



Aalto University
School of Science
and Technology

Ydinvoiman mahdollisuuksista maailman energiapulaan

Rainer Salomaa

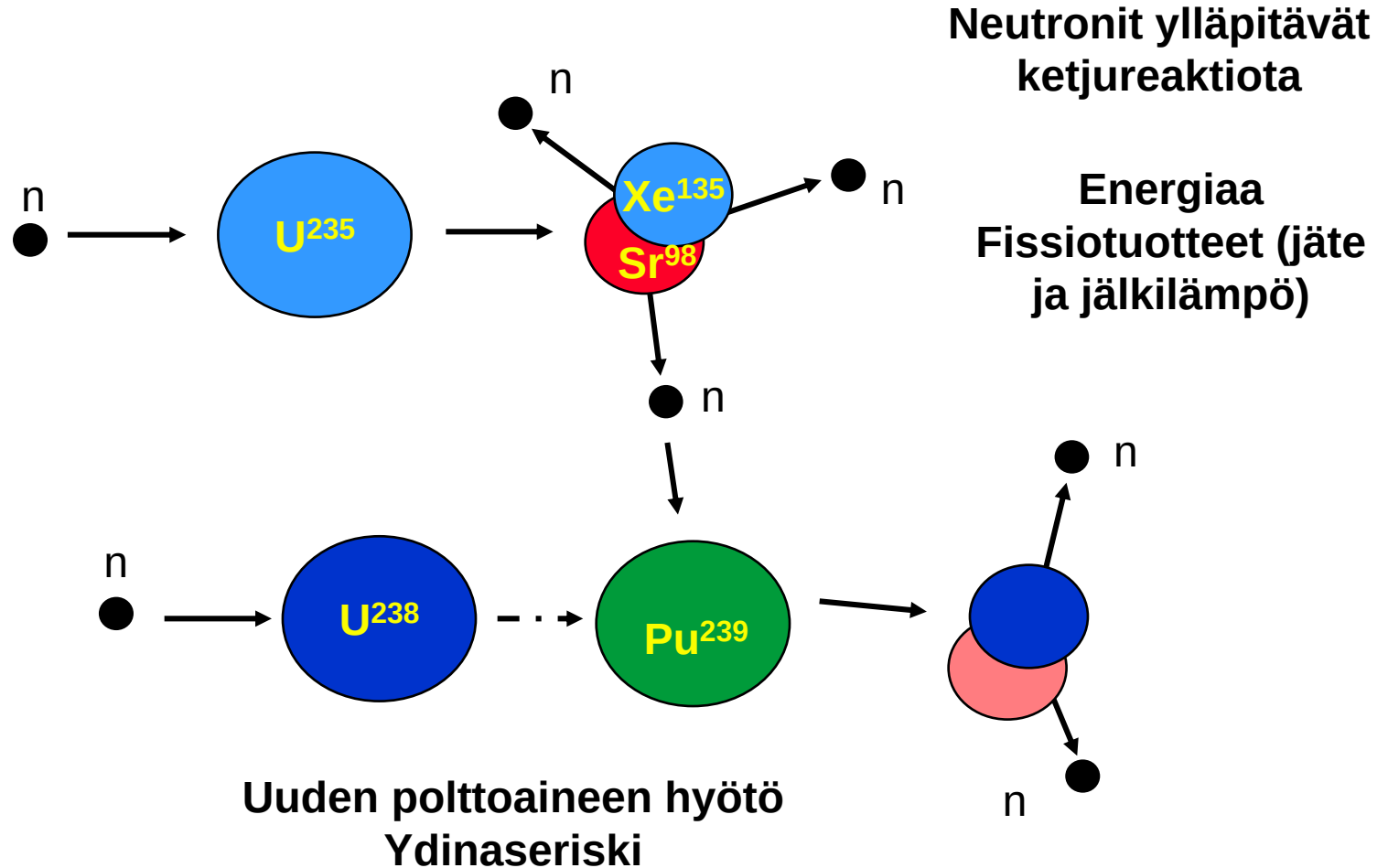
Fissio ja fuusio

Ydinreaktorisukupolvet

Ydinpolttoaineen riittävyys?

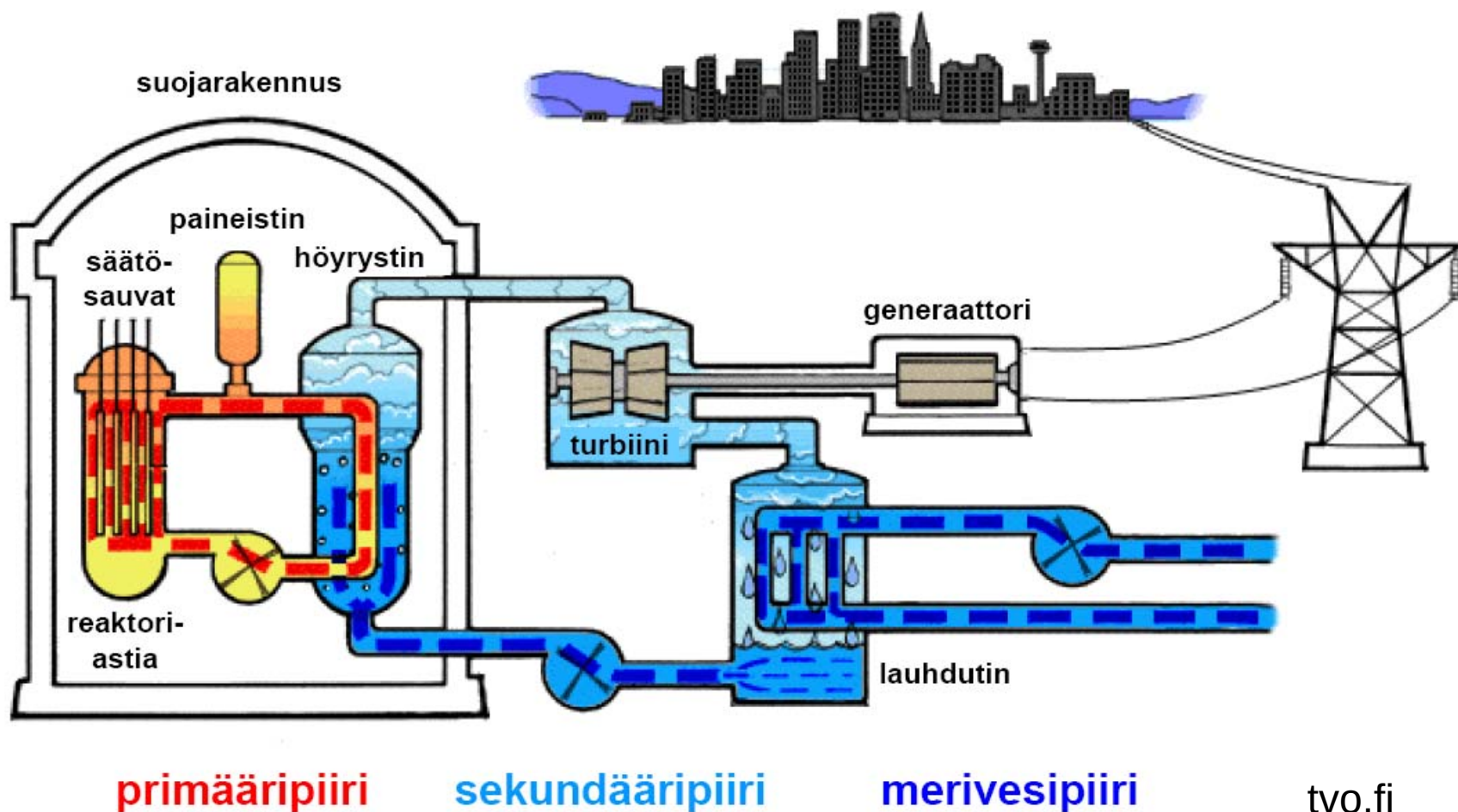
Milloin fuusio?

