

FY8 Ydinvoimalat

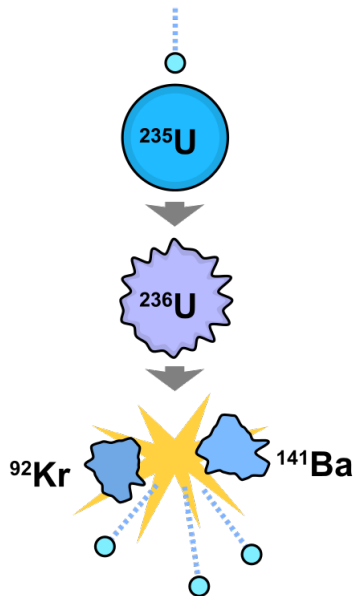
Tapio Hansson

Ydinvoimalaitokset

- ▶ Ydinvoimalaitoksissa pyritään tuottamaan lämpöä ydinreaktion avulla.
- ▶ Nykyisin energiantuotantokäytössä on ainoastaan fissioon perustuvia voimalaitoksia.
- ▶ Fuusiovoimaloita kehitetään kaiken aikaa ja prototyyppejä on jo testikäytössä.
- ▶ 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.

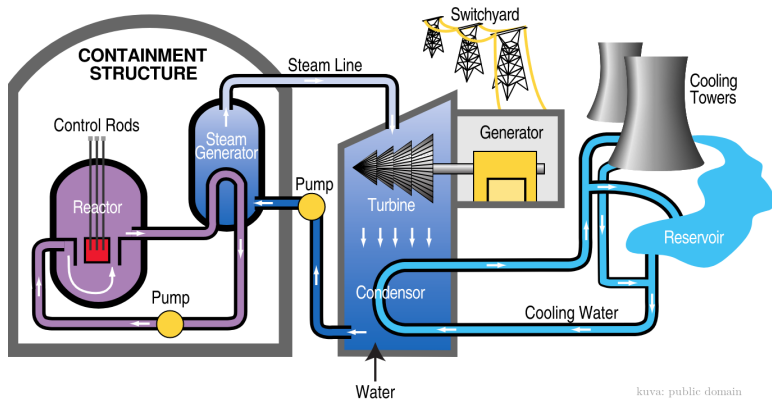
Fissio

- ▶ 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

- ▶ 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 viisi energiantuotantokäytössä olevaa reaktoria, joista kaksi on Loviisassa ja kolme on Olkiluodossa. Olkiluoto3 valmistui lopulta yli 20 vuoden rakentamisen jälkeen. ~~Pyhäjoelle ollaan rakentamassa uutta voimalaa.~~
- ▶ Olkiluodon kaksi reaktoria ovat *kiehutusvesireaktoreita* ja kolmas, sekä molemmat Loviisan reaktorit ovat *painevesireaktoreita*.
- ▶ Suomen sähkönkulutuksesta n. 30% katetaan ydinvoimalla (2022).
- ▶ Maailman sähkönkulutuksesta hieman alle 10% tuotetaan ydinvoimalla. Selvästi suurin osa, n. 35 % tuotetaan hiilen ja turpeen poltolla (Statistical Review of World Energy 2023).

Olkiluoto

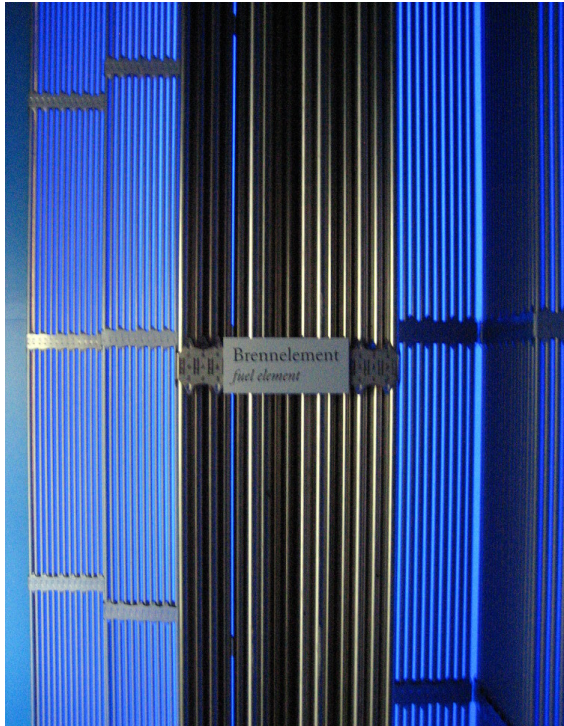


kuva: Teollisuuden voima Oy:

