

FY 8: Ydinvoimalat

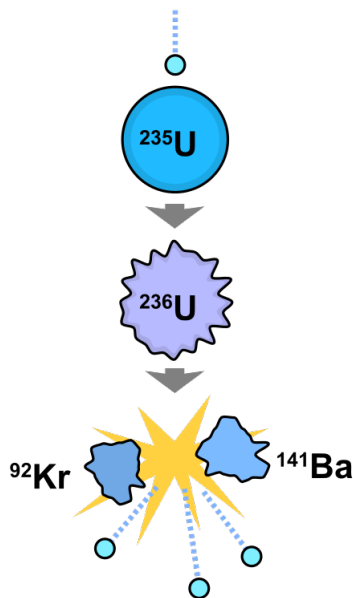
Tapio Hansson

Ydinvoimalaitokset

- ▶ Ydinvoimalaitoksissa pyritään tuottamaan lämpöä ydinreaktion avulla.
- ▶ Nykyisin käytössä on ainoastaan fissioon perustuvia voimalaitoksia.
- ▶ Fuusiovoimaloita kehitetään kaiken aikaa ja prototyypppejä on jo käytössä.
- ▶ Fissioydinvoima kuormittaa ilmastoa hyvin vähän, sillä itse energian tuotanto on puhdasta. Haasteet ovat uraanin louhinnassa ja radioaktiivisen jätteen käsittelyssä.
- ▶ Fuusiovoimalaitos on vielä puhtaampi, sillä polttoainetta ei tarvitse louhia, eikä lopputuotteena synny mitään radioaktiivista.

Fissio

- ▶ Fissiovoimalan energia on suurimmaksi osaksi peräisin $^{235}_{92}\text{U}$ -ytimen fissioreaktiosta.
- ▶ Reaktio syntyy vapaan neutronin osuessa ytimeen.
- ▶ Reaktiosta syntyy kolme uutta vapaata neutronia, mikä mahdollistaa *ketjureaktion*, jota sopivasti hillitsemällä voidaan ylläpitää tasaista energian tuotantoa.



Fissiovoimala

- ▶ Tyypillisen voimalan toimintakaavio:
<http://www.fennovoima.fi/userData/fennovoima/ydinvoima/laitosten-toimintakaaviot.jpg>.
- ▶ Ydinreaktiolla lämmitetään vettä, joka voimalatyypistä riippuen joko ohjataan turbiinille, tai lämmittämään sekundaarista vesikiertoa, joka pyörittää turvbiinia.
- ▶ Turbiinin jälkeen höyry ohjataan lauhduttimeen, joka jäähdytetään esimerkiksi merivedellä. Lauhdevesi ei ole missään kosketuksessa radioaktiivista ainesta sisältävän kierron kanssa.

Voimalaitoksia

- ▶ Suomessa on tällä hetkellä neljä energiantuotantokäytössä olevaa reaktoria, joista kaksi on Loviisassa ja kaksi on Olkiluodossa. Olkiluotoon on rakennettu kolmatta jo uskomattoman kauan (aloitettu 2005) ja Pyhäjoelle ollaan alkamassa rakentamaan uutta voimalaa.
- ▶ Olkiluodon kaksi reaktoria ovat *kiehutusvesireaktoreita* ja kolmas, sekä molemmat Loviisan reaktorit ovat *painevesireaktoreita*.
- ▶ Suomen sähkönkulutuksesta n. 27% katetaan ydinvoimalla (2013).
- ▶ Maailman sähkönkulutuksesta hieman yli 10% tuotetaan ydinvoimalla. Selvästi suurin osa, n. 40 % tuotetaan hiilen ja turpeen poltolla (IEA 2012).

