

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Simo Sihvola

KIEHUTUSVESIREAKTORIEN POLTTOAINEEN KEHITYSKAARI

Tarkastaja: Riitta Kyrki-Rajamäki
Ohjaaja: Ville Rintala

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	4
2	YLEISTÄ YDINVOIMASTA.....	4
2.1	Kiehutusvesilaitoksen toimintaperiaate	4
2.2	Reaktorin toimintaperiaate.....	5
2.3	Polttoainenipun esittely.....	5
2.3.1	Polttoainesauva	6
2.3.2	Vesisauvat ja -kanavat	7
2.3.3	Välituet ja päätylevyt.....	8
2.3.4	Polttoainesauvojen määrä	8
2.3.5	Osapitkät sauvat.....	9
2.3.6	Irtokappalesuodattimet	9
2.3.7	Materiaalit ja rasitukset.....	9
2.4	Termistöä	10
2.4.1	Palama.....	10
2.4.2	Palava Absorbaattori.....	10
2.4.3	Väkevöintiaste	11
2.4.4	PCI.....	11
3	KIEHUTUSVESIREAKTORIN POLTTOAINE	11
3.1	ASEA-Atom/ ABB Atom/ Westinghouse	12
3.1.1	8x8	12
3.1.2	Svea-64	13
3.1.3	Svea-100	15
3.1.4	Svea-96	16
3.1.5	Svea-96 optima	17
3.1.6	Svea-96 Optima 2	18
3.1.7	Svea-96 Optima 3	19
3.2	General Electric.....	20
3.2.1	7x7	21
3.2.2	GE-4.....	21
3.2.3	GE-5/Prepressurized/Barrier.....	22
3.2.4	GE-8/9/10	22
3.2.5	GE-11.....	23
3.2.6	GE-12.....	23
3.2.7	GE-13.....	23

3.2.8	GE-14.....	24
3.3	KWU/Siemens/Framatome ANP.....	24
3.3.1	6x6	25
3.3.2	7x7	25
3.3.3	8x8	25
3.3.4	9x9	26
3.3.5	Atrium 9 A/B	28
3.3.6	Atrium 10 A/B/P.....	29
3.3.7	Atrium 10XP/XM/MOX.....	30
4	POHDINTA.....	31
5	YHTEENVETO.....	32
6	LÄHTEET	34

KÄYTETYT LYHENTEET

ADOPT	Advanced doped pellet technology
BWR	Boiling water reactor
GE	General Electric
KWU	Kraftwerk Union
MOX	Mixed oxide
PCI	Pellet-cladding interaction

1 JOHDANTO

Ensimmäiseksi käsitellään kiehutusvesireaktorien (Boiling water reactor BWR) yleistä rakennetta sekä toimintaperiaatetta. Tämän jälkeen esitellään polttoainepun osat ja niiden tarkoitus polttoaineessa. Lisäksi esitellään muutama tekstissä käytettävä termi.

Polttoaineriippujen kehityksen kertominen keskittyy kolmeen suureen polttoainevalmistajaan sekä näiden edeltäjiin. Nämä suuret polttoainevalmistajat ovat Westinghouse, General Electric ja Areva. Polttoaineista esitellään perustietoja sekä käsitellään muutoksia edeltävään polttoainetyyppiin.

Valitsin tämän aiheen, koska minua kiinnosti polttoaineessa tapahtuneet muutokset vuosien varrella. Lisäksi opiskelen ydinvoimatekniikkaa ja ajattelin työstä olevan minulle apua tulevaisuudessa. Työ on tehty kirjallisuusselvityksenä.

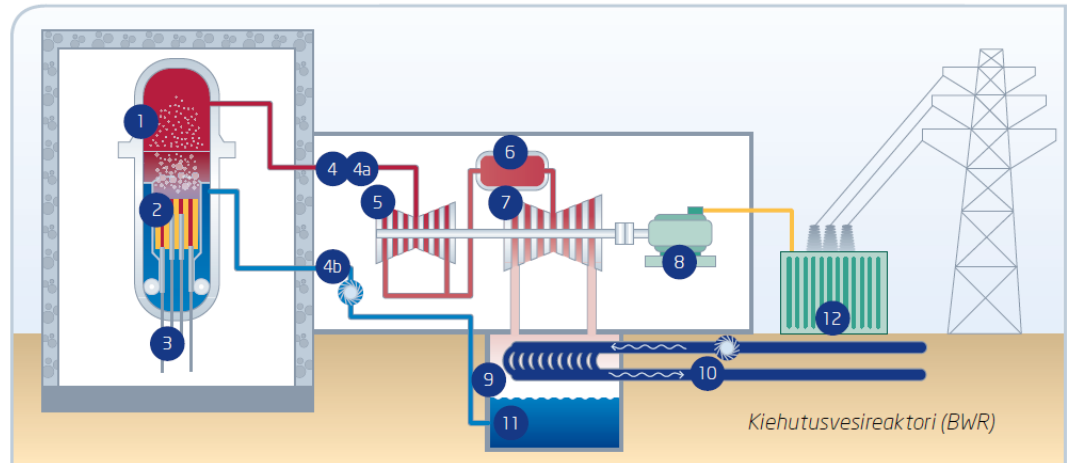
2 YLEISTÄ YDINVOIMASTA

2.1 Kiehutusvesilaitoksen toimintaperiaate

Kiehutusvesireaktoriin perustuva voimalaitos tuottaa sähköä samalla tavalla kuin muutkin höyryturbiinivoimalaitokset. Muissa laitoksissa vesi keitetään polttamalla esimerkiksi puuta tai kivihiiltä. Kiehutusvesireaktorissa vettä keitetään raskaiden atomien halkeamisista syntyvällä lämmöllä.

Ennen veden johtamista reaktoriin sen paine nostetaan pumpuilla noin 70 baariin. Vesi johdetaan reaktorin läpi, jossa siihen siirtyy lämpöä polttoainepuista. Veden lämmitettyä kiehumispisteeseen se alkaa kiehua ja tuottaa höyryä. Höyry johdetaan putkia pitkin korkeapaineturbiinille, jossa se paisuu muutamakertaiseen ilmakehän paineeseen. Sieltä höyry menee välitulistimelle, jossa höyry lämmitetään uudestaan, jotta paisumista voitaisiin jatkaa lisää. Välitulistimelta höyry siirtyy matalapaineturbiiniin, jossa höyry paisuu alle ympäristön paineen. Paisuessaan höyry pyörittää turbiineja, joka pyörittää sähköä tuottavaa generaattoria. Lo-

pulta höyry johdetaan lauhduttimelle, jossa loput lämmöstä siirtyy lämpönieluun ja höyry lauhtuu takaisin vedeksi. Tämän jälkeen alkaa sama kierto uudelleen. Kuvassa 1 on esitetty tämä kiertoprosessi kuvan muodossa. (Shultis ja Faw)



Kuva 1. Kiehuvesireaktorivoimalaitoksen toimintaperiaate. 1.Reaktori, 2.Sydän, 3.Säätösauvat, 4. Primääripiiri, 4a. Höyry turbiinille, 4b. Syöttövesi reaktoriin, 5 Korkeapaineturbiini, 6. Välitulistin, 7. Matalapaineturbiinit. 8. Generaattori, 9. Lauhdutin, 10. Merivesipiiri, 11. Lauhde, 12. Muuntaja. (Länsimies, s. 11)

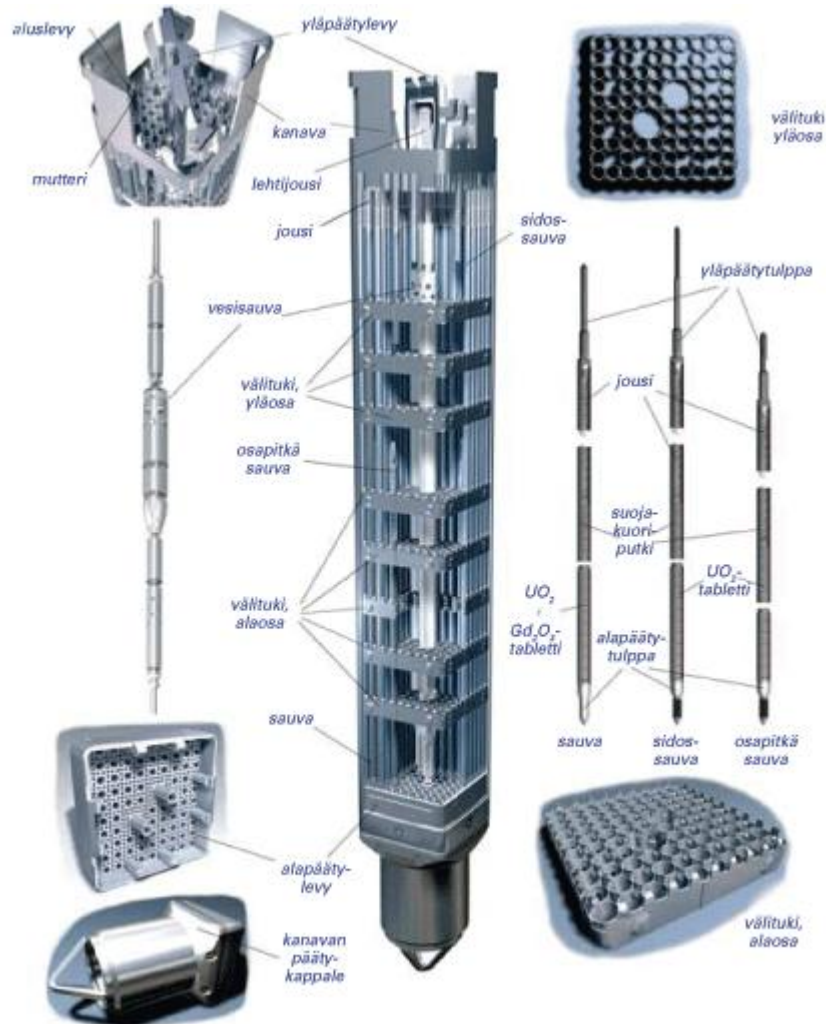
2.2 Reaktorin toimintaperiaate

Kiehuvesireaktorin toiminta perustuu atomien halkeamisen yhteydessä vapautuvaan lämpöön. Neutronit halkaisevat atomeja pienemmiksi atomeiksi. Alkudinin on raskaampi kuin hajoamisen jälkeiset tuotteet. Tämä välissä hävinnyt massa muuttuu energiaksi, joka havaitaan atomien ja neutroneiden liike-energiana. Tämä kuitenkin muuttuu nopeasti lämmöksi, joka kiehuuttaa vettä reaktorissa. (Eurasto *et al*, s. 26-27)

2.3 Polttoainenipun esittely

Tämän osan tarkoituksena on esitellä kiehuvesireaktorin polttoainenippuihin kuuluvat osat. Polttoainenippu rakentuu polttoaine- ja vesisauvoista, kotelon jousta, ylemmästä ja alemmasta päätyhilalevystä, välituista, nostorivasta ja kotelosta ja irto-osien suodattimesta. Kuvassa 2 on GE14 tyyppinen nippu, joka edustaa melko uutta mallia polttoainenipusta, osineen. Kaikkia kuvan osia ei ole ollut al-

kuperäisessä polttoainepelissa. Näiden käyttöönottoajankohdasta kerrotaan kohdassa 3 aina sen tyypin kohdalla, missä se on ensimmäistä kertaa käytössä.