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 $^{235}_{92}\text{U}$ isotooppia, mutta toimiakseen reaktori tarvitsee n. 3-5% osuuden.
- ▶ Uraanin 235-isotooppipitoisuutta kasvatetaan *väkevöimällä*.
- ▶ Väkevöinti voi tapahtua esim. diffuusion, massaspektrometrian tai sentrifugin avulla.
- ▶ Energiatiheys on suuri, hiilikaivostoimintaa tarvitaan n. 500 kertaa enemmän samaan energiamäärään nähden.
- ▶ Väkevöity uraani tiivistetään keraamisiksi pelleteiksi, jotka työnnetään zirkonium-putkiin. Putket niputetaan ja laitetaan reaktoriin.

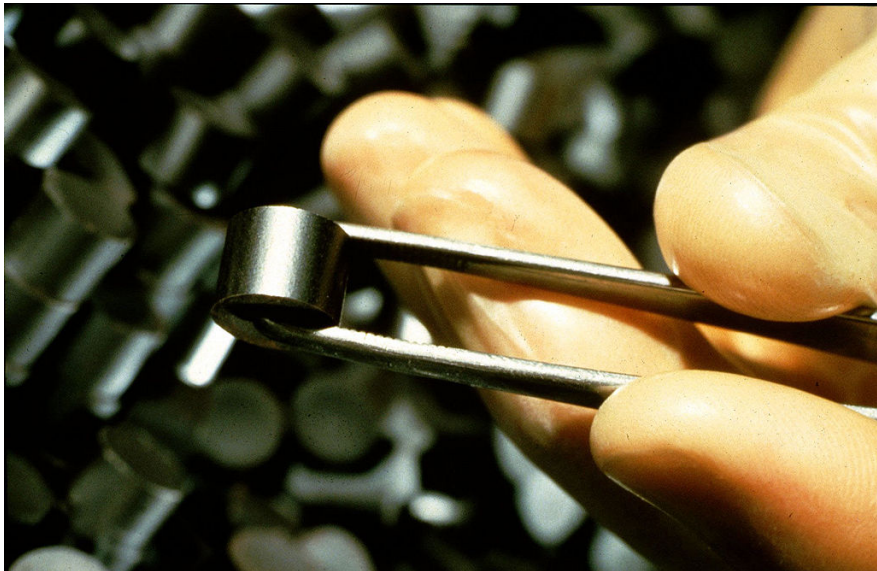


Polttoainesauvat



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

Uraanipelletti



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

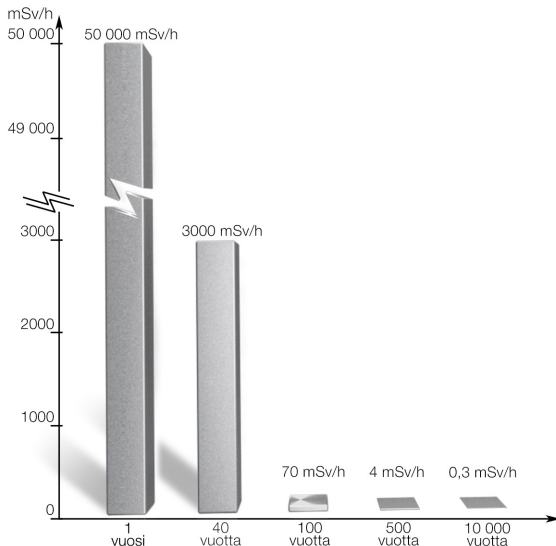
Jätteen käsittely

- ▶ 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 maailmassa pisimmälle edennyt ratkaisu: ONKALO.
- ▶ Koloa on kaivettu jo vuosia ja 2015 Posiva sai loppusijoituslaitoksen rakentamisluvan. Käyttölupa haetaan 2020 ja sijoittaminen tarkoitus aloittaa 2025.
- ▶ Tunneleita kaivettu jo (2023) n. 10 km ja 40 km kaivetaan lisää loppusijoittamisen aikana.
- ▶ Pitkät jäähdytysajat tekevät loppusijoituksesta pitkän prosessin, joka on tarkoitus lopettaa 2100-luvun alkupuoliskolla.

Aktiivisuuden aikaskaala



1 vuosi / 50 000 mSv/h:

Käytöstä poistetun poltto-
ainenipun säteilytaso pienenee
vuodessa lähes sadasosaan.

40 vuotta / 3 000 mSv/h:

1 000 mSv aiheuttaa äkillisesti
saatuna säteily sairauden ja
8 000 mSv kuoleman.

100 vuotta / 70 mSv/h:

Säteilytyössä työntekijän
annosraja viidessä vuodessa
on 100 mSv.

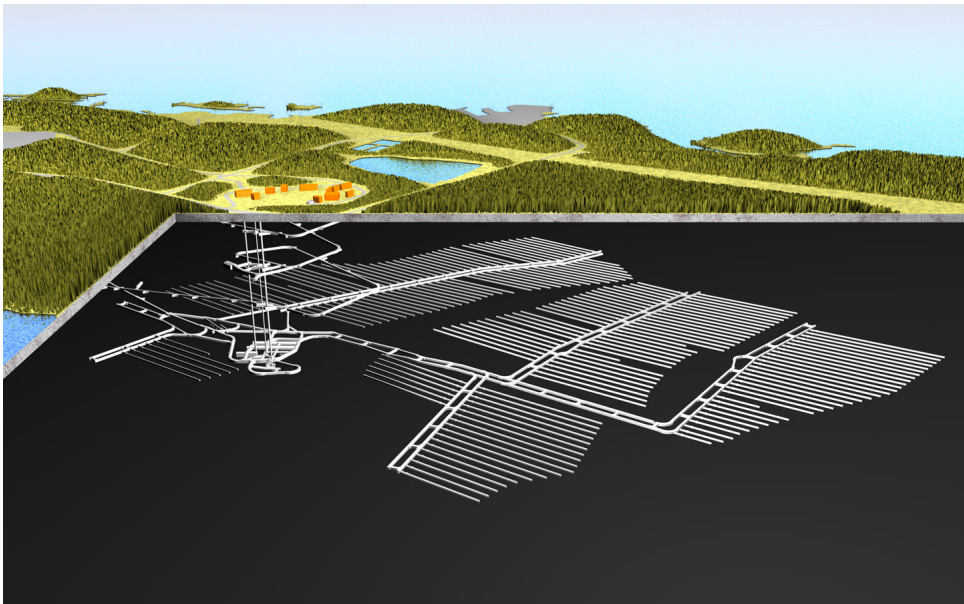
500 vuotta / 4 mSv/h:

Suomalaisen keskimääräinen
säteilyannos on noin 4 mSv
vuodessa.

10 000 vuotta / 0,3 mSv/h:

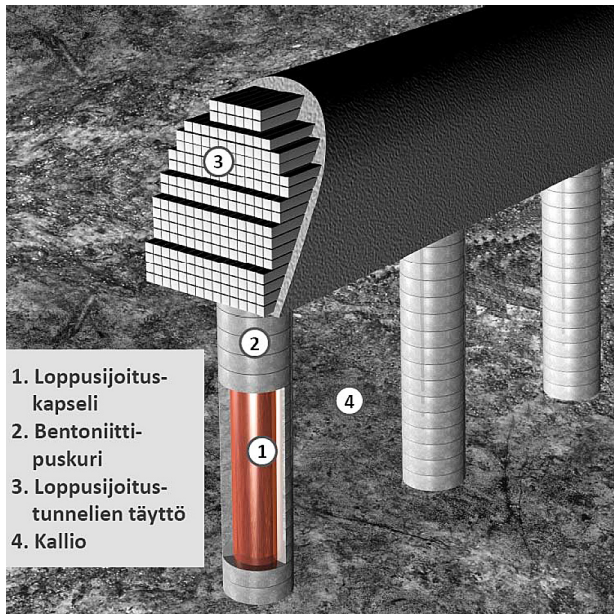
Mammografia-röntgen-
tutkimuksen säteilyannos
on noin 0,3 mSv.

ONKALO



kuva: Posiva Oy

Moniesteperiaate



kuva: Posiva Oy

Loppusijoituskapseli



kuva: Posiva Oy

Loppusijoitus

- ▶ Loppusijoitus perustuu moniasteperiaatteeseen, 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>

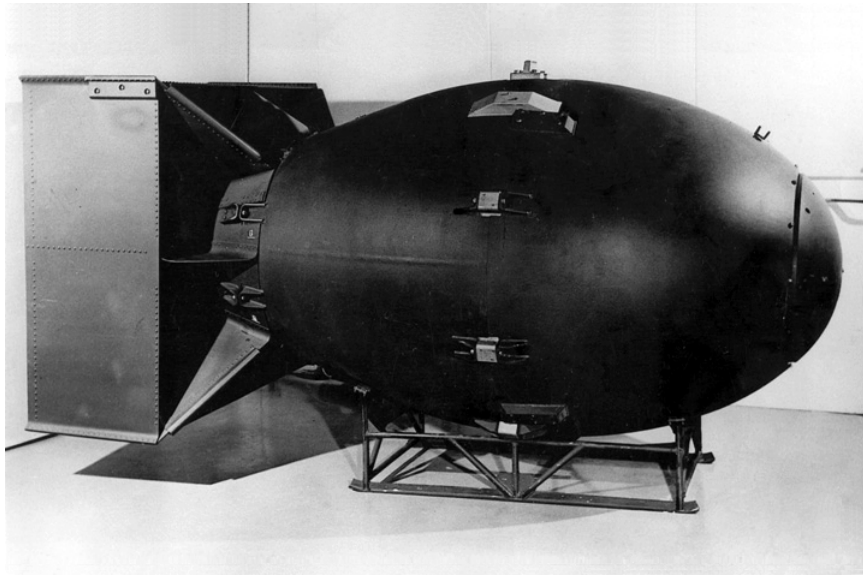
Ydinase

- ▶ Toisen maailmansodan aikaan sekä Saksa että Yhdysvallat pyrkivät kehittämään ydinasetta.
- ▶ Yhdysvalloissa käynnistettiin ns. Manhattan-projekti, jonka tavoitteena oli saada aikaan toimiva uraanipohjainen ydinpommi.
- ▶ Projektia johti fyysikko Robert Oppenheimer, ja siinä työskenteli suuri joukko hyvin tunnettuja fyysikoita, kuten Hans Bethe, Niels Bohr, Enrico Fermi ja Richard Feynman.
- ▶ Saksalaiset eivät saaneet toimivaa asetta ja Yhdysvaltojen ensimmäinen koeräjäytyskin tehtiin vasta 16.7.1945 kun sota oli jo loppunut Euroopassa.

Ydinaseen käyttö

- ▶ Little Boy-niminen pommi pudotettiin Hiroshiman kaupunkiin 6.8.1945, minkä seurauksena n. 75 000 ihmistä kuoli välittömästi.
- ▶ Kolme päivää myöhemmin Nagasagin kaupunkiin pudotettiin Fat Man, joka tappoi välittömästi n. 40 000 ihmistä.
- ▶ Japani antautui 15.8.1945.
- ▶ Ydinaseen puolustajat ovat laskeneet, että ilman aseiden käyttöä maihinnousussa seurannut kuolonuhrien määrä olisi ollut suurempi, kuin pommituksessa menehtyneiden määrä. Tämä on toki vain spekulatio.
- ▶ Sodan jälkeen sekä Yhdysvallat että Neuvostoliitto ovat suorittaneet suuren määrän ydinkokeita, joiden aiheuttamat laskeumat näkyvät tietyillä alueilla edelleen mittauksissa.

Fat Man

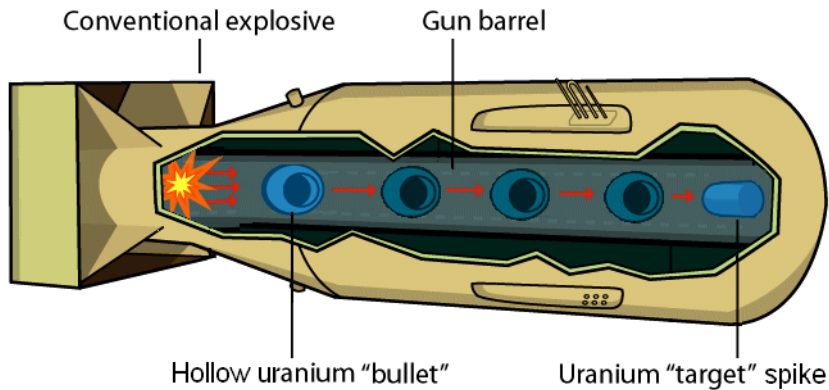


kuva: public domain

Ydinase

- ▶ Ydinpommin toiminta perustuu ketjureaktioon, kuten ydinvoimalassa käytettävän reaktorinkin.
- ▶ Uraanista tai plutoniumista tulee räjähdysaltista, kun ns. kriittinen massa ylittyy. Tällöin hajoamisreaktioissa vapautuvat neutronit saavat aikaan ketjureaktion materiaalin sisällä.
- ▶ Pommin rakenteilla ja hidasteaineilla voidaan vaikuttaa reaktion kulkuun ja pyrkiä maksimoimaan vapautuva energia.
- ▶ Esim. Little Boy'n energia oli 16 kilotonnia, eli vastasi 16 miljoonaa kilogrammaa TNT:tä.
- ▶ Suurin testattu ydinpommi on Neuvostoliiton Tsar Bomba, jonka teho oli 50 megatonnia.

Toimintaperiaate



kuva: HowardMorland https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gun-Type_Fission_Weapon.png

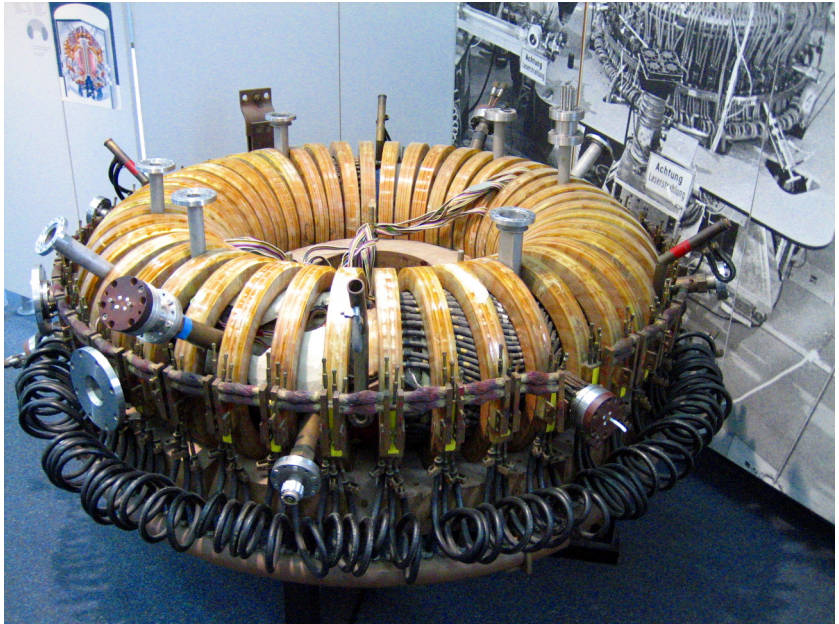
Fuusioreaktori

- ▶ 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.

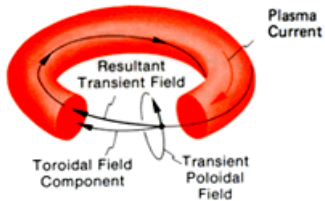
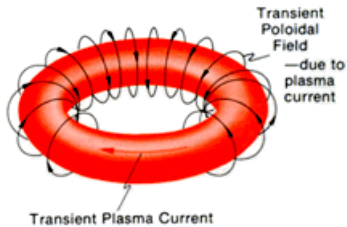
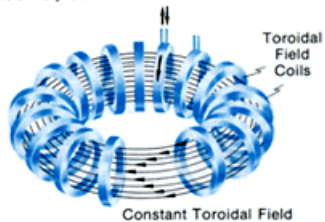
Tokamak

- ▶ 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.