Olkiluoto

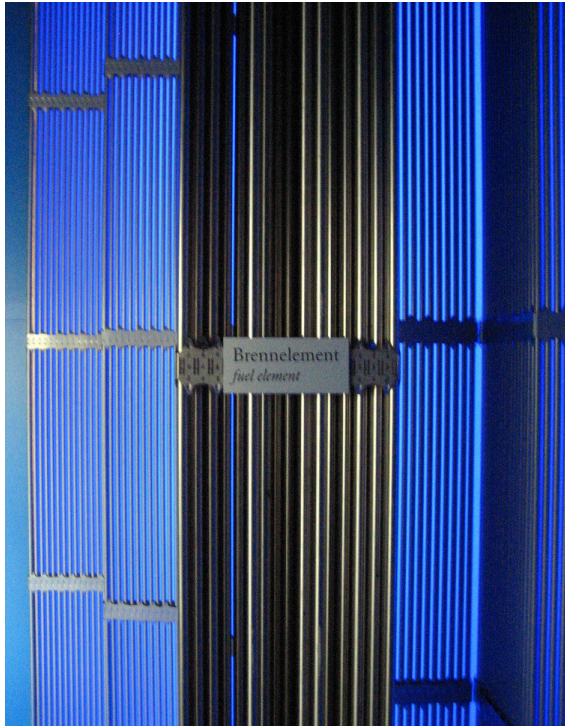


kuva: Teollisuuden voima Oy:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EPR_OLK3_TV0_fotomont_2_Vogelperspektive.jpg

Polttoainekierto

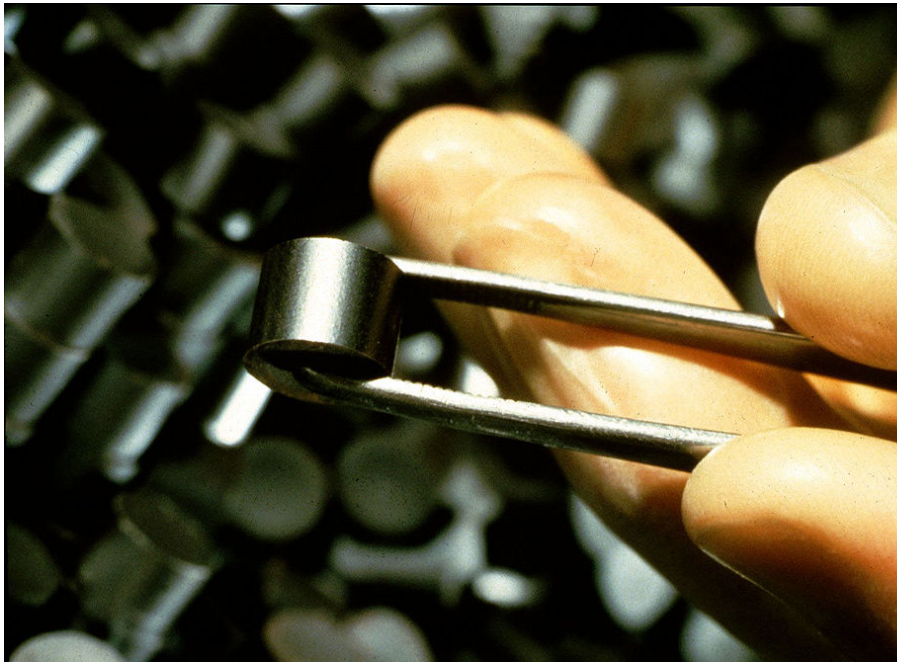
- ▶ Uraania louhitaan kaivoksista ympäri maailmaa.
- ▶ Luonnonuraanista n. 0.7% on käyttökelpoista ^{235}U isotooppia, mutta toimiakseen reaktori tarvitsee n. 3-5% osuuden.
- ▶ Uraani rikastetaan jauhamalla ja liuottamalla sopivaksi.
- ▶ Energiatiheys on suuri, hiilikaivostoimintaa tarvitaan n. 500 kertaa enemmän samaan energiamäärään nähden.
- ▶ Rikastettu uraani tiivistetään keraamisiksi pelleteiksi, jotka työnnetään zirkonium-putkiin. Putket niputetaan ja laitetaan reaktoriin.