Kuva 2. General electric (GE) GE14-tyyppinen polttoainepelipöytä. (Kosonen, 2006)

2.3.1 Polttoainesauva

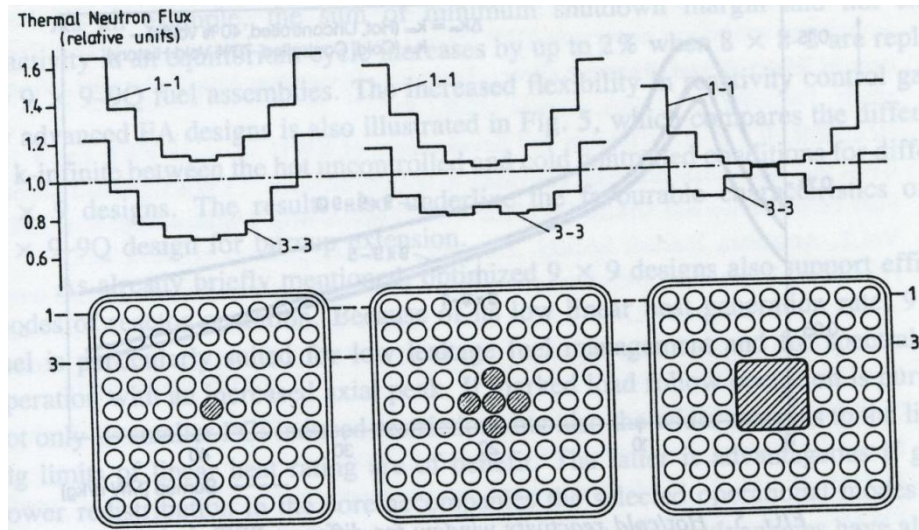
Polttoainesauva koostuu polttoainepelleteistä, suojakuoresta, ylä- ja alapäädyn tulpista sekä jousesta. Paksuudeltaan 0,5-0,8 millimetriä oleva suojakuori sisältää näistä osista polttoainepellettejä sekä jousen. Suojakuoren tehtävänä nimensä mukaisesti on yhdessä ylä- ja alapäädyn tulppien kanssa suojata polttoainetta ulkoisilta uhilta. Lisäksi näiden tehtävänä on pitää fissiona syntyvät kaasut suojakuoren sisällä. (Rudling, 2010, 204-205)

Polttoainepelletit sisältävät reaktorissa käytetyn fissiilin materiaalin, joka tuottaa reaktorissa lämmön ja pitää reaktorin kriittisenä. Fissiili materiaali on uraanidioksidia UO_2 tai sekoitus uraanidioksidia UO_2 ja palavaa absorbaattoria. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää MOX- polttoainetta (Mixed oxide fuel), jossa on sekoitettuna plutoniumdioksidia PuO_2 ja uraanidioksidia UO_2 . Suojakuoren sisällä olevan jousen on tarkoitus pitää polttoainepelletit paikoillaan siirtojen aikana. Lisäksi jousen kohdalle jäävä tila toimii reaktorissa olon aikana fissiokaasujen säiliönä. (Rudling, s.204)

2.3.2 Vesisauvat ja -kanavat

Vesisauvat ja -kanavat ovat zirkoniumseoksesta valmistettuja ohutseinäisiä kanavia. Vesikanavia löytyy pyöreän, neliön ja ristin muotoisia. (Rudling, s. 206). Holzerin (s. 52) mukaan vesikanavat korvaavat polttoainesauvoja polttoainenipussa.

Polttoainenipun sisällä olevat vesikanavat mahdollistavat paremman ja tasaisemman moderoinnin. Tämä johtaa tasaisempaan neutronivirran jakaumaan polttoaineen sisällä. Vesikanavat mahdollistavat tasaisemman U-235 rikastuksen polttoainesauvoissa, joka parantaa polttoaineen hyödynnettävyyttä. Neutronivuon käyttäytymistä polttoaineen sisällä esitellään kuvassa 3. Vesikanavia sisältävät polttoaineniput parantavat reaktorin käyttäytymistä korkeilla tehotasoilla ja häiriötilanteissa. (Siemens, s.14; TVO, 2011, s.15; Holzer *et al*, 1987, s. 52-53)



Kuva 3. Vesikanavien vaikutus neutronivuohon polttoaineen sisällä. Tummennetut alueet ovat vesikanavia. (Holzer et al, 1987, s. 53)

2.3.3 Välituet ja päätylevyt

Sauvat tuetaan päätylevyjen ja välitukien avulla paikoilleen. Välitukien on tarkoitus estää polttoainenippujen sivusuuntainen taipuminen ja kosketus toisiinsa. Lisäksi ne ylläpitävät vapaata tilaa, jotta virtaus pääsee kulkemaan polttoainenipun lävitse. (Rudling, s. 206-207). Lisäksi Siemensin mukaan välitukiin lisätyt pyörresiivet lisäävät kriittisen tehon marginaalia. Tämä johtuu paremmalla suunnittelulla saavutetuista eduista faasien erotuksessa ja nesteen saamisella paremmin lämpöpinnoille. (Siemens, s.15)

2.3.4 Polttoainesauvojen määrä

Polttoainesauvojen määrän lisääminen on pienentänyt niiden kokoa. Kun sauvoja on pienennetty, lineaarinen lämmöntuotto polttoainesauvojen sisällä on myös pienentynyt. Tämä kehitysaskel parantaa sammutusmarginaalia (shutdown margin) luvalliselle nopealle pikasululle epäkuuntoisella polttoaineella ja parantaa kapasiteetin seuraamista laitoksilla. (Holzer et al, 1984, s.29-30). Sammutusmarginaali kertoo kuinka helposti reaktori on sammutettavissa (Helmerson 2001, 25).

2.3.5 Osapitkät sauvat

Osapitkillä polttoainesauvoilla on kaksi hyödyllistä puolta, turvallisuus ja tekninen puoli. Turvallisuus puoli tulee esille kasvaneena sammutusmarginaalina, joka helpottaa joustavaa polttoainesuunnittelua. Polttoaineen yläosaan jää enemmän vapaata tilaa, joka mahdollistaa pienemmän paineen pudotuksen. Tämän seurauksena termohydraulinen tasapaino sydämessä paranee. Haittapuolena tässä on vähentynyt lämmöntuotto, koska lämmittävää pituutta on vähennetty. (Helmersson 2001, 25)

2.3.6 Irtokappalesuodattimet

Irtokappalesuodattimen tarkoituksena on estää hankauskorroosio polttoainesauvoissa. Irtokappaleiden pääsy polttoainepipun sisälle on pyritty estämään niin sanotuilla irtokappalesuodattimilla, jotka sijoitetaan polttoainepipun pohjalle. Suodattimen tarkoituksena on saada kiinni ainakin suurimmat irtokappaleet. (Siemens, s.15-16)

2.3.7 Materiaalit ja rasitukset

Polttoainepellettien materiaalina kiehutusvesireaktoreissa käytetään uraanidioksidia UO_2 . Korkea sulamispiste, isotrooppisuus, korroosion ja säteilyn kesto tekevät siitä hyvän polttoainemateriaalin. Uraanidioksidilla on kuitenkin huono lämmönjohtavuus, jonka seurauksena sen sisälämpötila tehoajolla on 1300-2000 °C. Samaan aikaan pintalämpötila on 400-500 °C. Lisäksi polttoaine paisuu lämpölaajenemisen seurauksena. (Kyrki-Rajamäki s. 7-10)

Suojakuoren täytyy suojata polttoainetta sekä estää fissiotuotteiden pääsy jäähdysteeseen. Hyvältä suojakuorimateriaalilta vaaditaan hyviä lujuusominaisuuksia, lämmönjohtavuutta, termistä kestävyyttä, säteily- sekä korroosiokestoja. Lisäksi materiaalin on oltava yhteensopiva polttoaineen kanssa ja pientä neutroniabsorptiota. Ruostumaton teräs ja zirkonium ovat osoittautuneet parhaiksi materiaaleiksi suojakuorelle. Zirkonium on kuitenkin otettu käyttöön suojakuorimateriaalina sen pienemmän neutroniabsorption johdosta. (Kyrki-Rajamäki s. 13-14)

Puhdas zirkonium oksidoituu vedessä ja sieppaa samalla vapautuvaa vetyä. Muodostuva zirkoniumhydridi aiheuttaa suojakuoren korroosiota. Tätä prosessia voidaan hallita käyttämällä tinaa sisältävää zirkonium lejeerinkiä. Tämä on johtanut Zircaloy-2 ja Zircaloy-4 käyttöön. (Kyrki-Rajamäki s. 15). Näiden materiaalit zirkoniumin lisäksi on esitetty taulukossa 1. Robertsin (s. 54) mukaan Zircaloy-2:sta käytetään suojakuoren materiaalina ja Zircaloy-4:sta polttoainekanavassa.

Taulukko 1. Zircaloy-2 ja Zircaloy-4 sisältämien alkuaineiden massaosuudet zirkoniumin lisäksi. (Frost, s.82)

Alkuaine	Zircaloy-2 [%]	Zircaloy-4[%]
Tina	1,20-1,70	1,20-1,70
Rauta	0,07-0,20	0,12-0,18
Kromi	0,10-0,15	0,05-0,15
Nikkeli	0,03-0,08	<0,007

2.4 Termistöä

2.4.1 Palama

Palamalla tarkoitetaan polttoaineesta vapautuneen lämpöenergian määrää polttoaineen massaa kohti. Polttoaineella tarkoitetaan vain uraanimetallia tai MOX (Mixed oxide) -polttoaineissa uraanin ja plutoniumin määrää. Normaalisti tälle käytetään yksikköä MWd/kgU (Megawattituntia/ kilogramma uraania). (Adamson 2003, 1-1)

2.4.2 Palava Absorbaattori

Kiehutusvesireaktoreissa käytetään palaman kompensoimiseen palavaa absorbaattoria. Kompensoiminen tapahtuu käyttämällä osassa polttoainesauvoja gadoliniumia. Alussa gadolinium absorboi voimakkaasti neutroneita, mutta samalla sen määrä polttoaineessa vähenee. Negatiivinen reaktiivisuusvaikutus pienenee gadoliniumin määrän vähetessä. (Eurasto *et al*, s. 49)

2.4.3 Väkevöintiaste

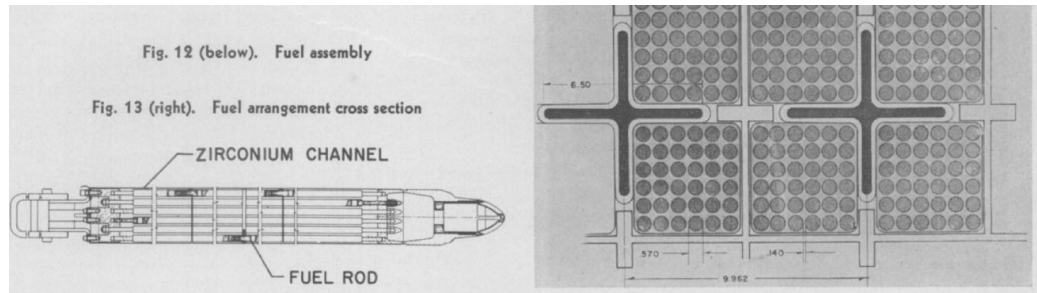
IAEA:n (s.4) mukaan luonnonuraani sisältää 0,71 prosenttia uraani-235:ttä, 99,28 prosenttia uraani-238:aa ja 0,006 prosenttia uraani-234:ää. Näistä vain uraani-235 on fissiili. Euraston *et al* (s. 80-81) mukaan luonnonuranaa ei voi käyttää kevytvesireaktoreissa polttoaineena sellaisenaan, vaan sen uraani-235 osuutta pitää kasvattaa. Tätä prosessia sanotaan väkevöimiseksi. Tämän jälkeen polttoainearaain massasta noin 3-4 prosenttia on uraani-235:ttä. Väkevöintiasteella tarkoitetaan uraani-235:n massaosuutta kokonaisuraanimäärästä.

