

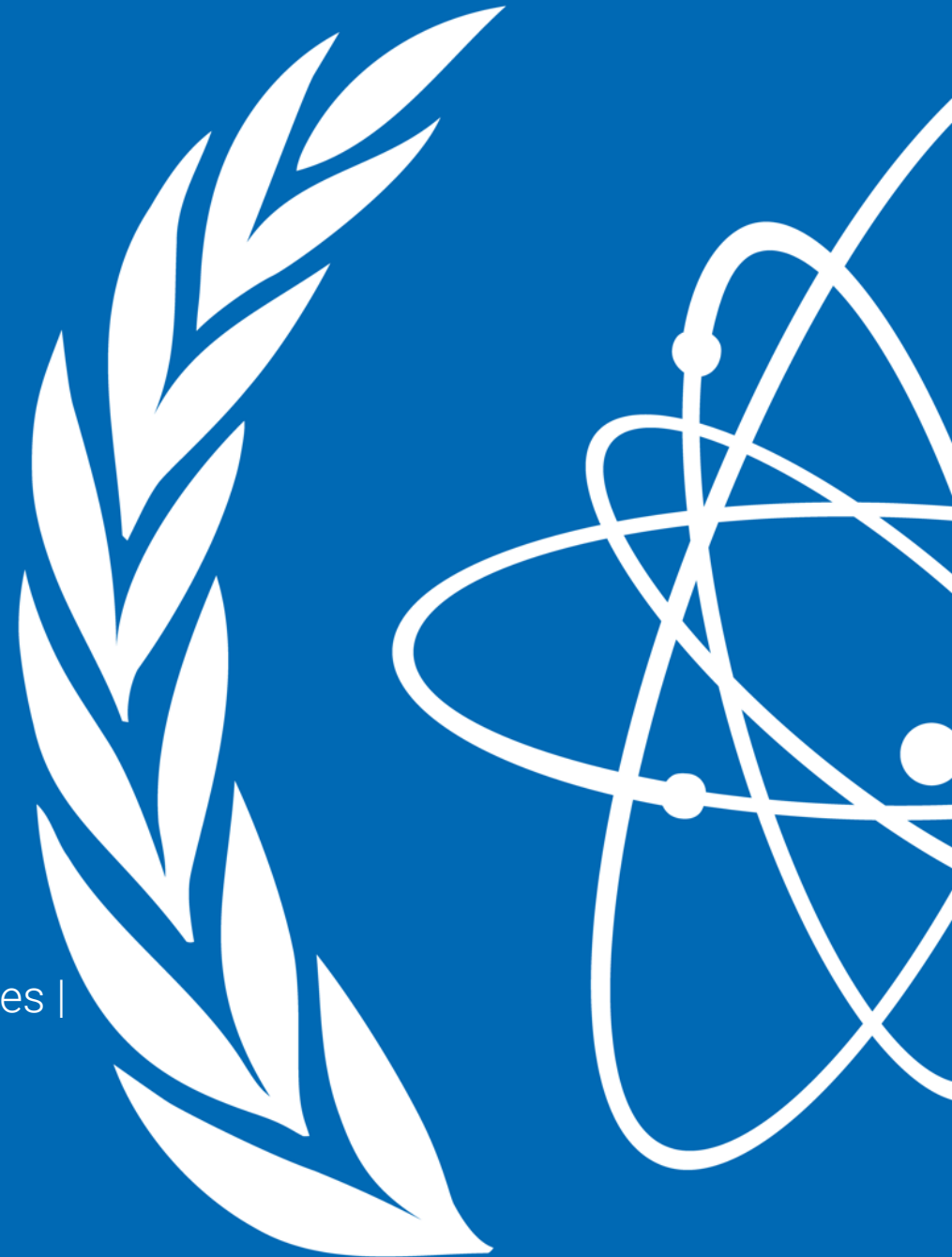
Fuusio

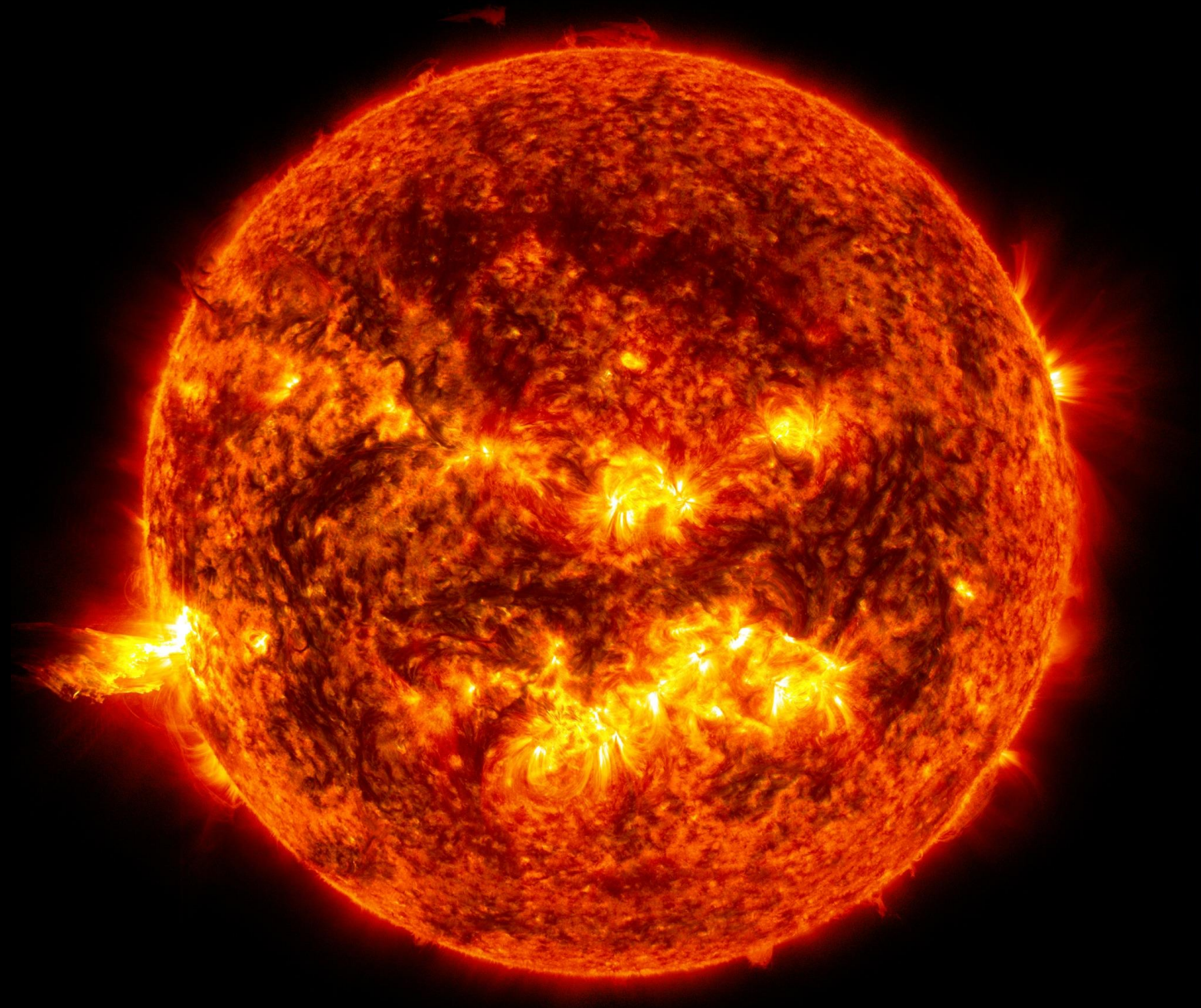
- nykytila ja mahdollisuudet

Kalle Heinola

Nuclear Data Section | Division of Physical and Chemical Sciences |
Department of Nuclear Sciences and Applications |

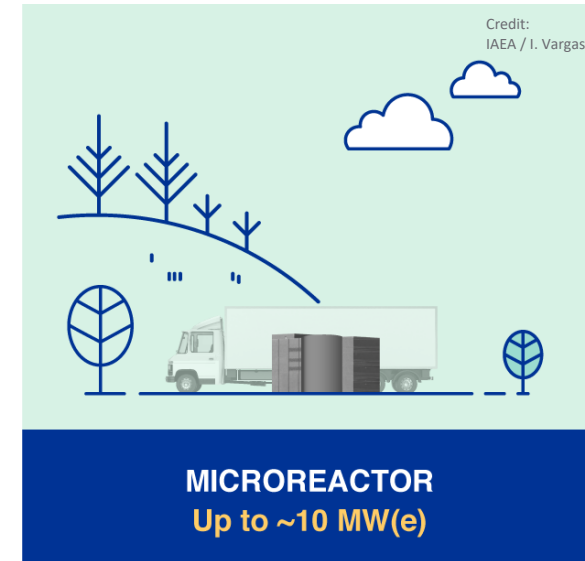
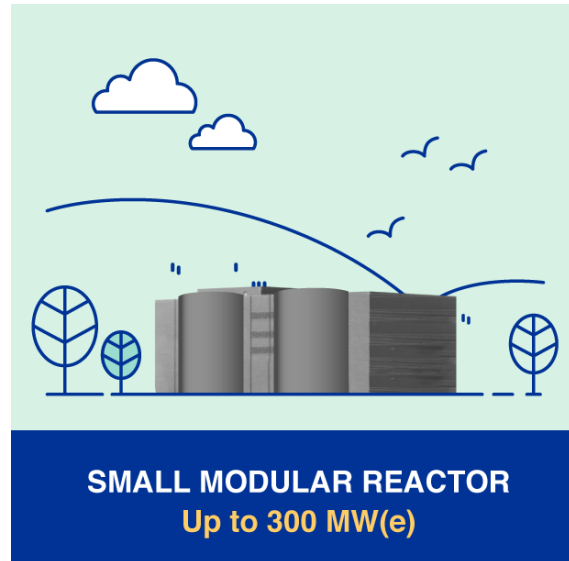
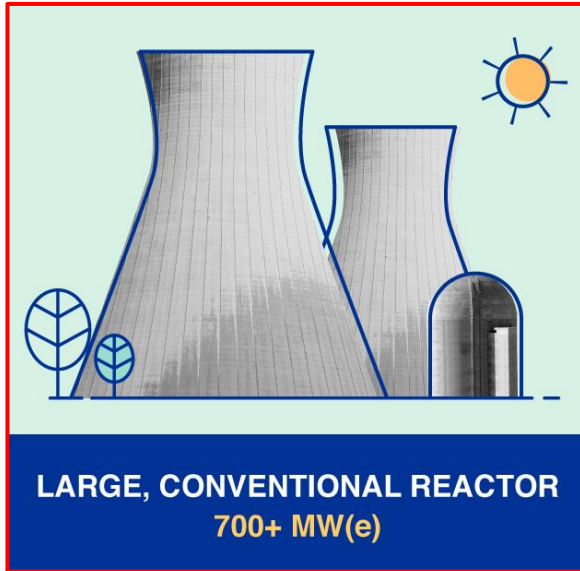
k.heinola@iaea.org



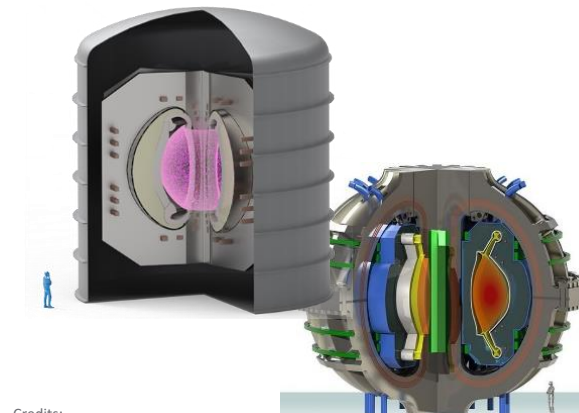
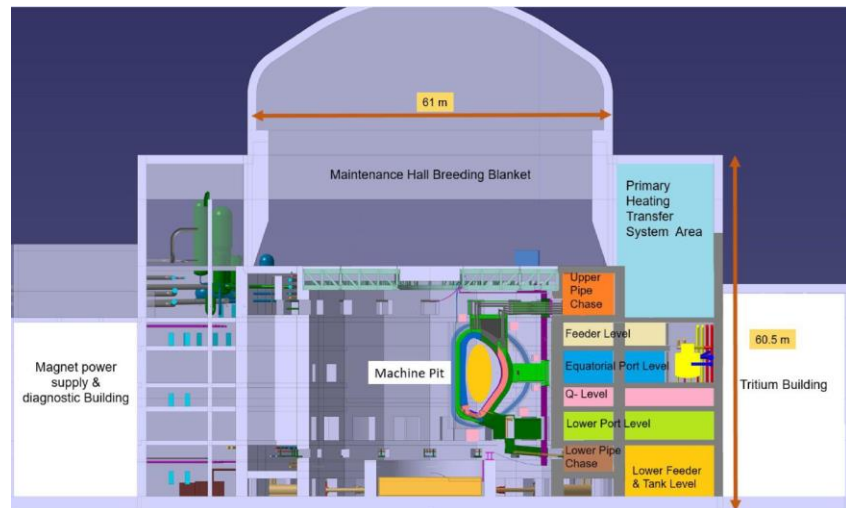


Tiivistelma

Fissio:



Fuusio:



Credits:
Commonwealth Fusion Systems / ARC rendering by A. Creely
Tokamak Energy Ltd



Fig. 1 Truck mounted 1 MWe PFRC.

C. Galea, et al., J. Fusion Energy 42, 4 (2023)

FUUSIO - ydinenergiaa

Johdanto

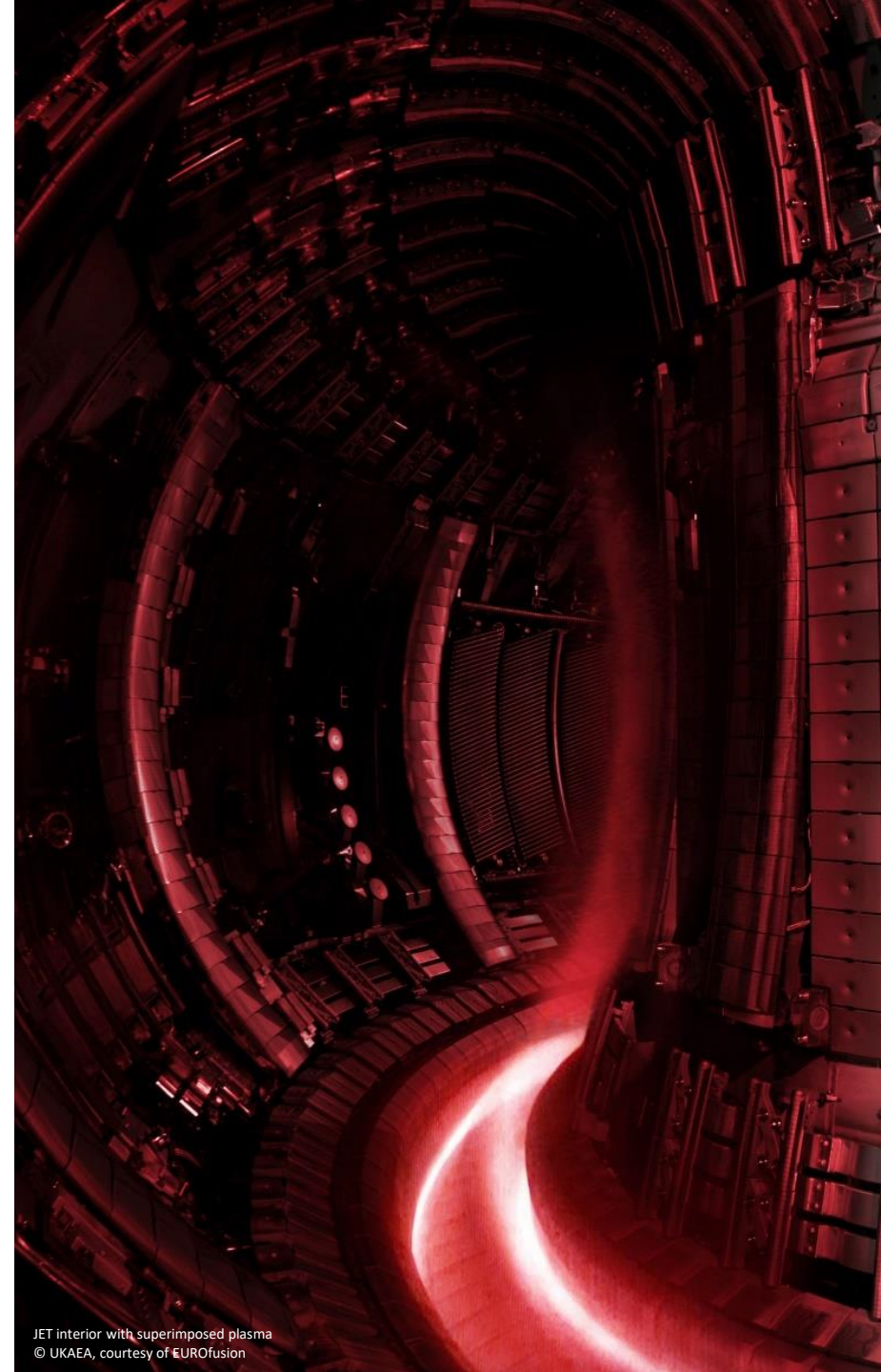
1. Tahtien energiaa
2. Fuusioenergiaa Maassa
3. Fuusio tanaan ja huomenna

Tiivistelmä

fuusioenergia (fusion energy)

ydinfuusio (nuclear fusion)

lampoydinfuusio (thermonuclear fusion)



Johdanto

- 1800-luku** teorioita Auringon energiasta (gravitaatio, luhistuminen)
- 1925** Aurinko vetyä ja heliumia
- 1938** ensimmäinen **D-T fuusio** (Manhattan project, Los Alamos, USA)
- 1939** teoria fuusiosta Auringon energialahteenä
- 1950 - ...** kohti fuusioenergian tuotantoa Maassa. **1950**: "fuusio"

☺ laaja kansainvälinen yhteistyö (US, UK, USSR/Russia, EU, China, Japan, ...)