Brennelement
fuel element



kuva: RIA Novosti: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RIAN_archive_132603_Nuclear_power_reactor_fuel_assembly.jpg



kuva: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fuel_Pellet.jpg

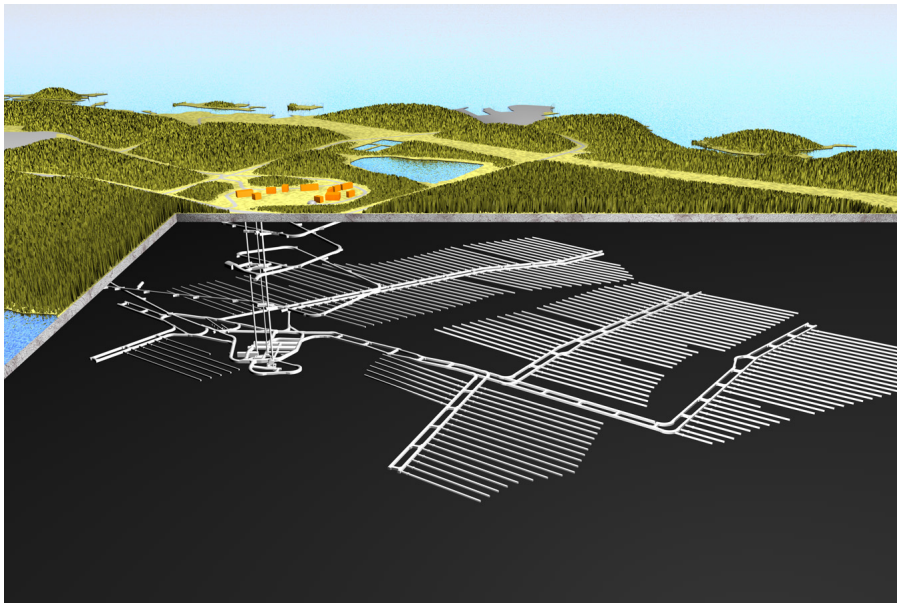
Jätteen käsittely

- ▶ Polttoainesauva on yleensä käytössä useita vuosia, kunnes sen U-235-pitoisuus laskee selvästi alle prosenttiin.
- ▶ Tuore ydinjäte on hyvin aktiivista ja kuumenee, joten aluksi se siirretään reaktorin lähellä olevaan vesialtaaseen. Ensimmäisen vuoden aikana aktiivisuus laskee alle sadasosaan alkuperäisestä.
- ▶ Kaikenkaikkiaan sauvoja jäähdytetään vedessä n. 40-60 vuotta.
- ▶ Jälleenkäsittelyllä n. 95% polttoaineesta voitaisiin saada uusiokäyttöön, mutta käsittely on kallista, joten sitä ei tehdä Suomessa.
- ▶ Vastaavasti Suomi on edelläkävijä ydinjätteen loppusijoituksessa.

Loppusijoitus

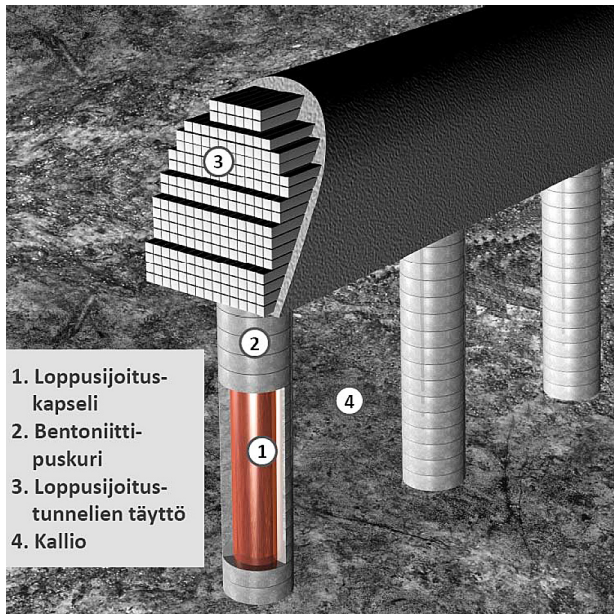
- ▶ Jätettä ei voi kierrättää uusiokäyttöön ikuisesti, joten joka tapauksessa se on joskus sijoitettava johonkin.
- ▶ Geologinen loppusijoitus on ratkaisu, jossa jätteet sijoitetaan syvälle maanpinnan alle.
- ▶ Suomessa on tällä hetkellä pisimmälle edennyt ratkaisu: ONKALO.
- ▶ Koloa on kaivettu jo vuosia ja 2015 Posiva sai loppusijoituslaitoksen rakentamisluvan. Käyttölupa haetaan 2020 ja sijoittaminen aloitetaan 2020-luvulla.
- ▶ Pitkät jäähdytysajat tekevät loppusijoituksesta pitkän prosessin, joka on tarkoitus lopettaa 2100-luvun alkupuoliskolla.
- ▶ Jätteen aktiivisuuden aikaskaala: http://www.posiva.fi/files/3999/sateilyn_vaheneminen_2015_3.jpg