Fissioreaktio



Painevesireaktorin periaate

Höyryntuottojärjestelmää (NSSS) lukuunottamatta konventionaalista tekniikkaa.



tvo.fi

3. sukupolvi: Fissioenergian etuja ja haittoja

- ☺ Kypsää tekniikkaa
- ☺ Taloudellinen kilpailukyky
- ☺ Ei kasvihuonekaasuja
- ☺ Hyvin vähäiset ympäristövaikutukset normaalikäytössä
- ☹ Turvallisuus (safety)
- ☹ Käytetyn polttoaineen loppusijoitus, ydinjäte
- ☹ Ydinaseet, turvallisuus (security)
- ☹ Ydinvoimavastaisuus



Ydinvoima tänään

- 443 reaktoria, nimellisteholtaan 378 GWe, tuotanto 2558 TWhe
- Uraanin tarve 69 000 ton
- 62 reaktoria rakenteilla, 64 GWe
- Suomi: Lo 1&2 (2x488MWe), Ol 1&2 (2x860MWe), Ol3 rakenteilla, Ol4 ja Fe1 suunnitteluvaihe, 16% kokonaisenergiasta, 22,6TWh ts. 33% sähkön tuotannosta (2009)
- Maailma: 700 Mtoe/11000 Mtoe ts. 6% kokonaisenergiasta ja ydinsähkön määrä 2558 TWh noin 14% kaikesta sähköstä. EU-27 ydinsähköä 28%
- 1TWhe = 10^6 MWhe arvoltaan noin 50 milj.€
- Fossiilisista polttoaineista pitäisi päästä eroon

Ydinvoima ei ole patenttiratkaisu, mutta sen osuus on ja on oleva merkittävä, etenkin kun huomioidaan, että vaihtoehtoja on kovin vähän

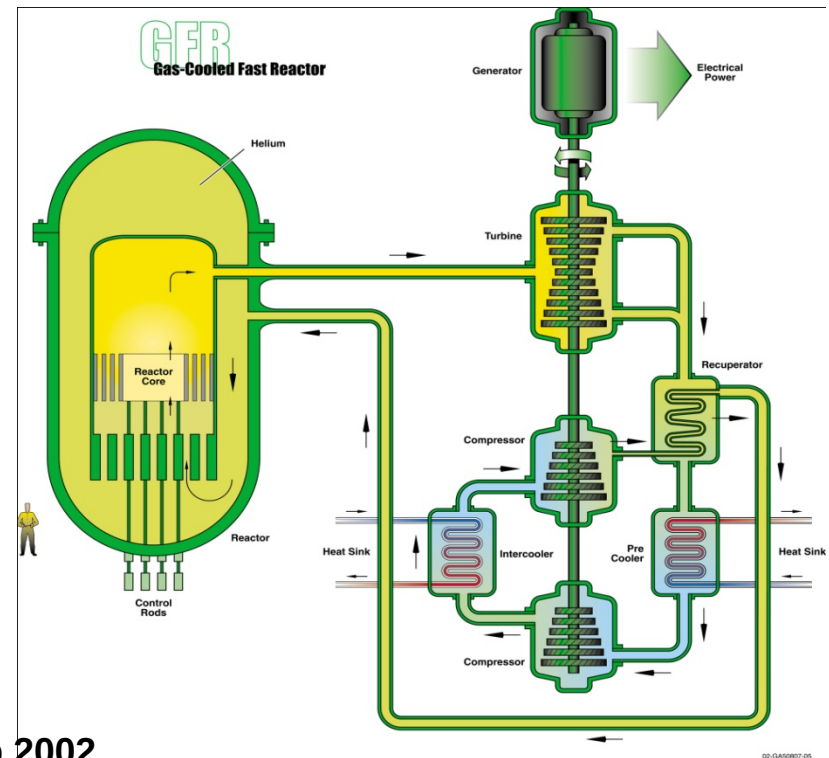
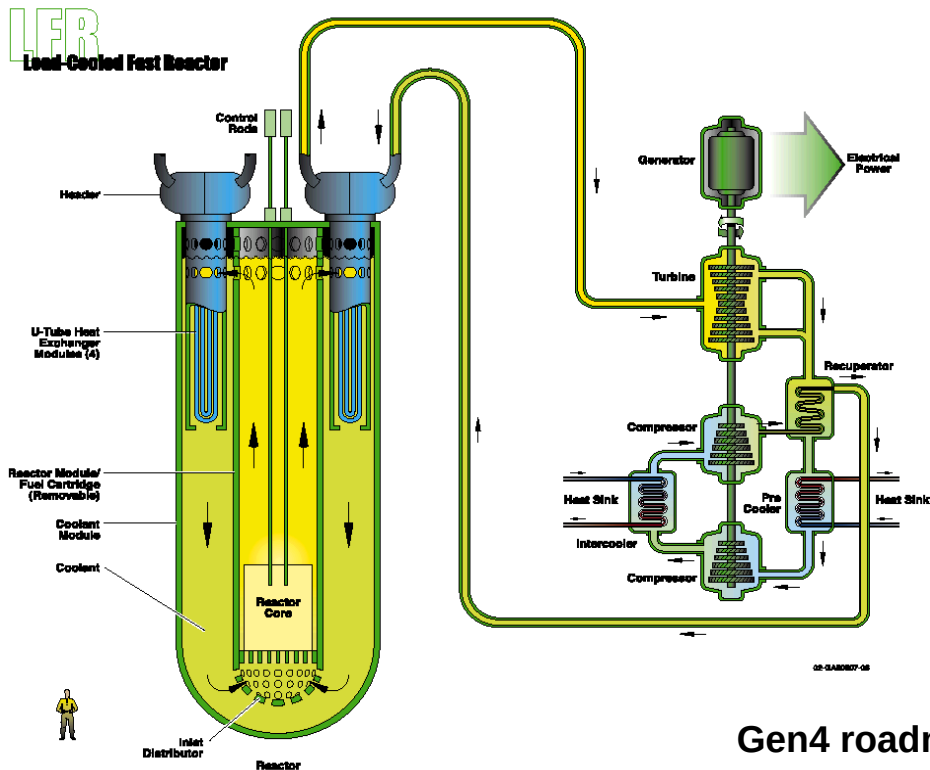
Kestävämmät ja hyväksyttävämmät ydinvoimaratkaisut?

4. sukupolvi: fissioreaktorien evoluutiosta revoluutioon

Turvallisuus, jätteen minimointi, fissiopolttoaineen riittävyys (U^{238}), ydinasevalvonta, taloudellisuus

Prosessilämpö, ydinjätteen transmutaatio, polttoainetehdas (hyötäjä)

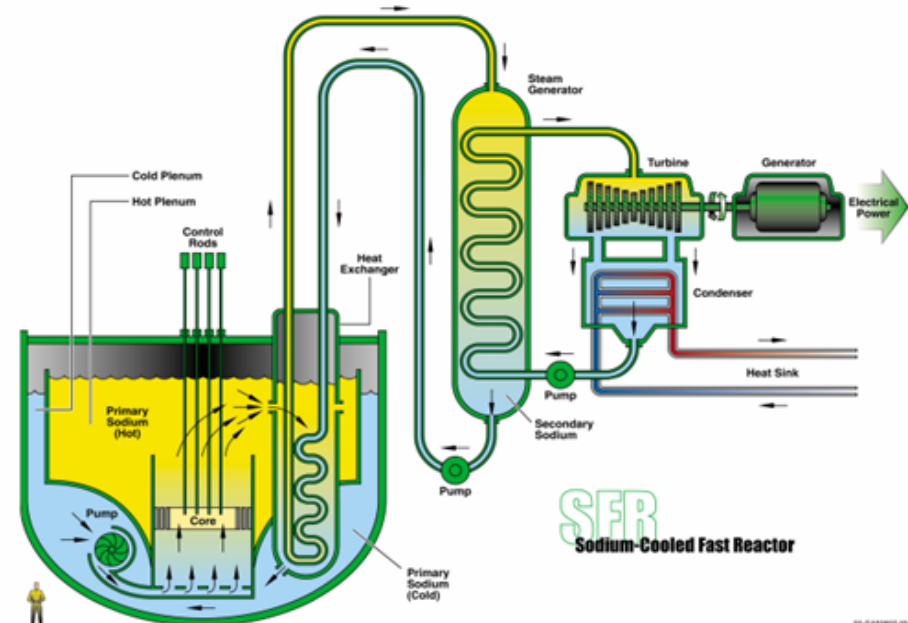
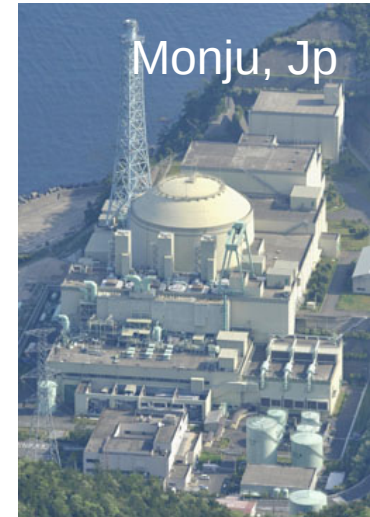
Kuusi GEN4 kandidaattia, torium (Th^{232}) uusi vaihtoehtoinen polttoaine



Gen4 roadmap 2002

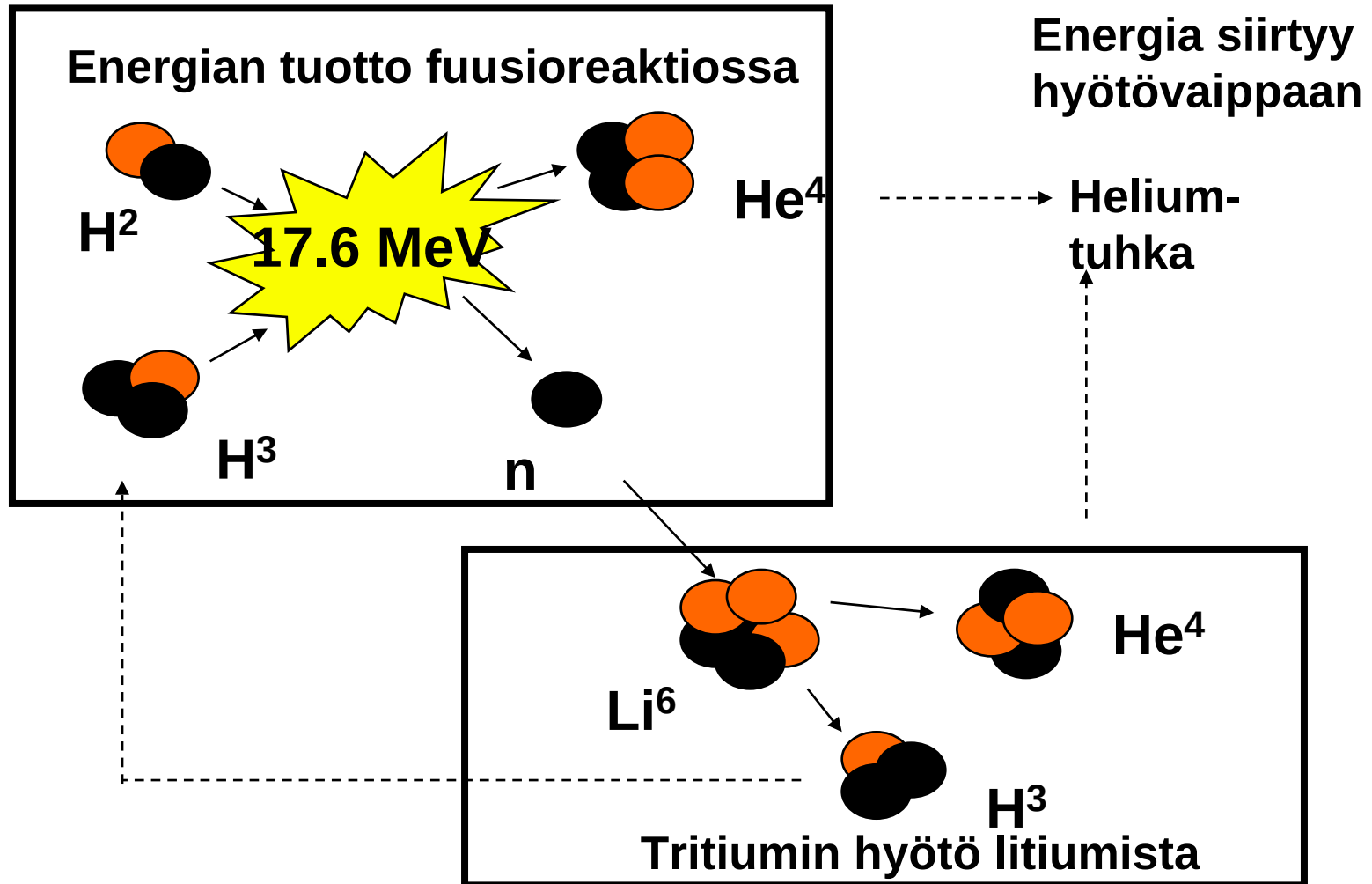
Nopeat hyötöreaktorit

- Hyötö = polttoainetta syntyy yli oman käytön
- Sula natrium jäähdytys (LMFBR) perustekniikka tunnettu
- Hyötökerroin rajoittaa nopean globaalin kasvun ts. uuden reaktorin käynnistäminen vie aikaa
- Poliittinen vastustus
- Teknisesti edistynein G4 ehdokas
- **Polttoainetta tuhansiksi vuosiksi eteenpäin**



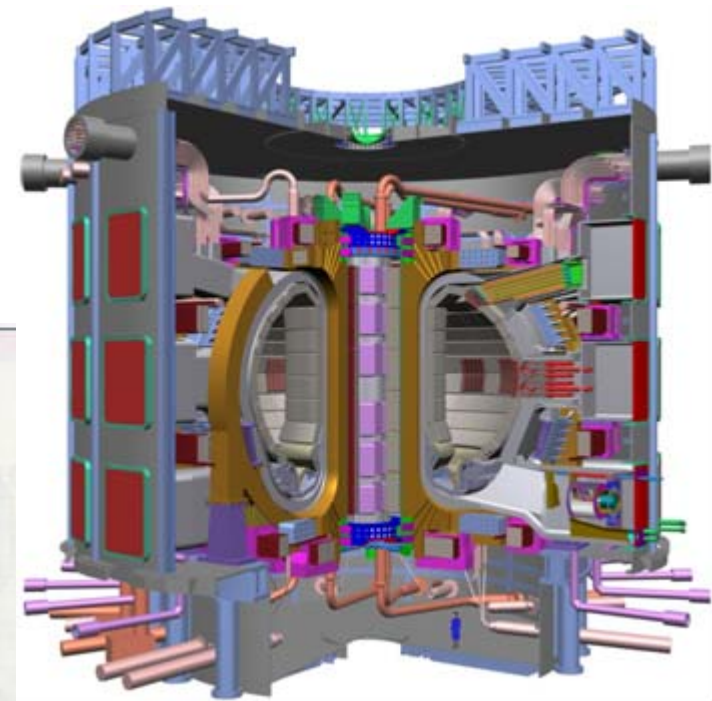
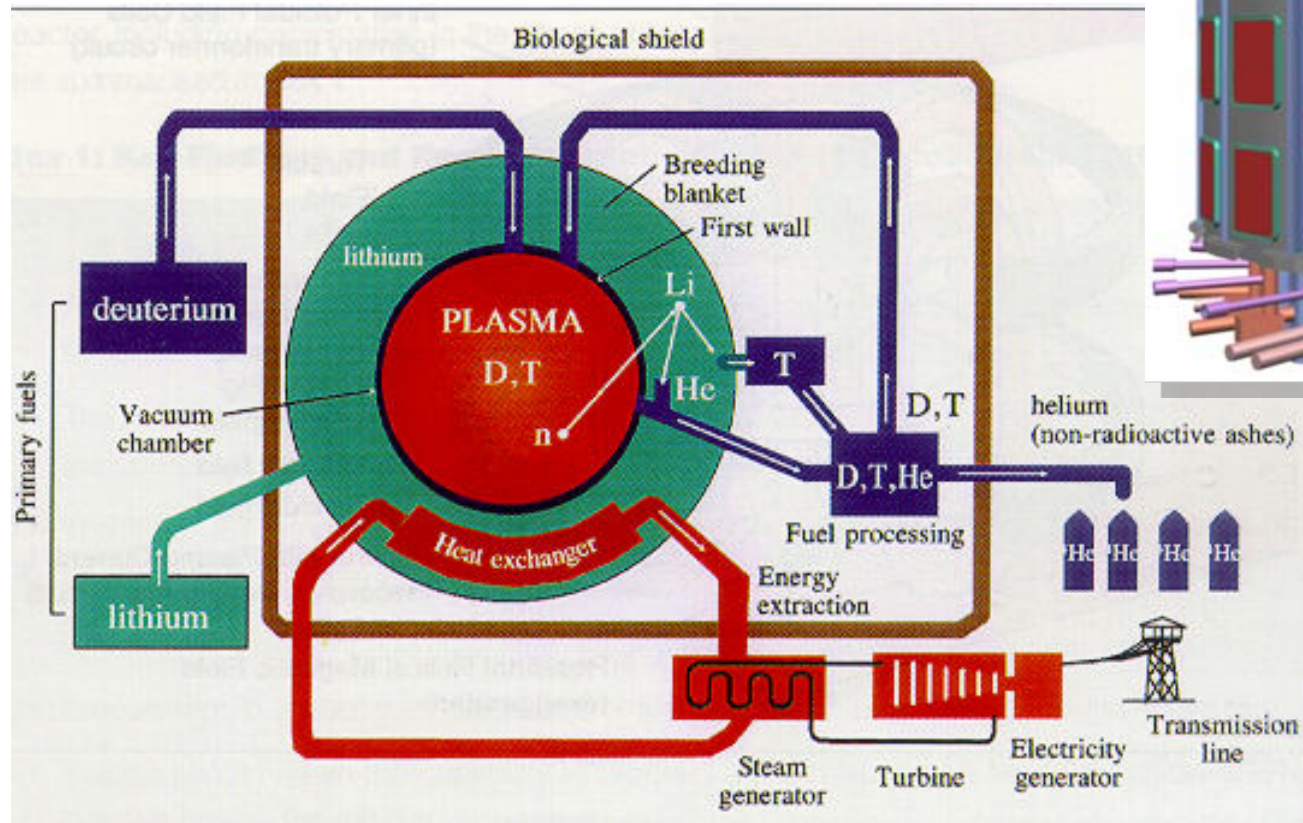
Lopullinen ratkaisu fuusio?

Fuusioreaktio



5. sukupolvi: tokamak fuusioreaktori

Litra vettä vastaa yhtä öljytynnyrillistä
Fuusiopalon edellyttämät ääriolosuhteet



Iter.org

5. sukupolvi: Fuusioenergian etuja ja haittoja

- ☺ Ei kasvihuonekaasuja
- ☺ Polttoainetta rajattomasti kaikkialla
- ☺ Fuusioreaktorin luontainen turvallisuus
- ☺ Ei hankalia pitkäikäisiä ydinjätteitä
- ☺ Rakenteiden aktivoituminen, tritium
- ☹ Ydinaseteknologiaa
- ☹ Hyvin vaikeaa tekniikkaa
- ☹ Fuusioenergian hinta ?

Tulevien sukupolvien valtavan lisäenergian tarpeen tyydyttämiseksi on hyvin vähän laajamittaisia vaihtoehtoja



Riittääkö teknisesti kovin vaikeaan fuusioenergian valjastamiseen tekninen taito, poliittinen tahto sekä onko siihen vielä riittävä aika?

Riittääkö uraania?
Tuleeko fuusio?

Fissioreaktorin polttoainekierto

220t köyhdytettyä UF₆

32t väkevöityä UF₆

250t UF₆

32t väkevöityä UO₂

200t U₃O₈

1000 MWe
7 TWh

50000 t
malma

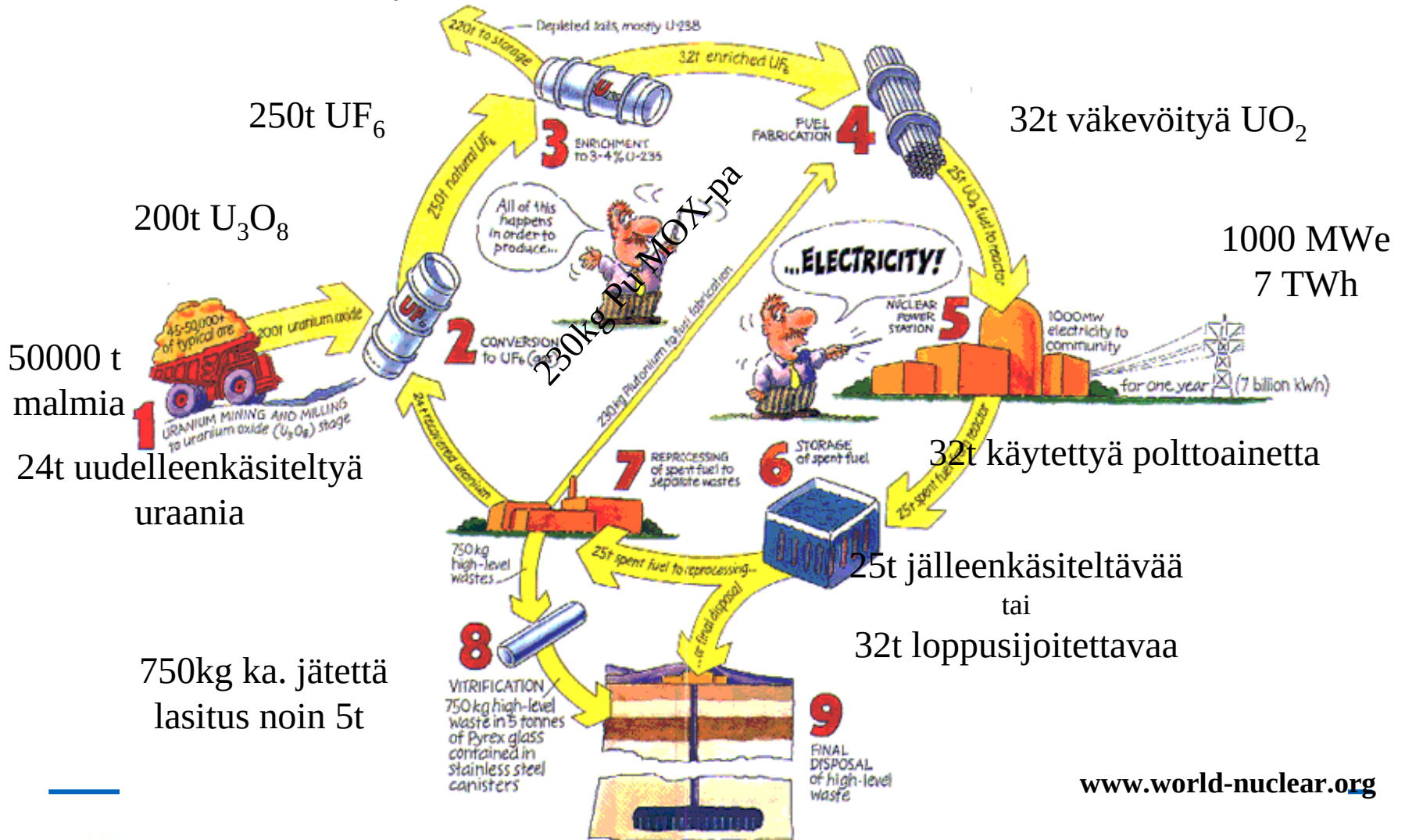
24t uudelleenkäsiteltyä
uraania

750kg ka. jätettä
lasitus noin 5t

32t käytettyä polttoainetta

25t jälleenkäsitteltävää
tai
32t loppusijoitettavaa

www.world-nuclear.org



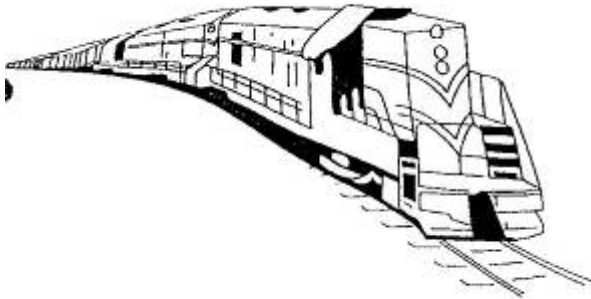
Energiaintensiivisyys: 1000 MWe:n voimalaitoksen vuosittainen polttoaineen kulutus



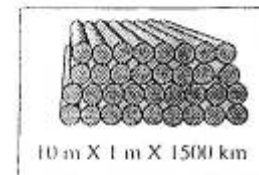
Ydinvoimalaitos
30 tonnia väkevöityä uraania
(2 kuorma-autoa)



Fuusiovoimalaitos 300kg
raskasta vetyä ja litiumia



Hiilivoimalaitos
2 400 000 tonnia hiiltä
(35 000 junavaunulastia)



Puun poltto
15 000 000 m³ halkoja



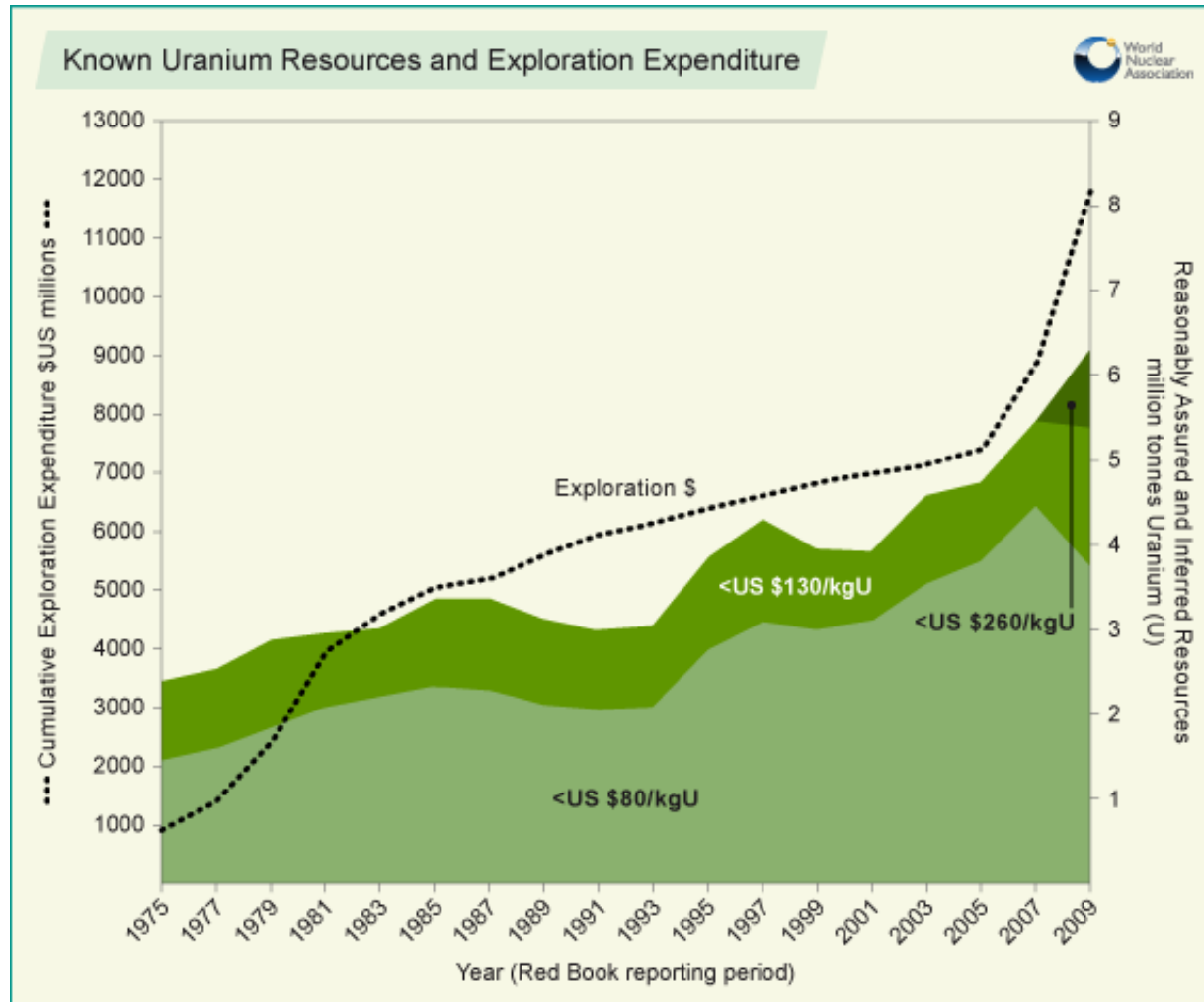
tai 80 km² aurinkopaneeleja tai
tuhat 3MWe:n tuulimyllyä

→ erilaiset käyttö- ja
järjestelmäsovellukset

Uraanin energiasisältö

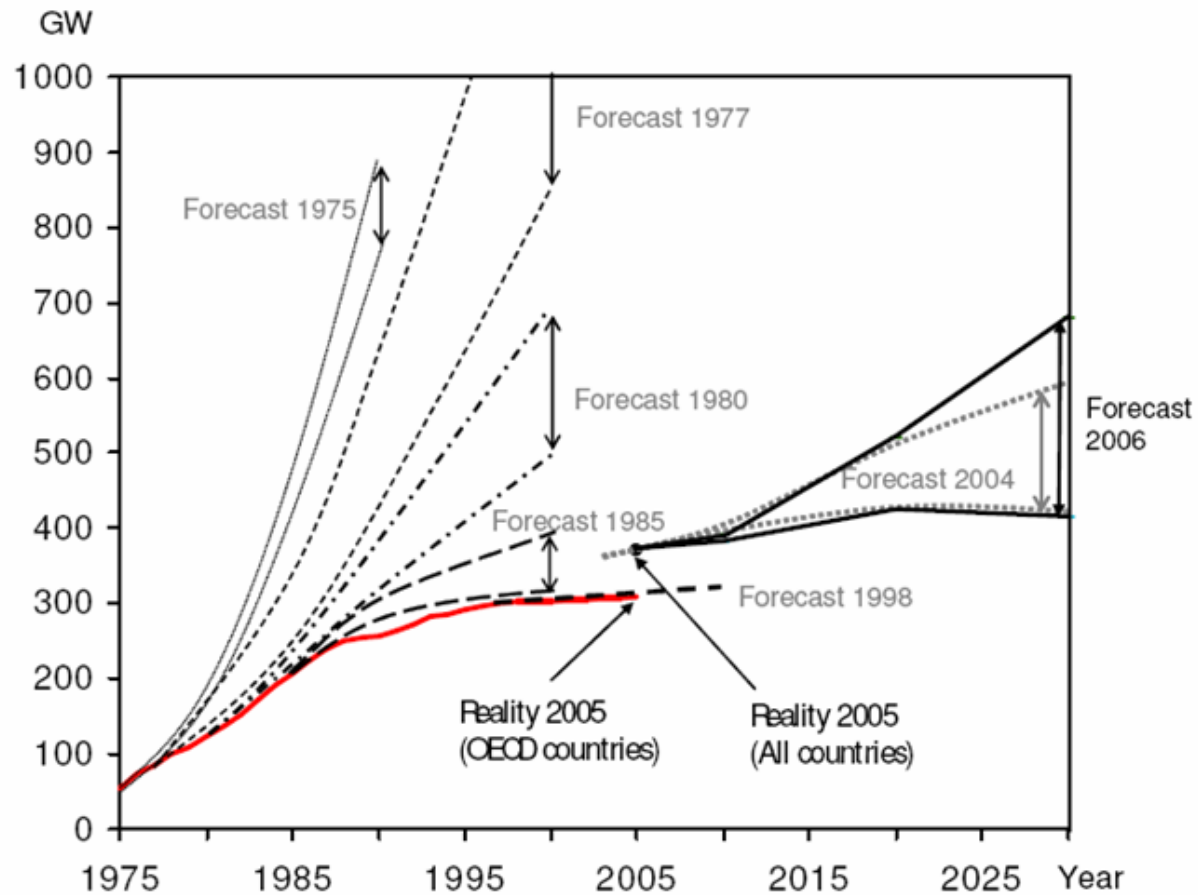
- Teoreettinen maksimi: täysin fissioituessaan uraani tuottaa energiaa noin 1000 MWd/kg.
- Isotooppia U^{235} luonnonuraanissa on vain 0,7%: energiaa pelkästään siitä saataisiin noin 7 MWd/kg (CANDU-reaktorit).
- U^{235} väkevöinti 3-5%. Kevytvesireaktorien poistopalama on tyypillisesti 30-60 MWd/kg, josta noin 20% aiheutuu U^{238} hyödetystä Pu^{239} :sta.
- Jälleenkäsittely (uraanin ja plutoniumin talteenotto) lisää energiantuotantoa runsaat 30%
- Polttoaineen suunnittelu voi lisätä energiantuotantoa 20%
- Esimerkki: 1000 MWe/30a/70% (IAEA1980) luonnonuraanin kulutus
 - LWR 4600 t (jälleenkäsiteltynä 3000t)
 - HWR 2700 t (jälleenkäsiteltynä 1800t)
 - FBR 36 t
- 6 miljoona tonnia uraania arvioidaan riittävän noin 100 a nykyisten kevytreaktorien polttoainekulutukseen.

U-varojen kasvu 3 Mton → 5Mton (tehostunut etsintä)



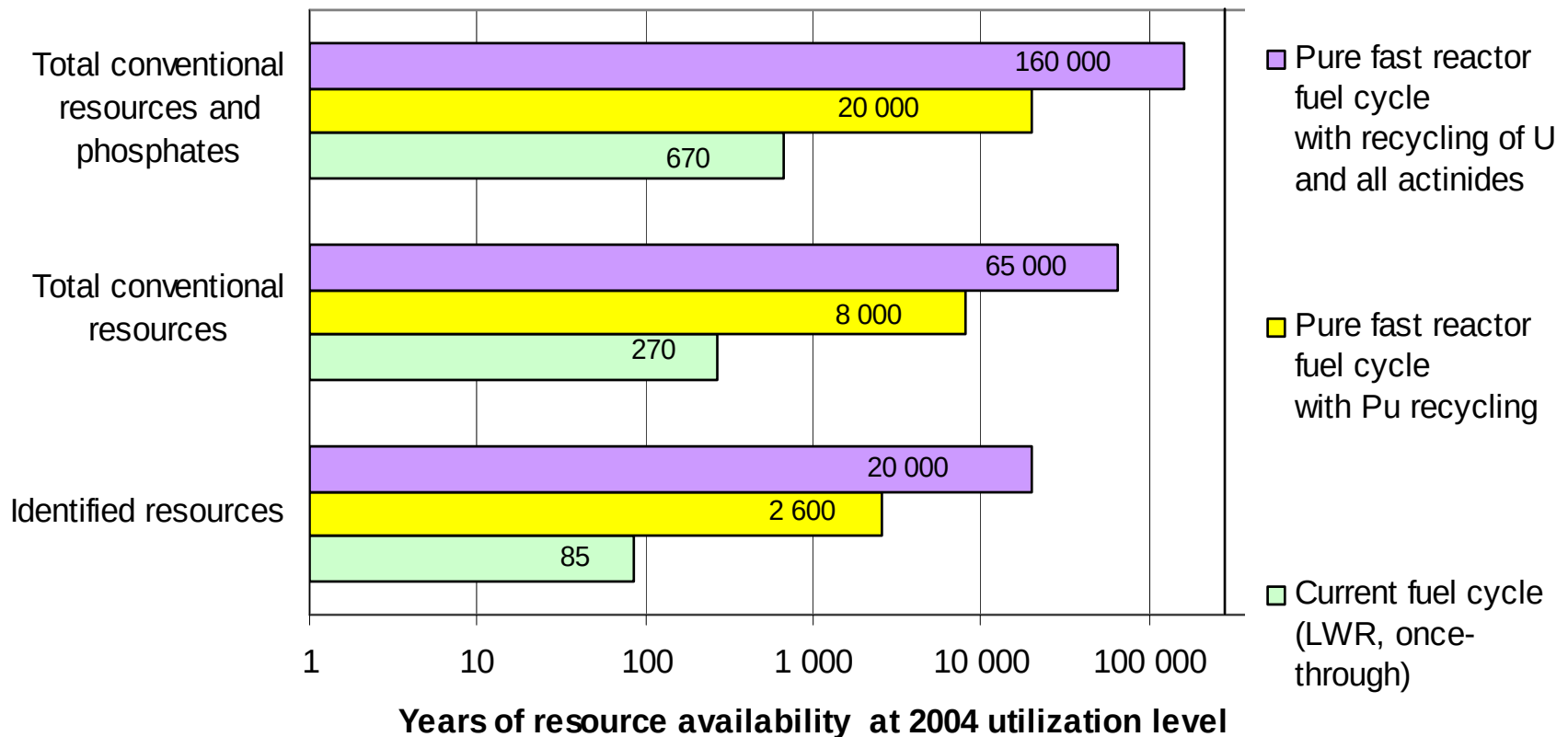
www.world-nuclear.org

Ennustamisen tuskaa



Data Source: IAEA; Graphics: LBST

Uraanivarojen tehokkaampi käyttö uuden tyyppisissä fissioreaktoreissa mahdollistaa kestävä kehityksen

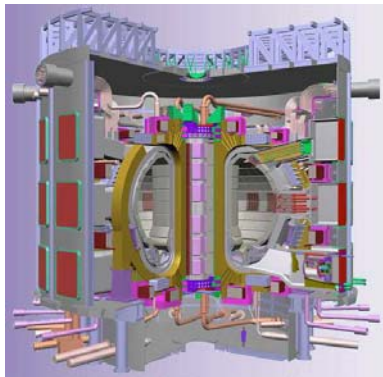
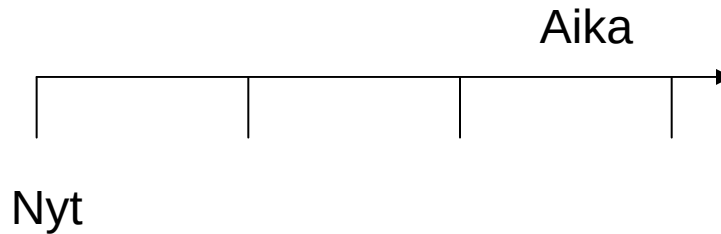
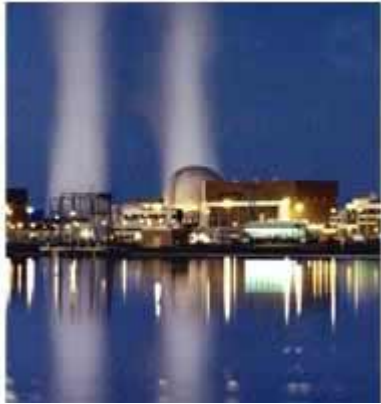


Uraanivarojen riittävyys vuosina ↑
Tunnettuja toriumesiintymiä yli 2,6 Mton

Lähde OECD / NEA 2006

Fuusioreaktorit eivät ehdi korvaamaan nykyisiä fissioreaktoreita

Fuusioenergian valjastamisen virstanpylväät

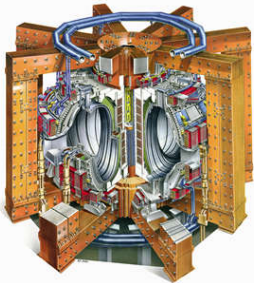


Poliittinen toteutettavuus

Taloudellinen toteutettavuus

Tekninen toteutettavuus, ITER

Tieteellinen toteutettavuus

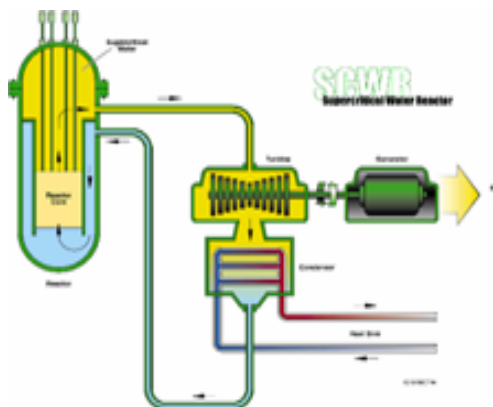


Vaihtoehtoja on - taitoa, aikaa ja tahtoa tarvitaan!

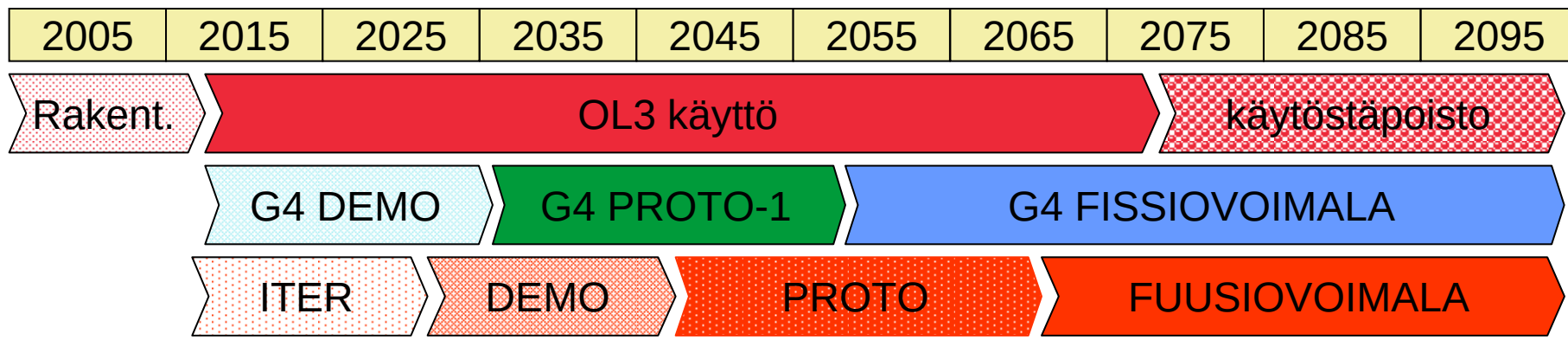
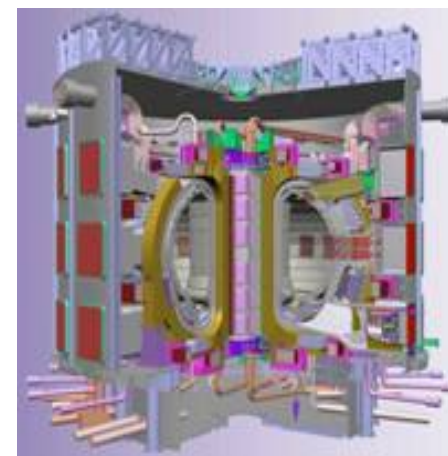
3. Sukupolvi
evoluutiolaitokset



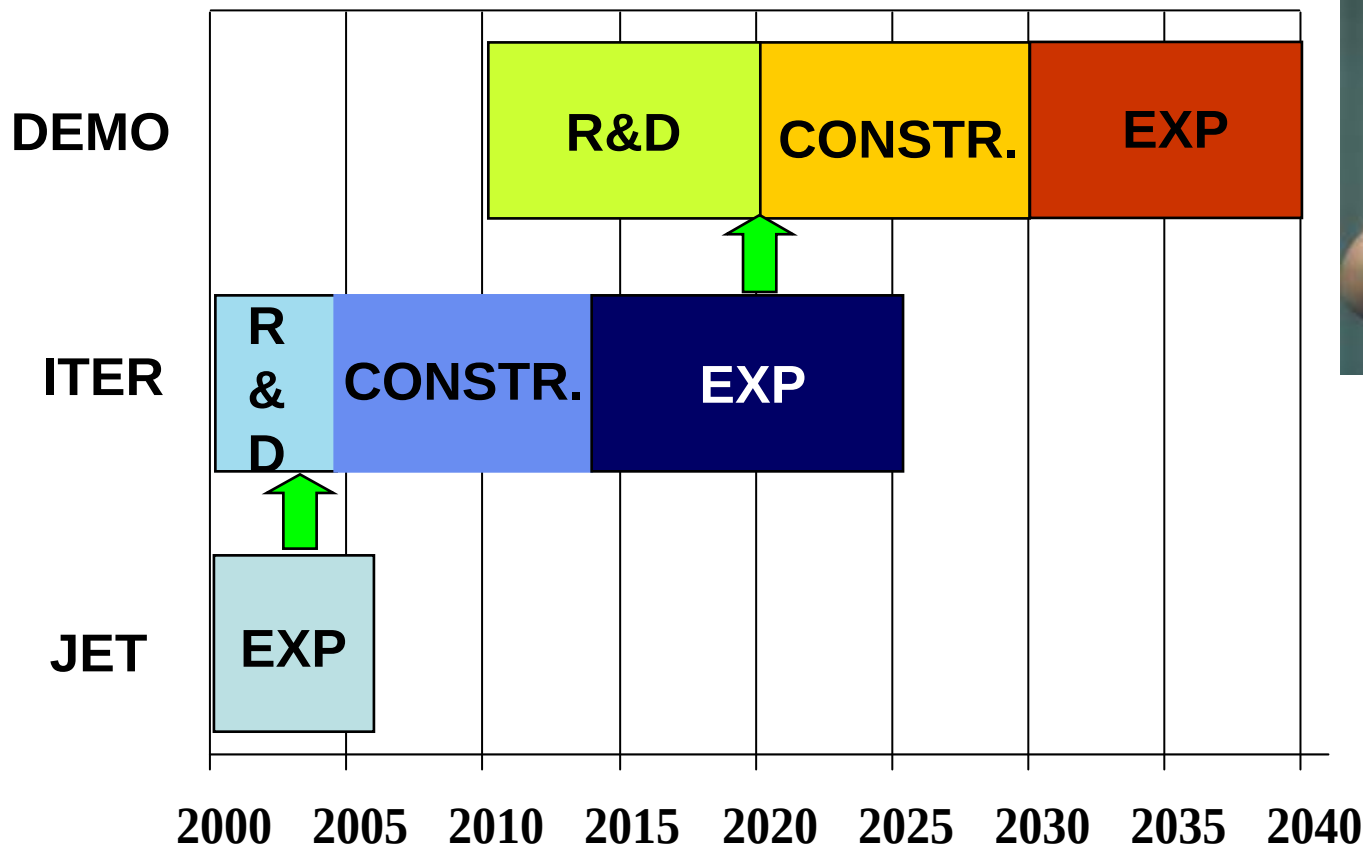
4. Sukupolvi
revoluutiolaitokset



5. Sukupolvi
fuusioreaktori



Milloin fuusioenergiaa?*



Toteutettavuus:

- Tieteellinen
- Tekninen
- Taloudellinen
- Poliittinen

***kalvo alunperin
vuodelta 2002!
AIKAA KULUNUT
JO 5-10a**

Jotta vuonna 2020, jolloin energiakysymysten oletetaan kärjistyvän, olisi selvyys siitä onko fuusioenergia todellinen vaihtoehto, on ITERin rakentamispäätös tehtävä heti. Laajamittainen fuusioenergian on mahdollista vasta v. 2050 jälkeen.

Loppupäätelmiä

- Nykyisille fissioreaktoreille uraania riittää ainakin sadaksi vuodeksi eteenpäin
- Hyötöreaktorien myötä uraania ja toriumia on moniksi sadoiksi vuosiksi, vaikka nykyinen reaktorikanta moninkertaistuisikin.
- Ydinenergialla pystytään tuottamaan merkittävä osa globaalista energiatarpeesta.
- Fissioenergiaan liittyy geneerisiä riskejä, jotka rationaalisin perustein voidaan sietää.
- Kilpailukykyinen fuusiovoimala ei tule ennen 2050.
- Fuusioenergia toteutuessaan on laajamittainen, turvallinen energiaratkaisu
- Fuusioreaktorikantaakin voi rajoittaa kriittiset materiaalit.
- Fuusiokin on ydinenergiaa ja ydintekniikkaa.