoida kokeen jälkeen. (Ibid)

Testin ajankohdan määrittämisessä otettiin huomioon sääolosuhteet. Tuuli ei saanut olla liian kova, jotta mahdollisesti syntyvä radioaktiivinen pilvi ei leviäisi kaupunkialueille.

Pohjoistuuli oli kaikkein paras vaihtoehto, koska etelässä oli matkaa monta kilometriä lähimpään asutukseen. (Ibid)

4.2.2 Tuhoaminen

Testipäivän aamuna suoritettiin viimeinen lyhyt koeajo, jotta varmistettiin, että reaktori oli toimintakunnossa. Koeajo sujui onnistuneesti, mutta visuaalisessa reaktorin tarkastuksessa huomattiin yhden polttoaine-elementin vääntyneen. Juuri loppuneesta koeajosta johtuen polttoaineen säteilytasot olivat vielä korkeat, mutta polttoaine-elementti nostettiin ylös reaktorista, ja levy väännettiin takaisin muotoonsa. Koetta oli tullut katsomaan paljon yleisöä, ja sen ei haluttu viivästyvän. (Haroldsen, R. 2008.)

Reaktori käynnistettiin, ja sitä ajettiin ensin matalalla teholla. Kun säätösauva poistettiin reaktorista, testi käynnistyi. Reaktori räjähti, ja koko suojasäiliön sisältö nousi ilmaan ja levisi aavikolle yli hehtaarin kokoiselle alueelle (kuva 3). Säätösauvakoneisto nousi, kunnes siihen kytketyt kaapelit lopulta pysäyttivät ilmalennon. Koko alue peittyi höyryyn ja savuun, ja pieniä paloja sulanutta polttoainetta satoi alas. Syntynyt pieni pilvi kulkeutui suunnitellusti etelään aiheuttamatta vaaraa kenellekään. Tapahtuma oli kokonaisuudessaan paljon aggressiivisempi kuin oli ennustettu. (Ibid)

Räjähdyks aiheutti sähkökatkoksen voimalaitosalueella. Sähkökatkoksesta johtuen suurnopeuskamera ei kuvannut tapahtumia loppuun asti ja sen filmien pelättiin vaurioituneen pysähdyksen seurauksena. Suurnopeuskamera ja oskilloskooppi täytyi kuitenkin hakea pois räjähdysalueelta, ennen kuin säteily olisi tuhonnut niiden filmit. Saman päivän aikana tehtiin alueelle useita käyntejä, jotta saataisiin ensikäden tietoa räjähdysten aiheuttamista vaurioista. Loppupäivästä säteilytasot olivat laskeneet siihen pisteeseen, että reaktorikuoppaan voitiin laskeutua. Käyntejä jaettiin ryhmän kesken tasaisesti niin, että kenenkään henkilökohtaiset annosrajat eivät ylittyisi. Päivän päättyessä kuitenkin lähes jokainen ryhmän jäsen oli ylittänyt reilusti 300 milliremin (3 mSv) viikoittaisen rajan. (Ibid)



Kuva 4. BORAX 2 -testilaitteiston räjäytys (Haroldsen, R. 2008.)

4.2.3 Tulokset ja siivoaminen

BORAX 2 -testit osoittivat, että kiehutusvesireaktorista voidaan kehittää energian tuotantoon sopiva konsepti. Tohtori Zinnin johtama Argonne National Laboratory sai tehtäväkseen kehittää testireaktorista toimivan voimalaitoksen. Seuraava reaktori, Borax 3, oli tarkoitus rakentaa samaan paikkaan kuin edeltäjänsä, joten alue oli puhdistettava mahdollisimman hyvin BORAX 2 -reaktorin räjäytyksessä syntyneistä radioaktiivisista kappaleista. (Ibid)

Yli hehtaarin kokoisen alueen siivoamiseen käytettiin kaikki saatavissa oleva vapaaehtoistyövoima yksittäisen henkilön saaman säteilyannoksen minimoimiseksi. Talteen kerättiin kaikki reaktorin osat, käytetty polttoaine sekä reaktoriin asennetut kultakalvot. Reaktoriin asennetut kultakalvot aktivoituivat testin aikana ja lähettivät nyt gammasäteilyä. Gammasäteilyn perusteella voitiin määrittää, että räjähdysen aikana

purkautunut energia oli 135 megajoulea ja että keskimäinen säätösauva ei ollut poistunut kokonaan reaktorista ennen kokeen loppua. Siivoamista jatkettiin, kunnes kaikki havaittavissa olevat osat oli kerätty pois, jolloin säteilytasot olivat vähentyneet huomattavasti. Lopuksi alueen päälle levitettiin kerros soraa. Soran päälle asennettiin sprinklerijärjestelmä, jonka tarkoituksena oli pitää koko alue kosteana pölyn kulkeutumisen estämiseksi. (Ibid)

Käytettyjä reaktorin osia pyrittiin korjaamaan ja puhdistamaan mahdollisimman hyvin uusiokäyttöä varten. Esimerkiksi lähes kaikki säätösauvakoneiston osat ja osa pumpun koneistosta pystyttiin käyttämään uudelleen BORAX 3 -laitoksessa. (Ibid)

5 BORAX 3

BORAX 3 -reaktori rakennettiin noin sadan metrin päähän BORAX 2 -reaktorikuopasta. Uusi reaktori rakennettiin pitämällä silmällä jatkuvampaa käyttöä kuin edeltäjillensä. Uusi paineastia 600 lbs/sq.inch. (41,4 bar) upotettiin kokonaan maan alle, ja reaktorikuopan seinät vuorattiin betonilla ja metallisella kuorella. Testejä oli tarkoitus tehdä myös talvella, joten vesiputket vedettiin maan alle jäätyksen estämiseksi. Vesilinjaan rakennettiin myös vedenpuhdistusjärjestelmä. Poiketen aikaisemmista BORAX-reaktoreista, BORAX 3:een rakennettiin paineistetut putkilinjat ulos reaktorista. Höyry kuitenkin vapautettiin ilmakehään. Vapautettava höyry oli lievästi radioaktiivista suurimmaksi osaksi typpi-16 isotoopin takia, joka kuitenkin lyhyen, 7,13 sekunnin, puoliintumisaikansa ansiosta puoliutui nopeasti pois. Lisäksi reaktorin ja muiden laitteistojen päälle rakennettiin kevyt suojarakennus. (Haroldsen, R. 2008.)