ONKALO



kuva: Posiva Oy

Moniesteperiaate



kuva: Posiva Oy

Loppusijoituskapseli



kuva: Posiva Oy

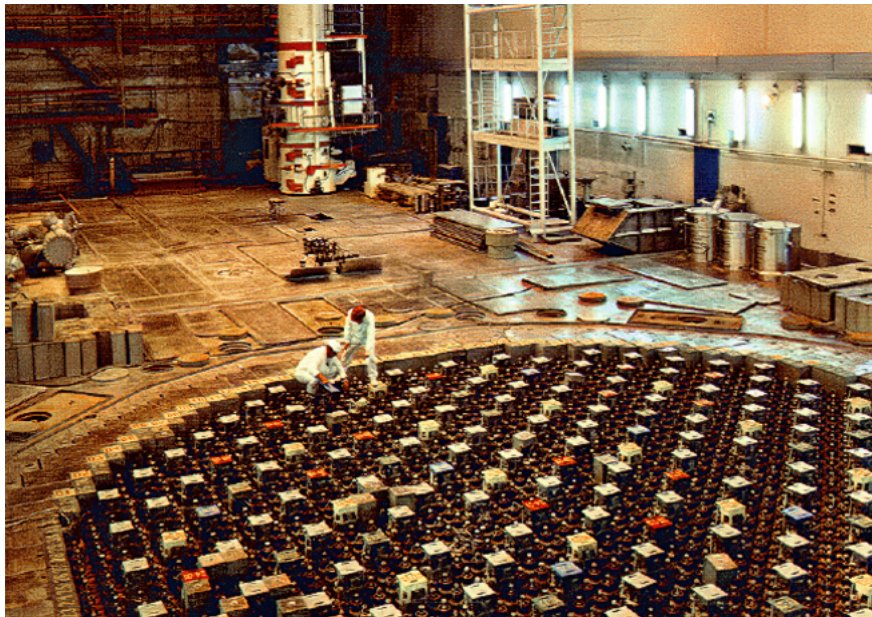
Loppusijoitus

- ▶ Loppusijoitus perustuu moniesteperiaatteeseen, jonka ensimmäinen vaihe on uraanipelletin rakenne. zirkonium-putki tarjoaa toisen suojan, ja vahva kuparikapselointi kolmannen. Kapselit laitetaan tunneliin, jossa seuraava eriste on täyteaine ja viimeinen vaihe luonnollisesti peruskallio.
- ▶ Säteilyä ei pääse juuri edes kuparikapselin ulkopuolelle ja pari metriä kalliota riittää pysäyttämään sen kokonaan.
- ▶ Jäte ei siis säteile pois loppusijoituspaikasta, vaan teoreettinen riski on sille, että kapselointi särkyy ja aine pääsee vuotamaan esimerkiksi pohjaveteen.
- ▶ Lisäksi jäte on aktiivista vielä tuhansia vuosia, joten tulevien sukupolvien toiminta sen suhteen on mahdotonta ennustaa.

Tšernobylin onnettomuus 1986

- ▶ Historian pahin ydinvoimalaonnettomuus.
- ▶ Räjähäntynyt reaktori oli rbmk-tyyppinen grafiittihidasteinen reaktori, joka on halpa ja "helppo" rakentaa.
- ▶ Reaktoria on valmistettu vain neuvostoliitossa, eikä sielläkään enää onnettomuuden jälkeen.
- ▶ Grafiitti on huono hidasteaine, sillä se syttyy helposti tuleen, eikä säätösauvojen lasku alkuun hillitse ketjureaktiota.
- ▶ Kyseinen reaktorityyppi oli suunniteltu osittain myös ydinasekehitykseen, ja sen toiminta oli tunnetusti epävakaa.

RBMK-reaktori



kuva: public domain

Tšernobylin onnettomuus 1986

- ▶ Reaktorin turvajärjestelmät oli kytketty kokeen vuoksi pois päältä.
- ▶ Grafiitti syttyi tuleen, ja levitti useita päiviä radioaktiivista ainesta savun mukana ympäristöön, koska reaktorista puuttui ilmatiivis kansi.
- ▶ Neuvostoliitto ei tiedottanut asiasta lainkaan.
- ▶ Säteilytasojen kasvu havaittiin ensin Ruotsissa, ja kesti pitkään, ennen kuin Neuvostoliitosta saatiin tiedotus asiasta.
- ▶ Onnettomuuden vaikutukset Suomessa ovat hyvin pienet, mutta tarkoilla mittareilla aktiivisuuden kasvu on voitu havaita.
- ▶ Paikalliset vaikutukset Tšernobylin ja Pripjatin alueella sen sijaan ovat toista luokkaa. Kuvia: <http://www.telegraph.co.uk/travel/picturegalleries/8776991/Photographs-of-Chernobyl-and-the-ghost-town-of-Pripyat.html?image=8>

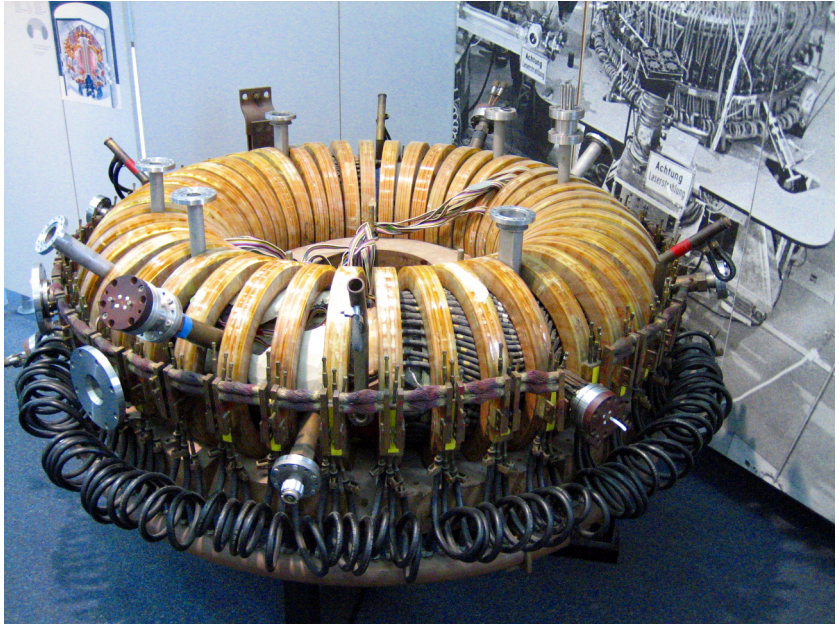
Fuusioreaktori

- ▶ Fuusioydinvoimasta puuttuvat käytännössä kaikki fissioydinvoimalan ongelmat.
- ▶ Fuusion ongelma on se, että se saadaan käyttöön vasta 10 vuoden päästä.
- ▶ Tällä hetkellä kehitettävien fuusiovoimaloiden perusideana on niinkutsuttu TOKAMAK (toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami — toroidal chamber with magnetic coils.)
- ▶ Tokamakia hieman teoreettisesti kehittyneempi malli on stellaraattori, jonka perusidea on kuitenkin sama.
- ▶ Fuusiossa vapautuvat neutronit ja protonit muuntavat reaktorin rakenteita hiljalleen hieman radioaktiivisiksi, mikä aiheuttaa myös fuusiovoimaloiden rakenteista hitusen ydinjätettä. Käytännössä siitä ei kuitenkaan muodosta ongelmaa.

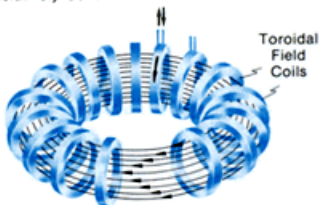
Tokamak

- ▶ Fuusioon tarvitaan valtava lämpötila jolloin aine on kaikki plasmana.
- ▶ Plasman hallinta on hankalaa, sillä mitkään rakenteet eivät kestä sen lämpötiloja.
- ▶ Tokamakissa plasmaa pyritään hallitsemaan suprajohtavilla magneeteilla, jotka ohjaavat plasman ympyräradalle.
- ▶ Plasma on miljoonien asteiden lämpötilassa, joten sen hallitseminen on haastavaa.
- ▶ Stellaraattori on toimintaperiaatteeltaan samanlainen, mutta magneettien muotoa on pyritty optimoimaan ympyrää paremmaksi.

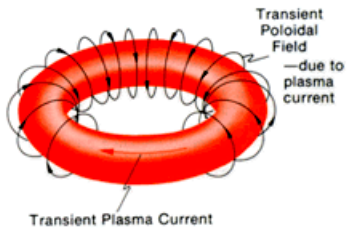
Tokamak



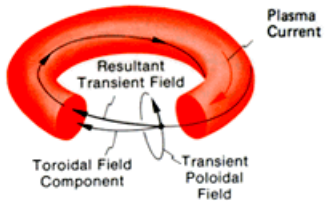
Relatively Constant Electric Current



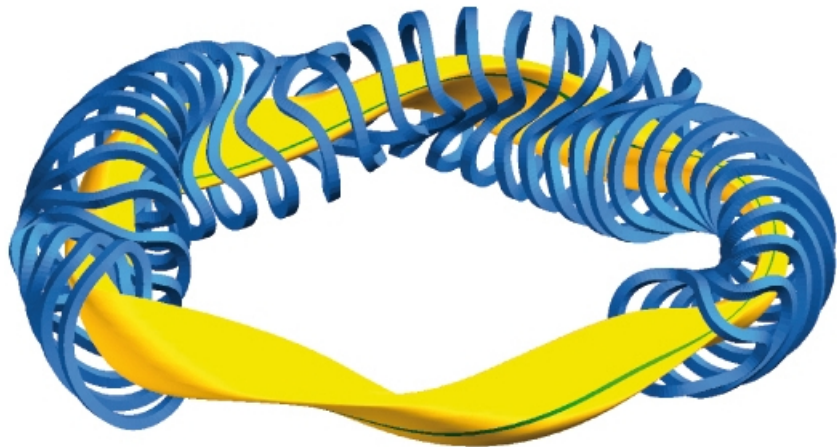
Constant Toroidal Field



Transient Plasma Current



Stellaraattori



kuva: Max-Planck Institut für Plasmaphysik

ITER

- ▶ Tämän hetken suurin mielenkiinto fuusiotutkimuksessa kohdistuu ITERiin, joka on Ranskaan rakenteilla oleva valtava Tokamak.
- ▶ Tavoitteena on saada positiivinen hyötysuhde pitkäksi aikaa.
- ▶ Nykyisen aikataulun mukaan reaktorin pitäisi käynnistyä 2020.
- ▶ Projektin valmistelusta on sovittu Yhdysvaltojen ja Neuvostoliiton välillä jo 1985, mutta varsinainen suunnittelu on aloitettu 2006.
- ▶ Laitteella ei tuoteta sähköä, vaan sitä käytetään prototyypinä.

