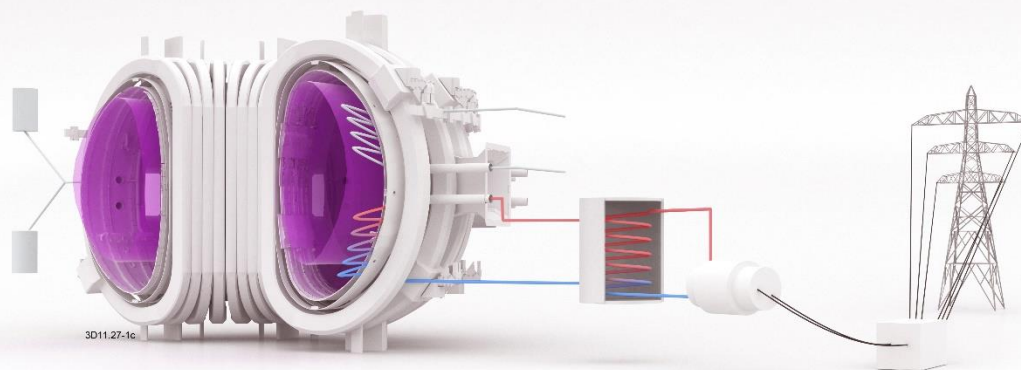


Znanost
na cesti

In ZRC SAZ



Credit: ITER

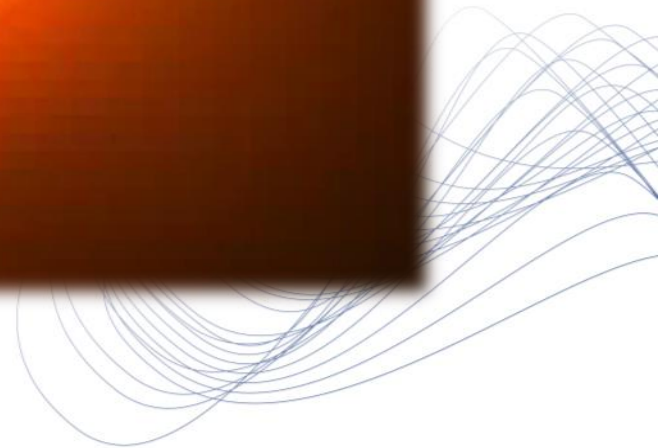
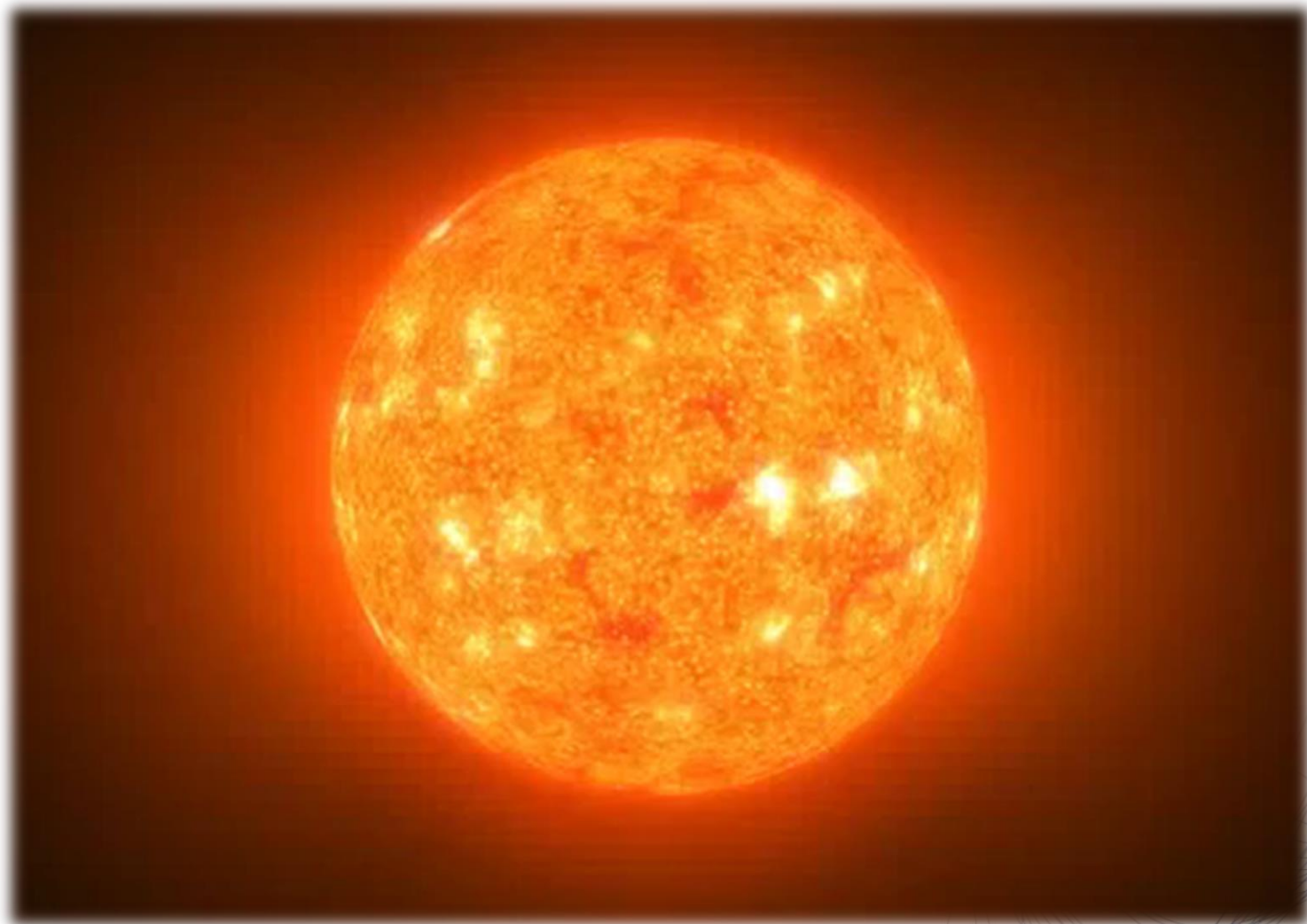
14. maj 2019 ob 19:00

Fuzijska elektrarna - strma pot tehnoloških presežkov

dr. Boštjan Končar, Institut „Jožef Stefan“

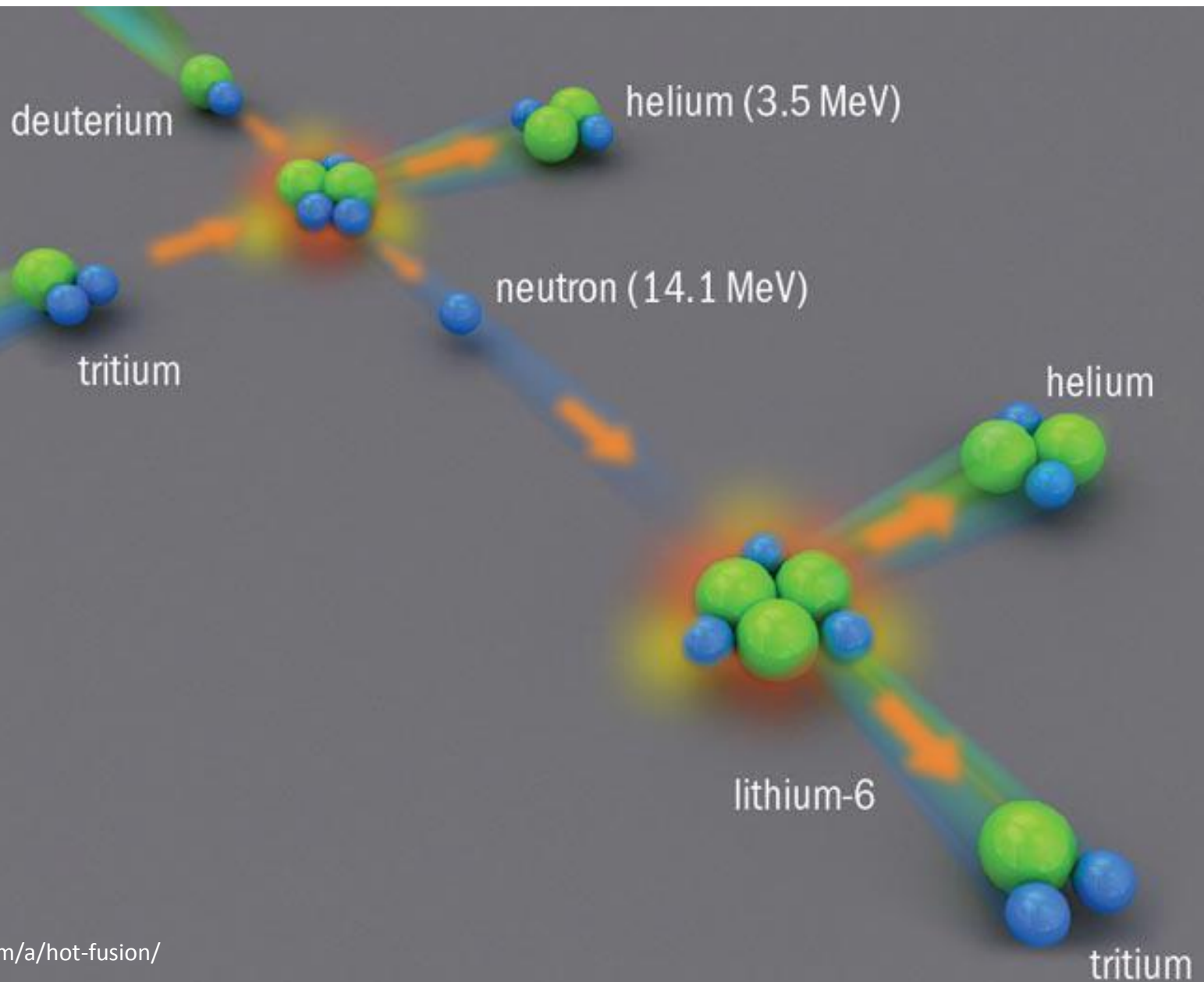
Lea Udovč, STA





Vir: <https://www.youtube.com/watch?v=ORmNh29u69A>

Fuzijska reakcija

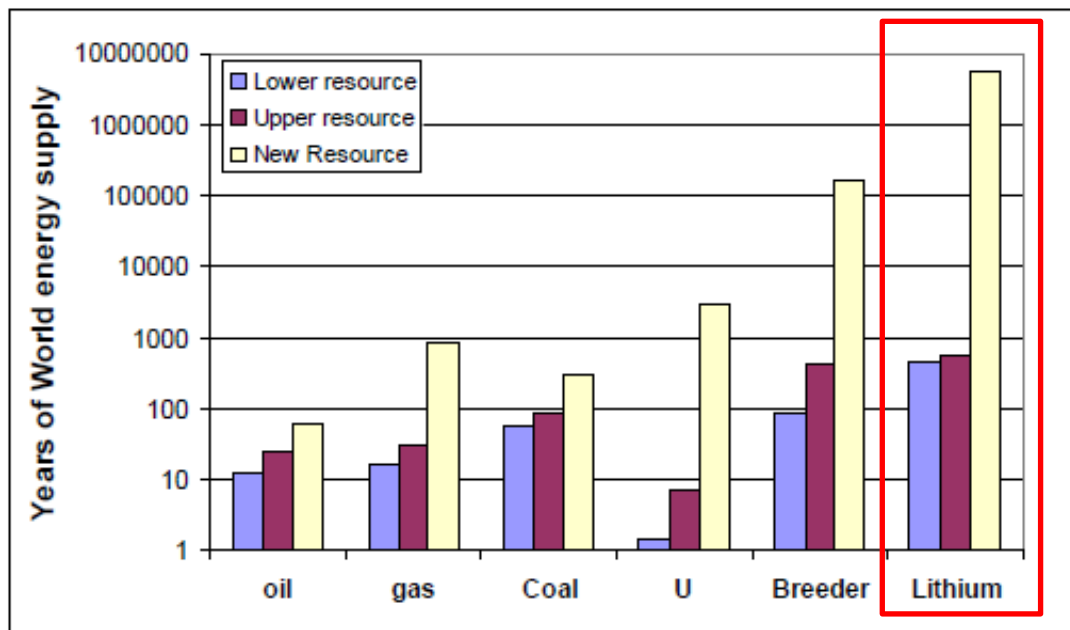


Zaloge goriva za različne energetske sisteme

- Devterij pridobimo iz vode
 - 1 liter vode vsebuje 33 mg of devterija
 - Neomejene zaloge v oceanih, milijarde let

- Tritij → iz litija
 - V zemeljski skorji,
 - V oceanih
 - Med tisoč in milijoni let zalog

Fuzija 😊



Vir: UKAEA (WEC, BP, USGS, WNA)

Poraba goriva ☺

Fuzijska elektrarna



+

=



Termoelektrarna

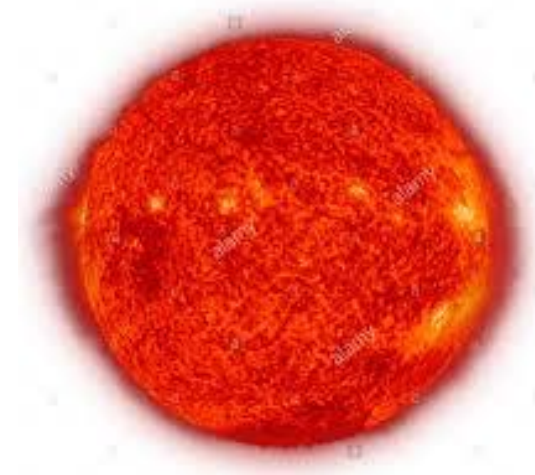


110 ton lignita

Potrebe povprečnega evropejca po električni energiji v 60 letih.

Ampak: fuzija je zelo zahtevna ☹️

- Delci z enakim nabojem se odbijajo.
- V centru sonca je 15 milijonov °C, na zemlji moramo doseči **150 milijonov °C**



- Doseči moramo zadostno:

- gostoto delcev n
- Temperaturo T
- Čas zadrževanja

Led



Voda



Para



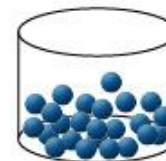
Strela
(ioniziran plin)



Trdno



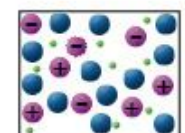
Tekoče



Plin



Plazma



● Molekule

● Ioni

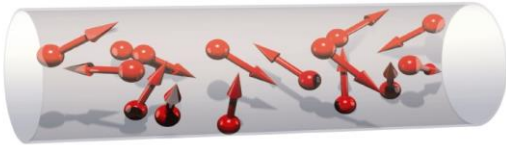
● Elektroni

Segrevamo

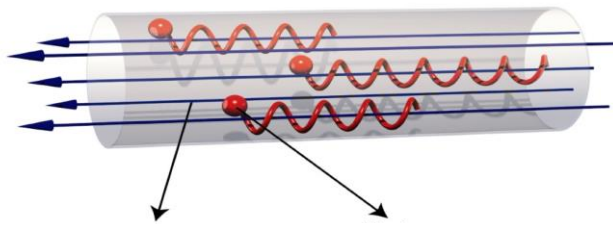


Magnetno omejevanje

Brez magnetnega polja

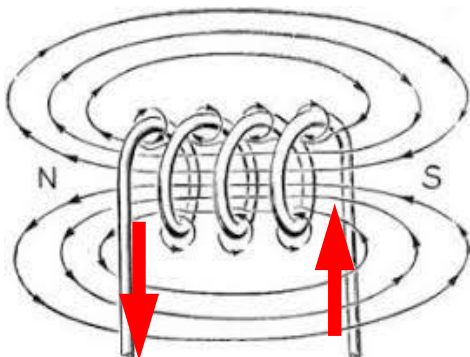


V magnetnem polju



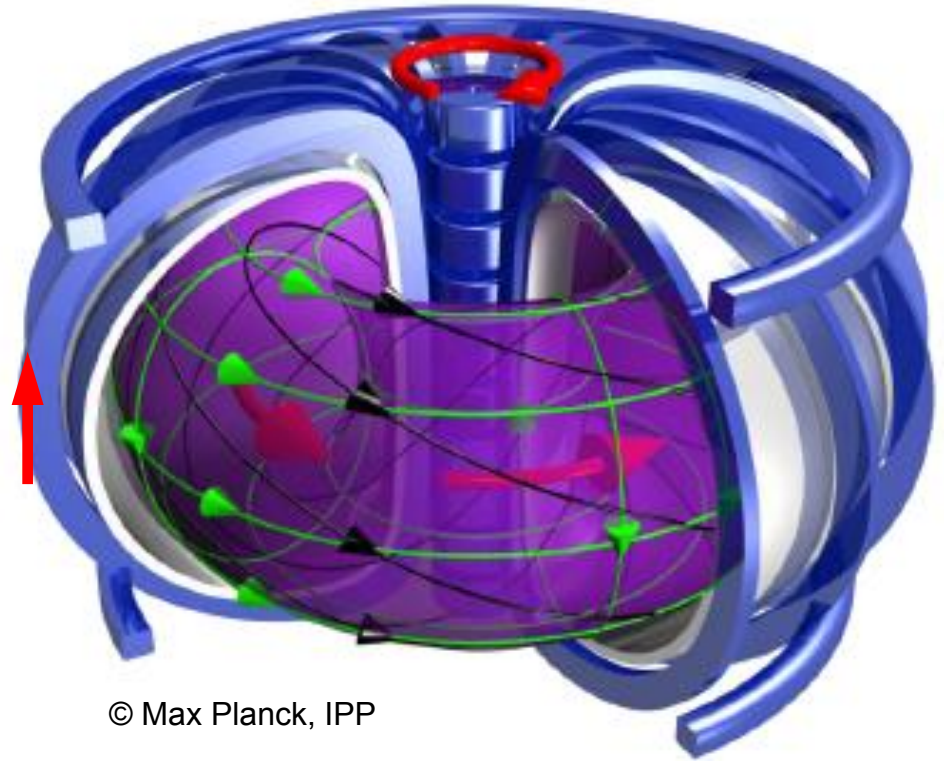
Magnetna silnica

Nabiti delec



Električni tok

Tokamak

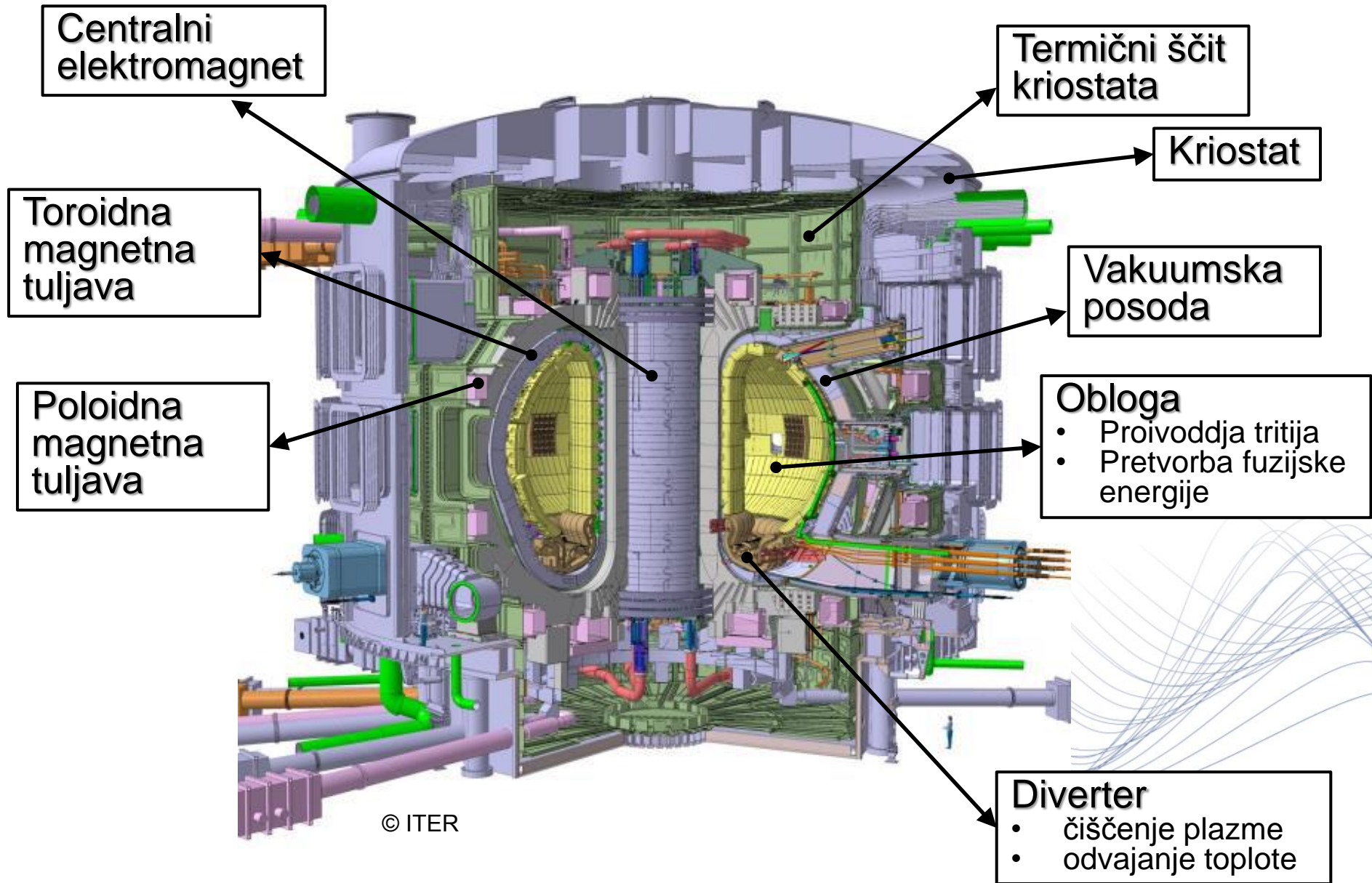


© Max Planck, IPP

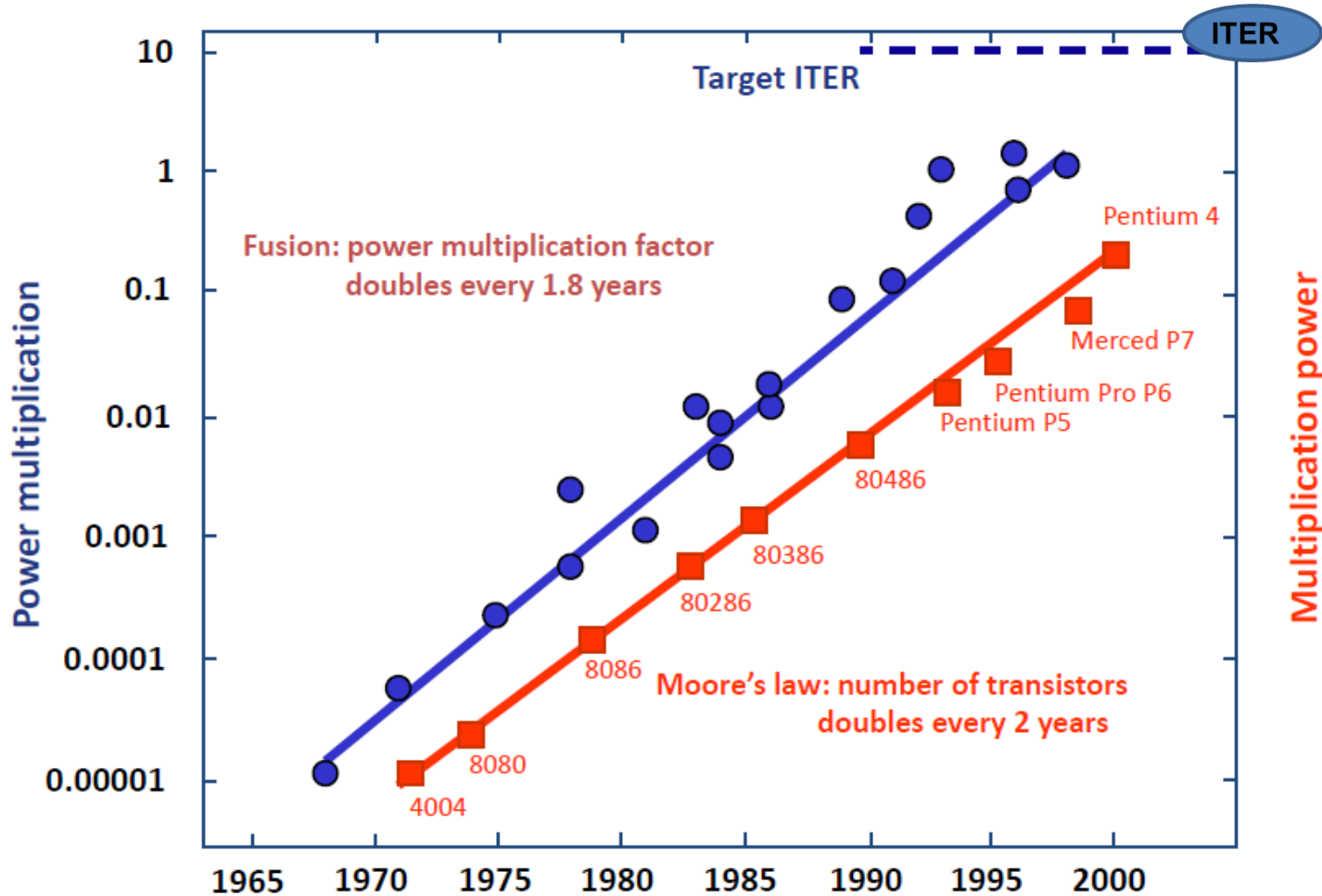
тороидальная камера с магнитными катушками"
(*toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami*)

A Sakharov, I. Tamm (1958)

Glavni deli tokamaka



Napredek v fuziji



© EUROfusion

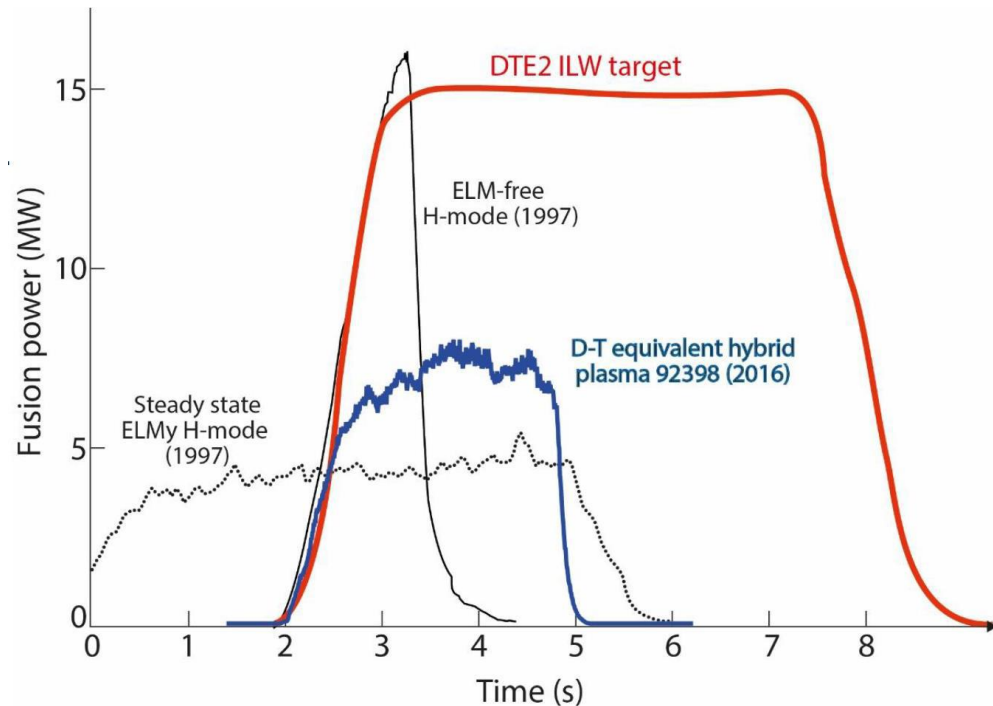
- Največja moč 16 MW (JET)
- Najdaljši pulz 6 min (Torre Supra)

Joint European Torus (največji)



© JET

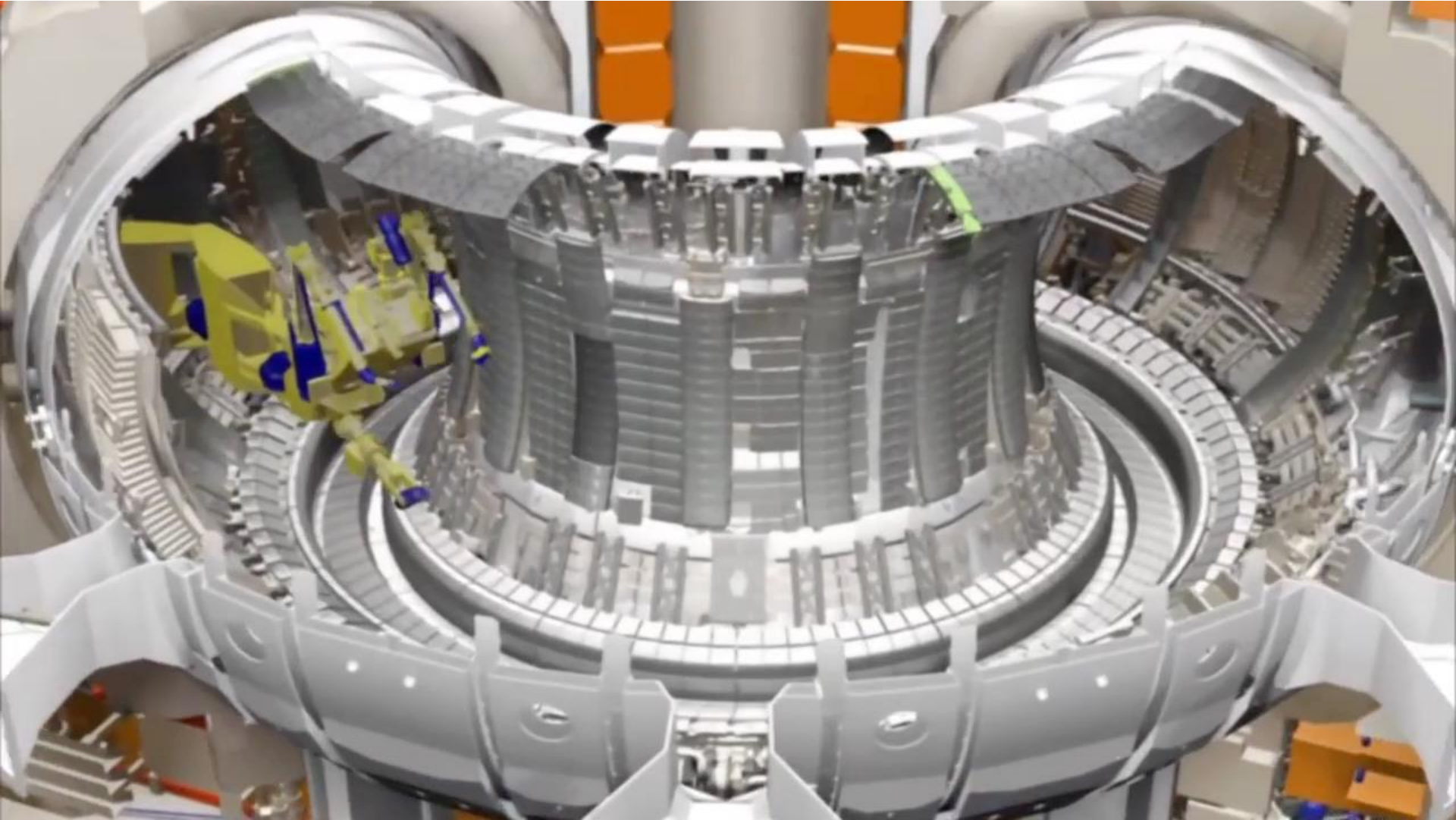
EU naprava (40 laboratorijev)
Culham, VB



Mantsinen EPS Conf. 2017

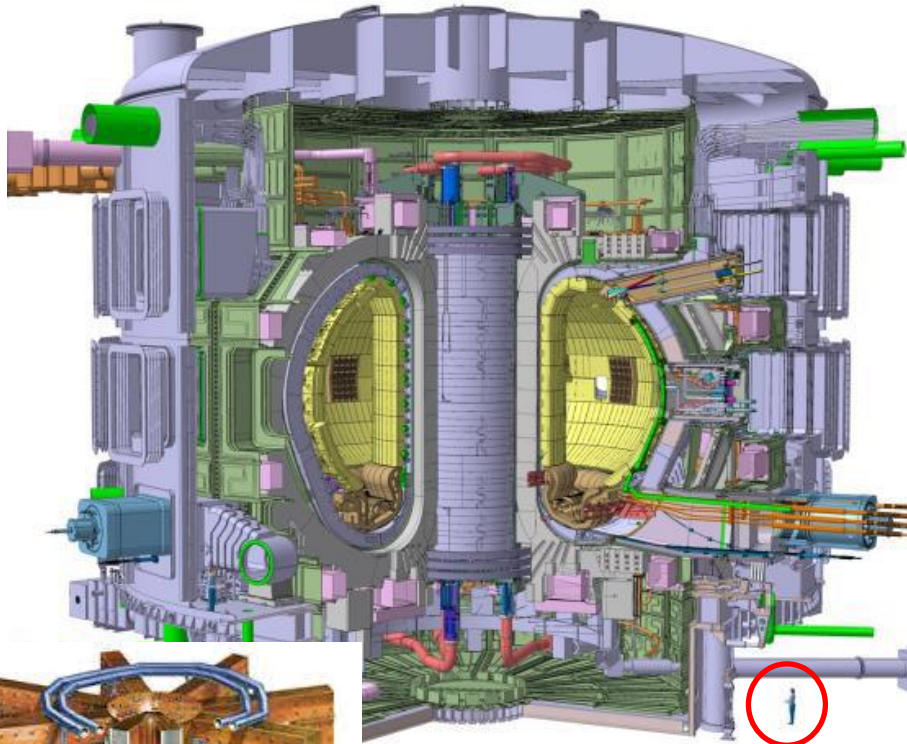
- Prva DT fuzija (1991)
- Največja moč 16 MW (1997).
- Največji izkoristek $Q_{DT} = 0.62$
- Trenutno edini lahko obratuje z DT

JET – daljinsko upravljanje

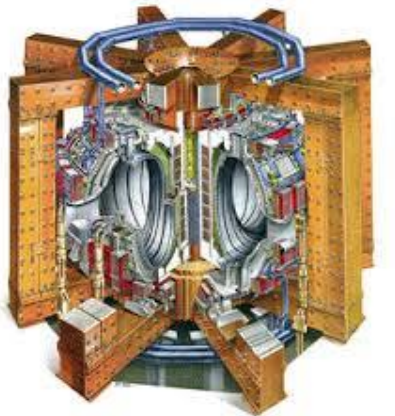


© JET <https://www.youtube.com/watch?v=pv8UrMUOkww>

ITER naslednji korak



© ITER



JET

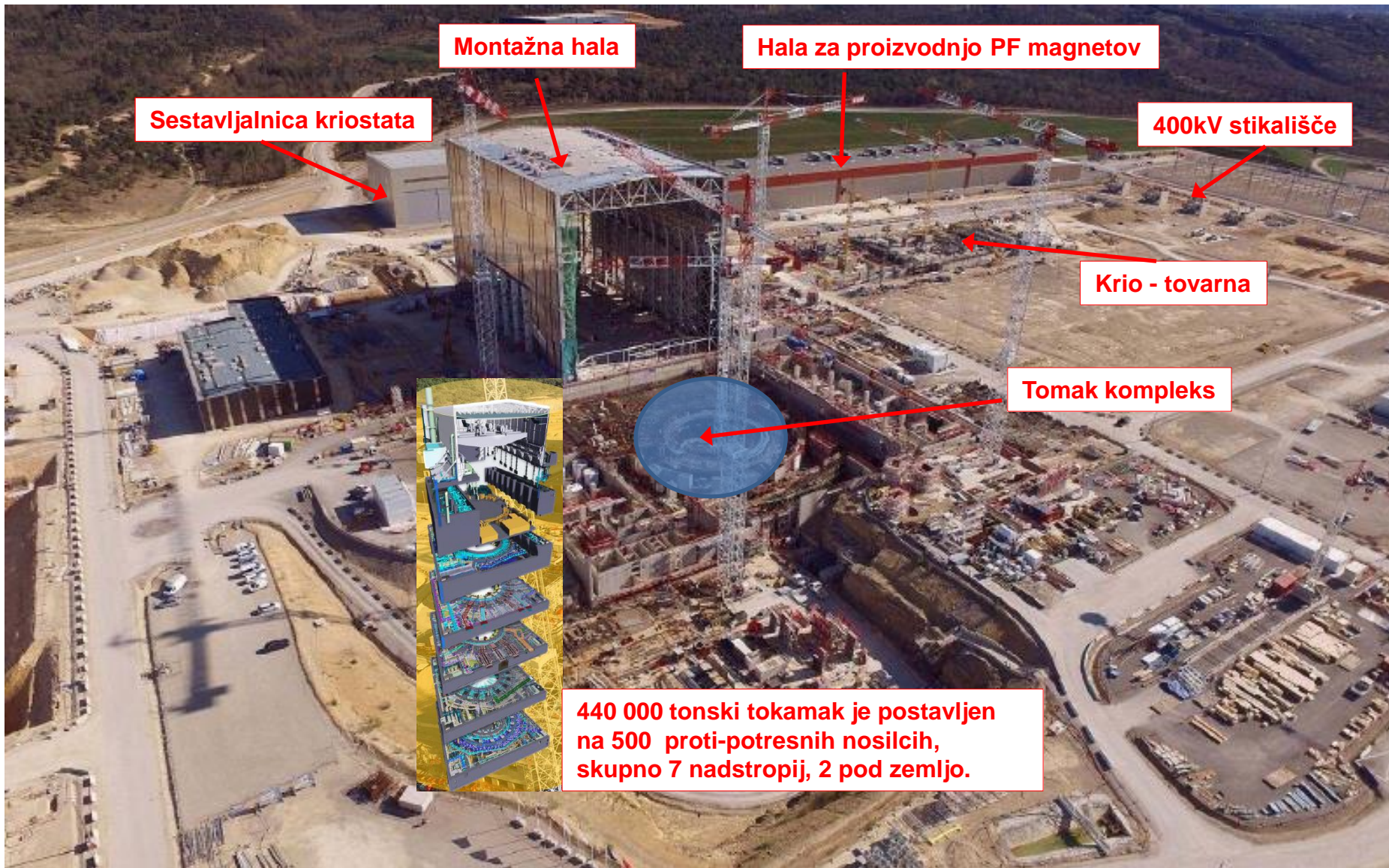
- Gretje 50 MW, 500 MW,
 $Q = P_{\text{fuz}} / P_{\text{gretje}} = 10$
- 230 milijonov stopinj, pulz 5 min
- Testiranje proizvodnje tritija

Samovžig plazme

- $P_{\text{fus}} = P_{\text{alpha}} + P_n$
- $P_{\text{alpha}} = 100$ MW (plazma se greje sama s He)
- $P_n = 400$ MW (koristna nevtronska moč)

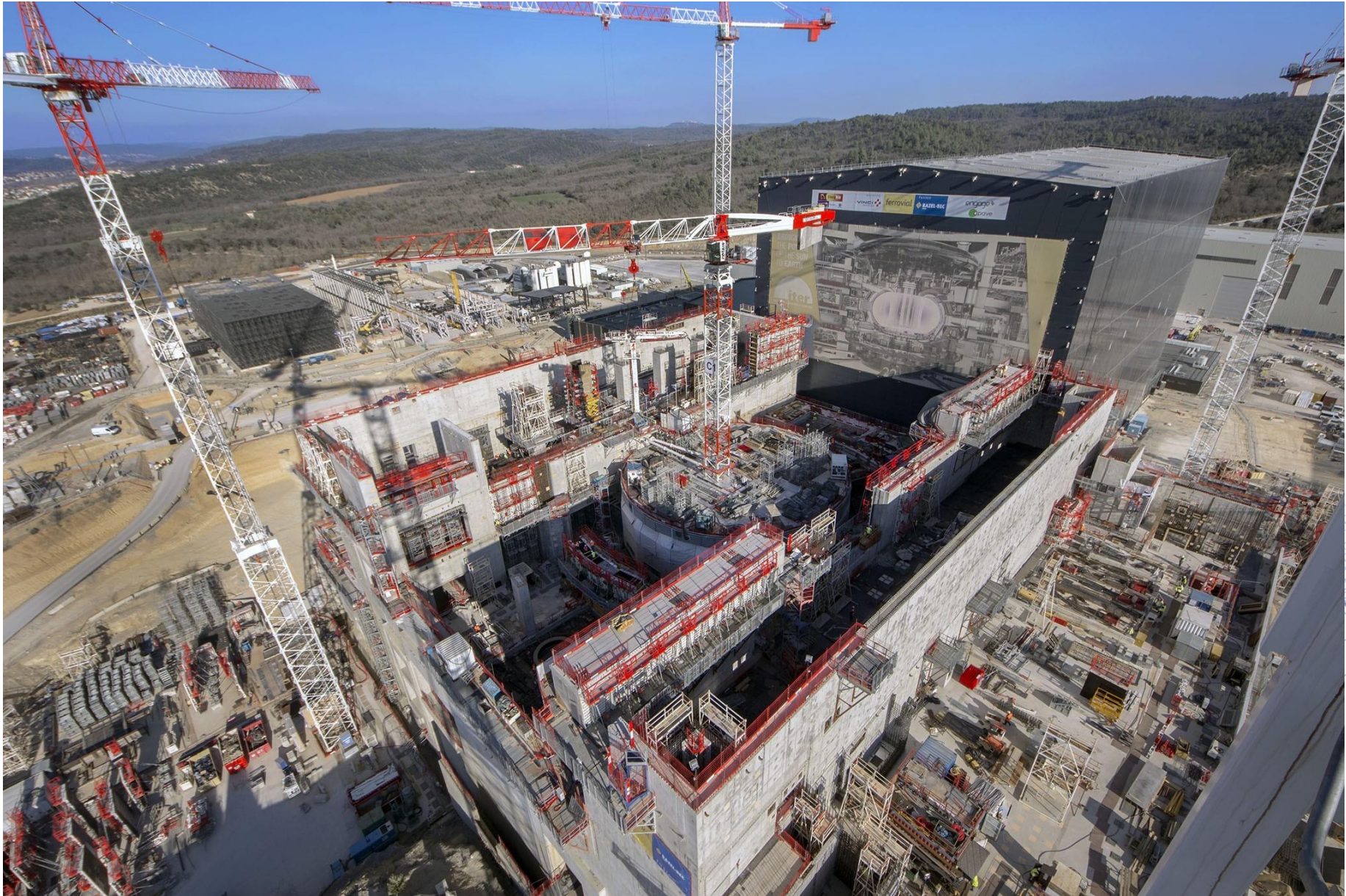
ITER (maj 2016)

© ITER



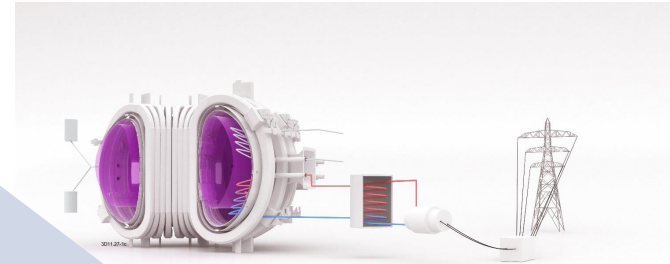
ITER (marec 2019)

© ITER



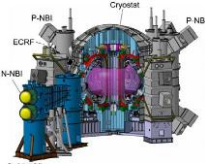
Na poti k fuzijski elektrarni

Nevtronsko obsevanje materialov
DONES

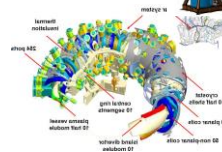


Fuzijska elektrarna

JT60-SA

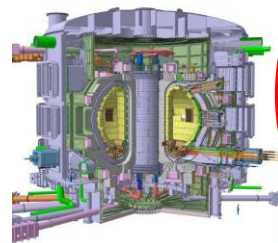


W7-X

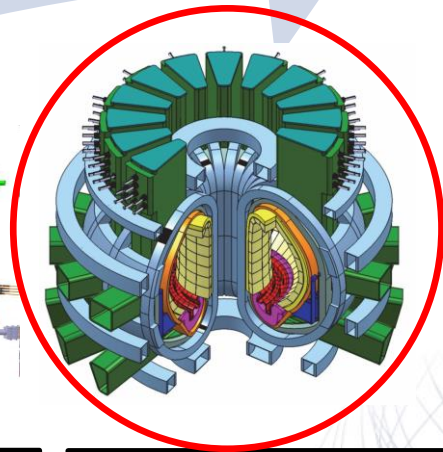


DEMO

ITER



JET



WEST, TCV,
COMPASS-U
itd...

AUG

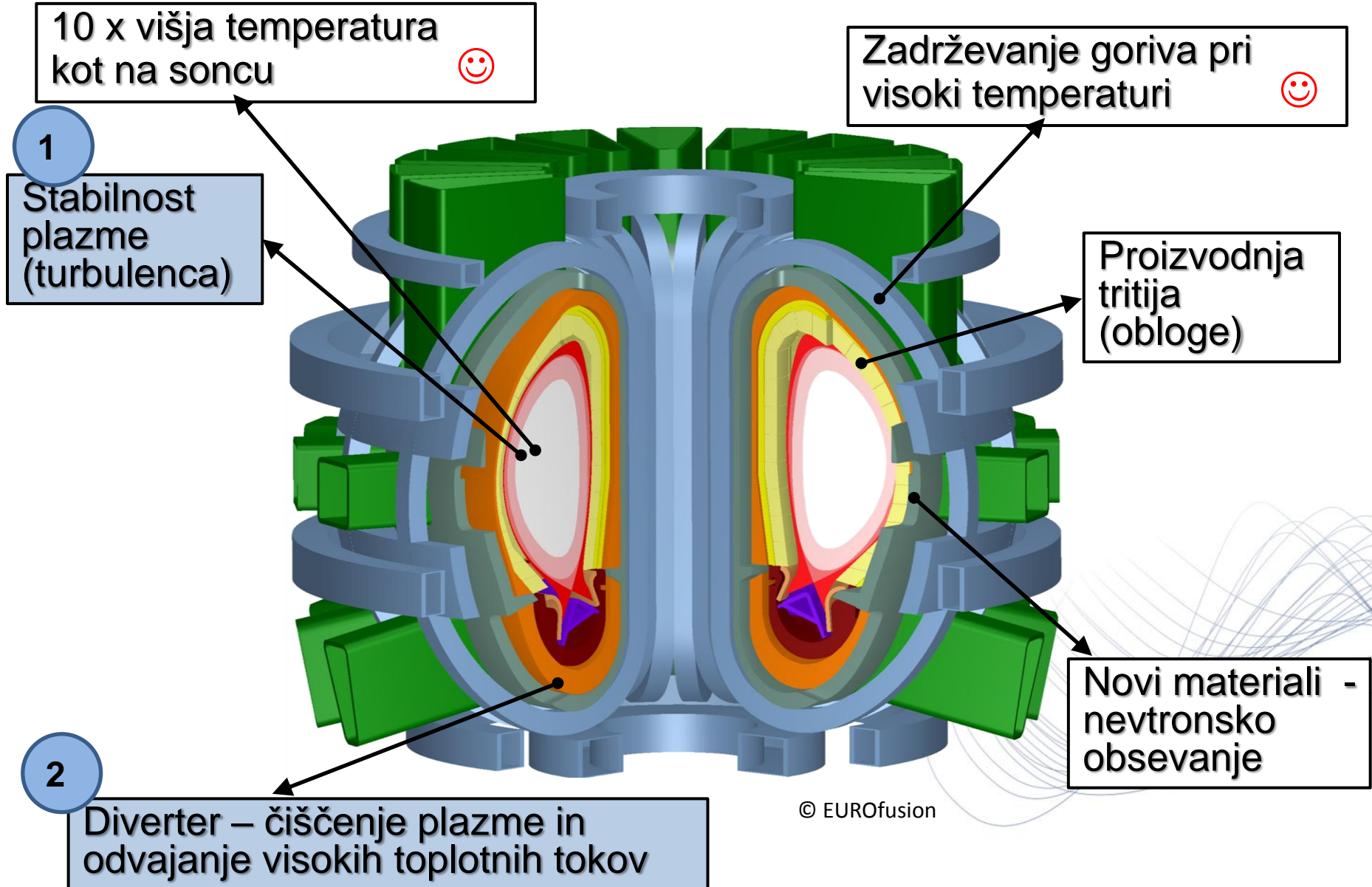


- Polmer ~3 m
- Pulz > 5s
- Moč = 16 MW
- Q ~0.6
- $V_{pl} = 80 \text{ m}^3$

- Polmer ~6 m
- Pulz > 5 min
- Moč ~500 MW
- Q ~10
- $V_{pl} = 800 \text{ m}^3$

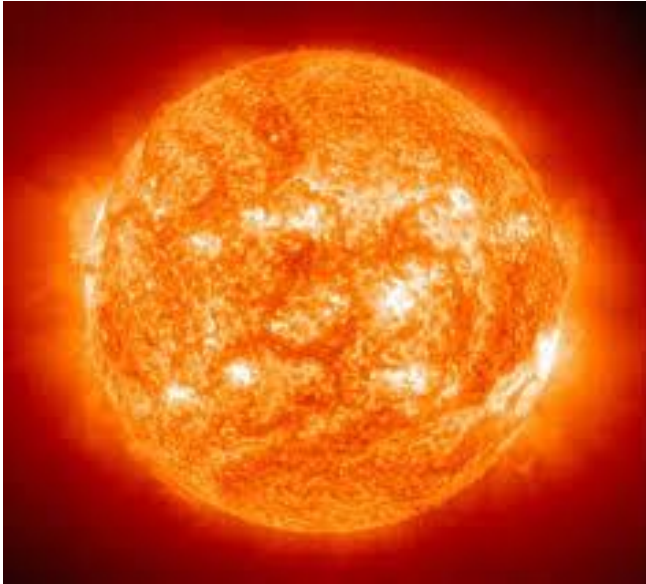
- Polmer ~9 m
- Pulz ~ 2 uri
- Moč ~ 2 GW
- $V_{pl} = 2300 \text{ m}^3$
- Proizvodnja elektrike

DEMO – Demonstracijska elektrarna - izzivi



1

Kontrola nestabilnosti, turbulenca



Turbulenca, izbruhi na sončevi površini



© CCFE

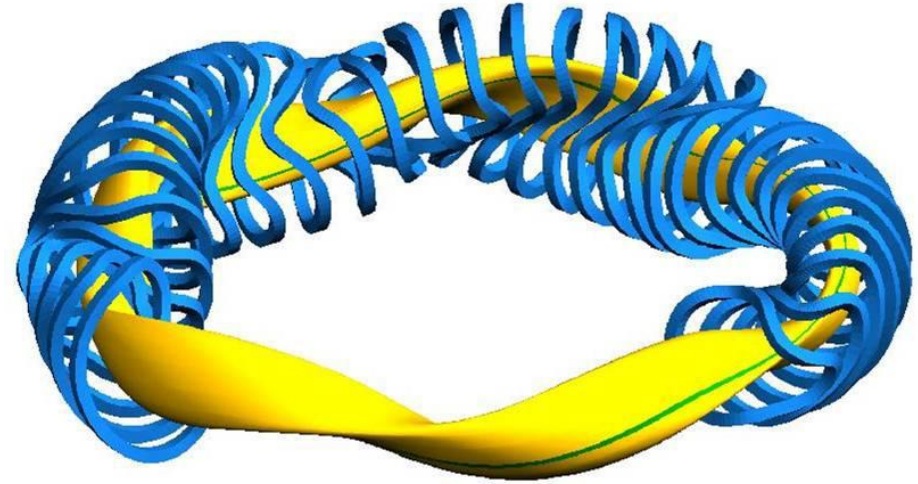
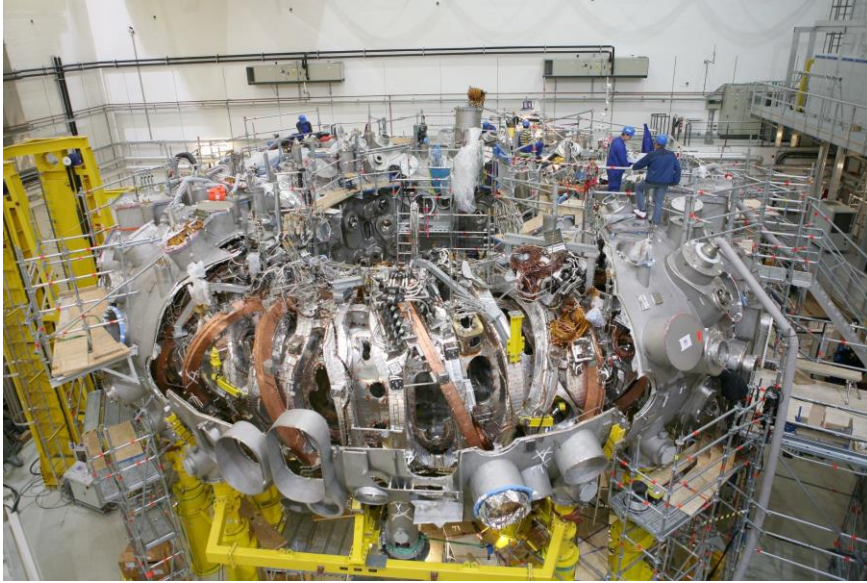
MAST (Mega Ampere Spherical Tokamak), © CCFE Culham

– Nestabilnosti na robu plazme (< 1 ms)

DEMO: nekajkrat višje toplotne obremenitve kot v Itru, zahteva po stabilnem obratovanju; lokalni preboji plazme (ELM) ne bodo dovoljeni! ☹️

Stelarator – alternativna rešitev

Wendelstein 7-X obratuje od 2015 v Nemčiji, Greifswald



© IPP, Klinger et al.

- Velikost: H= 4.5 m, D=16 m
- Teža: 725 ton
- Pulz: 30 min (plan)

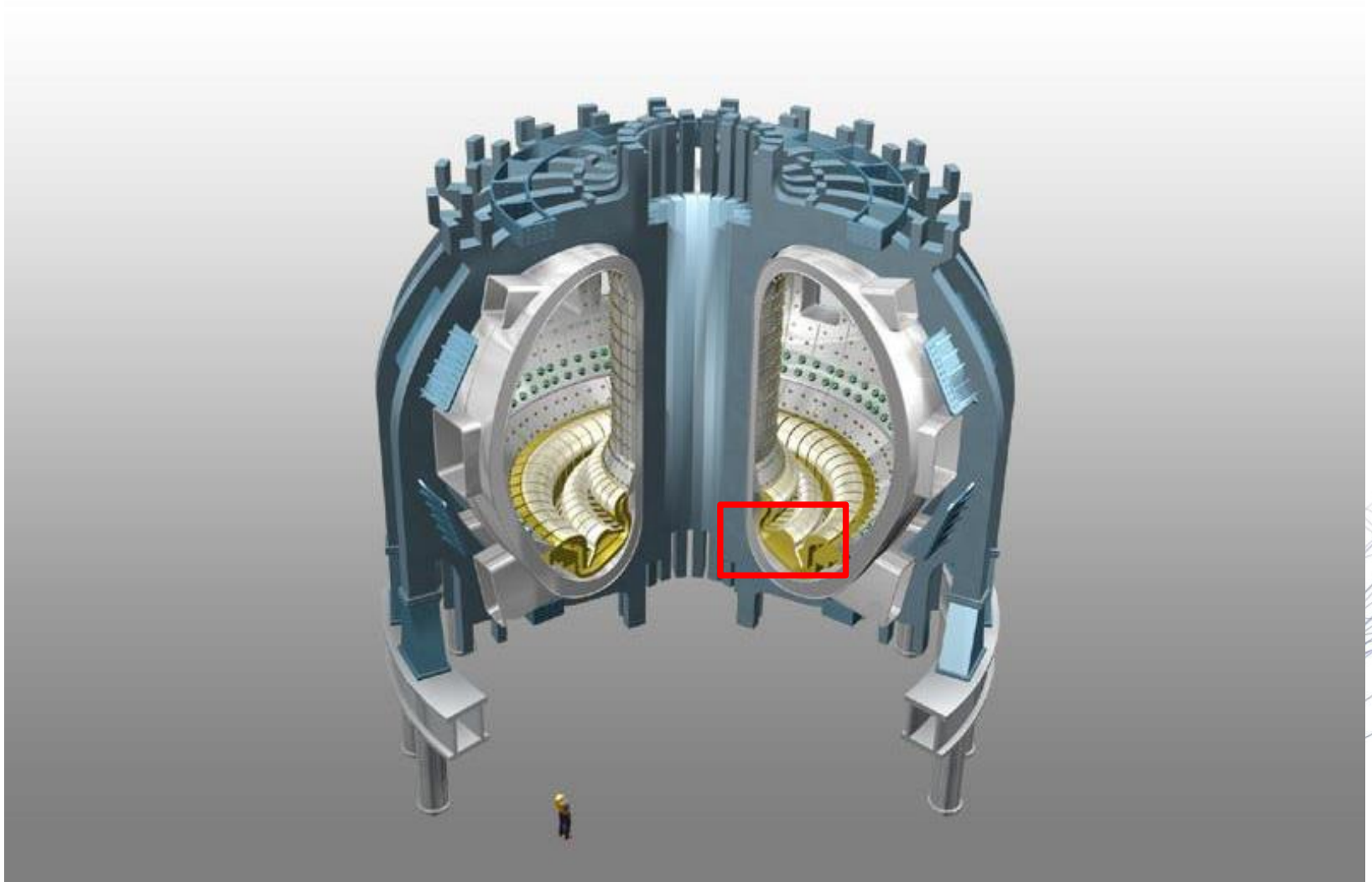
- Nprekinjeno obratovanje (primerno za elektrarno!) 😊
- Stabilna plazma
- **Zahtevno magnetno omejevanje** 😞

Izpušni sistem - diverter



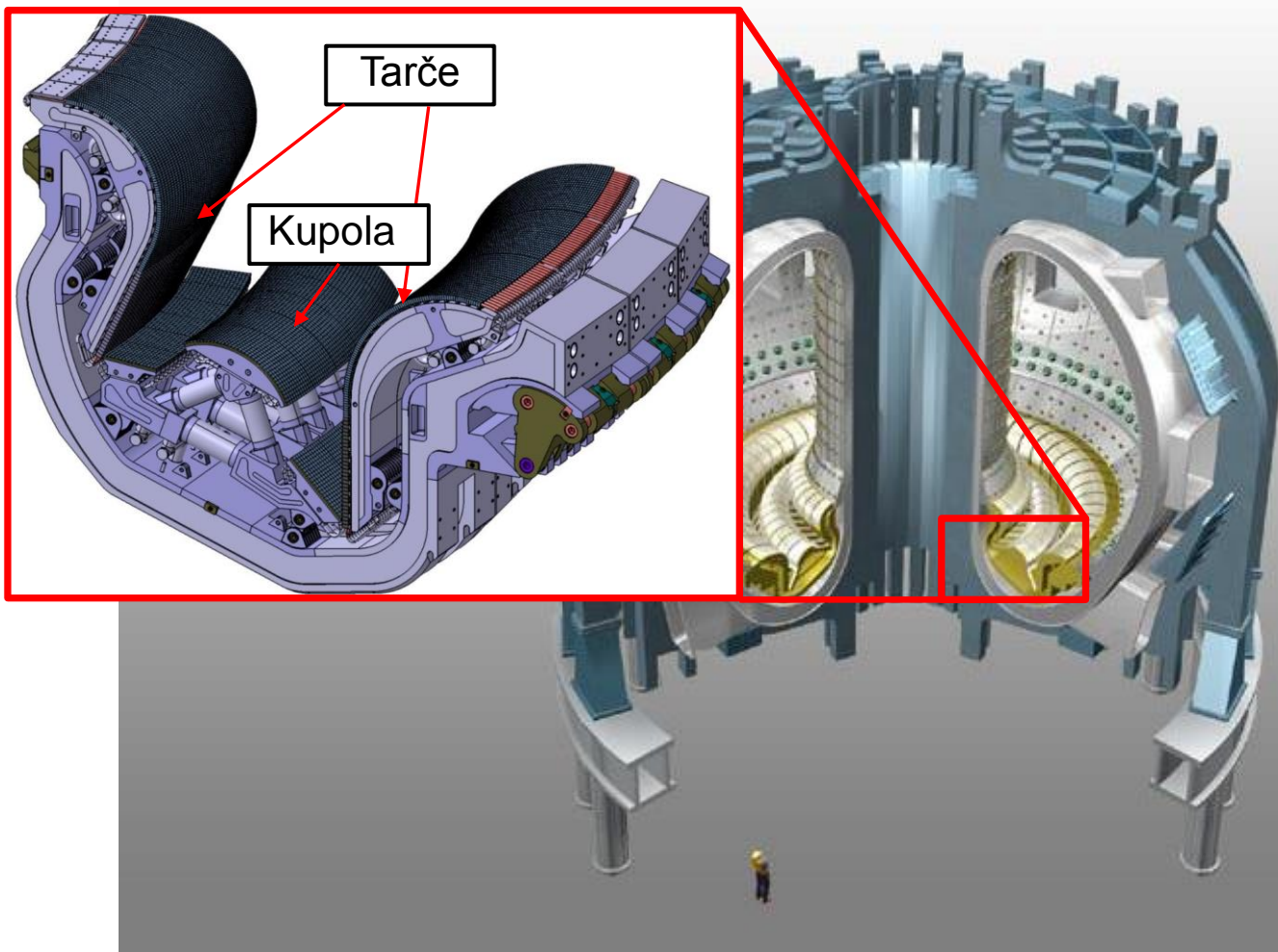
- Odpadna toplota
- Izgoreli plini

ITER diverter



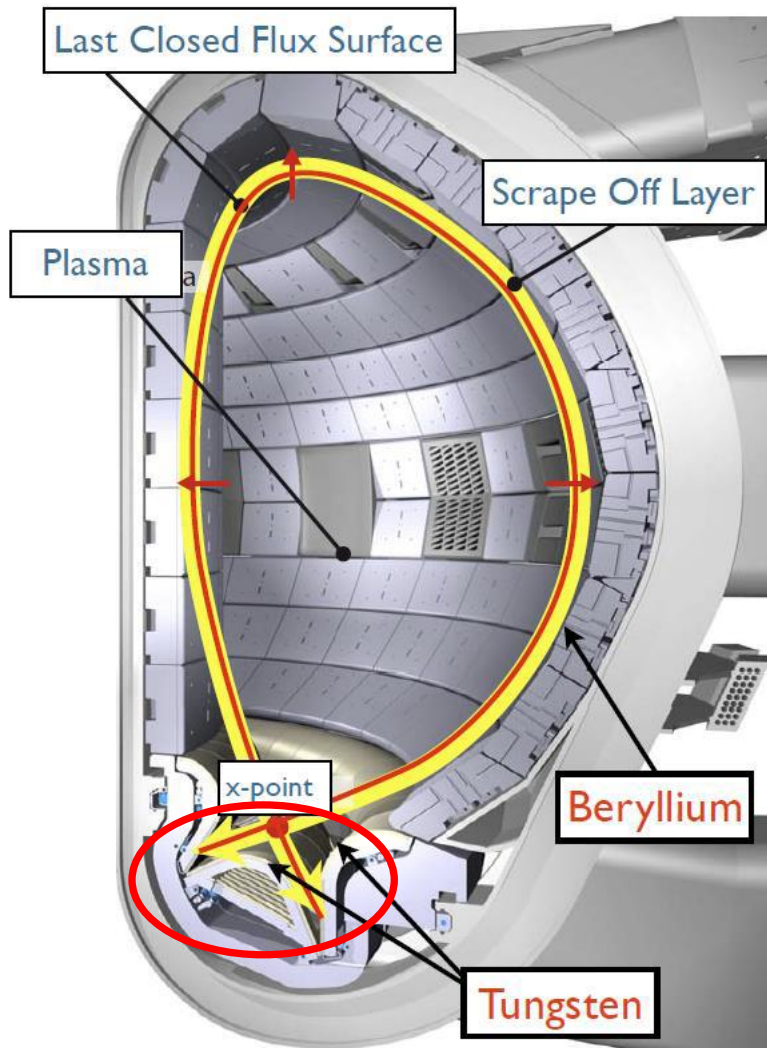
ITER diverter

54 kaset
vsaka ~ 9 ton



2

ITER diverter: Odvod toplote in nečistoč



$$P_{\text{fus}} = P_{\text{alpha}} + P_{\text{n}} = 500 \text{ MW}$$

$$P_{\text{n}} = 400 \text{ MW (nevtroni) } 80\%$$

$$P_{\text{alpha}} = 100 \text{ MW (površinski toplotni tok), } 90\% \text{ diverter (5 m}^2\text{)} \rightarrow \sim 20 \text{ MW/m}^2 \text{ ☹}$$

Kako zmanjšamo:

- Povečamo vpadni kot delcev
- Vpihovanje dušika (več radiacije)
- Alternativne konfiguracije plazme v diverterju

Dopustne toplotne obremenitve:

$$\sim 10 \text{ MW/ m}^2$$

2

Kaj pomeni 20 MW/m²?

~ 0.3 MW/m²



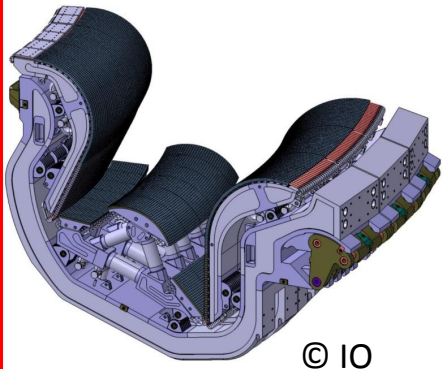
Termoelektrarna

~ 1 MW/m²



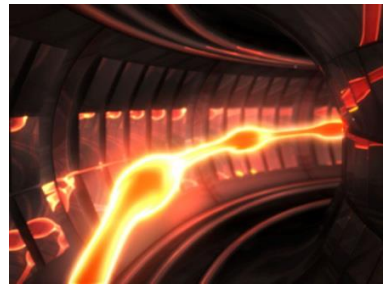
Gorivni element
jedrske
elektrarne

10 -20 MW/m²

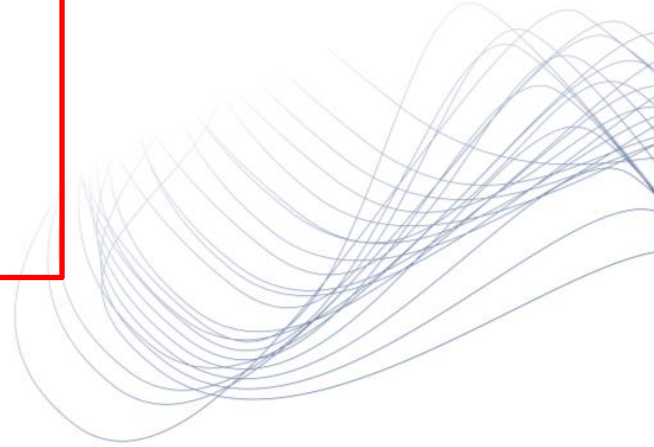


Diverter
(neprekinjeno
obratovanje)
© IO

> 10 GW/m²
(200 – 250 μs)



Tranzienti v Itru



Slovenija in fuzija

- Fuzijske raziskave potekajo v vseh razvitih državah
- Slovenska fuzijska asociacija
 - Institut Jožef Stefan
 - Univerza v Ljubljani (FS, FE, FMF)
 - Cosylab
 - IMT
- Nacionalni program Fuzijske tehnologije
- Mednarodna vpetost (EUROfusion, ITER)
- Področja:
 - Fizika in diagnostika plazme
 - Nevtronika
 - Novi materiali in interakcija s plazmo
 - Hlajenje komponent fuzijskih reaktorjev
 - Modeli/sistemi vodenja plazme

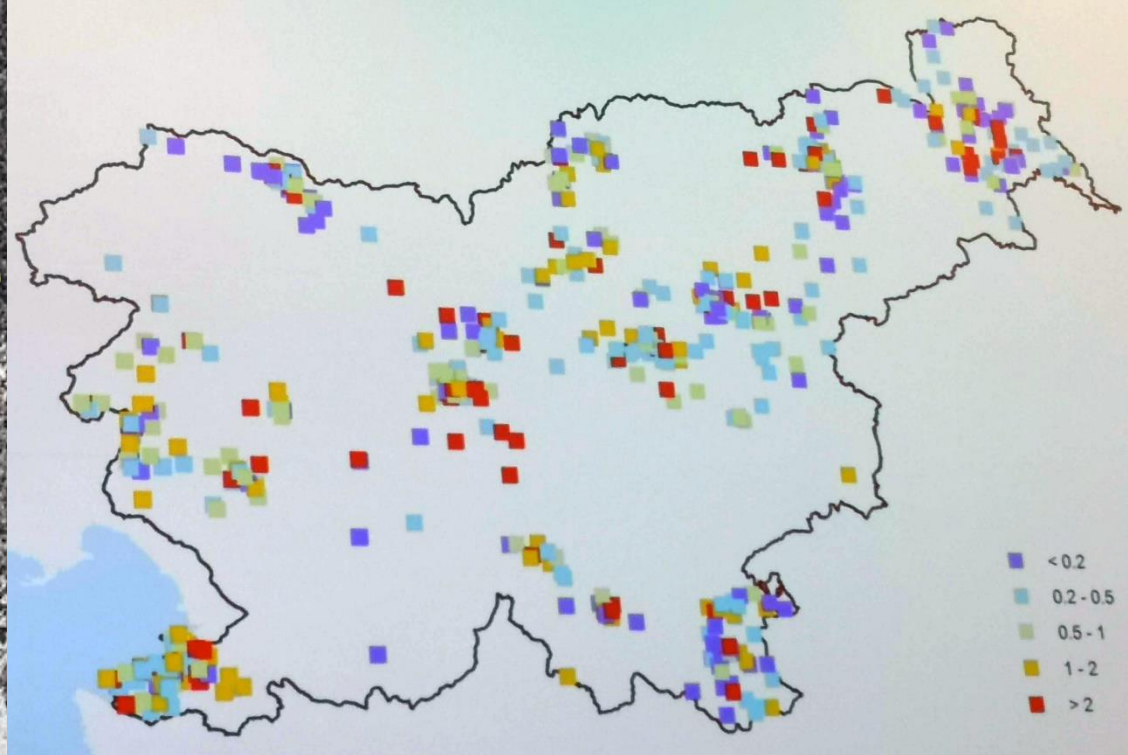


Univerza v Ljubljani



Znanost
na cesti

In ZRC SAZU



11. junij 2019

Živeti s kemikalijami

prof. dr. Milena Horvat, Institut „Jožef Stefan“

Matic Jerman