Borax 3 -reaktori saavutti kriittisyyden ensimmäisen kerran kesällä 1954. Reaktoria ajettiin 300 lbs (20 bar) paineessa ja noin 6 megawatin teholla. (Ibid)

5.1 Turbiinin ja generaattorin asennus

Borax 3 -reaktorin oli alun perin tarkoitus olla edeltäjiensä tapaan koereaktori, jolla voitaisiin varmistua kiehutusvesireaktoreiden soveltuvuudesta kaupalliseen sähköntuotantoon. Suunnitelmat kuitenkin muuttuivat merkittävästi senhetkisen suurvaltapolitiikan ansiosta. (Ibid)

Yhdysvallat oli kehitellyt ensimmäisen atomipommin, ja yleinen käsitys oli, että Yhdysvallat olisi muita edellä ydinvoimatekniikassa. Ydinvoimaa ei ollut kuitenkaan vielä sovellettu missään päin maailmaa rauhanomaiseen käyttöön. Neuvostoliitto ilmoitti aikovansa esitellä keväällä 1955 pidettävässä rauhanomaisen ydinvoiman kehityskonferenssissa Genevessä uuden 5 megawatin sähköntuotantoon soveltuvan laitosprototyypinsä. Yhdysvalloissakin oli rakenteilla sähköntuotantoon tarkoitettu voimalaitos, mutta se oli kopio ydinsukellusveneen reaktorista, joten sitä ei voitu laskea rauhanomaisen ydinvoiman kehitysaskelleeksi. Jos Yhdysvallat ei pian keksisi jotain,

yleinen käsitys muuttuisi niin, että Neuvostoliittoa pidettäisiin maailman johtavana ydinvoimatekniikan kehittäjänä. (Ibid)

Borax 3 -reaktori oli ratkaisu Yhdysvaltojen ongelmaan. Laitos oli jo valmiina ja tuotti höyryä. Lisäksi se oli uudentyyppinen kiehutusvesireaktori, joten sitä ei voitu linkittää sotateknologiaan. Laitos päätettiin valjastaa tuottamaan sähköä lähistöllä sijaitsevan kaupungin, Arcon, valaisemiseen. Ainut ongelma vain oli, että BORAX 3 -testilaitoksessa ei ollut turbiinia eikä valmista sähköverkkoinfrastruktuuria. (Ibid)

Puuttuvien laitteistojen asentamisella oli kiire, eikä sopivaa turbiinia ehdittäisi valmistaa, vaan jostain piti etsiä käyttöön soveltuva käytetty turbiini. Ongelma oli Boraxin tuottama höyry. Yleensä voimalaitokset tuottavat tulistettua höyryä, mutta Boraxin höyry oli kylläisessä lämpötilassa. Tulistamattoman höyryn käytöstä oli yleisellä tasolla luovuttu jo kauan aikaa sitten, joten oli etsittävä 25 – 50 vuotta vanhaa oikean kokoluokan turbiinia. (Ibid)

Sopiva turbiini löydettiin Albuquerquesta New Mexicosta. Turbiini oli vuonna 1925 rakennettu Westinghousen 3.75 megawatin matalapaineturbiini, joka oli mitoitettu toimimaan 300 lb/sq.inch. (n. 20 bar) paineella. Turbiini toimitettiin nopeasti BORAX-testialueelle Idahoon, ja BORAX-laitoksen käyttöhenkilökunta asensi sen parhaan osaamisensa mukaan. Turbiini, vaihteisto, jäähdytystorni ja keinokuorma suunniteltiin ja asennettiin nopeasti. Turbiinin hallintalaitteet olivat vanhoja, mikä vaikeutti turbiinin käyttöä. Esimerkiksi turbiinin pyörimisnopeutta ei voitu lukea mistään mittaristosta. (Ibid)

Kun laitteisto oli asennettu, turbiinin sisäänmenoventtiili avattiin, ja höyry purkautui turbiiniin. Turbiini alkoi pyöriä, ja taustamelu nousi voimakkaasti. Kenelläkään ryhmästä ei ollut kokemusta tämäntyyppisestä tai -kokoisesta turbiinista, joten kukaan ei tiennyt, oliko melu normaalia. Turbiinin tehoa kasvatettiin hyvin varovaisesti, jotta lämpötilaerot turbiinissa ehtisivät tasaantua. Turbiinin pyörimisnopeutta voitiin tarkkailla kolmesta säikeestä, jotka resonoivat riippuen pyörimisnopeudesta. Yksi resonoi, jos pyörimisnopeus oli liian alhainen, toinen, jos nopeus oli liian korkea, ja kolmas resonoi

vain oikealla pyörimisnopeudella. Pitkään kestäneen säädön jälkeen turbiini saatiin vihdoin vakautettua oikealle pyörimisnopeusalueelle. (Ibid)