- **1951** sähköä fissiolla, ANL, USA (4×200 W lamppua)
- **1953** Eisenhower: Atoms for Peace –puhe YK:ssa. **1957**: **IAEA**
- **1968** USSR: ensimmäinen tokamak ja fuusiolapimurto
- ...
- **1985** US ja USSR: fuusioyhteistyö. **1986** Reykjavik: **ITER** –päätös
- **2005** **ITER**-sijointuspaikka Cadarache, Ranska
- ~~2025~~ **2034** ensimmäinen plasma @ **ITER**

Fuusiosähkö: ennen vai jälkeen **2050**?

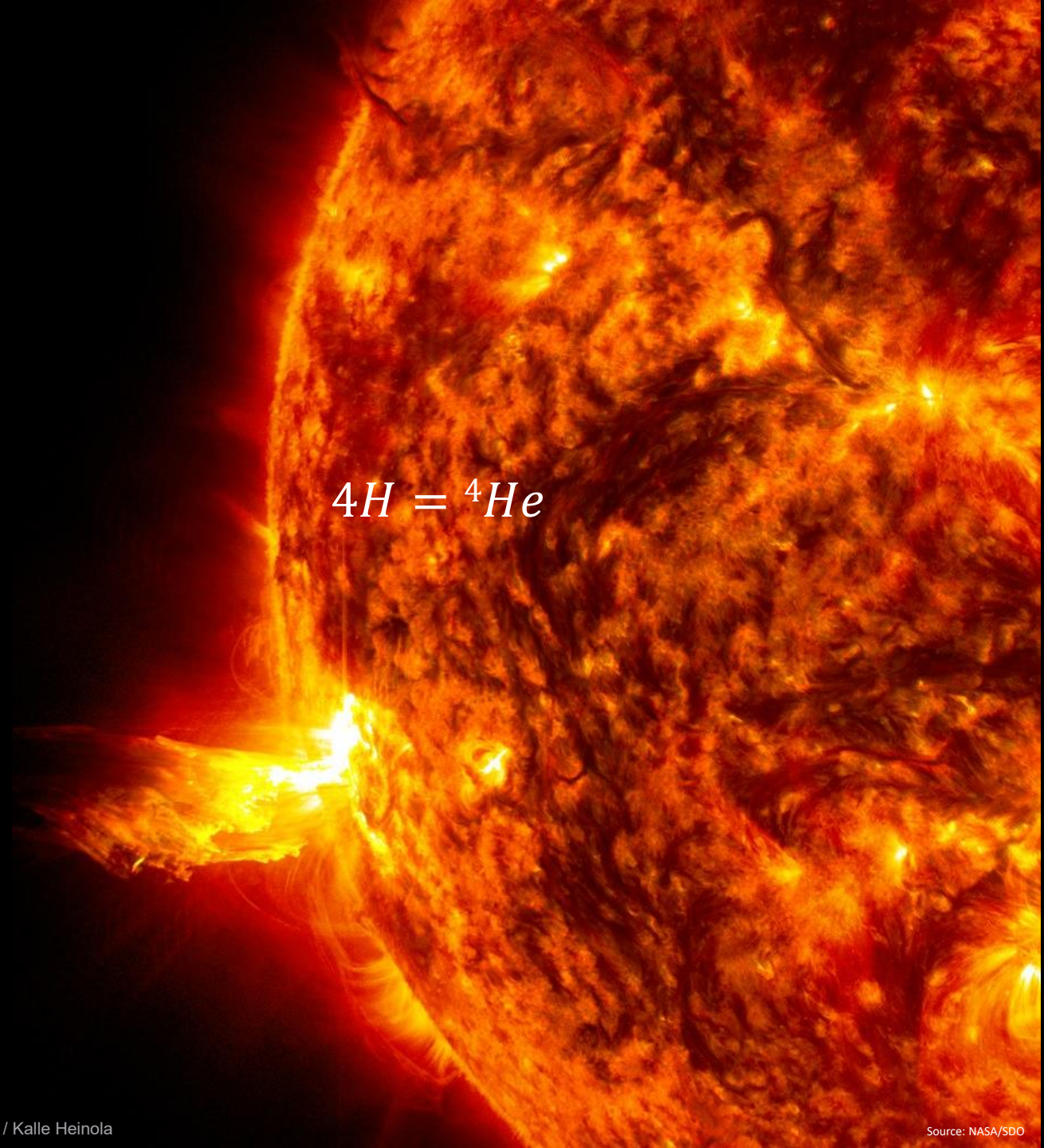
...kaupallinen toimija vai julkinen pilottihanke?

1. Tahtien energiaa

Aurinko:

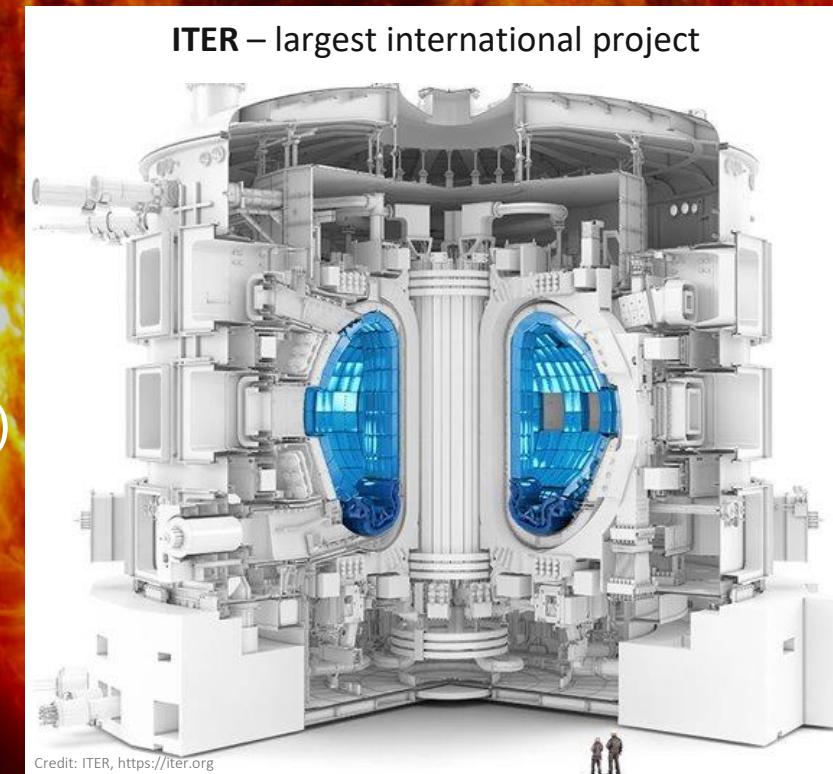
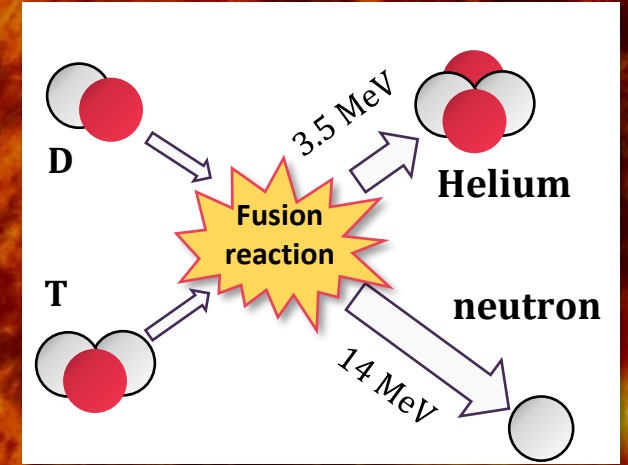
- PALJON vetyä (H), VALTAVA gravitaatio
- energiaa vetyreaktioista: $H + H$ fuusio
- fuusioenergian vapautuminen:
 $\Delta E = \Delta mc^2$

Maassa?



2. Fuusioenergiaa Maassa

- ✓ Fuusiopolttoaine = vetyplasma
 - deuterium (D) ja tritium (T)
 - DT plasma: korkea reaktiivisuus & energiatiheys
 - ydin > 100 milj. °C
 - koossapito voimakkailla magn.kentilla (suprajohde)
 - passiivisesti turvallinen: **ei ketjureaktioita, ei korkea-akt.jatetta**, ei CO₂
 - "advanced fuels" (DD, D³He, p¹¹B) = haastava
- ✓ **Neutronien** energia ymparoivaan vaippaan
- ✓ Fuusiolaitos tuottaa itse tarvitsemansa tritiumin (vaipassa Li)
- ✓ Fuusiossa vapautuva **helium** lammittaa plasmaa *lisaa*
 - **tehotuotto yli 100 % (Q > 1)**
 - ❑ **ITER**: Q = 10 eli hyötysuhde 1000 %



2. Fuusioenergiaa Maassa



✓ Fuusion energia

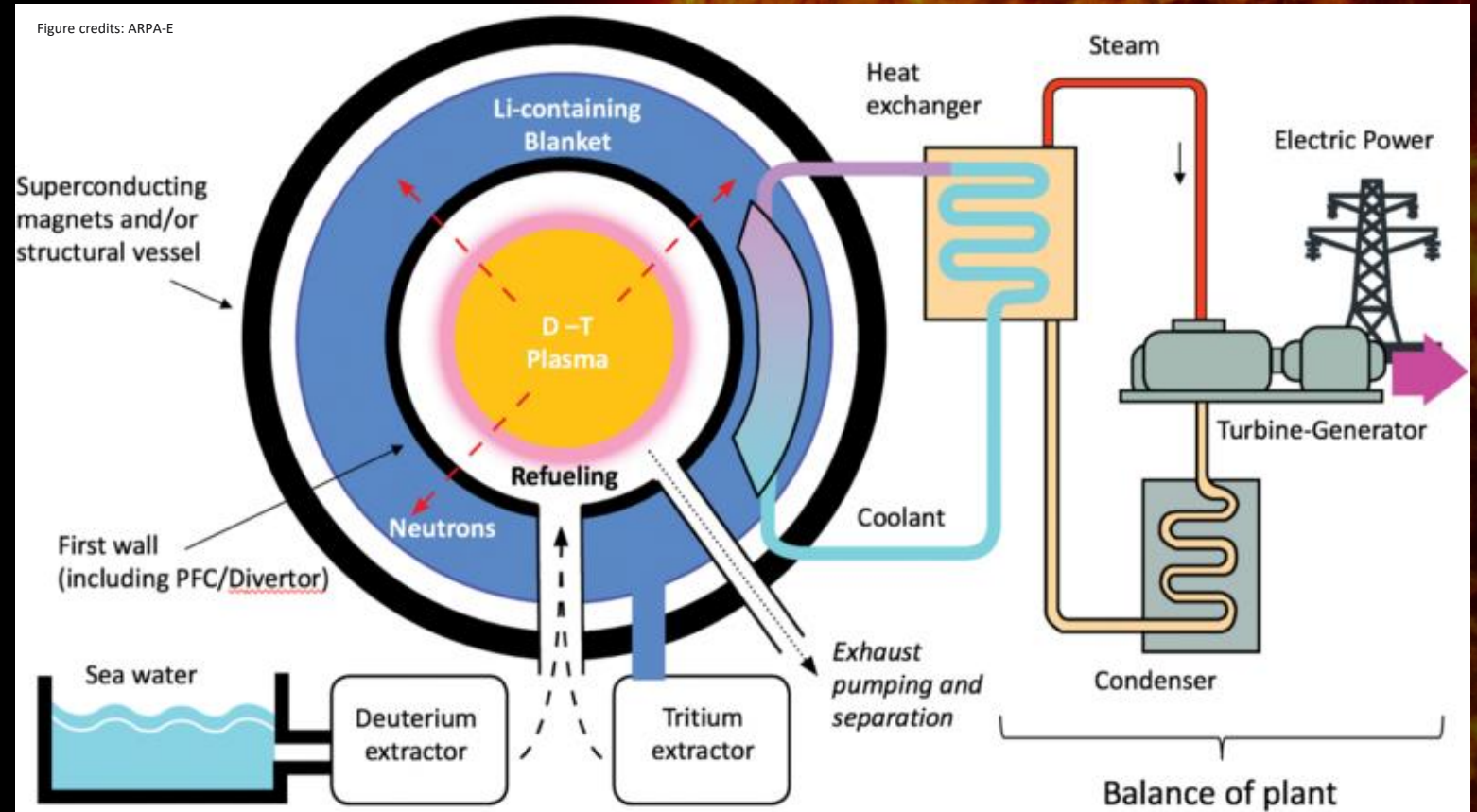
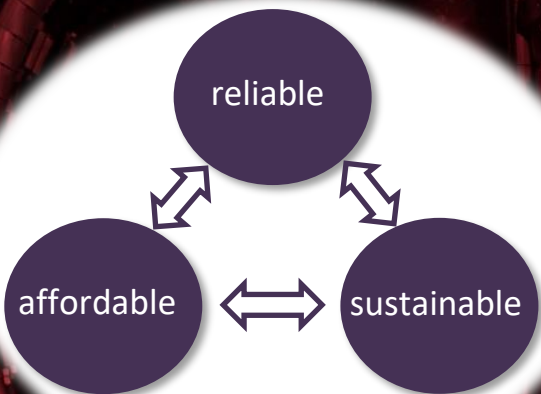
- ❑ 4 milj. × enemmän kuin kemiallinen reaktio (hiili, oljy, kaasu)
- ❑ 4 × enemmän kuin fissio (per massayksikko)

✓ 1000 MW_e voimalaitos – vuotuinen polttoainetarve

- ❑ fuusio: 300 kg D ja Lithium
- ❑ fissio: 30 tonnia rikastettua Uraania
- ❑ hiili: 2 400 000 tonnia; oljy: 10 milj. tynnyria

- Fuusiolla potentiaali olla merkittävä, puhdas *baseload* energialahde
 - täyttää “*energy trilemma*” vaatimukset

2. Fuusioenergiaa Maassa



- Fuusiolla potentiaali olla merkittävä, puhdas *baseload* energialahde
 - täyttää "*energy trilemma*" vaatimukset

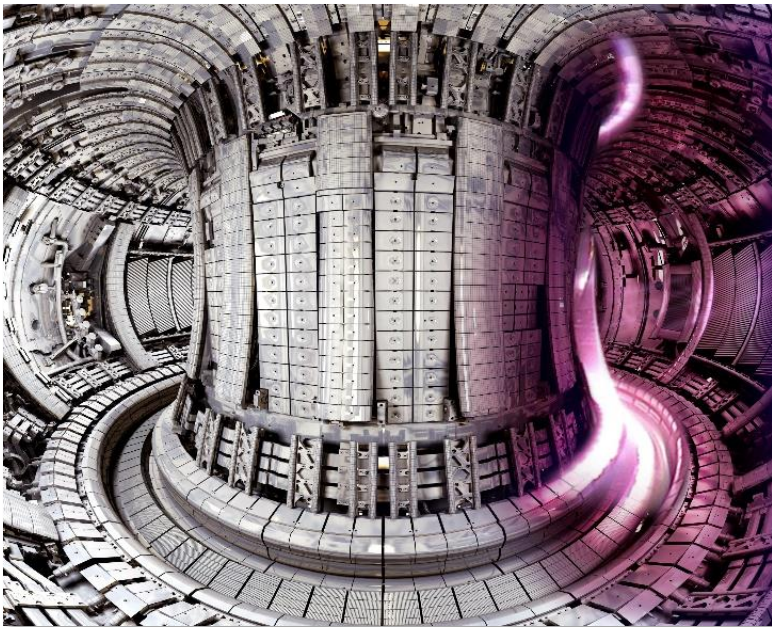
3. Fuusio tanaan ja huomenna

Miten?