2.4.4 PCI

PCI on lyhenne englanninkielisistä sanoista Pellet-cladding interaction, joka tarkoittaa suomeksi pelletin ja suojakuoren välistä vuorovaikutusta. Zircaloy on herkkä rasisuskorroosiohalkeamille, kun se on kosketuksissa jodin kanssa. Nopea tehon nousu aiheuttaa lämpölaajenemista polttoainepelleteissä, joka painaa polttoaineen suojakuorta aiheuttaen mekaanista vuorovaikutusta. Samaan aikaan nousut lämpötila aiheuttaa epävakautta polttoaineessa, mikä aiheuttaa fissiokaasujen vapautumista, varsinkin jodin. (Rönneberg ja Sanklef, s. 38)

3 KIEHUTUSVESIREAKTORIN POLTTOAINE

Ensimmäinen teollisen kokoluokan kiehutusvesireaktori oli General Electricin Dresden I, joka otettiin käyttöön vuonna 1959. Laitoksen latauksissa oli käytössä polttoainenippuja, joissa oli 36 polttoainesauvaa. Sauvat olivat neliöhilassa muodossa 6x6 ja ne oli sijoitettu Zircaloy 2:sta valmistetun kotelon sisään. Kotelon päätylevyt oli valmistettu tyypin 304 ruostumattomasta teräksestä. Polttoainesauvat oli lisäksi kiinnitetty kolmella välitukilevyllä, jotka olivat ruostumatonta terästä. Polttoaineen väkevöintiaste oli 1,5 % ja suojakuoren materiaalina käytettiin Zircaloy 2:sta. Polttoaine oli käytössä 4 vuotta ja sen palamaksi tuli 10,0 MWd/kgU. Kuvassa 4 on esitetty polttoaine sivulta, sekä sen poikkileikkaus. (Elliott *et al*, 1973)



Kuva 4. Dresden I:n polttoainenippu sivulta ja leikkauskuva (Elliott, 1973).

Polttoainenippujen kehitystä seurattaessa on huomioitava, että tietty kehitys voi tapahtua vain uusilla laitoksilla tai laitoksella tapahtuvien suurten muutosten aikana. Tietty reaktorimalli voi käyttää vain tietyn mallista polttoainetta. Esimerkiksi nipun ulkoisiin mittoihin ei voida puuttua paljon, koska sen täytyy sopia sille määritettyyn paikkaan reaktorissa. Toisaalta säätösauvojen sijoittaminen polttoainenipusta irralliseksi on mahdollistanut nipun sisälle tehtävät muutokset, kuten polttoainesauvojen määrän muuttamisen (Moore *et al*, s. 3-4).

3.1 ASEA-Atom/ ABB Atom/ Westinghouse

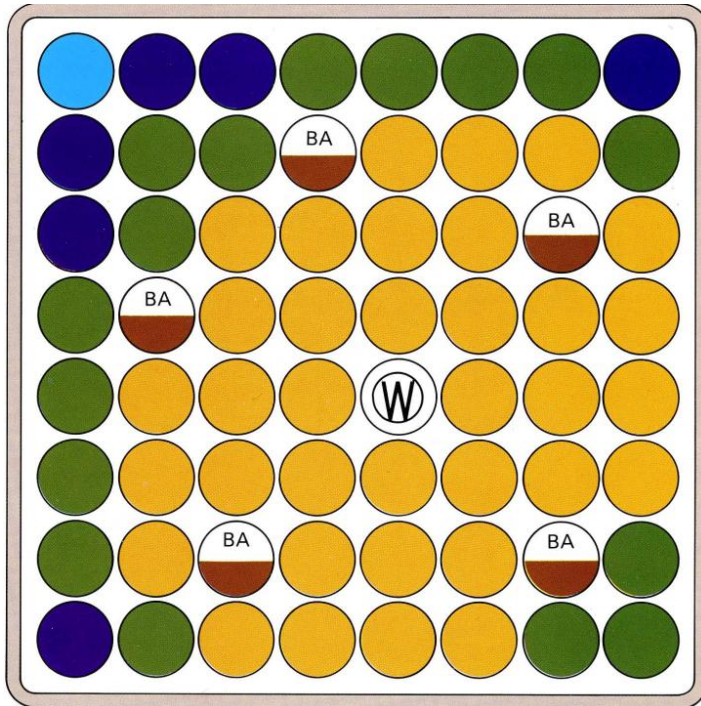
ASEA-Atom on perustettu vuonna 1969 ja sen edeltäjältä oli kokemusta kevytvesireaktorien polttoaineen valmistamisesta jo 1950-luvulta. Nykyinen tehdas otettiin käyttöön vuonna 1971. (ABB Atom, s. 3). Vuonna 1988 ASEA-Atomista tuli osa ABB:tä ja sen uudeksi nimeksi tuli ABB Atom. Vuonna 2000 ABB myi ydinpolttoaineen valmistuksen British Nuclear Fuel plc. Samalla ABB Atom yhdistettiin Westinghousen kanssa. (Westinghouse)

3.1.1 8x8

ABB atomin ensimmäinen polttoaine otettiin käyttöön 1968. Se sisältää 64 polttoainesauvaa, jotka on sijoitettu 8x8 neliöhilaan kotelon sisälle. Siinä käytössä olevat välituet ovat kromiseokseen pohjautuvia (Nylund ja Blomstrand, s. 158).

Polttoainesauvat ovat suljetun polttoainekanavan sisällä, joka on valmistettu Zircaloy-4 materiaalista. Polttoainesauvat ovat materiaaliltaan zircaloy-2:sta. Poltto-

ainesauvoissa käytetään palavaa absorbaattoria (Gd_3O_2) ja yksi polttoainesauva on kuuden välituen kiinnityssauvana, joten polttoainesauvoja on vain 63. Kuvassa 5 on TVO:lla käytössä ollut 8x8 polttoainenippu, jossa on viisi palavaa absorbaattorisauvaa. (TVO)

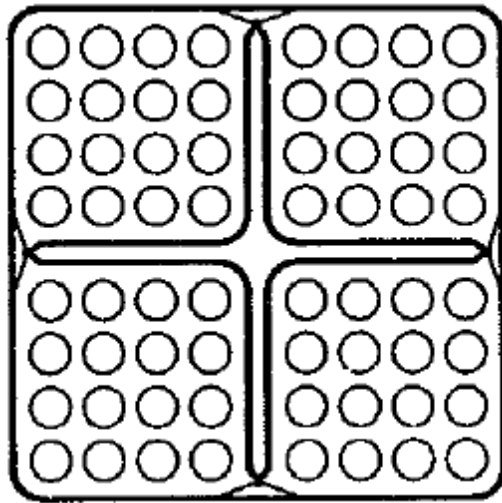


Kuva 5. TVO:lla käytössä olleen polttoainenipun poikkileikkaus. BA tarkoittaa palavaa absorbaattoria sisältävää polttoainesauvaa, W tarkoittaa välitukien kiinnityssauvaa. (TVO)

3.1.2 Svea-64

Seuraavan polttoainenipputyypin nimi on Svea-64 ja se julkaistiin 1981. Se sisältää 64 polttoainesauvaa. Polttoainesauvat on kuitenkin sijoitettu nipun sisälle neljään sisäkanavaan, joissa kaikissa on 16 sauvaa 4x4 hilassa. Näiden sisäkanavien väliin syntyy ristinmuotoinen kanava (kuva 6), jonka sisällä kulkee vettä. Tätä kutsutaan vesikanavaksi. (Blomstrand, 1995, s.28) Polttoainenipun kulmasauvojen väkevöintiaste on 2,35 prosenttia uraani-235, muiden reunalla olevien 2,82 prosenttia uraani-235 ja muiden 3,37 prosenttia uraani-235 (Nylund, s. 39).

Svea-64 polttoainenippu on 4,398 metriä korkea ja sen sivun pituus on 139,6 millimetriä. Polttoainesauvat ovat ulkohalkaisijaltaan 12,25 millimetriä ja sisähalkaisijaltaan 10,65 millimetriä ja paksuudeltaan 0,8 millimetriä. Suojakuoren materiaalina on Zircaloy-2. Polttoainepelletti on halkaisijaltaan 10,44 millimetriä ja korkeudeltaan 11 millimetriä. Polttoainesauvojen keskimääräinen lineaarilämpöteho on 190 W/cm. Keskimääräinen poistopalama on noin 40 MWd/kgU. (Mas-sih, 1995, s. 389 ja Nuclear engineering international, 1994, s. 21)



Kuva 6. Svea-64 polttoainenipun poikkileikkaus (Blomstrand, 1995, s. 28).

Svea-64 polttoaineessa jäädytevirtauksen on todettu olevan stabiilimpaa äänites-tien perusteella kuin 8x8 polttoainenipputyypissä. Polttoainetyypin 8x8 mittauk-sissa yhden hertzin taajuudella on piikki, jollaista ei ole havaittavissa Svea tyyppi-sen polttoaineen mittauksissa. Valmistustekniikan ja -välineiden kehitys on vä-hentänyt zirkoniumin määrää 20-30 prosenttia vesi- ja polttoainekanavissa. (IAEA 1987, s. 147-157).

Vesikanavien tulo myötä pohdittiin mahdollisuutta korvata osassa polttoainesau-voja oleva palava absorbaattori vesikanaviin laitettavilla absorbaattorilevyillä. Nämä levyt olisivat poistettavia ja ne poistettaisiin ensimmäisen polttoainevaih-don yhteydessä. Tämä poistaisi palamattoman gadoliniumin negatiivisen reaktii-visuusvaikutuksen lopuissa käyttöjaksoissa. (IAEA 1987, 158)

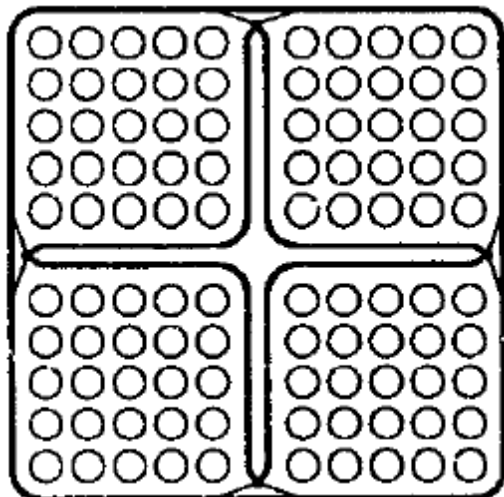
Tutkimuksia kromiseokseen pohjautuvien välitukien korvaamisella on tehty. Kromi seoksen absorptio vaikutusala on suuri, jonka johdosta sen korvaaminen

Zircaloy tai muulla hyvin optimoidulla metalliseoksella voi vähentää polttoainekierron hintaa prosentilla. (IAEA 1987, 158) Nuclear engineering international (1994) mukaan nämä on korvattu Inconel -materiaalilla.