Turbiinin toiminnan varmistumisen jälkeen aloitettiin generaattorin asentaminen. Kytkentä ei onnistunut ensimmäisellä yrittämällä. Vika paikannettiin sähkömagneettien virransyöttöjärjestelmästä. Irti olevat kytkennät piti aikataulupaineiden vuoksi kytkeä päälle turbiinin vielä pyöriessä. Jos turbiinin pysähtymistä olisi odotettu, aikaa olisi voinut kulua ainakin tunti. Turbiinin pyöriminen aiheutti virran kytkeytymisen päälle kesken kytkentöjen, ja ne piti suorittaa loppuun jännitetyönä. (Ibid)

Generaattori saatiin sähköistettyä, ja höyrynsyöttö aloitettiin uudelleen. Generaattori alkoi tuottaa sähköä ensimmäisen kerran historiassa kiehutusvesireaktorilla saadusta höyrystä. Kun generaattori ja vaihteisto oli testattu, keinokuorma kytkettiin kiinni. Keinokuorma koostui kolmesta eristetystä metallilevystä, jotka oli upotettu veteen. Veden pintaa muuttamalla saatiin säädelyä kuormaa, ja kuorman kuluttama energia siirtyi lämpönä veteen. Laitteisto oli nyt valmis Arcon valaisemiseen. (Ibid)

5.2 Booraus

Kiehutusvesireaktoreissa reaktiivisuuden säätö on vaativampaa kuin perinteisissä painevesireaktoreissa. Syntyvät kuplat laskevat reaktiivisuutta, jolloin reaktoriin täytyy ladata enemmän polttoainetta kuin reaktion käynnistämiseen vaaditaan, jotta se pysyy käynnissä. BORAX 3- reaktorin säätösauvat eivät riittäneet reaktiivisuuden pienentämiseen alussa ennen kuplien muodostumista suuremmalla polttoainemäärällä. Ongelma ratkaistiin lisäämällä veteen booria, jonka mikroskooppinen absorptiovaikutusala on suuri. Reaktorissa syntyy myös hajoamistuotteena ksenonin isotooppia Xe-135. Se kaappaa neutroneita ja hillitsee reaktiota. Ksenonin syntymisen myötä booria täytyi vähentää vedestä, jotta reaktorin teho ei alkaisi laskea. Boorin vähentämistä varten laitokseen täytyi rakentaa vedenpuhdistusjärjestelmä. Reaktorin sammuttamisen jälkeen, kun ksenon alkoi puoliintua, booria oli taas lisättävä. Jos booria ei lisättäisi, reaktori käynnistyisi uudelleen. (Ibid)

5.3 Arcon valaiseminen

Kun reaktori, turbiini ja generaattori oli saatu käyttökuntoon ja sähköverkko muokattua sopivaksi, käynnistettiin maailman ensimmäinen yritys valaista kaupunki ydinvoimalla tuotetulla sähköllä. Reaktoriin ladattiin polttoaine, ja tarvittava määrä booria sekoitettiin veteen. Säätosauvat nostettiin ja reaktio käynnistyi. Reaktoria käytettiin täydellä teholla, kunnes ksenonpitoisuus reaktorissa alkoi pienentää tehoa. Tehon alkaessa laskea vedenpuhdistusjärjestelmä otettiin käyttöön ja boori poistettiin vedestä. Turbiinia lämmitettiin normaalisti ennen käynnistämistä. Generaattorilta saatava 2300 V:n jännite muutettiin muuntajalla 480 V:n jännitteeksi. Generaattorilta lähtevä sähkölinja oli kytketty rinnan BORAX-reaktorille virtaa syöttävän 480 V -sähkölinjan kanssa. BORAX-laitos toimi nyt kokonaan itse tuottamallaan sähköllä. 12 000 V:n pääsiirtolinja oli katkaistu, joten EBR-1 - laitoksen kaivossa oleva ainut syöttövesipumppu ei saanut virtaa. BORAX:n vedensyöttö oli poikki, kunnes pääsiirtolinja kytkettäisiin takaisin. (Haroldsen, R. 2008.)

Borax saatiin onnistuneesti kytkettyä 12 000 V:n pääsiirtolinjaan, joka oli muunnettu 2300 V:lle sopivaksi. BORAX tuotti kuitenkin vain vähän virtaa, ja kukaan ei tiennyt, pysyisikö jännite yllä, kun BORAX-laitoksen ja Arcon välinen siirtolinja erotettaisiin muusta verkosta. Kun erotus tapahtui, jännite verkossa tippui 70 %. Sähköaseman operaattori päätti keskeyttää yrityksen, mutta ennen kuin operaattori ehti tehdä mitään, sähkölinja petti. Koko BORAX-laitosalue oli yhtäkkiä pimeänä. Reaktorin hätäsulku toimi kuitenkin suunnitellusti. Säätosauvat tippuivat takaisin reaktorin sisään, ja paineilmalla toimivat venttiilit sulkeutuivat estäen veden poistumisen reaktorista. (Ibid)

Ongelma oli reaktorissa olevan ksenonin puoliutuminen. Ilman virtaa booria ei saataisi pumpattua reaktoriin, ja ksenonin hävitessä reaktori käynnistyisi uudelleen. Myöskään syöttövesipumppu ei toiminut, joten syntyvää lämpöä ei saataisi siirrettyä pois reaktorista. Ksenonin käyttäytymistä ei tiedetty tarpeeksi hyvin, jotta tarkka käynnistymisajankohta voitaisiin määrittää, mutta aikaa vian korjaamiseen arvioitiin olevan noin 24 tuntia. Asiaa hankaloitti vielä varageneraattorin aikaisempi hajoaminen, joten edes reaktoria

tarkkaileville instrumenteille ei saatu virtaa. Reaktorin hätäsulun jälkeen jälkilämpöä muodostui vielä noin 1 % verran huipputehosta. Jälkilämpö voisi aiheuttaa polttoaineen ylikuumentumisen ja vaurioitumisen, jos polttoainetta paljastuisi veden alta. Veden haihtuminen estettiin automaattisesti sähköjen katketessa sulkeutuvilla paineventtiileillä, jotka pitävän paineastian paineen niin korkeana, että vesi ei pääse höyrystymään. Paineventtiilien paine kuitenkin vuotaa pikkuhiljaa pois, jos painetta ylläpitävä kompressor ei ole käytössä. Tällöin venttiilit aukeavat ja paineastian paine pienenee mahdollistaen veden kiehumisen ja polttoainevaurion. (Ibid)

