

# **Pebble Bed Modular Reactor**

Tuomo Sevón

Kuulakekoreaktori (Pebble Bed Modular Reactor, PBMR) on neljännen sukupolven heliumjähdytteinen grafiittihidasteinen ydinreaktori. Kuulakekoreaktorin polttoaine on pakattu vähän tennispalloa pienempiin kuuliin, joita kierrätetään jatkuvasti reaktorin läpi. Sähkö tuotetaan kaasuturbiinilla. Reaktorin turvallisuus perustuu passiivisiin ominaisuuksiin. Luontainen turvallisuus pienentää reaktorin rakennuskustannuksia, kun tarvitaan vähemmän kalliita turvallisuusjärjestelmiä.

Etelä-Afrikkaan aiotaan rakentaa ensimmäinen täysikokoinen PBMR-demonstraatiolaitos. Laitoksen lupakäsittely on parhaillaan menossa. Rakentaminen voi alkaa vuonna 2007, ja reaktori olisi valmis vuonna 2010.

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Rakenne ja toiminta.....</b>	<b>3</b>
2.1	PBMR:n Sähköntuotantoprosessi.....	3
2.2	Polttoainekuulan rakenne.....	4
2.3	Reaktorin sydän ja polttoainekuulien kierrätys .....	5
<b>3</b>	<b>Turvallisuus.....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Taloudellisuus .....</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>PBMR-projektin eteneminen .....</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Yhteenveto ja pohdinnat .....</b>	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>Kirjallisuusviitteet.....</b>	<b>10</b>

# 1 JOHDANTO

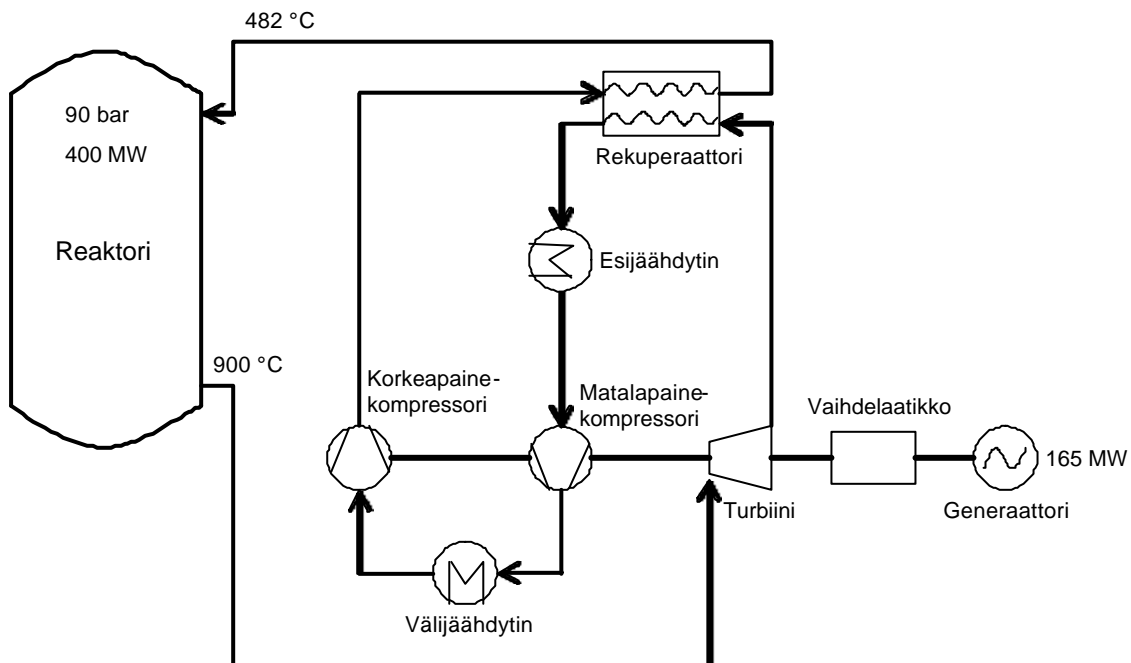
Kuulakekoreaktori (Pebble Bed Modular Reactor, PBMR) on eräs suunnitelluista neljännen sukupolven ydinreaktorityypeistä. Kuulakekoreaktorissa käytetään jäähdytteenä korkeassa lämpötilassa olevaa helium-kaasua ja sähkö tuotetaan kaasuturbiinilla. Neutronien hidastimena eli moderaattorina toimii grafiitti. Kuulakekoreaktorin polttoaine on pieninä uraanidioksidijyväsinä grafiittikuulien sisällä. Nämä kuulat kiertävät jatkuvasti reaktorin läpi: Uusia kuulia syötetään reaktorin yläosaan, kuulat valuvat reaktorin läpi ja niitä poistetaan reaktorin alaosasta.

