



Dirbtinė saulės sukūrimas Žemėje ir elektros gamyba.

Egidijus Urbonavičius
Lietuvos energetikos institutas



**LIETUVOS
ENERGETIKOS
INSTITUTAS**



This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium and has received funding from the Euratom research and training programme 2014-2018 and 2019-2020 under grant agreement No 633053. The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the European Commission.

Branduolių sintezė



Saulė ir žvaigždės šviečia dėl branduolių sintezės reakcijų, vykstančių jose.

Ar mes galime atkartoti šį milžinišką energijos šaltinį Žemėje?

Image: NASA



Branduolių sintezė kaip energijos šaltinis



Susijungusių atomų suma yra mažesnė už jų sudarančių atomų masę. Kur dingo masė?

Iš žymiosios Alberto Einšteino formulės matome, kad masė pavirsta energija:

$$E=mc^2$$

Kitais žodžiais:
Energija = masė x šviesos greitis kvadratu

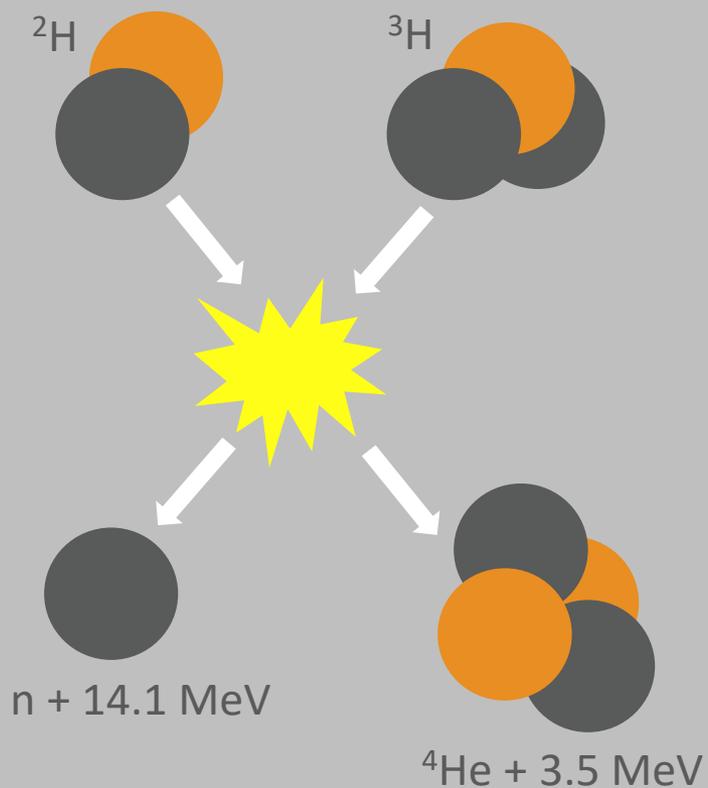


Branduolių sintezė vs. Branduolių skilimas



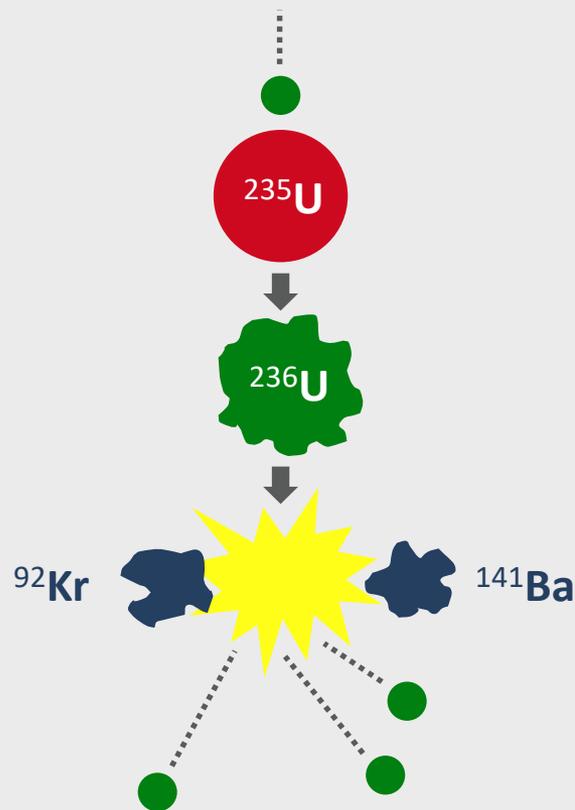
Branduolių sintezė

Du maži branduoliai susijungia sudarydami didesnį.



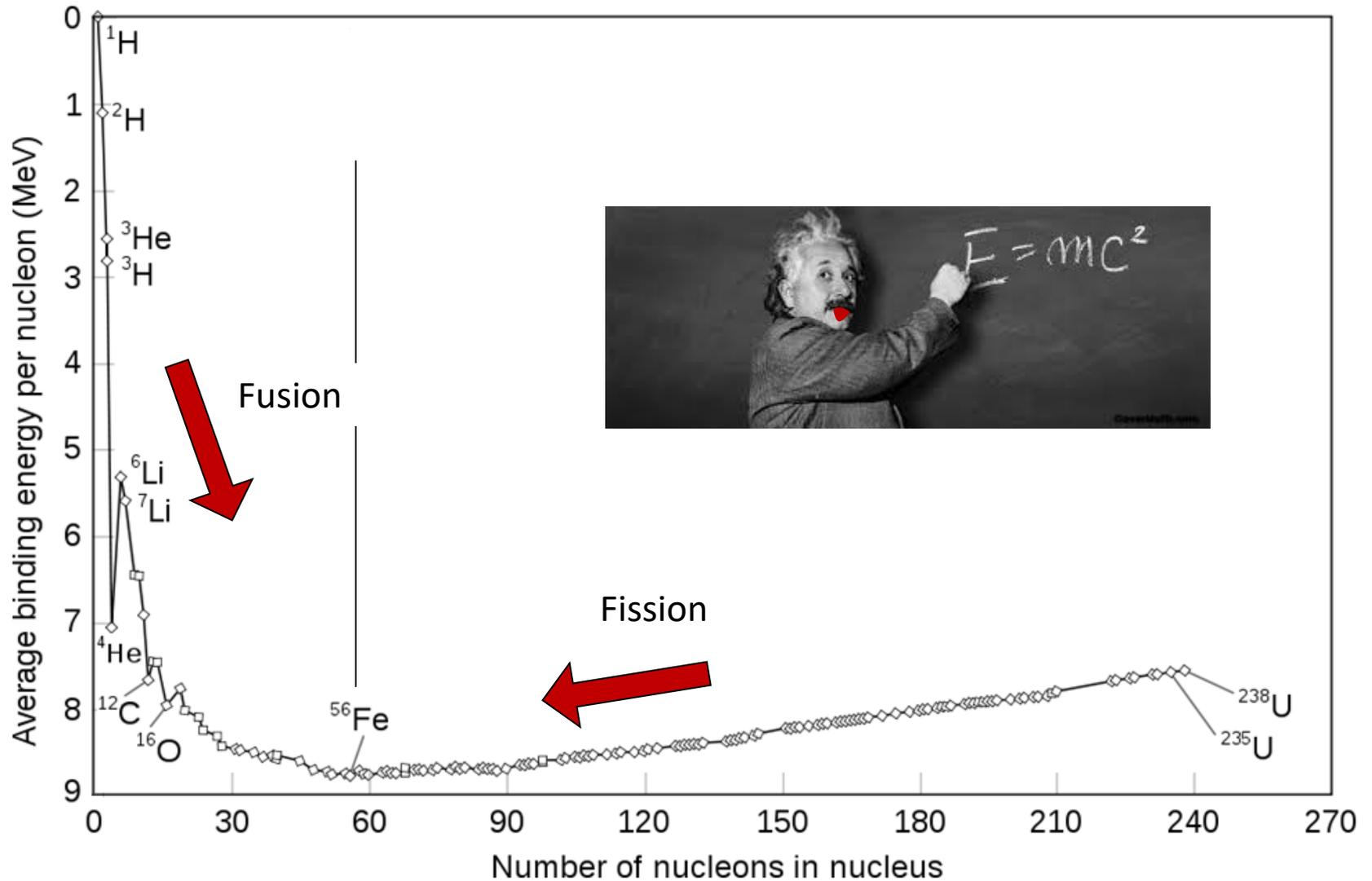
Branduolių skilimas

Vienas didelis branduolys skyla į mažesnius.



Graphic: EUROfusion, Reinald Fenke, CC BY 4.0, www.euro-fusion.org

$$E = mc^2$$



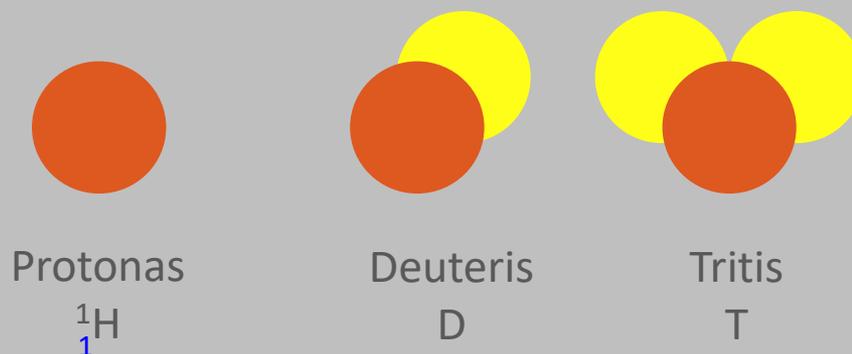
Kokia geriausia branduolių sintezės reakcija Žemėje?



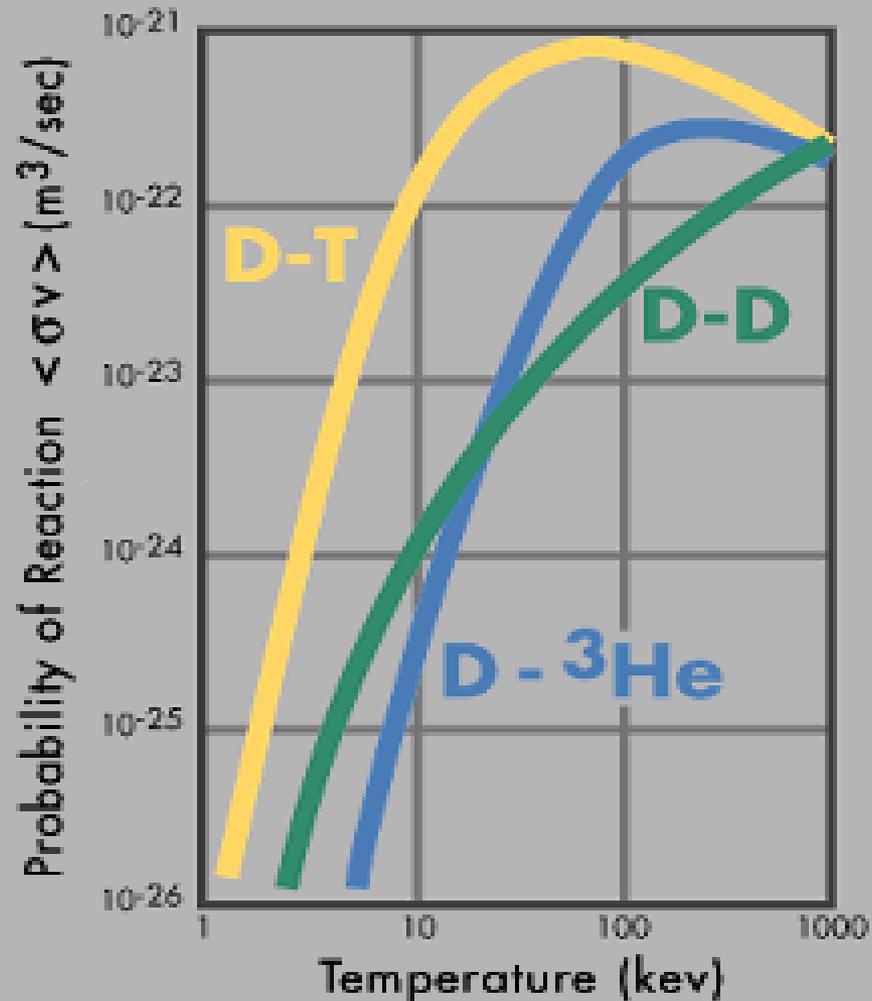
Saulėje vandenilio (H) branduoliai susijungia sudarydami Helio branduolį (He).

Žemėje efektyviausia yra naudoti du vandenilio izotopus:

- Deuterį (D)
- Tritį (T)



Kokia geriausia branduolių sintezės reakcija Žemėje?



Branduolių sintezei Žemėje reikalinga plazma



Plazma yra labiausiai paplitusi medžiagos būseną visatoje. Ji sudaro 99% visos matomos medžiagos.



Image 1: prominence on the Sun, By NASA Goddard spaceflight center [public domain], via Wikimedia Commons.

Image2: ITER Organization, www.iter.org

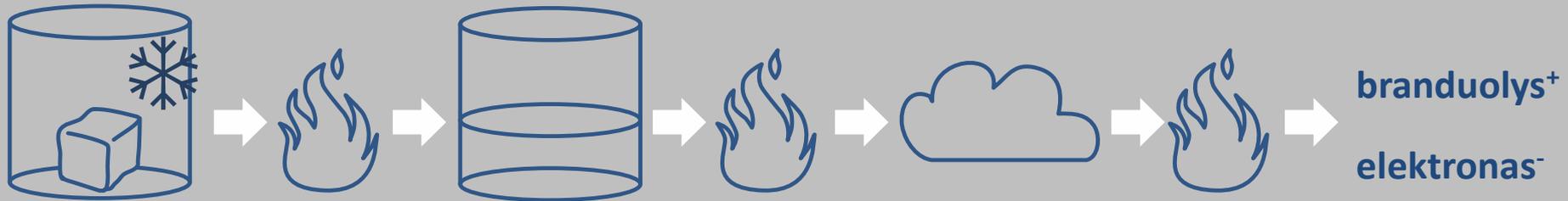
Image 3: By Carsten (Flickr: Polarlicht-Reise 2013 - Tag09 - 22) [CC BY 2.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>)], via Wikimedia Commons

Branduolių atostūmio jėgai nugalėti reikia 150 milijonų laipsnių temperatūros. Deuterio-tričio sintezės reaktoriuje medžiagos būseną yra **plazma**.

Keturios medžiagos būsenos



Kaitinant kietą medžiagą ji lydosi ir tampa skysta. Kaitinant skystį jis tampa dujomis. Kaitinant dujas jos tampa plazma.



Graphic: EUROfusion, Reinald Fenke, CC BY 4.0, www.euro-fusion.org



Siekiant pradėti branduolių sintezę būtina vienu metu:

Būtina gerai suprasti **plazmos fiziką.**

1

Išlaikyti aukštą temperatūrą

2

Išlaikyti plazmą tūryje

3

Išvengti plazmos šilumos praradimo

Plazmos išlaikymas yra esmė



Images(left to right): NASA, CCFE, green picture replace with https://en.wikipedia.org/wiki/National_Ignition_Facility#/media/File:Preamplifier_at_the_National_Ignition_Facility.jpg,
image: Lawrence Livermore National Laboratory, CC BY-SA 3.0, <http://tinyurl.com/hj7qvan>

Žvaigždės yra masyvios ir jos priklauso nuo

Gravitacinio išlaikymo

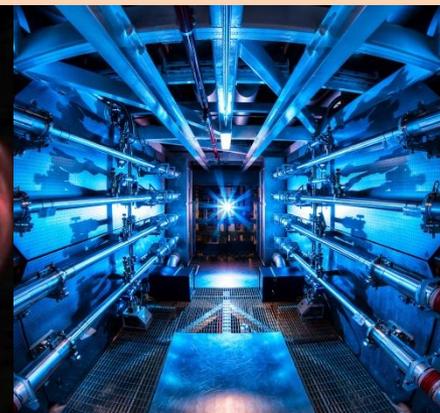


Žemėje natūraliomis sąlygomis branduolių sintezė nevyksta, todėl daugiausia remiamasi dviem būdais:

Magnetinis išlaikymas



Inercinis išlaikymas



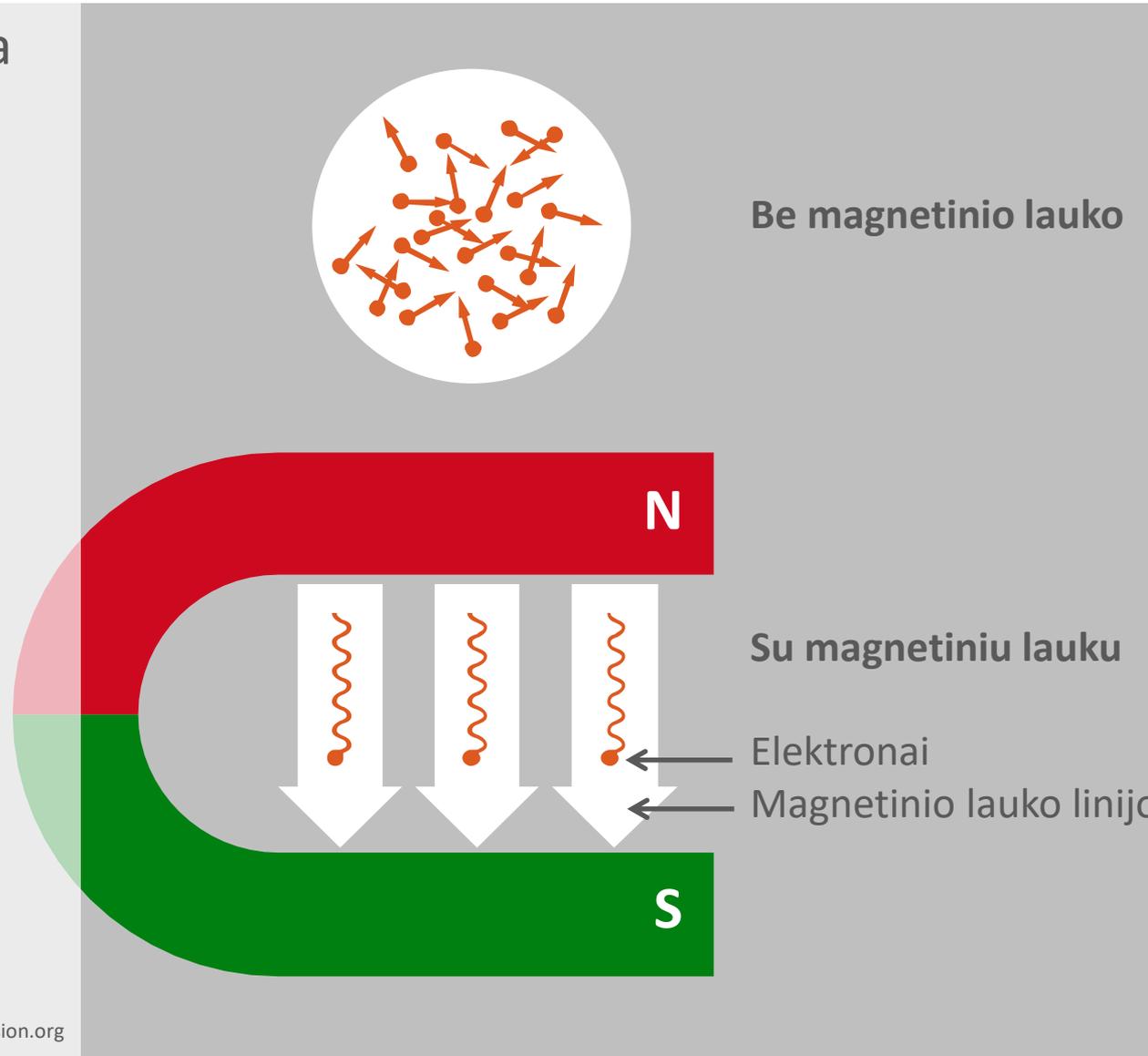
Magnetinio išlaikymo branduolių sintezė



Plazma suspaudžiama ir jos dalelės sukasi aplink **magnetinio lauko** linijas, o **elektrinis laukas** jas kaitina

Tankis labai mažas: 250 tūkstančių kartų mažesnis už žemės atmosferą

Išlaikymo laikas yra ilgas: >sekundes





Tokamako pagrindai

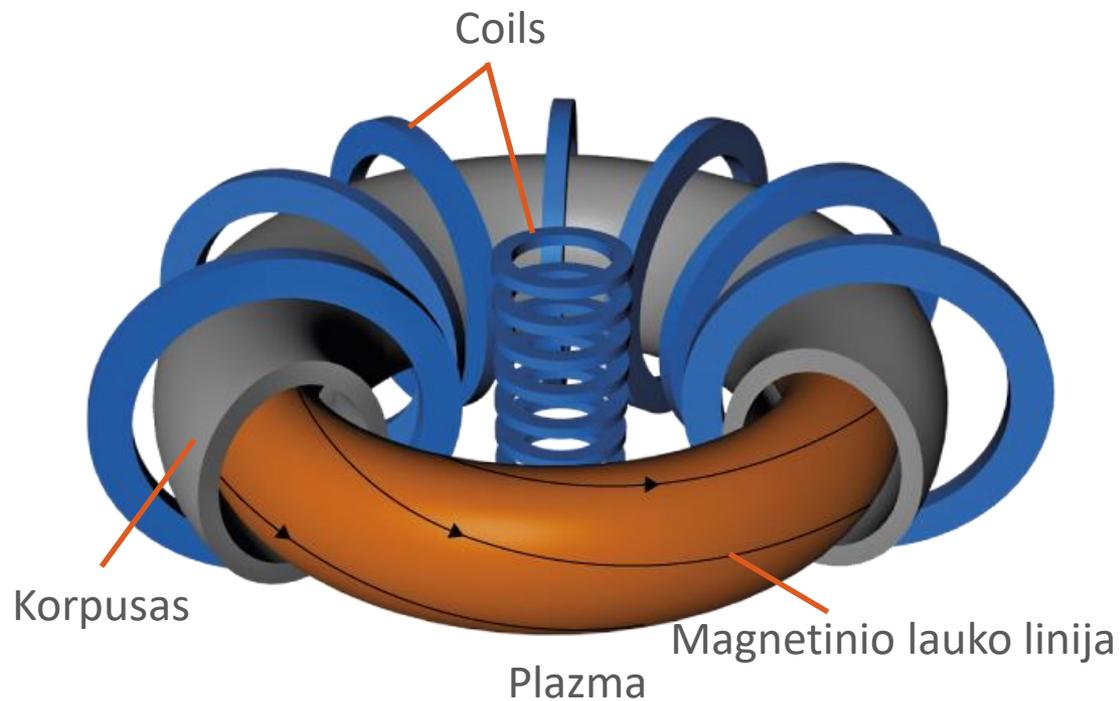
Jis sudarytas iš

Metalinio korpuso plazmai išlaikyti

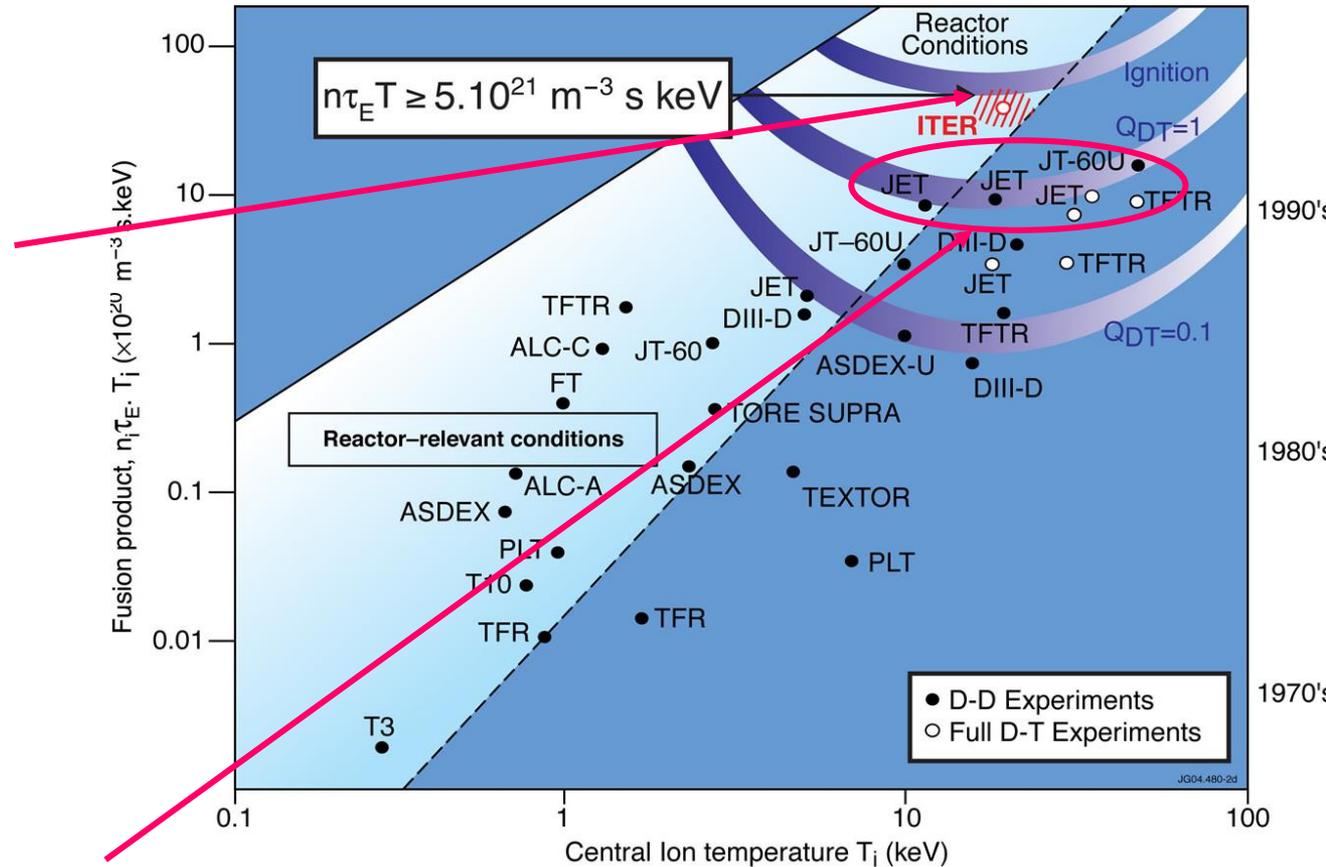
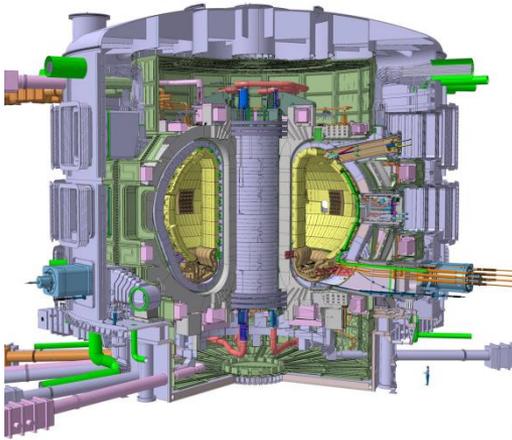
Magnetinio lauko ričių, kurios

- nukreipia plazmos daleles
- plazmoje generuoja elektros srovę
- Išlaiko plazmos formą

Graphic: EUROfusion, Reinald Fenke, CC BY 4.0, www.euro-fusion.org



Branduolių sintezės progresas



1990's

1980's

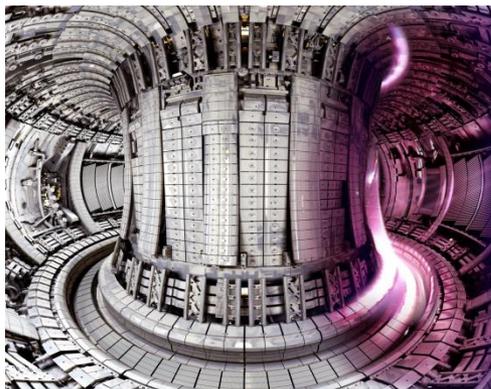
1970's

ITER

Galios atgavimas:

$$P_{\text{fusion}} = 10 \times P_{\text{in}}$$

Parodyti techninius principus

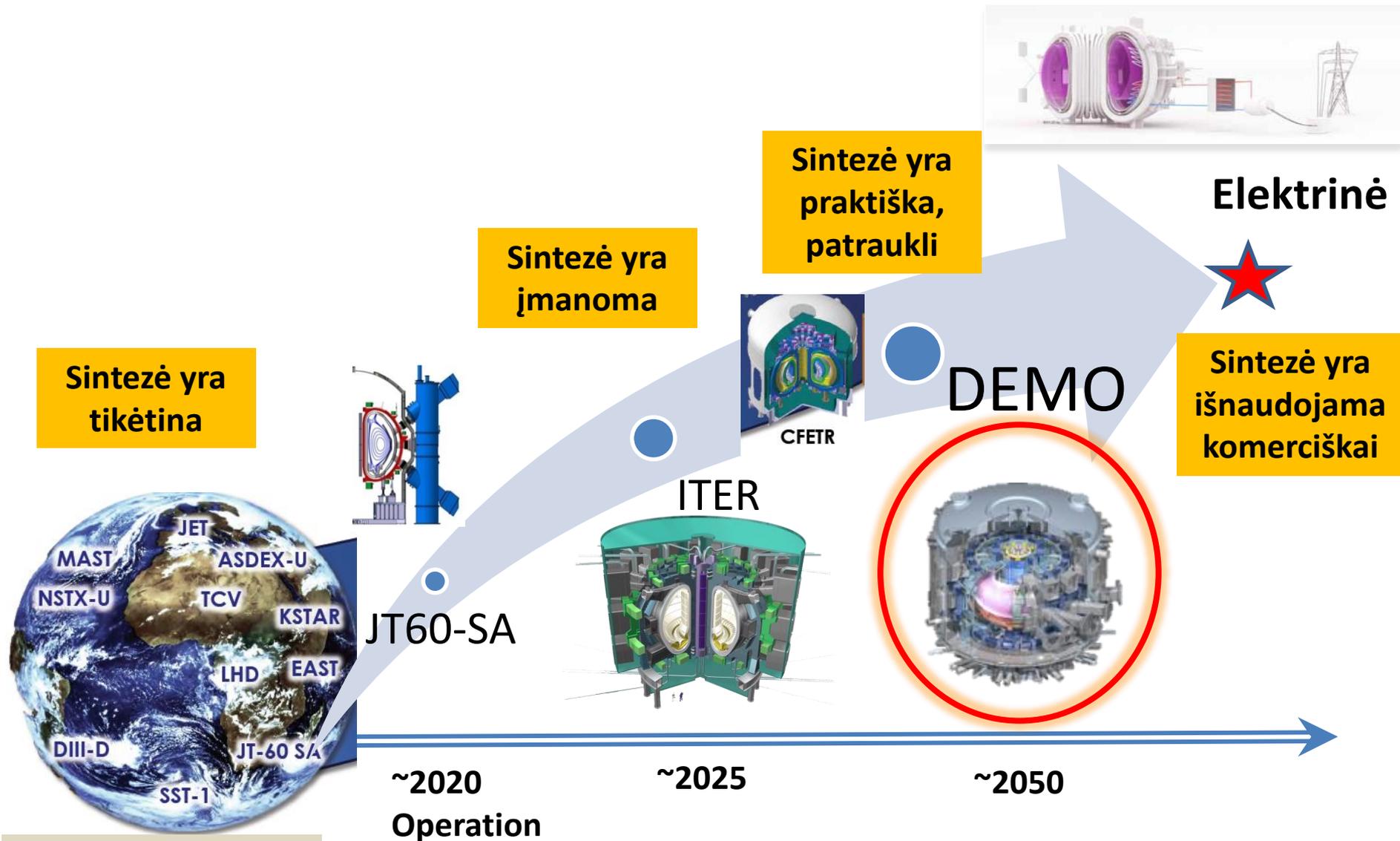


JET (ir kiti įrenginiai) galios balansas:

$$P_{\text{fusion}} = P_{\text{in}}$$

Pagrindinis tikslas – mokslinis supratimas

Preliminarus grafikas ir pagrindiniai įrenginiai



Branduolių sintezės įrenginiai pasaulyje



30 mokslinių tyrimų institutų ir 150 universitetų

28 Europos šalys dirba kartu siekdami bendro Branduolių sintezės kelrodžio tikslo:

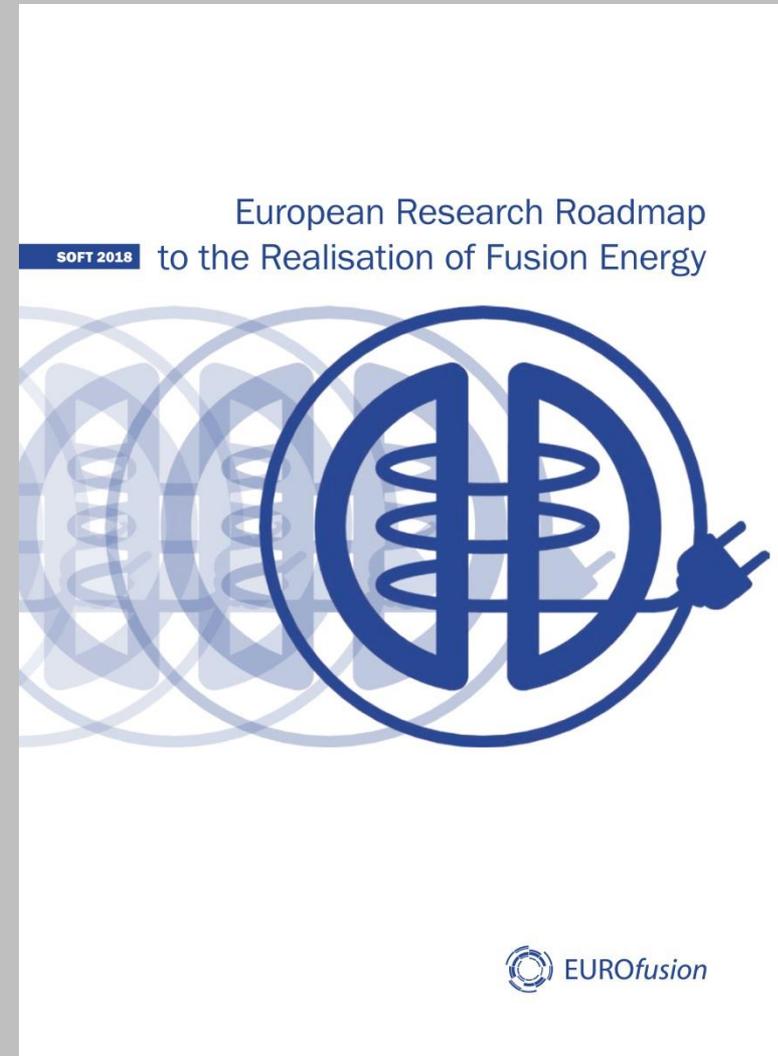
Elektra, pagaminta branduolių sintezės elektrinėje





Pademonstruoti elektros gamybą branduolių sintezės elektrinėje prasidėjus antrai šio amžiaus pusei

- Remiasi techninio įvertinimo ataskaitomis
- Parodo nuoseklią ES programą, turinčią aiškų tikslą
- Be neužbaigtų mokslinių tyrimų
- Išleista 2018 rugsėjį

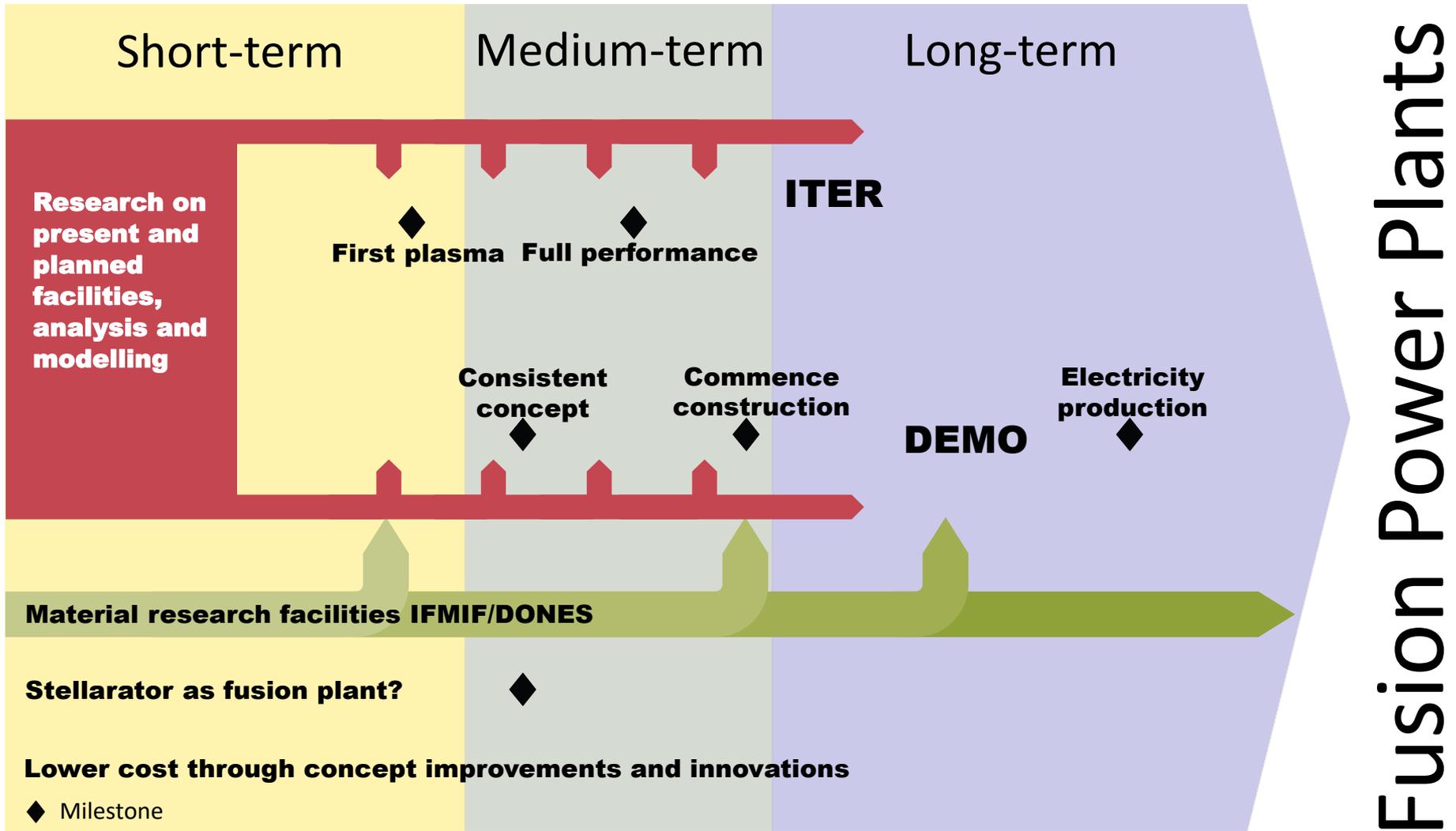




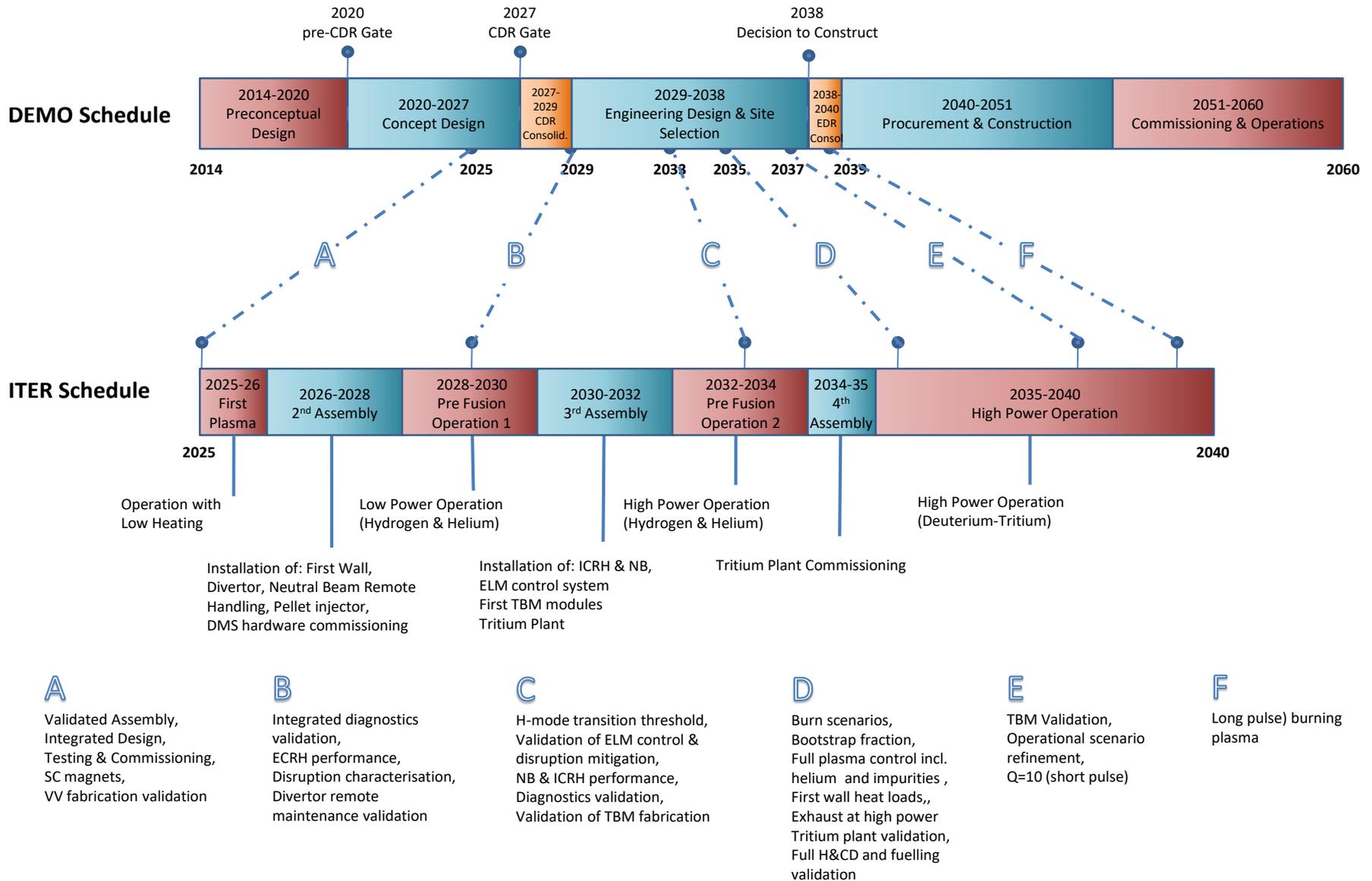
- Šis kelrodis yra pagrindas programos, kuri
 - Prisideda prie ITER sėkmės ir jo rezultatų efektyvaus panaudojimo
 - Aprašo kelią link licencijuotos elektros gamybos DEMO elektrinėje
 - Aprašo viziją po DEMO (pramonės pasirengimas)
 - Įvertina atsargines strategijas
 - Gali būti taikoma nustatant mokslinių tyrimų prioritetus



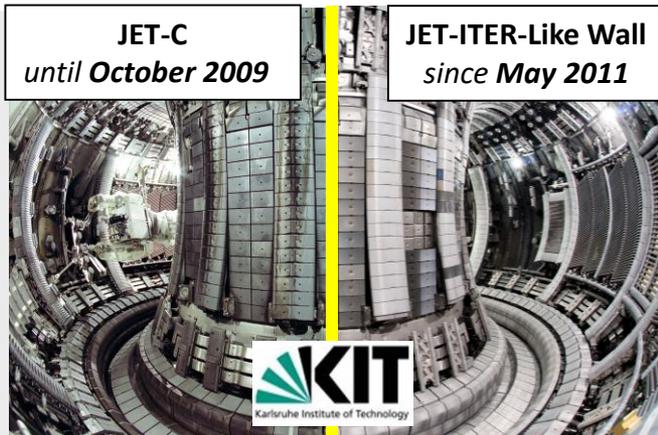
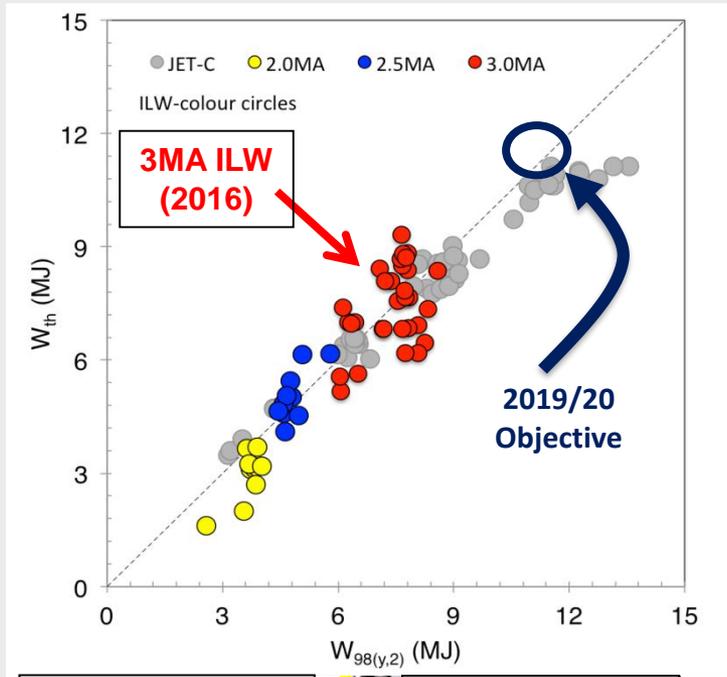
Branduolių sintezės kelrodis



ITER rezultatų pritaikymas DEMO - pavyzdžiai



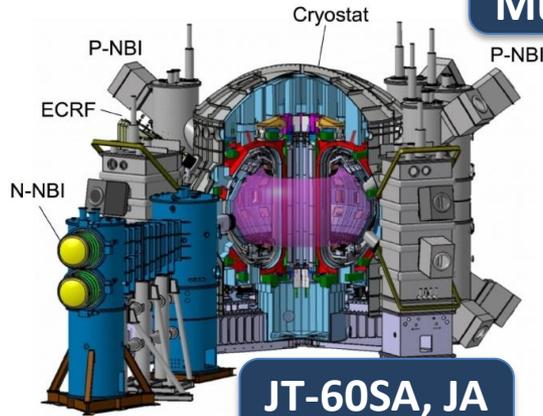
Kelrodžio misijos



Tokamak jrenginiai

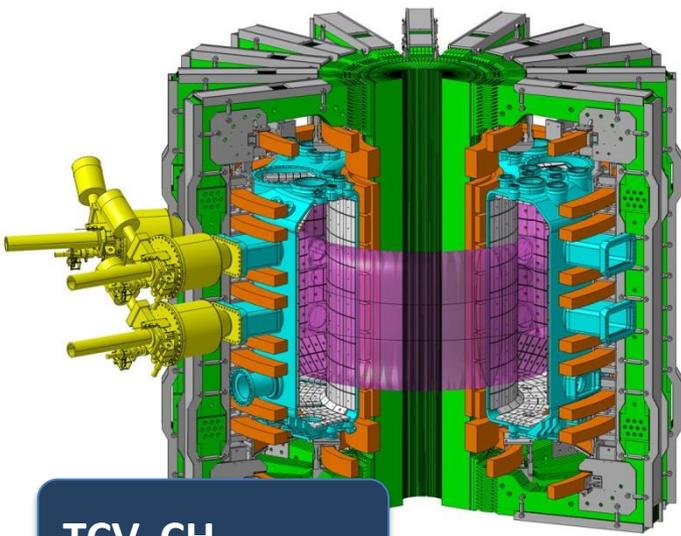
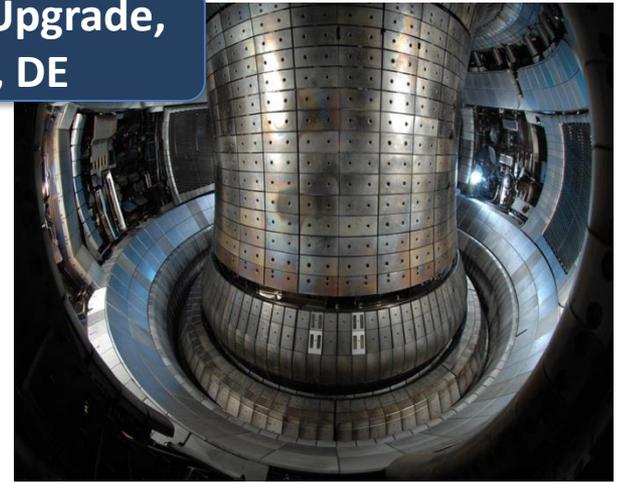


JET, UK

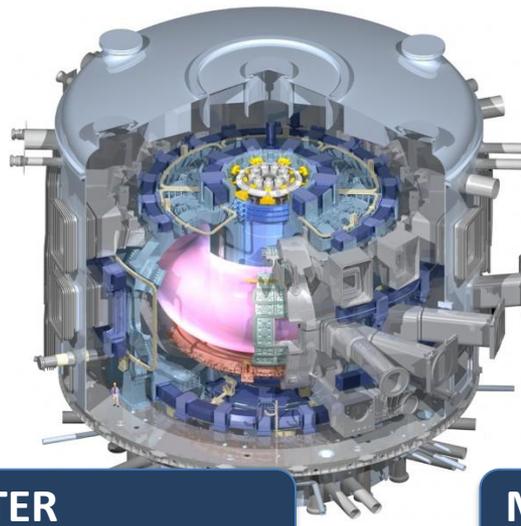


JT-60SA, JA
(Start in 2020)

ASDEX Upgrade, Munich, DE



TCV, CH

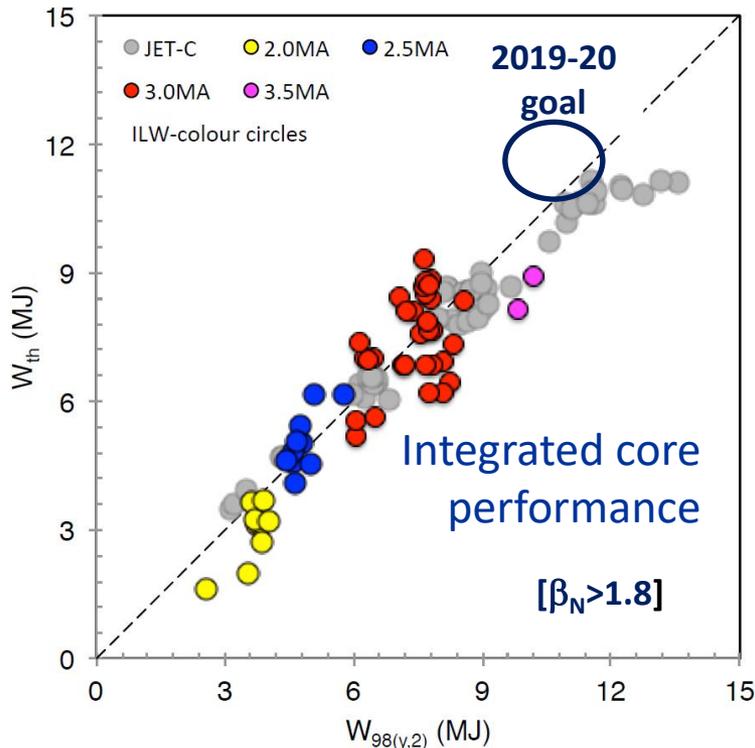


ITER
(Our target device)

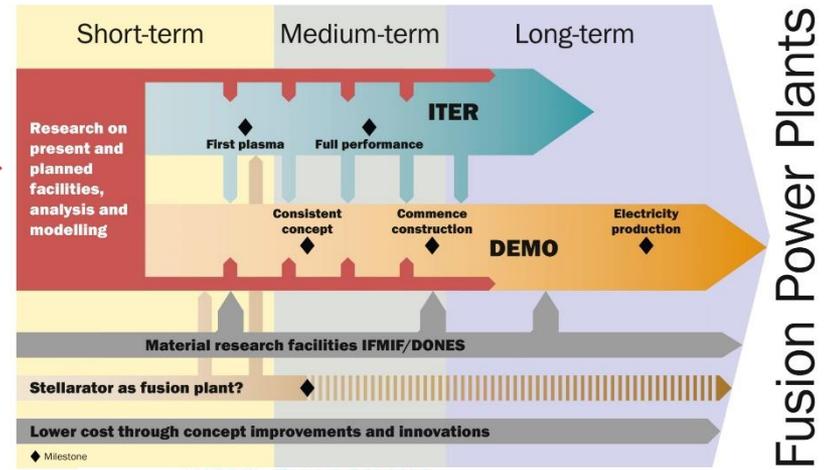
MAST Upgrade, UK
(Start in 2020)



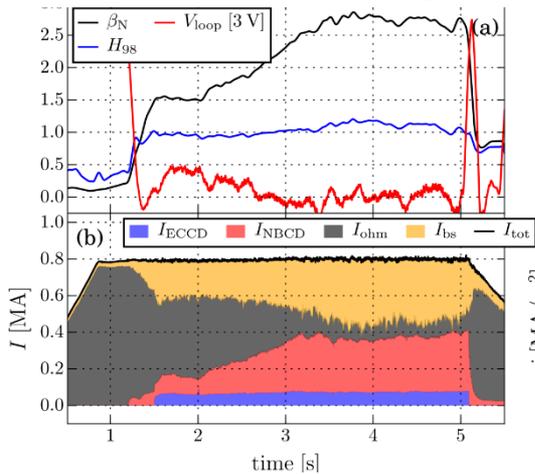
Misijos 1 ir 2: Plazmos scenarijai



JET



Fusion Power Plants



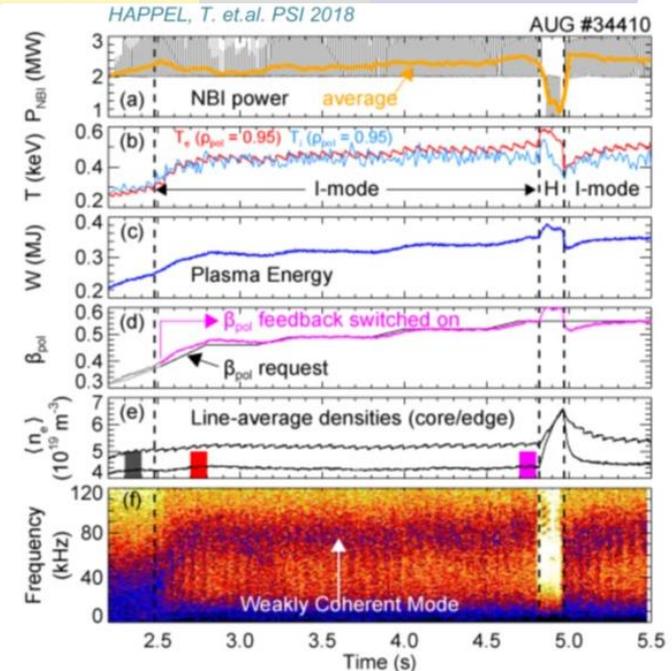
Steady state?

No-ELMs? (I-mode)

AUG



T Happel et al., PSI, IAEA 2018
A. Bock et al., Nucl. Fusion 2017





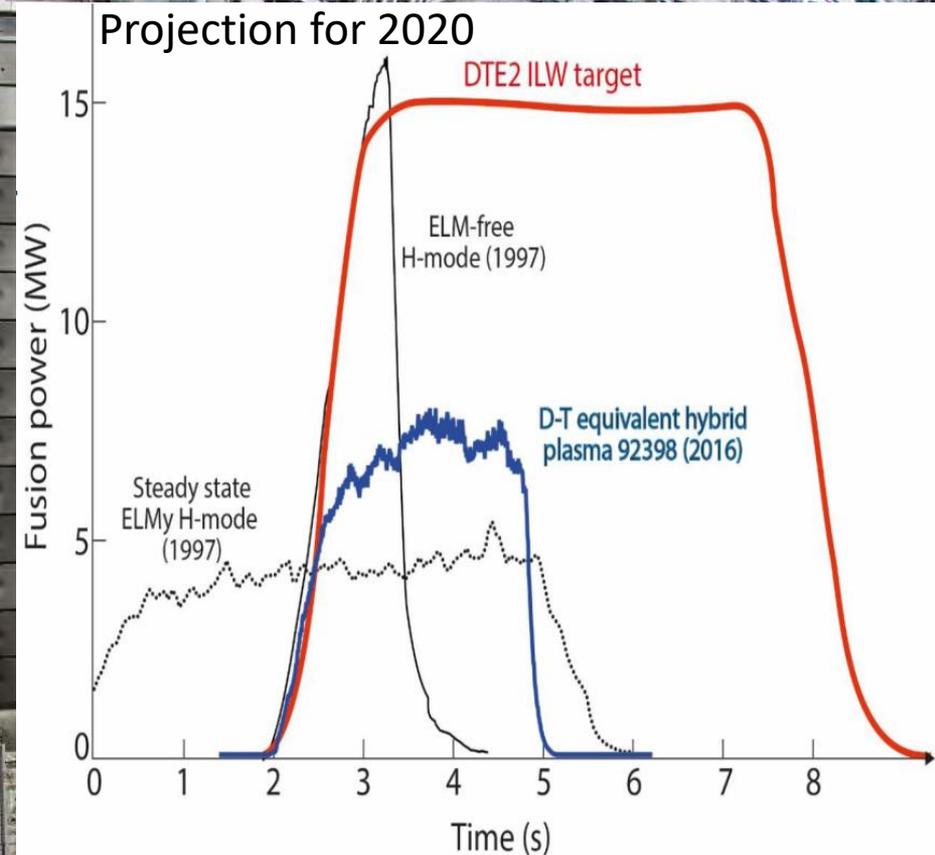
JET – world's largest tokamak

Unique ITER-Relevance:

- Be-wall, W-divertor
- Only device currently able to use tritium
- Remote Handling
- Closest in performance

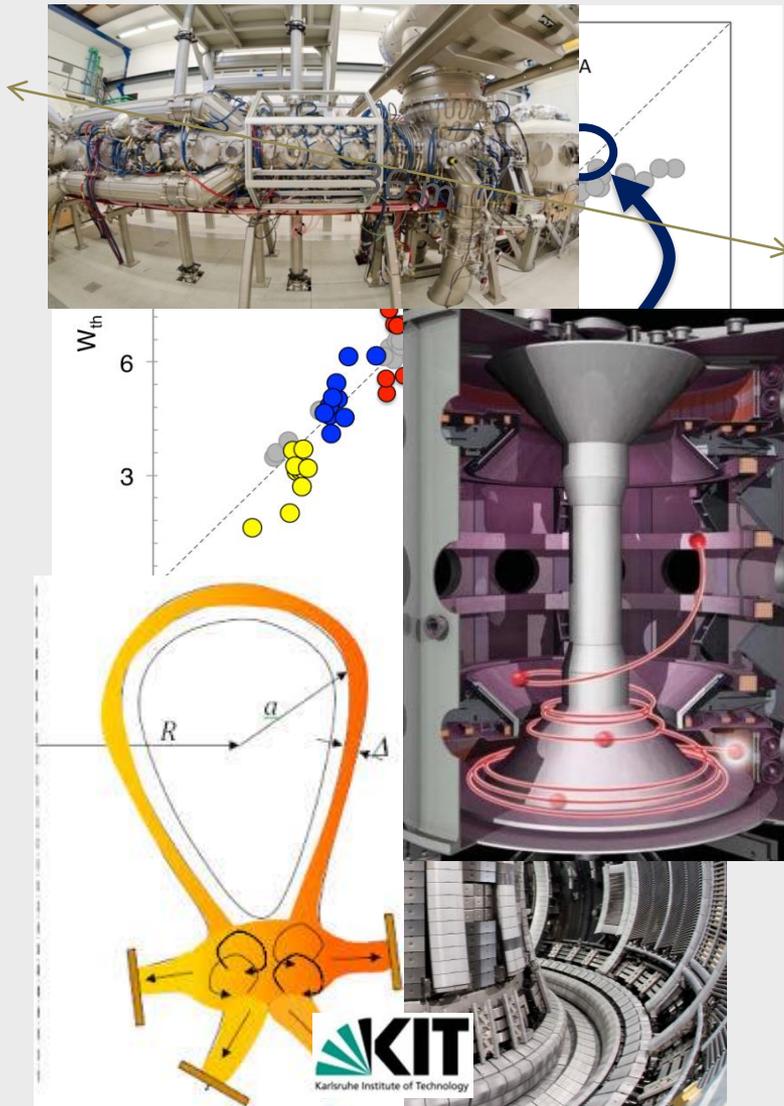
Programme

- To 2020: high performance DT, disruption management, isotope effects, etc
- After 2020: tbc



Graphic: URB session, CC BY 4.0, www.euro-fusion.org

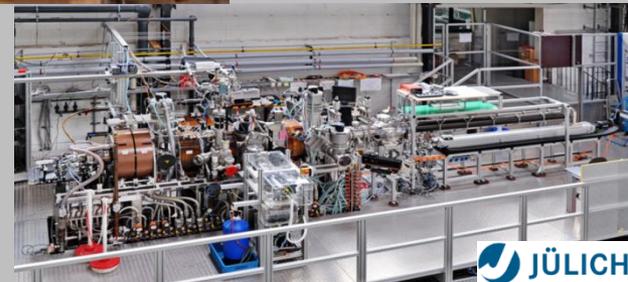
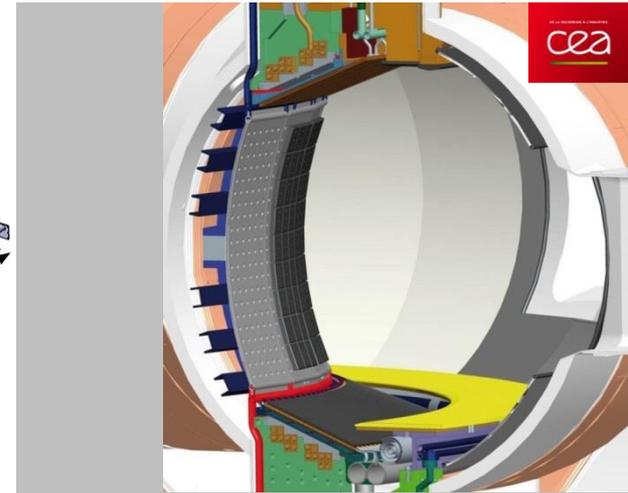
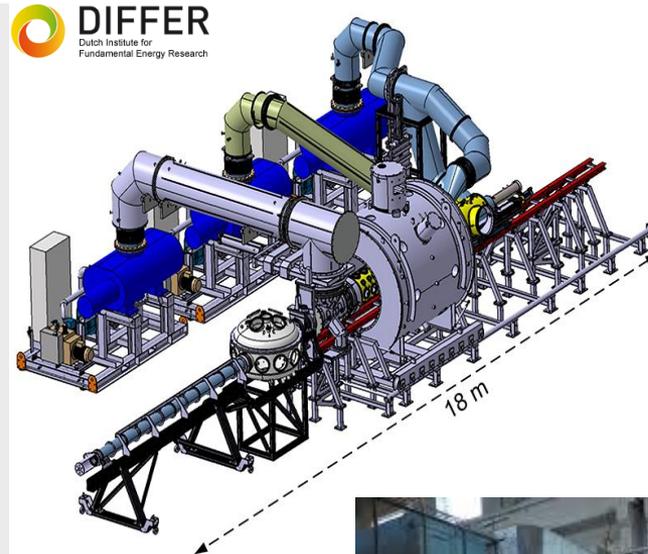
Kelrodžio misijos



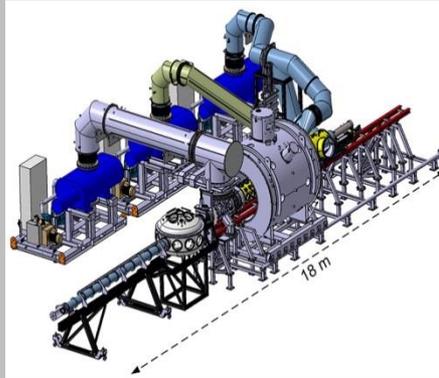
Plazmos veikiamų komponentų bandymai



Devices to study the behaviour of plasma facing components



World record exposure in MAGNUM-PSI



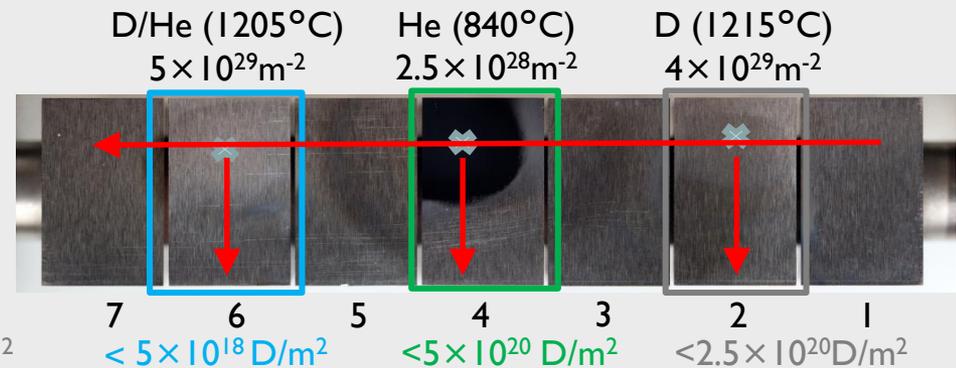
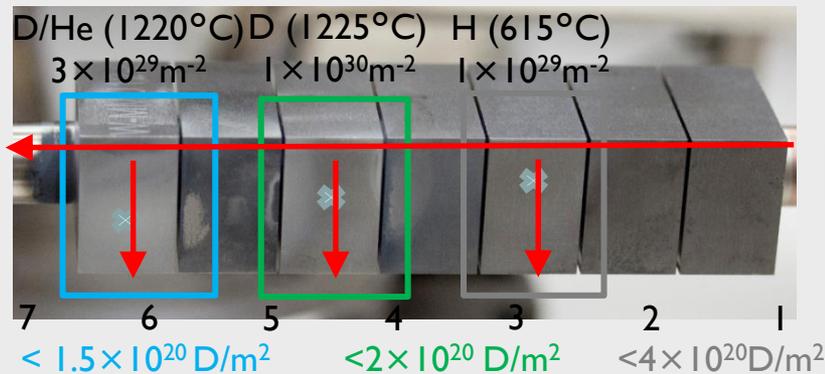
T. Morgan, PFMC 2019
M. Balden, PFMC 2019

ITER relevant conditions (~1 Full Power Year):

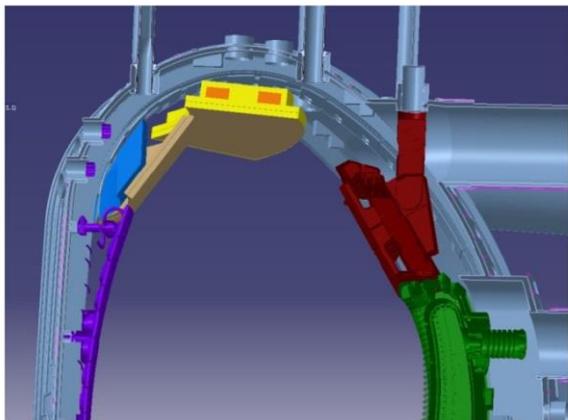
Target	1200 C°
Heat load	20 MWm ⁻²
Particle load	1.5 · 10 ²⁵ particles m ⁻² s ⁻¹
Duration:	18,5 hours



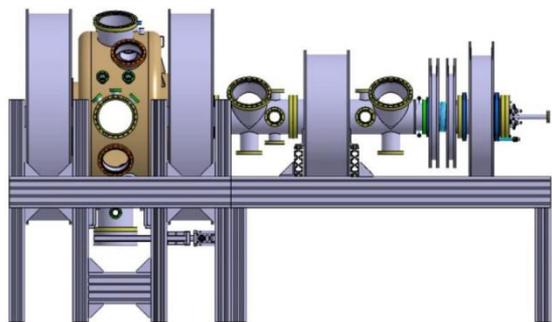
❖ = MAGNUM beam spot centre



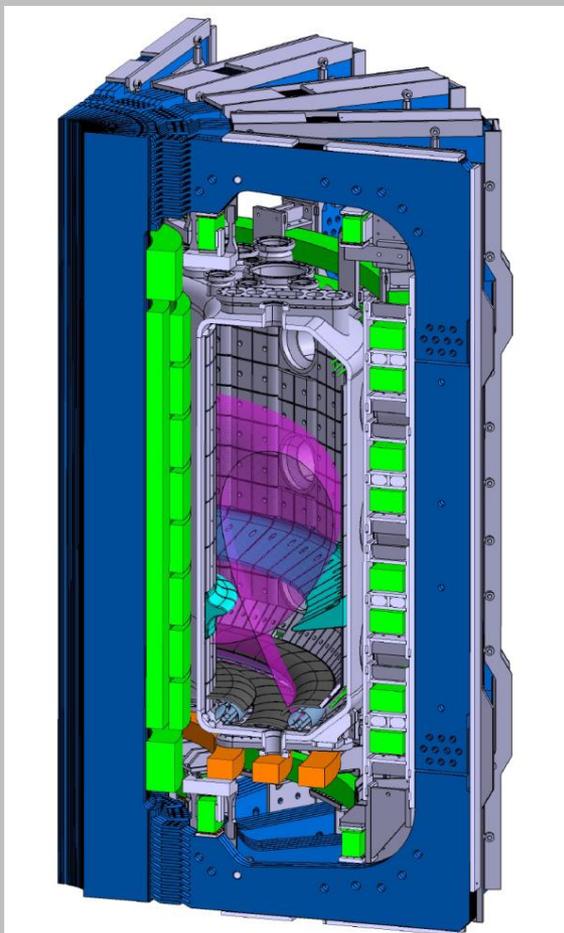
Plasma Exhaust – newly funded upgrades



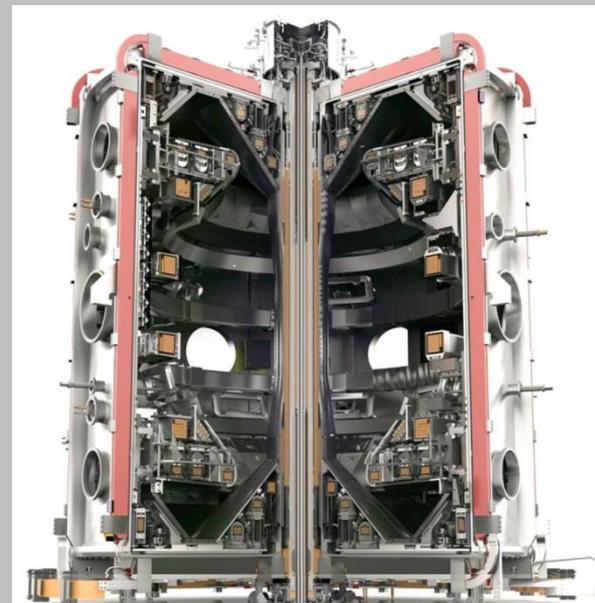
Upper divertor in ASDEX-Upgrade



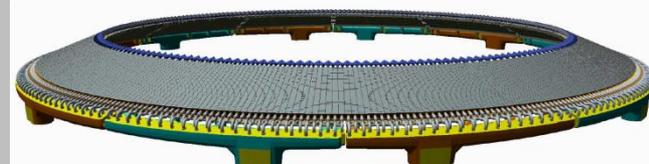
JULE-PSI and JUDITH-3



Baffles and cryopump in TCV

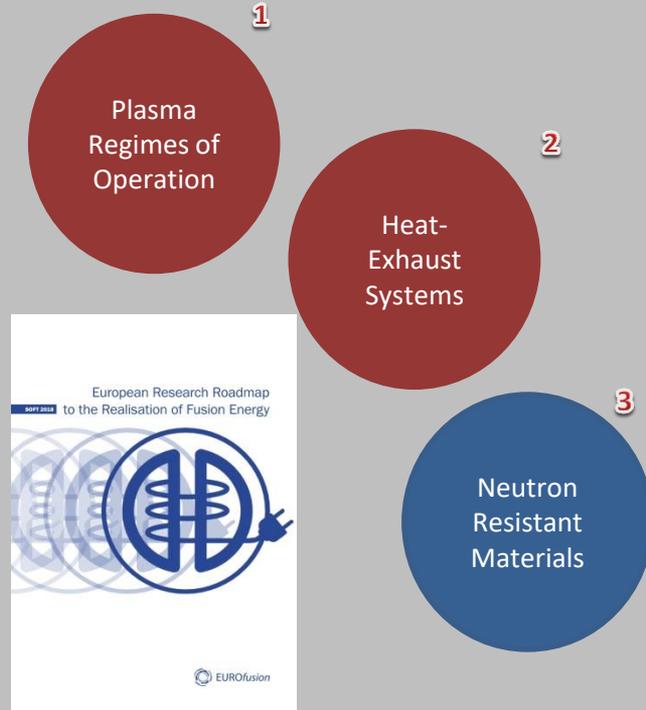
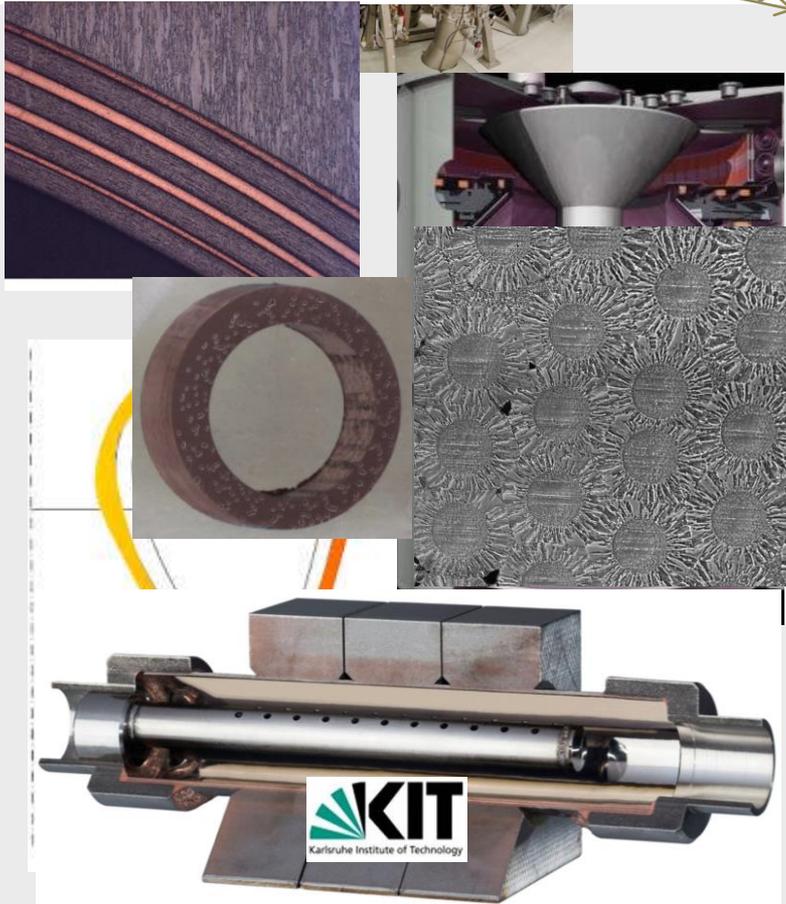


NBI and Divertor diagnostics for MAST-Upgrade



Actively-cooled divertor in WEST

Roadmap Missions



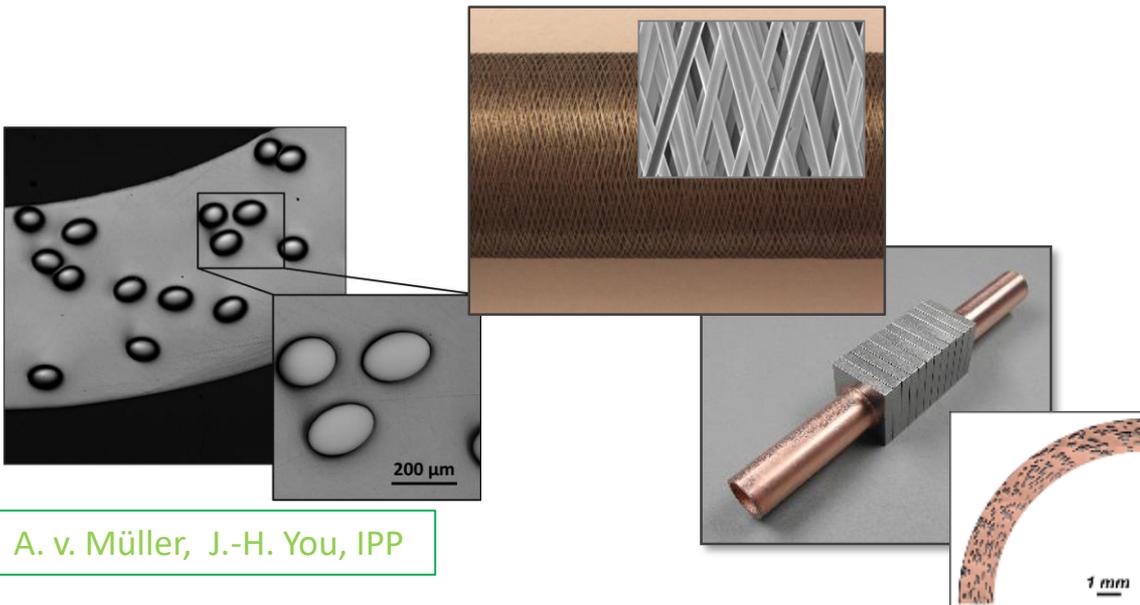
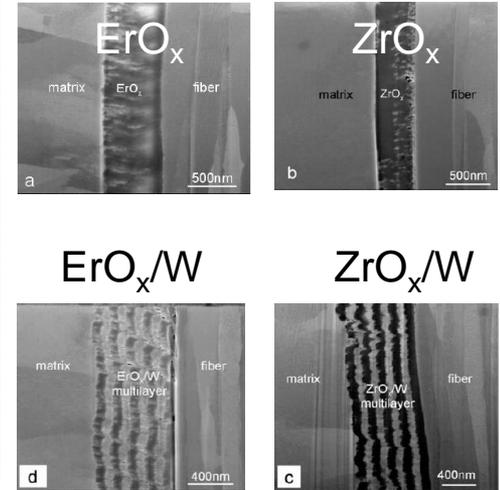
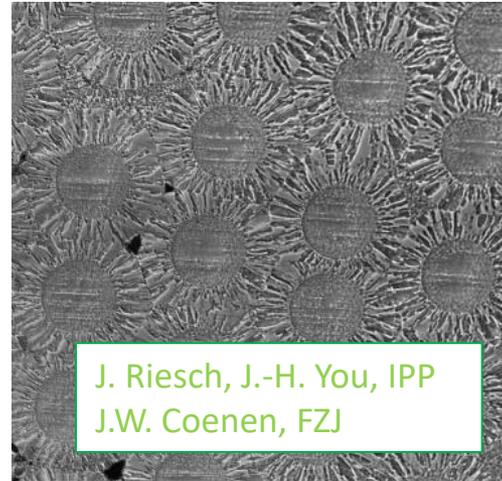
High Heat Flux Materials



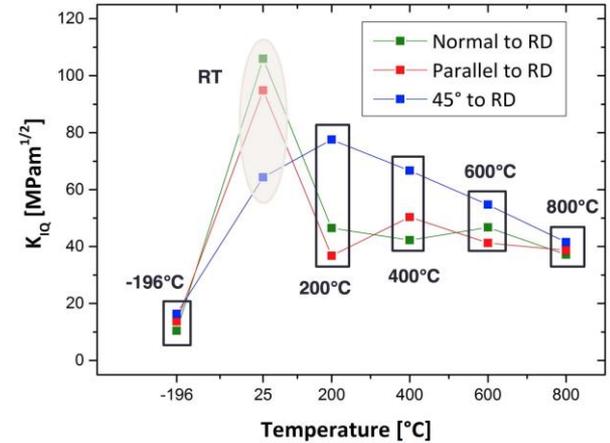
Cu-W(fiber) composite tubes



W-W(fiber) composite



Fracture Toughness



V. Nikolic, ÖAW

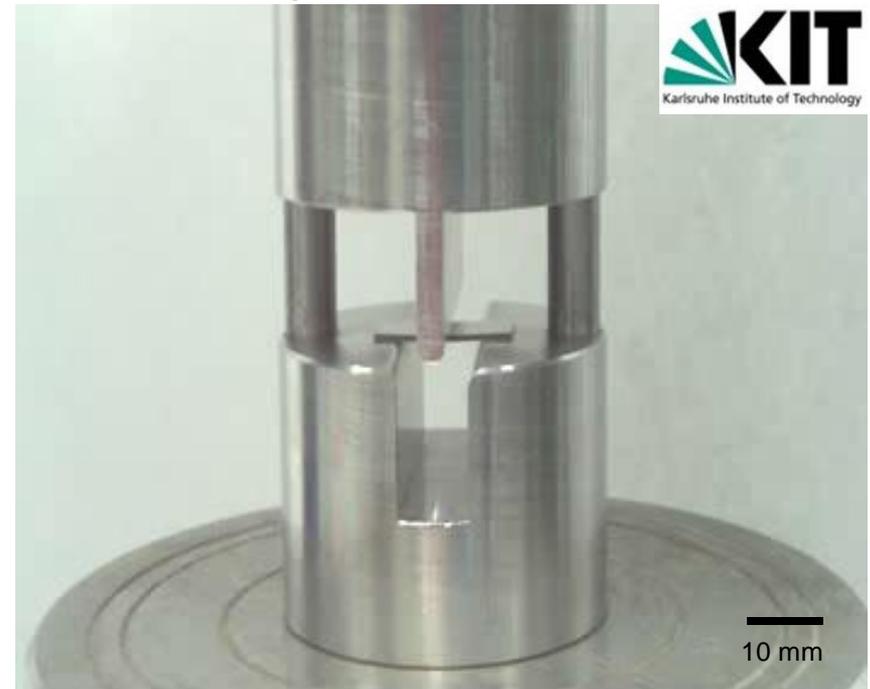
Refractory Materials for DEMO Divertors

In close cooperation with Plansee company

Hot-rolled, coarse-grained W
Test temperature: RT



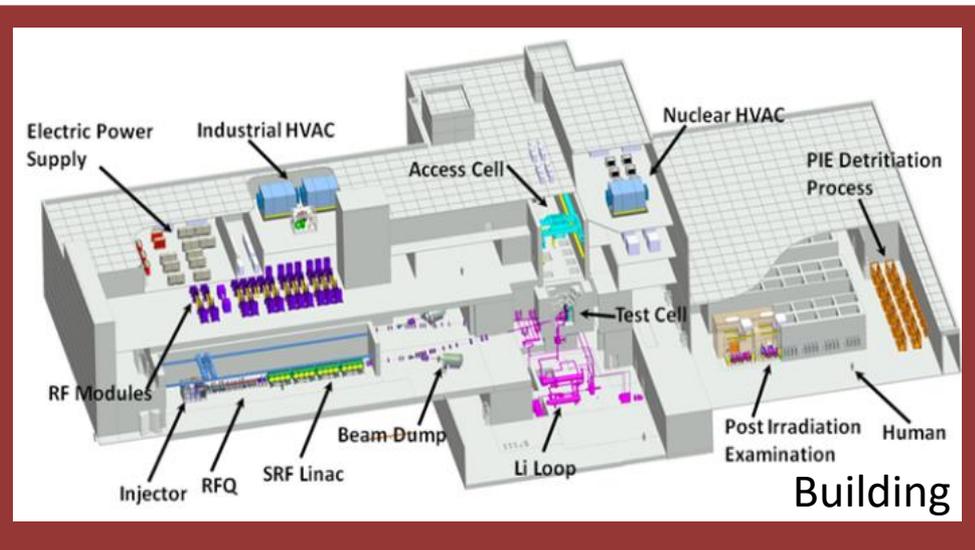
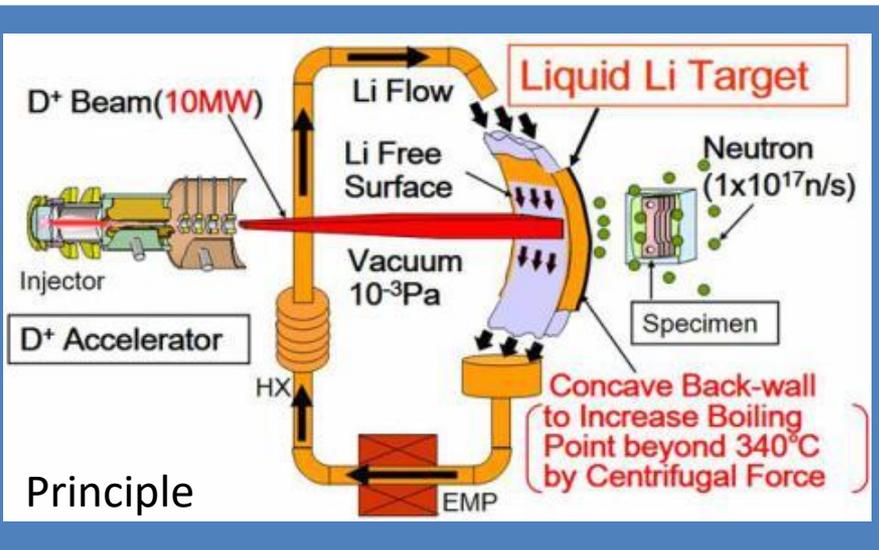
Severely cold-rolled, ultrafine-grained W;
Test temperature: RT



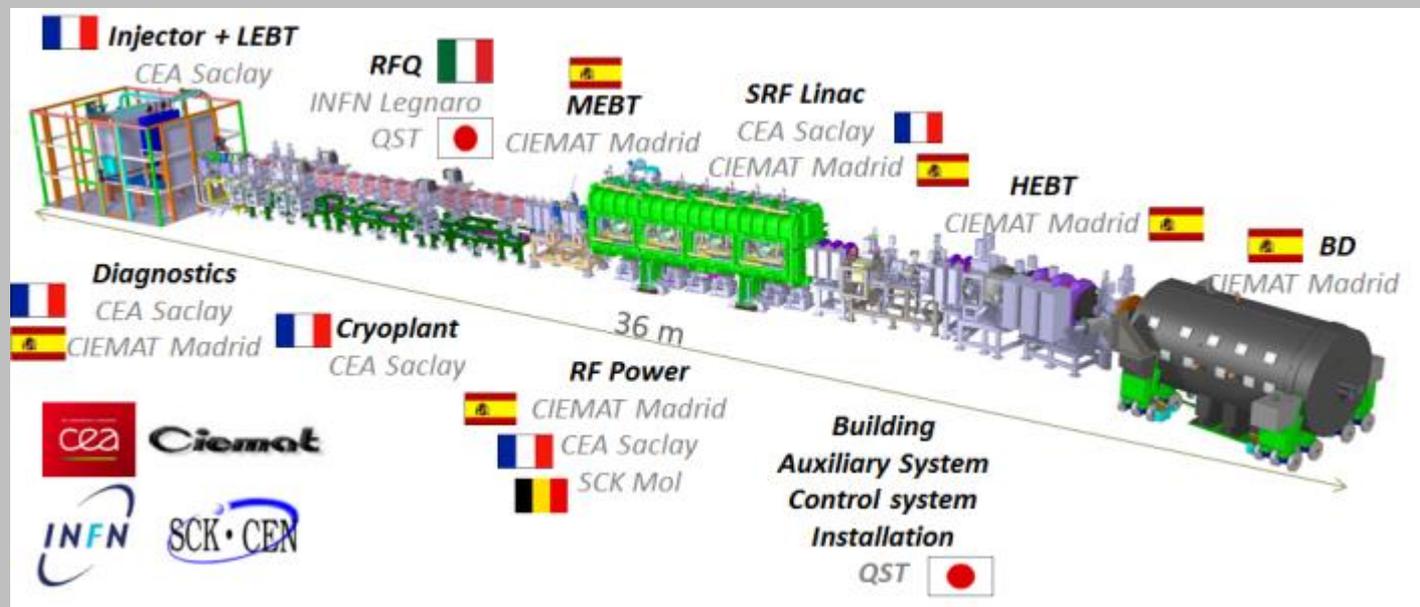
→ Severe cold-rolling makes W ductile

J. Reiser et al., *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 64 (2017) 261–278

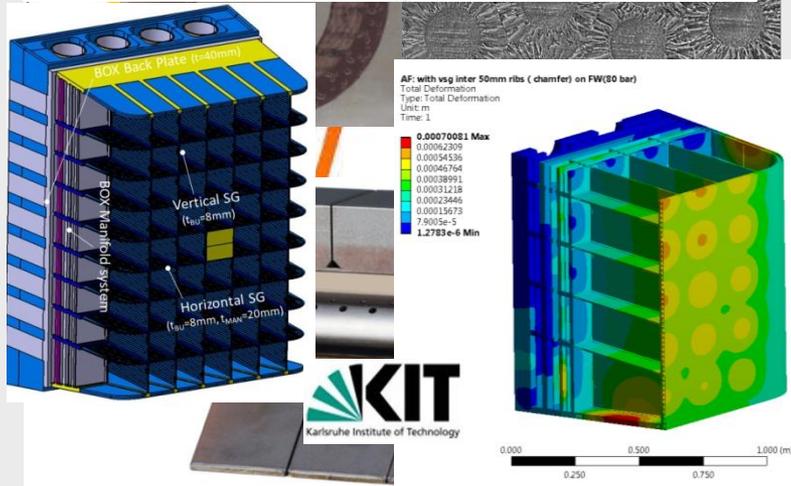
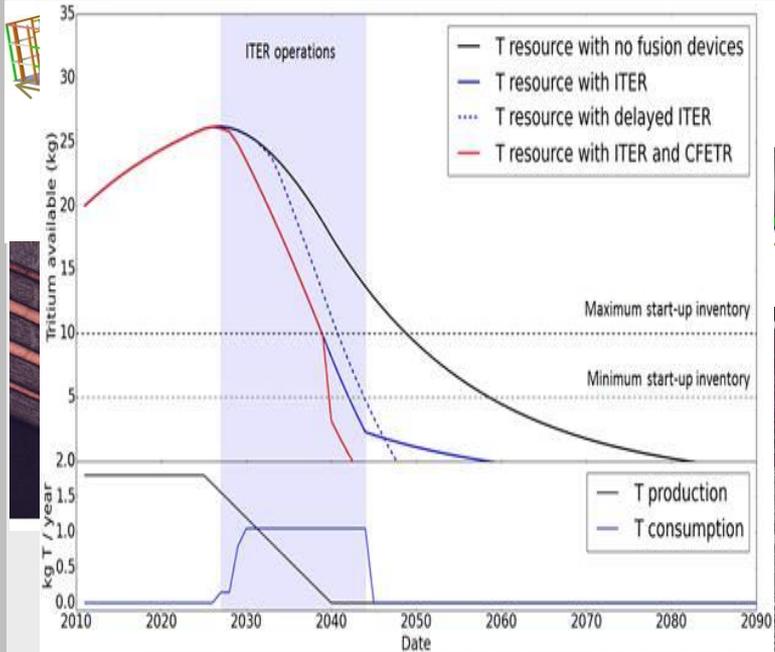
IFMIF-DONES



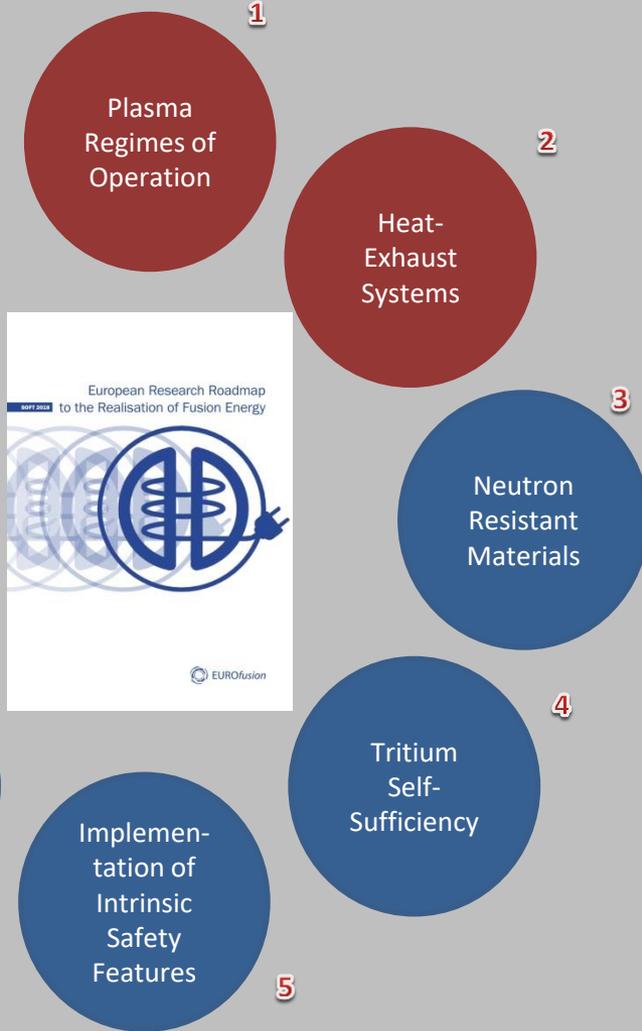
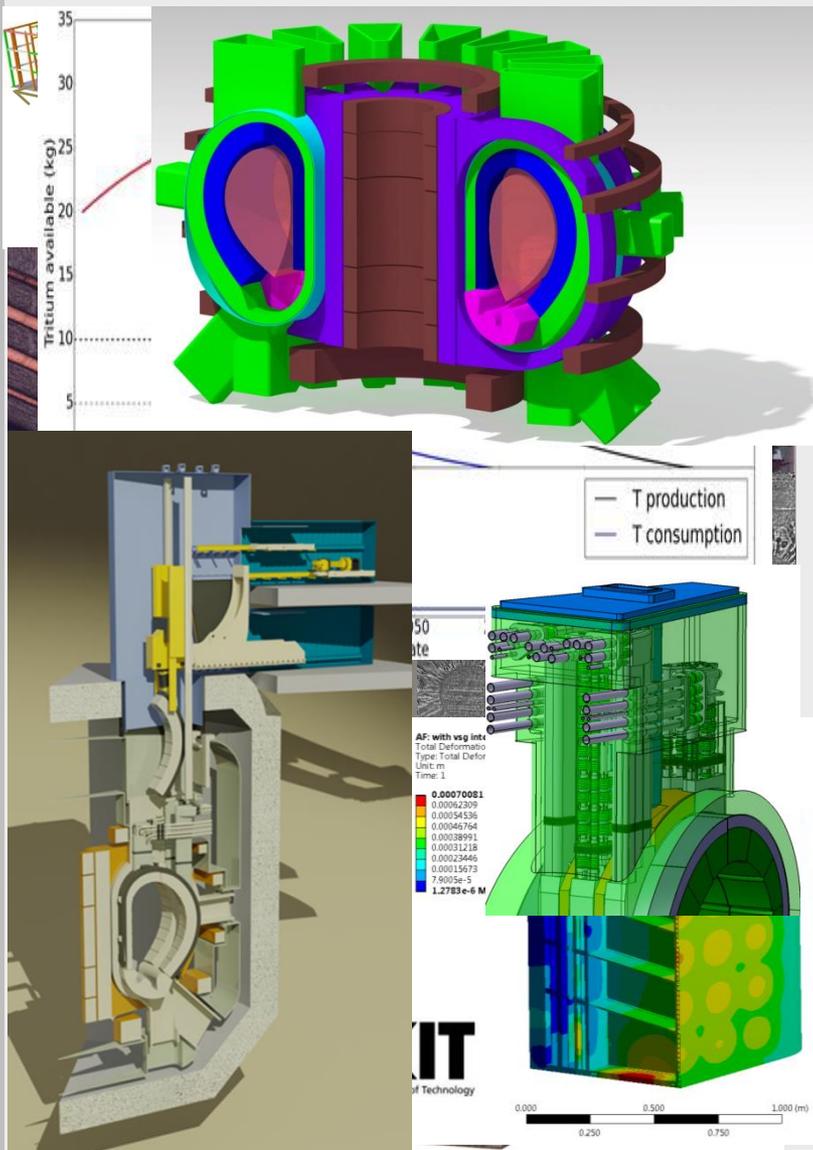
Prototype accelerator (with/in Japan)



Roadmap Missions



Roadmap Missions

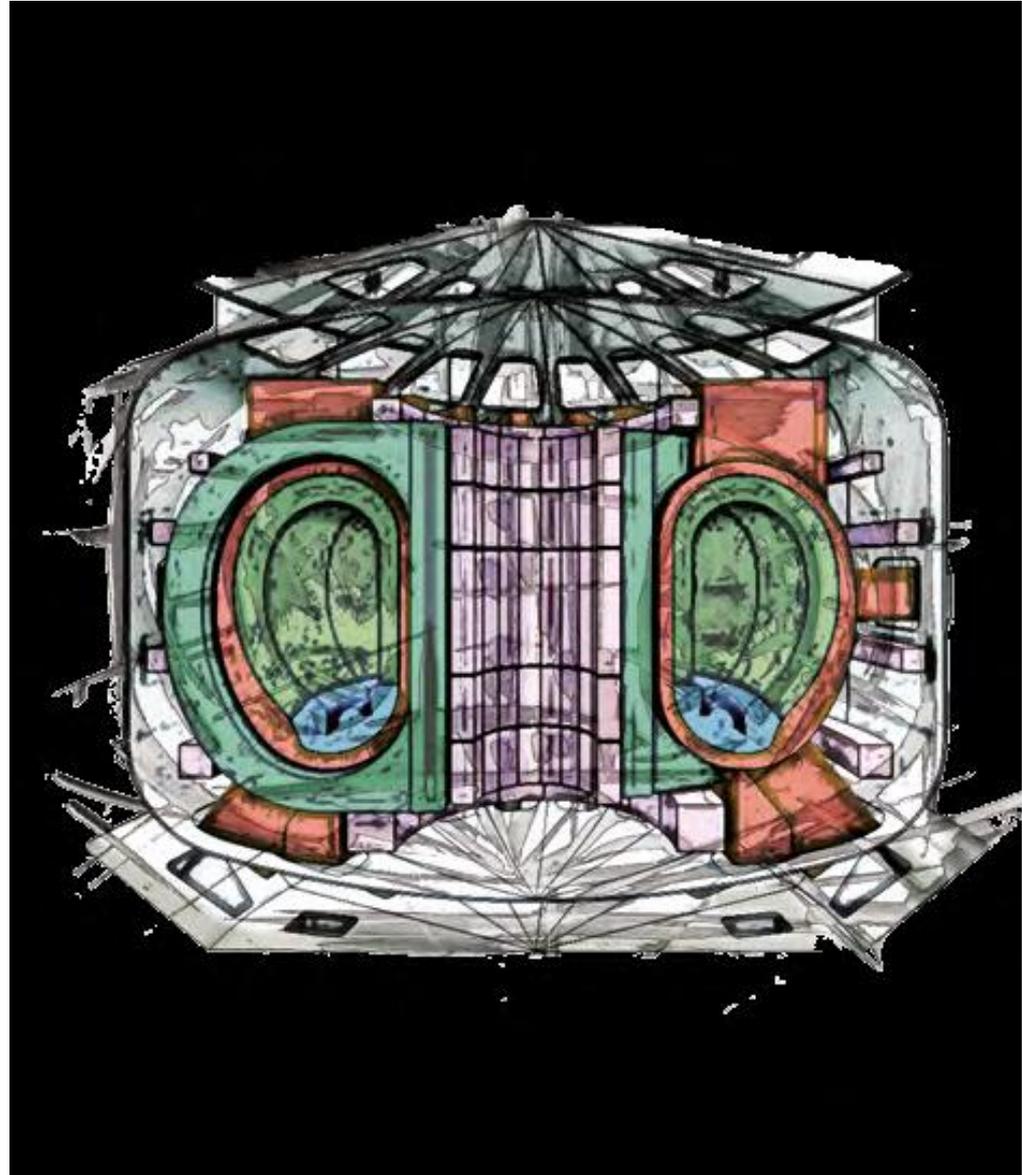


European DEMO concept is not decided!



- Close enough to ITER (science & technology) – reduce risk, use ITER experience*
- Close enough to a power plant to enable industry – reduce risk
 - Pick a starting point
 - Seek integrated evidence-based concept
 - Adapt as needed
 - Include test zones in DEMO to increase technology output

* *examples in back-up slides*

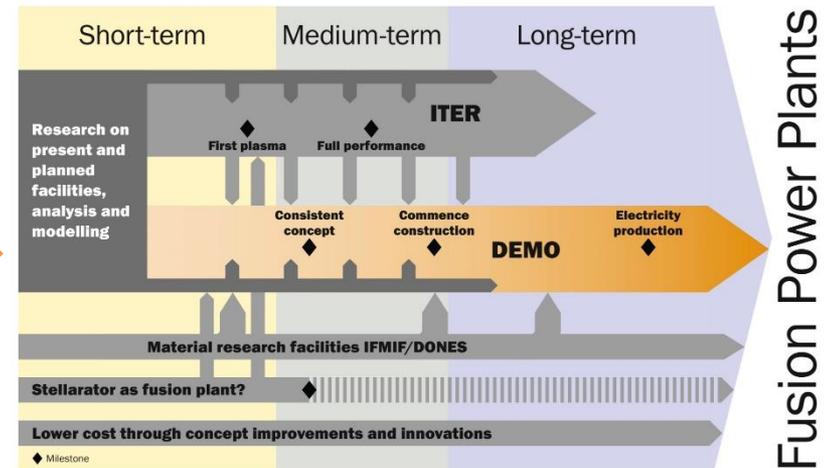
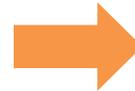


Missions 4-6: DEMO – plasma to grid

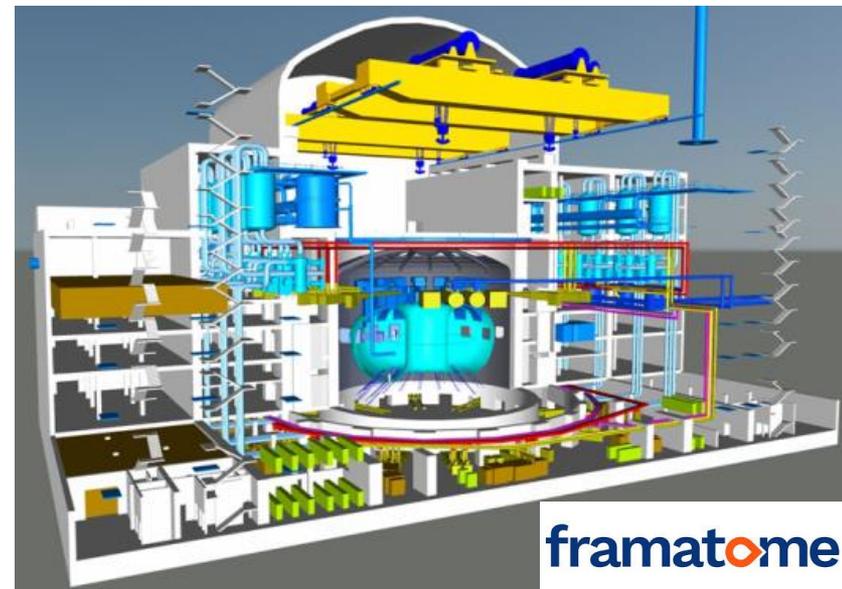


Full set of interconnected activities

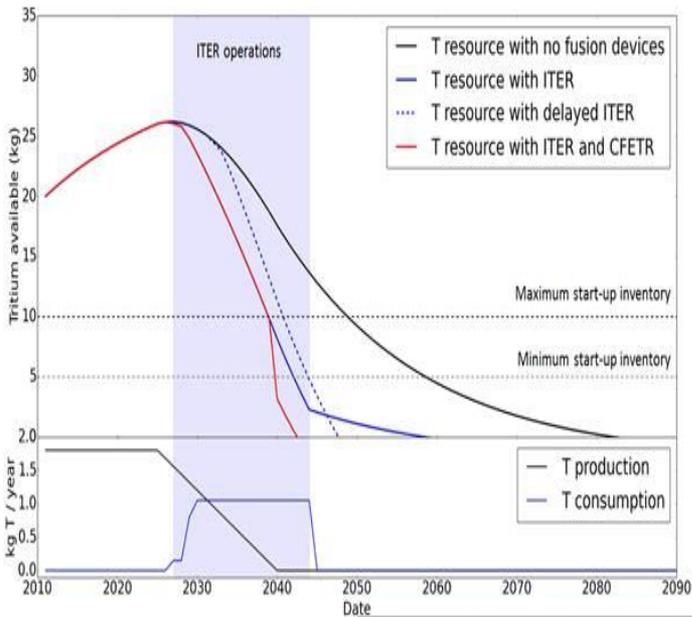
- Consistent **plasma** (pulsed has advantages)
- Breeding **blanket** (options)
- Divertor and main chamber **plasma facing components**
- **Containment**: vessel, cryostat, buildings
- **Balance of plant**: heat exchangers, turbines, storage
- **Reliable control**
- **Heating** and current drive
- **Tritium**, fuelling, pumping
- **Remote maintenance**: design driver
- **Safety**, environment, waste, recycling
- **Materials**: structural, functional



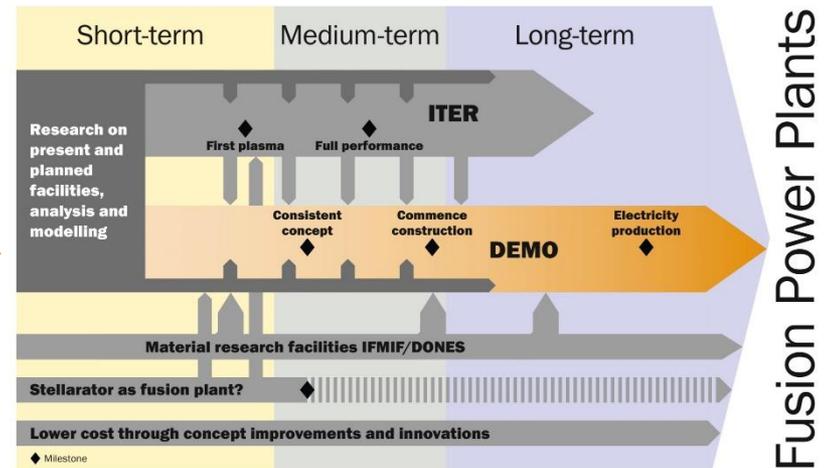
Integration, integration, integration



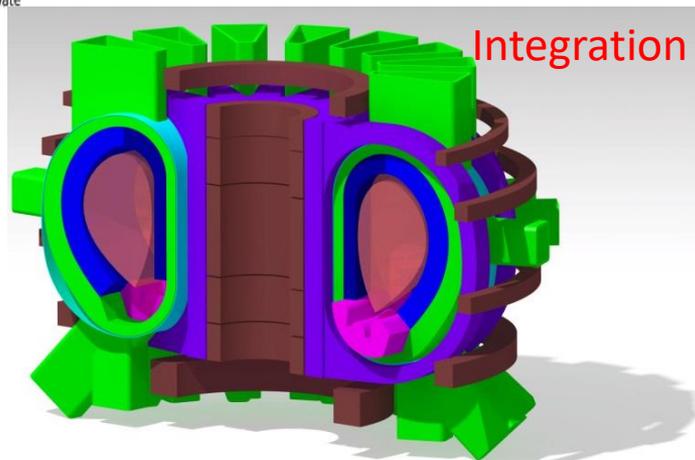
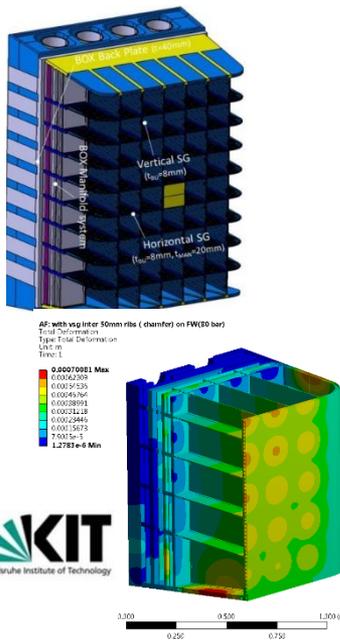
Missions 4-6: DEMO – plasma to grid



Tritium availability, inventory

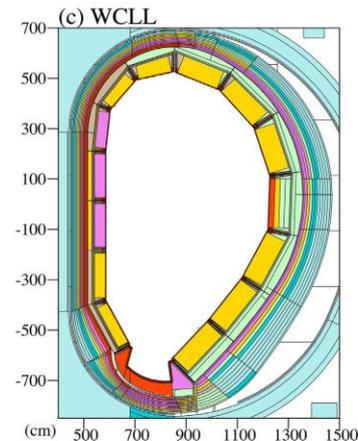


Fusion Power Plants

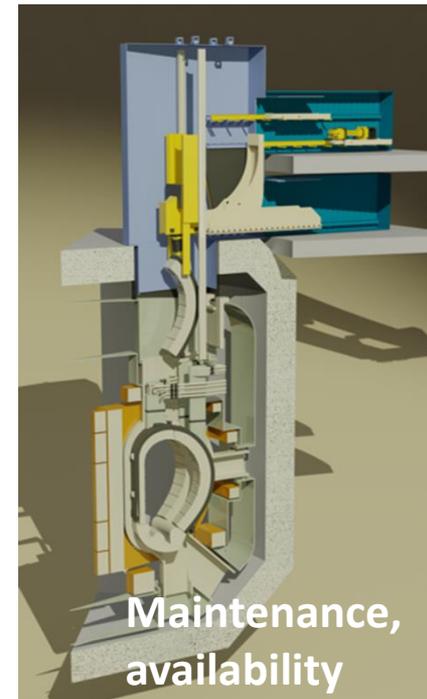


Integration

Breed, power, shield (now with ITER TBMs)



Activation, shielding



Maintenance, availability

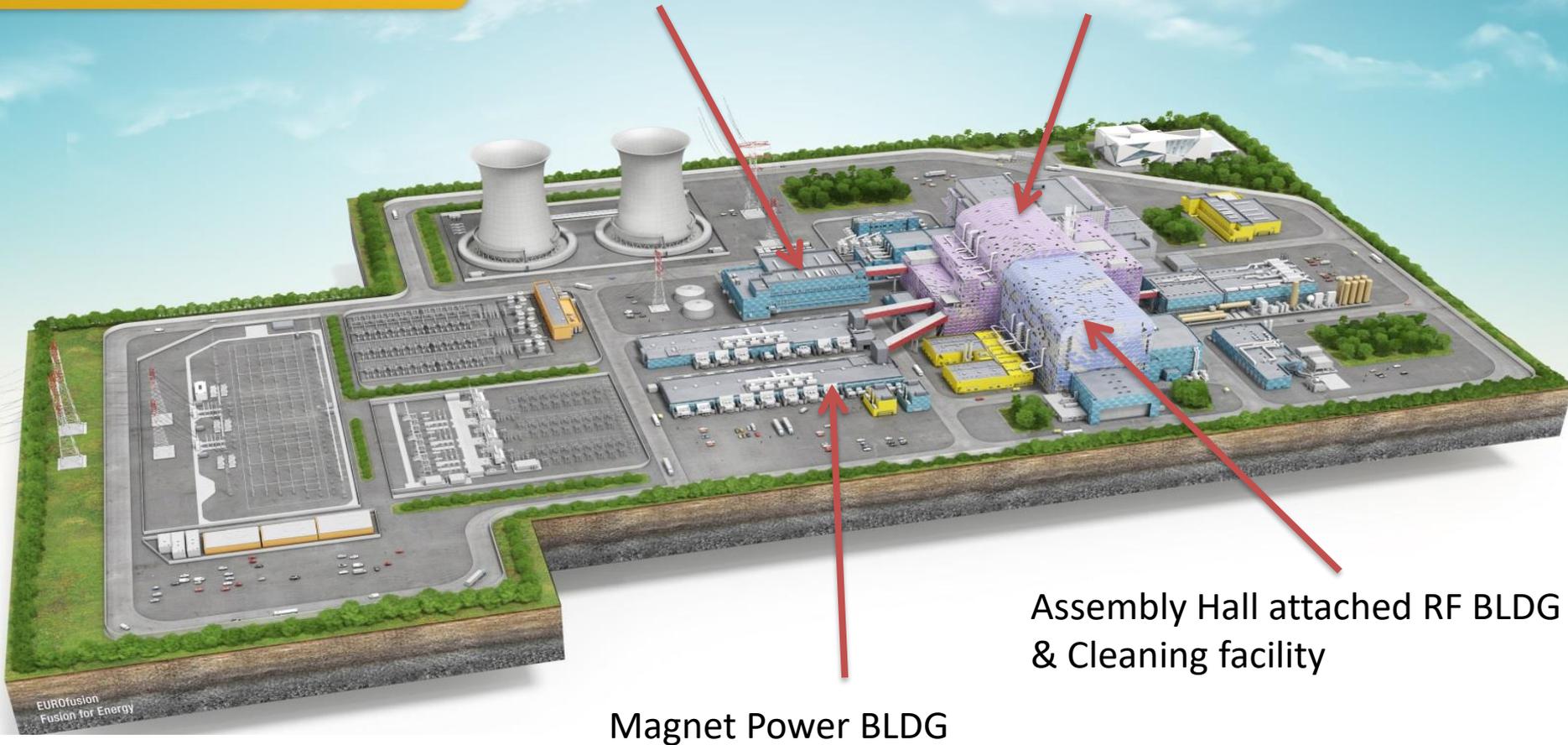
Preliminary DEMO Plant Layout



DEMO
DEMONSTRATION POWER PLANT

Turbine BLDG

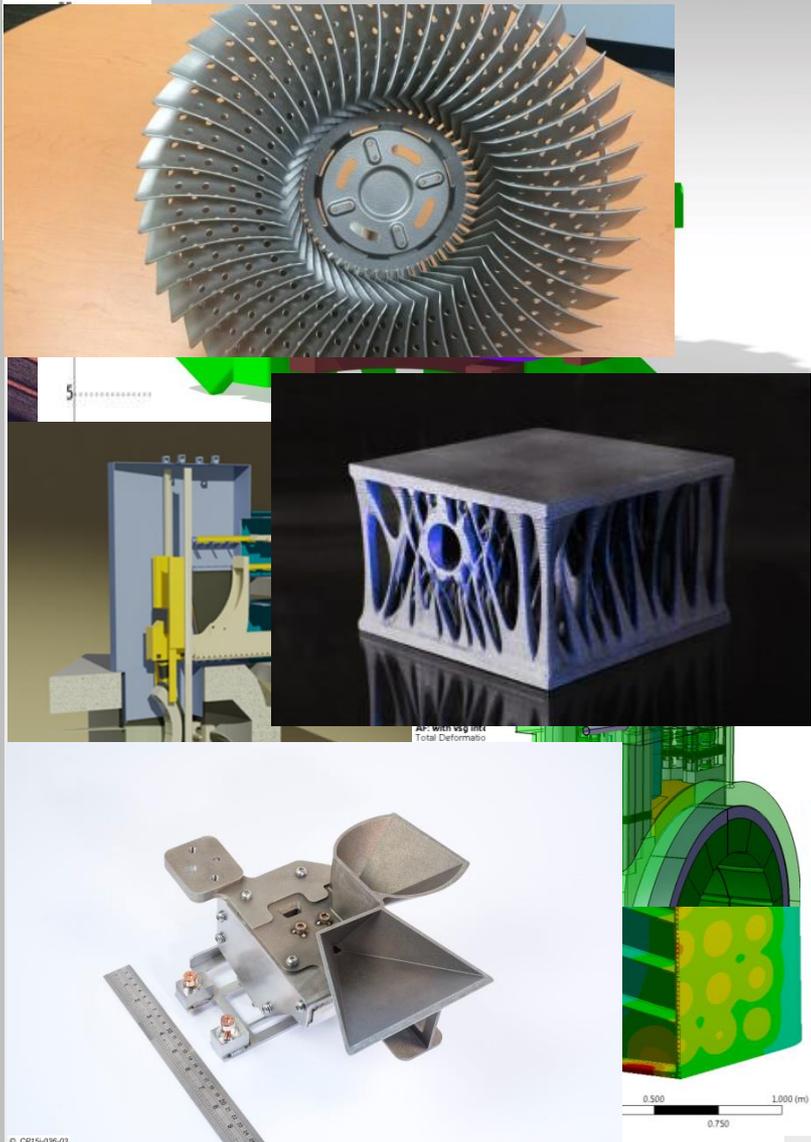
Tokamak Complex BLDG



Assembly Hall attached RF BLDG
& Cleaning facility

Magnet Power BLDG

Roadmap Missions



Mission 7: Cost of electricity

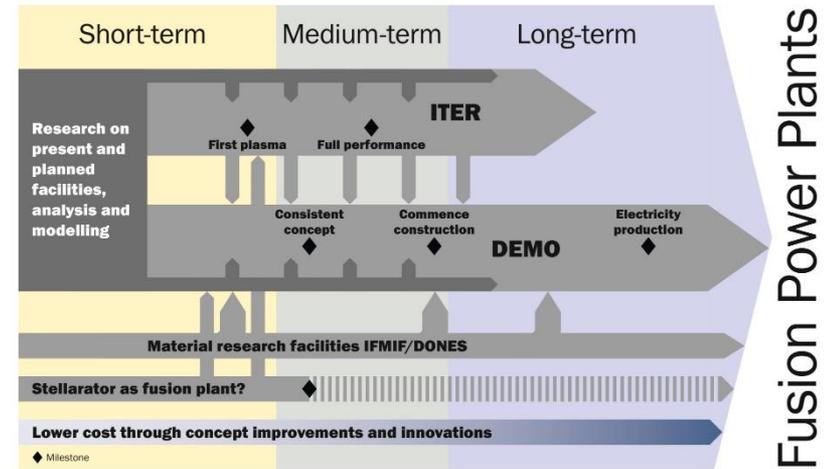


Challenges & opportunities for DEMO, FPPs

- plant and organisation complexity and interactions:
- shorter design cycle (computers!)
- increased availability (radical remote maintenance?)
- advanced plasmas, magnets, blankets/thermal cycles, materials
- advanced manufacturing and “design for manufacture”

Approach

- Identify cost drivers for DEMO and possible power plants
- Holistic approach to whole plant, whole lifetime, supply chain



HTS cable



Mission 7: Cost of electricity

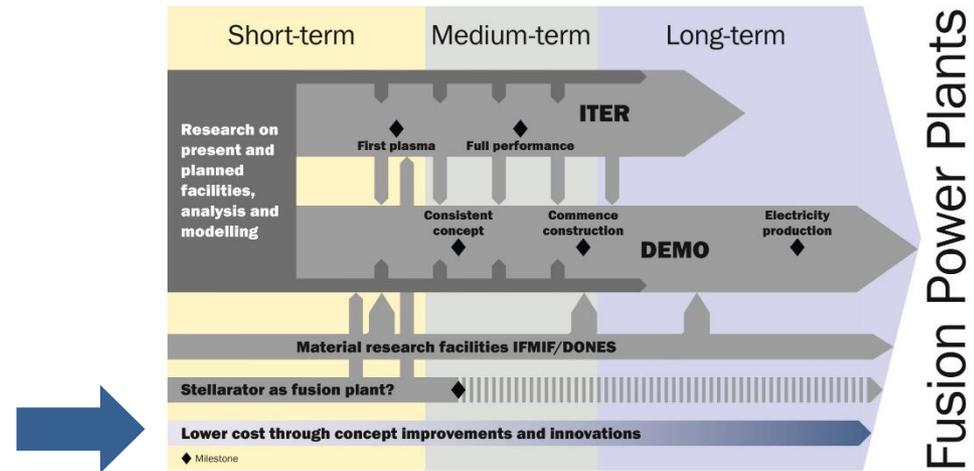


Challenges & opportunities for DEMO, FPPs

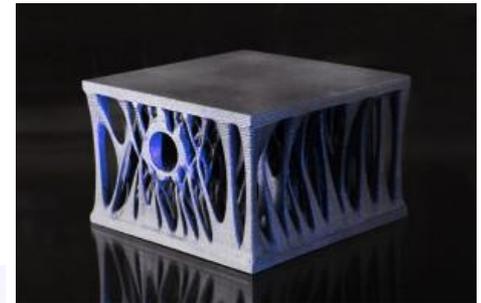
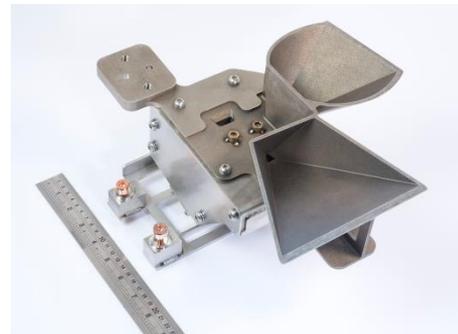
- plant and organisation complexity and interactions:
- shorter design cycle (computers!)
- increased availability (radical remote maintenance?)
- advanced plasmas, magnets, blankets/thermal cycles, materials
- advanced manufacturing and “design for manufacture”

Approach

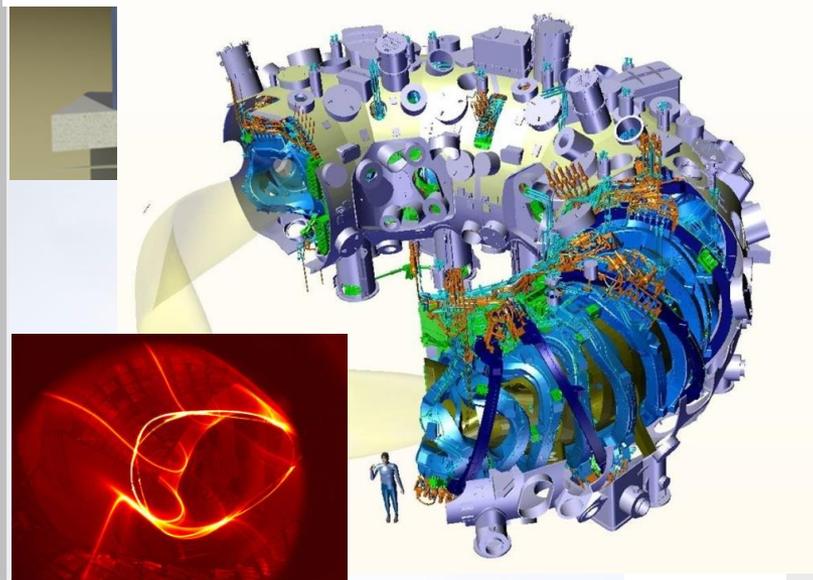
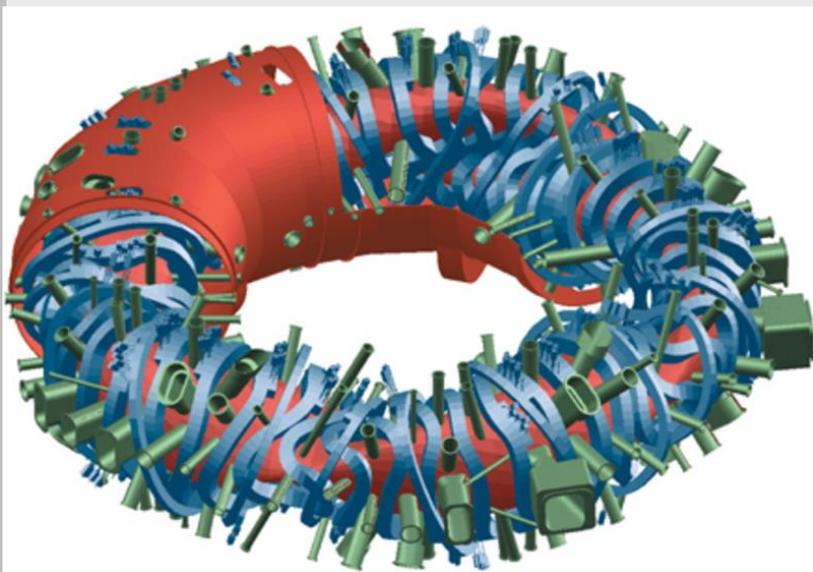
- Identify cost drivers for DEMO and possible power plants
- Holistic approach to whole plant, whole lifetime, supply chain



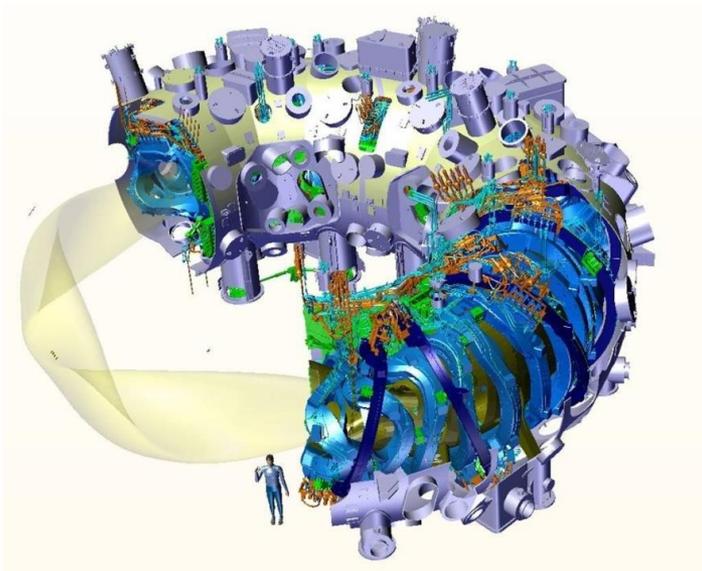
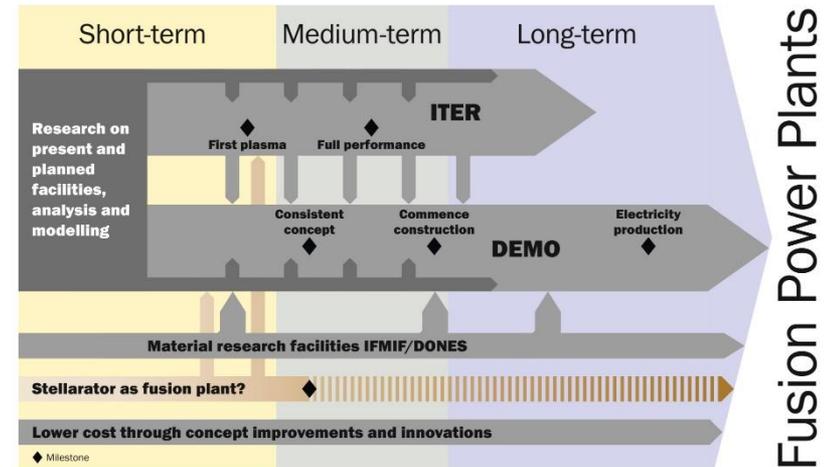
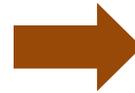
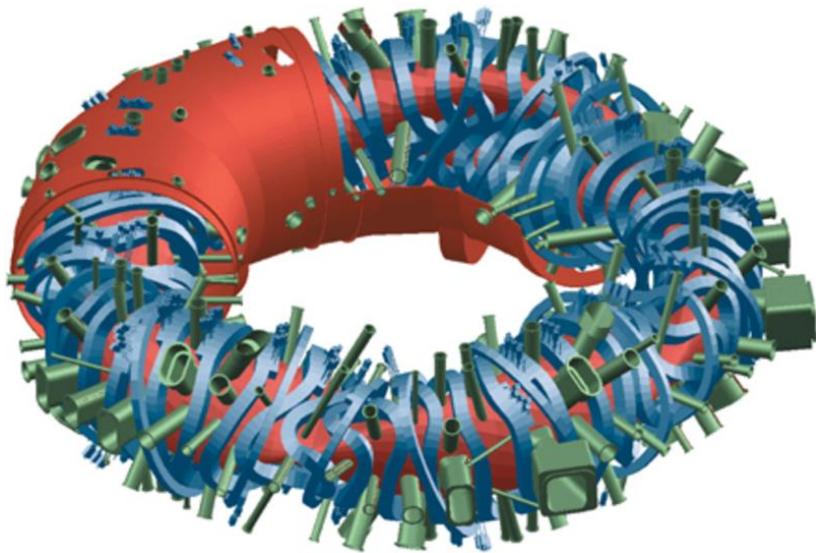
Advanced manufacturing



Roadmap Missions

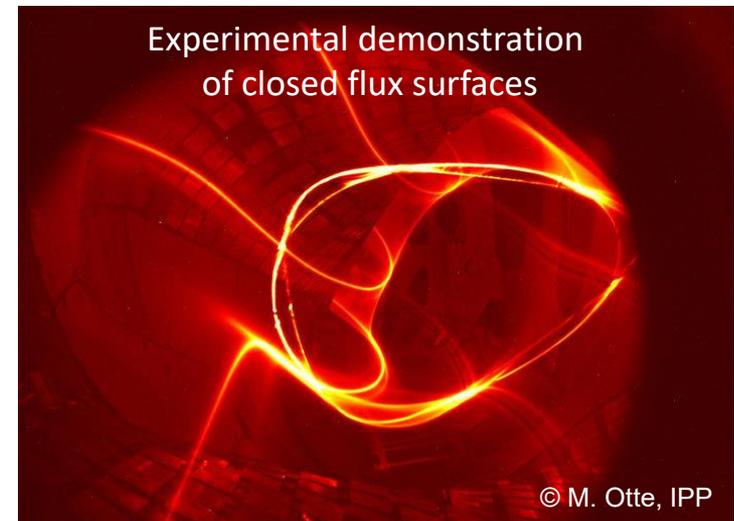


Mission 8 - Stellarators

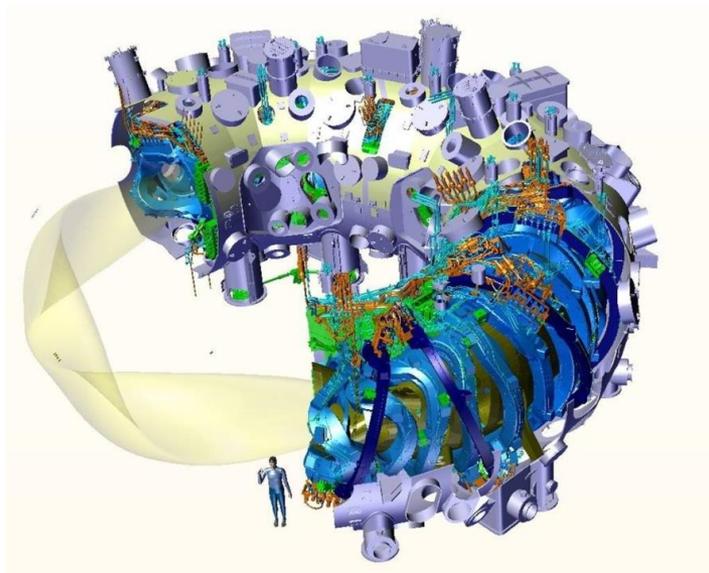
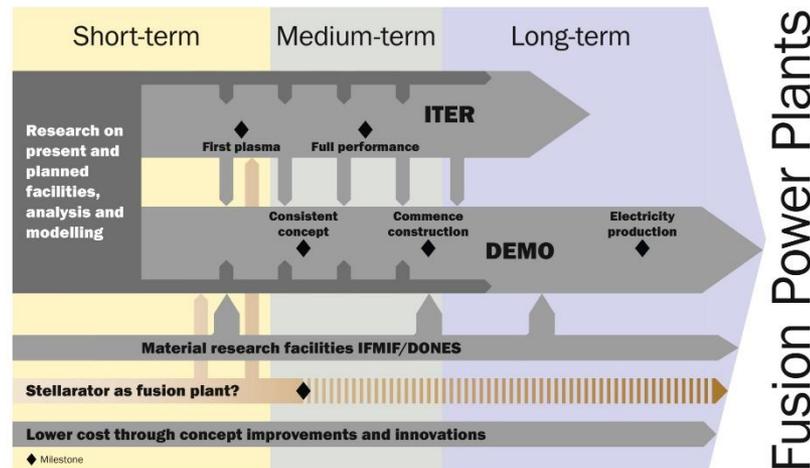
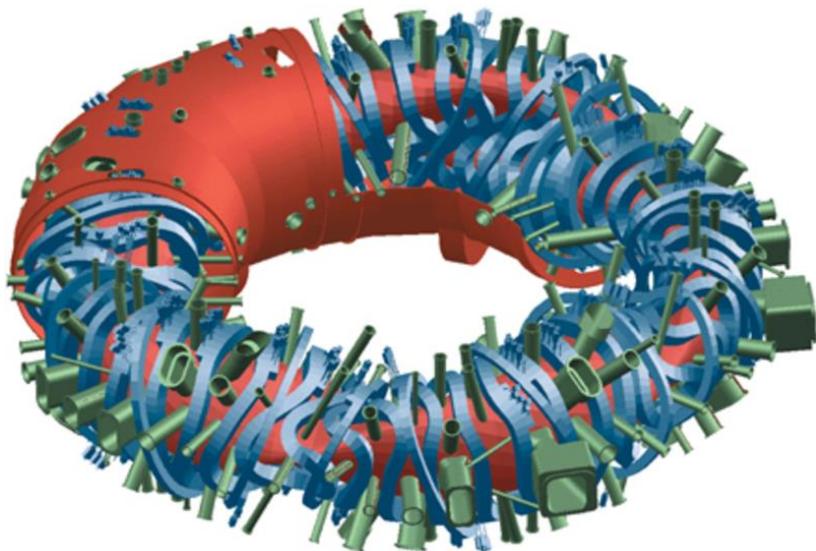


Wendelstein 7-X: 5.5m helias stellarator

2018: Record triple product for stellarators

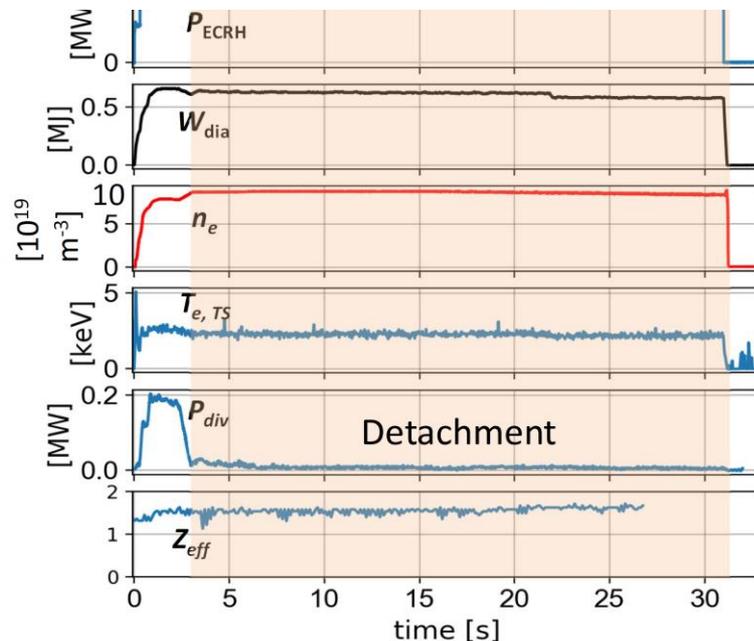


Mission 8 - Stellarators



Wendelstein 7-X:
5.5m helias
stellarator

30s pulse with
detached island
divertor (APS
2018)





Branduolių sintezės spinofai



Nors pramonė pradės statyti branduolių sintezės elektrines tik už dešimtmečių, tačiau jau dabar gali turėti tiesioginės naudos:



Bruker

Health

Superconducting cables employed for Medical Resonance Imaging. Yearly turnover ~1 billion

Materials sciences

A technique pressing metal sheets into the desired shapes. Today, the company '3D Metal Forming' delivers sophisticated cockpit shapes to the aeronautics industry.



3dmetalfforming



Wikimedia

Environment

Palladium alloy membranes developed for cleaning up fusion waste effectively treat effluents from chemical and automobile industries

Remote Handling

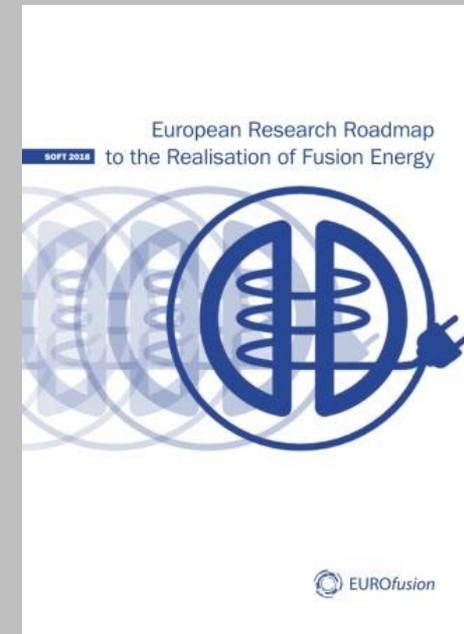
used in EUROfusion's JET Tokamak:

Applied to high-energy physics, space science, nuclear decommissioning, and modern surgical methods





- Branduolių sintezės kelrodis pristato išsamų įrodymais grįstą mokslinių tyrimų planą
- Programa siekia padėti ITER sėkmei ir nukreipti DEMO projekto pasirinkimus
- Pateikia bazinį DEMO projekto variantą, kuris reikalingas identifikuoti ir išspręsti projekto integravimo klausimus.
 - **Sukurtas karkasas leidžia ateityje nagrinėti ir alternatyvias koncepcijas**
- Pagrindinis tikslas – pradėti gaminti elektrą branduolių sintezės elektrinėje kaip galima greičiau
- Kuriamos technologijos leidžia kartu atsirasti ir spinofams, kurie gali rasti pritaikymą visiškai kitose gyvenimo srityse.



<https://www.euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/>