Reaktorin käynnistymistä varten reaktorin päälle kasattiin boorihapposäiliöitä, jotka voitaisiin tarvittaessa kaataa käsin reaktoriin. Käsin kaatamista varten reaktorissa oleva ylipaine pitäisi vapauttaa, jolloin reaktori todennäköisesti vaurioituisi ja vapaaehtoiset boorin kaataajat voisivat altistua huomattavalle määrälle säteilyä. Sähkölinja saatiin kuitenkin korjattua hyvissä ajoin seuraavana aamuna ilman ongelmia. Ennen seuraavaa yritystä reaktorin päälle asennettiin boorihapposäiliö, joka voitaisiin tyhjentää reaktoriin aukaisemalla venttiili paineastian ja säiliön välistä hätätilanteessa. Vastaava systeemi on nykyään käytössä vakioturvallisuusvarusteena kaikissa vesihidasteisissa ydinreaktoreissa. (Ibid)

Sähkölinjojen korjaaminen kesti yön yli, jona aikana tehtiin tärkeä löytö seuraavaa yritystä varten. Utahin sähköverkkoyhtiön tiloista löydettiin 2300/12 000 Voltin muuntaja, joka sopi täydellisesti muuntamaan generaattorilta saatava 2300V:n jännitesiertolinjan 12 000 voltin jännitteeseen. Löytyneen muuntajan ansiosta laitoksen kytkeminen Arcoon menevään sähkölinjaan olisi huomattavasti yksinkertaisempaa. (Ibid)

Reaktori käynnistettiin, ja kaikki sujui normaalisti. Sähköverkkoyhtiön sähköasentaja alkoi tarkastaa liitettävien verkkojen vaihekulmia kuten aikaisemminkin. Nyt erona kuitenkin oli ensiöpuolen 2300 V:n jännite. Mitatessaan pyörimisnopeutta suurempi jännite räjäytti käsimittarin, joka aiheutti palovammoja mittaajalle ja sähkölinjan

erottimen laukeamisen. Borax-laitteisto oli taas ilman sähköä ja reaktori sammui. Sähköt saatiin kytkettyä nopeasti takaisin sulkemalla erotin. (Ibid)

Kolmannella kerralla verkkojen vaihekulmat tarkastettiin suurille jännitteille tarkoitettulla asianmukaisella mittarilla ja verkot saatiin synkronoitua. BORAX-laitos tuotti nyt virtaa verkkoon, johon Arco oli kytketty. Verkkoon syötettiin virtaa myös muista lähteistä. Ennen kuin Arcon ja Borax-reaktorin välinen siirtolinja eristettäisiin muusta verkosta, haluttiin kasvattaa generaattorin kuormaa vastaamaan Arcon aiheuttamaa kuormaa. Jännitettä kasvatettiin aina 2700 V:iin asti, mutta huomattavia muutoksia kuormassa ei havaittu. Lopulta huomattiin turbiinin kuristamisen auttavan saavuttamaan vaaditun kuorman. Kun kuorma oli saatu oikeaksi, ilmoitettiin sähköverkkoyhtiöön, että Arco-BORAX välinen linja voitiin erottaa muusta verkosta. (Ibid) 17.7.1955 erotus tapahtui onnistuneesti, ja koko Arcon kaupunki toimi nyt BORAX kiehutusvesireaktorin tuottamalla energialla. BORAX 3 tuotti sähköä 2 megawatin teholla, josta 0,5 megawattia kului Arcon valaisemiseen. Koetta jatkettiin noin kahden tunnin ajan uskottavuuden varmistamiseksi. (Argonne National Laboratory. 2016.)

Seuraavana päivänä reaktori käynnistettiin vielä kertaalleen, kun joukko kansainvälisiä ydinvoiman opiskelijoita tuli vierailulle viereiselle EBR-1 -laitokselle. Samalla heille esiteltiin käynnissä oleva BORAX-reaktori, ja he toimivat riippumattomina todistajina sille, että Yhdysvallat oli onnistunut tuottamaan sähköä kokonaisuudessaan kaupungille kiehutusvesireaktorilla. Vain muutama päivä myöhemmin saavutukset esiteltiin menestyksekkäästi Geneven konferenssissa. (Weinberg, A, M. 2004)

5.4 Geneven konferenssi

Yhdysvaltojen järjestämä Geneven konferenssi ydinenergian rauhanomaisen käytön puolesta pidettiin elokuussa 1955. Konferenssi oli ensimmäinen kerta sodan jälkeen, kun ydintekniikan salaisuuksia paljastettiin muille maille. Konferenssi antoi alan tutkijoille ensi kertaa mahdollisuuden vaihtaa tietojaan ja osaamistaan muiden maiden tutkijoiden kanssa. (Stacy, S, M. 2000) Argonne National Laboratoryn ja BORAX kokeiden johtaja Walter Zinn lähetettiin edustamaan Yhdysvaltoja ja kertomaan BORAX-kokeiden saavutuksista. YK:n järjestämään konferenssiin osallistui yli tuhat ydinenergian asiantuntijaa rautaesiripun molemmilta puolilta. Neuvostoliiton D.I.Blokhinsev esitteli ensin Obnisk 5000 kW grafiittihidasteisen, vesijäähdytetyn kooreaktorin. Neuvostoliiton kooreaktori oli ensiaskel venäläisiin plutoniumia tuottaviin reaktoreihin. Obnisk reaktorin pohjalta kehittyi myöhemmin venäjällä yleistynyt RBMK (Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalnyy) -reaktori. Neuvostoliiton edustajan jälkeen Waltter Zinn antoi ensimmäisen lausunnon maailmassa onnistuneista kiehutusvesireaktorikokeista. (Weinberg, A, M. 2004)