- Lukuisia eri reaktorikonsepteja. Yleisimmat:

Magneettinen koossapito

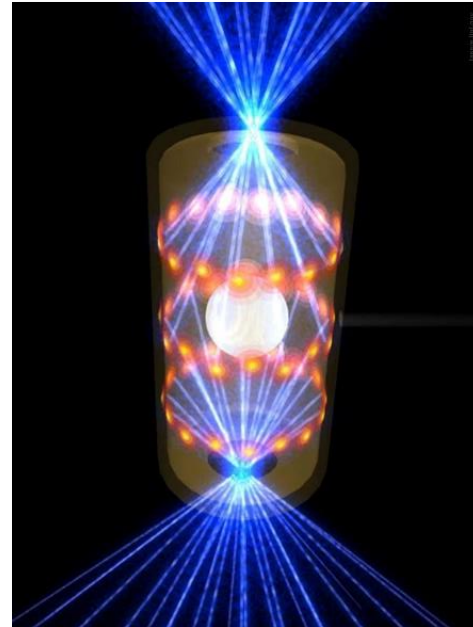
(magnetic confinement)



- Julkinen: ITER (kv), JET (EU & UK), WEST (FRA), ASDEX (GER), EAST (CHN), JT-60SA (JPN ja EU), DIII-D (USA), jne
- lukuisia yksityisiä firmoja

Inertiaalinen koossapito

(inertial confinement; laser)

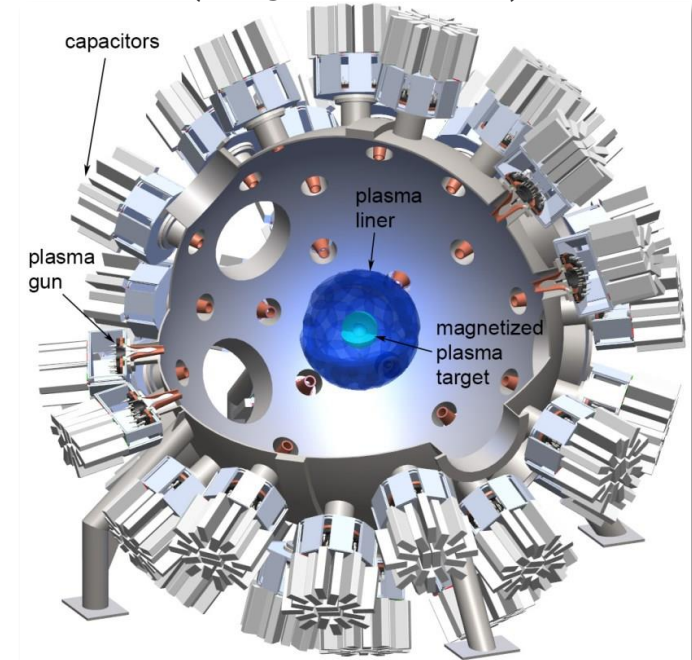


- USA: NNSA
- Japani: ICE roadmap
- joitain yksityisiä firmoja

FUUSIO / Kalle Heinola

Magneto-inertiaalinen

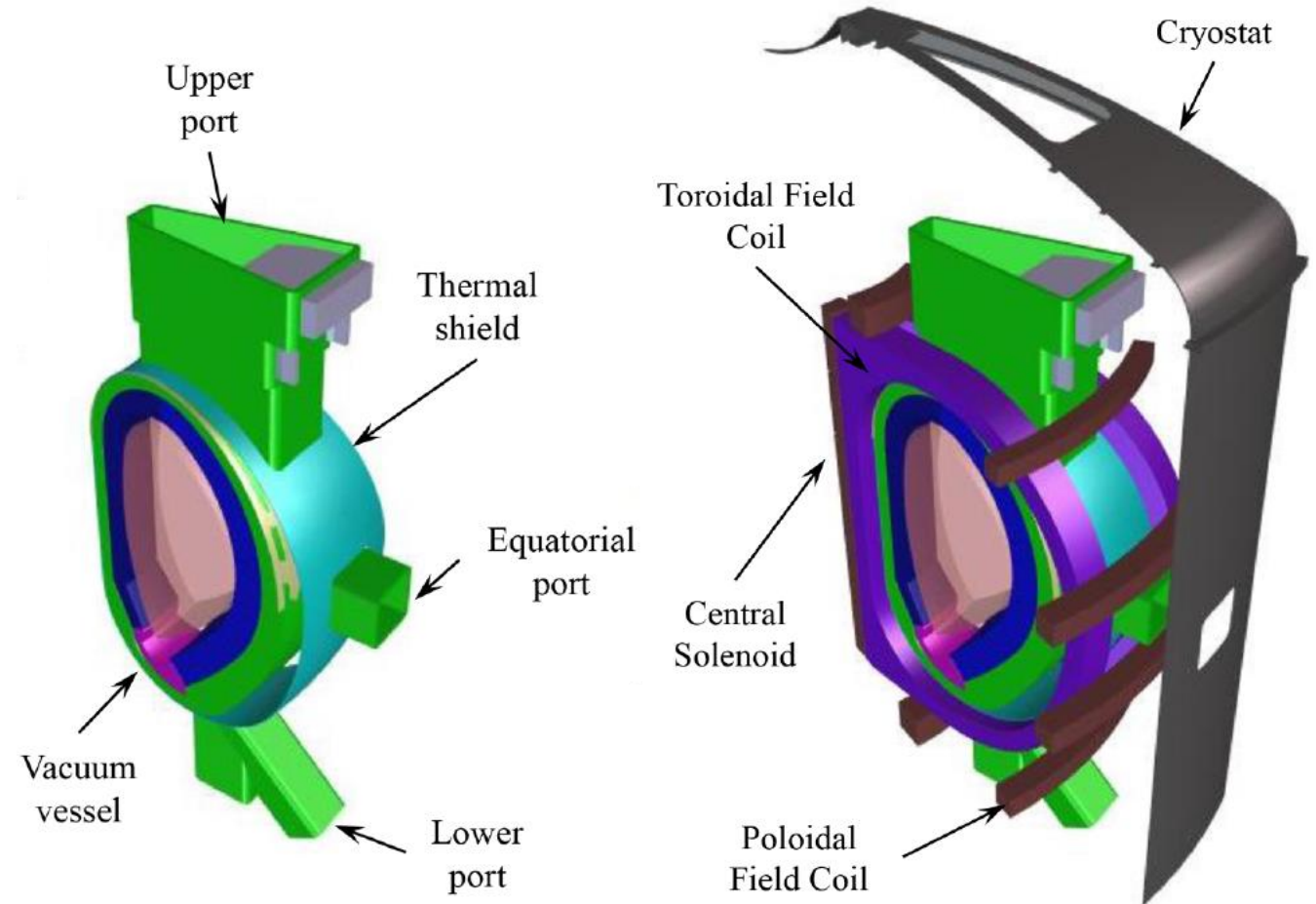
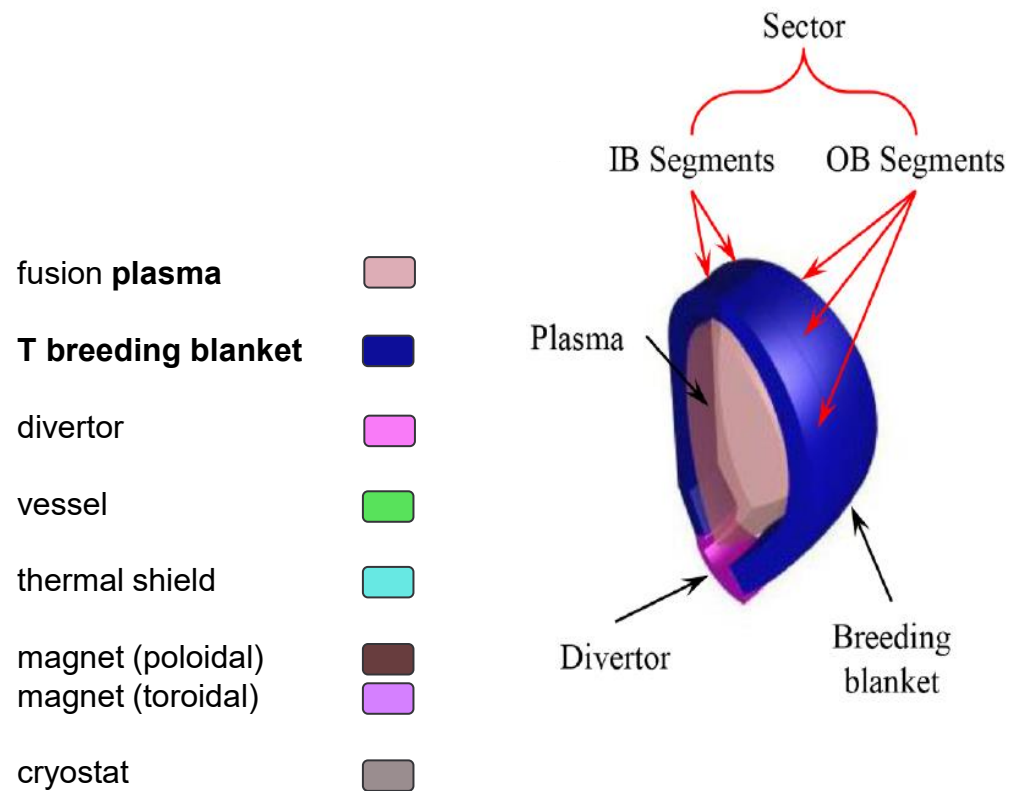
(magneto-inertial)



- joitain yksityisiä firmoja

3. Fuusio tanaan ja huomenna

Magneettinen koossapito



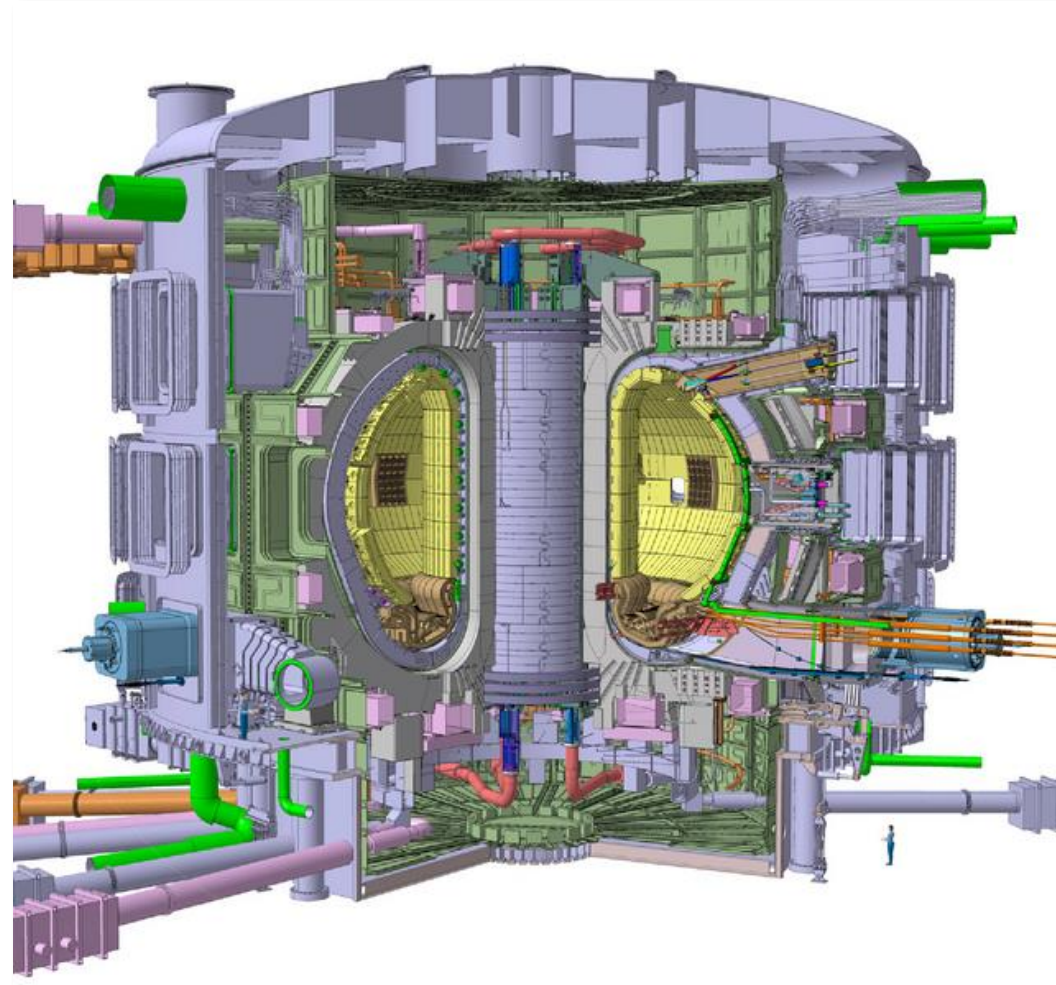
3. Fuusio tanaan ja huomenna

Magneettinen koossapito

ITER design:

tavoitteet ja
demonstrointi

- ✓ tehokkuus Q yli 1
($Q = 10$)
- ✓ itsetuotettu
fuusiopolttoaine
("T breeding")



3. Fuusio tanaan ja huomenna

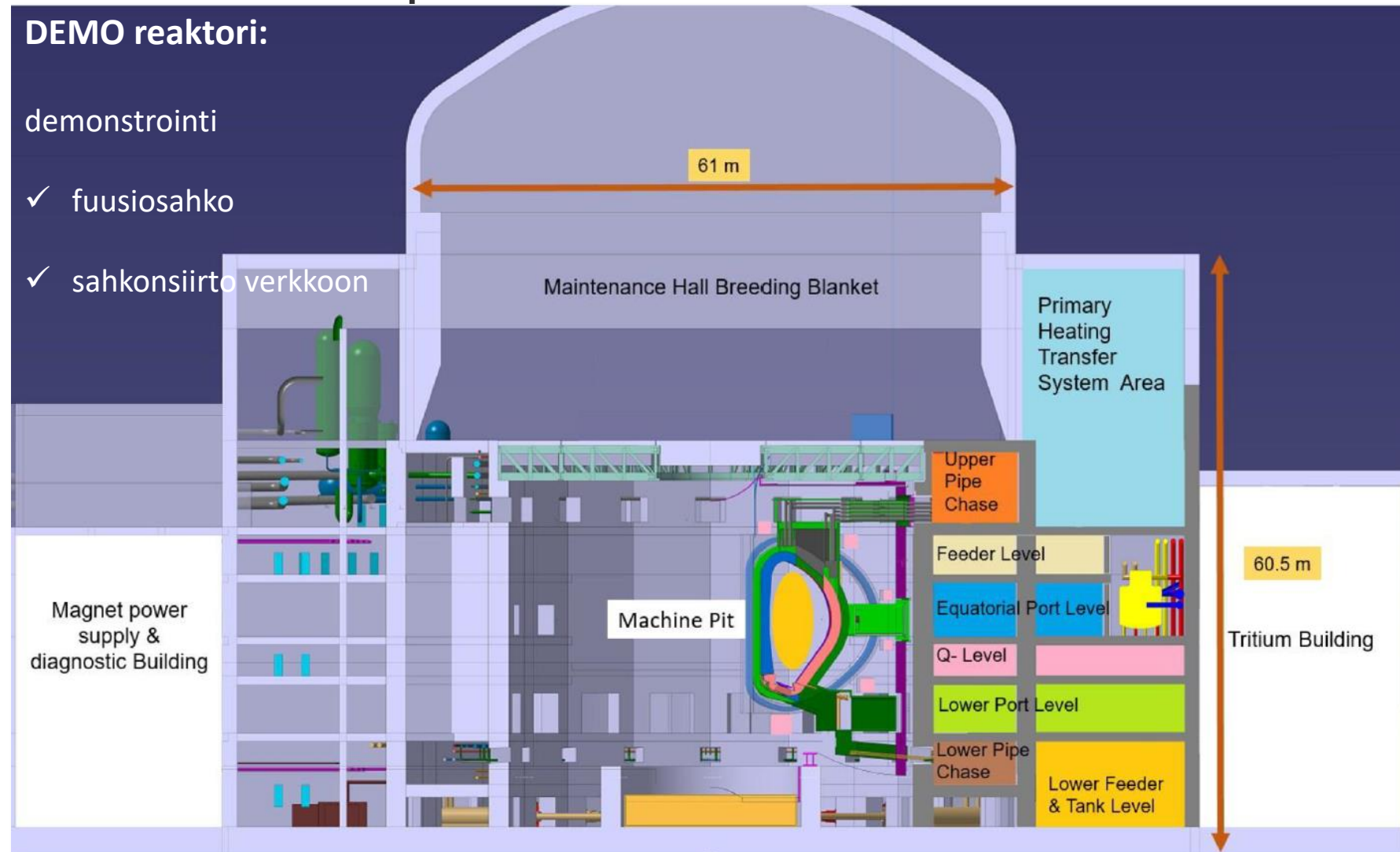
Magneettinen koossapito

DEMO reaktori:

demonstrointi

✓ fuusiosahko

✓ sähkönsiirto verkkoon



3. Fuusio tanaan ja huomenna

ITER

– suurin kans.valinen rakennushanke

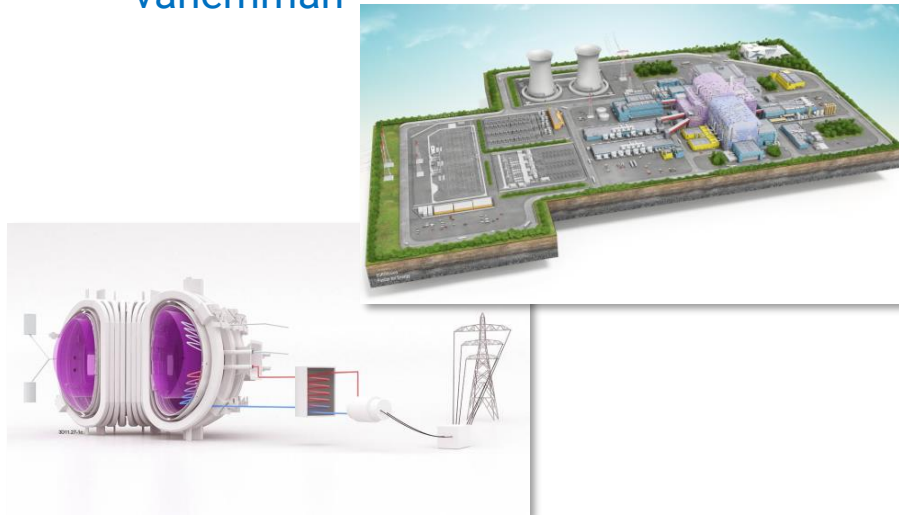
- EU, Japani, E-Korea, USA, Venäjä, Kiina, Intia
- Rakentaminen ja asennus ~10 y.
Kaytto 20 y.
- Kustannus: ~20 BEUR
- Tavoite $Q = 10$ ja Tritium tuotanto
- Pulssi: 400 sek, 500 MW_{th}



DEMO/pilotti

– teollisen fuusiosahkon demonstrointi

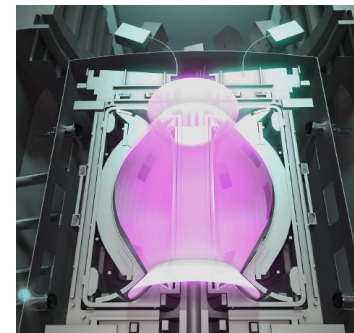
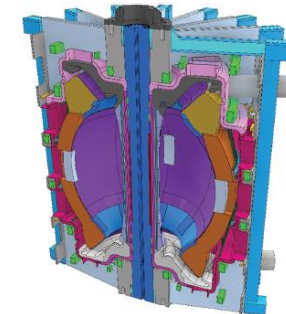
- Useita hankkeita: EU, UK, USA, Japani, E-Korea, Kiina, Venäjä, ...
- Rakentamisen aloitus 2024 – 2040+
- Kustannus: NN BEUR
- Tavoite jopa $Q > 100$
- Pulssi: useita tunteja, 2 – 4 GW_{th} tai vähemmän



Esimerkki

Public-Private Partnership

- STEP-reaktori (Iso-Britannia, West Burton)
- Rakentaminen: 2024 – ,
operointi: 2040 alkaen
- Kustannus: 2.5 B£ (design £220M)
- Tavoite $Q \leq 10$
- Pulssi: ~ useita tunteja, 1.6 – 1.8 GW_{th} (100 – 200MW_e)



3. Fuusio tanaan ja huomenna

ITER

– suurin kans.valinen rakennushanke



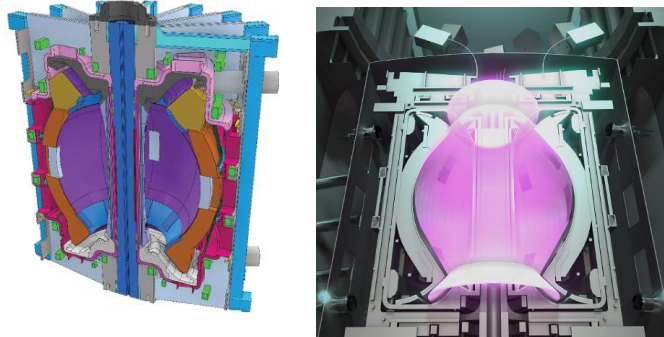
DEMO/pilotti

– teollisen fuusiosahkon demonstrointi



STEP

– kansallinen ja julkinen projekti

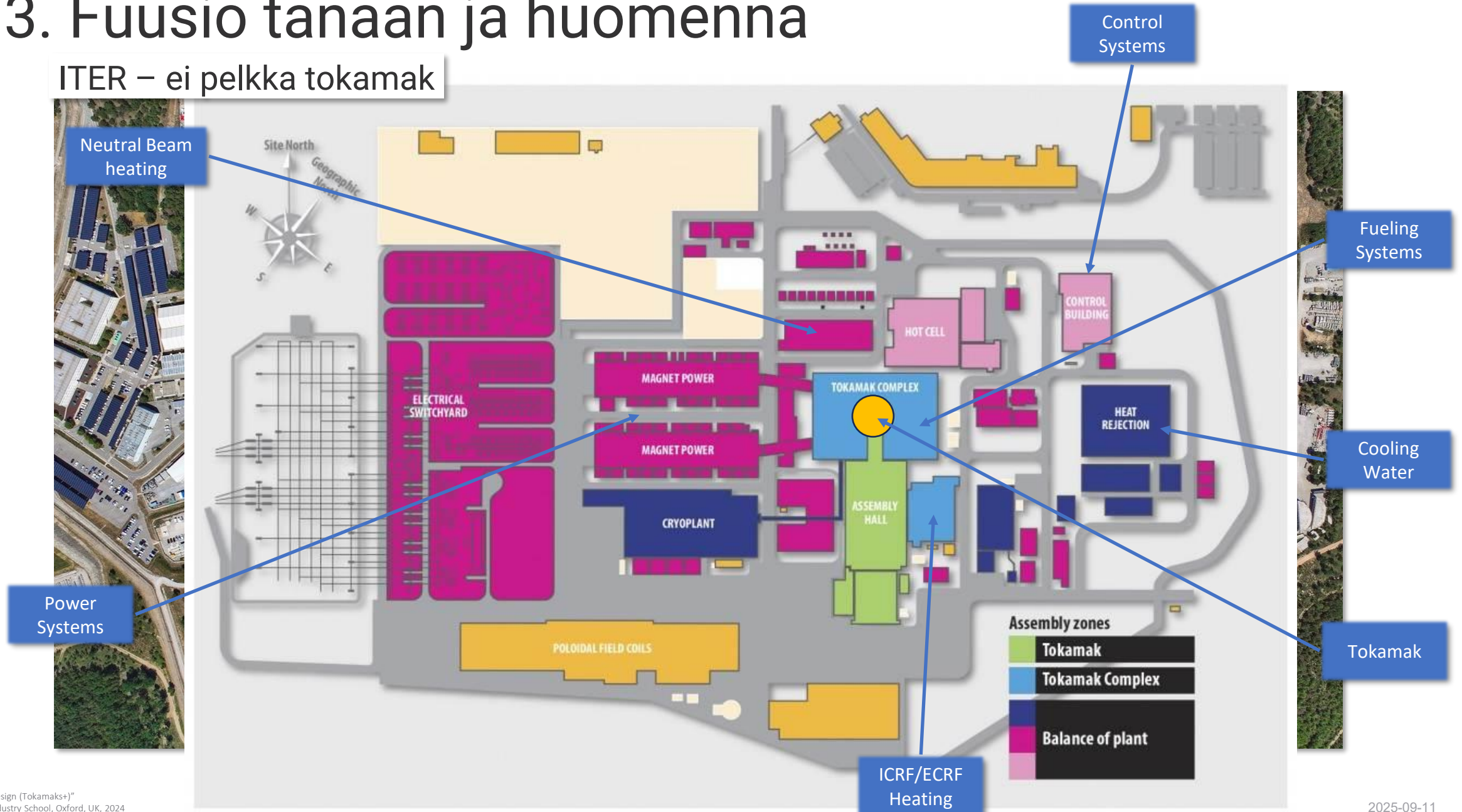


	Fossile boiler	Fission	ITER	DEMO	STEP	
Pintakuormitus						
- keskim.	0.2	0.7	3 – 5	0.5 – 1.5	1 – 5	MW/m ²
- max.	0.3	1.5	10 – 20	10 – 20	10 – 20	MW/m ²
neutronivaurio	-	10	0.5	20 – 50	0.1 per day	dpa
Full power life	25	4	0.1			vuotta

avaruussukkula ~6 MW/m²
hitsausliekki ~15 MW/m²

3. Fuusio tanaan ja huomenna

ITER – ei pelkka tokamak



3. Fuusio tanaan ja huomenna

Magneettinen koossapito

Spekseja

- ✓ Plasman ydin 100 milj. °C
- ✓ Fuusiossa vapautuva Helium lammittaa plasmaa
- ✓ Plasman sisaseinalla joitain satoja °C
 - Seinämateriaalit avainasemassa
- ✓ Ymparoiva Li-pohjainen vaippa jarruttaa neutronit
 - **Tritiumin muodostuminen**

Komponentit ja materiaalit

- ✓ Hyvä lammonjohtavuus
- ✓ Hyvä lammonjohtavuus
- ✓ Hyvä lammonjohtavuus
- ✓ Kestää fyysistä kulutusta, **neutronipommitusta** ja mekaanisia stresseja
- ✓ Ei loukkuunnuta Tritium-polttoainetta
- ✓ ...



Picture credit:
ITER DG Pietro Barabaschi:
"The ITER Project: moving forward to an updated baseline"
presented at SOFT 2024, Dublin, Ireland, 2024

3. Fuusio tanaan ja huomenna

Julkinen sektori: roadmap (esim EURATOM-rahoitteinen EUROfusion consortium)

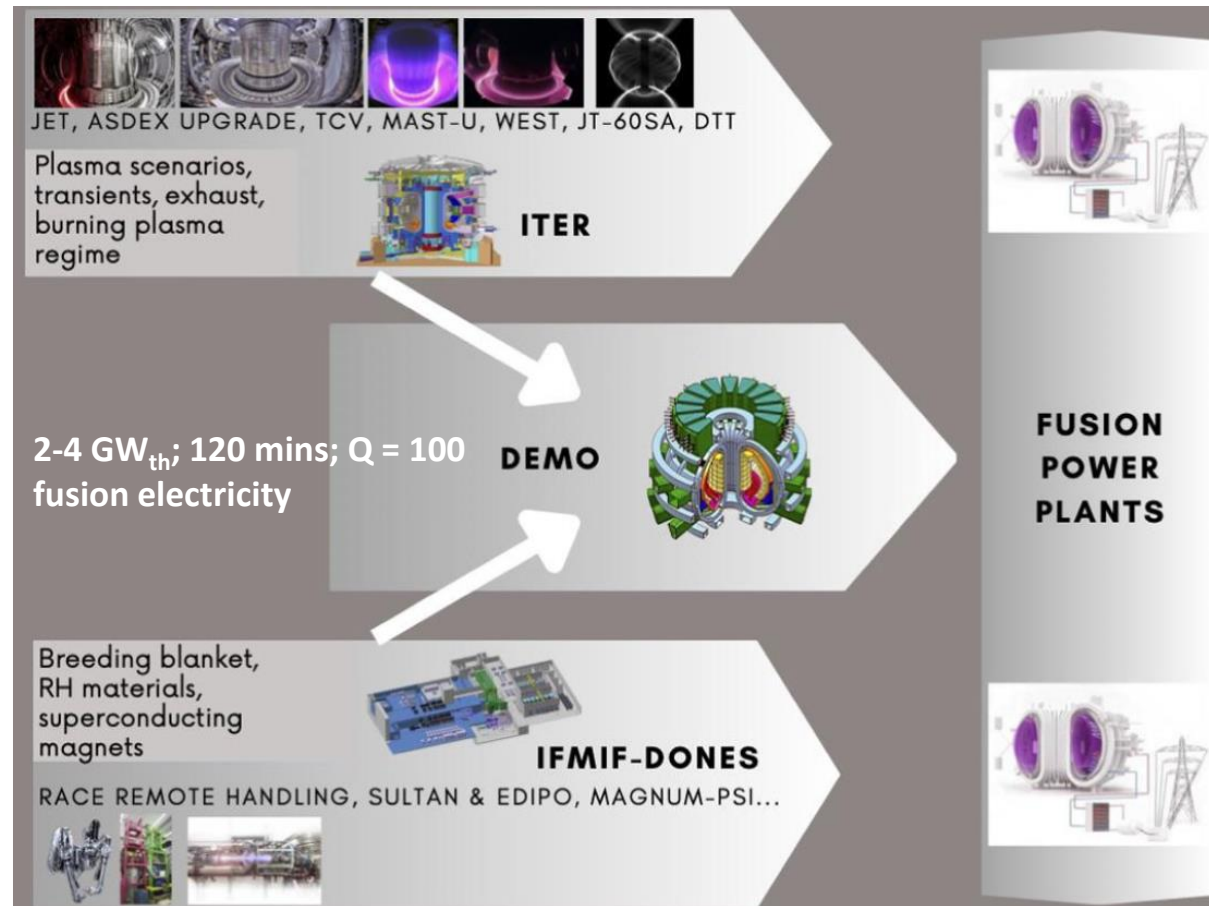
- Intensiivinen kansainvalinen yhteistyö fuusioenergian tuottamiseksi

nykypaiva: “from lab to track”
kymmenia MW; pulssit kymmenia sek.

ITER 500 MW_{th}; 10 mins; Q = 10

high-flux neutron-vaurio -kokeet;
komponenttien R&D

research & engineering:
materiaalit, teknologiat



“Kaupallinen FPP
joskus 2050+ jälkeen”

3. Fuusio tanaan ja huomenna

Julkinen sektori: tavoitteena GW_e voimala



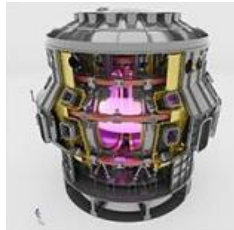
valtavat plasmavoluminit & neutronituotto

nykypaiva



JET

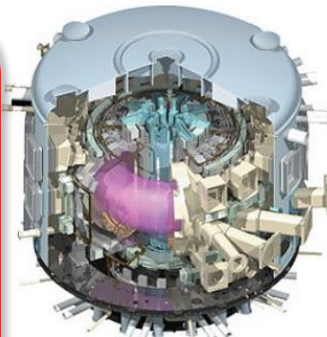
80 m^3



JT-60SA

135 m^3

lukuisia tukimuskaytossa
olevia fuusiolaitoksia
(eri kokoisia & eri tarkoituksiin)

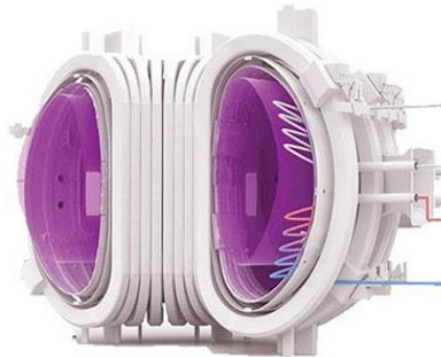


ITER

800 m^3

(one-third the size of an Olympic swimming pool)

$\sim 500 \text{ MW}_{th}$

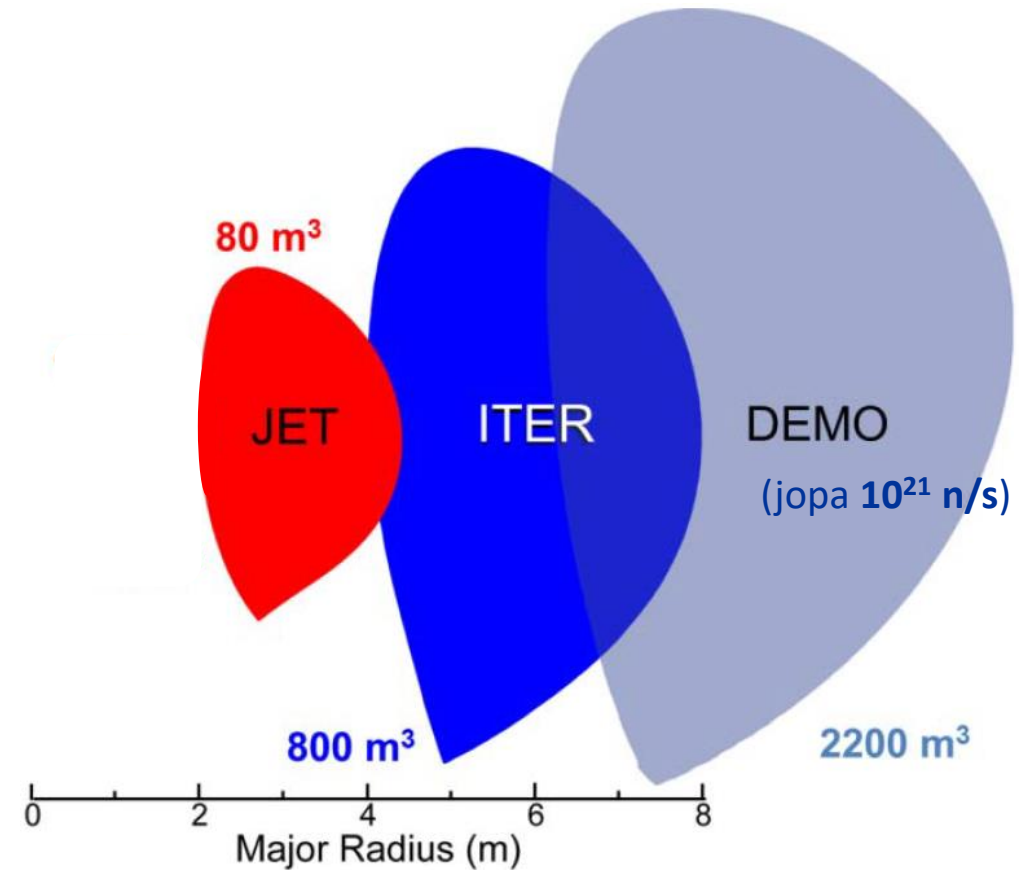


DEMO

$\sim 1000 - 3500 \text{ m}^3$

(half to one and a half times the size of an Olympic swimming pool)

$\sim 2000-4000 \text{ MW}_{th}$



3. Fuusio tanaan ja huomenna

DEMO: neutronituotto

Suurin neutronikuorma

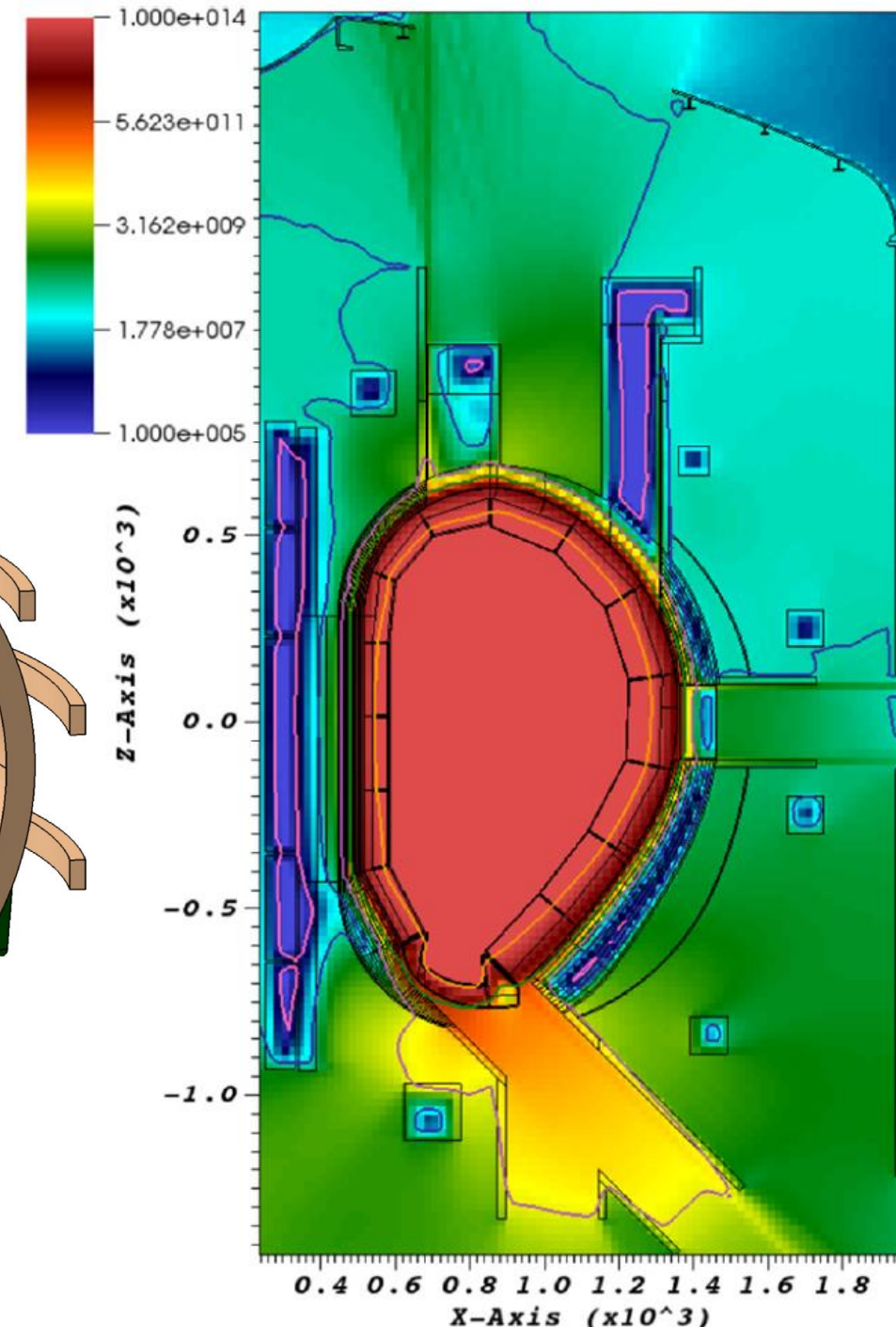
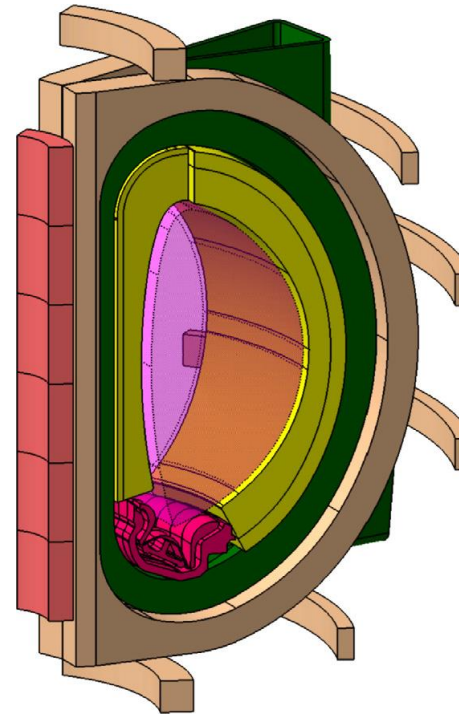
>> plasmakammio,
in-vessel komponentit

Rakenteiden materiaalit ei korkeasti aktivoituvia

plasma

magneetit

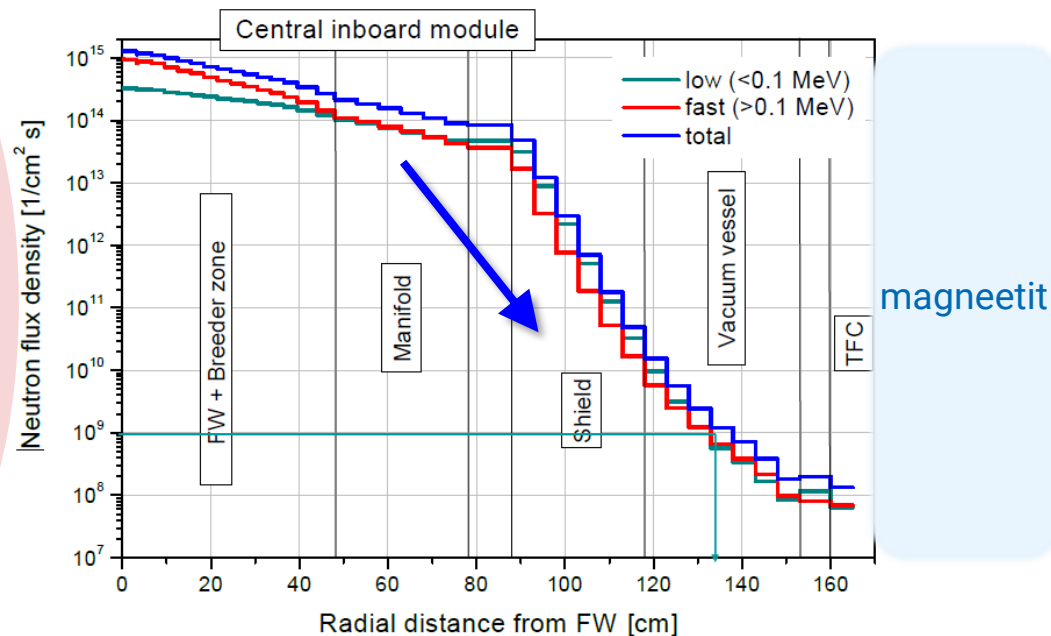
Component	Inboard thickness (mm)	Outboard thickness (mm)	Material composition
First wall armour	2	2	W
First wall	30	30	EUROFER 63.5%, He 37.5%
Tritium Breeding zone	475	775	Heterogeneous, EUROFER structure, He coolant, Pb-15.8 at.%Li, 90% ⁶ Li
Manifold	300	400	LiPb 5%, EUROFER 28%, He 67%
Shielding	300	400	WC 65%, EUROFER 10%, H ₂ O 25%
Vacuum vessel	350	650	SS316 61%, H ₂ O 37%, B 2%
TF coil casing	60	60	SS316



3. Fuusio tanaan ja huomenna

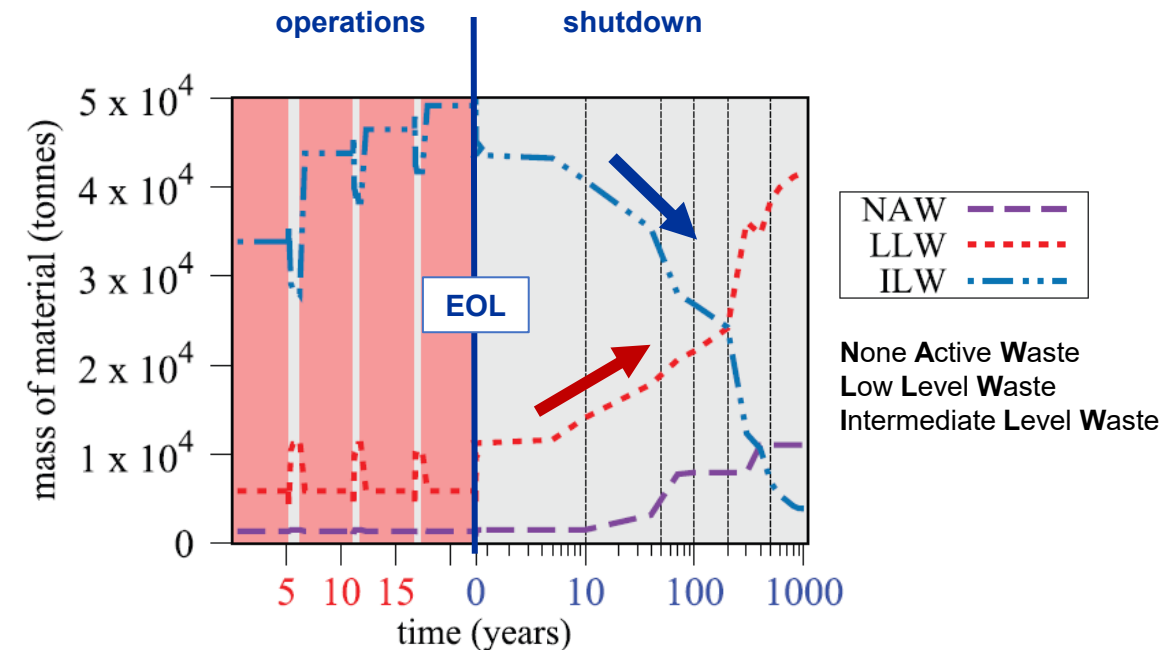
DEMO: neutronituotto ja aktiivisuus

- ✓ hallittu *neutron transport* reaktorikuoressa



- uusi Tritium: tuotanto *breeding* –alueella/vaipassa
- neutronisuojaus ulkokuorelle ja magneeteille

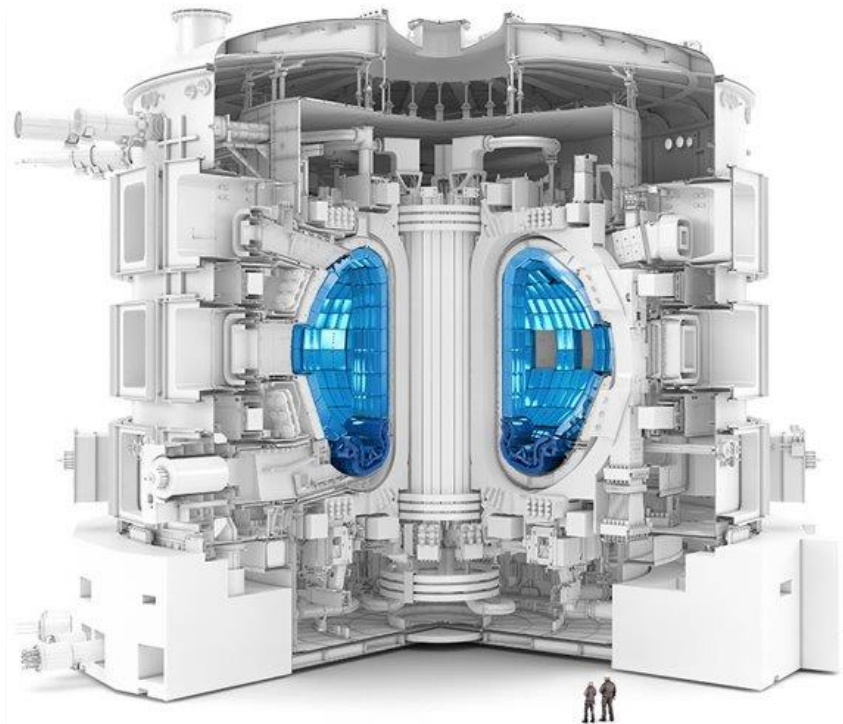
- ✓ DEMO: aktivoitumisen kehitys



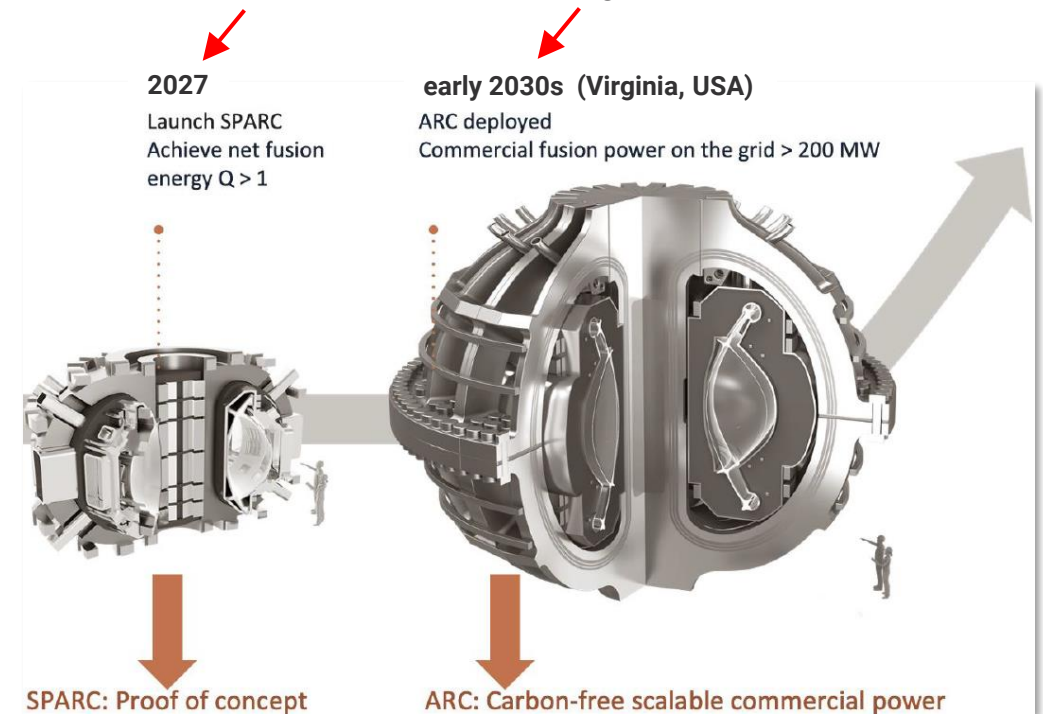
- ei korkea-aktiivista jätettä
- ei pitkaikaista jätettä

3. Fuusio tanaan ja huomenna

Julkinen sektori: isot laitokset esim. ITER, DEMO & FPP ($\sim \text{GW}_e$)



Yksityinen & kansallinen sektori: pienemmat laitokset, uudet & ketterät ratkaisut, pienempi MW_e , nopeampi toimitus



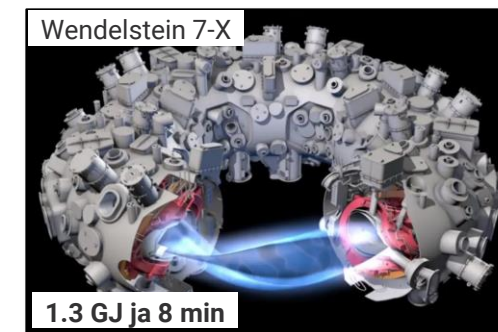
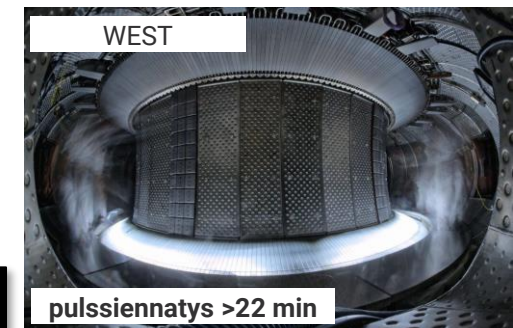
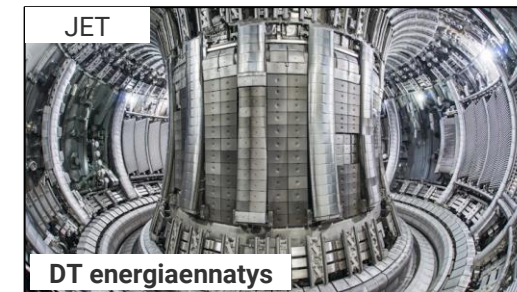
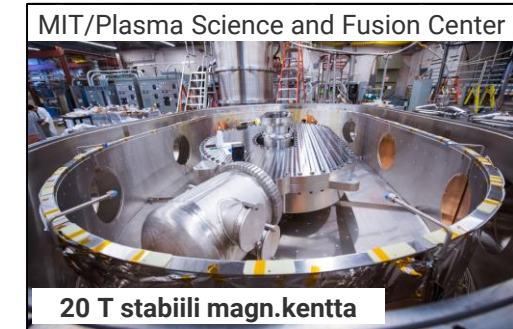
Source: Commonwealth Fusion Systems, <https://cfs.energy>

**Julkinen & yksityinen sektori –
yhteensä 172 fuusiolaitosta globaalisti
toiminnassa/rakenteilla/suunniteltu (26 FPP)**

3. Fuusio tanaan ja huomenna

Julkisen ja yksityisen sektorin kehitys

- **Kasvanut optimismi** fuusioenergiaan – teknologiset edistysaskeleet (useita!), mm.
 - ✓ **USA, National Ignition Facility:** inertiaalifuusiossa saavutettu historiallinen $Q > 4$ (seka sen toistettavuus) DT-kokeessa
 - ✓ **USA, MIT/Plasma Science and Fusion Center:** uudet korkean lampotilan suprajohdemagneetit, maailmanennatys **20 Tesla**
 - ✓ **EU ja UK, Joint European Torus (JET):** maailmanennatys energiatuotannossa: DT-plasmalla 69 MJ käyttämällä **0,2 mg** polttoainetta
 - ✓ **Ranska, WEST-tokamak:** pulssiennatys **>22 min**
 - ✓ **Saksa, Wendelstein 7-X:** hallittu energiakontrolli 1.3 GJ pulssin kestaessa 8 min
 - ✓ **UK, MAST-U:** tehokas energian poisto uudentyyppisellä komponentilla ("Super-X divertor"): 20 × pienempi energiakuorma



Tanaan – kilpajuoksu fuusiossa: power balance, pulssin pituus, Q-arvo, ... + AI !

3. Fuusio tanaan ja huomenna

Julkisen ja yksityisen sektorin kehitys

- **Kasvanut optimismi** fuusioenergiaan

wnn
world nuclear news

Tokamak Energy gives details of pilot fusion energy plant design

Wednesday, 16 October 2024

The UK-based company gave first details of a high-field spherical tokamak plant "capable of generating 800 MW of fusion power and 85 MW of net electricity" as part of the USA's Bold Decadal Vision for Commercial Fusion Energy programme.

INTERESTING
ENGINEERING

Nuclear fusion gets \$3.4 billion boost as UK repurposes old coal plant site

Updated: Jun 12, 2025 01:25 PM EST

wnn
world nuclear news

Fusion machines advance in Spain and New Zealand

Tuesday, 22 October 2024

IEEE Spectrum

Is China Pulling Ahead in the Quest for Fusion Energy? > New reactors signal China's plan to lead the world in fusion R&D

BY TOM CLYNES

29 APR 2025 | 5 MIN READ |

wnn
world nuclear news

Japan launches FAST fusion project

Tuesday, 12 November 2024

The FAST (Fusion by Advanced Superconducting Tokamak) project has been launched in Japan with the aim of achieving fusion-based power generation by the end of the 2030s.

INNOVATION
NEWS NETWORK

Germany boosts investment in fusion research to enhance collaboration

Energy □ 3rd December 2024



Applied Radiation and Isotopes

Available online 4 September 2025, 112163

In Press, Journal Pre-proof What's this?



Theoretical novel medical isotope production with deuterium-tritium fusion technology

Lee J. Evitts ^a , Philip W. Miller ^b, Chiara Da Pieve ^c [#], Andrew Turner ^a, Stefano Borini ^a

TC TechCrunch

Nvidia, Google, and Bill Gates help Commonwealth Fusion Systems raise \$863M

August 28, 2025

3. Fuusio tanaan ja huomenna

Julkisen ja yksityisen sektorin kehitys

- **Kasvanut optimismi** fuusioenergiaan – teknologiset edistysaskeleet
- **Levittynyt huippuosaaminen** eri puolilla maailmaa: USA, UK, Kiina, Saksa, Ranska ja Japani johtavia maita
- Kasvava kiinnostus ja investointi **Public-Private Partnerships** –hankkeisiin
- **Regulatory framework** – USA ja UK “fuusiota ei reguloida kuten fissiota”; Saksa, Kiina, Japani ja Kanada arviointi käynnissä. **Suomi**: uusi YVL.

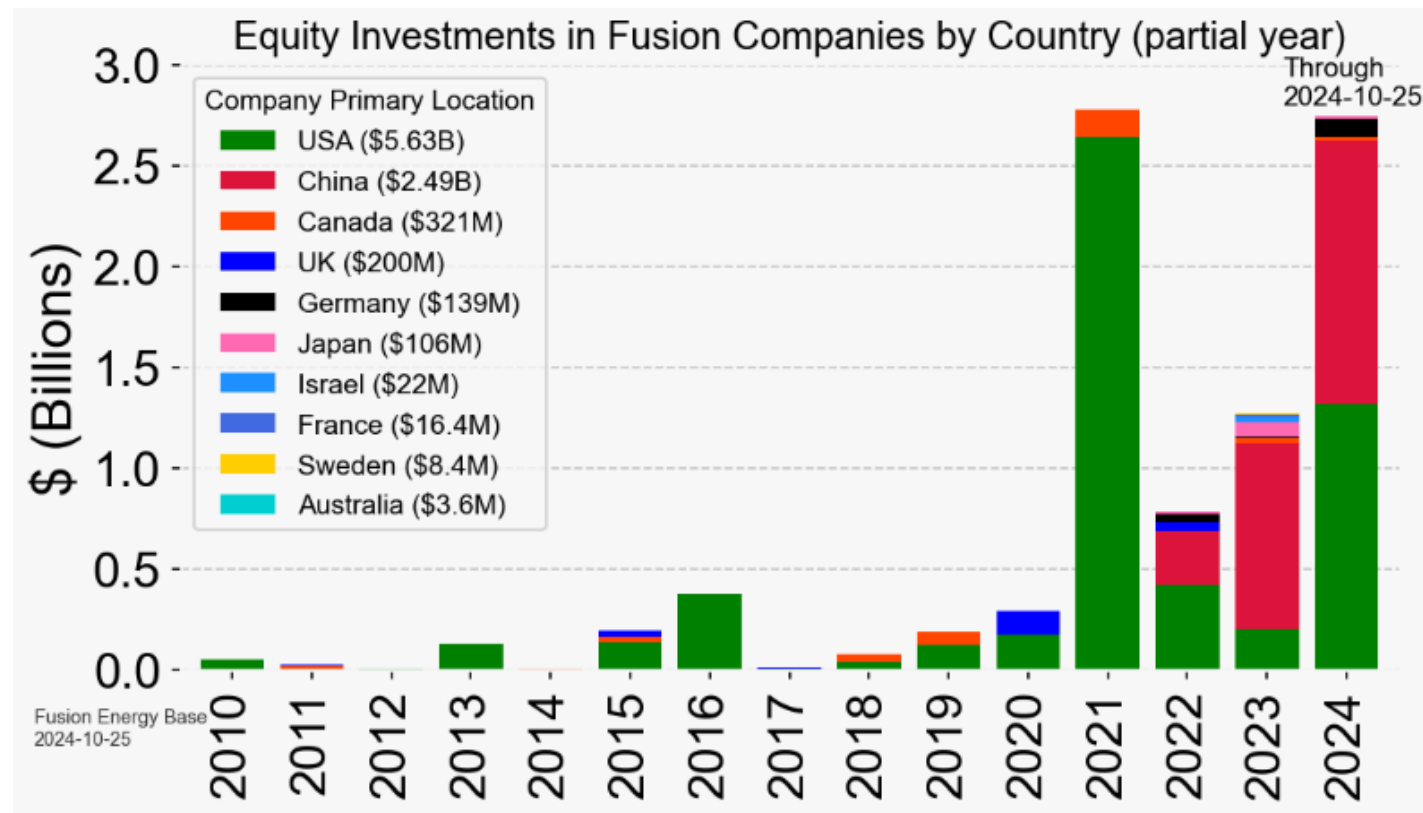
Silti – haasteita edelleen olemassa

- ✓ **reaktorimateriaalit**: raju neutronipommitus, korkeat lampotila- ja magn.kenttavaihtelut
- ✓ **tritium-tuotanto** (*tritium breeding*): tuotto, siirto, varastointi, kierto polttoaineeksi
- ✓ **operatiivisten komponenttien huolto ja ylläpito**: robotiikka ja kauko-ohjaus
- ✓ **järjestelmien toimivuus kokonaisuutena**
- ✓ **epastandardit ohjaussysteemit**
- ✓ **Regulatory framework certainty**
- ...
- ✓ **puuttuva kokemus rakentaa kompleksisia fuusiolaitoksia**: tarve vahvalle järjestelmasuunnittelulle ja projektijohtamiselle (kokemukset fissiosta apuna?)

3. Fuusio tanaan ja huomenna

Yksityinen sektori – investointien vyöry

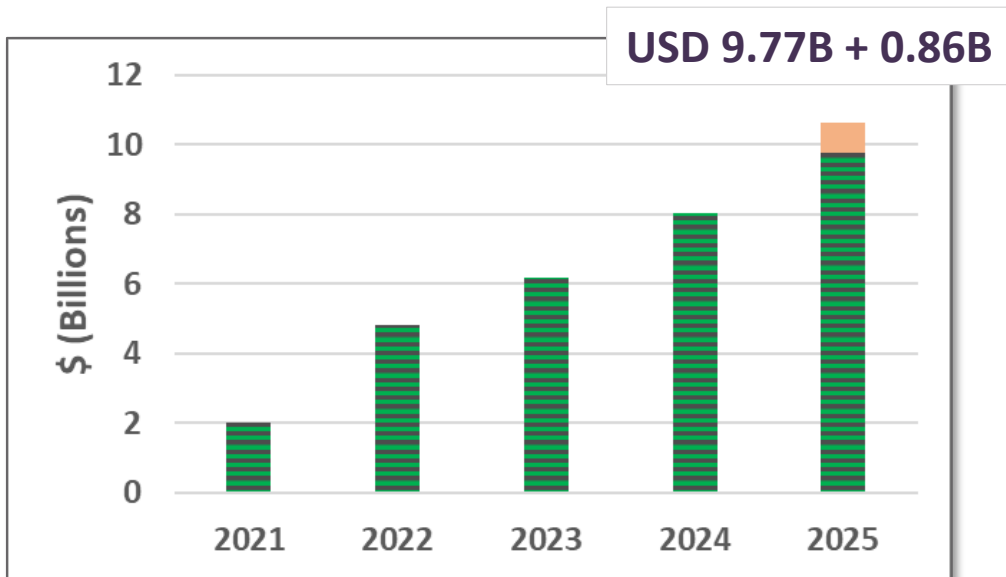
Maakohtaiset fuusioinvestoinnit 2010-2024 lokakuu



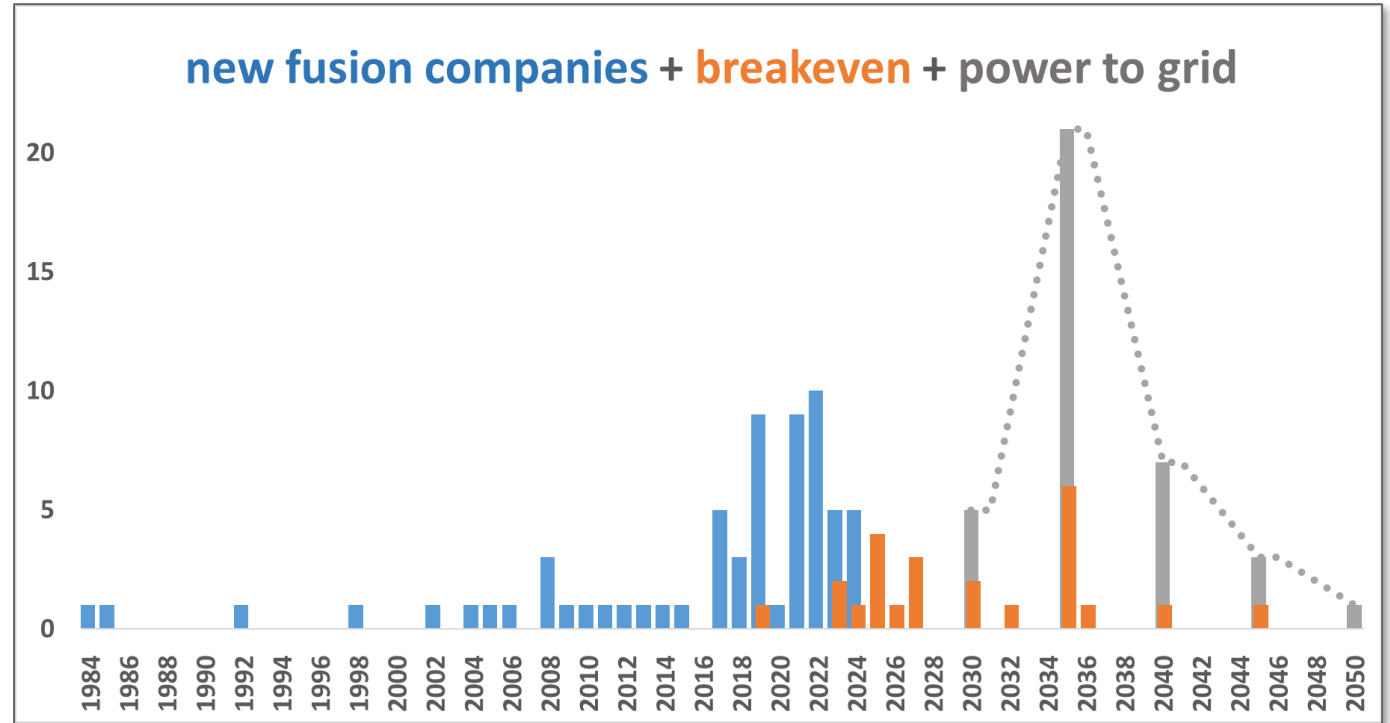
3. Fuusio tanaan ja huomenna

Yksityinen sektori – investoinnit ja fuusioenergian horisontti

Globaali kumulatiivinen investointi 2021~2025



**“Kaupallista fuusioenergiaa
alkaen 2030-2040”**



Data compiled by K. Heinola. Sources:
Fusion Industry Association survey – The Global Fusion Industry 2022-2025
Fusion companies: https://github.com/alfkoehn/fusion_plots/blob/master/fusion_companies/fusion_companies.md

- 2025: yksityisten fuusioyhtiöiden lkm 53
- lukuisia konsepteja; *ketteriä* ratkaisuja; ripea aikataulu
- ❖ fuusio 2050-luvulla: “\$1 trillion market”



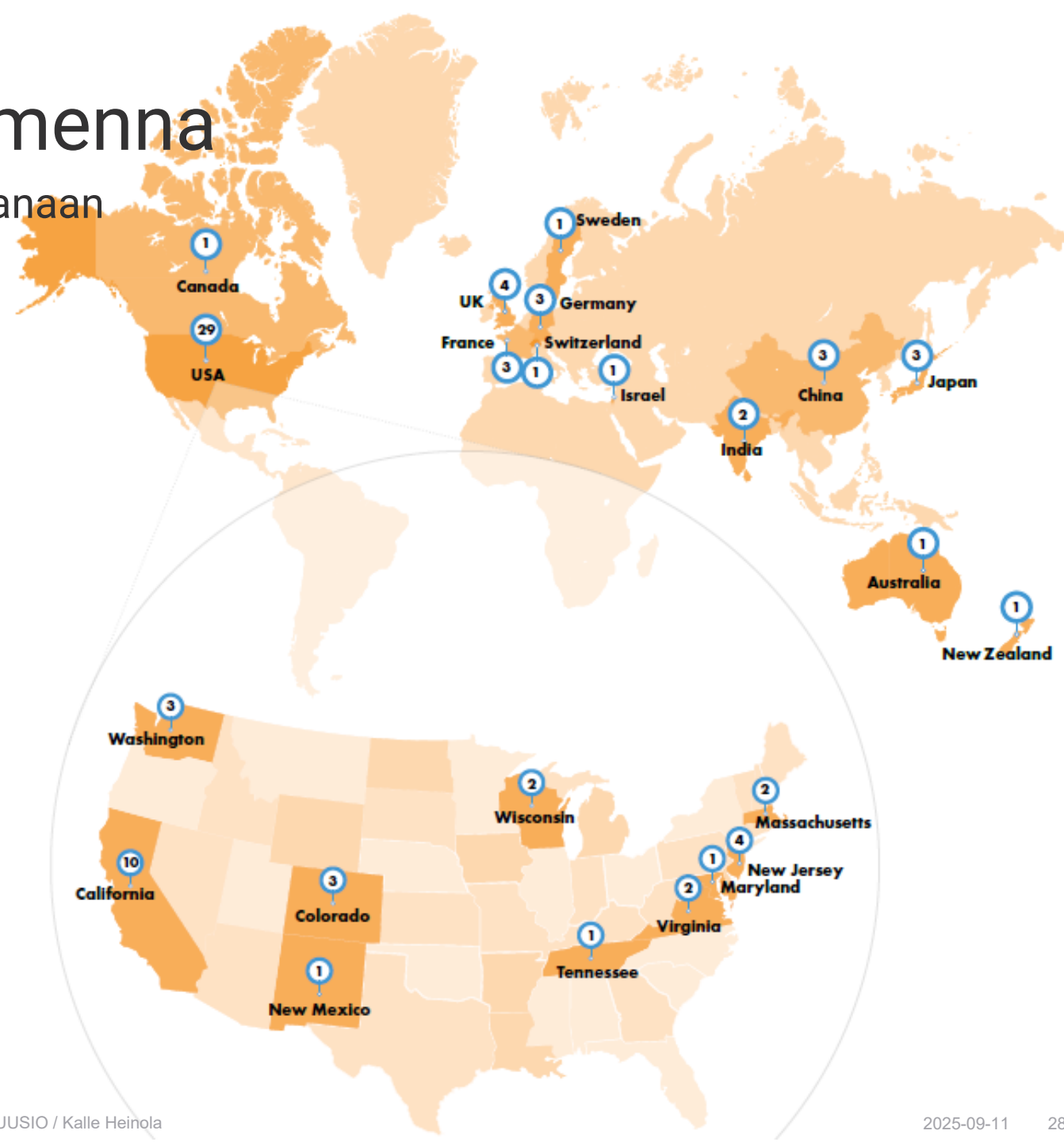
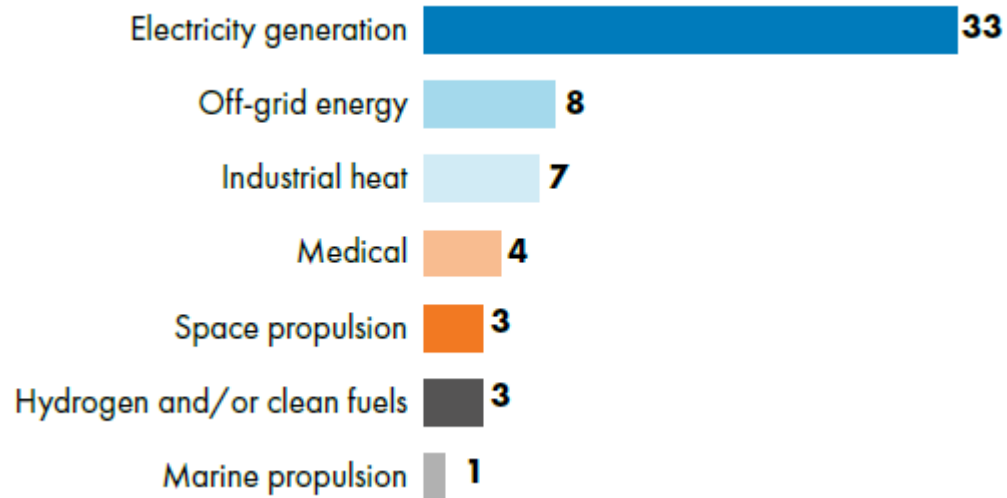
FUSION ENERGY WORLDWIDE DEMAND REPORT
Release date is August 27th, 2024

<https://ignitionresearch.com/reports-fusion-energy-worldwide-demand-market-report/>

3. Fuusio tanaan ja huomenna

Yksityinen sektori – toimijat maailmassa tanaan

Areas of private fusion energy market



3. Fuusio tanaan ja huomenna

IAEA ja fuusio

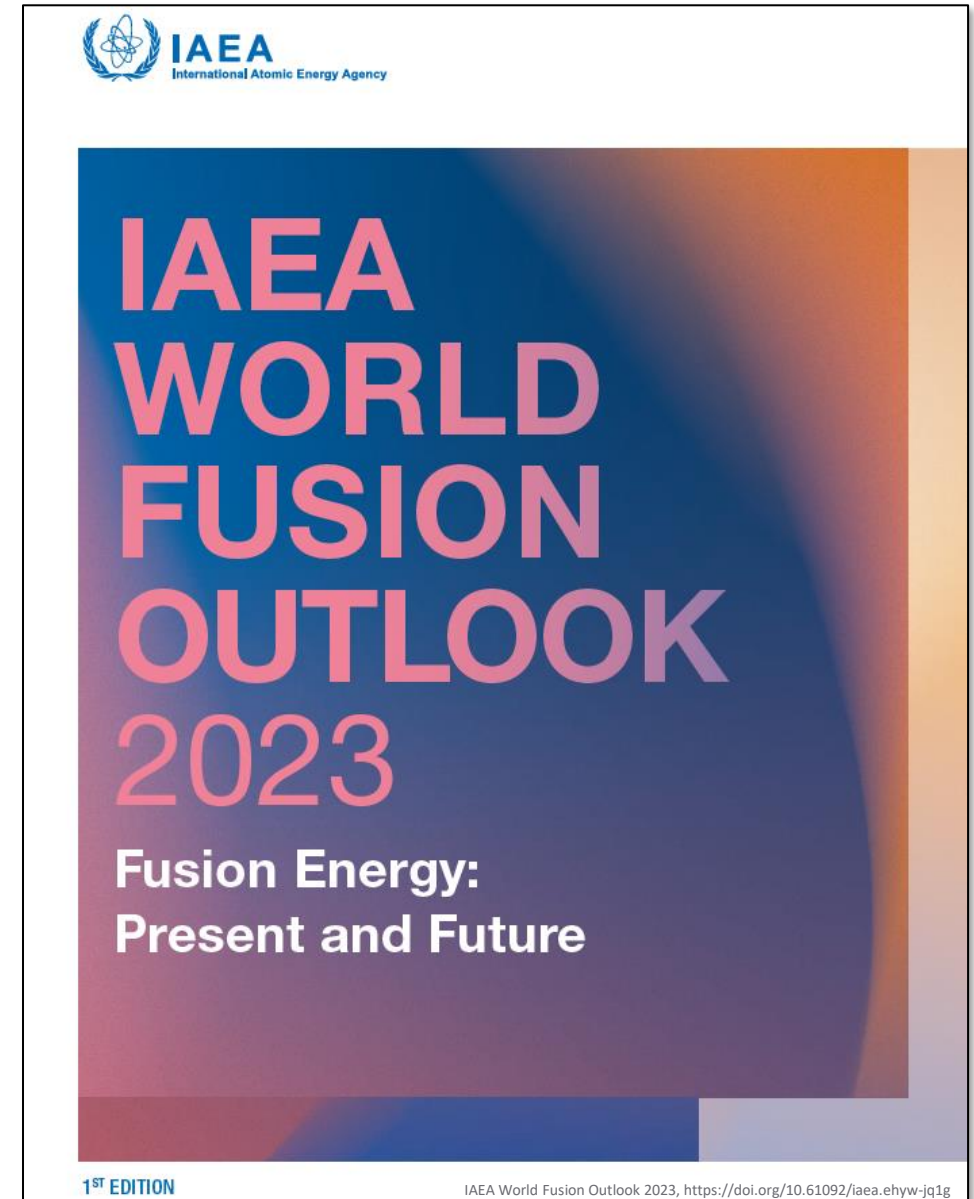
Vuodesta 1958 fuusion R&D tukemista

Fuusioteknologian kehittyessä ja koelaitosten lkm kasvaessa, myös IAEAn rooli ja merkitys jäsenmaille kasvanut.

IAEA tukee voimakkaasti jäsenmaiden (180) fuusion R&D sekä tulevaisuuden teknologioiden käyttöönottoa.

Fuusio kattaa kaikki IAEAn tekniset osastot ja yksiköt

- Plasma ja materiaalitiede, neutroniikka, fundamentaalinen fuusiodata, fuusioteknologiat
- *Regulatory frameworks*, lissensiointi, turvallisuus, *waste management*, jne



3. Fuusio tanaan ja huomenna

IAEA ja fuusio

Aktiviteetit

- ✓ **Kansainvalisen fuusioyhteison kokoaja** (*hub, forum*)
- ✓ *Framework* fuusioenergian käyttöönnotolle
- ✓ Koordinoitua, globaalia fuusion R&D –projekteja
- ✓ Fuusiodata: tietokannat, palvelut, levitys
- ✓ Fuusioon liittyvät yleiset suunnittelukriteerit ja *codes & standards*
- ✓ muut aktiviteetit

konferenssit, *workshopit*, koulut –

- Fusion Energy Conference (vuodesta 1961) – maailman suurin fuusiotapahtuma

World Fusion Energy Group

- vuodesta 2024; kokoaa yhteen kaikki fusion *stakeholderit*; julkinen ja yksityinen

kumppanuuksien muodostaminen

- maailman merkittävimmät fuusioinstituutit



3. Fuusio tanaan ja huomenna

IAEA ja fuusio

Aktiviteetit

- ✓ Kansainvälisen fuusioyhteison kokoaja (*hub, forum*)
- ✓ **Framework fuusioenergian kayttoonotolle**
- ✓ Koordinoidut, globaalit fuusion R&D –projektit
- ✓ Fuusiodata: tietokannat, palvelut, levitys
- ✓ Fuusioon liittyvät yleiset suunnittelukriteerit ja *codes & standards*
- ✓ muut aktiviteetit

Aiheet, mm.

- **Fusion Key Elements** –dokumentti
- fuusioalusta (*platform*)
- ohjeita: fuusion *safety assessments* ja *regulatory framework*
- mallinnus ja simulointi (neutroniikka, *digital twins*, etc)
- järjestelmaintegraatio ja rakentaminen
- KM
- *energy justice* ja sosiaalinen lisensointi
- fuusiolaitosten kapasiteetti ja integrointi verkkoon

3. Fuusio tanaan ja huomenna

IAEA ja fuusio

Aktiviteetit

- ✓ Kansainvälisen fuusioyhteison kokoaja (*hub, forum*)
- ✓ *Framework* fuusioenergian käyttöönnotolle
- ✓ **Koordinoidut, globaalit fuusion R&D –projektit**
- ✓ Fuusiodata: tietokannat, palvelut, levitys
- ✓ Fuusioon liittyvät yleiset suunnittelukriteerit ja *codes & standards*
- ✓ muut aktiviteetit

IAEA jasenvaltiot

- tutkimuslaitokset yhteistyössä sovitun fuusio-aiheen parissa, jolla yhteistä merkitystä

3. Fuusio tanaan ja huomenna

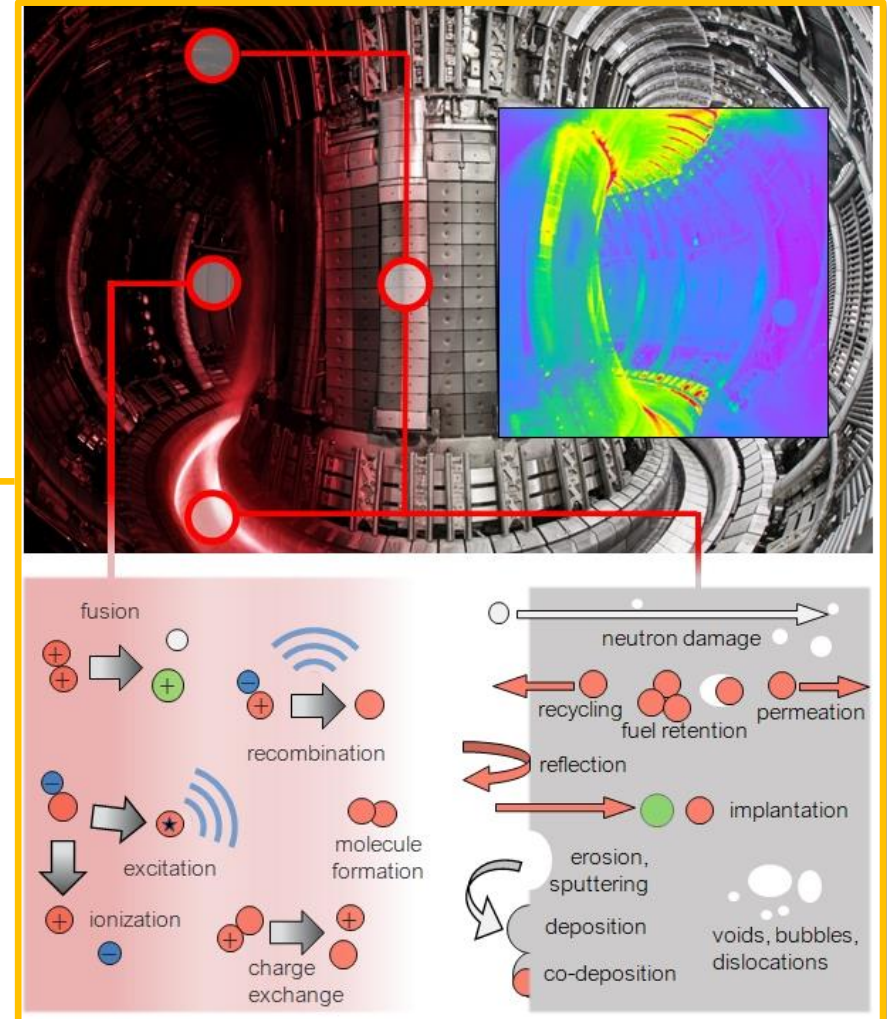
IAEA ja fuusio

Aktiviteetit

- ✓ Kansainvälisen fuusioyhteison kokoaja (*hub, forum*)
- ✓ *Framework* fuusioenergian käyttöönnotolle
- ✓ Koordinoidut, globaalit fuusion R&D –projektit
- ✓ **Fuusiodata: tietokannat, palvelut, levitys**
- ✓ Fuusioon liittyvät yleiset suunnittelukriteerit ja *codes & standards*
- ✓ muut aktiviteetit

Fuusiodata ja T&K

- fundamentaaliset fuusioprosessit ja niiden data (neutroniikka, plasma, materiaalit)



3. Fuusio tanaan ja huomenna

IAEA ja fuusio

Aktiviteetit

- ✓ Kansainvälisen fuusioyhteison kokoaja (*hub, forum*)
- ✓ *Framework* fuusioenergian käyttöönnotolle
- ✓ Koordinoidut, globaalit fuusion R&D –projektit
- ✓ Fuusiodata: tietokannat, palvelut, levitys
- ✓ **Fuusioon liittyvät yleiset suunnittelukriteerit ja *codes & standards***
- ✓ muut aktiviteetit



IAEA

International Atomic Energy Agency
Atoms for Peace and Development

**Technical Meeting on Experience in Codes and
Standards for Fusion Technology**
IAEA Headquarters, Vienna, Austria

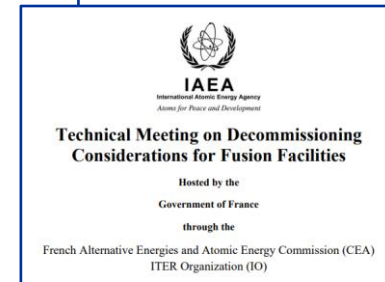
18-21 November 2025

3. Fuusio tanaan ja huomenna

IAEA ja fuusio

Aktiviteetit

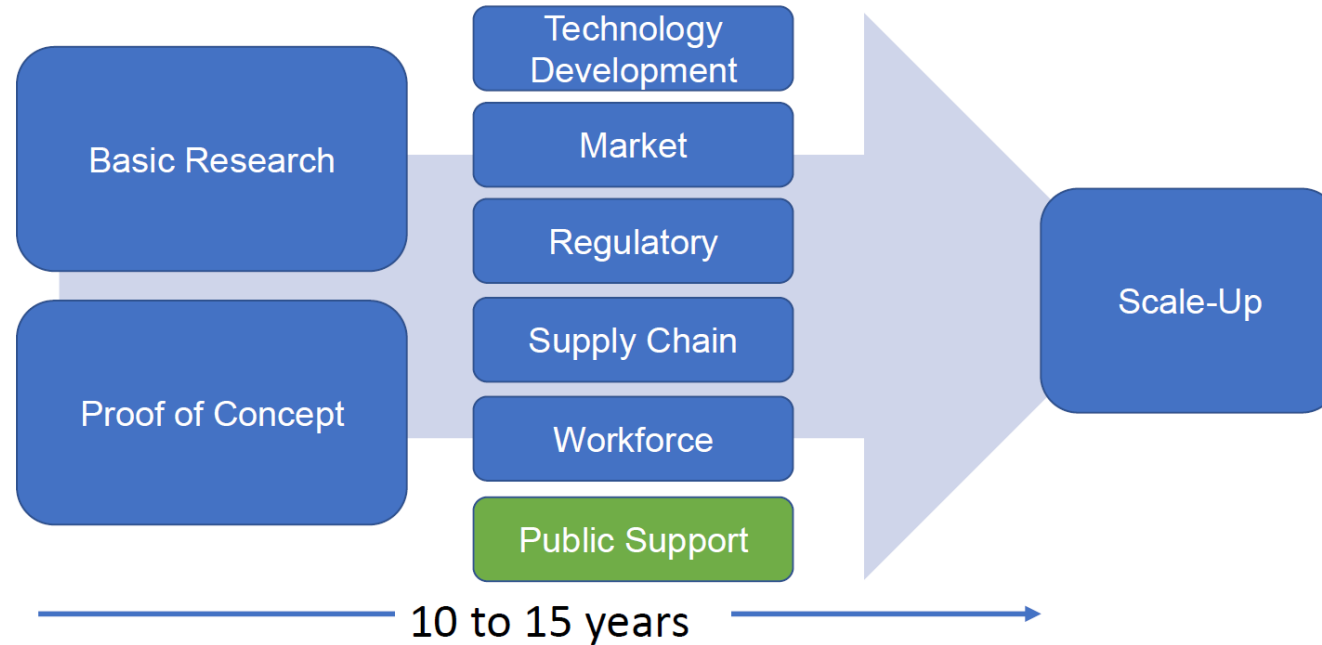
- ✓ Kansainvälisen fuusioyhteison kokoaja (*hub*,
- ✓ *Framework* fuusioenergian käyttönotolle
- ✓ Koordinoidut, globaalit fuusion R&D –projekti
- ✓ Fuusiodata: tietokannat, palvelut, levitys
- ✓ Fuusioon liittyvät yleiset suunnittelukriteerit ja *codes & standards*
- ✓ **muut aktiviteetit**



- **Nuclear Fusion journal**
✓ the leading scientific journal for fusion
- **TRLs for Fusion Technology Components**
- **Decommissioning Considerations for Fusion Facilities**
- **Radioactive Waste Management for Fusion**
- **Economic Studies for Fusion**

Tiivistelmä

Accelerate the Time from Proof of Concept to Scale-Up

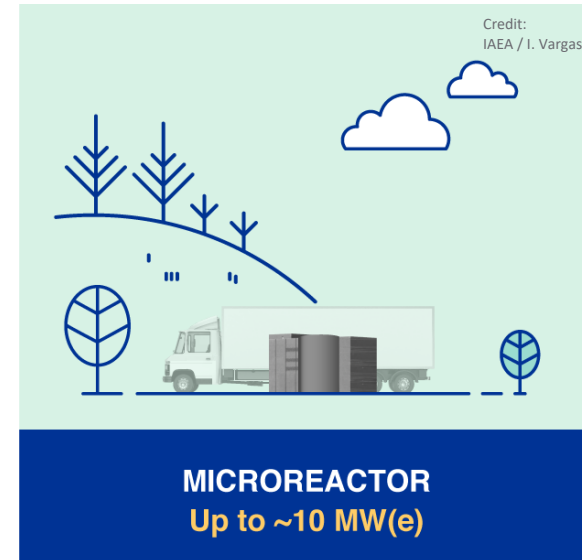
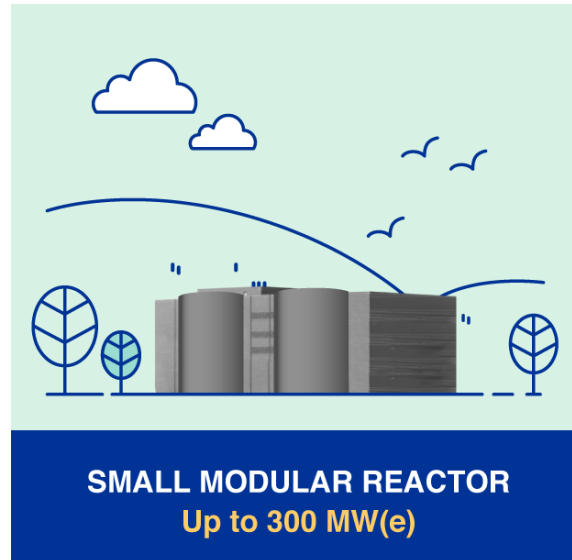
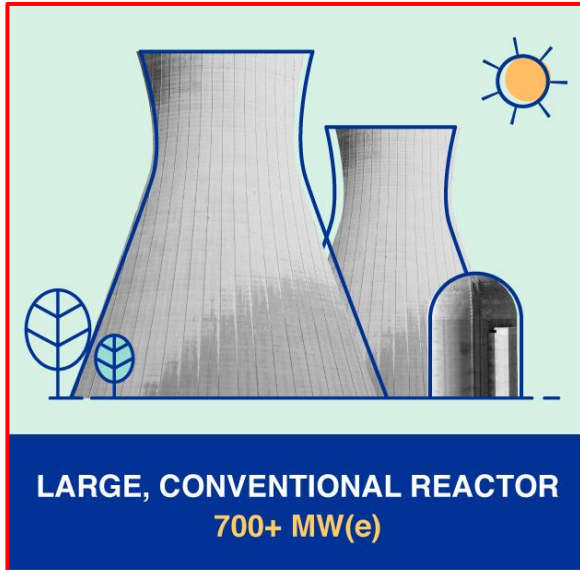


“The IAEA has been, is and will be the central hub for international cooperation and coordination in fusion, just as it is for fission.”

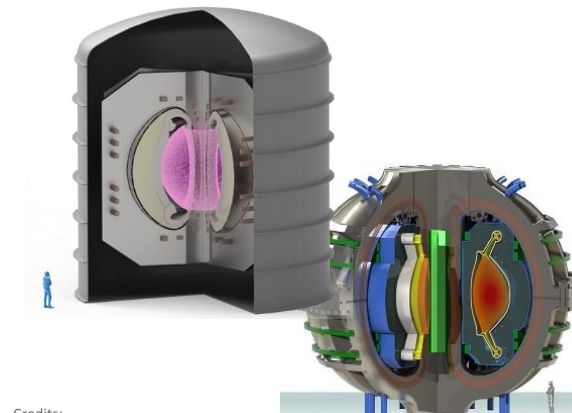
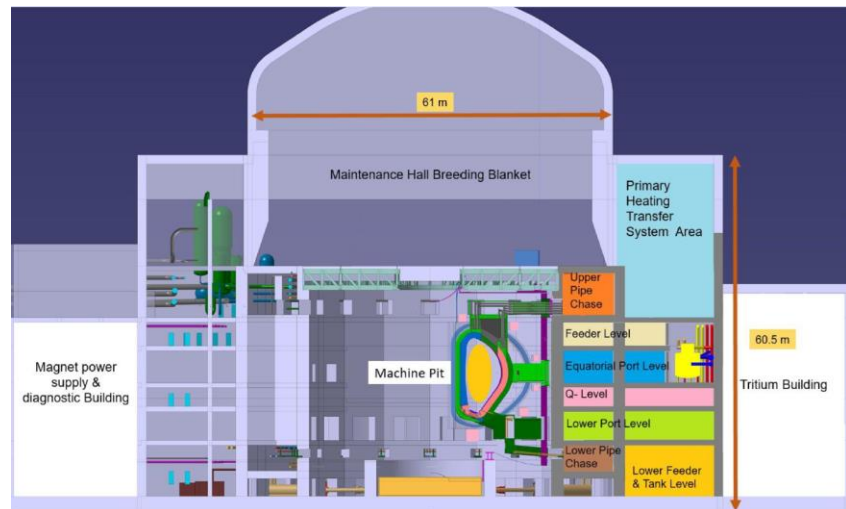
- IAEA DG Grossi, opening statement at FEC2023

Tiivistelma

Fissio:



Fuusio:



Credits:
Commonwealth Fusion Systems / ARC rendering by A. Creely
Tokamak Energy Ltd



Fig. 1 Truck mounted 1 MWe PFRC.

C. Galea, et al., J. Fusion Energy 42, 4 (2023)



Kiitos!

Kalle Heinola

k.heinola@iaea.org