

Tokamak és sztellarátor napjainkban

Pokol Gergő



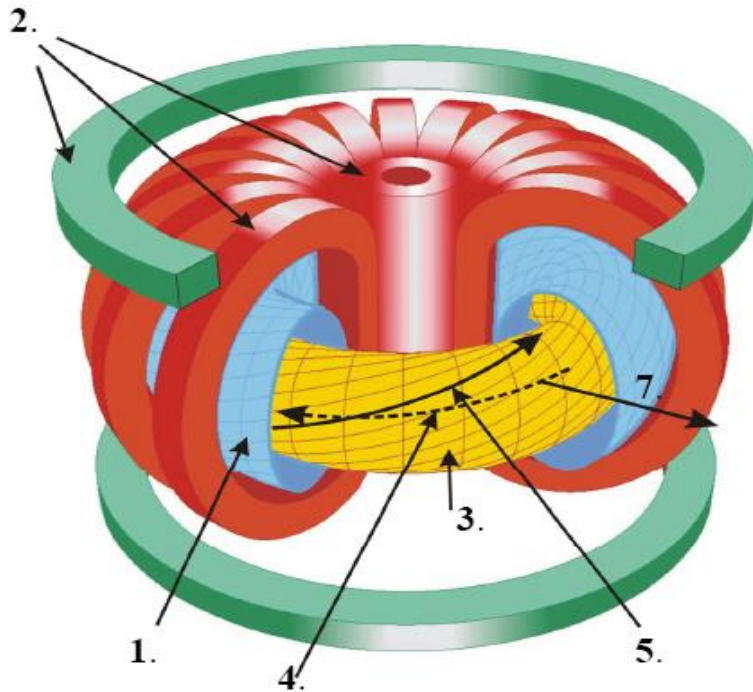
M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BME NTI

MAFIHE 2017 Fúziós Plazmafizika Téli Iskola

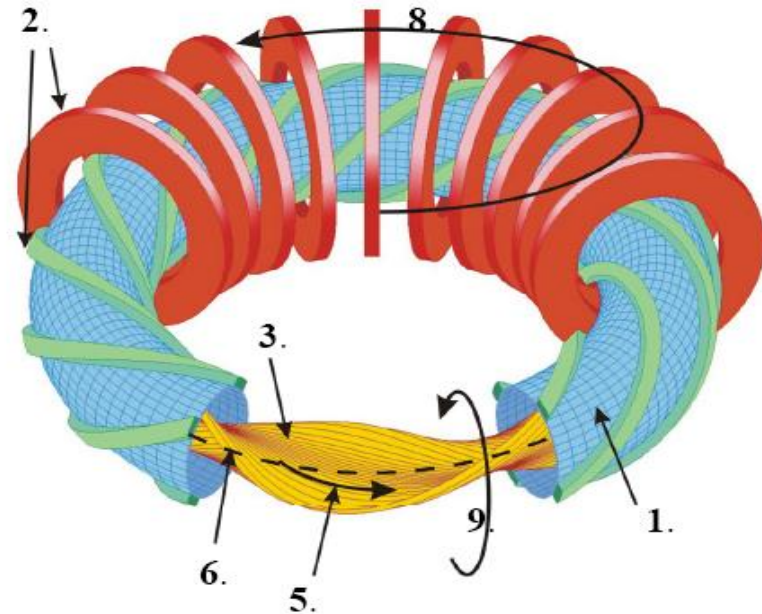
2017. február 11.

Tokamak



Toroidális plazmaáram

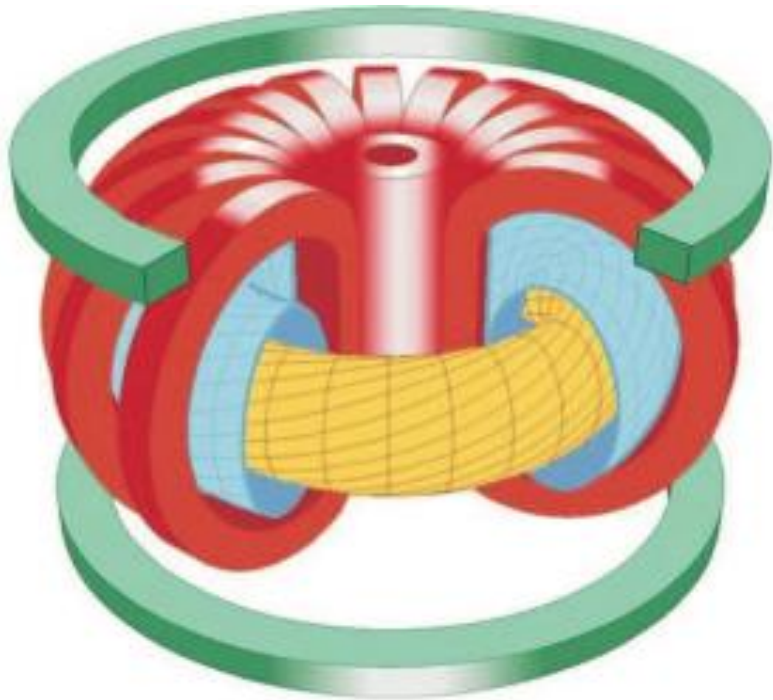
Sztellarátor



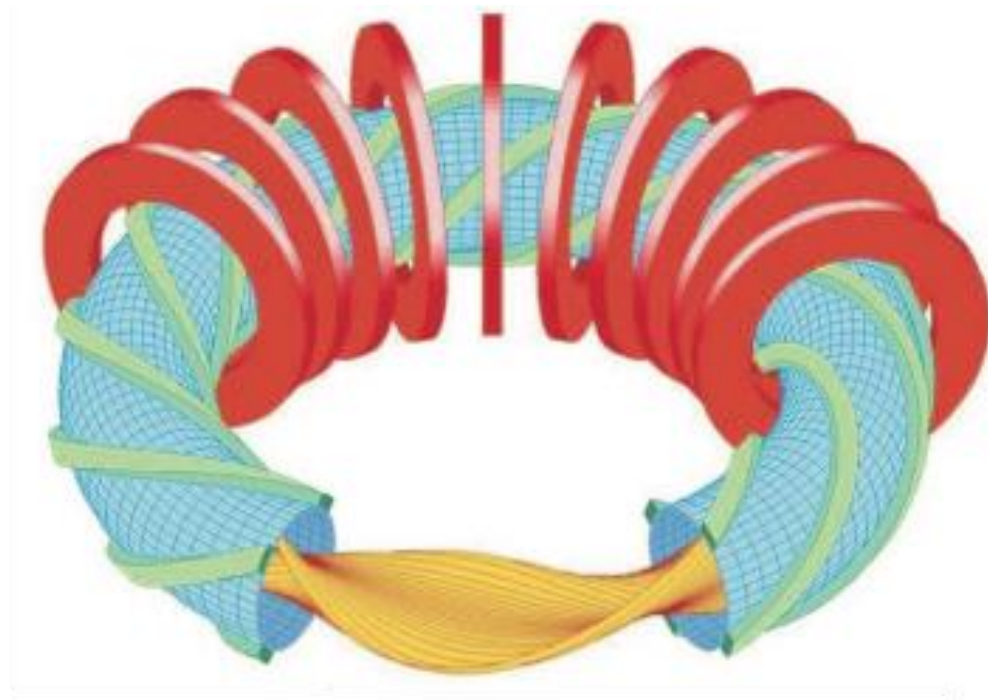
Helikális tekercsek

- (1) vákuumkamra, (2) mágneses tekercsek, (3) plazma,
 (4) plazmaáram, (5) mágneses erővonal, (6) mágneses tengely,
 (7) radiális irány, (8) toroidális irány, (9) poloidális irány

Tokamak és sztellarátor



- + Szimmetrikus 2D geometria
- + Érettebb technológia
- Alapvetően impulzus üzem
- Áram okozta instabilitások



- + Folytonos üzem
- + Nincsenek áram okozta instab.
- Komplex 3D geometria
- Kísérleti technológia

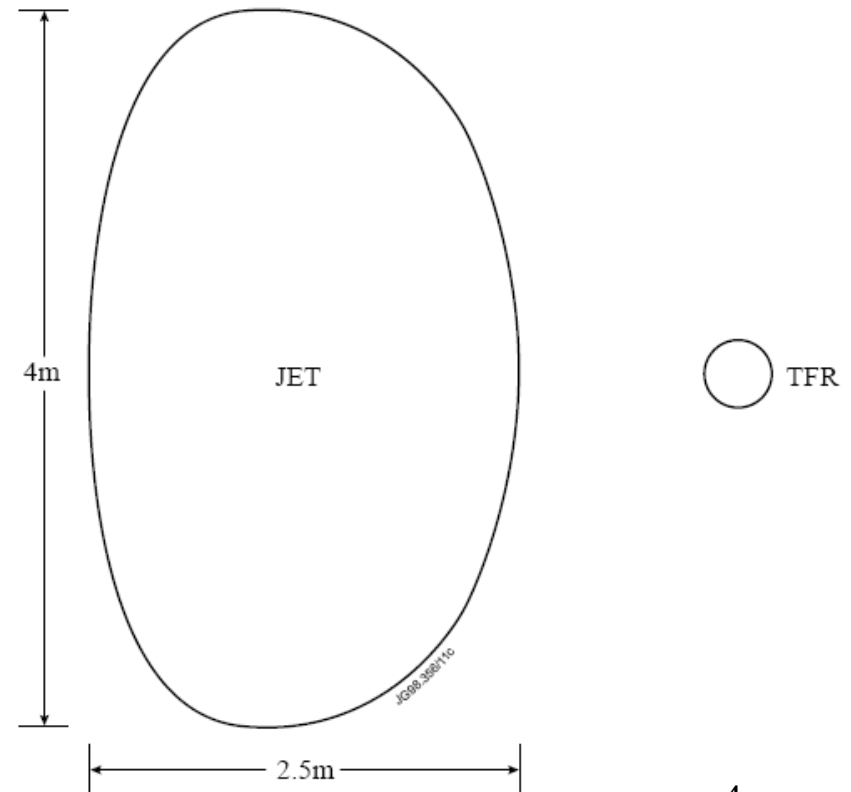
Egy nagy lépés: Joint European Torus

- . 1973: Tervezés elindul
- . 1975: JET-R5 Report – célok és tervek
- . 1977: Építési terület kijelölése – Culham
- . 1979: Építés megkezdése
- . 1983: Első plazma
- . 1984: Hivatalos megnyitó

Több nyitott kérdés volt:

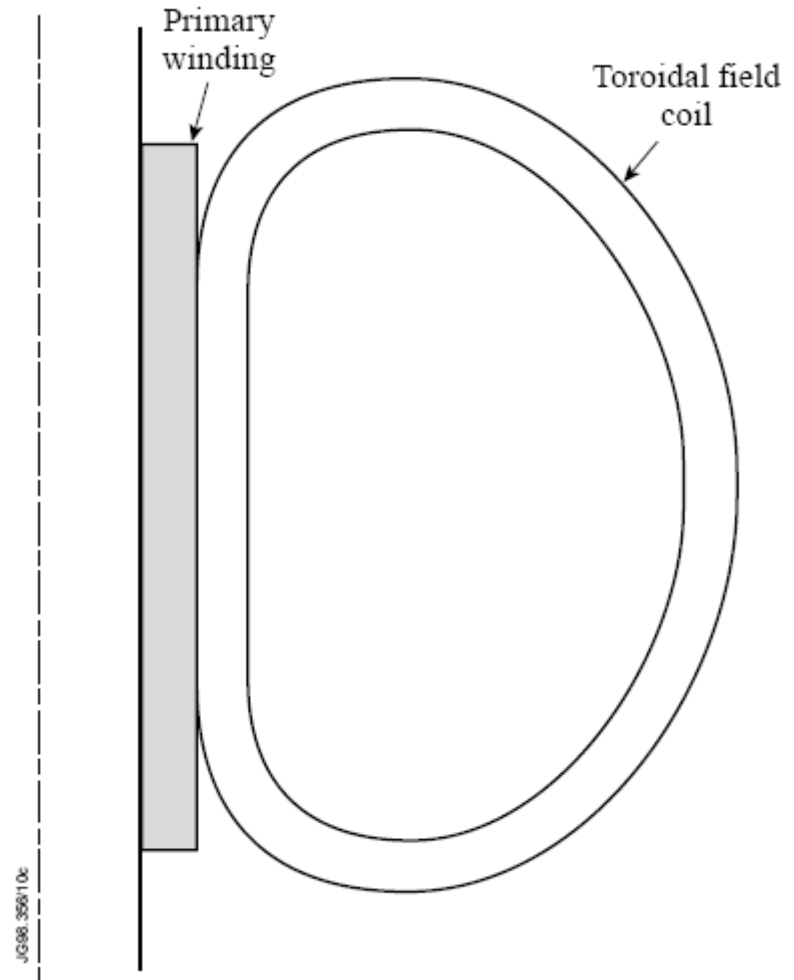
1. Anomális transzport
2. Beta-limit
3. diszrupciók

...



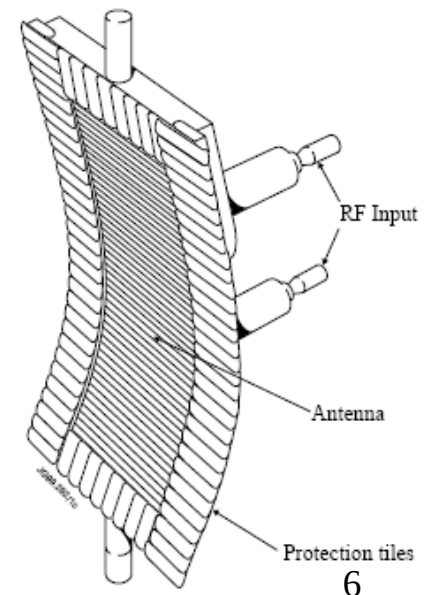
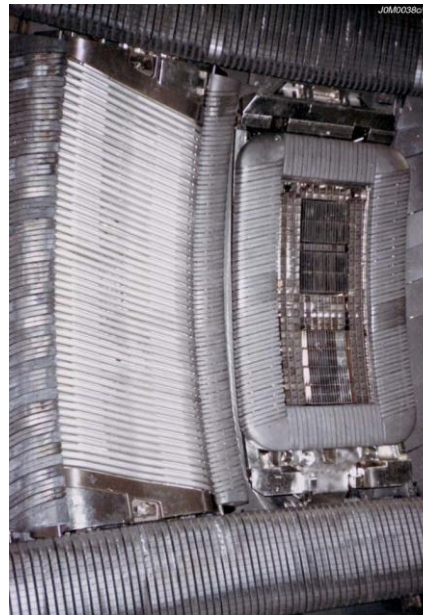
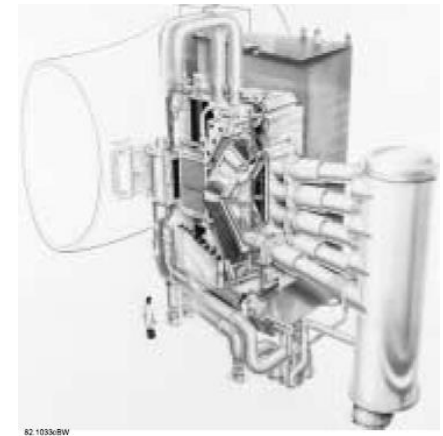
Tervezési szempontok

- Sugárárány: 2,4
 - költségek minimalizálása
- Plazmaáram: 3.8 MA
 - α -részecskék összetartása
- Toroidális mágneses tér: 2,8 T
 - mechanikai stabilitás
- Geometria: D-alak
 - középen a beső terekcs tartja a toroidális tekercseket
 - a toroidális tekercs görbülete az $\sim 1/R$ mágneses térnek megfelelő



Tervezési szempontok – fűtések, stabilitás

- A ohmikus fűtés nem elég.
- $\tau_E \sim 0,4-4 \text{ s} \rightarrow P \sim 1-100 \text{ MW}$
- Semleges nyaláb befecskendezés (NBI)
 - $<25 \text{ MW}$, 80-160 keV, H-D
- Ion-ciklotron rezonancia fűtés (ICRH)
 - $<15 \text{ MW}$, 25-55 MHz
- Összenyomással



Elnyújtott plazma

→ függőleges instabilitás

- vákuumkamra lassítja
- aktív stabilizálás

Dedikált célok

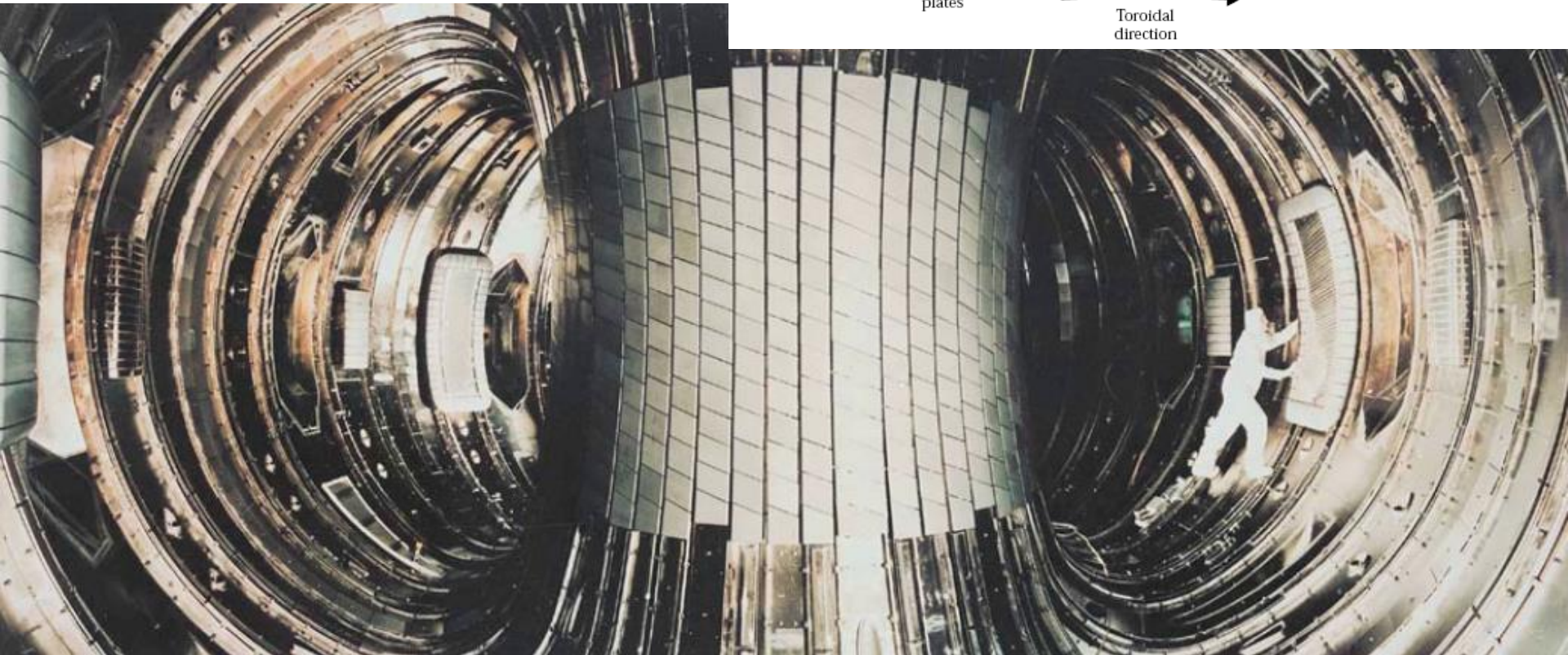
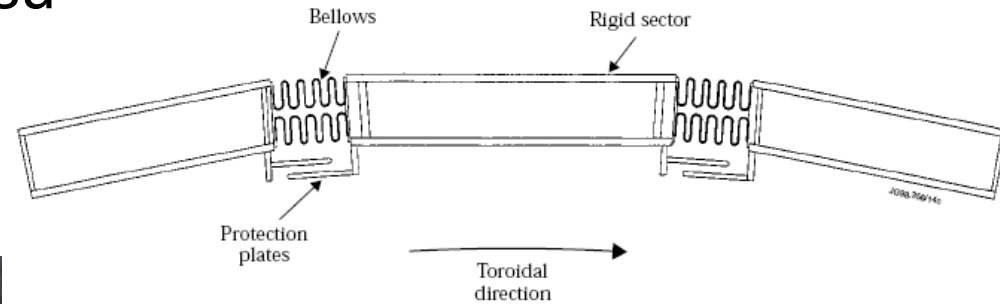
- A plazma viselkedésének skálázása, ahogy a paraméterek a reaktor-releváns tartományt közelítik.
- A plazma-fal kölcsönhatás ezen feltételek között.
- A plazma fűtésének tanulmányozása.
- Az α -részecsék keletkezésének, összetartásának és plazmafűtésének tanulmányozása.

A JET felépítése – Vákuumkamra

Vákuum tartó, 500°C hőmérsékleten kifűthető, hűtött-fűtött,
nagy elektromos ellenállású

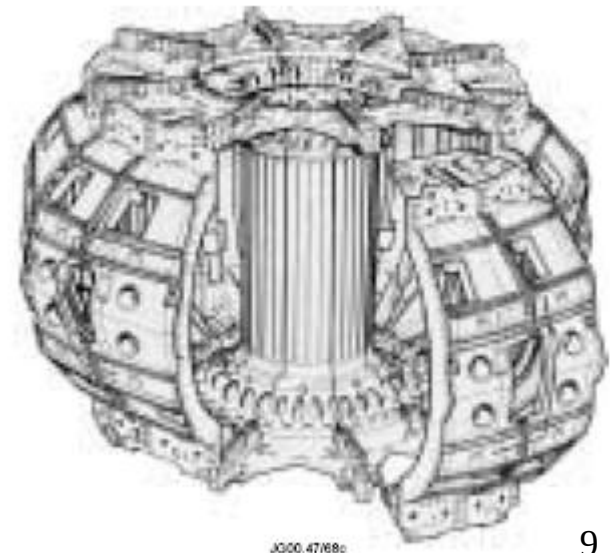
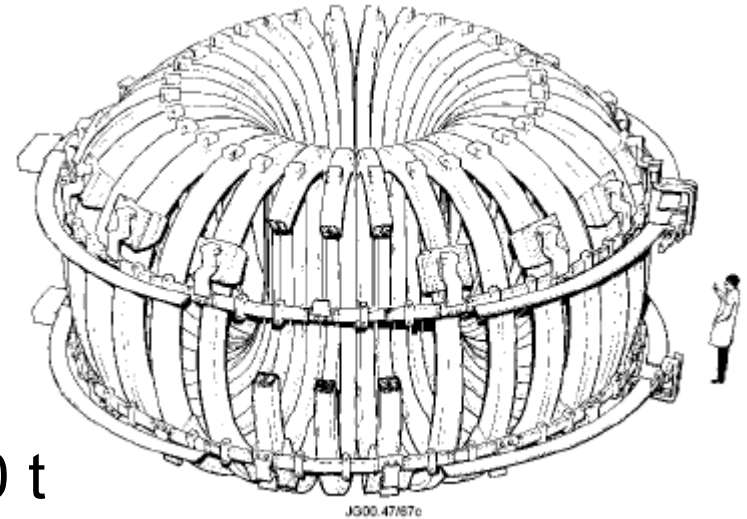
→ összetett szerkezet

→ Nikkel ötvözet



A JET felépítése – Toroidális tér tekercsek

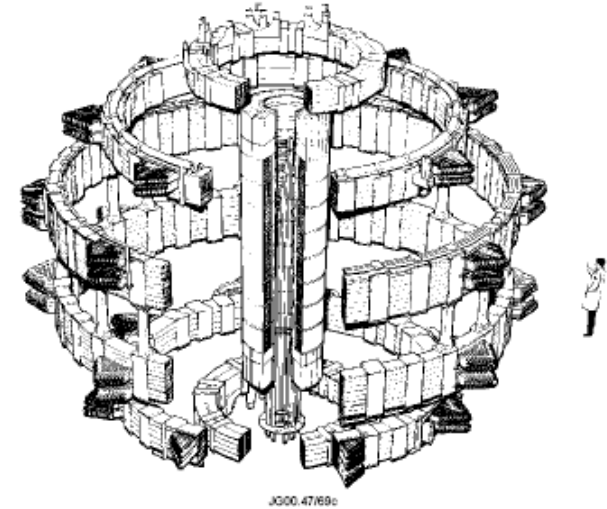
- 32 db D-alakú réztekercs
 - menetszám: 24
 - tömeg: 12 t
 - áram összesen: 51 MA
 - erő a kis sugár irányában: 600 t
 - erő a nagy sugár irányában: 2000 t
- külső mechanikai merevítés



A JET felépítése – Poloidális tér tekercsek

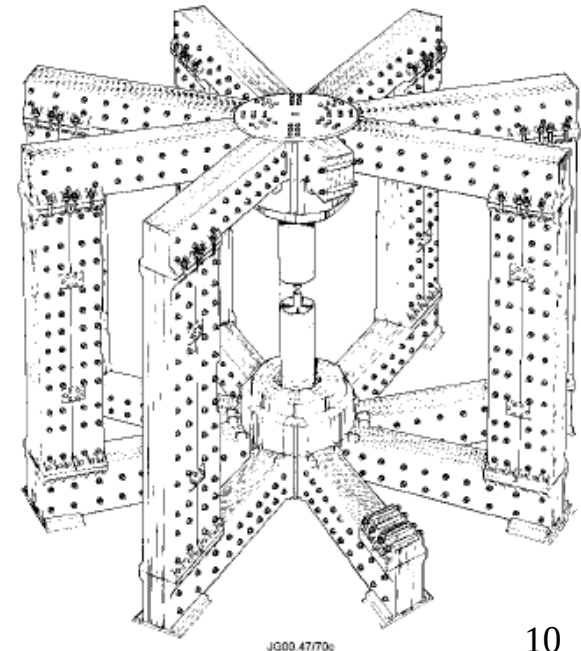
Poloidális tér tekercsek a plazma alakjának szabályozására

- 6 réz tekercs
- átmérő: <11 m
- a toroidális tér tekercseken kívül



Belső tekercs a transzformátor középső vasmagja körül

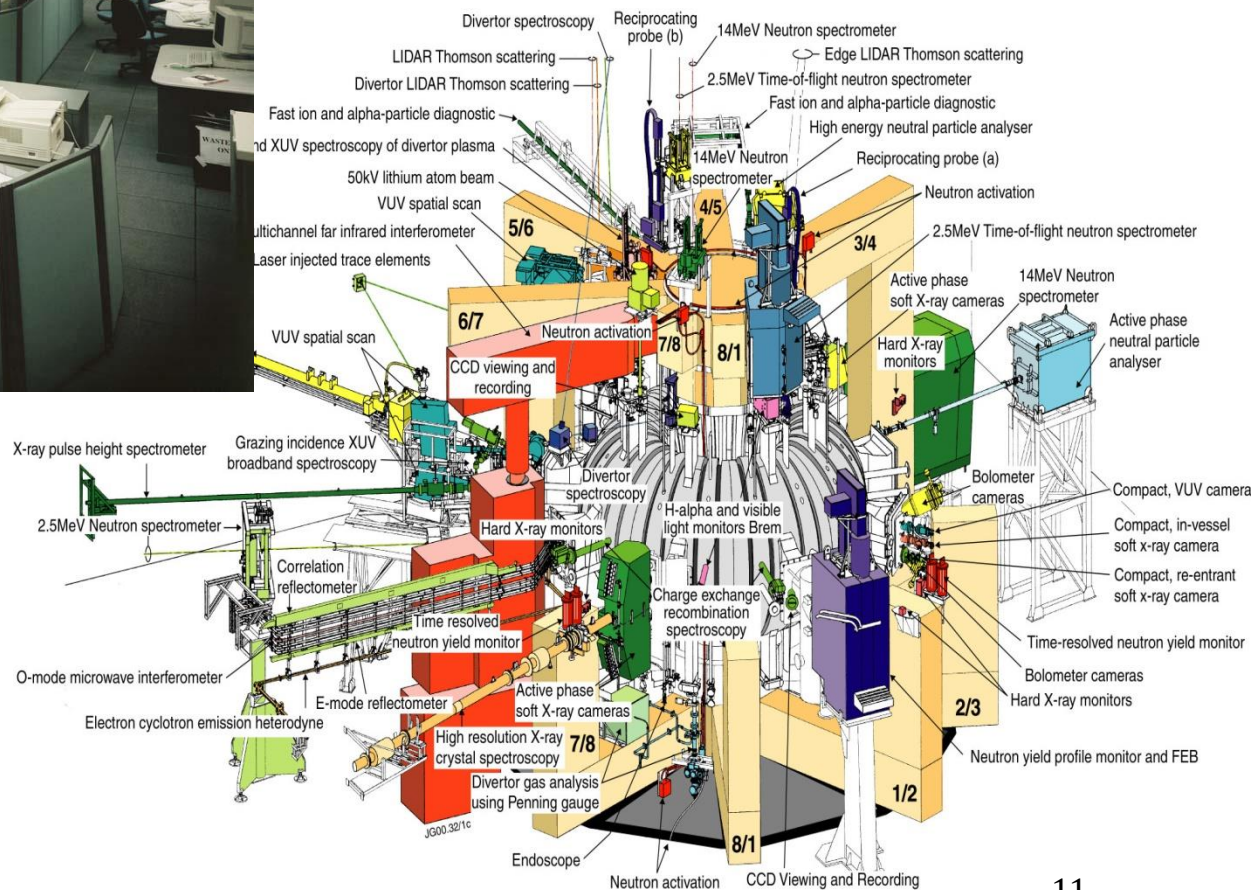
- réz tekercs
- vasmag: 8 kör laminált vasból
- 2600 t



A JET felépítése – Diagnosztikák, irányítás



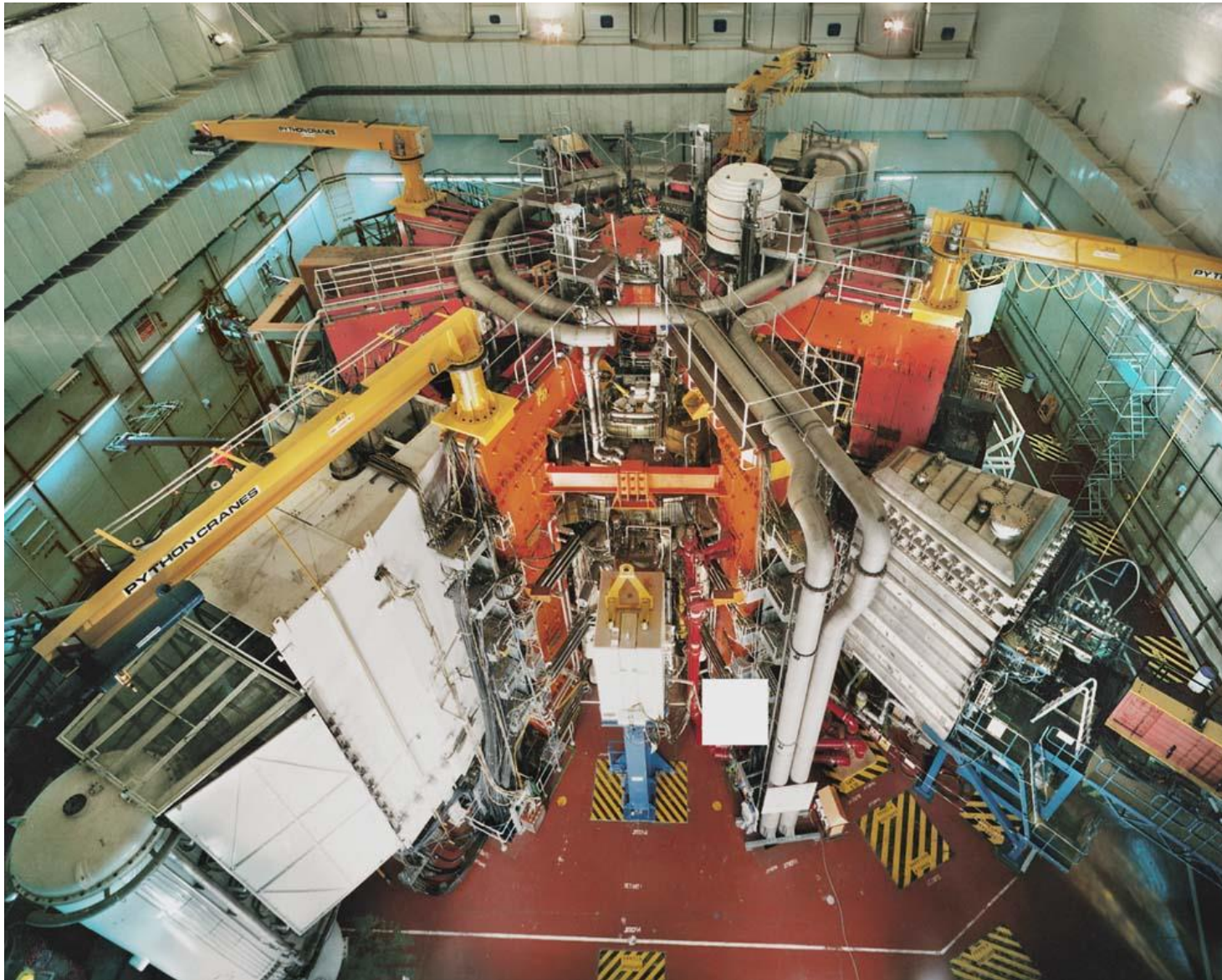
J96.132c



Időre elkészült!

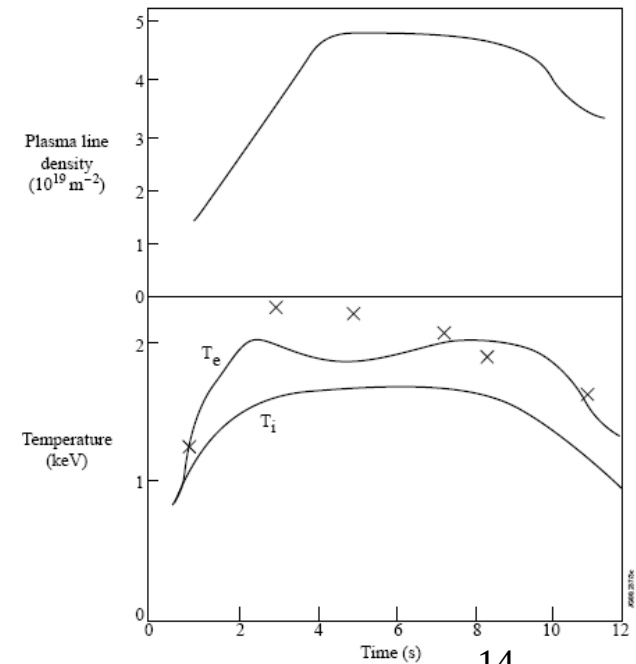
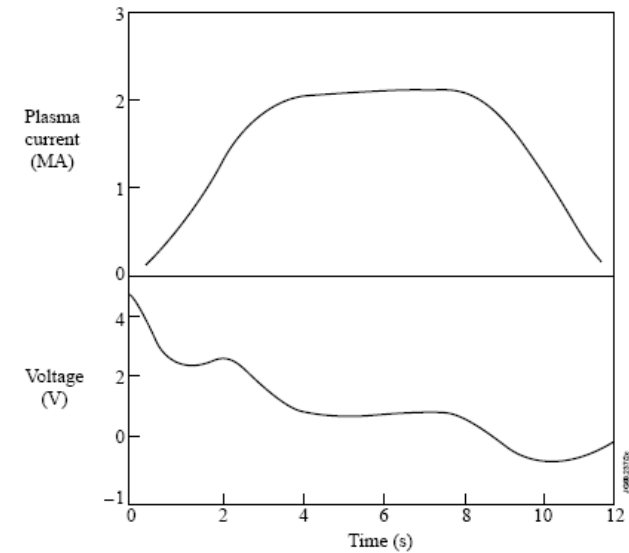


JET



Első kísérletek

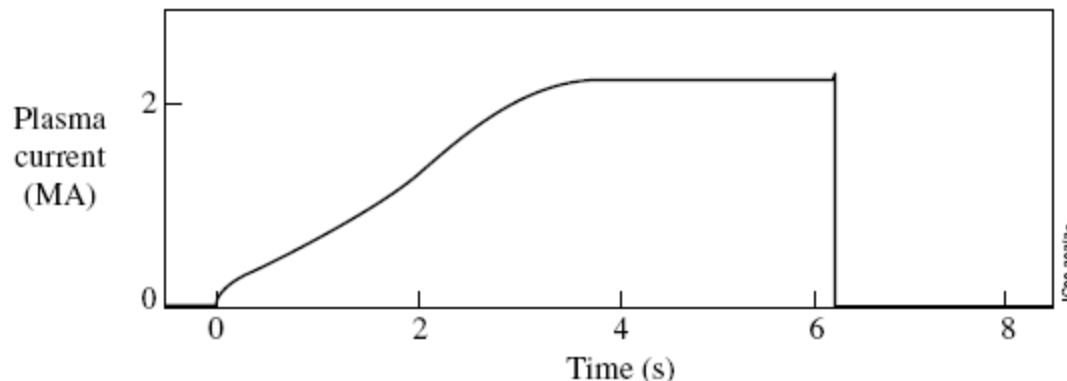
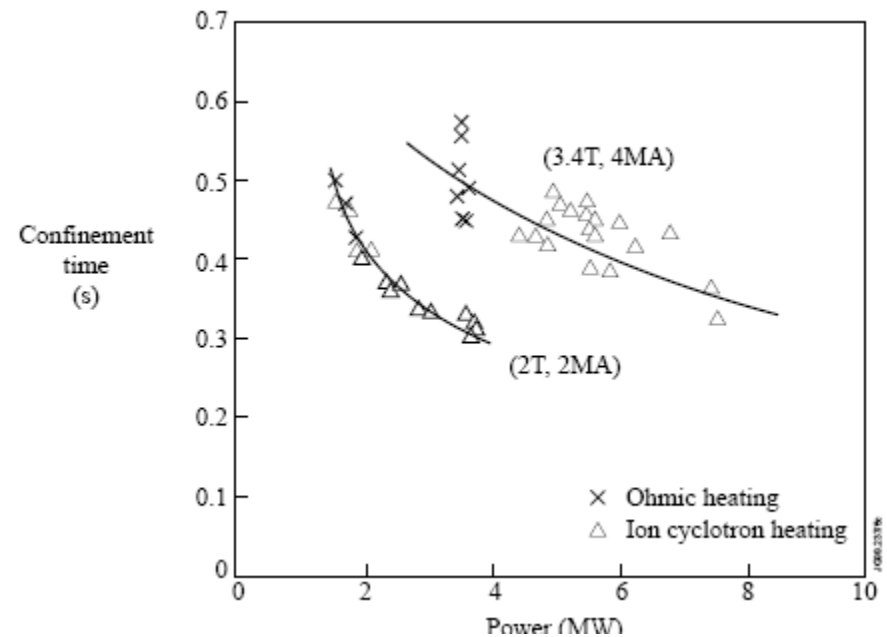
- Ohmikus fűtéssel a vártnál magasabb hőmérséklet
 - a befogott részecskék nem visznek áramot
 - sok a szennyező
→ nagy az ellenállás
- Első függőleges eltolódás esemény (VDE)
 - elnyújtott alakú plazma függőleges irányú vezérlése elveszett
→ 2,7 MA a vákuumkamra falában
→ A vákuumkamra falának megerősítése



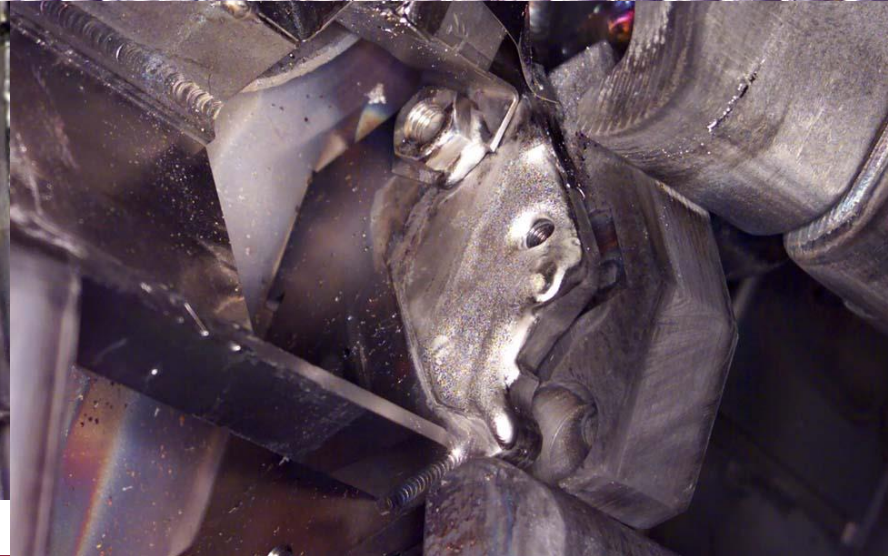
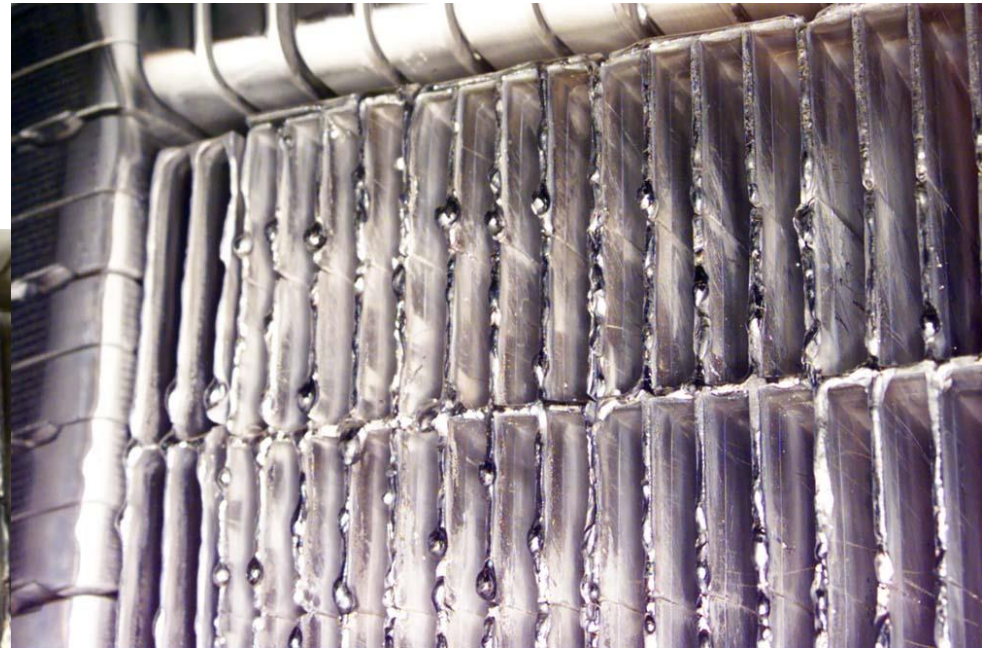
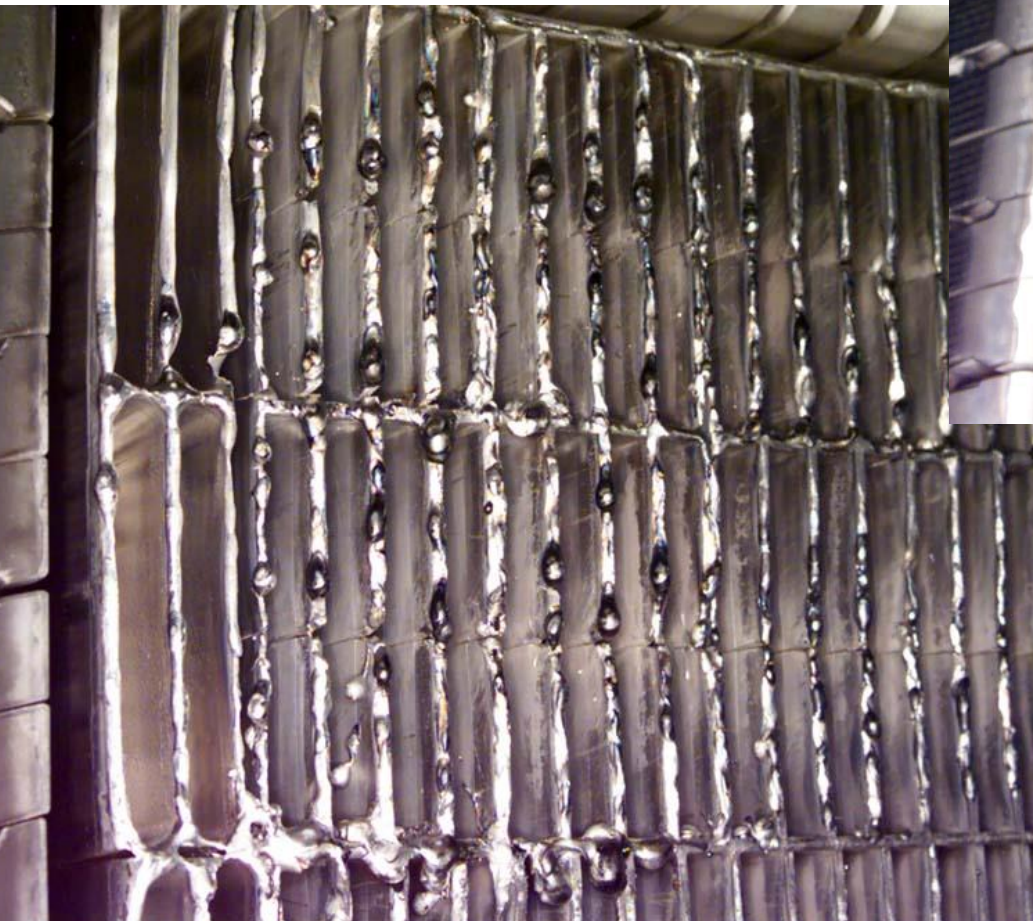
További kísérletek

- Összetartás-leromlás
(confinement degradation)
- Diszrupciók
 - Okozhatja:
 - Mágneses geometria
 - Sűrűség limit
 - Szennyezők bejutása

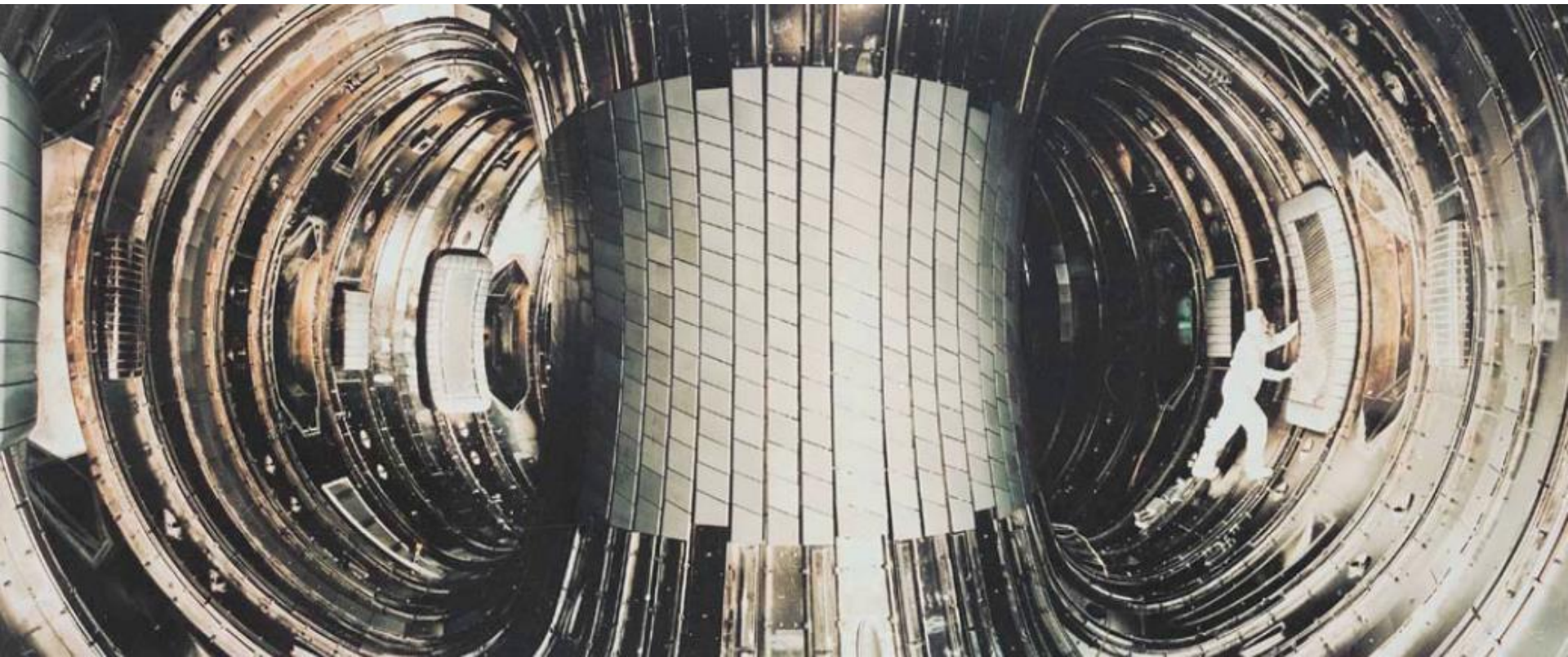
• ...



A diszrupció hatása



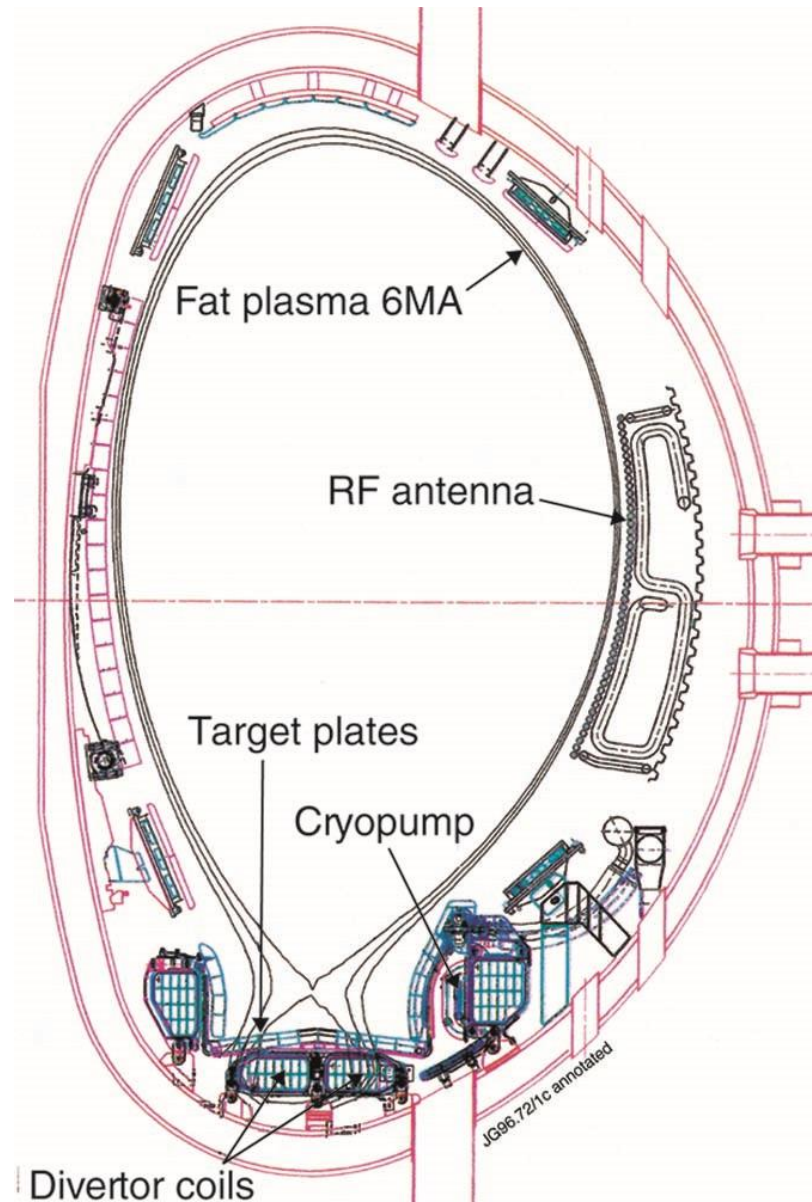
JET fal – 1985



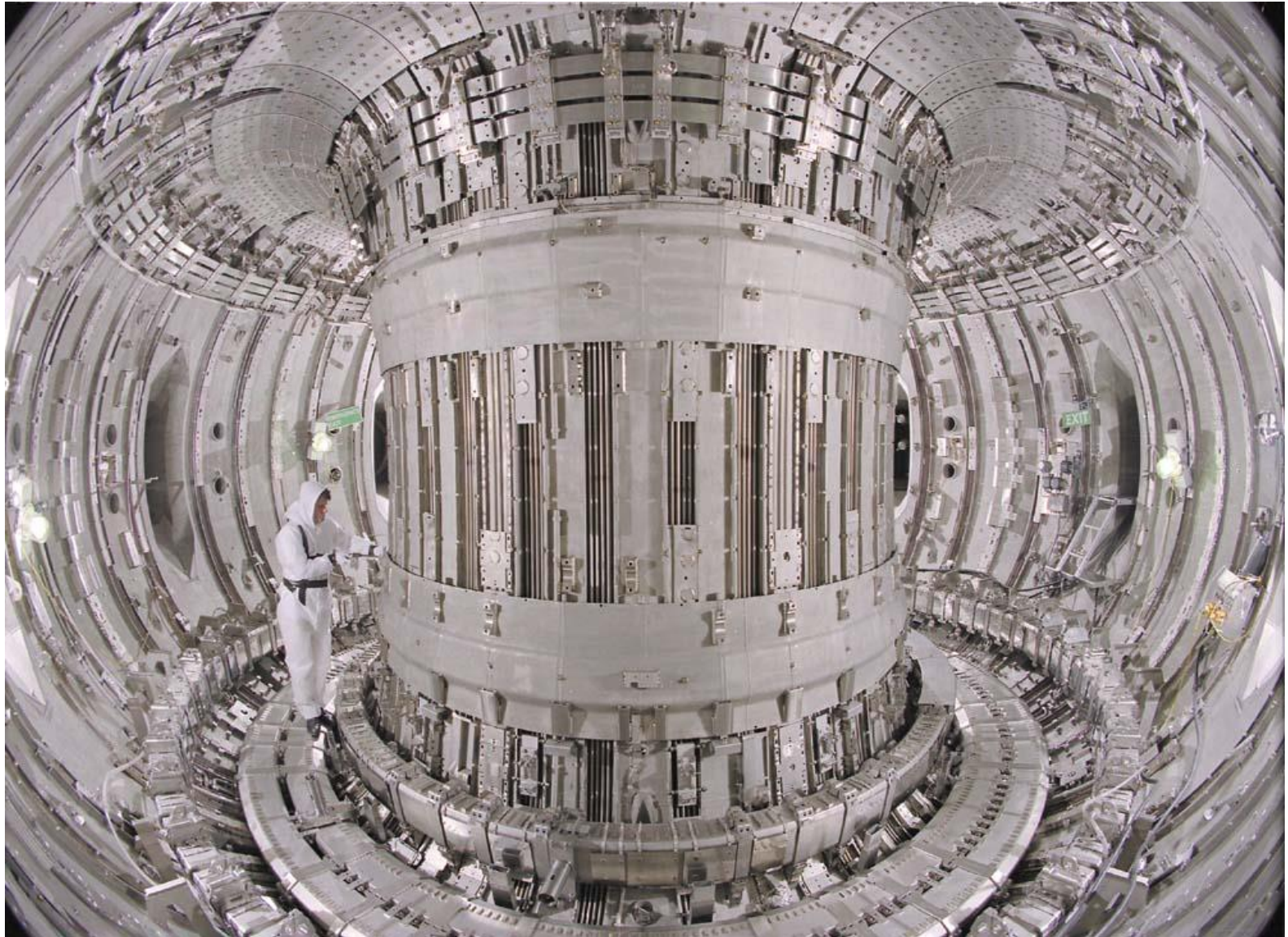
JET fal – 1987



Plazma-fal kölcsönhatás – 1991 divertor



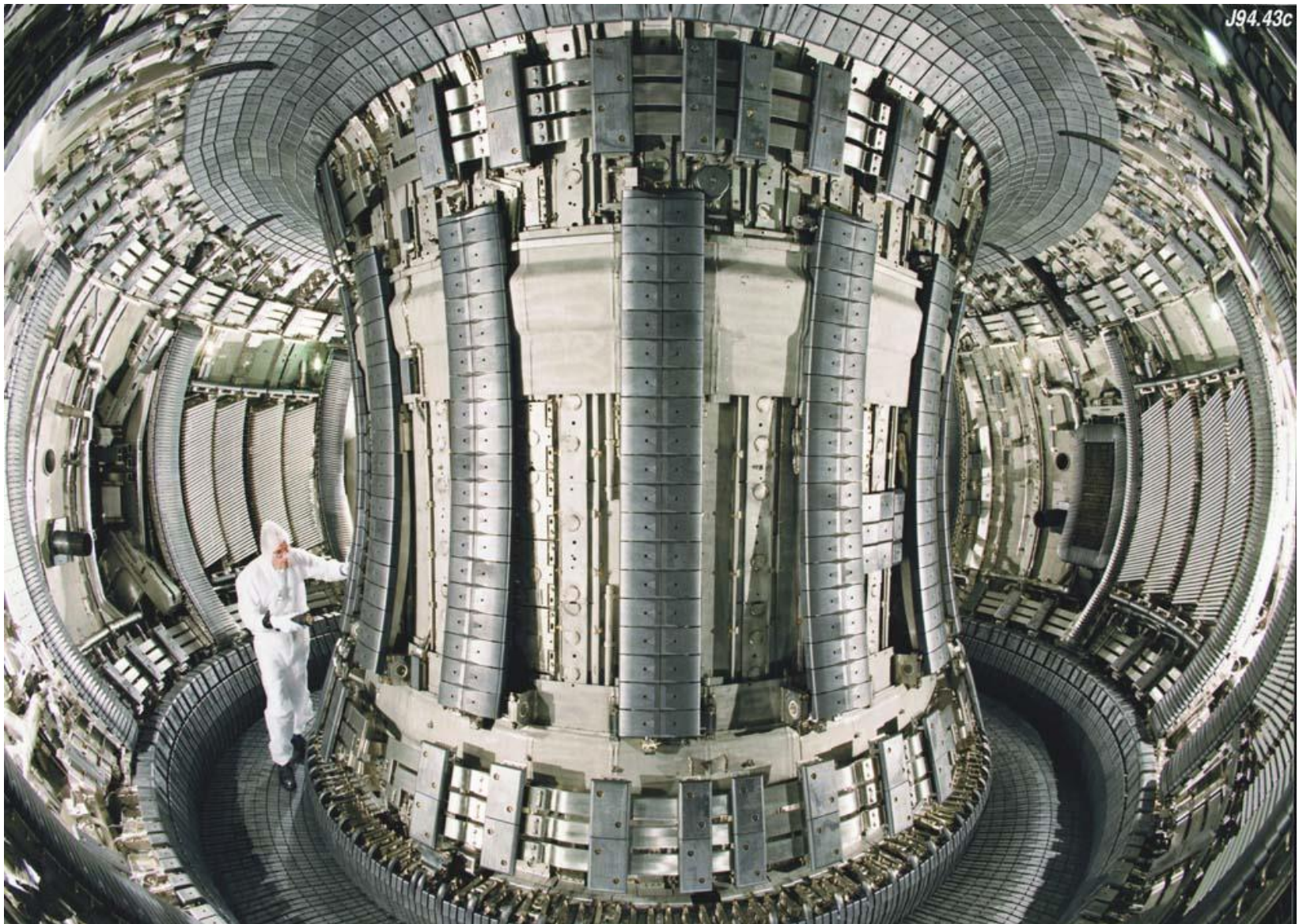
JET fal – 1991 divertor



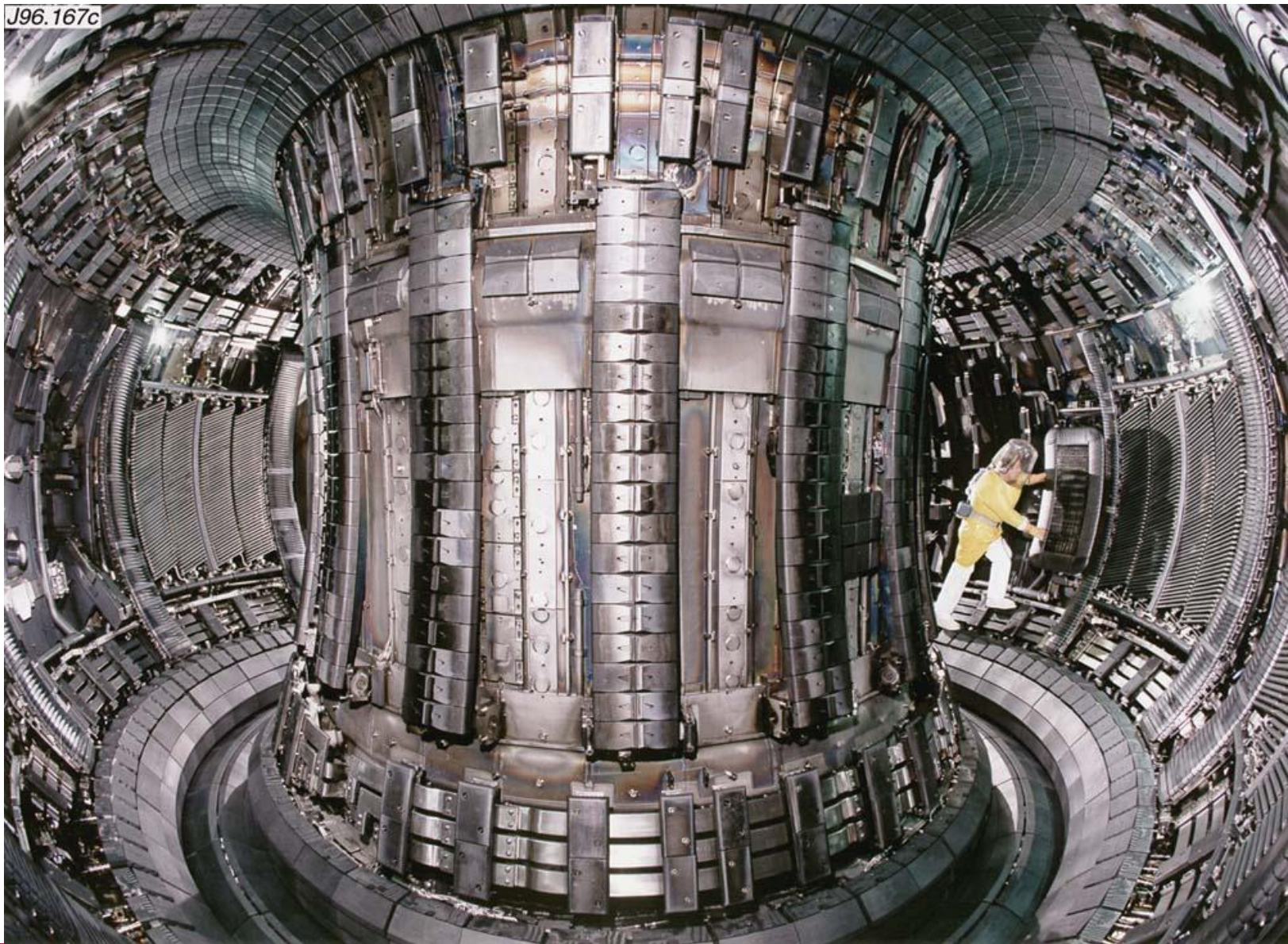
JET fal – 1991



JET fal – 1994

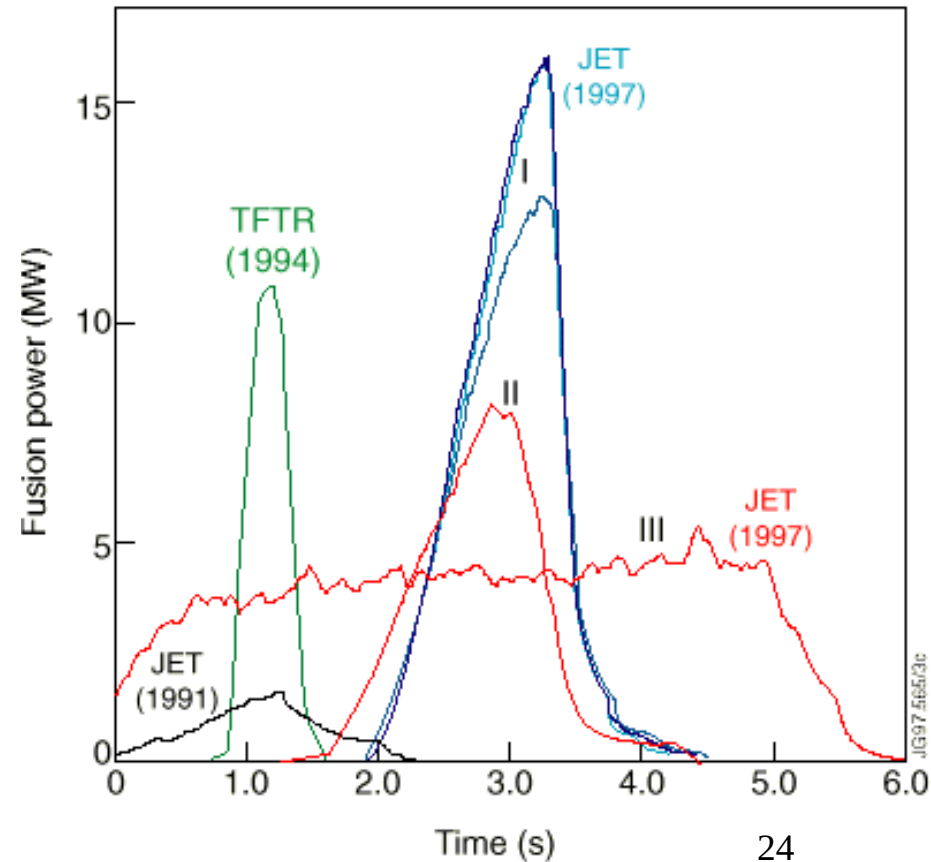
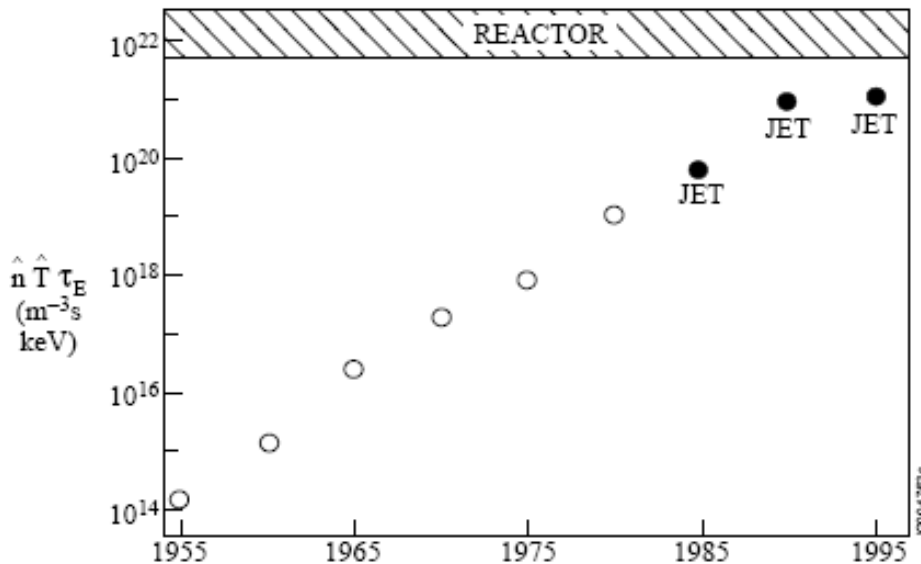


JET fal – 1996

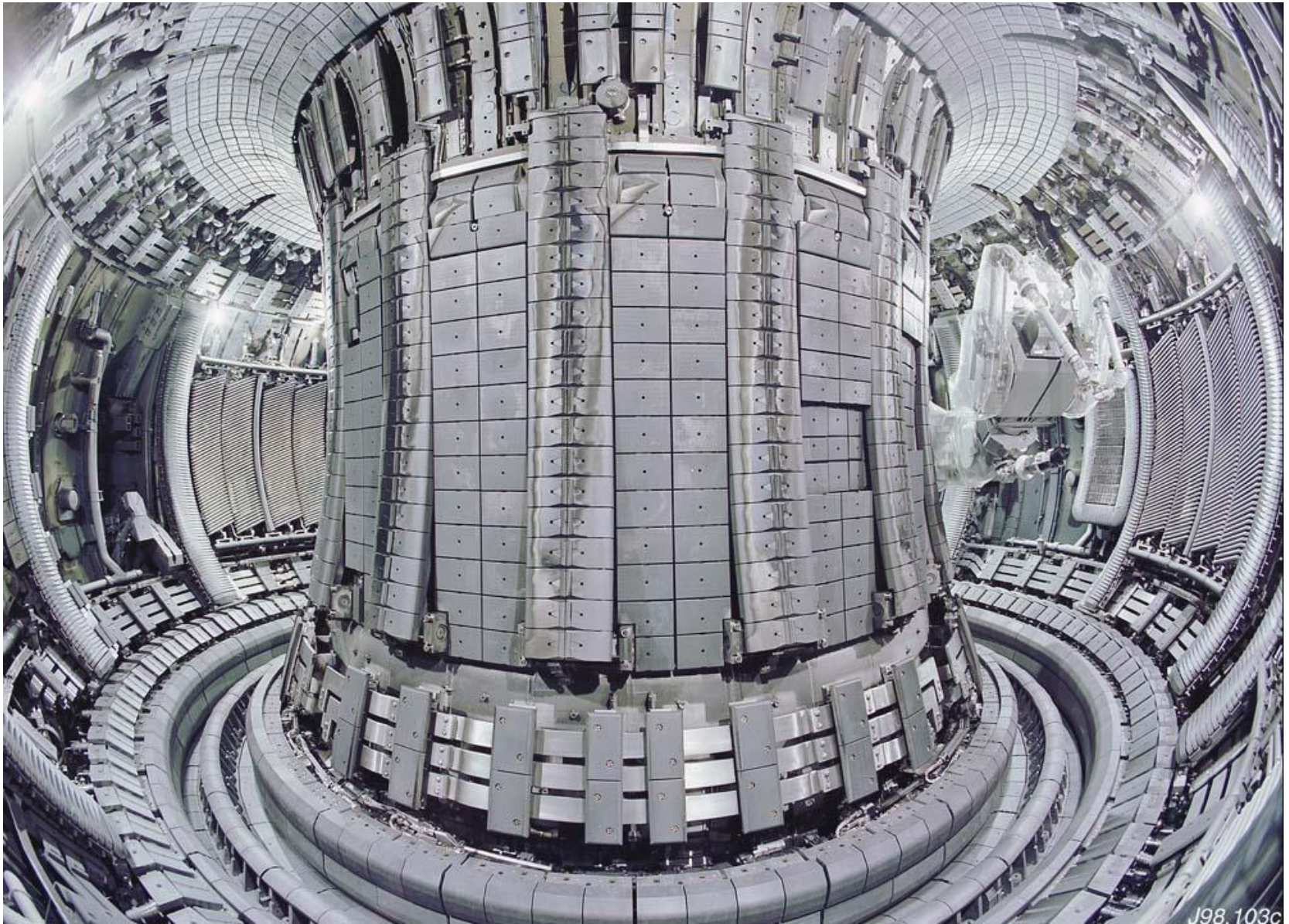


DT kísérletek

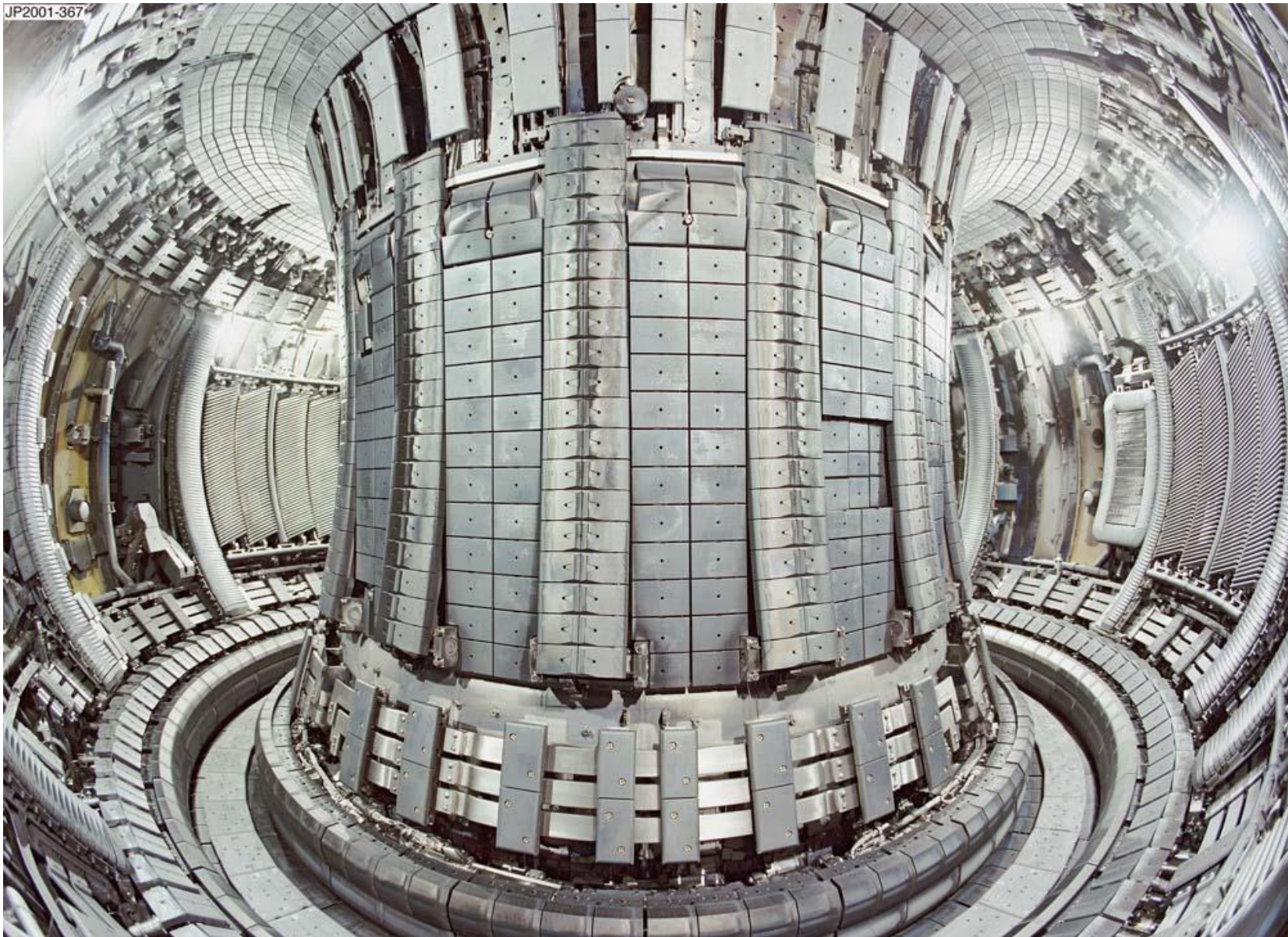
- Begyűjtás feltétele (Lawson-kritérium): $P_\alpha > P_v$
 $\rightarrow nT\tau_E > 5e21 \text{ m}^{-3}\text{s keV}$ (fúziós hármasszorzat).
- 16 MW, $Q=0,6$ (1997)



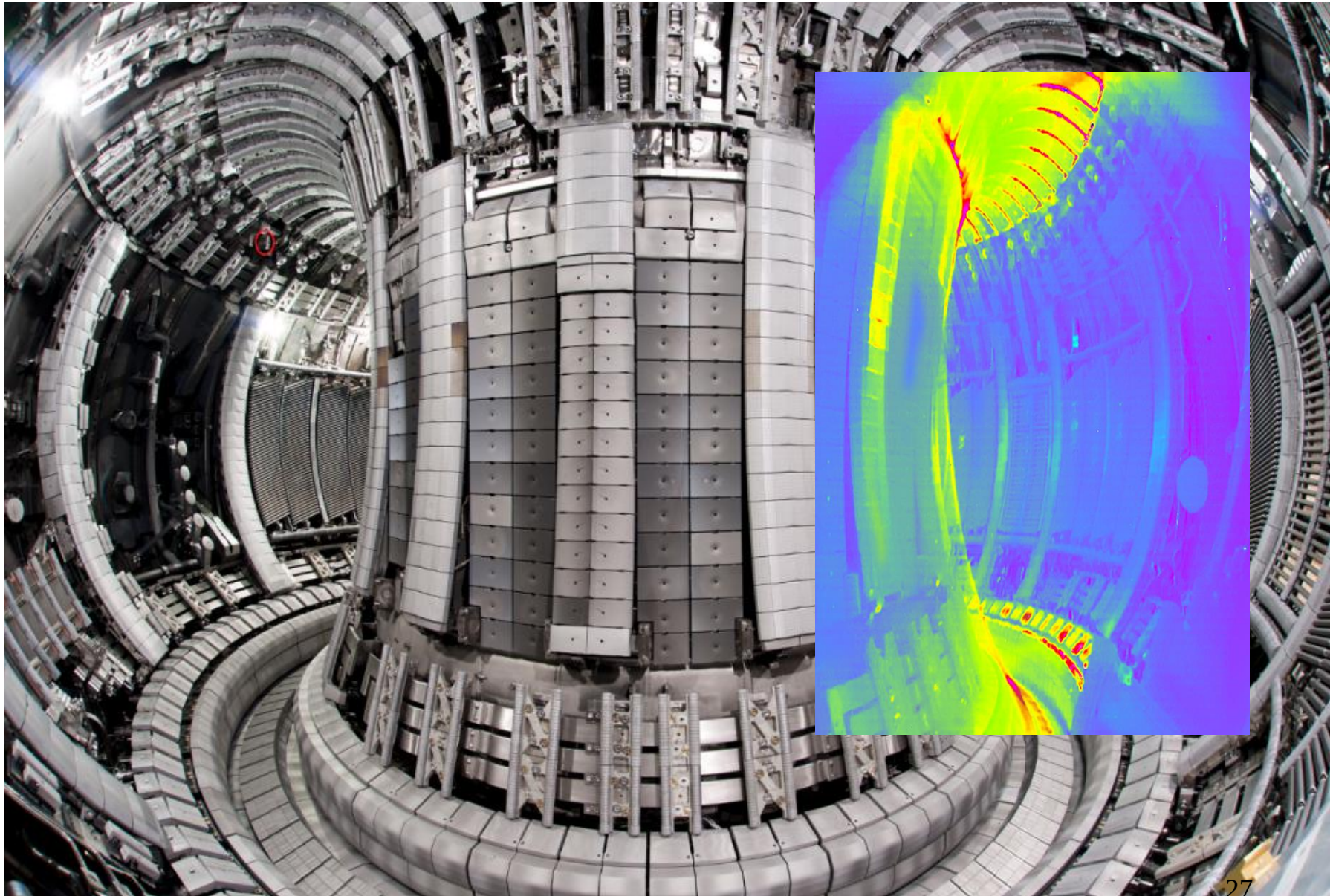
JET fal – 1998



JET fal – 2005



ITER-szerű fal – 2011



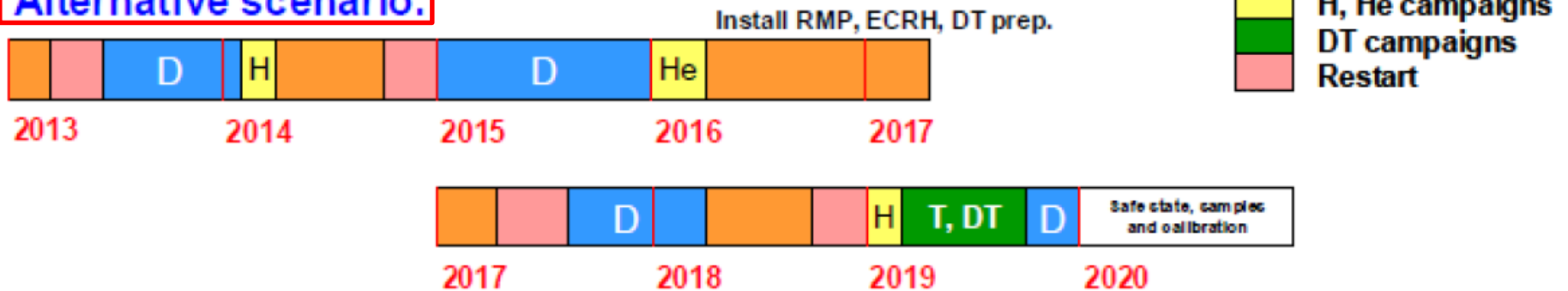
JET menetrend

Végső D-T kampány - előkészítés alatt Üzemidő hosszabbítása?

Reference scenario:

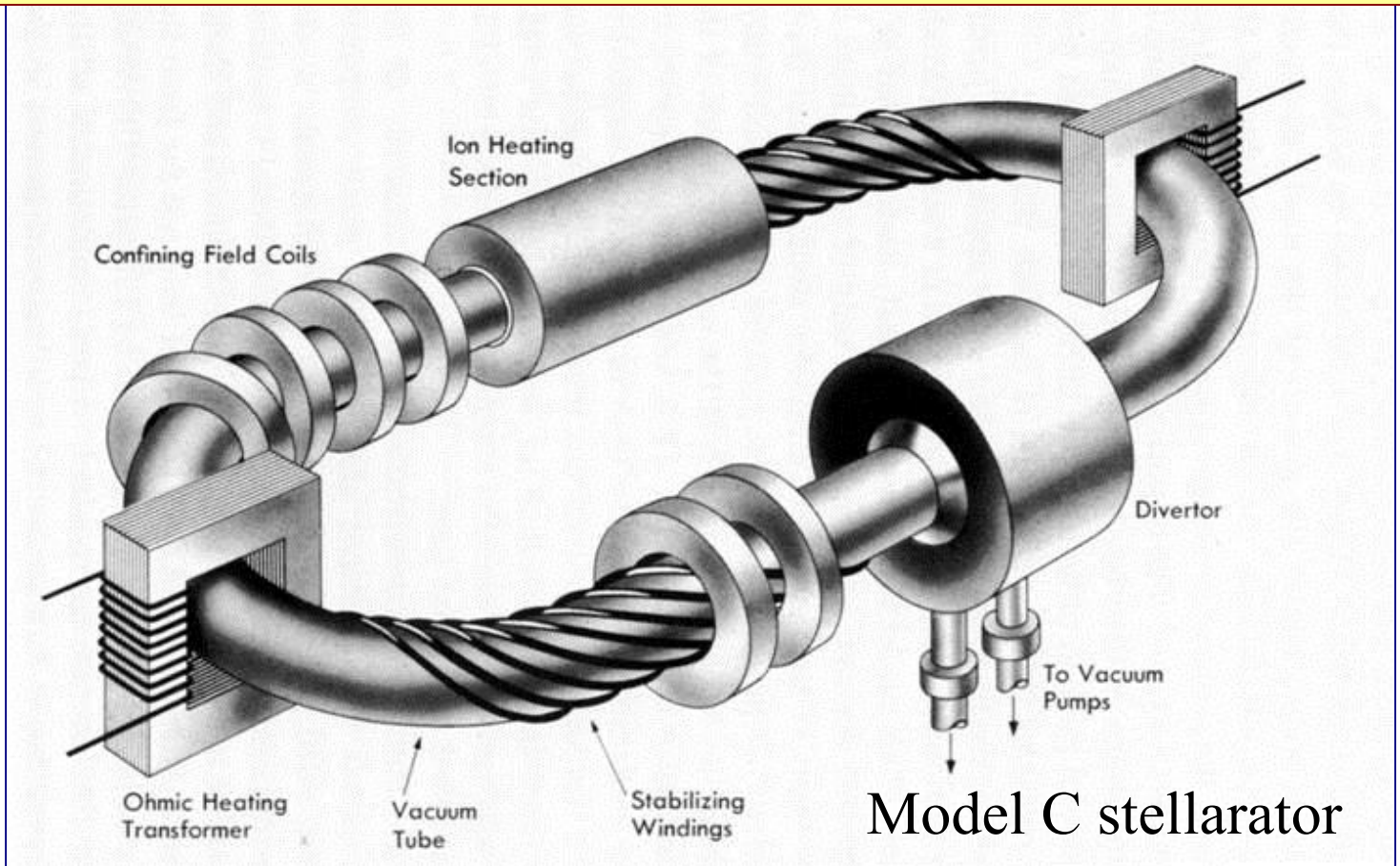


Alternative scenario:



Sztellarátor

Feltaláló: Lyman Spitzer, Princeton Plasma Physics Laboratory, USA, 1951



Wendelstein sztellarátorok

Wendelstein I-A (1961):

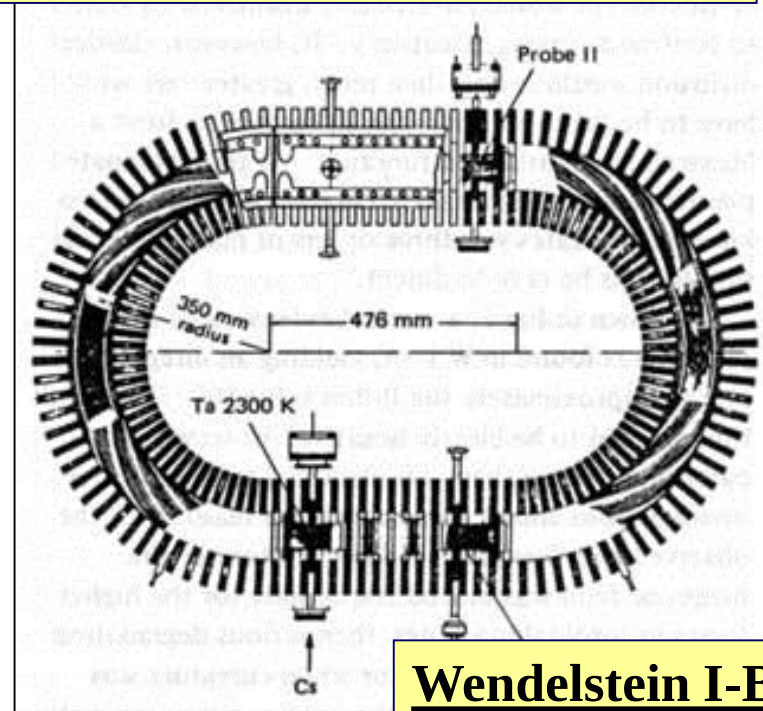
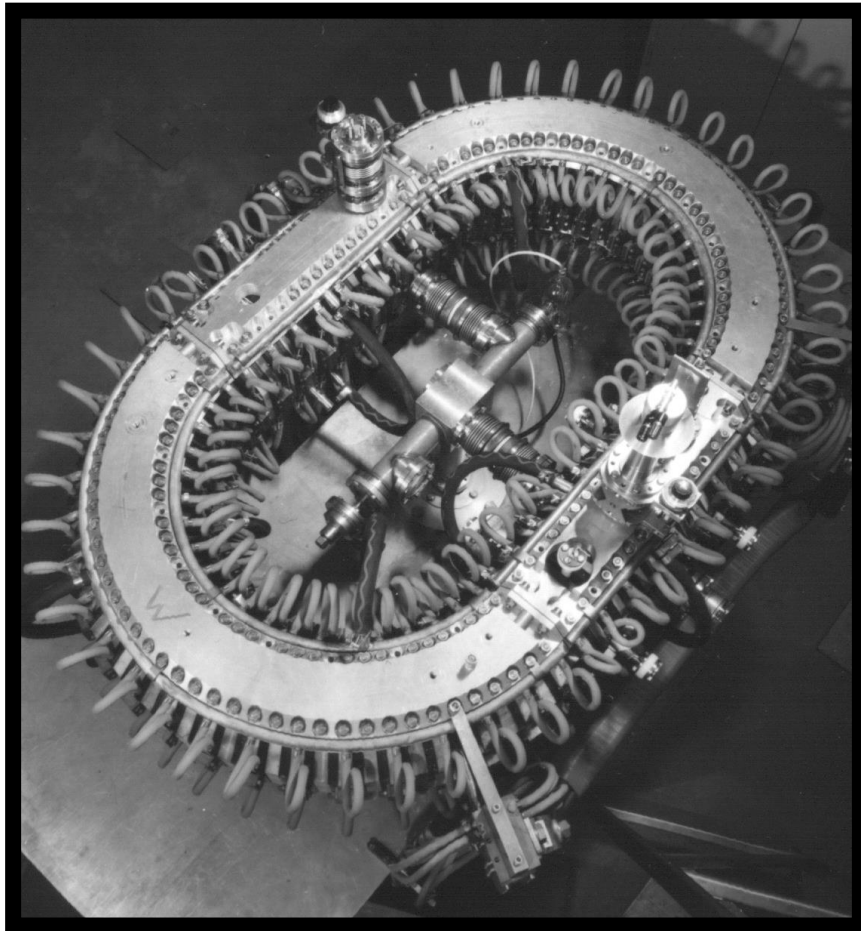
„Versenypálya” geometria

Nagy sugár: 35 cm

Kis sugár: 2 cm

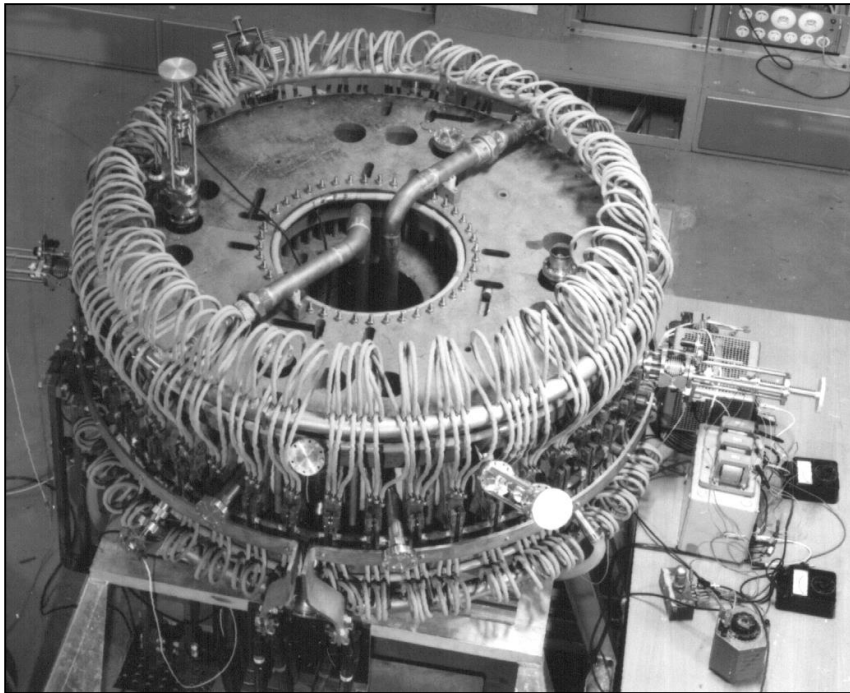
Mágneses tér: 1 T

Ohmikus fűtés



Wendelstein I-B

Wendelstein sztellarátorok



Wendelstein II-A (1968):

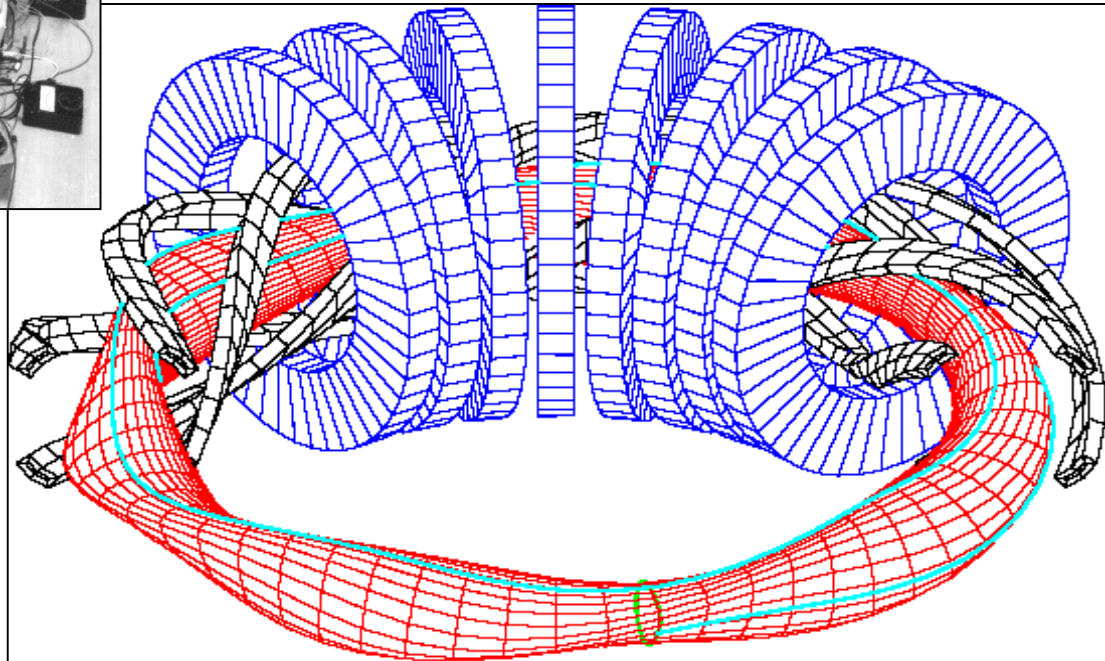
Tórusz geometria

Nagy sugár: 50 cm

Kis sugár: 5 cm

Mágneses tér: 0,6 T

RF fűtés



Wendelstein sztellarátorok

Wendelstein II-B (1971):

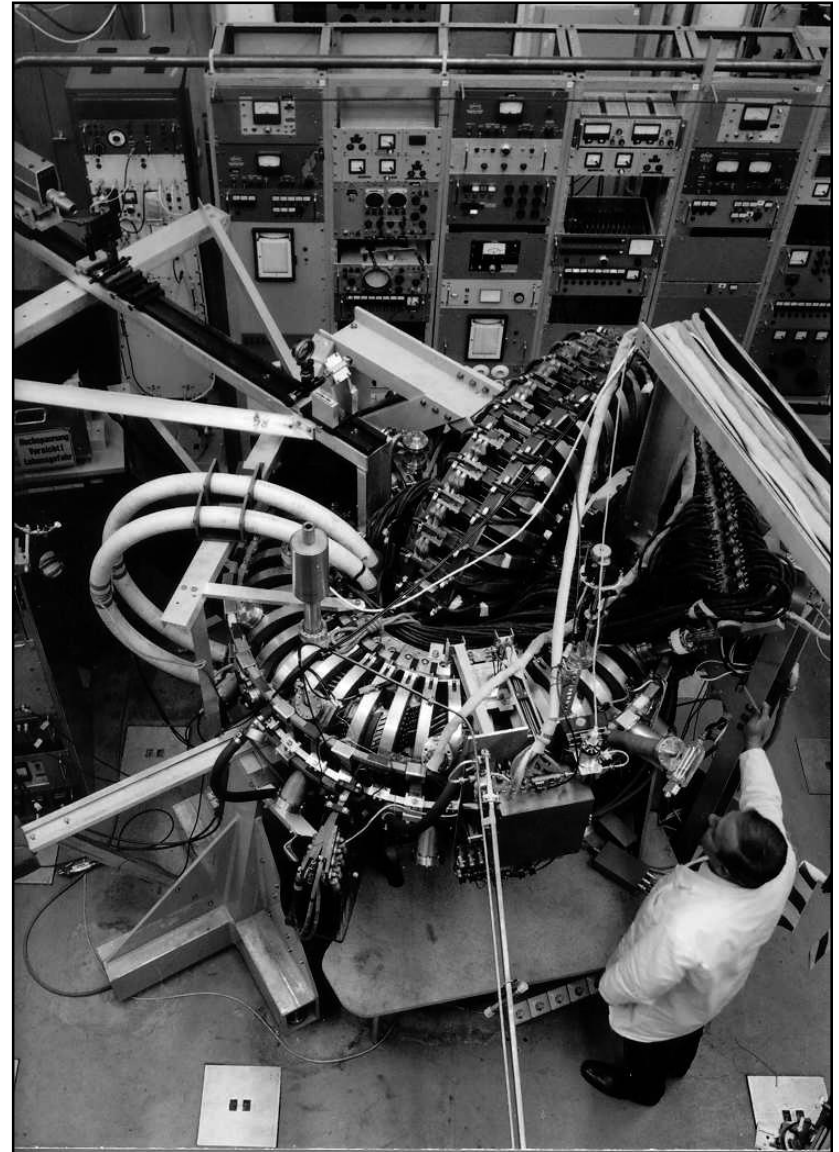
Tórusz geometria

Nagy sugár: 50 cm

Kis sugár: 5 cm

Mágneses tér: 1,25 T

RF fűtés



Wendelstein sztellarátorok

Wendelstein 7-A (1976):

Tórusz geometria

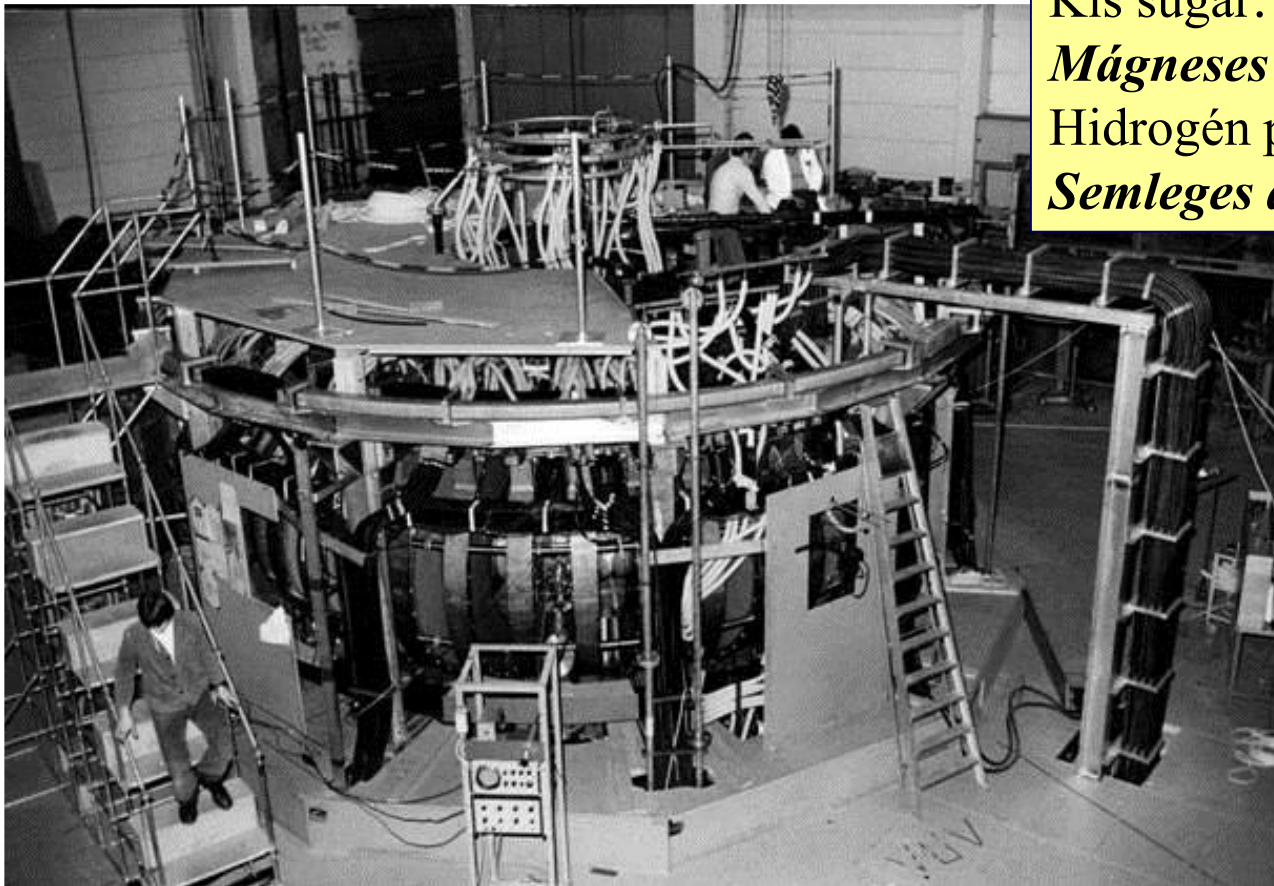
Nagy sugár: 2 m

Kis sugár: 0,1 m

Mágneses tér: 3,4 T

Hidrogén plazma

Semleges atomnyaláb fűtés



Wendelstein sztellarátorok

Wendelstein 7-A (1976):

Tórusz geometria

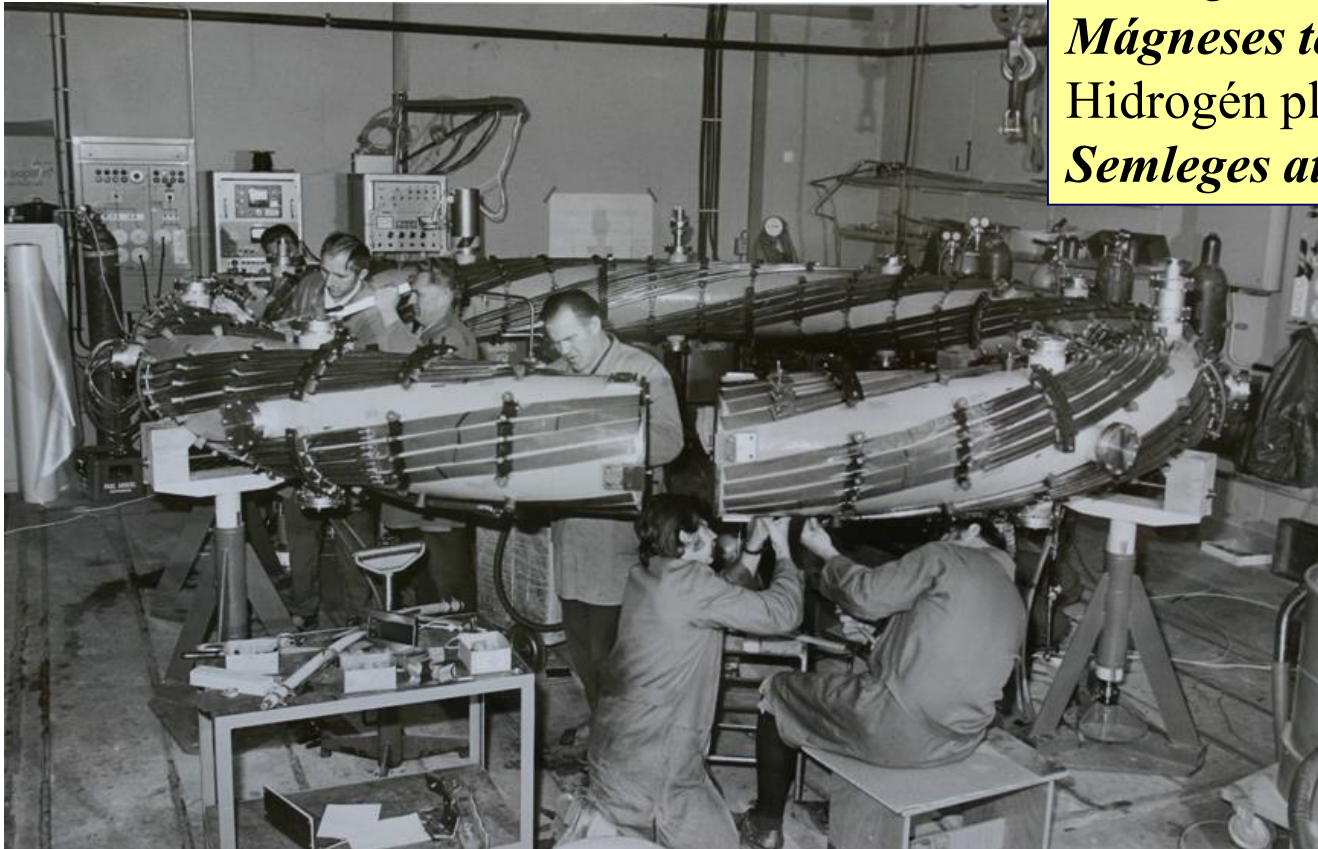
Nagy sugár: 2 m

Kis sugár: 0,1 m

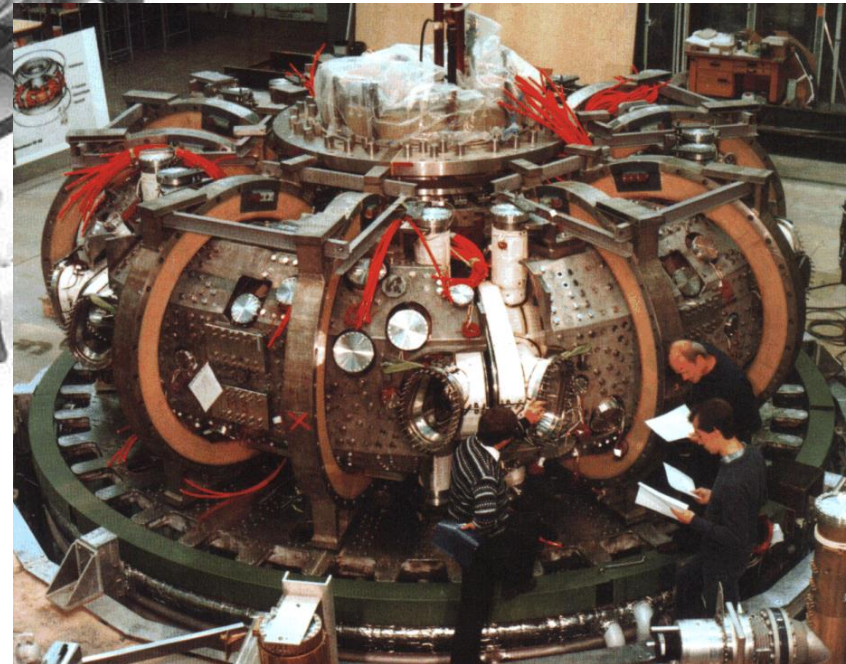
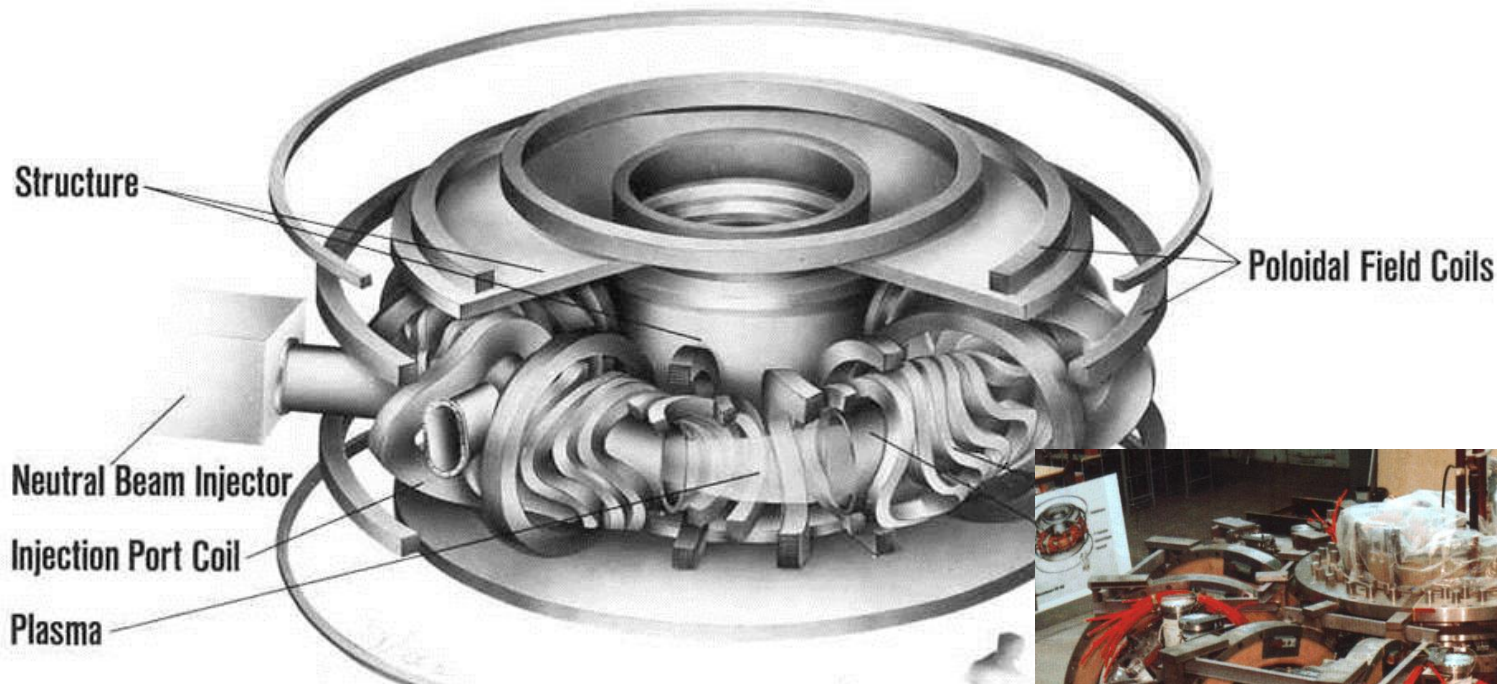
Mágneses tér: 3,4 T

Hidrogén plazma

Semleges atomnyaláb fűtés



Wendelstein sztellarátorok



Wendelstein 7-AS (1988):

Moduláris sztellarátor (5 modul)

Részlegesen optimaizált

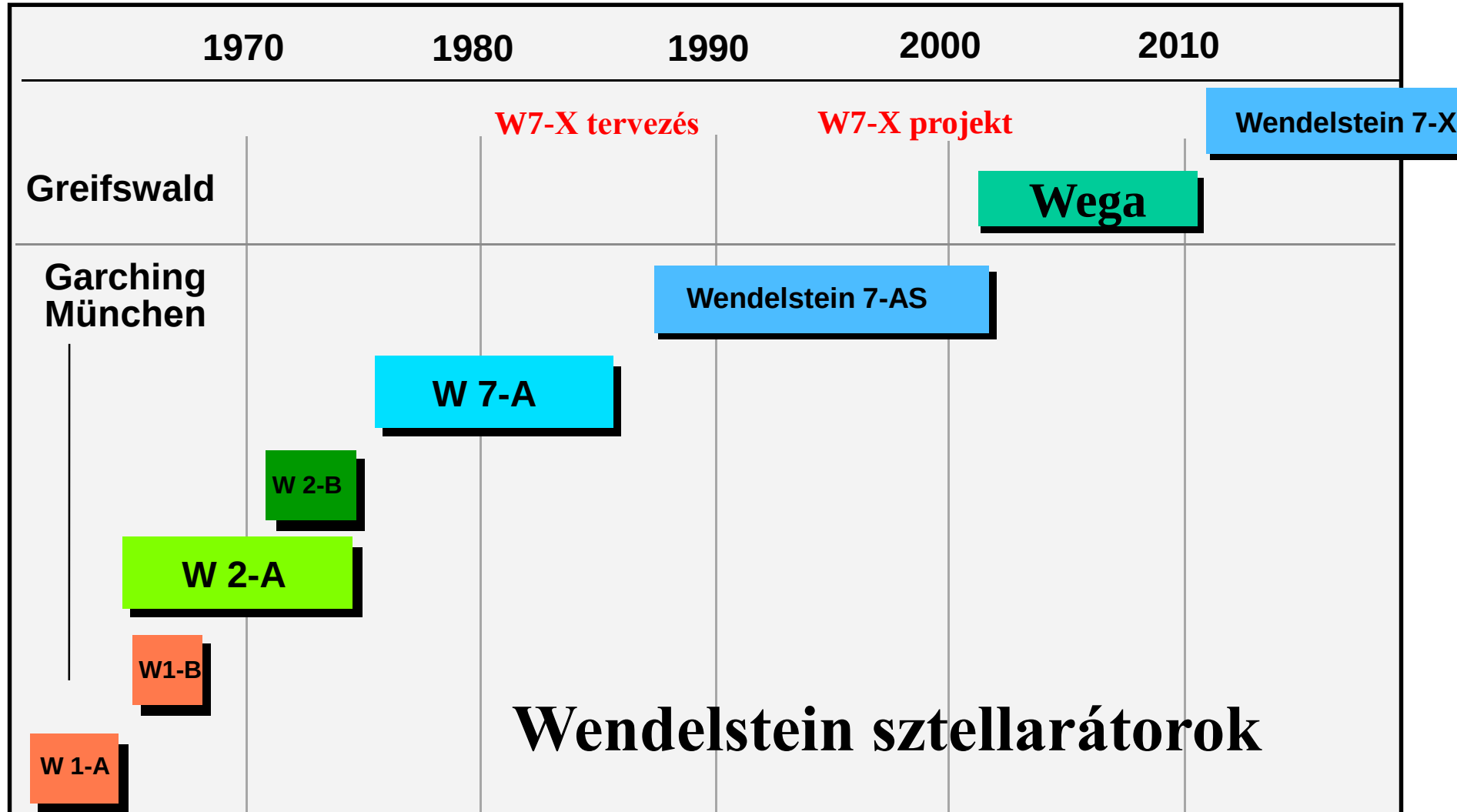
Nagy sugár: 2 m

Kis sugár: 0,18 m

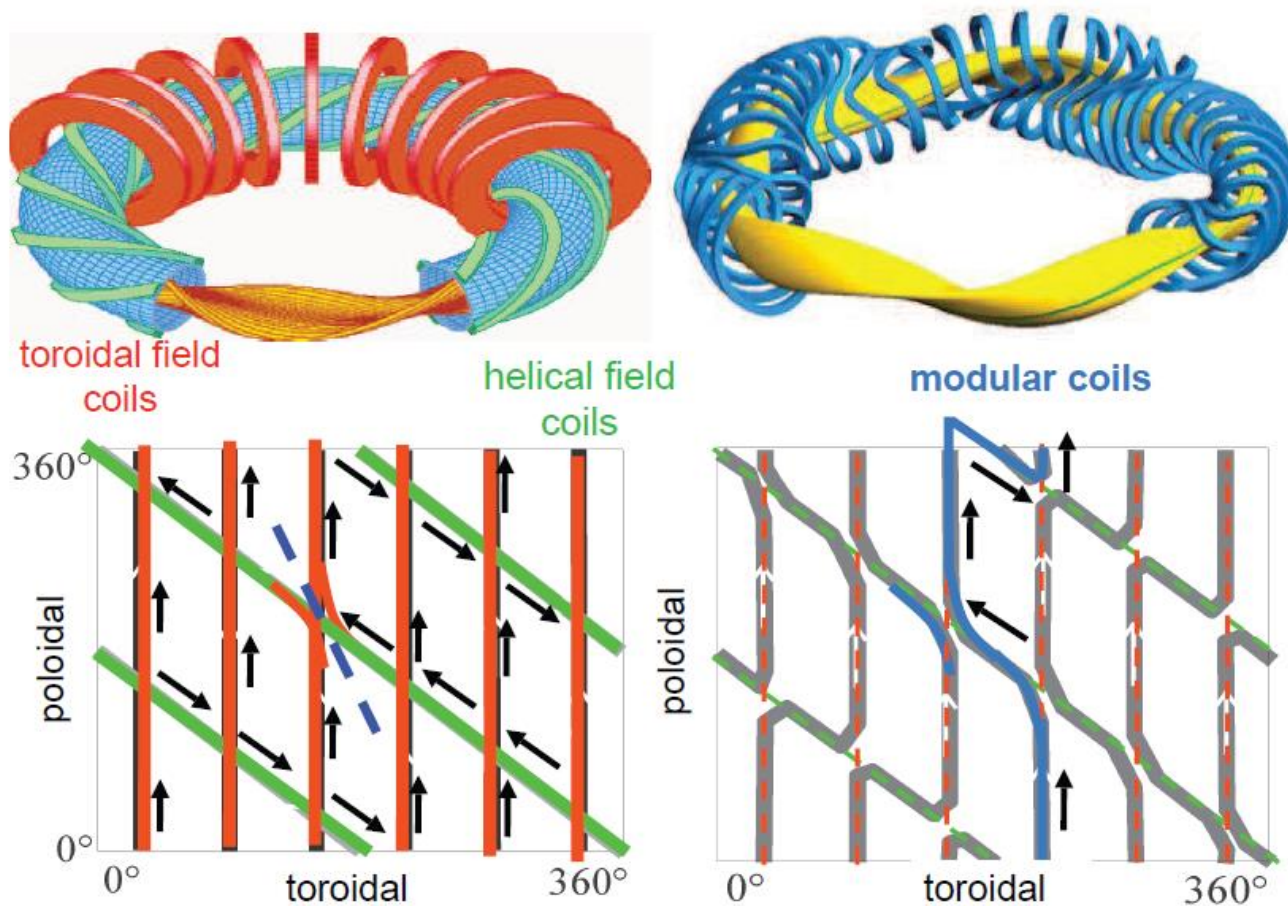
Mágneses tér: 2,5 T

Hidrogén és deutérium plazma

Wendelstein sztellarátorok



Klasszikus és moduláris sztellarátorok



+ Moduláris tekercsekkel szabadabban lehet optimalizálni.

- Pontos 3D modellezés szükséges!

Sztellarátor optimalizálás

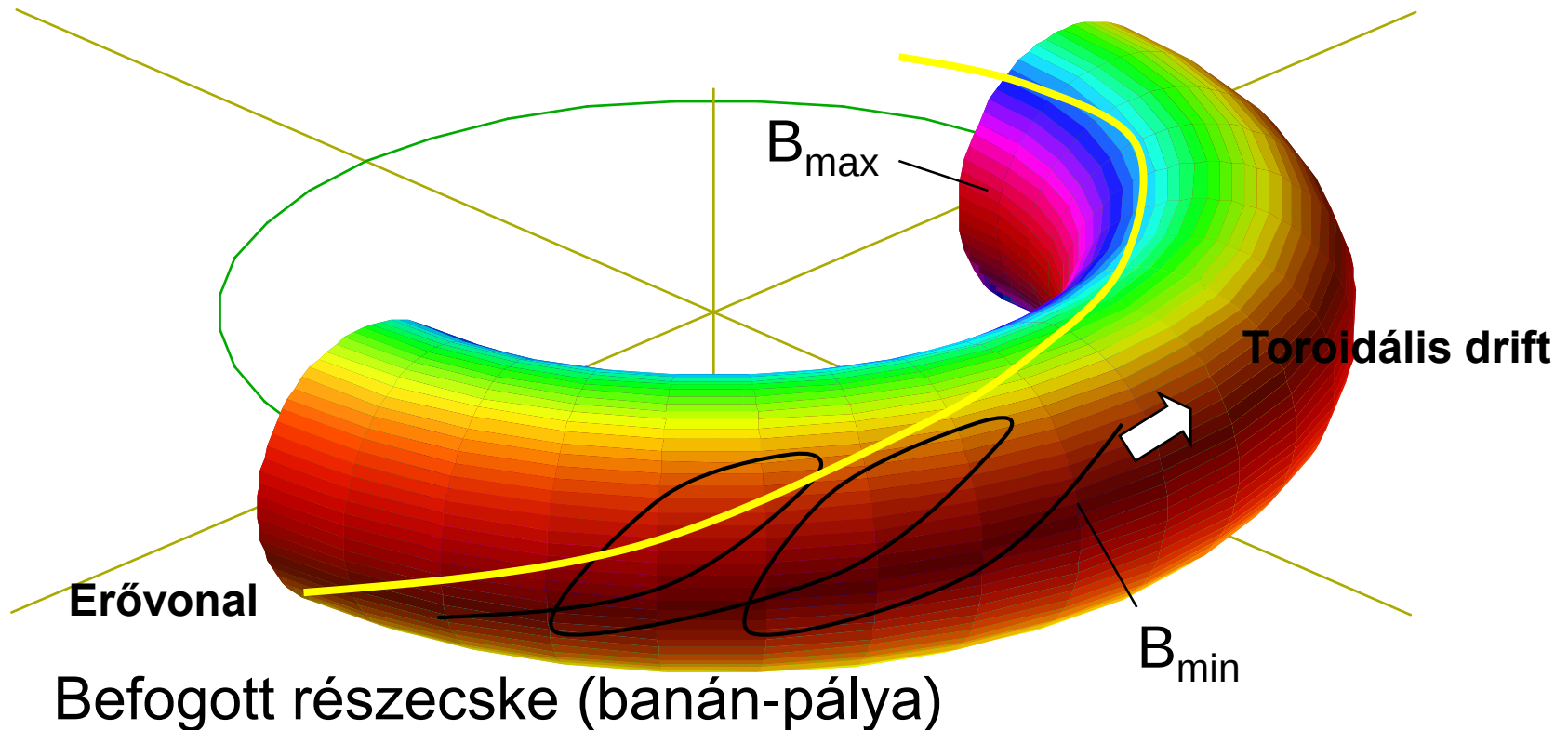
Optimalizált sztellarátor!

Az optimalizálás szempontjai:

- Jó minőségű mágneses felületek
- Erősen lecsökkentett plazmaáramok
- Csökkentett ütközésmentes transzport
- Csökkentett gyorsrészecske veszteségek
- Jó MHD stabilitás
- **Technikailag megvalósítható tekercsrendszer**

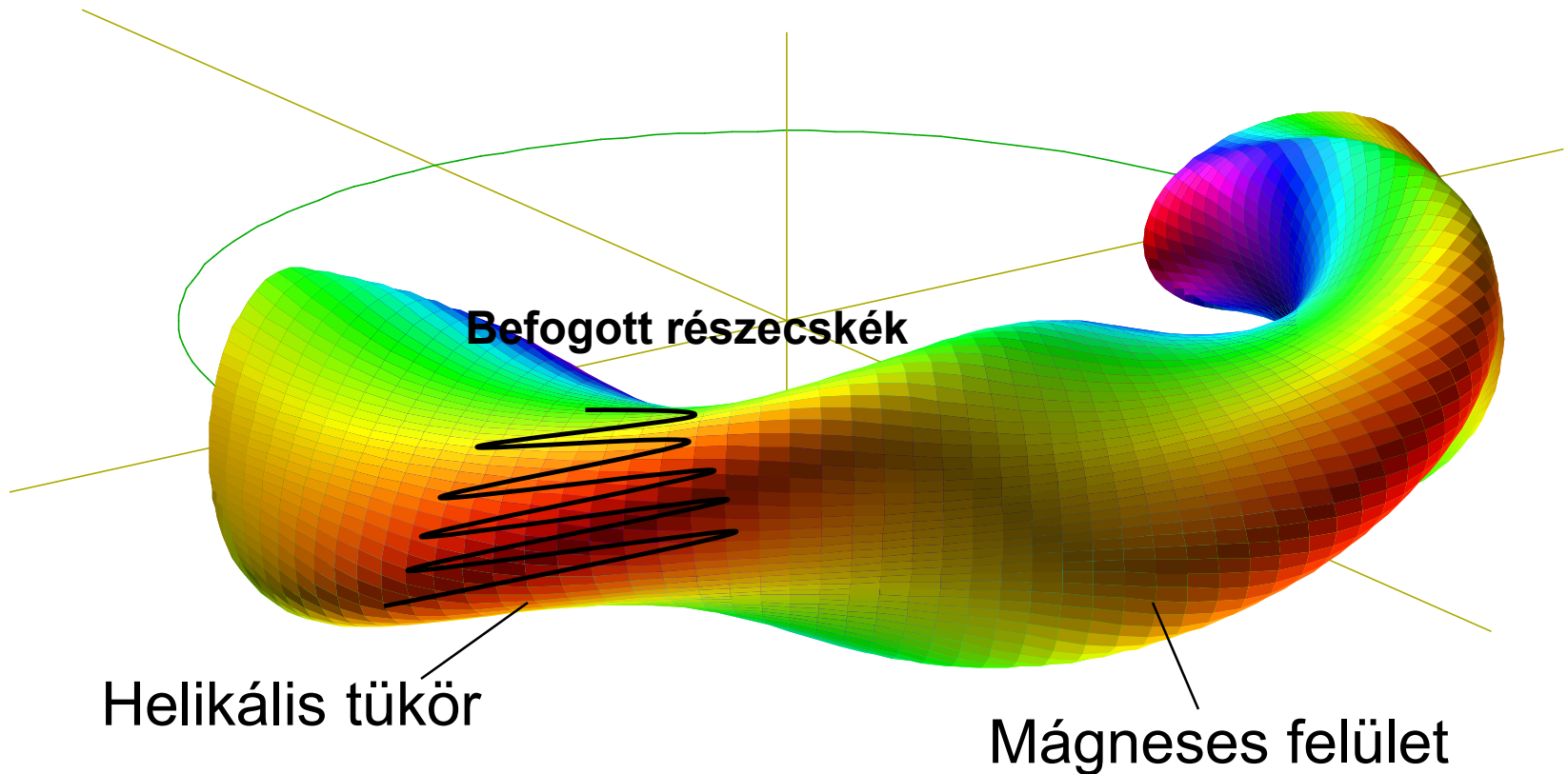
Neoklasszikus transzport tokamakban

Tokamak



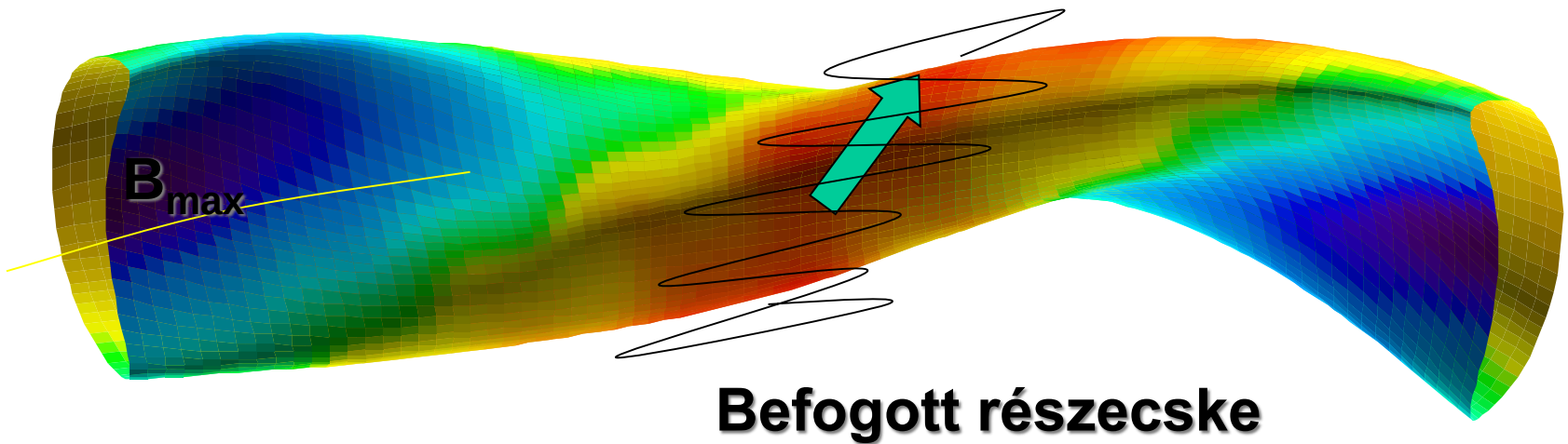
Neoklasszikus transzport sztellarátorban

L = 2 Stellarator

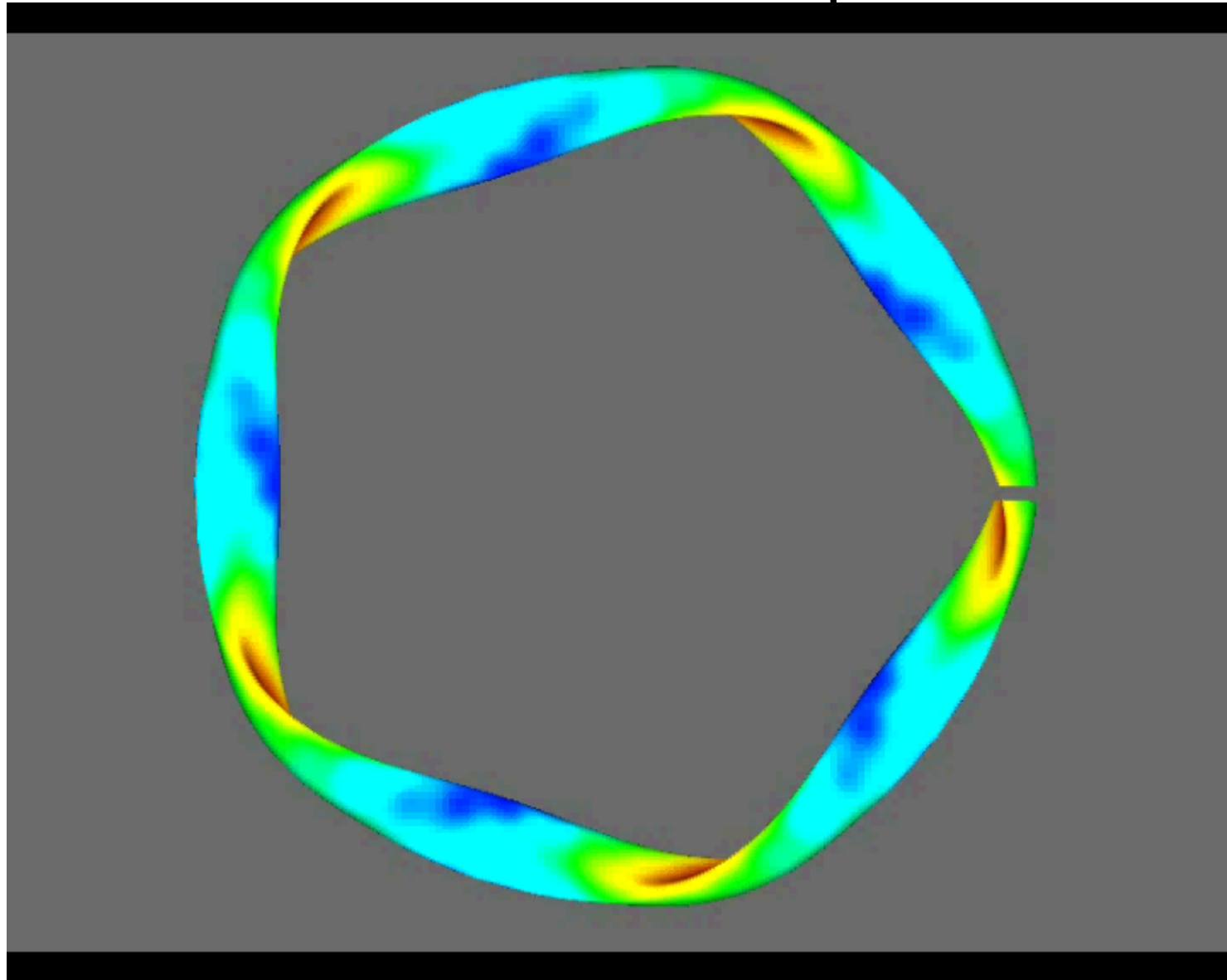


Csökkentett neoklasszikus transzport a W7-X-ben

Mágneses felület (1 Periódus)

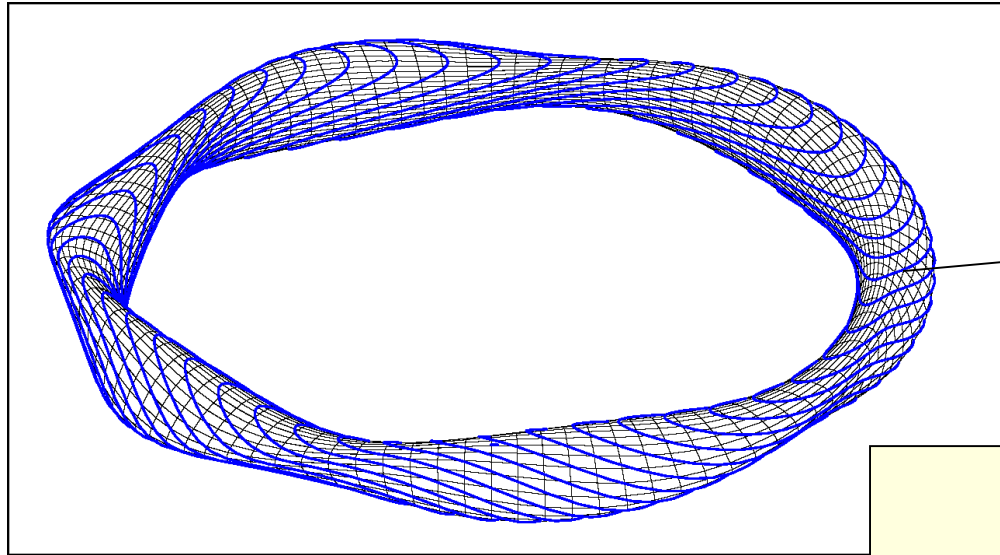


Csökkentett neoklasszikus transzport a W7-X-ben

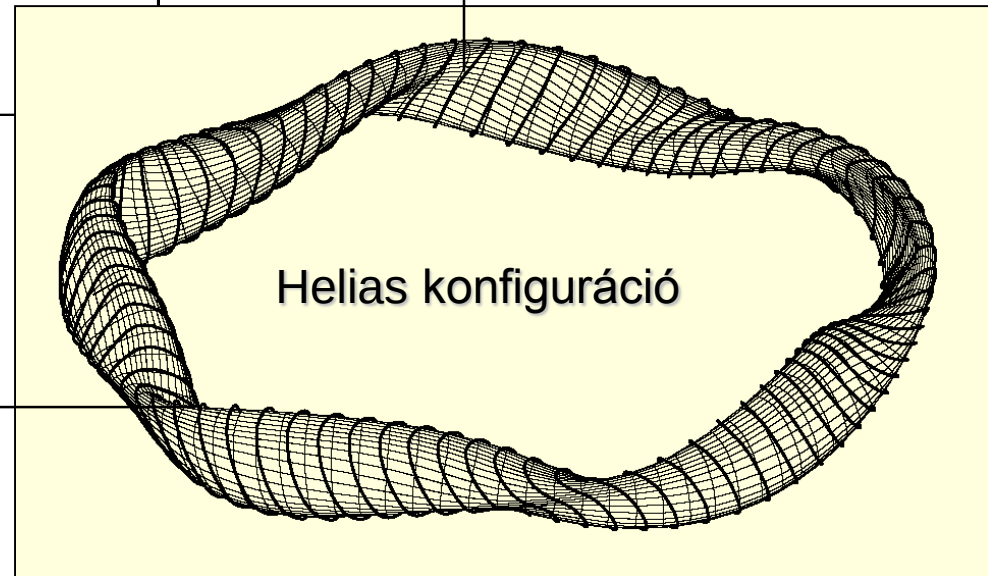


Csökkentett párhuzamos plazmaáram a W7-X-ben

L = 2 Sztellarátor

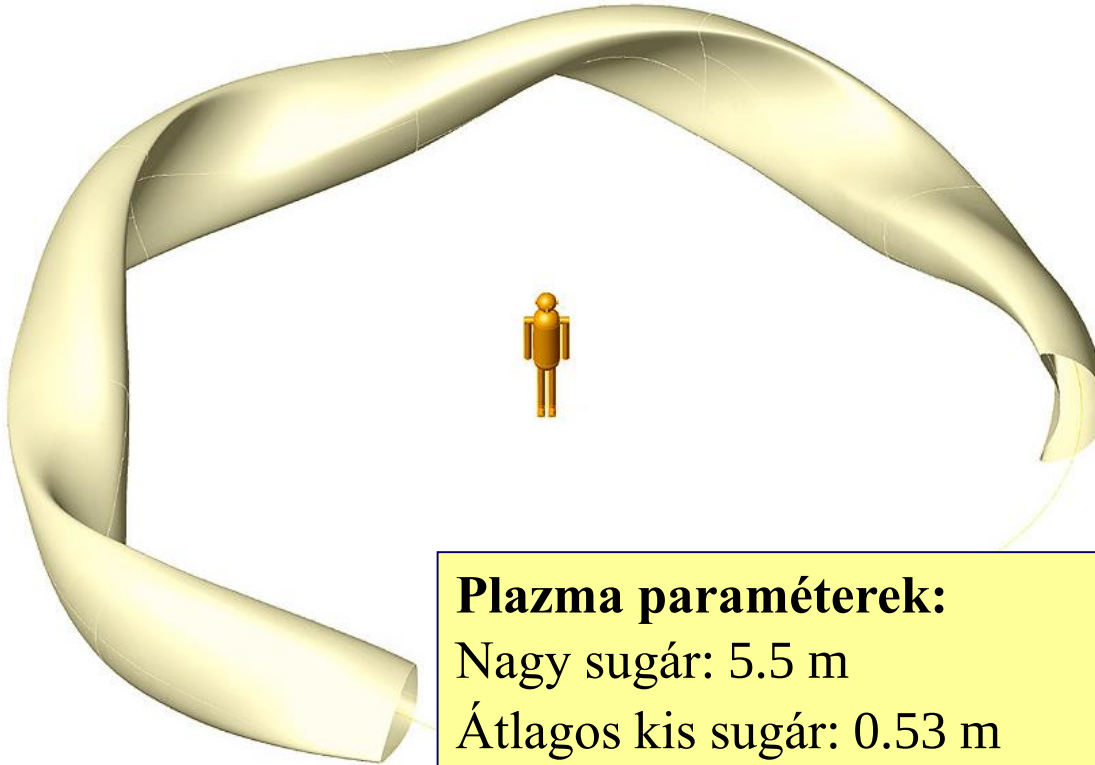


Plazma áramvonalak



Mágneses erővonalak

W7-X felépítése



Plazma paraméterek:

Nagy sugár: 5.5 m

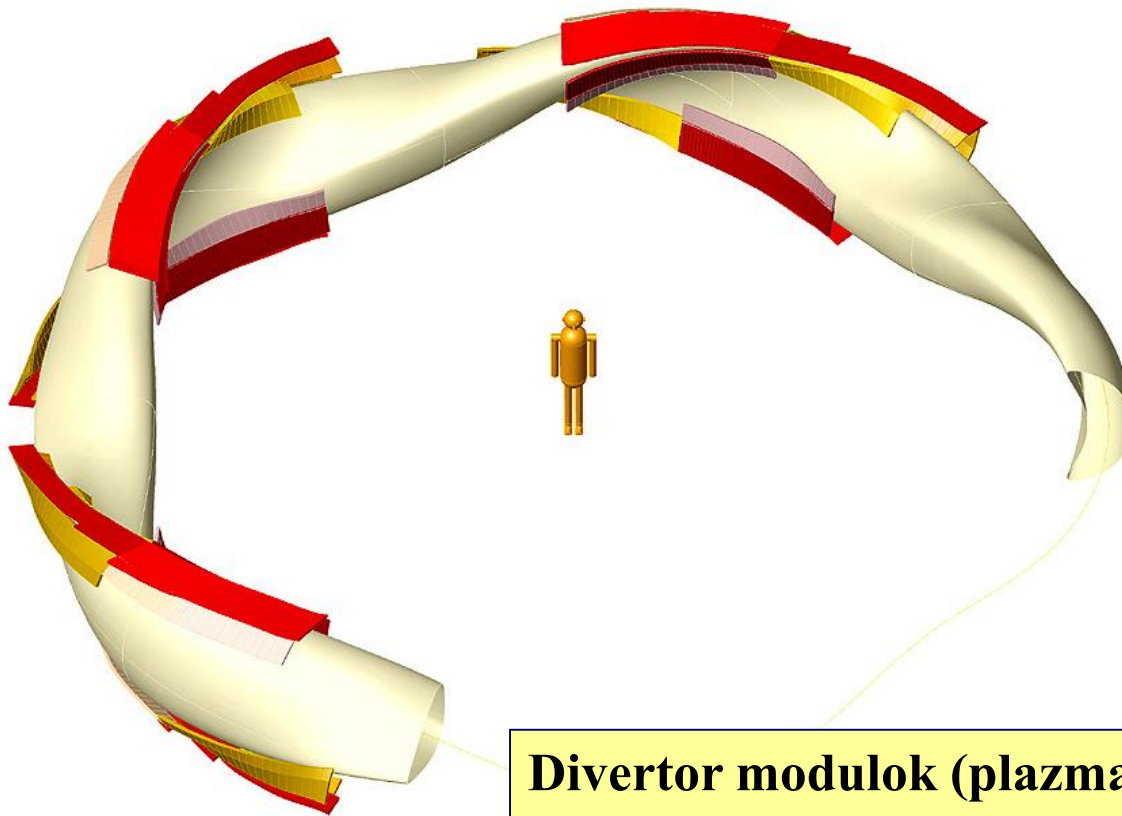
Átlagos kis sugár: 0.53 m

Középponti plazmasűrűség: $3 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$

Középponti elektronhőmérséklet: 5-10 keV

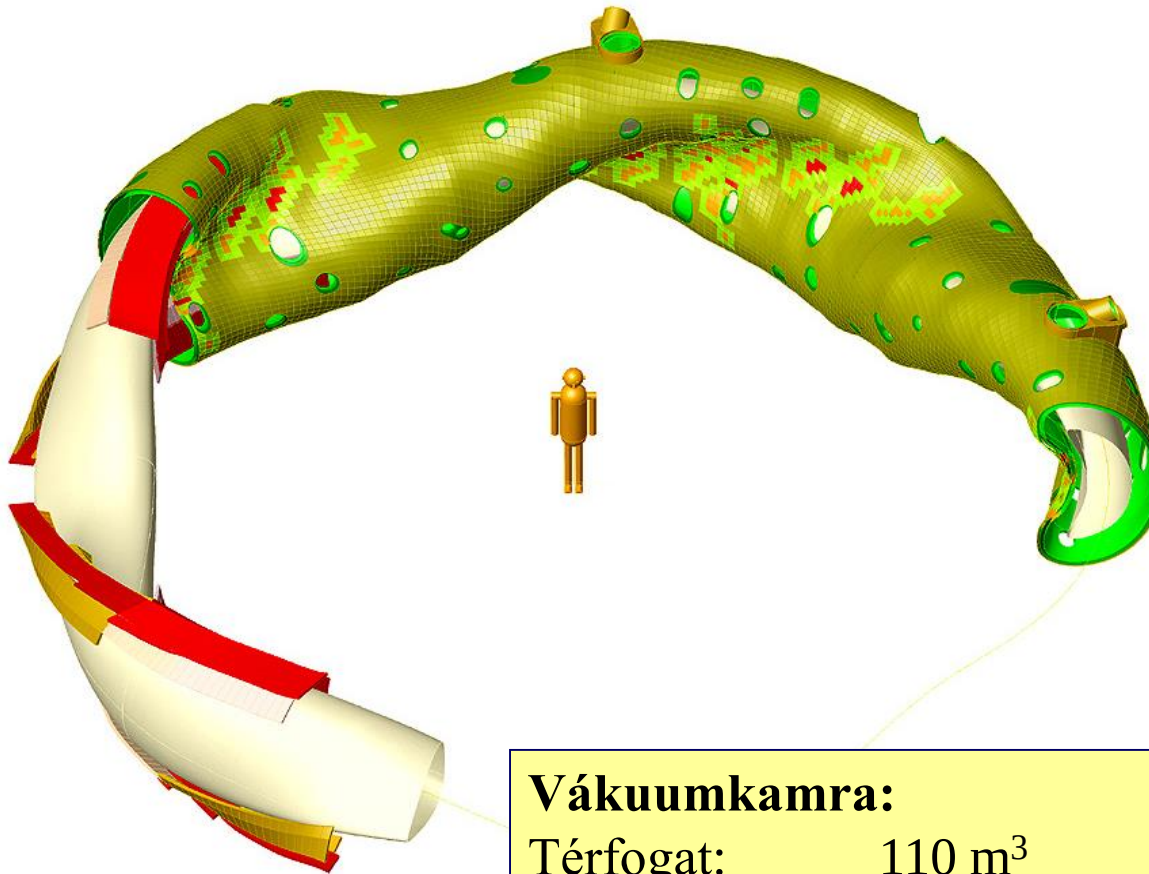
Hidrogén és deutérium plazma

W7-X felépítése



Divertor modulok (plazmahatároló elem):
10 darab
Felületi teljesítménysűrűség: 10 MW/m^2
Folyamatos üzemmód aktív hűtéssel (végső konfiguráció)
Kriopumpával szívott

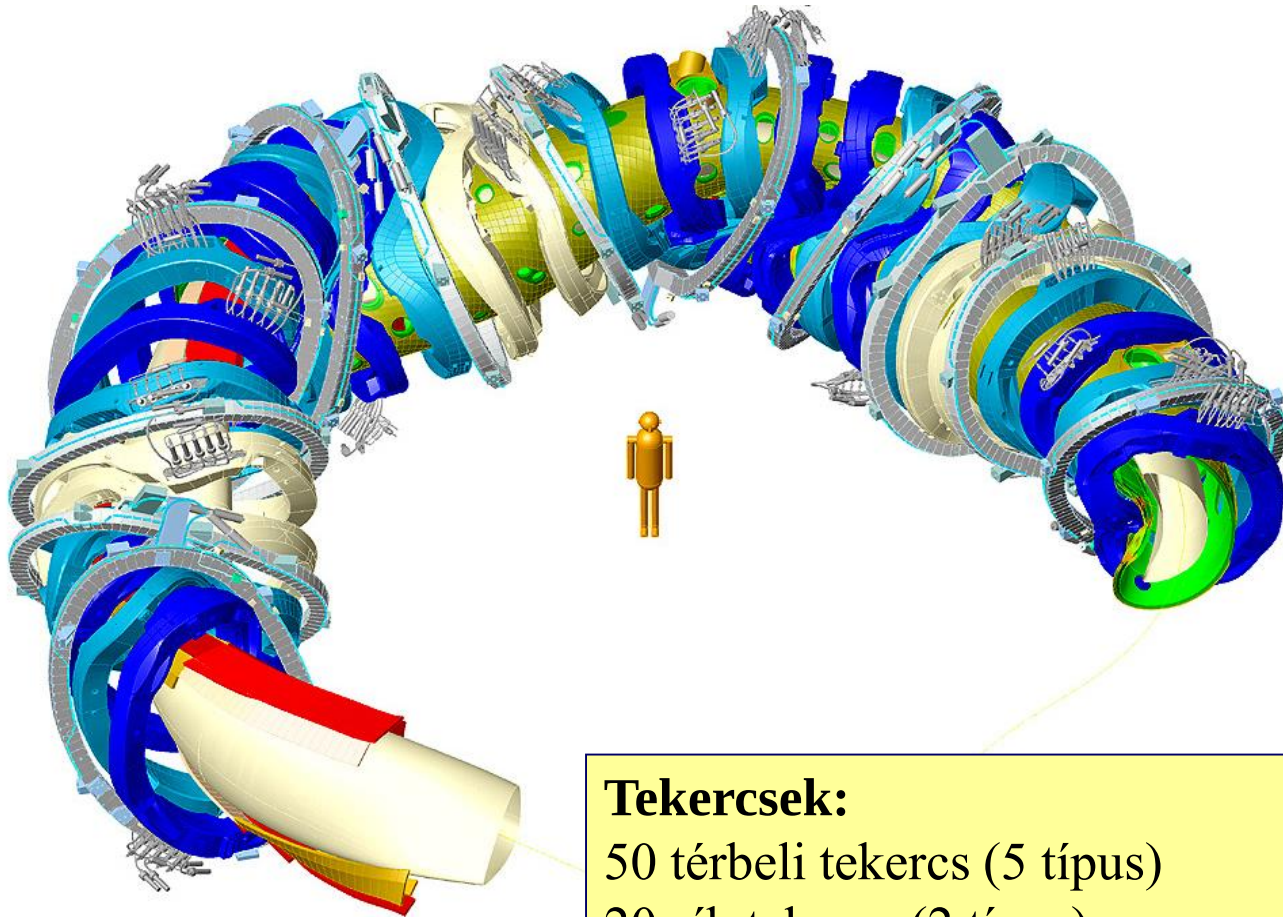
W7-X felépítése



Vákuumkamra:

Térfogat:	110 m ³
Felület:	200 m ²
Vákuum:	< 10 ⁻⁸ mbar
Tömeg:	35 t

W7-X felépítése



Tekercsek:

50 térbeli tekercs (5 típus)

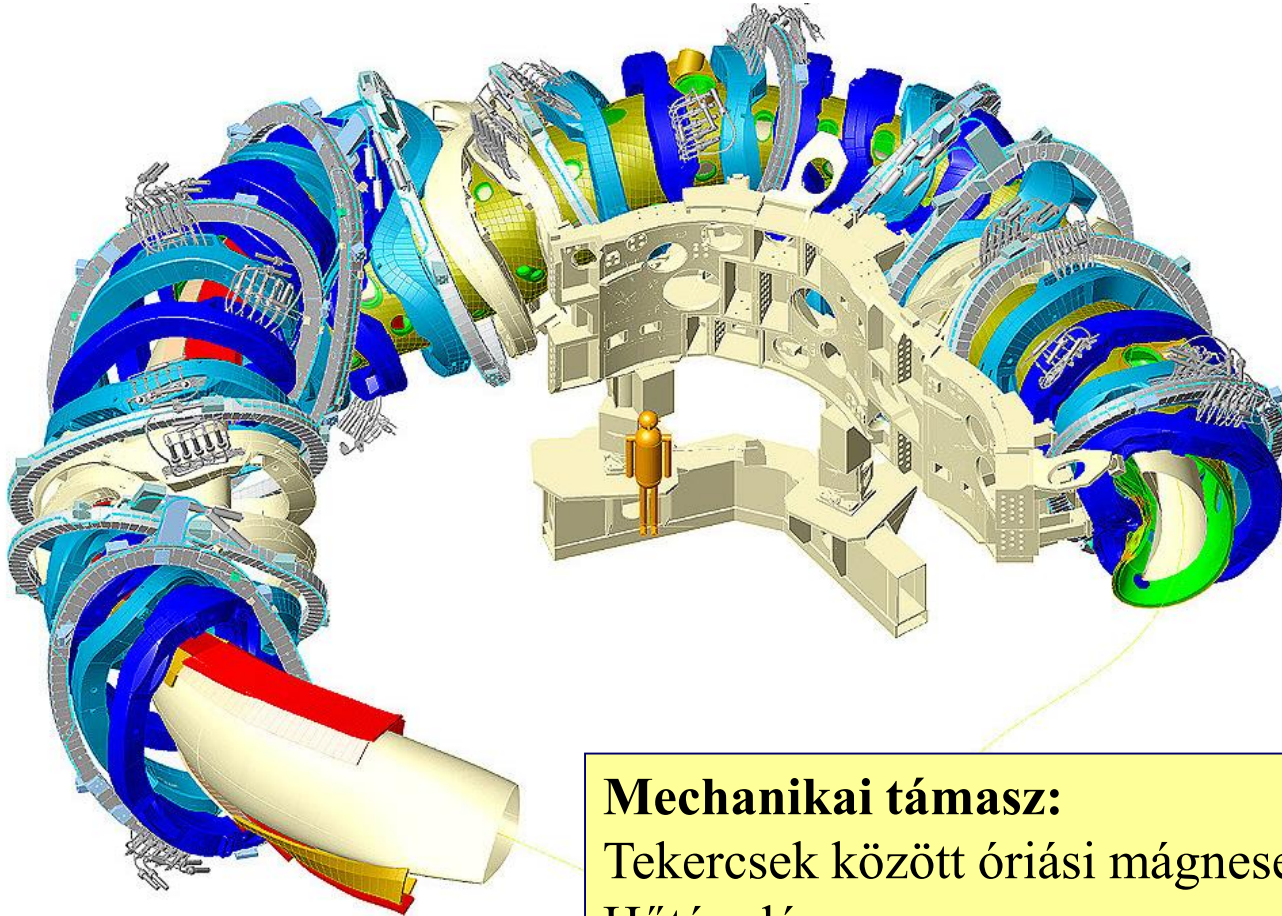
20 sík tekercs (2 típus)

5 modul, 2-2 szimmetrikus félmodul

NbTi szupravezető (< 3.4 K, 6.8 T, 17.8 kA)

Mágneses tér a plazma közepén: 2.5 T

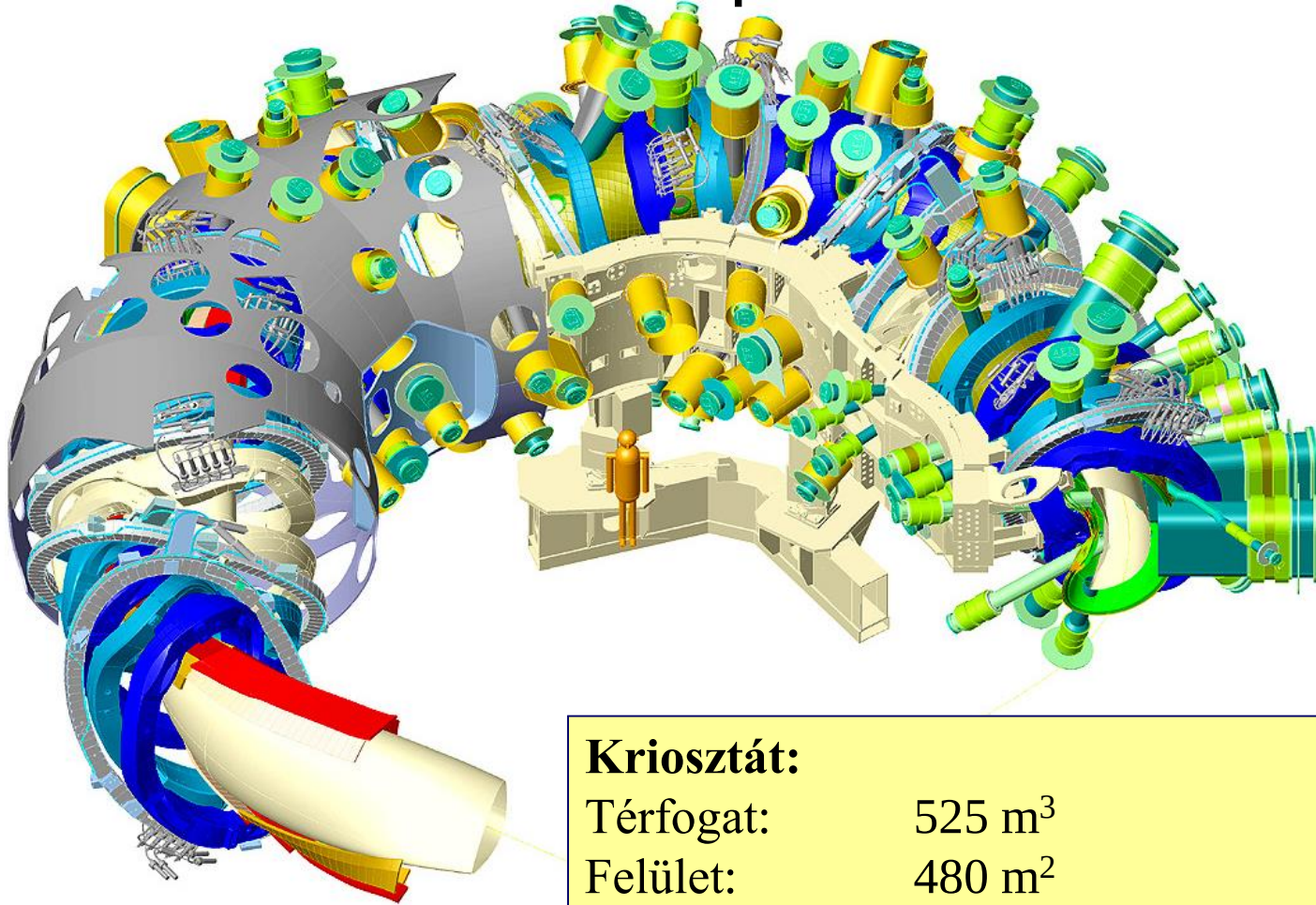
W7-X felépítése



Mechanikai támasz:

Tekercsek között óriási mágneses erők
Hőtágulás
Középponti elrendezés

W7-X felépítése



Kriosztát:

Térfogat: 525 m³

Felület: 480 m²

Vákuum: $< 10^{-5}$ mbar

Tömeg: 150 t

Termikus szigetelés minden felületen

W7-X megépítése

Tekercsek:

- *Problémás gyártás*
- *Tesztelve kriosztátban, áram alatt*



http://www.ipp.mpg.de/1727365/zeitraffer_w7x

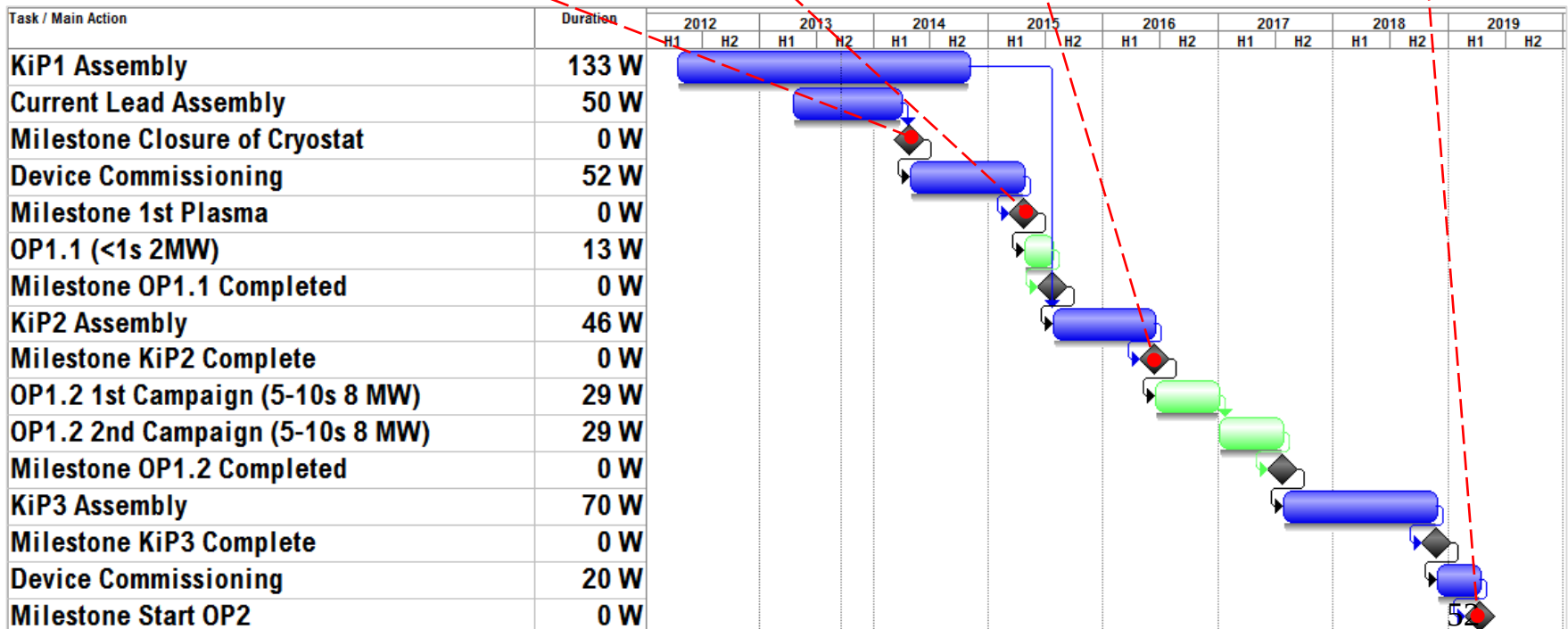
W7-X megépítése

összeszerelés
befejezve
2014

első plazma
2015

10 MW $\rightarrow$ 20 mW,
~5 sec
1 MW, 60 sec
2016

10 MW, 30 perc
> 20 MW, ~ 10 sec
2019

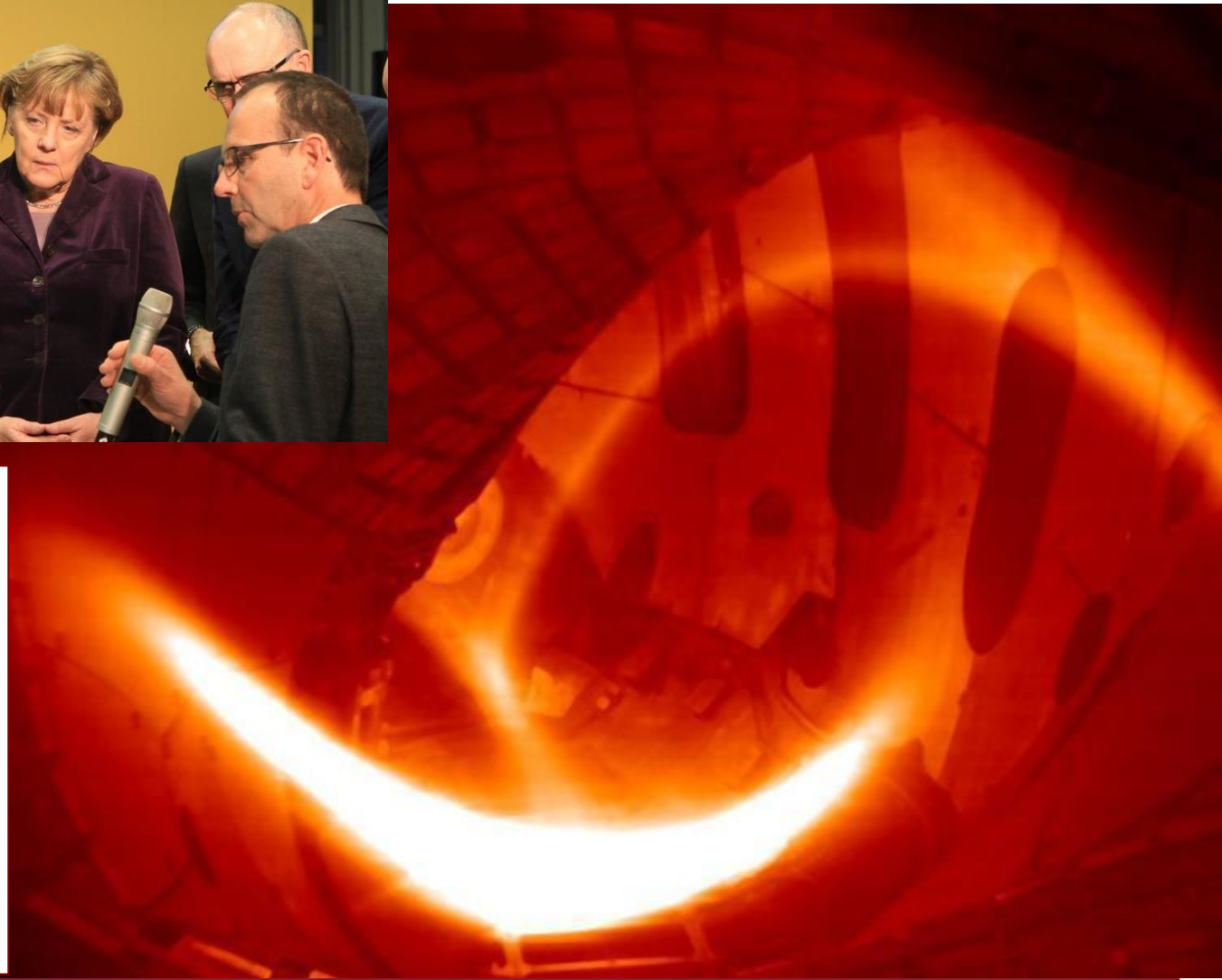


W7-X első H plazma – 2016.02.03.

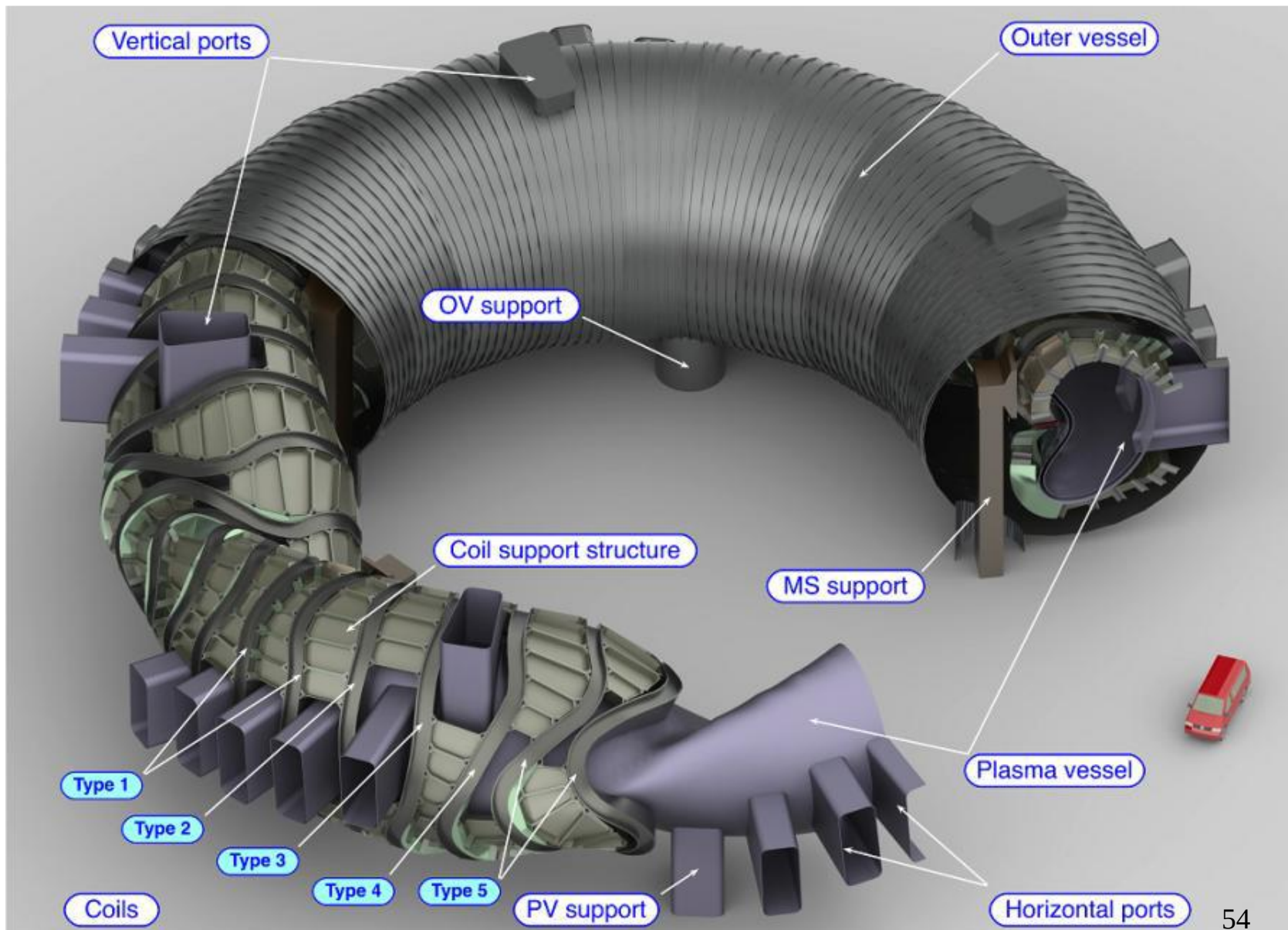


Első kampány:

- Rendkívül jó összetartás***
- Kampány meghosszabbítva***
- Jelenleg passzív divertor szerelése***

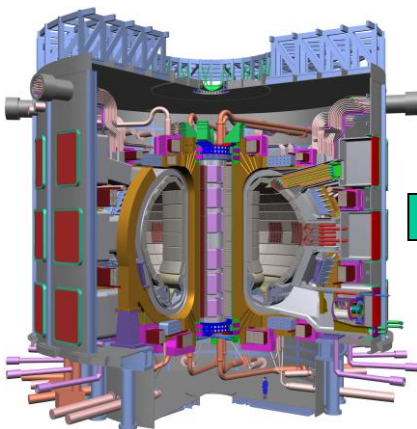


HELIAS 5-B

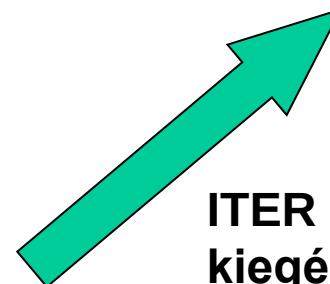
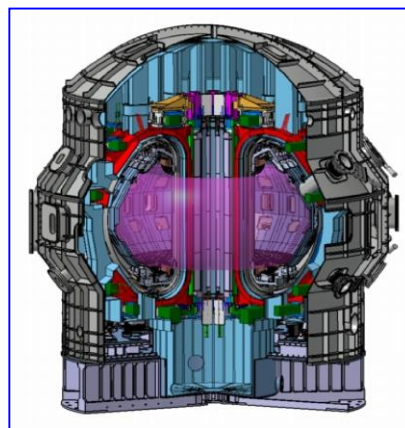


Távol-keleti supravezető tokamakok

ITER



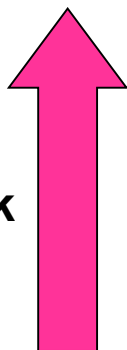
DEMO



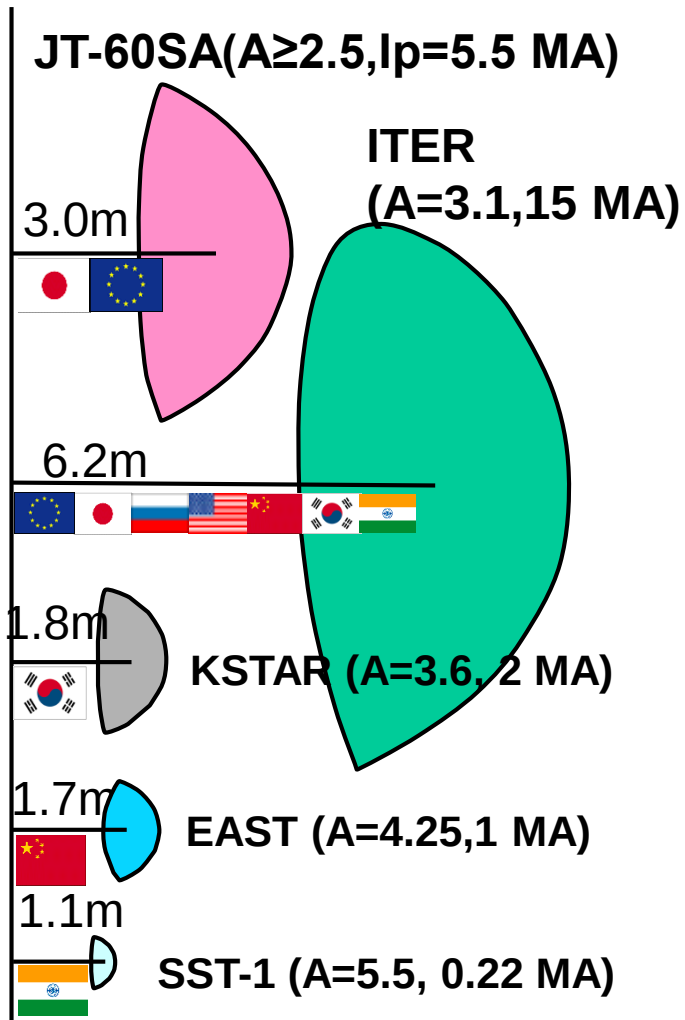
ITER
kiegészítése
DEMO
fejlesztésében

JT-60SA, Japán
KSTAR, Dél-Korea
EAST, Kína
SST-1, India

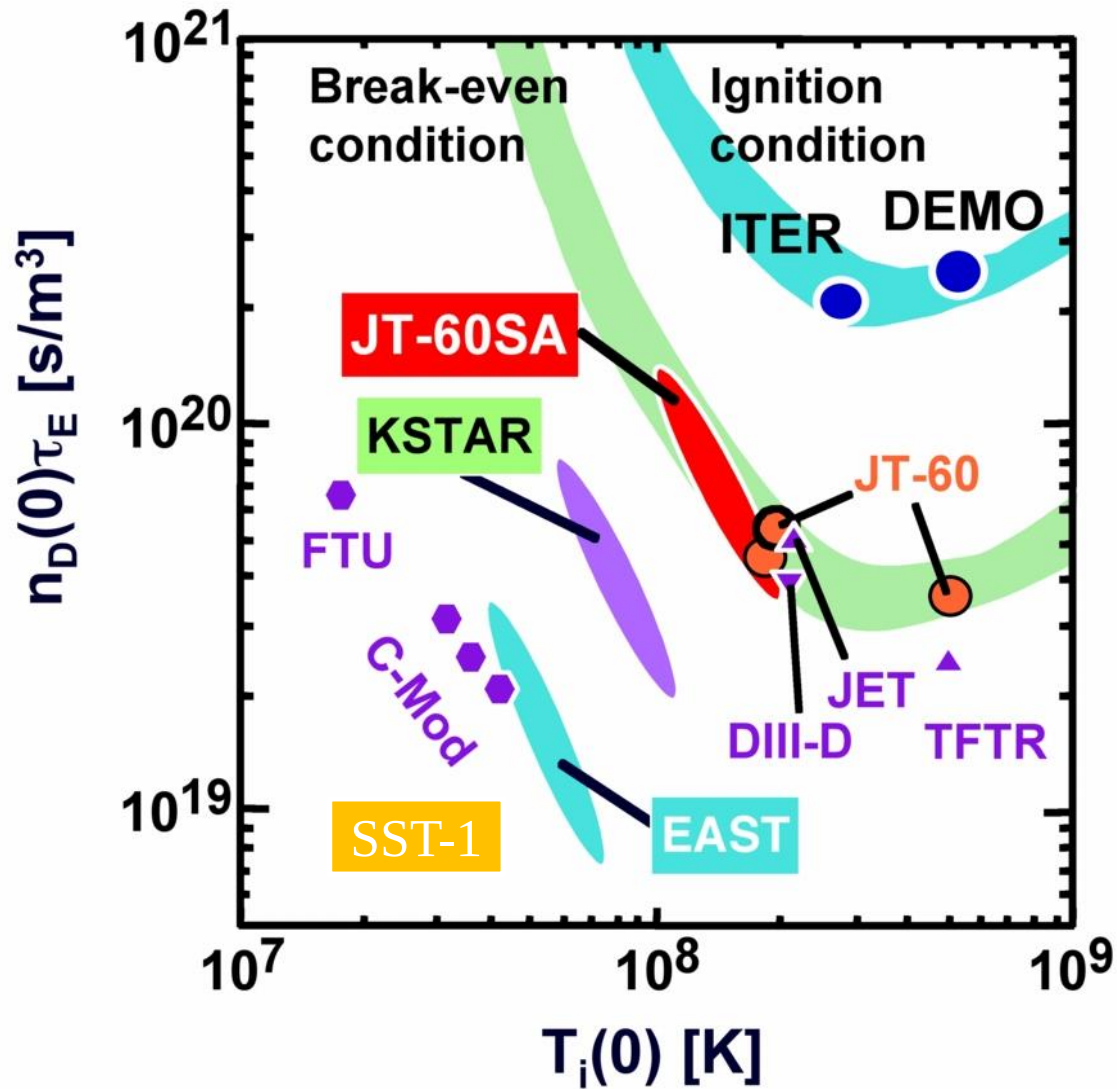
ITER
hasznosításának
támogatása



Távol-keleti supravezető tokamakok

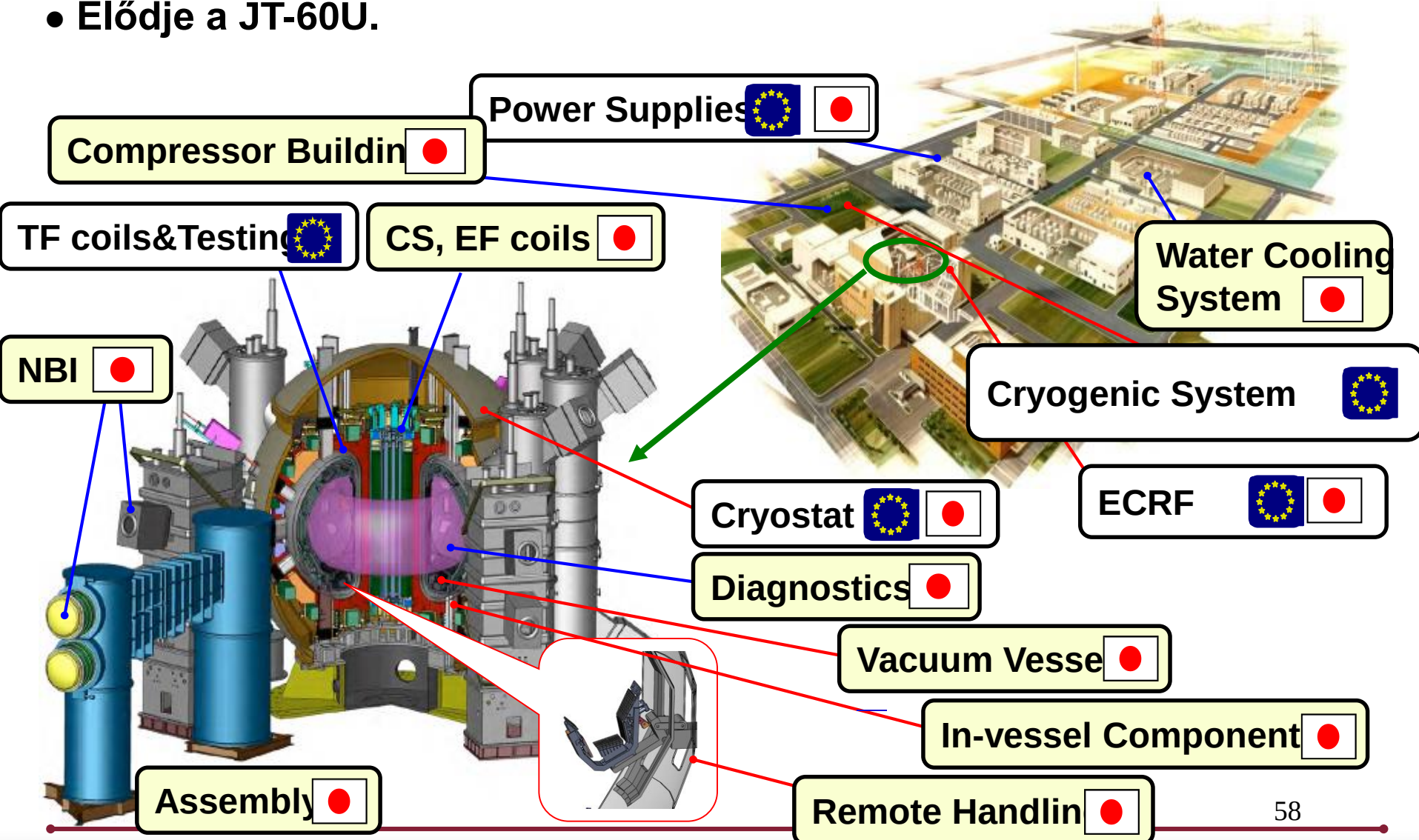


Távol-keleti supravezető tokamakok



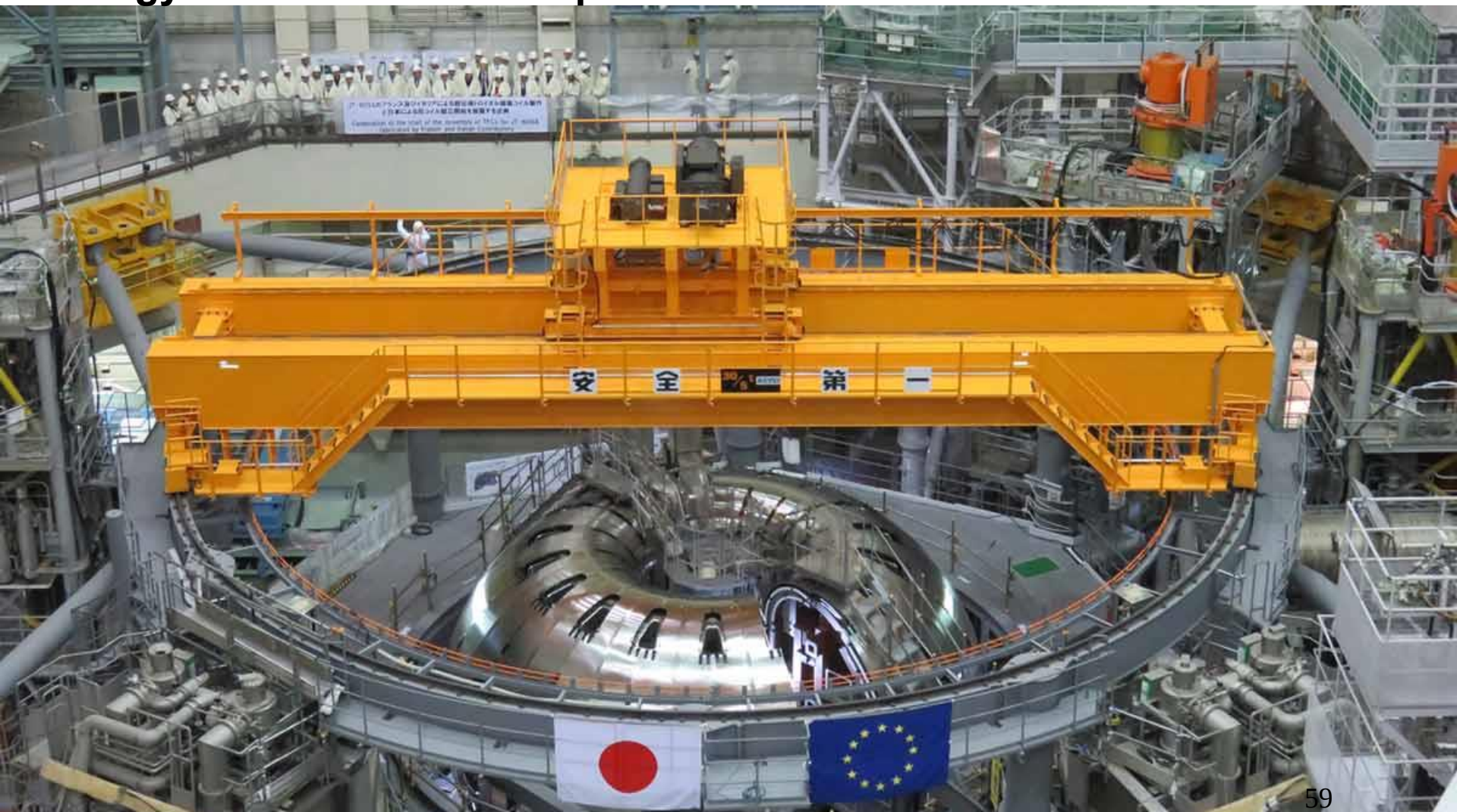
JT60-SA

- Japán - EU együttműködésben épül, 2019-ben első plazma.
- Elődje a JT-60U.

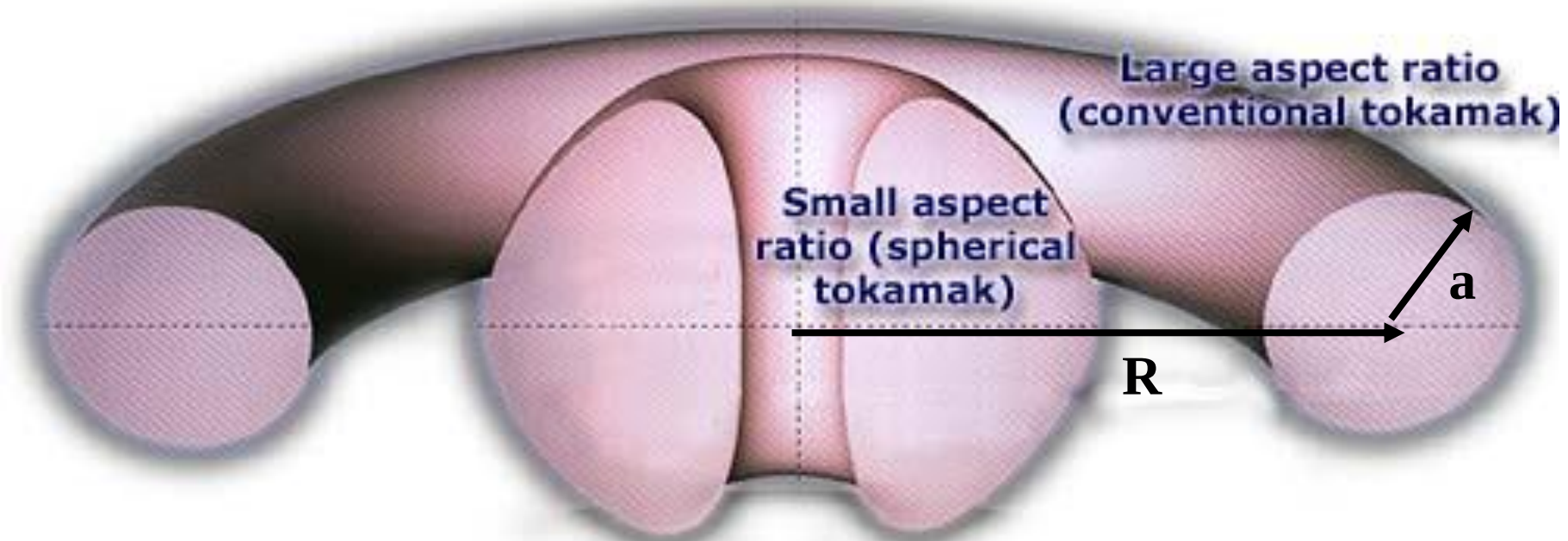


JT60-SA

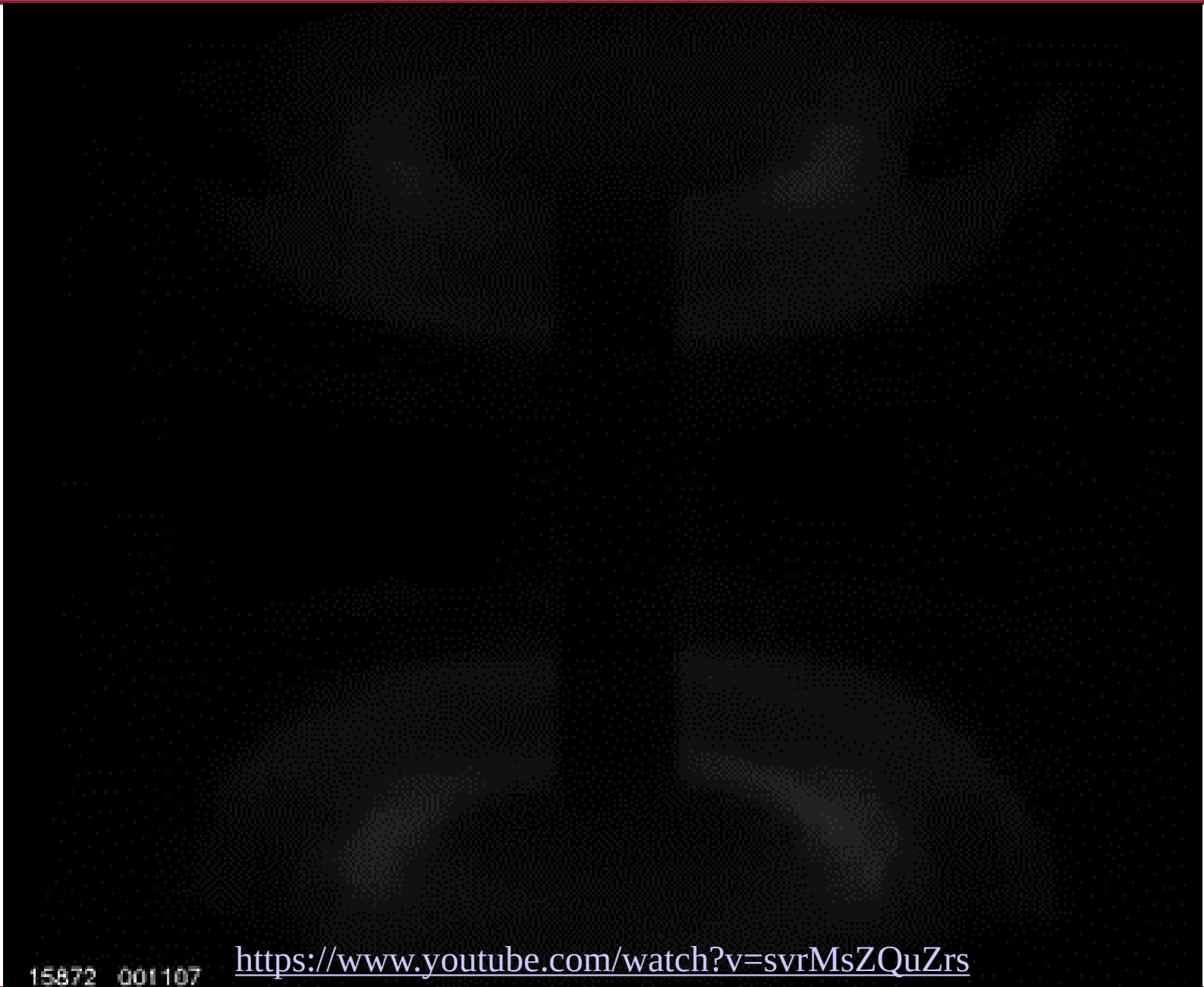
- Gyors ionok által keltett hullámok tanulmányozhatók.
- Magyar kamerarendszer épül rá!



Szférikus tokamakok



- Kis sugárarány: $R/a \sim 1.2-1.4$
- $\beta = p_{\text{kinetikus}}/p_{\text{mágneses}} \sim \text{inverz sugárarány}$
- MAST (EU), NSTX (USA)



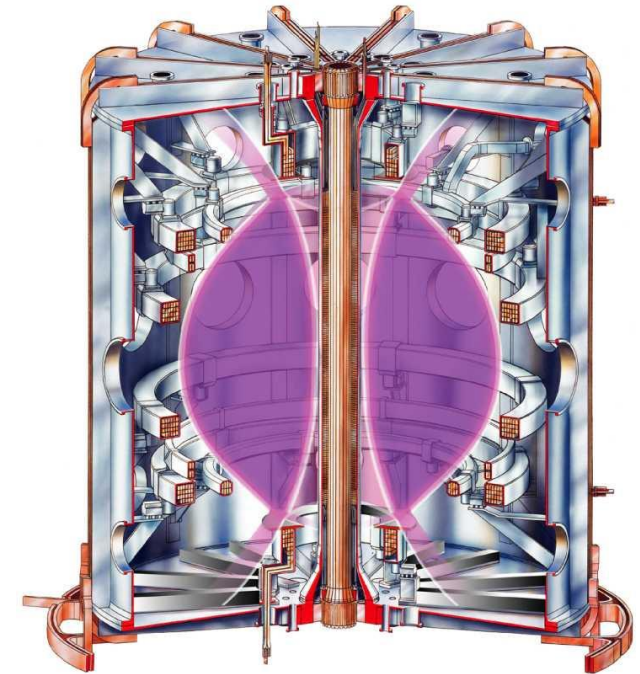
15872 001107

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

MAFIHE 2017 Fúziós Plazmafizika Téli Iskola, 2017. február 11.

MAST (Culham, UK) 1999 -

Major radius	0.85 m
Minor radius	0.65 m
Aspect ratio	1.3
Max. plasma current	1.4 MA
Max. magnetic field	0.52 T



MAST Upgrade

- Start: 2017
- Erősebb mágnesek: 0.84 T for < 2 s.
- Erősebb fűtés: 12.5 MW NBI
- Super-X divertor
- ELM-szabályozás



Kapcsolat

BME NTI: Pokol Gergő, pokol@reak.bme.hu, www.reak.bme.hu/pokol

MTA Wigner FK: Zoletnik Sándor, Dunai Dániel, Veres Gábor..., NÉV [@wigner.mta.hu](mailto:NÉV@wigner.mta.hu)

BME tantárgyak

Ajánlott irodalom

Fusion Roadmap:

<http://www.efda.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>

Magyar EURATOM Fúziós Szövetség honlapja: <http://magfuzio.hu>

ITER: <http://www.iter.org/>

ITER Newslane: <http://www.iter.org/newslane>

F4E: <http://fusionforenergy.europa.eu/>

EFDA: <http://www.efda.org>

Facebook: magfuzio.hu, ITER, EUROfusion, fusenet.eu