6 BORAX 4

BORAX 4 -reaktori käynnistettiin Argonnessa 1956. Se oli mitoiltaan edeltäjiensä kaltainen: 20 MW lämpötehoa, 300 psi:n (n. 20 bar) painesäiliö ja tarvittaessa siitä saataisiin 2,5 MW sähkötehoa. BORAX 4 -reaktorin tarkoituksena oli testata uudenlaisia uraanista ja toriumista valmistettuja polttoaine-elementtejä. (Argonne National Laboratory, Borax 4) Uraani- ja toriumoksidista koostuva keraaminen reaktorisydän kestää paremmin suuria lämpötiloja eikä reagoi jäähdytteenä toimivan veden kanssa läheskään yhtä helposti kuin aiemmin käytetyt alumiinipinnoitteiset polttoainelevyt. Keraamisten polttoaine-elementtien etuna on myös niiden hinta sekä paljon suurempi palama. Lisäksi toriumista muodostuu neutronivuossa uraani-233:a, jota voidaan käyttää myös polttoaineena. (Argonne National Laboratory. 2016.)

BORAX 4 saavutti kriittisyyden ensimmäisen kerran 3. päivä joulukuuta 1956, ja sitä käytettiin ilmakehänpaineessa seuraavan vuoden huhtikuun loppuun asti. Toukokuussa aloitettiin testiajot 300 psi:n (40 bar) paineessa ja 216 °C:n lämpötilassa. Testaamista jatkettiin aina joulukuulle asti. Kaikki testit sujuivat ongelmitta, ja keraamiset polttoaine-elementit todettiin turvallisiksi normaalitilanteissa. Seuraavaksi polttoaine nostettiin pois reaktorista ja tarkastettiin. Tarkastuksen jälkeen vanhat 59 sekä 10 uutta polttoaine-elementtiä ladattiin reaktoriin. Tarkoituksena oli nostaa maksimitehoa. (Ibid)

Viimeinen testi suoritettiin keväällä 1958 polttoaine-elementeillä, joiden kuoret olivat vaurioituneet. Vaurioituneet elementit pyrittiin paikallistamaan reaktorisydäimestä, sekä mitattiin säteilytasojen nousemista muualla voimalaitoksella. Kokeen aikana tarkkailtiin myös syntyviä fissiokaasuja kuten ksenon-138:aa ja krypton-88:aa, jotka vapautuivat ilmakehään. Reaktorivedestä, tuorehöyrystä sekä laitoksen ulkopuolisista alueista otettiin myös näytteitä. Lopputuloksena todettiin kiehutusvesireaktorin, jonka sydän koostuu keraamisesta uraanista ja toriumista, olevan turvallinen käyttää pitkiäkin aikoja, vaikka polttoaine-elementit olisivat vaurioituneet. BORAX 4 -kokeet lopetettiin kesäkuussa 1958, kun se korvattiin BORAX 5- testilaitoksella. (Ibid)

7 BORAX 5

Vuonna 1958 päätettiin rakentaa BORAX 5 -testilaitos. Tarkoituksena oli testata täysin uutta prosessin osaa ydinvoimalaitoksessa, tulistinta. Lisäksi tarkoituksena oli kehittää kiehutusvesilaitoksen muita järjestelmiä tehokkaammiksi. Periaatteena tulistuksessa oli kiehuttaa vettä keskellä reaktoria ja ohjata syntynyt höyry loppureaktorin läpi, jolloin se tulistuu. Ensimmäinen tulistin, jota testattiin, oli reaktorin keskelle integroitu polttoaineristikko (kuva 5). Kokeissa huomattiin, että tehoa saatiin kasvatettua lisäämällä tulistimen polttoaine-elementtien määrää. Tuorehöyryn lämpötilaa saatiin nostettua parhaimmillaan 253 °C:sta 455°C:een. 1964 testattiin myös reaktorin reunoille sijoitettua tulistinta, mikä antoikin lupaavia tuloksia. Tulistuksella aikaan saadulla hyötysuhteen parantumisella oli suora vaikutus ydinvoimalan takaisinmaksuajan lyhenemiseen. (Argonne National Laboratory. 2016.)

Ennen laitoksen sulkemista reaktoria ajettiin vielä vaurioituneilla polttoaine-elementeillä. Koe osoitti, että polttoaine-elementtien varioitumisella on vain hyvin vähäinen vaikutus turbiinin kontaminaatiotasoihin. (Ibid)

Laitos päätettiin sulkea elokuussa 1964, ennen kuin kaikki halutut kokeet saatiin tehtyä. Selvittämättä jäi, kuinka suuria tehoja ja tehotehyyksiä saataisiin pakotetulla kierrolla tulistimien avulla. Lisäksi tulistimen ongelmatilanteita, kuten tulvimista tai jäähdytteen menettämistä, ei testattu lainkaan. (Ibid)