Jo nykyiset kolmannen sukupolven ydinvoimalat ovat sekä turvallisuuden ja ympäristöhaittojen että sähkön tuotantokustannusten kannalta erittäin kilpailukykyisiä muiden sähköntuotantomuotojen kanssa. Neljännen sukupolven reaktoreiden kehityksen tärkeimpinä tavoitteina on silti vielä parempi turvallisuus ja pienemmät tuotantokustannukset kuin nykyisissä reaktoreissa. Tässä tekstissä kerrotaan kuulakekoreaktorin rakenteesta ja toiminnasta sekä arvioidaan, miten kuulakekoreaktorit täyttävät tiukat turvallisuus- ja taloudellisuustavoitteensa.

## 2 RAKENNE JA TOIMINTA

### 2.1 PBMR:n Sähköntuotantoprosessi

Kuulakekoreaktorin sähköntuotanto perustuu ns. Braytonin sykliin. Laitoksen jäähdytekierto ja tärkeimmät komponentit käyvät ilmi kuvasta 1. Tämä teksti perustuu viimeisimpiin, lähteessä [1] kuvattuihin suunnitelmiin. Reaktorin lämpötehoksi on suunniteltu 400 MW ja sähkötehoksi 165 MW, jolloin hyötysuhteeksi saadaan 41 %.



Kuva 1. PBMR-laitoksen jäähdytekierto ja tärkeimmät komponentit.

Helium-jäähdyte virtaa reaktorin läpi ylhäältä alaspäin ja kuumenee samalla 900 °C:seen. Reaktorista tuleva helium johdetaan turbiiniin, joka pyörittää samalla akselilla olevaa generaattoria sekä kahta kompressoria. Turbiinin kierrosnopeus on sama kuin kompressorien, ja generaattori on liitetty turbiiniin vaihdelaatikon välityksellä. Turbiinin jälkeen heliumista otetaan lämpöä talteen rekuperaattorissa, jonka jälkeen sitä jäähdytetään merivedellä esijäähdyttimessä. Kaksi kompressoria nostaa heliumin paineen takaisin reaktorin käyttöpaineeseen, 90 bariin. Tämän jälkeen heliumin lämpötila nostetaan rekuperaattorissa 482 °C:een, jossa se johdetaan takaisin reaktoriin.

Matala- ja korkeapainekompressorien välissä on välijäähdytin, jossa heliumia jäähdytetään merivedellä. Syy rekuperaattorin ja välijäähdyttimen käyttöön nähdään kaavasta

$$dW = V dp = \frac{nRT}{p} dp. \quad (1)$$

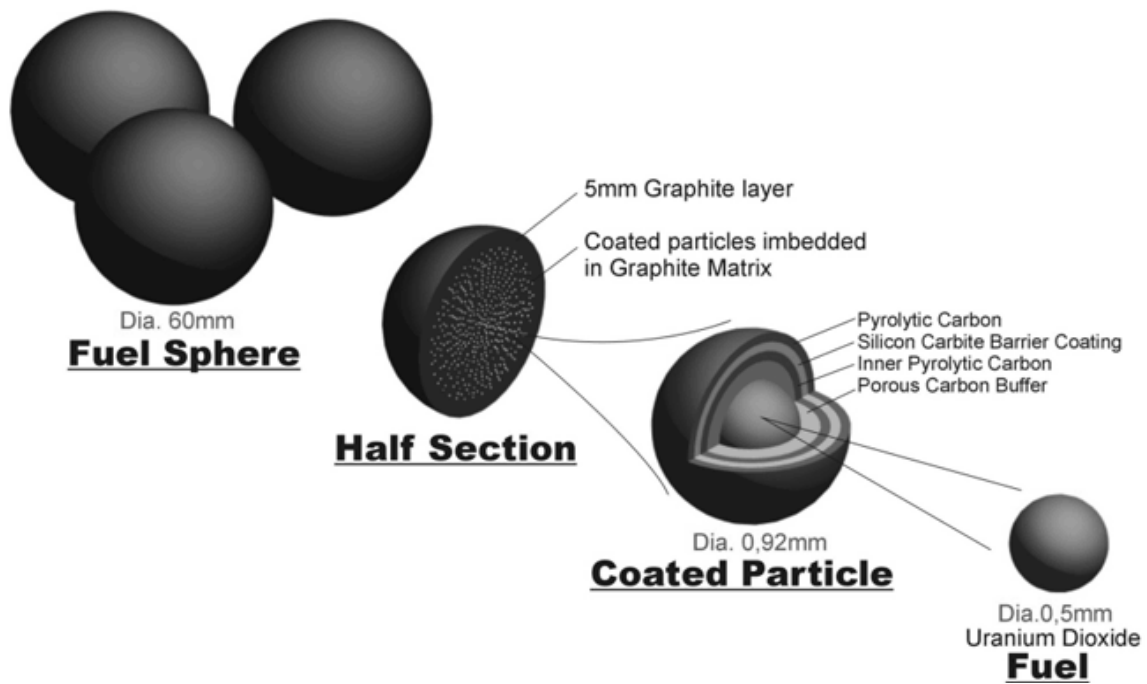
Tässä  $dW$  on kaasun puristukseen tarvittava työ,  $V$  tilavuus,  $dp$  paineen muutos,  $n$  ainemäärä,  $R$  yleinen kaasuvakio,  $T$  lämpötila ja  $p$  paine. Ensimmäinen yhtäsuuruus on kaasun tai nesteen isentrooppiseen puristukseen tarvittava työ. Se kertoo siis minimityön, joka tarvitaan paineen nostamiseen, jos puristus on adiabaattinen (ei lämmönvaihtoa ympäristön kanssa). Toinen yhtäsuuruus taas perustuu ideaalikaasun tilanyhtälöön. Kaavasta (1) nähdään, että kaasun lämpötilan alentaminen rekuperaattorissa ja välijäähdyttimessä pienentää kompressorin kuluttamaa tehoa ja sitä kautta parantaa laitoksen hyötysuhdetta.

Aikaisempien suunnitelmien mukaan molemmat kompressorit ja generaattori olisivat olleet erillisillä, pystysuuntaisilla akseleilla, ja laitoksessa olisi siis ollut kolme turbiinia. Tällöin generaattorin vaihdelaatikkoa ei olisi tarvittu lainkaan. Viimeisimmässä suunnitelmassa [1] on siis siirretty yhden vaakasuuntaisen akselin käyttöön. Tästä on hyötyä erityisesti sellaisessa häiriötilanteessa, jossa generaattorilta häviää kuorma, jolloin vanhan suunnitelman mukainen turbiini olisi saattanut rynnätä ylikerroksille. Uudessa suunnitelmassa samalla akselilla olevat kompressorit hidastavat turbiinin kierrosnopeutta. Vaakasuuntainen akseli helpottaa myös laakerointia, kun voidaan käyttää samanlaista tekniikkaa, joka on jo yleisesti käytössä voimalaitoksilla.

## 2.2 Polttoainekuulan rakenne

Kuulakekoreaktorissa käytetään ns. TRISO-tyyppisiä (triple isotropic layers) polttoainekuulia. Kuulan rakenne on esitetty kuvassa 2. Jokaisessa kuulassa on noin 9 grammaa urania 15 000 uraanidioksidijyvänä [3], halkaisijaltaan 0,5 mm. Uraanin rikastusaste on noin 10 % [4]. Polttoainejyvät on päällystetty huokoisella grafiittikerroksella, joka tarjoaa riittävän tilan fissiotuotekaasuille. Tämän päällä on ohuet kerrokset pyrolyyttista grafiittia, piikarbidia ja uusi kerros pyrolyyttista grafiittia. Piikarbidikerros on tärkein fissiotuotteiden leviämiseste. Päällystetyn partikkelin halkaisija on 0,92 mm. Nämä partikkelit sekoitetaan grafiittijauheeseen ja puristetaan palloksi, joka päällystetään vielä 5 mm:n grafiittikerroksella. Valmiin polttoainekuulan halkaisija on 6 cm.

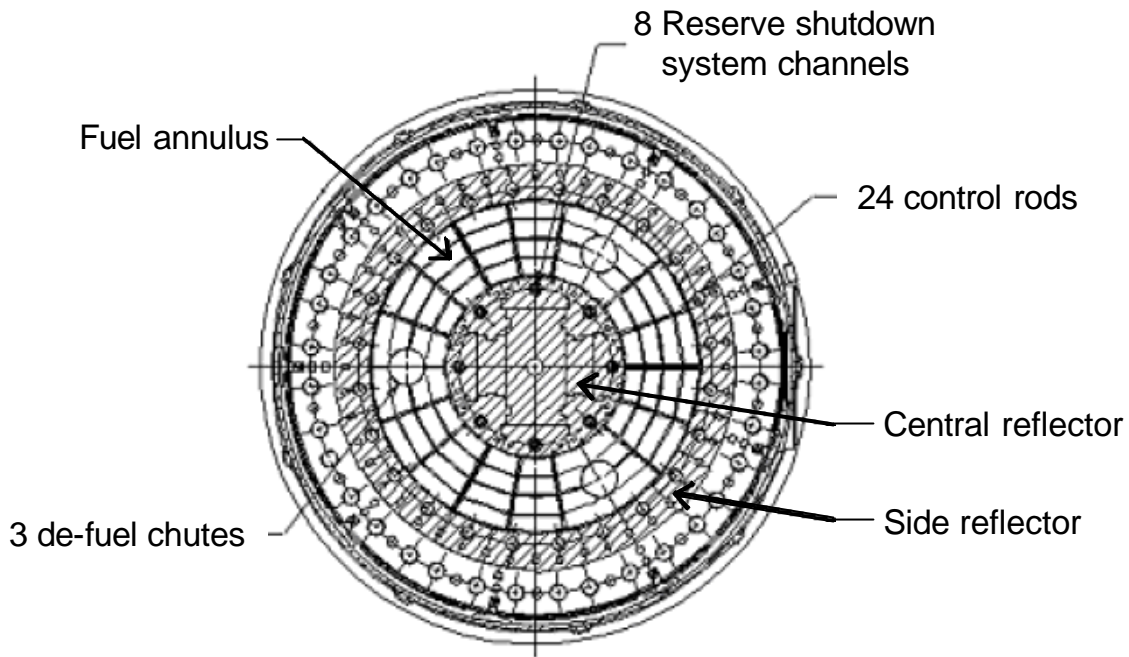
Tällaisia polttoainekuulia on käytetty saksalaisilla laitoksilla ja käyttökokemukset ovat olleet hyvät. Kuula kestää vähintään 1600 °C:n lämpötiloja, ja merkittäviä määriä fissiotuotteita alkaa vapautua vasta 2000 °C:n yläpuolella. Sen sijaan perinteisen kevytvesireaktorin polttoainesauvan zirkonium-suojakuori alkaa hapettua jo 1200 °C:ssa. [5]



Kuva 2. Kuulakekoreaktorin polttoainekuulan rakenne. [2]

### 2.3 Reaktorin sydän ja polttoainekuulien kierrätys

Kuulakekoreaktorin sydämen rakenne on esitetty kuvassa 3. Polttoainekuulat sijaitsevat annulaarisessa eli rengasmaisessa tilassa keskellä olevan grafiittiheijastimen ympärillä. Polttoainerenkaan ympärillä on toinen grafiittiheijastin. Säätosauvat lasketaan tämän sivuheijastimen sisällä oleviin reikiin. Keskiheijastimessa on kanavat säätosauvoista riippumattomalle varasammutusjärjestelmälle, jolla reaktori voidaan sammuttaa pudottamalla booripalloja keskiheijastimen sisään.



Kuva 3. Kuulakekoreaktorin sydän ylhäältäpäin. [2]

Keskiheijastimen suunniteltu halkaisija on 2 m ja polttoainerenkaan leveys 0,85 m. Polttoaineen annulaarinen sijoittelu ja reaktorisydämen erittäin suuri, 11 metrin korkeus antavat sydämelle suuren pinta-alan suhteessa tilavuuteen, mikä helpottaa passiivista jäähdytystä onnettomuustilanteissa [1]. Vertailun vuoksi Olkiluodon 1- ja 2-reaktoreiden sydän on vain 3,68 m korkea [6], vaikka niiden teho on yli kuusinkertainen kuulakekoreaktoriin verrattuna. Reaktorissa on noin 450 000 polttoainekuulaa [4], joten lämpöteho on keskimäärin 0,9 kW/kuula.

Korkeiden lämpötilojen takia reaktorin teräksinen paineastia sekä suojarakennuksen betoniseinä tarvitsevat omat jäähdytysjärjestelmät. Paineastiaa jäähdytetään erillisellä helium-kierrolla (core barrel conditioning system). Paineastian ja suojarakennuksen betoniseinän välissä kulkevat RCCS-järjestelmän (Reactor Cavity Cooling System) vesiputket. Tämä järjestelmä toimii tarvittaessa täysin passiivisesti esimerkiksi sähkökatkoksen aikana. [4]

Kuulakekoreaktorin polttoainekuulia kierrätetään jatkuvasti reaktorin läpi. Reaktorin alaosassa on kolme suppiloa, joiden kautta poistetaan noin 4500 polttoainekuulaa päivässä. Poistettujen kuulien tilalle reaktorin yläosaan syötetään uusia polttoainekuulia. Jokainen kuula kiertää keskimäärin kuusi kertaa reaktorin läpi. Poistettujen kuulien palama määritetään mittaamalla niiden gammasäteilyspektri. Kun haluttu palama on saavutettu, kuula poistetaan käytöstä ja siirretään käytetyn polttoaineen varastoon. Demonstraatiolaitokselle suunniteltu loppupalama on 92 MWd/kg<sub>U</sub>, eli yli kaksinkertainen Suomessa yleisesti käytettävään palamaan 40 MWd/kg<sub>U</sub>. Kuulia liikutellaan pneumaattisesti paineistetun heliumin avulla. [4]

### 3 TURVALLISUUS

Ydinenergian yhteiskunnallisen hyväksyttävyyden parantamiseksi on katsottu tarpeelliseksi edelleen pienentää ydinvoimalaitosten onnettomuuksien todennäköisyyttä ja niiden seurauksia. Hyväksyttävyyden kannalta tärkeää on myös se, että turvallisuus on helposti todettavissa suun-

nitelmistä eikä turvallisuuden varmistamiseksi tarvita monimutkaisia fysiikkaan tai todennäköisyyslaskentaan perustuvia laskelmia. Seuraavassa on lueteltu seikkoja, jotka tekevät kuulakekoreaktorista turvallisemman kuin nykyisin käytössä olevat kevytvesireaktorit:

- Jatkuvan polttoaineen latauksen takia reaktorissa ei ole koskaan suurta ylimääräistä reaktiivisuutta. Tämä pienentää olennaisesti riskiä, että ketjureaktio ”karkaisi käsistä” (reaktiivisuusonnettomuus). Nykyisiin kevytvesireaktoreihin ladataan uutta polttoainetta yleensä kerran vuodessa. Käyttöjakson alussa reaktorissa täytyy olla paljon ylimääräistä reaktiivisuutta kompensoimaan kasvavan palaman aiheuttama reaktiivisuuden pieneneminen. Tämä voi periaatteessa aiheuttaa reaktiivisuusonnettomuuden esimerkiksi säätösauvojen uloslennon tai jäähtytteen booripitoisuuden laimenemisen takia.
- Helium-jäähdye on aina kaasumaisessa muodossa. Tämä poistaa vesijäähdytteen reaktoreiden jäähtytteen faasimuutoksen aiheuttamat riskit, kuten lämmönsiirtokriisin mahdollisuuden sekä nopeisiin painemuutoksiin liittyvät olomuodon muutokset.
- Helium ei juurikaan aktivoitu neutronisäteilyssä. Kemiallisesti passiivisena jalokaasuna se ei myöskään aiheuta korroosiota. Näiden seikkojen ansiosta kuulakekoreaktorin jäähdye on hyvin heikosti radioaktiivista, jolloin jäähdytevedoista laitoksen ulkopuolelle ei aiheudu vaaraa ihmisille. Sen sijaan vesijäähdytteen reaktorin primäärijäähdye on erittäin radioaktiivista, koska vedessä oleva happi aktivoituu neutronisäteilyssä muodostaen beeta-aktiivista typpi-16-isotooppia, jonka puoliintumisaika on 7 sekuntia. Pitempiaikaista jäähdytysveden radioaktiivisuutta taas aiheuttavat primääripiiristä irtoavat korroosiotuotteet, jotka aktivoituvat neutronisäteilyssä.
- Kuulakekoreaktorin polttoainekuulat kestävät yli 1600 °C:een lämpötiloja, ja merkittäviä määriä fissiotuotteita alkaa vapautua vasta 2000 °C:een yläpuolella. Sen sijaan perinteisen kevytvesireaktorin polttoainesauvan zirkonium-suojakuori alkaa hapettua jo 1200 °C:ssa. [5]
- Kuulakekoreaktorilla on suuri pinta-ala suhteessa tilavuuteen ja tehoon, ja paineastian ympärillä ei ole lämpöeristettä. Tämän ansiosta onnettomuustilanteessa reaktorin jälkilämpö poistuu reaktorista täysin passiivisesti johtumalla ja säteilemällä, vaikka mikään aktiivinen jäähdytysjärjestelmä ei toimisi. Reaktorin suuri lämpökapasiteetti hidastaa lämpötilan nousua niin, että polttoaineen maksimilämpötila saavutetaan vasta useita päiviä jäähdytyksen menetyksen jälkeen, jolloin jälkilämpöteho on jo olennaisesti pienempi kuin heti reaktorin pikasulun jälkeen. Tämä antaa myös operaattoreille runsaasti aikaa toimia. [5]
- Reaktorissa syntyvä plutonium ei sovellu ydinasekäyttöön, koska siinä on liikaa plutonium-240-isotooppia suhteessa fissiiliin plutonium-239-isotooppiin [7].

Mm. näiden seikkojen ansiosta lähteen [4] mukaan ei ole löydetty uskottavaa tapahtumaketjua, joka voisi johtaa kuulakekoreaktorin sydämen sulamiseen. On kuitenkin eräs seikka, jota on käsitelty löytämässäni lähteissä hyvin vähän. Grafiitti on palava aine. Jos reaktoriin pääsisi suuri määrä ilmaa, grafiitti voisi syttyä palamaan, ja tällöin ympäristöön voisi vapautua huomattava määrä radioaktiivisia aineita.

## 4 TALOUDELLISUUS

Turvallisuuden lisäksi neljännen sukupolven reaktorien suunnittelussa keskeinen tavoite on sähkön tuotantokustannusten alentaminen verrattuna nykyisiin reaktoreihin ja muihin kilpaileviin energiantuotantotapoihin. Merkittävä kustannuksiin vaikuttava tekijä on voimalaitoksen hyötysuhde. PBMR-demonstraatiolaitoksen hyötysuhteeksi on suunniteltu noin 41 % [1], ja tätä pyritään nostamaan laitoksen jatkokehityksessä. Olkiluotoon rakennettavan EPR-laitoksen hyötysuhde on noin 37 % [8]. PBMR:n parempi hyötysuhde johtuu korkeammasta lämpötilasta. Periaatteessa 900 °C:een lämpötilalla voitaisiin saavuttaa selvästi korkeampikin hyötysuhde, mutta PBMR-laitoksessa hyötysuhdetta rajoittavat ilmeisesti suuret lämpöhäviöt eristämättömästä ja suuripinta-alaisesta paineastiasta

Toinen tärkeä kustannuksiin vaikuttava tekijä on laitoksen käyttökerroin. Maailman ydinvoimalaitosten keskimääräinen käyttökerroin on nykyään noin 84 %, ja Olkiluodon laitosyksiköiden keskimääräinen käyttökerroin viimeisten kymmenen vuoden ajalta on yli 95 % [9]. PBMR-laitoksen käyttökertoimelle on asetettu tavoitteeksi 95 %. Viiden prosentin seisokkijajasta puolet on suunniteltuja huoltoseisokkeja ja puolet odottamattomia seisokkeja. Korkeiden käyttökertoimien saavuttamista helpottaa se, että jatkuvan polttoaineen latauksen ansiosta polttoainevaihtoseisokkeja ei tarvita lainkaan. PBMR-laitokselle on suunniteltu huoltoseisokki vain joka kuudes vuosi turbiinin ja kompressoreiden huoltoa varten. Lisäksi koska grafiitin käyttöikänsä voimakkaassa neutronisäteilyssä liittyy epävarmuuksia, niin on varauduttu pidempään huoltoseisokkiin joka 24. vuosi keskiheijastimen vaihtamista varten. [4]

PBMR-laitoksen kustannuksia pienentää merkittävästi se, että reaktorin luontaisten turvallisuusominaisuuksien ansiosta ei tarvita yhtä kalliita turvallisuusjärjestelmiä kuin nykyisissä reaktoreissa. Lisäksi reaktorin pienemmän tehon ansiosta yhden kuulakekoreaktorin rakennuskustannukset ovat paljon pienemmät kuin yhden suuren kevytvesireaktorin, jolloin rahoitus on helpompi järjestää ja rakentajan ei tarvitse ottaa niin suurta taloudellista riskiä. Kuulakekoreaktoreiden pieni koko mahdollistaa tuotantotehon kasvattamisen pienissä osissa sähkönkulutuksen kasvun mukaan. Tulevaisuudessa kustannuksia voidaan alentaa myös rakentamalla suuri määrä samanlaisia kuulakekoreaktoreita ”sarjatuotantona”. Tällöin voimalaitoksen rakennusaika voisi olla kaksi vuotta [10], kun Olkiluodon kolmosreaktoria rakennetaan suunnitelman mukaan neljä vuotta.

## 5 PBMR-PROJEKTIN ETENEMINEN

Maailman ensimmäinen kuulakekolaitos oli Saksassa 1966–1987 toiminut AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor). Sen sydäntä jäähdytettiin heliumilla, josta lämpö siirrettiin veteen, joka pyöritti höyryturbiinia. Laitoksen sähköteho oli 15 MW. Vuosina 1985–1991 Saksassa toimi suurempi THTR (Thorium High Temperature Reactor). Tämä laitos tuotti höyryturbiinilla sähköä 296 MW. Näillä laitoksilla tutkittiin erityisesti kuulakekoreaktorin turvallisuuteen liittyviä asioita. AVR:llä tehtiin mm. koe, jossa pysäytettiin jäähdytevirtaus reaktorin läpi ja annettiin säätösauvojen dila ulkona reaktorista. Reaktori sammui itsestään muutamassa minuutissa, ja polttoaine ei kärsinyt merkittäviä vaurioita [11]. Kiinassa käynnistettiin vuonna 2000 kuulakekomallinen tutkimusreaktori HTR-10. Sen lämpöteho on 10 MW ja se käyttää Braytonin sykliä. [3]

PBMR-laitoskonseptia kehittää PBMR-niminen yhtiö, jonka omistavat British Nuclear Fuels (BNFL, Westinghousen omistaja), eteläafrikkalainen sähköyhtiö Eskom sekä Industrial Development Corporation of South Africa [10]. Eskom aikoo rakentaa ensimmäisen täysikokoisen PBMR-demonstraatiolaitoksen Koebergiin Etelä-Afrikkaan. Laitoksen ympäristö- ja rakentamislupien käsittely on parhaillaan menossa, ja rakentaminen voisi alkaa vuonna 2007 [1]. Projektin aikataulu on viivästynyt jo moneen kertaan, mutta nykyisellä aikataululla reaktori voisi olla valmis ehkä vuonna 2010, ja ensimmäisiä kaupallisia kuulakekoreaktoreita alettaisiin rakentaa vuoden 2013 tienoilla [10].

Ensimmäisten toimivien laitosten jälkeen kuulakekoreaktorin tekniikkaa aiotaan kehittää eteenpäin. Eräs tutkittava asia on grafiittiheijastimen kesto voimakkaassa neutronisäteilyssä, jotta keskiheijastin saataisiin kestäväksi koko laitoksen eliniän. Jäähdytteen ulostulolämpötilaa aiotaan kasvattaa 1200 °C:seen, reaktorin lämpötehoa 600 megawattiin ja sähkötehoa 300 megawattiin. Tällöin hyötysuhde siis paranisi 50 %:iin. Lämpötilan nosto vaatii uusia materiaaleja, esimerkiksi hiilikuitua, kuuman haaran jäähdyteputkiin ja turbiinin siipiin. Lisäksi vedyn tuotanto on yhteinen tavoite kaikille korkealämpötilareaktoreille. [1]

## 6 YHTEENVETO JA POHDINNAT

Kuulakekoreaktori on suunnitelluista neljännen sukupolven reaktorityypeistä lähimpänä toteutumista. Suunnitelmien perusteella PBMR vaikuttaa sekä talouden että turvallisuuden kannalta paremmalta kuin nykyiset kolmannen sukupolven kevytvesireaktorit. Täytyy kuitenkin muistaa, että kuulakekoreaktorin turvallisuuskysymyksiä on tutkittu paljon vähemmän kuin kevytvesireaktoreiden turvallisuutta. Tarkemmissa tutkimuksissa ja käyttökokemusten kertyessä saattaa tulla esiin seikkoja, joita ei ole tähän mennessä keksitty. Eräs vaikeasti eliminoitava riski on grafiitin syttyminen palamaan. Myös polttoainekuulien käsittelyjärjestelmän toimivuus teettäisi varmasti vielä paljon työtä.

Nykyiset ydinvoimaloiden turvallisuusvaatimukset on kirjoitettu kevytvesireaktoreita varten. Yleiset turvallisuusperiaatteet soveltuvat käytettäväksi myös kuulakekoreaktoreissa, mutta tarkemmat vaatimukset ja ohjeet täytyy kirjoittaa suurelta osalta uudestaan uuden sukupolven reaktoreita varten. Samalla täytyy miettiä, kuinka paljon turvallisuusjärjestelmiä voidaan vähentää ja luottaa luontaisiin ja passiivisiin turvallisuusominaisuuksiin. Ydinvoimalaitoksen riskit johtuvat pohjimmiltaan siitä, että reaktorissa on suuri määrä radioaktiivisia aineita, joiden leviäminen ympäristöön olisi vaarallista. Tätä seikkaa ei mikään fissioreaktori pysty välttämään, ja sen takia kaikkentyyppisten reaktorien turvallisuus vaatii huolellisuutta sekä suunnittelussa että käytössä.

Uuden laitostyyppin kehittäminen on aina suuri taloudellinen riski. Kuulakekoreaktorin kehittäjät ovat onneksi ottaneet tämän riskin, ja on mielenkiintoista seurata, miten projekti etenee. Jos uusi reaktori toimii hyvin, kuulakekoreaktoreilla voidaan ehkä reilun vuosikymmenen kuluttua alkaa korvata käyttöikänsä päähän tulevia kevytvesireaktoreita myös Suomessa. Kehitysmäiden kannalta luontaisesti turvallinen ja pieninä yksiköinä rakennettava reaktorityyppi on erityisen kiinnostava.

## 7 KIRJALLISUUSVIITTEET

- [1] **Matzner, D.** *PBMR Project Status and the Way Ahead*. 2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Beijing, China, September 22–24, 2004, Paper A04, 13 s.  
[http://www.iaea.org/inis/aws/htgr/fulltext/htr2004\\_a04.pdf](http://www.iaea.org/inis/aws/htgr/fulltext/htr2004_a04.pdf)
- [2] **Ion, S.; Nicholls, D.; Matzie, R.; Matzner, D.** *Pebble Bed Modular Reactor The First Generation IV Reactor To Be Constructed*. World Nuclear Association Annual Symposium 2003. <http://www.world-nuclear.org/sym/2003/matzie.htm>
- [3] **Poikolainen, J.** *Kuulakekoreaktorin sähköntuotantokustannusten arviointi*. Espoo: VTT Prosessit, 2003. 74 s. (Projektiraportti PRO1/P7003/03).  
<http://www.vtt.fi/pro/pro1/kuulakekoraportti.pdf>
- [4] **Koster, A.; Matzie, R.; Matzner, D.** *Pebble-bed modular reactor: a generation IV high-temperature gas-cooled reactor*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy, 2004. Vol. 218, nro 5, s. 309–318. ISSN 0957-6509.
- [5] **International Atomic Energy Agency.** *Considerations in the development of safety requirements for innovative reactors: Application to modular high temperature gas cooled reactors*. Vienna, Austria, 2003. 60 s. (IAEA-TECDOC-1366). ISBN 92-0-107203-1. ISSN 1011-4289.  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1366\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1366_web.pdf)
- [6] **Teollisuuden Voima Oy.** *Olkiluoto, Ydinvoimalaitosyksiköt Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2*, Tekninen esite, 44 s., 2000. <http://www.tvo.fi/uploads/g3c2fu.pdf>
- [7] **Slabber, J.** *Pebble Fuel Advantages*. 2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Beijing, China, September 22–24, 2004, Paper B15, 7 s. [http://www.iaea.org/inis/aws/htgr/fulltext/htr2004\\_b15.pdf](http://www.iaea.org/inis/aws/htgr/fulltext/htr2004_b15.pdf)
- [8] **Teollisuuden Voima Oy.** *Laitosyksikön teknisiä tietoja*.  
<http://www.tvo.fi/637.htm> (2.4.2005)
- [9] **Teollisuuden Voima Oy.** *Tuotanto*. <http://www.tvo.fi/408.htm> (2.4.2005)
- [10] **Pebble Bed Modular Reactor (Pty.) Ltd.** <https://www.pbmr.com> (2.4.2005)
- [11] **Ferreira, T.** *South Africa's nuclear model*. IAEA Bulletin, 2004. Vol. 46, nro 1, s. 48-50. ISSN 0020-6067.  
<http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull461/bull461.pdf>