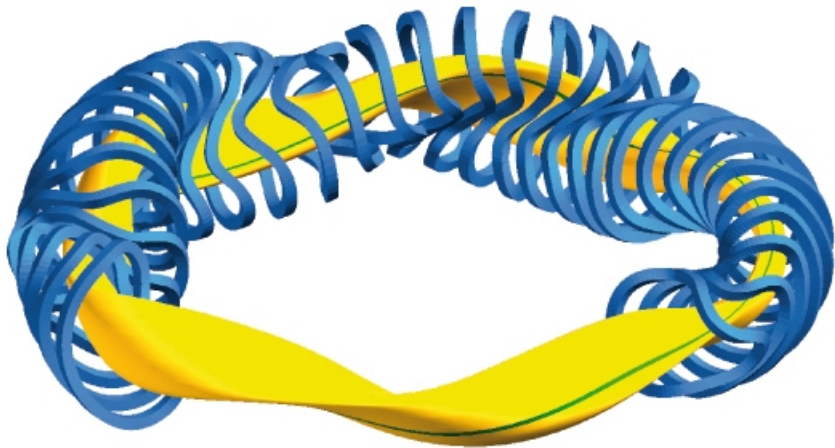
Tokamak



Relatively Constant Electric Current



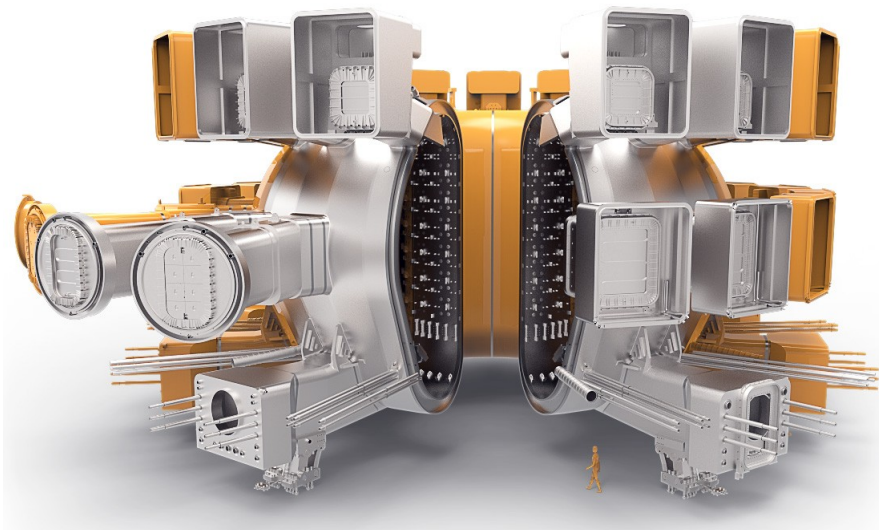
Stellaraattori



kuva: Max-Planck Institut für Plasmaphysik

ITER

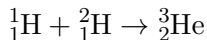
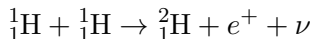
- ▶ Tämän hetken suurin mielenkiinto fuusiotutkimuksessa kohdistuu ITERiin, joka on Ranskaan rakenteilla oleva valtava Tokamak.
- ▶ Tavoitteena on saada positiivinen hyötysuhde pitkäksi aikaa.
- ▶ Nykyisen aikataulun mukaan reaktorin pitäisi käynnistyä 2025.
- ▶ Projektin valmistelusta on sovittu Yhdysvaltojen ja Neuvostoliiton välillä jo 1985, mutta varsinainen suunnittelu on aloitettu 2006.
- ▶ Laitteella ei tuoteta sähköä, vaan sitä käytetään prototyyppinä.



kuva: ITER Organization, <http://www.iter.org/>

Fuusio Auringossa

- ▶ Auringon energiantuotanto perustuu korkeassa lämpötilassa plasmaksi muuttuneen aineen fuusioitumiseen.
- ▶ Reaktioketjun pohjalla on vedyn fuusioituminen ja niin sanottu protoni-protoni-ketju.
- ▶ Ketju alkaa kahden vety-ytimen yhdistymisenä deuteriumiksi, joka fuusioituessaan jälleen vedyn kanssa tuottaa heliumia.



- ▶ Fuusioituminen jatkuu rautaan saakka.
- ▶ Raskaampien alkuaineiden synty vaatii lisää energiaa, mikä on mahdollista supernovaräjähdyksessä, jolloin neutronien liike-energia kasvaa riittävän suureksi ja ne voivat yhdistyä ytimiin.