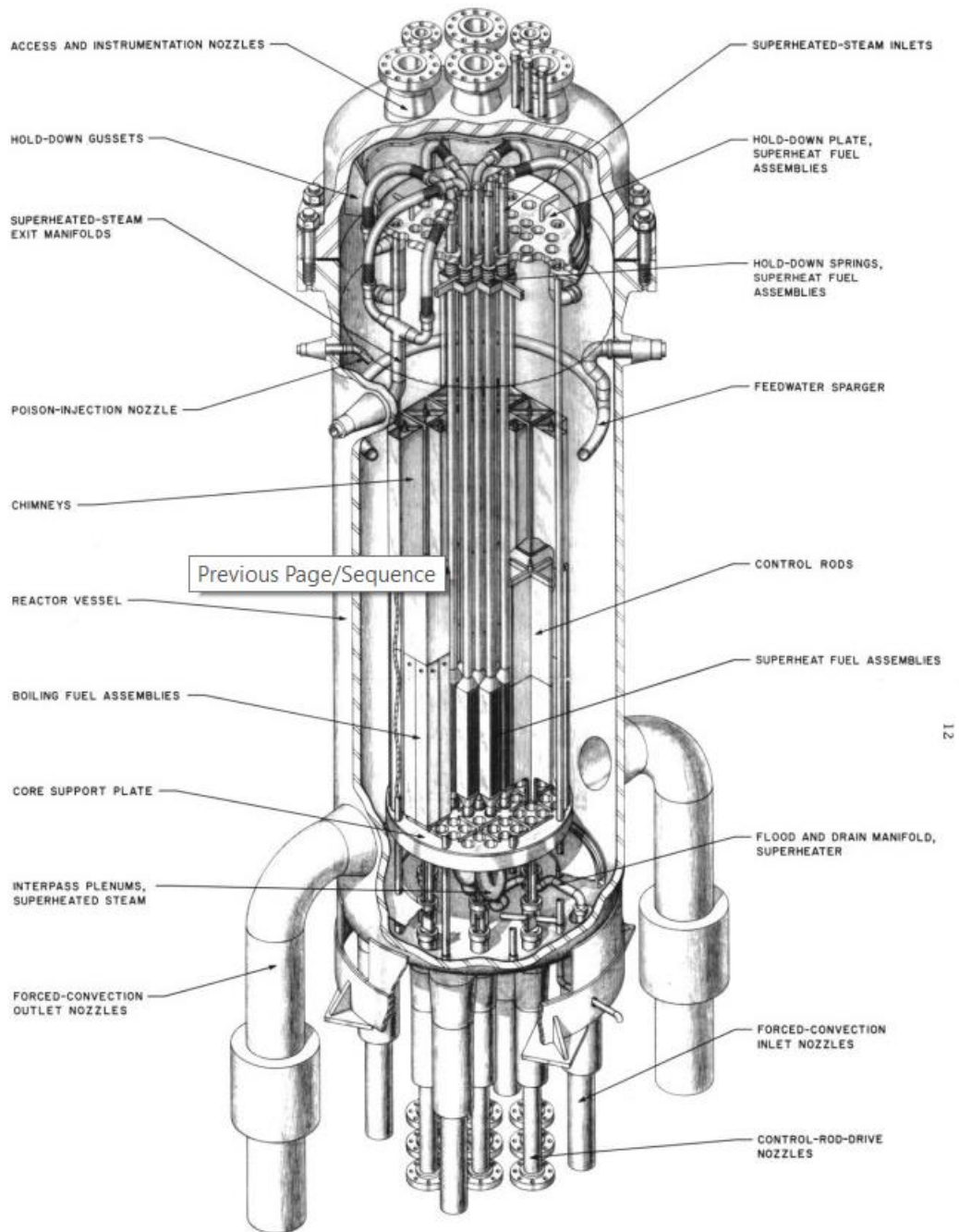


Fig. 2
Reactor with Central Superheater
BORAX V

Kuva 5. BORAX 5. Reaktorin keskelle asennettu tulistin (Argonne National Laboratory. 1960).

8 VERTAILU NYKYPÄIVÄÄN

BORAX-kokeet suoritettiin ilman viranomaisvalvontaa ja kiireellisellä aikataululla. Tämä osaltaan vaikutti työtapoihin sekä varsinkin turvallisuuteen. Ongelmatilanteissa pyrittiin keksimään ratkaisut mahdollisimman nopeasti, mikä osaltaan kasvatti onnettomuuden riskiä, mutta toisaalta johti moniin vielä nykyäänkin käytössä oleviin keksintöihin. (Haroldsen, R. 2008.)

8.1 Säteilyturvallisuus

Nykyään säteilyturvallisuutta ydinvoimalaitoksilla, sairaaloissa ja muussa teollisuudessa, joissa käytetään säteileviä lähteitä, tarkkailee koulutuksen saanut henkilökunta. Siviileille ja säteilytyön ammattilaisille on määrätty tarkat vuosikohtaiset annosrajat, joita ei saa ylittää. Vuosikohtaisten annosrajojen lisäksi on monesti määritetty myös suurin sallittu annosnopeus, jonka vaikutuksen alaisena henkilö voi olla. (Fortum. 2016)

Suomessa Säteilyturvakeskus on määrännyt vuotuiset annosrajat. Säteilytyöntekijälle suurin sallittu annos on 50 mSv/a. Viiden vuoden keskiarvo saa kuitenkin olla suurimmillaan vain 20 mSv/a. Jos työntekijä ylittää rajat, hänet on on poistettava säteilytyöstä. (STUK. 2014)

BORAX-testeissä suurimmat riskit säteilyturvallisuuden kannalta liittyivät BORAX 2 -tuhoutumistestiin. Polttoaine oli aikaisempien kokeiden myötä aktivoitunut, ja kun reaktori räjäytettiin, polttoaine levisi pieninä paloina testausalueelle. Muutamien päivien päästä säteilytasot alueella olisivat tippuneet huomattavasti, mutta räjähdystä seuranneiden kameroiden filmit olisivat voineet tuhoutua siinä ajassa säteilyn vaikutuksesta, joten alueelle täytyi päästä mahdollisimman nopeasti. (Haroldsen, R. 2008.)