3.1.3 Svea-100

Vuonna 1988 tullut Svea-100 malliin on lisätty polttoaine sauvojen määrää 64:stä sataan. Muotoilultaan se vastaa Svea-64 polttoainetta, mutta jokaisessa sisäkana-
vassa on nyt 25 polttoainesauvaa 5x5 hilassa (kuva 7). (J. Blomstrand 1995, 28)

Polttoainenipun ulkomitat ovat pysyneet samoina kuin Svea-64 polttoainenipussa. Sauvojen määrän lisääntyessä polttoainesauvojen halkaisijaa on pienennetty 9,62 millimetriin ja suojakuoren paksuutta on pienennetty 0,63 millimetriin. Suojakuoren materiaali on edelleen Zircaloy-2. Välitukien materiaalina on käytetty Inconelia. Polttoainesauvojen keskimääräistä lineaaritehoa on saatu laskettua 120 W/cm. Keskimääräinen poistopalama on 40-50 MWd/kgU välillä. (Nuclear engineering international, 1994, s.21)



Kuva 7. Svea-100 polttoainenipun poikkileikkaus.

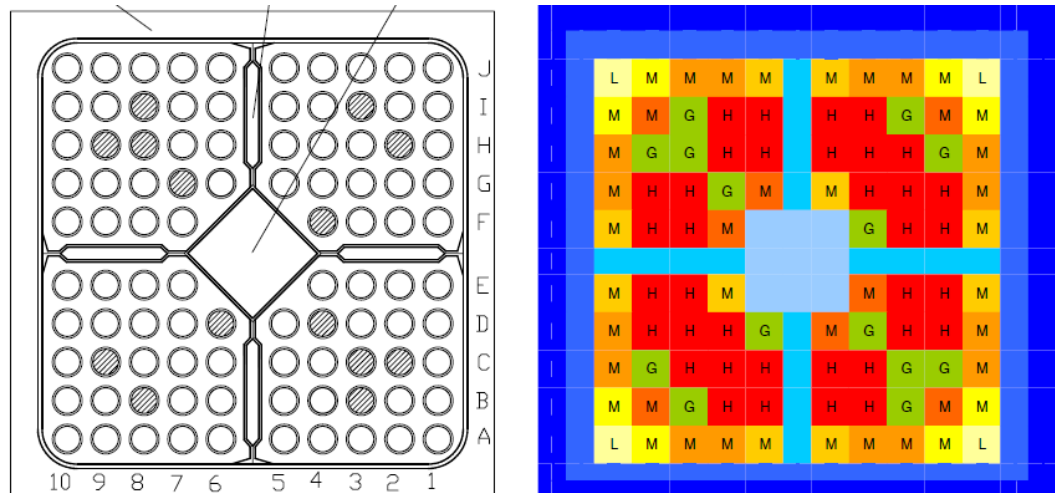
3.1.4 Svea-96

Kaksi vuotta myöhemmin tuotiin seuraava kehitetty versio polttoainenipusta, joka on nimeltään Svea-96. Se on kehitetty Svea-100 polttoainenipusta poistamalla jokaisen alikanavan lähinnä keskustaa oleva polttoainesauva. Tämä poistaa polttoainenipusta 4 sauvaa, joten sauvoja jää 96 kappaletta. Kuvassa 8 on esitetty tästä polttoaineesta poikkileikkaus, sekä polttoainesauvojen väkevöintiastekuva. (Blomstrand *et al*, 28)

Polttoainenipun korkeutta on kasvatettu 4,422 metriin Svea-100 mallisesta nipusta, mutta sivun pituutta on pienennetty hieman 139,1 millimetriin. Polttoainesauvan suojakuori ovat sisähalkaisijaltaan 8,36 millimetriä ja ulkohalkaisijaltaan 9,62 millimetriä. Polttoaine pelletin korkeus on 8,7 millimetriä ja halkaisija 8,19 millimetriä. (Massah, 1995, s. 389 ja Nuclear engineering international, 1994, s. 21)

Polttoainesauvan suojakuoren materiaalina on Zircaloy 2 ja välitukien materiaalina Inconel. Keskimääräinen lineaariteho polttoainesauvoissa on 120 W/cm. Keskimääräinen poistopalama polttoainenipuilla on ollut 41 MWd/kgU ja suurin poistopalama on ollut 60 MWd/kgU. (Nuclear engineering international, 2004, s. 31)

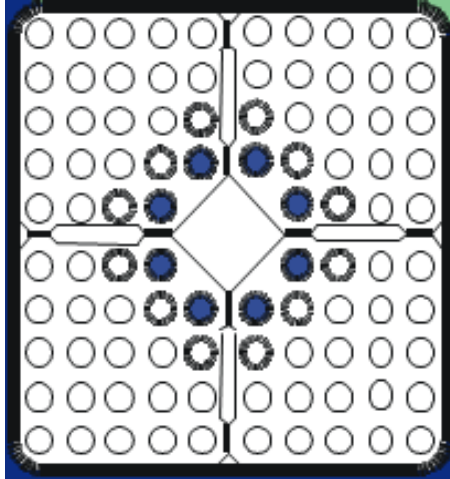
Svea-96+ poikkileikkaukseltaan Svea-96 kanssa samanlainen, mutta sen sivun pituus on pienempi (138,6 millimetriä). Tämä johtuu siitä, että se on tarkoitettu käytettäväksi toisten valmistajien reaktoreissa. (Nuclear engineering international, 2004, s. 31)



Kuva 8. Svea-96+ polttoainenipun poikkileikkaus (oik.) ja sauvojen polttoaineneiden väkevyys. L matala rikasteinen sauva ($\epsilon \approx 2,3$ prosenttia uraani-235), M keskirikasteinen sauva ($2,3 < \epsilon < 4,7$ prosenttia uraani-235), H korkearikasteinen sauva ($\epsilon \approx 4,7$ prosenttia uraani-235), G palavaa absorbaattoria sisältävä sauva, jonka polttoainetapleetit sisältävät 4,0 prosenttia Gd_2O_3 . (Tani *et al*, 2006, s. 491)

3.1.5 Svea-96 optima

Svea-96 optima julkistettiin 1998. Sen suurimpana erona edeltäjään on osapitkät polttoainesauvat keskellä sijaitsevan vesikanavan ympärillä, sekä osan polttoainesauvoista korvaaminen isommilla sauvoilla. Alikanavista on poistettu kaksi lähinnä vesikanavaa olevaa polttoainesauvaa ja ne on korvattu 2/3 mittaisilla polttoainesauvoilla. Alikanavassa kahden lähimmän polttoainesauvakehän halkaisijaa on kasvatettu 10,3 mm. Nämä muutokset on nähtävissä myös kuvasta 9. (Enica *et al*)



Kuva 9. Svea Optima polttoainenipun poikkileikkaus. Sininen tarkoittaa 2/3 pituis- ta polttoainesauvaa. Rosoinen reuna tarkoittaa halkaisijaltaan 10,3 mm polttoaine- sauvaa. (Enica *et al*)

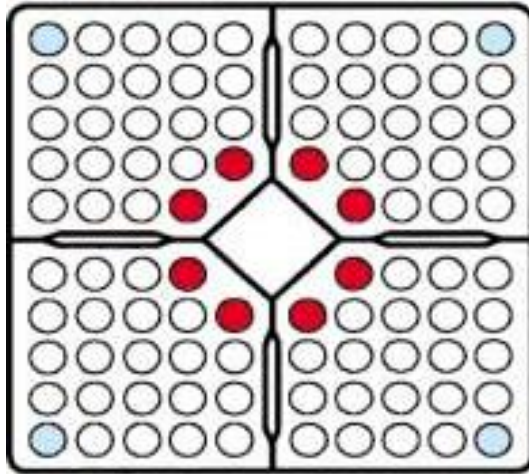
Polttoainenipun pituutta on pienennetty noin 60 millimetriä 4,420 metriin. Sivun pituus on palautettu alkuperäiseen 139,6 millimetriin. Täysimittaisten polttoaine- sauvojen pituus on 3885,6 millimetriä ja osapitkiä sauvoja on 8 kappaletta. Mui- den kuin levennettyjen sauvojen halkaisija on 9,62 millimetriä. Polttoainepelletit ovat halkaisijaltaan 8,19 millimetriä ja korkeudeltaan 10 millimetriä. Suojakuori on paksuudeltaan 0,63 millimetriä. (Nuclear engineering international, 2004, s. 31)

Polttosauvan suojakuoren materiaalina on käytetty Zircaloy 2 materiaalia, jossa on myös mahdollisuus zirkonium-tina vuoraukseen. Välitukien materiaalina on käy- tössä Inconel. Polttoainesauvojen keskimääräinen lineaariteho on saatu laskettua 124 W/cm. Keskimääräinen poistopalama 48 MWd/kgU ja suurin poistopalama on 60 MWd/kgU. (Nuclear engineering international, 2004, s. 31)

3.1.6 Svea-96 Optima 2

Svea-96 optima 2:en lataukset reaktoreihin aloitettiin vuonna 2000, eli vain kaksi vuotta Svea-96 optiman jälkeen. Muutoksia edeltäjään on vähän ja ne kohdistuvat polttoainesauvoihin. Keskellä olleista paksunnetuista sauvoista on luovuttu ja ne on korvattu muiden kanssa saman paksuisilla polttoainesauvoilla. Kahdeksan kes- kimmäistä sauvaa ovat edelleen 2/3 pituisia. Suurin muutos on polttoainenipun

jokaisen kulmasauvan korvaaminen 1/3 mittaisella polttoainesauvalla. Nämä muutokset on nähtävissä kuvassa 10. (Helmersson s. 24)



Kuva 10. Poikkileikkaus Svea-96 Optima 2 polttoainepinusta. Vaaleansinisellä on merkitty 1/3 pituisia, punaisella 2/3 pituisia ja valkoisella kokopitkiä polttoainesauvoja. (Helmersson, s. 24)

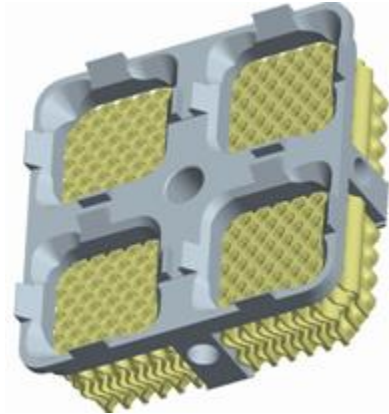
Polttoainepinun pituus on 4420 millimetriä ja leveys 139,6 millimetriä. Polttoainesauvan pituutta on kasvatettu 3985,3 mm:iin ja halkaisijaa 9,84 mm:iin. Polttoaineen suojakuoren paksuutta on ohennettu 0,605 millimetriin. Polttoainepellettien koko halkaisija on kasvanut 8,48 millimetriin ja korkeus on pysynyt 10mm:ssä. (Nuclear engineering international, 2004, s. 31)

Polttoainesauvojen suojakuoren materiaali on Zircaloy 2 zirkonium-tina vuorauksella. Välitukien materiaalina on Inconel. Polttoainesauvojen keskimääräinen teho on 131 W/cm. Polttoaineen keskimääräiseksi poistopalamaksi on lisensoitu 58 MWd/kgU ja maksimiksi 60 MWd/kgU. (Nuclear engineering international, 2004, s. 31)

3.1.7 Svea-96 Optima 3

Muutokset Svea-96 optima 2:een ovat keskittyneet polttoaineen kestävyyspuolelle vähentämään irtokappaleiden aiheuttamaa riskiä hajottaa polttoainetta. Välitukia on kehitetty yksinkertaisempaan muotoon, jotta niihin ei pääsisi kiinnittymään irtokappaleita. Lisäksi uudella välitukirakenteella saavutetaan pienempi paineen-

pudotus. Irtokappaleiden pääsyä polttoainepinon kanavaan on pyritty vähentämään ottamalla uusi Triplewave+ pohjan romusuodatin (Kuva 11). (Enica *et al*)



Kuva 11. Uusi Triplewave+ irtokappalesuodatin.

Polttoainepelleteissä on otettu käyttöön jo Svea-96 optima 2 kokeilussa ollut uusi polttoainepelletityyppi ADOPT (Advanced doped pellet technology). Lisäksi polttoainekanavan korroosionsietokykyä on parannettu vaihtamalla materiaaliksi ZIRLO. (Enica *et al*). Hyung *et al* (s. 828) mukaan ZIRLO sisältää zirkoniumin lisäksi massaprosentteina 1,8 Niobiumia, 1,2 tinaa ja 0,1 rautaa.

ADOPT on Westinghousen uudentyypinen polttoainepelletti. Uuteen polttoainepellettiin on lisätty kromi- ja alumiinioksideja UO_2 :in lisäksi. Uudet pelletit saavuttavat noin 0,5 prosenttia suuremman tiheyden, lyhyemmän sintrausajan ja viisi kertaa suuremman raekoon. Studsvik 2 laitoksella tehdyissä vakio tehoajon kokeissa noin 30 MWd/kgU palamaan on osoittautunut, että fissiokaasu vapautui 50 % vähemmän verrattuna tavalliseen UO_2 pellettiin. (Arborelius *et al*, s. 967)

3.2 General Electric

Edison Electric Light Company perustettiin Thomas Edisonin toimesta vuonna 1878. Vuonna 1889 Edison siirsi kaikki yrityksensä Edison General Electric Companyn alle. 1940-luvun loppupuoliskolla yritys aloitti kehittämään ydinreaktoria sukellusveneisiin ja ensimmäinen General Electricin ydinreaktoria voimanlähteenä käyttämä sukellusvene Seawolf valmistui vuonna 1955. (Fundinguniverse)

General Electricin polttoainetta tehtiin alussa erikoisille reaktorityypeille BWR 2/3 ja BWR 4-6. BWR 2/3 reaktorit olivat korkeudeltaan 4,35 metriä ja BWR 4-6 reaktorit 4,48 metriä. Tämän takia polttoainenippujen korkeudessakin on eroa, vaikka samantyyppisen polttoainenippujen muu muoto on lähes vastaava. BWR 2/3 polttoainenippu on korkeudeltaan 4,036 metriä ja BWR 4-6 4,161 metriä. (Energy Information Administration, 1994, s. 86)

3.2.1 7x7

Tähän kokoluokkaan kuuluu GE-2 ja GE-3 polttoaineniput. GE-2 polttoainesauvat ovat 7x7-hilassa ja siihen kuuluu 49 polttoainesauvaa. Polttoainetta sauvassa on 3,66 metrin alueella ja sauvan halkaisija on 14,30 millimetriä. Suojakuoren paksuus on 0,813 millimetriä ja sen materiaali on Zircaloy-2. Polttoainepelletit ovat halkaisijaltaan 12,37 millimetriä ja korkeudeltaan 12,70 millimetriä. Uraania polttoaine nipussa on noin 195 kg. Keskimääräinen lineaarilämpöteho polttoaineessa on 231 W/cm. Maksimilämpötila polttoaineessa on 2440 °C. (Bailey *et al*, s.2.3-4)

GE-2 esiintyneiden luotettavuusongelmien takia kehitettiin GE-3 polttoaine. Polttoainesauvan suojakuoren paksuutta kasvatettiin 0,940 millimetriin. GE-3 polttoainenipusta on olemassa a ja b versiot. A:ssa polttoainetta sauvoissa on 3,66 metrin alueella ja b:ssä 3,71 metrin alueella. Tämän takia a:ssa on urania n. 187 kg ja b:ssä 190 kg. (Energy Information Administration, 1994, s. 74-76). Reichin (s. 25) mukaan polttoainesauvojen jousiosassa otettiin käyttöön vetyä sitova aine, joka sitoo vesihöyryä sauvan sisällä.

3.2.2 GE-4

Tässä versiossa siirryttiin hilarakenteessa 8x8-hilaiseen versioon. Lisäksi yksi polttoainesauva on korvattu vesisauvalla, joten polttoaineessa on 63 polttoainesauvaa. Polttoainetta sauvassa on 3,71 metrin matkalla ja sauvan ulkohalkaisija on 12,52 millimetriä. Suojakuoren paksuus on 0,864 millimetriä ja sen materiaalina on käytetty Zircaloy-2. Polttoainepelletit ovat halkaisijaltaan 10,57 millimetriä ja korkeudeltaan 10,67 millimetriä. Polttoaineen keskimääräinen lineaarilämpöteho

179 W/cm ja suurin lämpötila 1830 °C. Tästäkin polttoaineesta on kaksi versiota aktiivisen polttoainepituuden mukaan, jotka ovat samanmittaisia kuin GE-3:ssa. A:ssa on uraania 184 kg ja b:ssä 187 kg. (Energy Information Administration, s. 74-76; Bailey *et al*, s.2.3-4)

3.2.3 GE-5/Prepressurized/Barrier

GE-5 eroaa monessa suhteessa GE-4:stä, vaikka kummatkin ovat 8x8-hilaisia. GE-5:ssä on 62 polttoainesauvaa ja 2 vesisauvaa. Polttoainesauvan halkaisija on pienentynyt 12,27 millimetriin ja suojakuoren paksuus on palautettu 0,813 millimetriin. Polttoainetta sauvassa on 3,81 metrin alueella. Polttoainepelletit ovat sekä halkaisijaltaan että korkeudeltaan 10,41 millimetriä. Polttoaineen keskimääräinen lineaarilämpöteho on 177 W/cm ja polttoaineen suurin lämpötila 1890 °C. Uraania polttoainepippu sisältää 183 kilogrammaa. (Energy Information Administration, s. 74-76; Bailey *et al*, s.2.3-4)

Mooren ja Notzin mukaan GE-5:ssa on käytetty myös aksiaalista luonnonuraanivaippaa polttoainesauvan molemmissa päissä. GE Pressurized on muotoilultaan saman samanlainen, kuin GE-5. Sitä erottaa kuitenkin polttoainesauvat, jotka on paineistettu 3 ilmakehän paineeseen heliumilla. Barrier polttoainepipussa on sauvojen sisäpinnalle lisätty puhdasta zirkoniumia suojaksi. Tällä suojalla vähennetään pelletin ja suojakuoren vuorovaikutusta (PCI), jota käsiteltiin kappaleessa 2.4.4. Tähän tyyppiin on myös saatu hieman lisää uraania ja sen massa on 185 kg. (Bailey *et al*, s.2.3-4)

3.2.4 GE-8/9/10

Polttoainepipputyypissä GE-8 vesisauvojen määrää on lisätty 4 kappaleeseen, joten polttoainesauvoja jää jäljelle 60. Tässä tyyppissä otettiin käyttöön pystysuuntaiset alueet rikastuksessa ja palavalle absorbaattorille. Myös polttoainesauvojen paineistus nostettiin viiteen ilmakehänpaineeseen. Polttoainepipun uraanimassa on 179 kg. (Energy Information Administration, 1994, s. 74-77)

Polttoainenippuun GE-9 on muutettu ferule-tyyppiset välituet. Lisäksi vesisauvat on korvattu yhdellä isolla vesisauvalla, joka korvaa neljä polttoainesauvaa. Tässä polttoainenipussa on noin 172 kg uraania. (Energy Information Administration, 1994, s. 74-77)

Suurin muutos polttoainenipputyypissä GE-10 on polttoainekanavan paksuudessa. Kulmissa polttoainekanavan paksuus on 2,54 millimetriä ja sivuilla 1,65 millimetriä. Tämän seurauksena reaktorista saadaan vähennettyä neutroneja absorboivaa materiaalia. Lisäksi kanavaa uudistettiin niin, että se ohjaa virtauksen kanavan reunoilta kohti polttoainenipun keskustaa. Tämä polttoainenippu sisältää noin 177 kg uraania. (Energy Information Administration, 1994, s. 74-77)

3.2.5 GE-11

GE-11 on General Electricin 9x9-hilainen polttoainenippu. Polttoainenipussa on kaksi suurta vesisauvaa, jotka vievät seitsemän polttoainesauvan tilan. Polttoainesauvoja nipussa on 74, joista 8 on 2,286 metriä pitkiä. Muiden polttoainetta sisältämä pituus on 3,588 metriä. Polttoainenipun sisältämän uraanin määrä on noin 170kg. (Energy Information Administration, 1994, s. 74-77; Nuclear engineering international, 2004, s. 31)

3.2.6 GE-12

General Electricin ensimmäinen polttoainenipputyyppi, joka on 10x10-hilainen. Siinä on 92 polttoainesauvaa, joista 14 on 2,286 metriä pitkiä. Loppujen sauvojen polttoainetta sisältävä pituus on 3,689 metriä. Välituet on tehty vähentämään paineen pudotusta. Polttoainenipulla on pienempi lineaarinen lämpöteho, kuin edeltäjillään. (Energy Information Administration, 1996, s.120; Nuclear engineering international, 2004, s. 31)

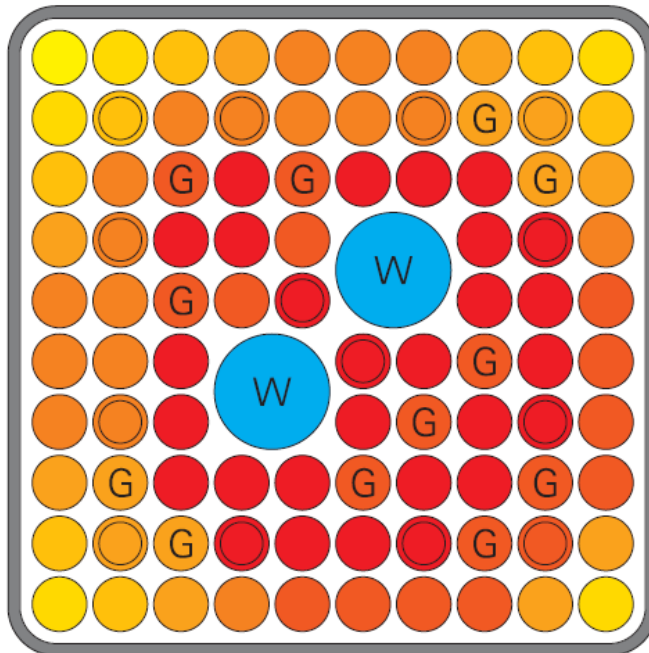
3.2.7 GE-13

GE-13 on paranneltu versio GE-11 polttoaineesta. Tämän polttoaineen hilarakenne on 9x9. Polttoainenipun paino on kasvanut verrattuna edeltäjänsä. Kriittisen

tehon varaa on saatu kasvatettua. Polttoainenipussa on käytössä ferrule tyyppiset välituet. (Energy Information Administration, 1996, s. 121)

3.2.8 GE-14

GE-14 on 10x10-hilainen polttoainenippu, joka on paranneltu versio GE-12:sta. Tämän polttoainetyypin osapitkien polttoainesauvojen pituutta on lyhennetty 2,134 metriin. Välituissa on otettu käyttöön uusi välitys. (Nuclear engineering international, 2004, s. 31) Kuvassa 12 on näkyvissä polttoainenipun sauvat ja vesikanavat.



Kuva 12. GE-14 polttoaineen poikkileikkaus. Tummempi väritys tarkoittaa korkeampaa väkevöintiastetta, G tarkoittaa palavaa absorbaattoria sisältävää polttoainesauvaa, ympyrä sauvan sisällä tarkoittaa puolipituista sauvaa. (TVO, 2010, s. 15)

3.3 KWU/Siemens/Framatome ANP

Kraftwerk union AG perustettiin vuonna 1969. Heikko kustannustehokkuus ja väittely ydinvoiman turvallisuudesta pysäyttivät toiminnan. Lisäksi AEG:n ongelmien seurauksena sen omistus siirrettiin Siemensille. Vuonna 1992 Siemens KWU integroitiin Europa and Siemens Power Corporationin kanssa. (Siemens,

2011 ja 1994). Vuonna 2003 Siemens yhdisti ydinvoimatoimintansa Framatomen kanssa Framatome ANP:ksi (Henriksson).

3.3.1 6x6

Vuonna 1965 asetettiin ensimmäinen 6x6 polttoainenippu, jolloin otettiin käyttöön myös zircaloysta tehdyt välituet. Tämän tyyppisen polttoaineen polttoainepelletin halkaisija on 14,30 millimetriä. Keskimääräinen lineaarinen lämpöteho polttoaineessa on 125-176 W/cm välillä. Maksimipalama koko polttoainenipun alueella on 28 MWd/kgU. Vuonna 1966 käytettiin ensimmäistä kertaa täyttä MOX- polttoainesauvaa, mutta nippuja on käytetty vain 71 kappaletta vuoteen 1988 mennessä. Viimeinen tämän polttoainetyypin aikana tullut kehitysaskel oli palavan absorbaattorin (Gd_3O_2) lisääminen polttoaineeseen vuonna 1970. (Siemens, 1990, s. 6-9)

3.3.2 7x7

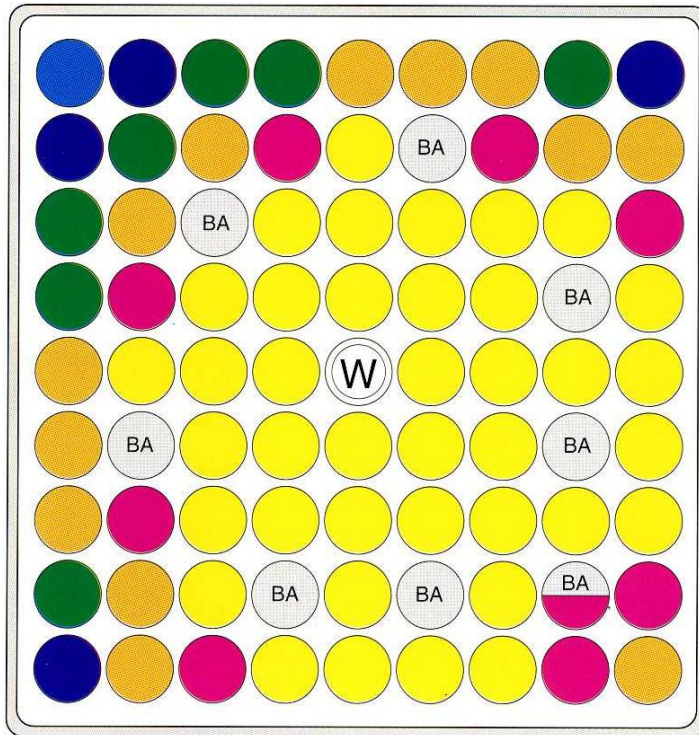
Vuonna 1972 otettiin käyttöön 7x7-hilainen polttoainenippu. Siinä on käytössä samankokoiset polttoainepelletit, kuin 6x6-hilaisessa polttoainenipussa. Polttoaineen lineaarinen lämpöteho on 230 W/cm. Keskimääräinen poistopalama polttoaineella on 38 MWd/kgU. (Siemens, 1990, s. 6)

3.3.3 8x8

Tästä polttoainenipputyypistä on olemassa kaksi erilaista versiota. Vuonna 1975 käyttöönotettu 8x8-1 tyyppinen versio, jossa yksi polttoainesauva on korvattu vesisauvalla. Polttoainepelletin koko tässä tyypissä oli 12,50 millimetriä ja keskimääräinen lineaariteho 178-182 W/cm. 8x8-2 versio otettiin käyttöön vuonna 1983 ja siinä on kaksi polttoainesauvaa korvattu vesisauvoilla. Polttoainepelletti on 12,30 millimetriä halkaisijaltaan ja keskimääräinen lineaariteho 177-204 W/cm. Keskimääräinen maksimi poistopalama molemmilla nipputyypeillä on 38 MWd/kgU. (Siemens, 1990 s.6)

3.3.4 9x9

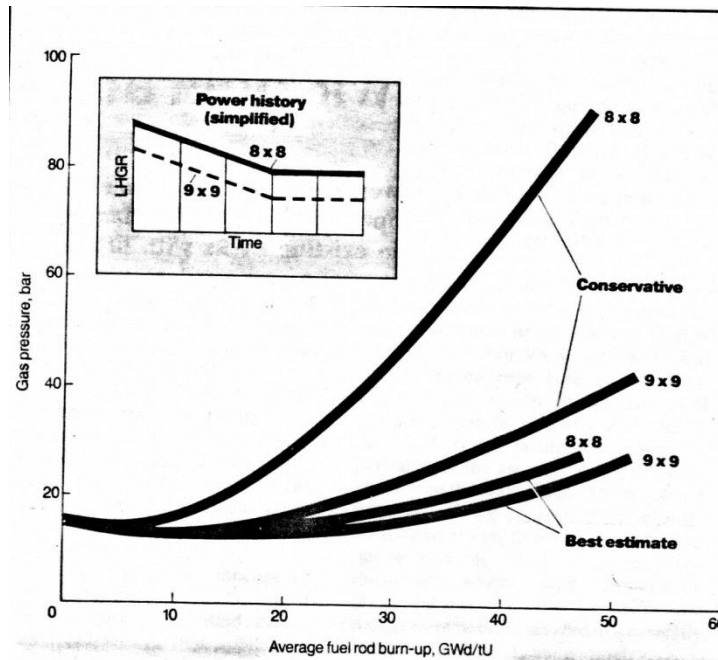
Vuonna 1975 alettiin kehittää 9x9 polttoainetta, jonka tavoitteena vähentää pelletin ja polttoainesauvan suojakuoren välistä vuorovaikutusta (PCI). Tämän lisäksi parannettiin polttoaineen käyttöä ja kasvatettiin poistopalamaa. Pääkohteet polttoaineen kehityksessä ovat olleet operoinnin joustavuuden kasvattaminen, polttoaineen altistuksen kasvattaminen ja käyttöasteen parantaminen. (Holzer *et al*, 1984, s. 29) Kuvassa 13 on nähtävillä TVO:lla käytössä olleen 9x9 polttoaineen poikkileikkaus.



Kuva 13. 9x9 polttoaineen poikkileikkaus. Polttoaine on sitä rikastetumpaa mitä kirkkaampi väri. BA tarkoittaa palavaa absorbaattoria sisältävää sauvaa ja W tarkoittaa välitukien kiinnityssauvaa. (TVO, s.35)

KRB-II laitoksen kokeilussa saatiin keskimääräisessä lineaaritehossa selvä tiputus siirryttäessä 8x8 polttonipusta 9x9 malliseen nippuun. Lineaariteho tippui 204 W/cm:stä 154 W/cm:iin. Termohydrauliset muutokset antoivat 8 prosentin lisämarginaalin rajoittavaan kriittiseen tehoon. Polttoainesauvojen fissiokaasujen aiheuttama paineenousu polttoainesauvoissa on huomattavasti alhaisempi verrattu-

na 8x8 polttoaine-elementtiin. Tämä ero on havaittavissa selkeimmin konservatiivisissa olosuhteissa suurilla palamilla (kuva 14) . (Holzer *et al*, 1984, s. 30)



Kuva 14. Fissiokaasujen aiheuttama paineen nousu 8x8 ja 9x9 polttoaineriipulla palaman mukaan. Ylemmät käyrät konservatiivisissa oloissa ja alemmat parhaassa mahdollisessa tilassa. (Holzer, s.30)

Vuonna 1984 tuotiin testiin ensimmäiset 9x9-polttoainesauvat, joissa polttoainesauvoja oli korvattu vesisauvoilla. Aluksi markkinoille tuotiin polttoaineriippuja, joista oli vaihdettu yksi tai kaksi sauvaa keskeltä nippua. Näiden polttoaineriippujen nimet olivat 9x9-1 ja 9x9-2. Jo seuraavana vuonna tuotiin 9x9-5 polttoaineriippu, jossa keskeltä oli poistettu 5 polttoainesauvaa. Tällä polttoaineryypillä saavutettiin 35 MWd/kgU palama. Tietoja polttoaineiden 9x9-1 ja 9x9-5 on taulukossa 2, jossa on lisäksi vertailtu 8x8-2 polttoaineratkaisuja. Vuonna 1986 lisättiin mahdollisuus zirkonium -vuoratuille polttoainesauvoille. (Holzer *et al*, 1984, s. 35; Siemens, s.5)

Taulukko 2. Perustietoja kiehutusvesireaktorien polttoaineesta. (Holzer *et al*, 1984, s. 35)

Polttoainenipun tyyppi	yks.	8x8-2	9x9-1	9x9-5
Polttoainesauvojen määrä		62	80	76
polttoainesauvan halkaisija	mm	12,3	10,75	11
vesisauvan halkaisija	mm	15	13,15	13,15
uraanin massa	kg	176	173	179
keskimääräinen lineaarilämpöteho ¹	W/cm	168	130	137
Maksimi lineaarilämpöteho ¹	W/cm	400	310	325
Kriittisen tehosuhteen minimi ¹		vertailu	6 %	3,50 %
Poistopalaman kasvu ¹²	MWd/tU	vertailu	1 %	7 %

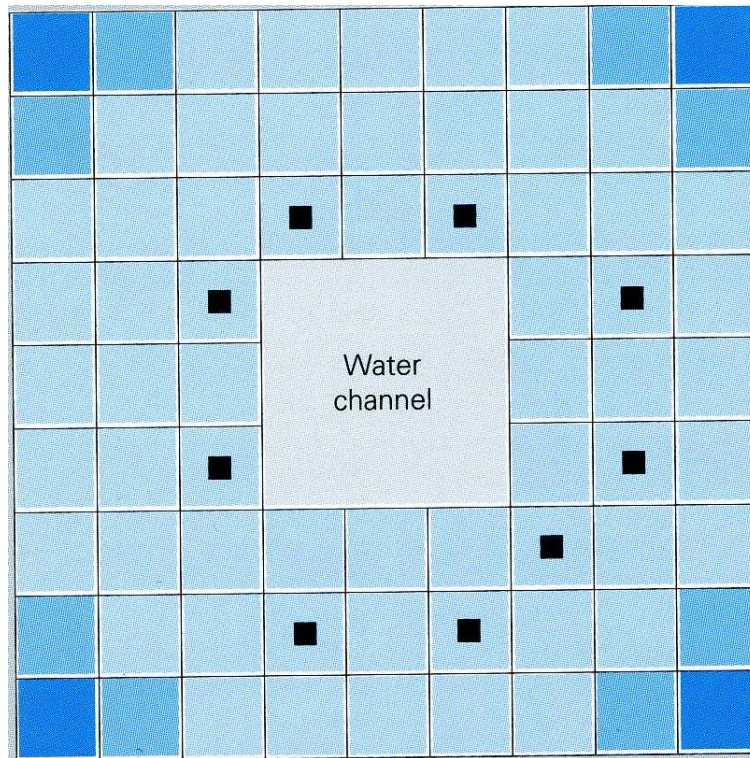
1. Tyypillisessä 900MWe kiehutusvesireaktorissa.

2. Yhtenäisellä rikastuksella ja samanlaisella käyttöhistorialla. (kasvaneinen marginaalien hyötyä ei ole laskettu mukaan.

3.3.5 Atrium 9 A/B

Vuonna 1988 esiteltiin ensimmäinen uuden ATRIUM konseptin polttoainenippu. Se on hilarakenteeltaan 9x9 tyyppinen polttoainenippu, jossa 72 polttoainesauvaa. Keskeltä sauvaa on poistettu 9 polttoainesauvaa, jotka on korvattu 3x3 polttoainesauvan kokoilla vesikanavalla, jonka materiaali on Zircaloy 2. Sillä saavutettiin 40 MWd/kgU palama. Polttoainenipun pohjan päätylevyyn on lisätty romun pääsyä estävä romusuodatin. (Siemens, s.5,15; Nuclear engineering international, 2004, s.31)

Vuonna 1992 tuotiin polttoainenipusta paranneltu versio ATRIUM 9A. Kokonaispituudeltaan se on 4,472 metriä korkea ja sen kanavan sisäinen sivumitta on 133,4 millimetriä. Polttoainesauvat ovat 4075 millimetriä korkeita ja 11 millimetriä halkaisijaltaan. Sauvan suojakuoren paksuus on 0,666 millimetriä. Polttoainepelletit ovat 11,5 millimetriä korkeita ja niiden halkaisija on 9,5 millimetriä. Polttoainepellettien tiheys on 11,45 tai 10,55 g/cm³, johtuen onko käytössä vuoraamaton vai vuorattu polttoainesauva. Polttoainenipun keskimääräinen palama on 40-45 MWd/kgU. Keskimääräinen lineaariteho polttoaineessa on 158W/cm. Polttoainesauvojen materiaalina on käytetty Zircaloy 2:sta. Välitukien materiaalina on Zircaloy 2 tai vaihtoehtoisesti Inconel. Kuvasta 15 näkyy tämän polttoainenipputyypin väkevöintialueet. (Siemens, s.5-14)



Kuva 15. ATRIUM 9A polttoainenipun väkevöintialueet. Tumman sinisellä 2,5 wt% ²³⁵U, keskivaalealla sinisellä 3,2 wt% ²³⁵U ja vaaleansinisellä 3,7 wt% ²³⁵U. Lisäksi musta neliö tarkoittaa, että siihen polttoainesauvaan on lisätty palavaa absorbaattoria Gd₂O₃. (Siemens, s.24)

Välituissa ATRIUM 9 tyypissä oli alussa käytössä ”Munakennotyyppinen” ratkaisu, jossa polttoainesauvat tuettiin Zircaloy vanteilla. Nipun 9A versiossa käyttöön otettiin Zircaloy renkainen ratkaisu käyttöön. Viimeisimmässä ”munakennoratkaisussa” on lisätty pyörresiivet. Tämä uudentyypinen välitukiratkaisu on nimetty ULTRAFLOW™ välitueksi ja se on otettu käyttöön 9B versiossa polttoainenipusta. 9B versiossa ei ole muuten paljon eroa A versioon verrattuna. (Siemens, s. 15)

3.3.6 Atrium 10 A/B/P

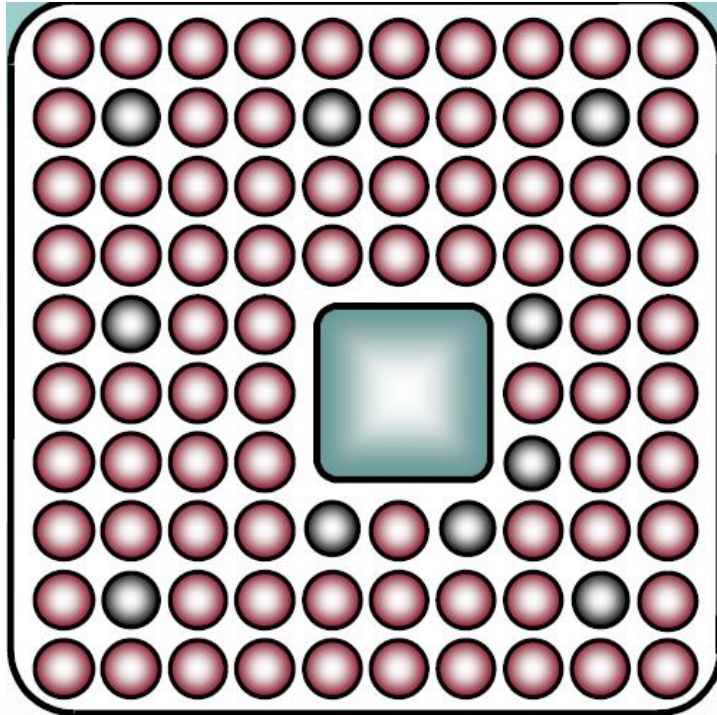
Vuonna 1993 esiteltiin 10x10 hilatyyppiin perustuva polttoainenipputyyppi, jossa 91 polttoainesauvaa. Näistä 8 on osapitkiä polttoainesauvoja. Keskimääräiseksi palamaksi tällä polttoainenipputyyppillä on saatu 50 MWd/kgU. Vuonna 1994 esiteltiin mahdollisuus raudalla parannettuun zirkonium vuoraukseen. 10x10 ratkaisussa polttoainenipun vesikanava ei ole täysin keskellä, vaan se on hieman epäsymmetrinen. (Siemens, s. 5)

Polttoainenipun korkeus näissä polttoaineissa on 4,470 metriä ja sivun sisäleveys 134 millimetriä. 10P versiossa millimetrin leveämpi. Polttoainesauvan korkeus on 4,0814 metriä ja halkaisija 10,05 millimetriä. Sauvan suojakuorimateriaalina Zircaloy 2 ja sen paksuus on 0,605 millimetriä. Mahdollisuus on myös matalan lämpötilan valmistukseen ja raudalla parannettuun zirkonium vuoraukseen. Polttoaine pelletit ovat korkeudeltaan 10,5 millimetriä ja leveydeltään 8,67 millimetriä. Pelletin tiheys on $10,55 \text{ g/cm}^3$ vuoratussa ja $10,55 \text{ g/cm}^3$ vuoraamattomassa suojakuoressa. Keskimääräinen lineaariteho polttoaineella on 143 W/cm . Keskimääräinen rekisteröity poistopalama näillä polttoaineilla on 65 MWd/kgU . (Nuclear engineering international, 2004, s.31)

Suurimmat erot näillä polttoainetyypeillä on lyhyiden polttoainesauvojen määrässä ja välituen materiaalissa. Kun 10A ja 10B versioissa on 8 osapitkää polttoainesauvaa, niin 10P versiossa niitä on 12. Välitukien materiaalina 10A/B versioissa on Zircaloy, mutta 10P versiossa Inconel. (Siemens, s.14; Nuclear engineering international, 2004, s.31)

3.3.7 Atrium 10XP/XM/MOX

Atrium 10XP on paranneltu versio 10x10 hilaisesta polttoaineesta, joka on otettu käyttöön 2002. Siinä on vähennetty puolipitkien sauvojen määrä 10 kappaleeseen, jotka ovat nähtävissä mustina ympyröinä kuvassa 16. Sauvojen ulkohalkaisijaa on kasvatettu 10,28 millimetriin ja pelletin halkaisijaa on myös kasvatettu 8,87 millimetriin. Keskimääräinen lämpöteho sauvassa on 158 W/cm . Muilta osin polttoainenipun mitat vastaavat 10P mallia. (Nuclear engineering international, 2004, s. 31)



Kuva 16. Poikkileikkaus ATRIUM 10XP polttoainenipusta. Kuvassa punaiset ympyrät ovat normaaleja polttoainesauvoja ja musta osapitkiä. Sinertävä laatikko on vesikanava. (Höglund, s.105)

4 POHDINTA

Kuten olemme jo huomanneet, polttoaineen keskimääräinen poistopalama on kasvanut uudemmilla polttoaineilla. Polttoaineen poistopalama on kasvanut uusien polttoainenipputyyppeiden myötä useilla kymmenillä MWd/kgU. Tämä kasvaminen näkyy myös taulukosta 3, jossa reaktorista poistetun polttoaineen suurimmat palamat ovat siirtyneet koko ajan kohti suurempaa palamaa.

Taulukko 3. Yhdysvalloissa reaktorista poistettujen nippujen palamat vuosina 1968-1992. (Energy Information Administration, 1994, s.25)

Year	Burnup Ranges ^a (GWD/MTU)												TOTAL
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	
Boiling-Water Reactors (BWR)													
1968	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1969	0.0	1.2	1.0	7.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.8
1970	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6
1971	41.5	8.1	2.8	10.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	64.0
1972	97.9	12.1	27.6	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	141.5
1973	9.7	16.5	30.9	36.4	1.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.1
1974	0.0	78.4	117.7	44.7	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	244.6
1975	0.3	1.7	62.0	136.4	25.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	225.6
1976	0.9	87.1	108.7	118.4	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	297.4
1977	0.0	48.0	40.3	235.0	58.9	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	382.9
1978	6.3	32.4	13.1	84.2	232.0	15.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	383.2
1979	0.0	0.0	18.6	108.7	149.2	123.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	399.8
1980	14.0	0.4	0.6	93.3	413.3	87.6	10.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	619.9
1981	0.0	0.2	0.2	58.1	265.4	133.3	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	458.7
1982	0.0	0.2	4.6	25.6	138.5	173.6	13.8	0.6	0.4	0.0	0.0	0.0	357.2
1983	0.0	0.0	0.9	2.9	113.5	337.8	35.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	491.3
1984	0.0	7.9	43.0	0.3	136.2	239.5	70.8	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	493.0
1985	18.9	42.5	18.3	35.8	93.2	297.4	10.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	514.6
1986	50.8	32.4	42.5	86.8	43.1	180.7	41.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	458.2
1987	133.5	36.1	68.8	40.8	24.7	352.4	42.9	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	699.4
1988	17.0	24.5	1.8	42.9	168.3	192.4	88.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	535.8
1989	30.9	16.9	85.3	71.8	193.2	227.7	85.5	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	714.9
1990	17.0	0.0	34.0	67.6	106.2	247.5	158.9	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	632.8
1991	17.8	24.6	0.0	7.2	24.0	215.0	287.2	12.1	0.0	0.0	0.0	0.0	588.0
1992 ^b ..	0.0	0.0	7.6	86.1	85.1	83.9	382.7	103.4	0.0	0.0	0.0	0.0	728.7
Temps ^c ..	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
TOTAL...	460.7	451.0	730.4	1,384.0	2,279.7	2,908.1	1,209.8	122.6	1.3	0.0	0.0	0.0	9,547.6

5 YHTEENVETO

Ensimmäiset polttoaineniput olivat yksinkertaisia 7x7- tai 8x8-hilaisia. Niiden suuret lämpötehot aiheuttivat ongelmia suojakuorimateriaaleille, varsinkin pelletin ja suojakuoren mekaanista vuorovaikutusta. Tämän seurauksena lähdettiin kehittämään polttoainenippuja, joissa oli enemmän polttoainesauvoja. Kun polttoainesauvoja oli enemmän, niiden koko pieni. Samalla keskimääräinen lämpöteho saatiin pienemmäksi.

Seuraavaksi huomattiin ongelmat polttoaineen vaikeassa hallittavuudessa suurilla tehoilla. Ongelmaa alettiin ratkoa lisäämällä polttoainenippuun vesikanavia. Tällä saatiin parannettua polttoaineen moderointia ja käytettävyyttä. Lisäksi vesikanavat paransivat reaktorin käyttäytymistä suurilla tehotasoilla ja häiriötilanteissa. Materiaaleja parannettiin, jotta neutronien loiskaappauksia saataisiin vähennettyä. Tämä materiaalikehitys koski lähinnä välitukien materiaalia.

Polttoaineen kehitystä jatkettiin lisäämällä polttoainesauvojen määrää lopulta 10x10-hilaiseen. Samalla kehitettiin optimaalisempia vesikanavia. Paineenlaskua polttoaineen yläosassa on vähennetty ottamalla käyttöön osamittaisia polttoainesauvoja, jotta höyryllä olisi tilaa laajeta.

Viimeisimmissä polttoainetyypeissä on alettu huomioida myös pienet ongelmat virtauksessa sekä romujen aiheuttamat vikaantumiset. Virtausta polttoaineen sisällä on parannettu lisäämällä välitukiin virtausta ohjaavia siivekkeitä, jotka ohjaavat virtausta polttoainesauvojen suuntaan. Romujen aiheuttamaan uhkaan on puututtu lisäämällä polttoaineniippujen pohjaan romusuodattimia. Lisäksi välitukia on muotoiltu niin, ettei niihin tarttuisi irtokappaleita.

Tulevaisuudessa polttoaineen kehitys keskittyy luultavimmin suurempien palamien hakemiseen. Tätä varten polttoaineniippujen materiaaleja joudutaan kehittämään. Toinen tärkeä suuntaus on yhä kestävämpien polttoaineiden kehitys, ettei turhia polttoaineen vaihtoja jouduttaisi tekemään.

6 LÄHTEET

ABB Atom, SVEA BWR Fuel, esite.

ARBORELIUS Jakob, BACKMAN Karin, HALLSTADIUS Lars, LIMBACK Magnus, NILSSON Jimmy, REBENSORFF Björn, ZHOU Gang, KITANO Koji, LÖFSTRÖM Reidar, RÖNNBERG Gunnar, Advanced Doped UO₂ Pellets in LWR Applications, *Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY*, **43**(2006), 9, s. 967-976.

Adamson Ron, Cox Brian, Garzarolli Friedrich, Strasser Alfred, Rudling Reter, Wikmark Gunnar, High Burnup Fuel Issues, *Advanced Nuclear Technology International*, 2003.

Bailey W. J., Berting F. M., Wu S., Fuel Performance Annual Report for 1989, Pacific Northwest Laboratory, 1992.

Blomstrand J., Lüdtke B., Lundmark R., Sonntag H., Core stability tracking of the KKB BWR in recent years, *Nuclear Engineering and design*, 154, 1995, s. 27-41.

Elliott V.A., Maxson F. D., Nixon V. D., Merryman J. W., *The Dresden Nuclear Power Station*, 1958.

Energiategollisuus ry, Hyvä tietää uraanista, 2006.

Energy Information Administration, Spent Nuclear Fuel Discharges from US. Reactors 1992, 1994.

Energy Information Administration, Spent Nuclear Fuel Discharges from US. Reactors 1994, 1996.

Enica Anghel, Dag Aziz, Helmersson Sture, Hallstadius Lars, Westinghouse new BWR fuel- towards flawless target. Top fuel Orlandossa Floridassa 26-29.9.2010.

Eurasto Tapani, Hyvärinen Juhani, Järvinen Marja-Leena, Sandberg Jorma, Sjöblom Kirsti-Liisa, YDINVOIMALAITOSTEKNIIKAN PERUSTEITA, *YDIN-TURVALLISUUS*, Stuk, s. 26-49.

Frost Brian R. T., Nuclear fuel elements, 1982, ISBN 0-08-020412-0.

Fundinguniverse, <http://www.fundinguniverse.com/company-histories/General-Electric-Company-Company-History.html>, luettu 11.4.2011.

IAEA, Review of fuel element developments for water cooled nuclear power reactors, *Tecnival reports series No. 299*, 1989, ISBN 92-0-155389-7.

Helmersson S., Advances in Bwr fuel development, *Nuclear Europe Worldscan 3-4/2001*, 2001, s.24-25.

Henriksson Arto, Miljoonien urakka kiinnostaa, *Loviisan Sanomat*, 10.01.2003, <http://www.loviisansanomat.net/lue.php?id=192>, luettu 13.4.2011.

Holzer R., Lill G, Kilian P., Urban P., New 9x9 fuel improver BWR operation. *Nuclear engineering internatonal* (1984), 29-36.

Holzer R. W., Lill G. W., Kilian P., Suchy P., Progress in the design of fuel assemblies for LWRs, *Improvements in Water Reactor Fuel Technology and Utilization*, IAEA, Vienna, 1987, ISBN 92-0-050087-0.

Hyung Hoon Kim, Jun Ho Kim, Jin Young Moon, Ho Seong Lee, Jeong Joo Kimmand Young Suck Chai, High-temperature Oxidation Behavior of Zircaloy-4 and Zirlo in Steam Ambient, *J. mater. Sci. Techol.*, 2010, **26**(9), 827-832.

Höglund Randolph, Reactor physics calculations in Nordic countries, Proceedings of the 11th Nordic Reactor Physics Meeting, Helsinki, 9.-10.4.2003, VTT, ISBN 951-38-6286-0.

Kosonen Maija, <http://www.tvo.fi/ytimekas/0206/tekniikkanurkka.html>, eYtimekäs 2/2006, 2006, katsottu 25.10.2010.

Kyrki-Rajamäki Riitta, Ydinvoimatekniikka I luentomoniste, syksy 2008, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Länsimies Anna-Maria, Hyvä tietää ydinvoimasta, Energiateollisuus ry, ISBN 978-952-5615-38-8.

Massih A., Rajala T., Jernkvist L.O., Analyses of pellet- cladding mechanical interaction behaviour of different ABB Atom fuel rod designs, *Nuclear engineering and design*, **156**, 1995, s. 383-391.

Moore R.S. ja Notz K.J., Tools for LWR Spent Fuel Characterization: " Assembly Classes and Fuel Designs, Oak Ridge National Laboratory, 1991.

Moore, R.S., Williamson, D.A., Notz, K.J., A classification scheme for LWR fuel assemblies. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1988.

Nuclear engineering international, Fuel review 1994, 1994, s. 21-30.

Nuclear engineering international, Fuel review 2004, 2004, s. 31.

http://www.neimagazine.com/journals/Power/NEI/September_2004/attachments/NEISep04p26-35.pdf, katsottu 20.4.2011

Nylund O., Blomstrand J., Current experience and development aspects of svea BWR fuel, in IAEA, *Improvements in water reactor fuel technology and utilization*, Vienna, 1987, s. 147-160.

Nylund Olav, SVEA BWR fuel assembly gives 10 per cent fuel saving, *Modern power systems*, December 1983, s. 39-40.

Reich W. J., Moore R.S. ja Notz K.J., Distribution of characteristics of LWR spent fuel, 1991.

Reuss Paul, Neutron Physics, 2008, ISBN: 978-2-7598-0041-4.

Roddy, J.W., Claiborne, H.C., Ashline, R.C., Johnson, P.J., Rhyne, B.T., Physical and Decay Characteristics of Commercial LWR Spent Fuel, 1985.

Roberts J. T. Adrian, Structural Materials in nuclear power Systems, 1981, ISBN 0-306-40669-1.

Rudling Peter, Nuclear fuel quality management handbook volume 1, 2010, s. 190-225.

Rönnberg G. ja Sandklef S., Principles, design and performance of light water reactor fuel. *Nuclear Energy*, 1989, **28**, No. 1., s. 35-40.

Siemens, Former Affiliates,

http://www.siemens.com/history/en/affiliated_companies/former_affiliates.htm#toc-8, luettu 13.4.2011

Siemens, Fuel Assemblies - References '94, *esite*, 1994.

Siemens, Fuel Assemblies - References '89, *esite*, 1990.

Shultis J. Kenneth, Faw Richard E., Fundamentals of Nuclear Science and Engineering, 2002, ISBN 978-0-203-91035-1, kappale 11.3.

Tani F. ja Jatuff F., Chawla R., Study of spectral heterogeneities for the interpretation of calculational trends in predicting pin power distributions in a SVEA-96+ BWR assembly. *Annals of Nuclear Energy*, **33**, 2006, s. 490-498.

TVO, Nuclear Power Plant Units 1 and 2, *esite*, s. 30-31.

TVO, Ydinvoimalaitosyksiköt Olkiluoto 1 ja 2, esite,

<http://www.tvo.fi/uploads/File/yksikot-OL1-OL2%281%29.pdf>, katsottu
13.4.2011.

Westinghouse, Westinghouse Sweden History,

http://www.westinghousenuclear.com/ProductLines/Nuclear_Fuel/w_sweden_history.shtm, luettu 13.4.2011.