Alueelle mentiin kahden hengen ryhmissä. Jokaisella ryhmän jäsenellä oli mukanaan dosimetri, josta voitiin lukea saatu säteilyannos. Viikoittaisen rajan (3 mSv) täytyttyä parin täytyi poistua alueelta. Kun jokainen Borax-testiryhmän jäsen oli vuorollaan saavuttanut viikoittaiset rajat, täytyi käyntejä reaktorin luona jatkaa. Kokeiden tärkeydestä johtuen päätettiin tietoisesti ylittää asetetut annosrajat. (Ibid)

Reaktorikuoppaan laskeuduttiin vielä samana iltana etsimään sinne sijoitettuja kultakalvoja, joiden avulla räjähdyksessä vapautuva energia voitiin määrittää. Reaktorikuopan pohjalla oli muutamia senttimetrejä vettä, mikä toimi säteilysuojana pohjalla oville polttoaineen paloille. Eräs reaktoriin laskeutuneista BORAX-testiryhmän jäsenistä, sähköinsinööri Ray Haroldsen, sai kokonaisuudessaan päivän aikana noin 150 mSv annoksen. Myös muut ryhmään kuuluvat ylittivät omat annosrajansa moninkertaisesti. (Ibid)

Verrattuna nykyisiin säteilyturvallisuuskäytäntöihin suurimpana erona on sallittujen annosrajojen suuruus ja niiden noudattaminen. Huomioitavaa on myös, että tuolloin työntekijät itse olivat vastuussa saamastaan säteilyannoksesta, eikä testien aikana suoritettu viranomaisten puolesta minkäänlaista valvontaa. Esimerkiksi Suomessa säteilyturvallisuuskeskus edellyttää ydinvoimalaitostyöntekijöitä kantamaan dosimetria mukanaan työmaalla, ja dosimetrien tulokset on raportoitava Säteilyturvakeskukseen. Säteilytyötä tekeväälle tarkkailujakson pituus on pääsääntöisesti yksi kuukausi (STUK. 2009).

8.2 Ydinturvallisuus

Ydinonnettomuus on yksi ydinvoiman rauhanomaisen käytön suurimmista riskeistä. Ydinonnettomuuksia voidaan ehkäistä karkeasti kahdella tavalla. Varsinkin Yhdysvalloissa päähuomio keskitetään onnettomuuksien ennaltaehkäisyyn. Yhdysvalloissa ydinvoimaloita valvova viranomainen NRC (Nuclear Regulatory Commission) on määrännyt polttoaineen vaurioitumisen suurimmaksi sallituksi todennäköisyydeksi 1 onnettomuuden 10 000 käyttövuotta kohden. Parhaimmat laitokset yltyvät jopa 1/1 000 000 -suhteeseen. Euroopassa painoarvo on taas enemmän päällekkäisillä turvajärjestelmillä kuten painovoimaisella säätösauvojen laskeutumisella tai korkean paineen kestäväällä suojakuorella. (World Nuclear Association. 2016.)

BORAX-kokeiden turvajärjestelmissä oli vakavia puutteita nykyisillä standardeilla tarkasteltaessa. Ensimmäisessä reaktorissa ei ollut suojakuorta ollenkaan, ja reaktorin kansikin pidettiin auki, joten kaikki radioaktiiviset partikkelit pääsivät leviämään vapaasti ympäristöön. Onnettomuuden sattuessa mikään ei olisi estänyt polttoaineen leviämistä testausalueelle. (Haroldsen, R. 2008.)

BORAX 3 -laitosta kytkettäessä verkkoon sattui nykyasteikolla INES 3-luokan vakava turvallisuuteen vaikuttava tapahtuma. Sähköjen katketessa laitokselta ainut syöttövesipumppu sammui. Nykyisin laitoksilla on useita pääsyöttövesipumppuja kytketty eri redundansseihin ja varavoiman saanti on varmistettu useilla eri lähteillä, esimerkiksi diesel generaattoreilla. (Ibid)

Syöttövesipumpun sammuttua lämpöä ei saatu siirrettyä ulos reaktorista. Ongelma oli reaktorissa oleva Xenonin puoliintuminen, joka tekee reaktorin kriittiseksi, vaikka säätösauvat ovatkin alhaalla. Koska sähköt olivat poikki, myöskään booria ei voitu syöttää reaktoriin menevään veteen. Nykyisissä voimalaitoksissa on erilliset hätäboorausjärjestelmät, vaikka säätösauvat riittäisivätkin reaktorin pitämiseen alikriittisenä. (Ibid)

Sähköjen ollessa poikki paine venttiileitä säätelevässä piirissä alkoi hitaasti laskea. Jos paine laskisi liikaa, reaktorin ulostulon sulkevat venttiilit avautuisivat ja paine reaktorissa laskisi. Laskeva paine aiheuttaisi jäähdytteen kiehumisen ja lopulta polttoaineen paljastumisen. Nykyisissä laitoksissa vastaavat tapahtumat on pystytty estämään monilla päällekkäisillä sähkönsyöttöjärjestelmillä. (Ibid)

BORAX-kokeet poikkesivat monilla muillakin tavoin nykyaikaisista käytännöistä. Esimerkiksi käytetyn turbiinin ja generaattorin asentaminen ilman asiantuntemusta tai tietoa turbiinin toimivuudesta kiehutusvesireaktoriin ei tulisi kysymykseenkään nykyisten säädösten puitteissa. Suomessa vaaditaan primääripiirin komponenteilta turvallisuusluokan 1 täyttävät vaatimukset, esimerkiksi hyväksytyt maanjäristysluokitus ja valmistuksen aikainen laadunvalvonta (Saikkonen, S. 2013).

8.3 Järjestelmät

Nopeasta aikataulusta johtuen ensimmäisten BORAX-kokeiden järjestelmät olivat yksinkertaisia. Yksinkertaisisten järjestelmien vuoksi ilmeni ongelmatilanteita, mutta ne mahdollistivat myös tarvittaessa nopean muokkauksen ja korjauksen. Kun BORAX 3 -kokeiden aikana voimalaitos oli ilman sähköä, täytyi kehitellä nopeasti menetelmä, joka estää reaktorin ylikuumentuminen. Reaktorin kannen päälle kasattiin tynnyreittäin booria, joka voitaisiin tarpeen tullen kaataa käsin reaktoriin. Nykyisin menetelmää kutsutaan

hätäbooraukseksi, ja se on yksi yleisimmistä turvallisuuslaitteistoista ydinvoimaloissa ympäri maailmaa. (Haroldsen, R. 2008)

BORAX-kokeet olivat myös erinomaisen insinööriyön näyte. Kolmessa vuodessa rakennettiin kolme kooreaktoria, jotka suoriutuivat juuri siitä, mihin ne oli suunniteltu. Vajavaisista laitteistoista ja kiireellisestä aikataulusta huolimatta BORAX-kokeista suoriuduttiin ilman vakavia loukkaantumisia. Hetkellisistä suurista säteilyaltistuksista huolimatta kukaan testiryhmän jäsenistä ei kuollut ennenaikaisesti syöpään tai muihin säteilyyn linkitettäviin sairauksiin. (Haroldsen, R. 2008)

9 YHTEENVETO

BORAX-kokeet olivat tyypillinen esimerkki oman aikansa teknologian kehittamisestä. Teknologisen ylivertauisuuden näyttäminen muille kansakunnille ja kilpailu johtavan suurvallan asemasta Neuvostoliittoa vastaan sai Yhdysvallat tekemään monia huikeita tieteellisiä ja teknologisia innovaatioita kylmän sodan aikana. Tärkeistä motiiveista ja kiireellisistä aikatauluista johtuen kehitystyössä otettiin monesti paljon riskejä niin ympäristön kuin myös ihmisten kustannuksella.

BORAX-kokeet saivat alkunsa pienestä onnettomuudesta Argonne National Laboratoryn testitiloissa, ja siitä seuranneiden ideoiden seurauksena kiehutusvesireaktoreita on rakennettu ympäri maailmaa.

BORAX 1 -reaktori oli alkukantainen maahan kaivettu painesäiliö, jolla osoitettiin, että kiehuminen ei aiheuta reaktorin tai polttoaineen vauriotumista. Sillä saatiin lisäksi määritettyä raja-arvoja teholle, joiden sisällä reaktoria on turvallista operoida.

BORAX 2 -reaktori auttoi tarkentamaan näitä raja-arvoja. Lopuksi suoritettu Borax 2 -reaktorin tuhoutumistesti antoi hyödyllistä tietoa reaktorin käyttäytymisestä ongelmatilanteissa ja onnettomuudessa vapautuvista energioista.

BORAX 3 oli Yhdysvaltojen ylpeyden aihe, kun se ensimmäisen kerran ydinvoimaloiden historiassa valaisi kokonaisen kaupungin. Borax 3 oli osoitus Yhdysvaltojen tiedeyhteisölle ja myös koko maailmalle, että kiehutusvesireaktori on toimiva konsepti energian tuotannossa.

BORAX 4 ja 5 olivat pidempiaikaisia projekteja, joiden avulla pyrittiin jalostamaan ideaa kiehutusvesireaktorista tehokkaammaksi ja taloudellisemmaksi. Kokeissa testattiin onnistuneesti muun muassa keraamisesti päällystettyjä polttoaine-elementtejä ja tulistinta.

LÄHDELUETTELO

A Green Road Journal. 2014. 1954-Borax 1-5 reactors Melted Down And Blown Up, 100% On Purpose. <http://www.agreenroadjournal.com/2014/03/1954-borax-1-5-reactors-melted-down-100.html>

Argonne National Laboratory. 2016. Reactors Designed by Argonne National Laboratory. <http://www.ne.anl.gov/About/hn/news960121.shtml>

Argonne National Laboratory. 1960. Preliminary Design and Hazards Report-Boiling Reactor Experiment V (BORAX V). Chicago
http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc11538/m2/1/high_res_d/Bulletin6120.pdf

Atomic Heritage Foundation. 2015. Manhattan Project Spotlight: Enrico Fermi. Washington D.C. <http://www.atomicheritage.org/article/manhattan-project-spotlight-enrico-fermi>

Fortum. 2016. Tulokoulutus. Loviisa.

Haroldsen, R. 2008. The Story of Borax nuclear reactor and the EBR-1 Meltdown. Idaho.

Saikkonen, S. 2013. Pori. Prizztech Oy.

http://www.prizz.fi/sites/default/files/asiakaskuvat/Julkaisut/Ydinvoimaopas_nettiin.pdf

Stacy, S, M. 2000. Proving the principle. Idaho. Idaho Operations Office of the Department of Energy. Saatavissa: http://www4vip.inl.gov/publications/d/proving-the-principle/chapter_14.pdf

STUK. 2009. Säteilyturvallisuus työpaikoilla. ISSN 0789-4368. Helsinki.
<http://www.finlex.fi/data/normit/5773/ST1-6.pdf>

STUK. 2014. Säteilyaltistuksen enimmäis-arvojen soveltaminen ja säteily-annoksen laskemisperusteet. ISSN 1456-8160. Helsinki.

<http://www.finlex.fi/data/normit/4406/ST7-2.pdf>

Weinberg, A. M. 2004. Walter Henry Zinn 1906-2000. Washington, D.C. The national academics press

World Nuclear Association. 2016. Safety of nuclear power reactors. World Nuclear Association.

<http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx>