

Korszerű nukleáris energiatermelés – Fúzió 3.

Mai berendezések: JET, W7-X, ITER

Pokol Gergő



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BME NTI

Korszerű nukleáris energiatermelés

2019. szeptember 25.

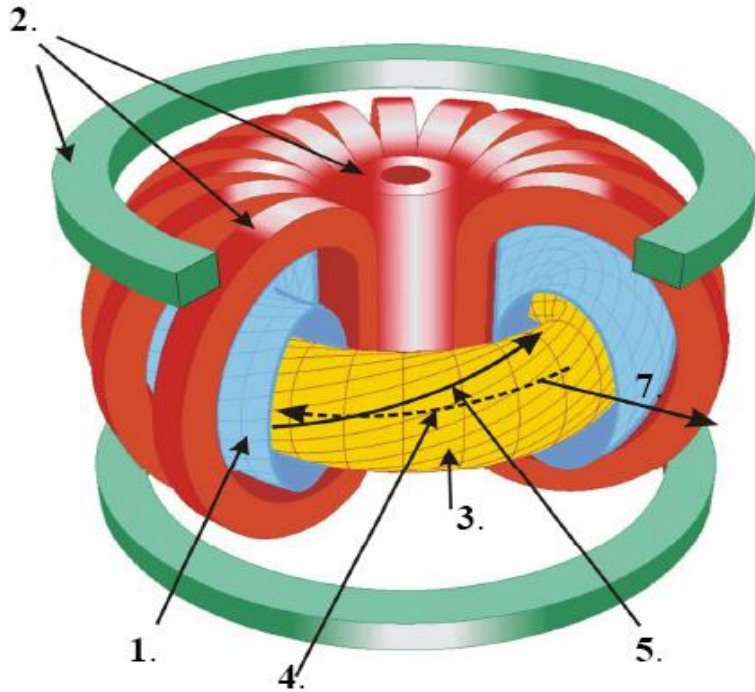
1. Telefon elővesz
2. WiFi jelszó: wigner2008, vagy mobilnet
3. Böngészőbe: Kahoot.it
4. Kód: kivetítőn
5. Név: Neptun kód !!!



6. Értékelés:

- Az összes kérdésre hibátlan megoldás → **+1 pont**
- Többiek között az elért ponttal arányos eséllyel **2 x +1 pont sorsolás**

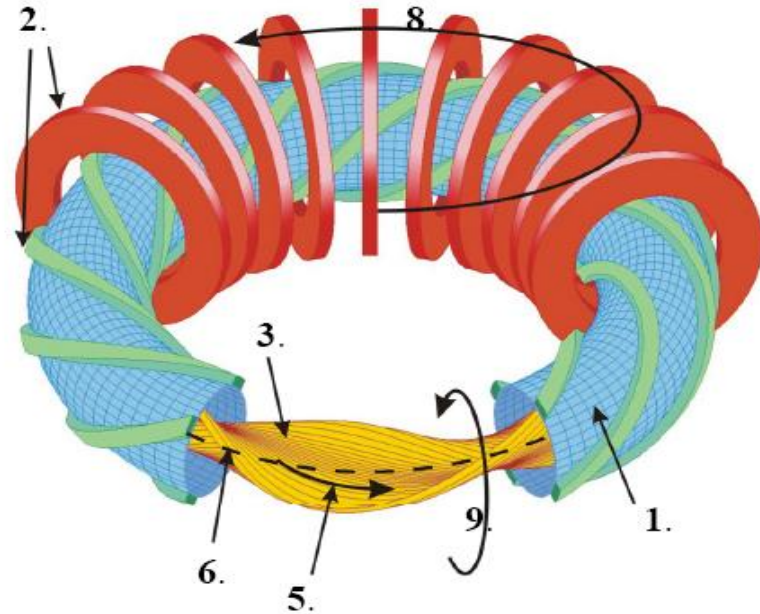
Tokamak



Toroidális plazmaáram

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

Sztellarátor

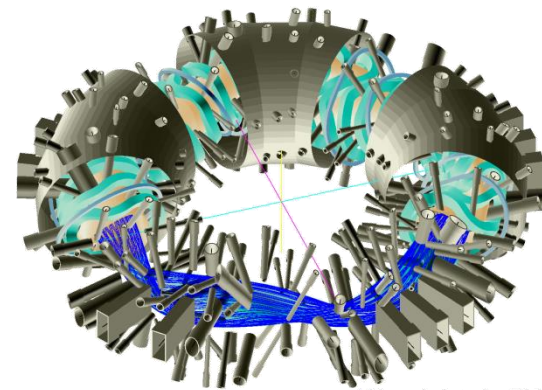
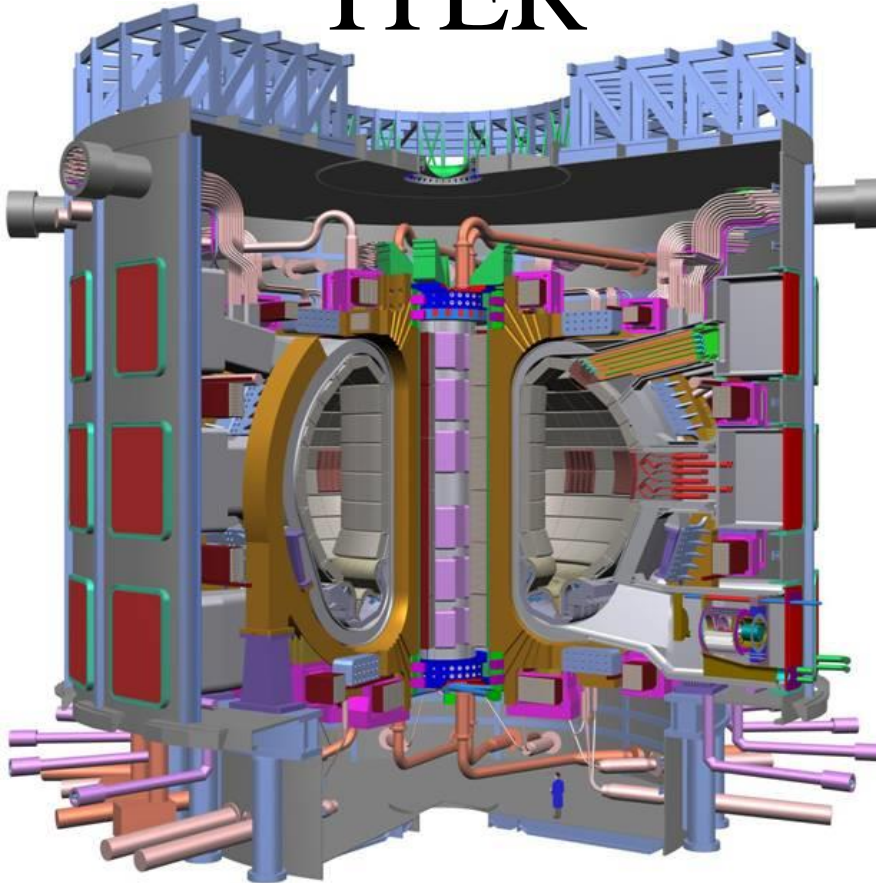


Helikális tekercek

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

ITER

Wendelstein 7-X



Wendelstein 7X

A jelenleg épülő legnagyobb tokamak (Cadarache) és sztellarátor (Greifswald).

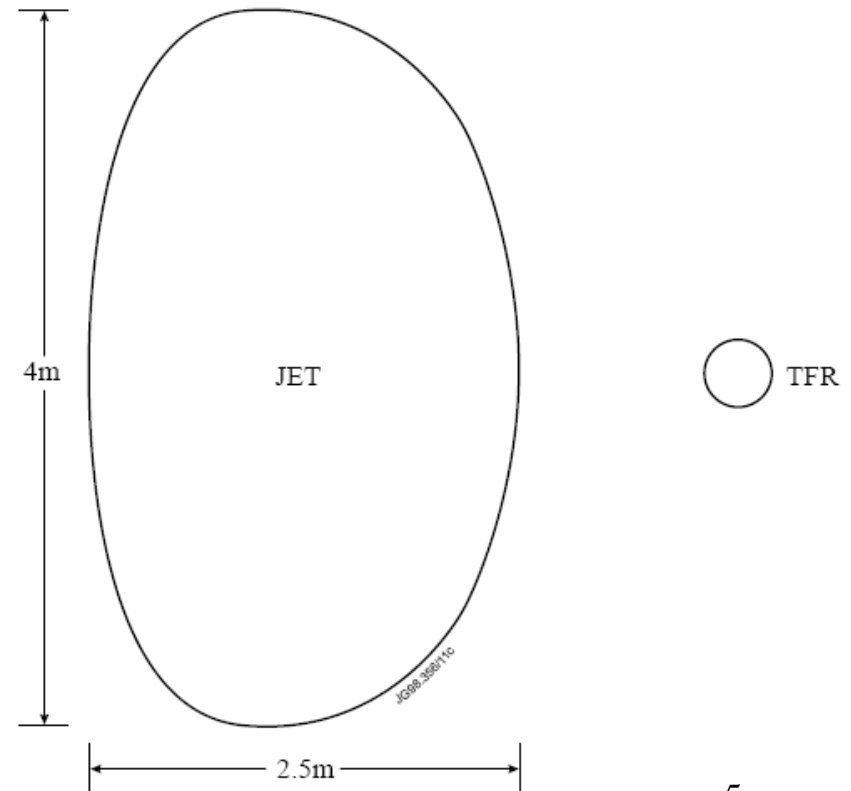
Egy nagy lépés: Joint European Torus

- 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:

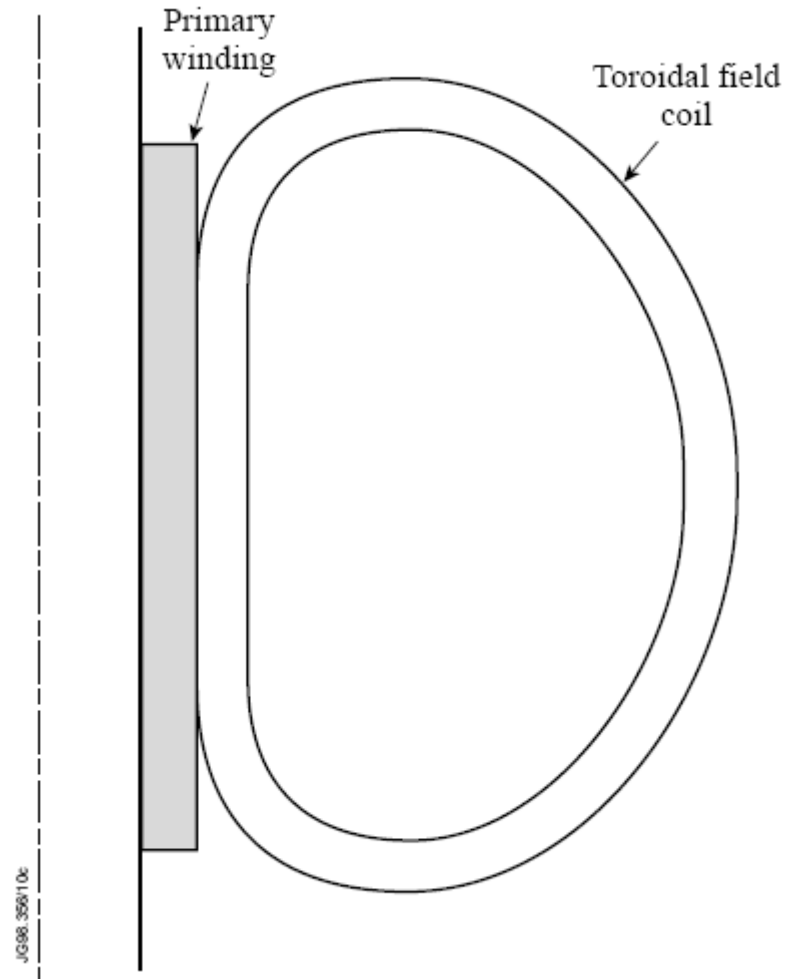
1. Anomális transzport
2. Beta-limit
3. diszrupciók

...



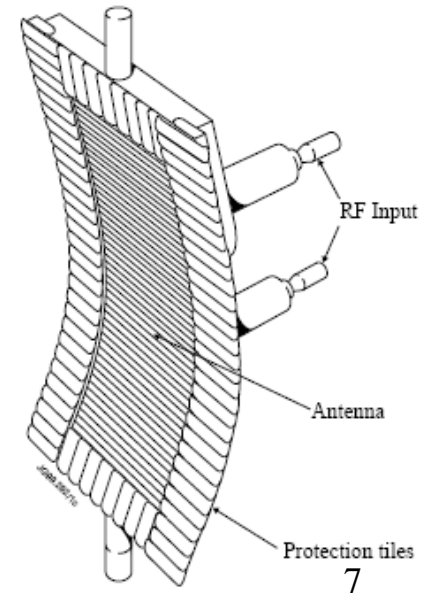
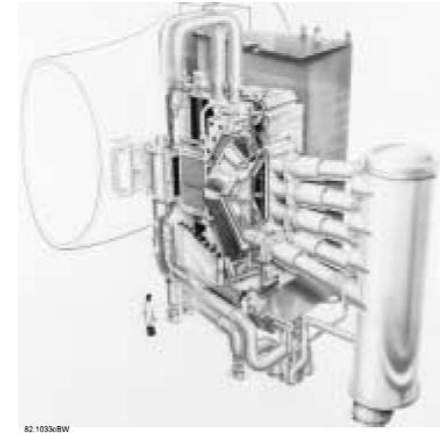
Tervezési szempontok

- Plazmaáram: 3.8 MA
 - α -részecskék összetartása
- Toroidális mágneses tér: 2,8 T
 - mechanikai stabilitás
- Sugárarány: 2,4
 - költségek minimalizálása
- 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

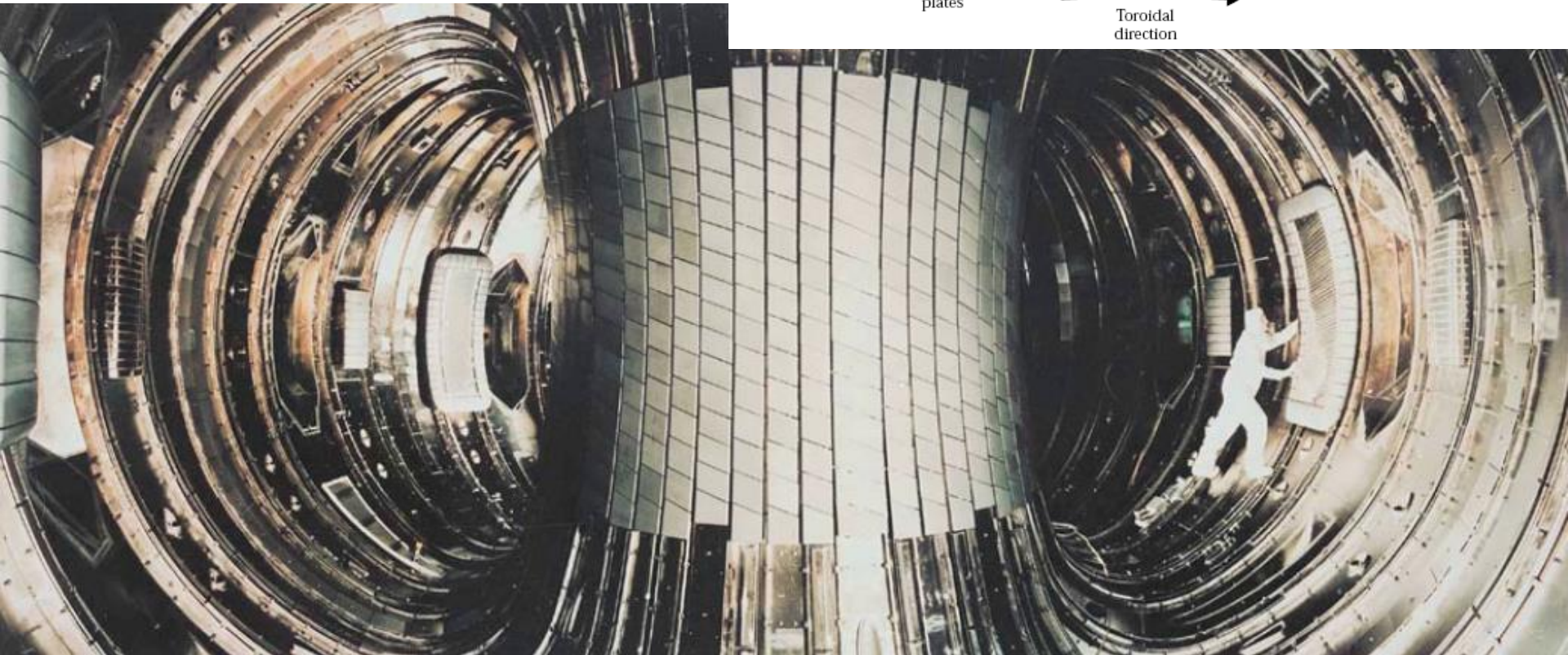
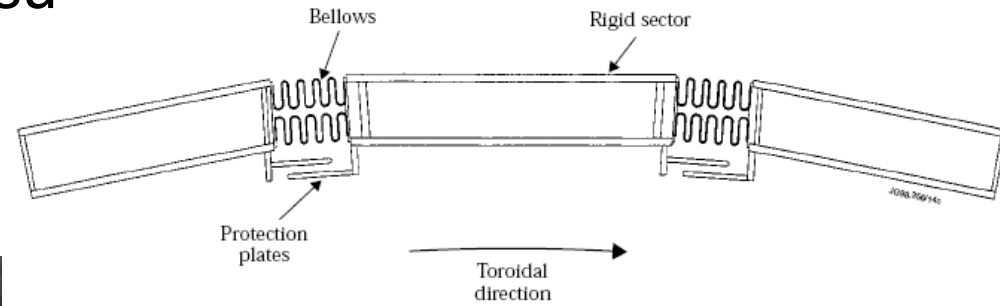
- A plazma viselkedésének skálázása, ahogy a paraméterek a reaktor-releváns tartományt közelítik.
- A JET belső fal ezen feltételek között.
- A plazma fűtésének tanulmányozása.
- Az α -részecskék keletkezésének, összetartásának és plazmafűtésének tanulmányozása.

A JET felépítése – Vákuumkamra

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

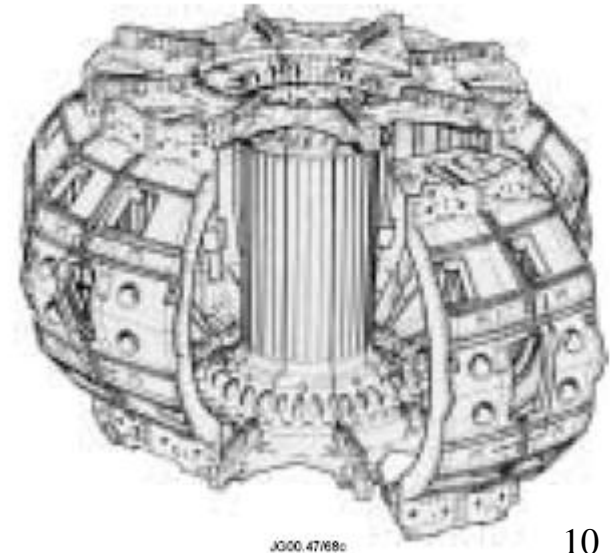
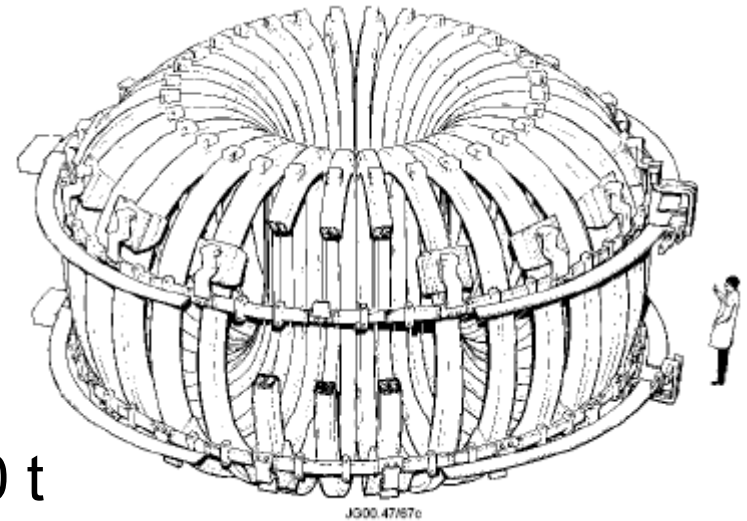
→ összetett szerkezet

→ Nikkel ötvözet



A JET felépítése – Toroidális tér tekercsek

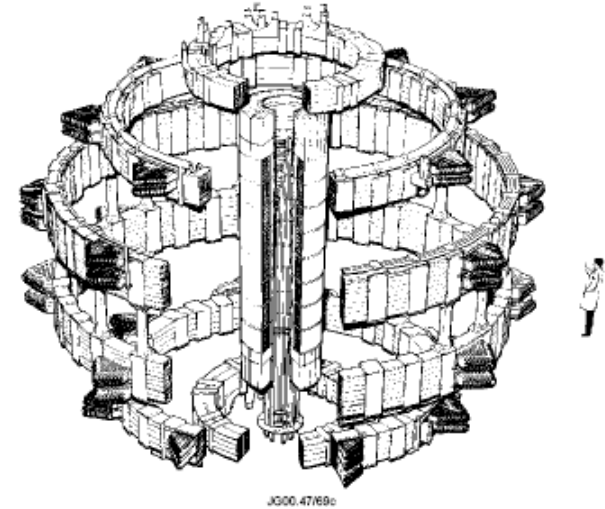
- 32 db D-alakú **résztekercs**
 - menetszám: 24
 - tömeg: 12 t
 - áram összesen: 51 MA
 - erő a kis sugár irányában: 600 t
 - erő a nagy sugár irányában: 2000 t
- külső mechanikai merevítés



A JET felépítése – Poloidális tér tekercsek

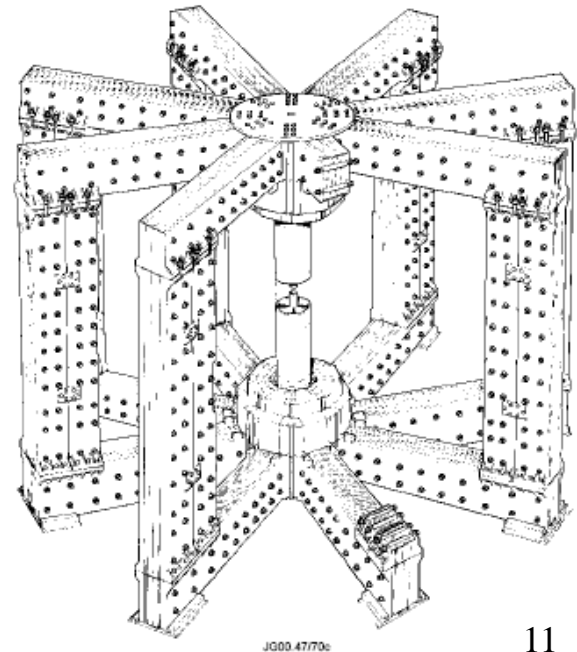
Poloidális tér tekercsek a plazma alakjának szabályozására

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

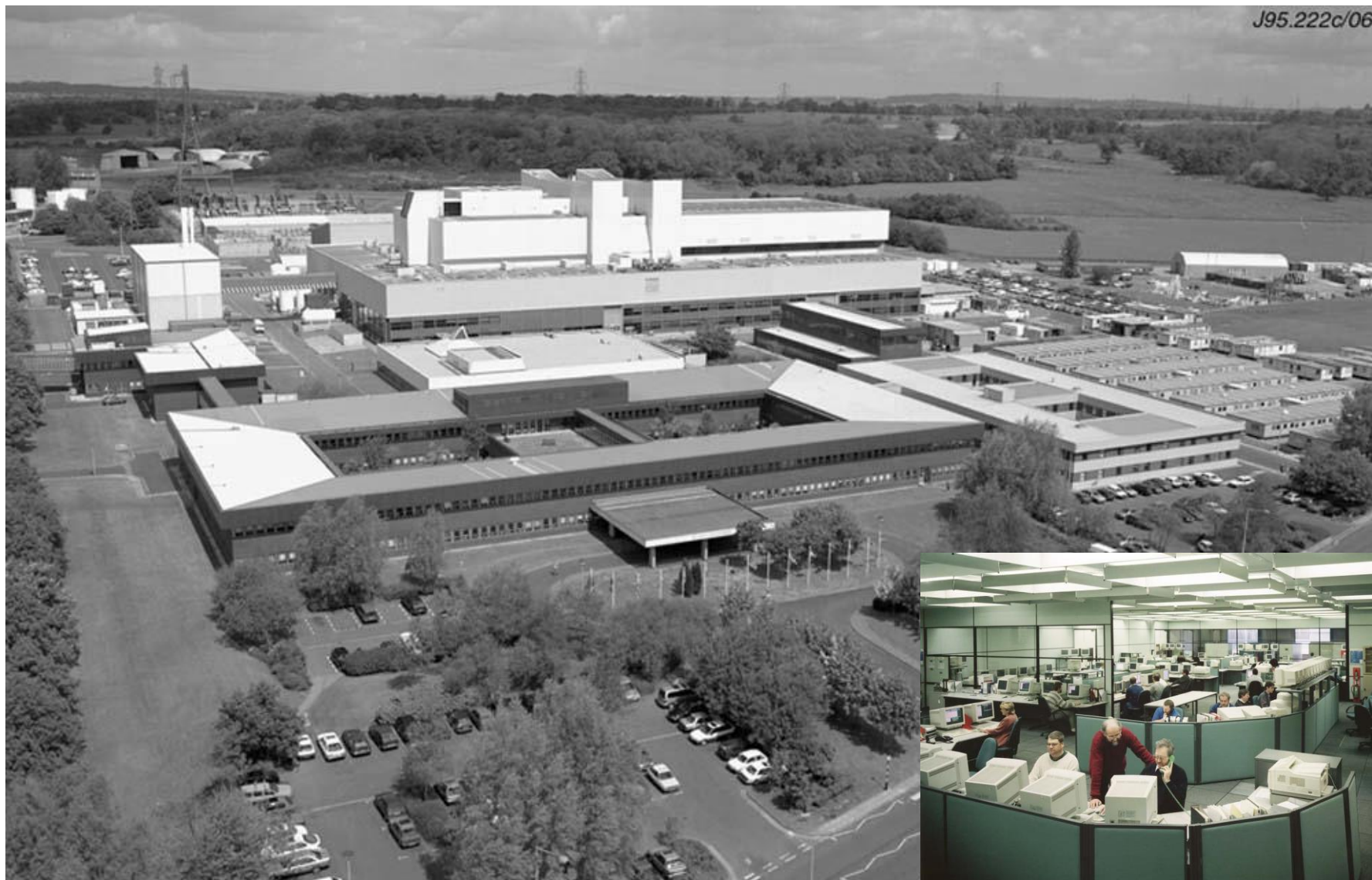


Belső tekercs a transzformátor középső vasmagja körül

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

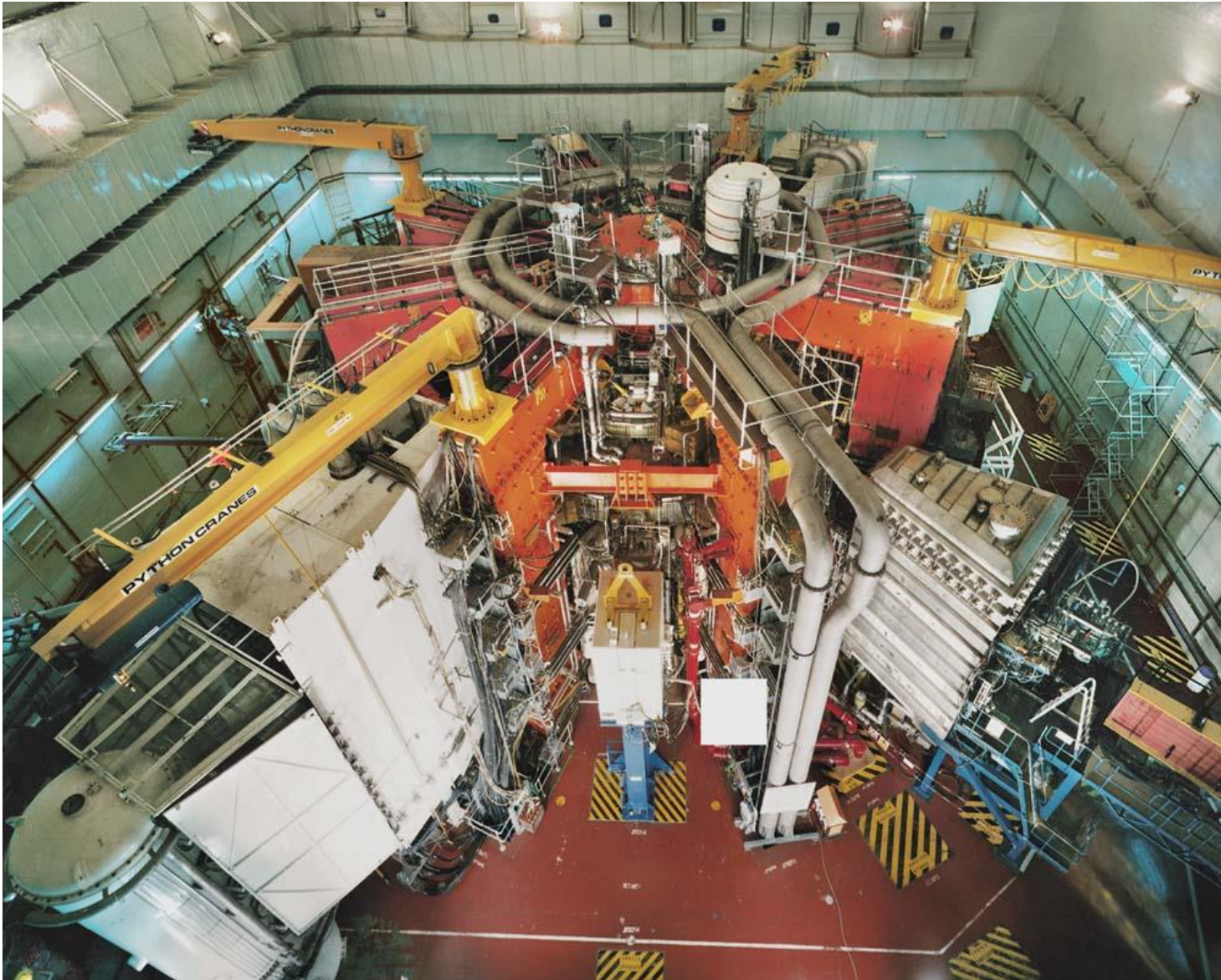


Időre elkészült!

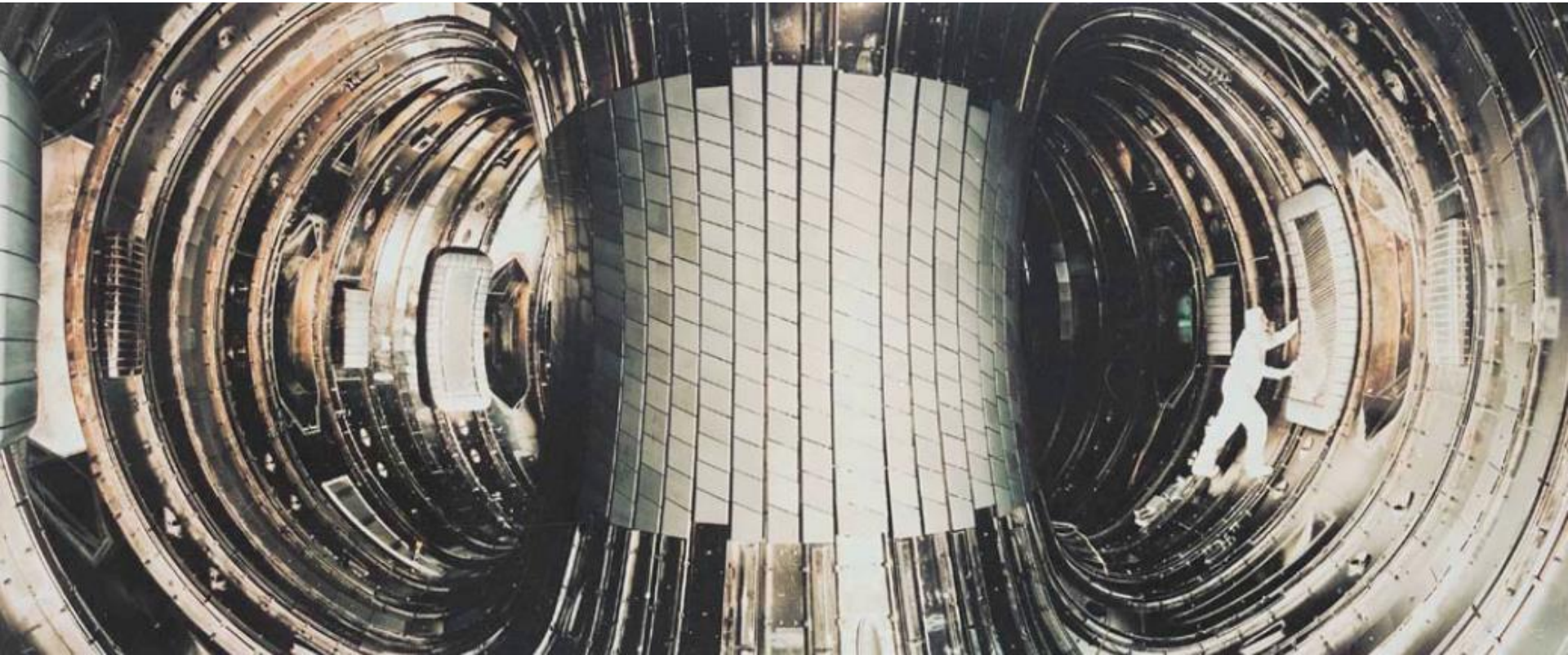


Korszerű nukleáris energiatermelés, 2019. szeptember 25.

Időre elkészült!



JET belső fal – 1985

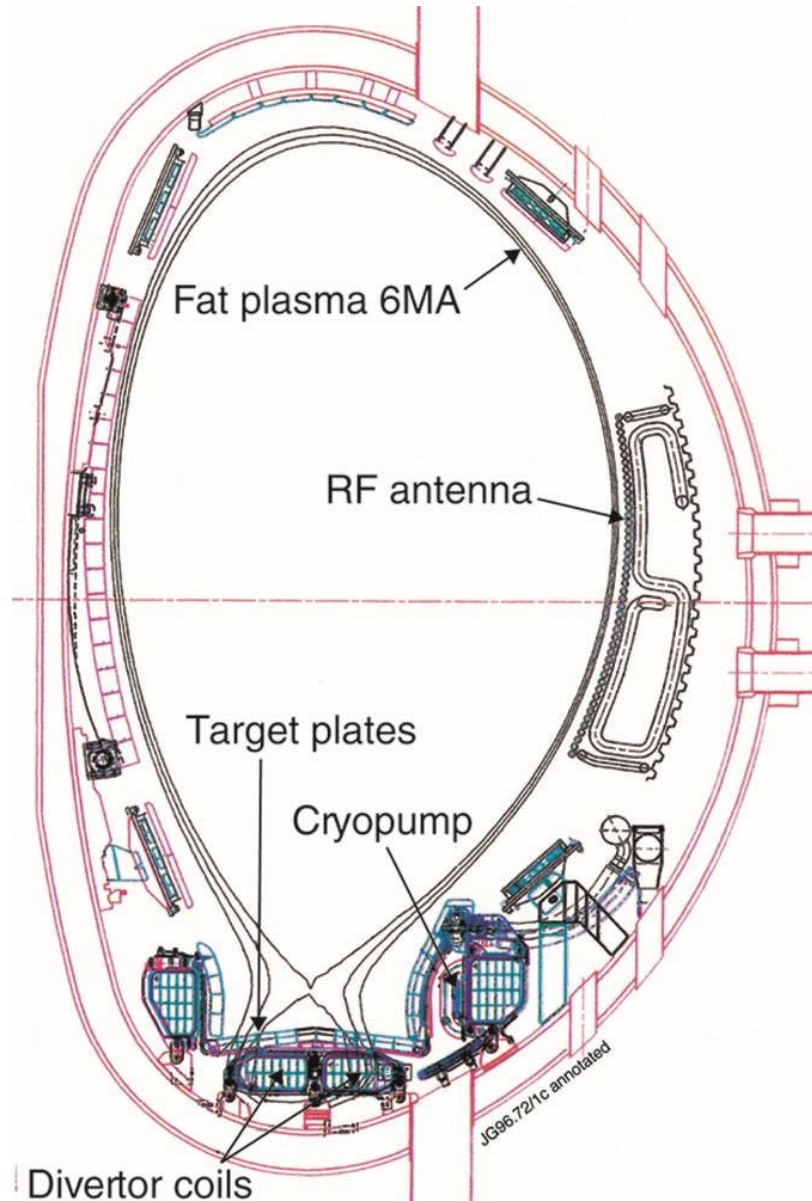


JET belső fal – 1987

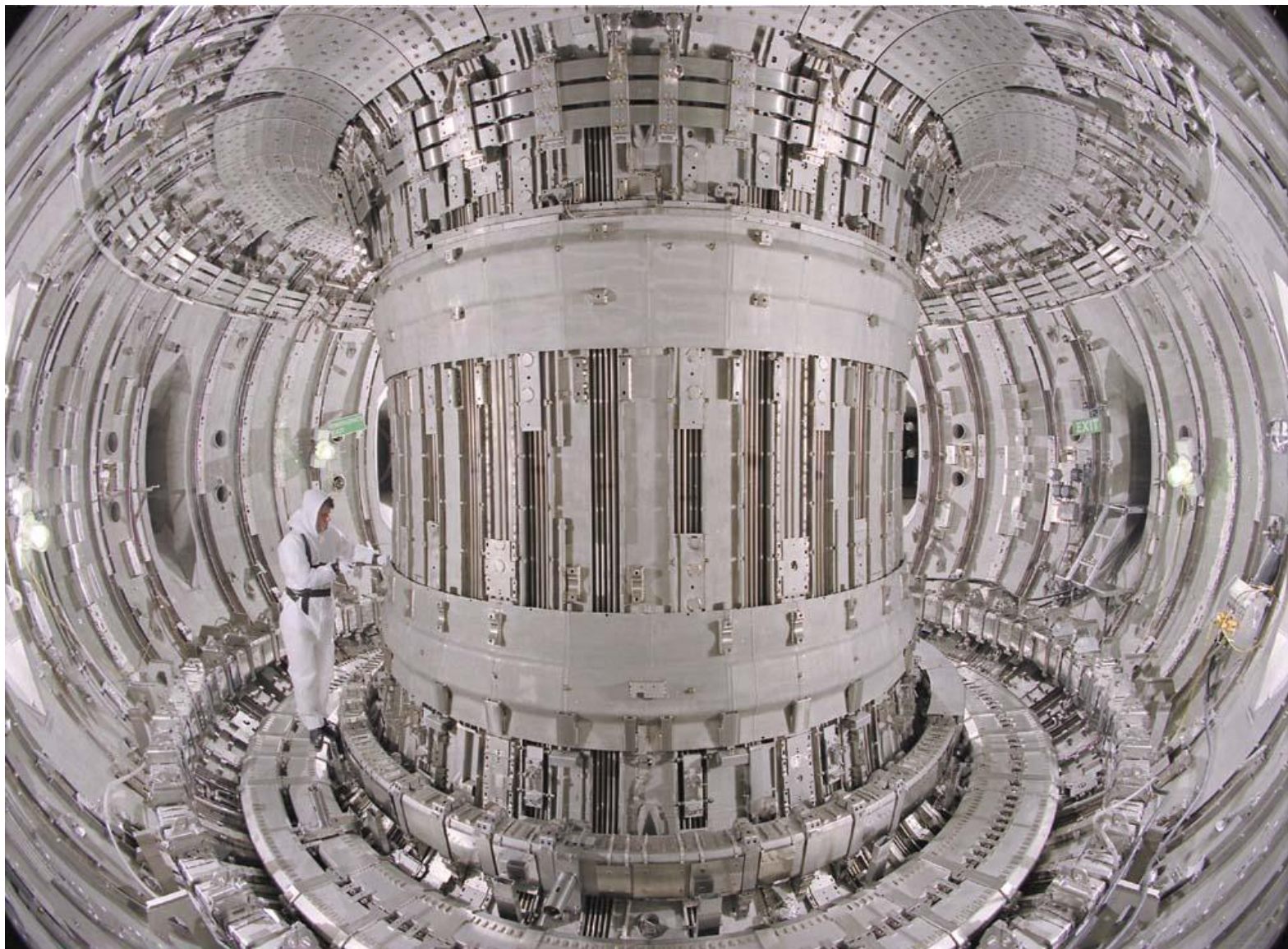


Korszerű nukleáris energiatermelés, 2019. szeptember 25.

JET belső fal – 1991 divertor



JET belső fal – 1991 divertor

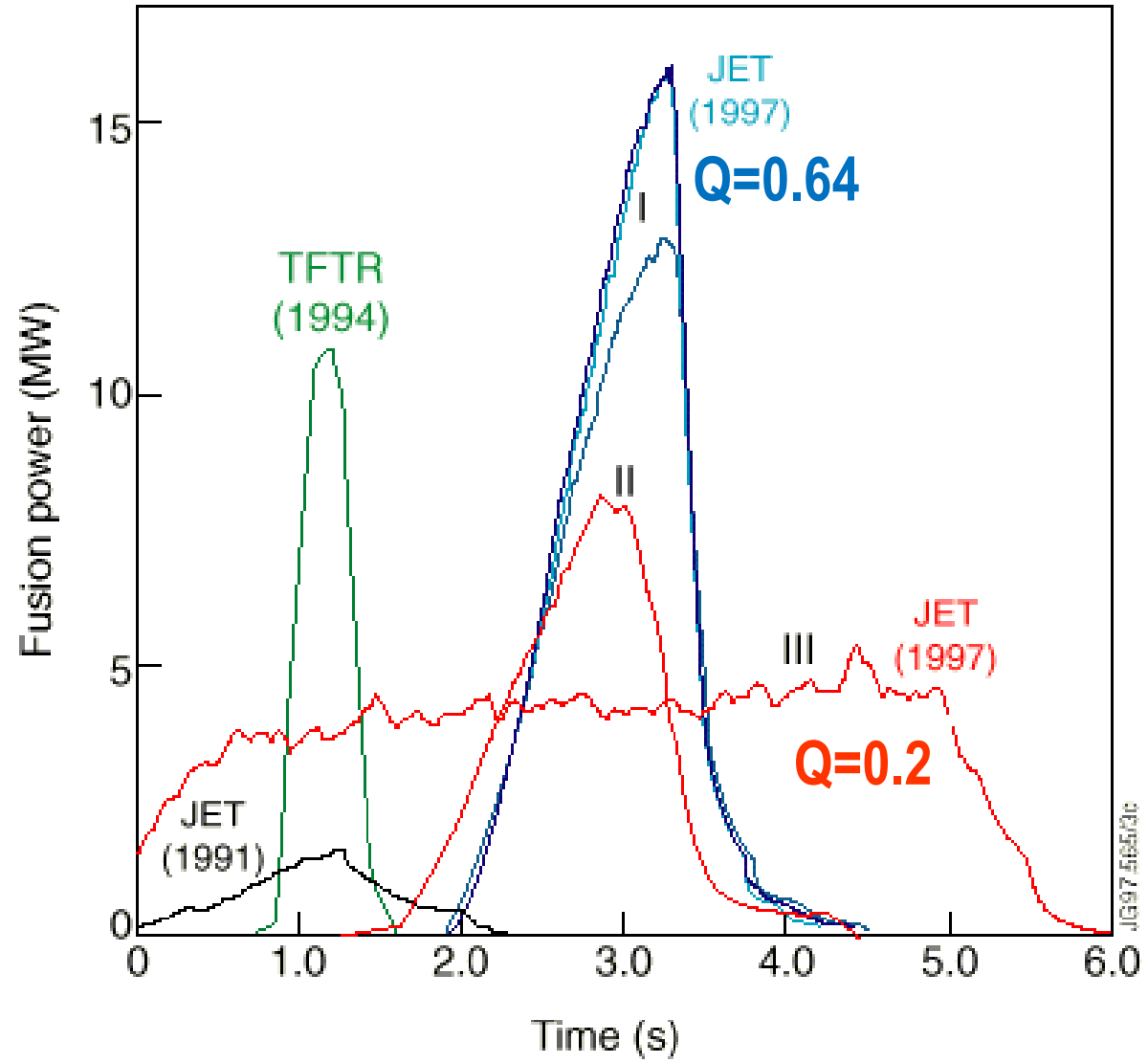


JET belső fal – 1991

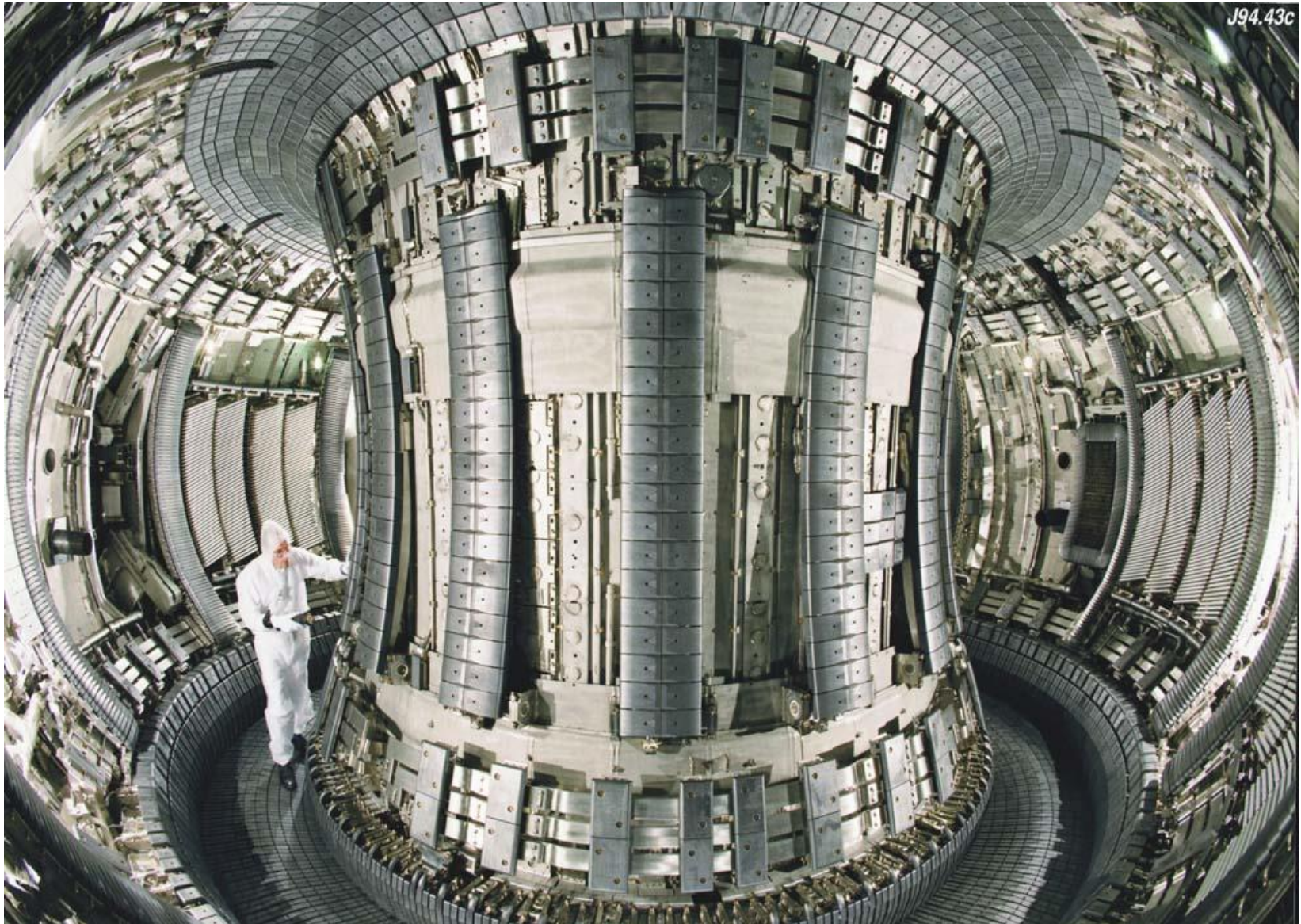


JET D-T kisülések

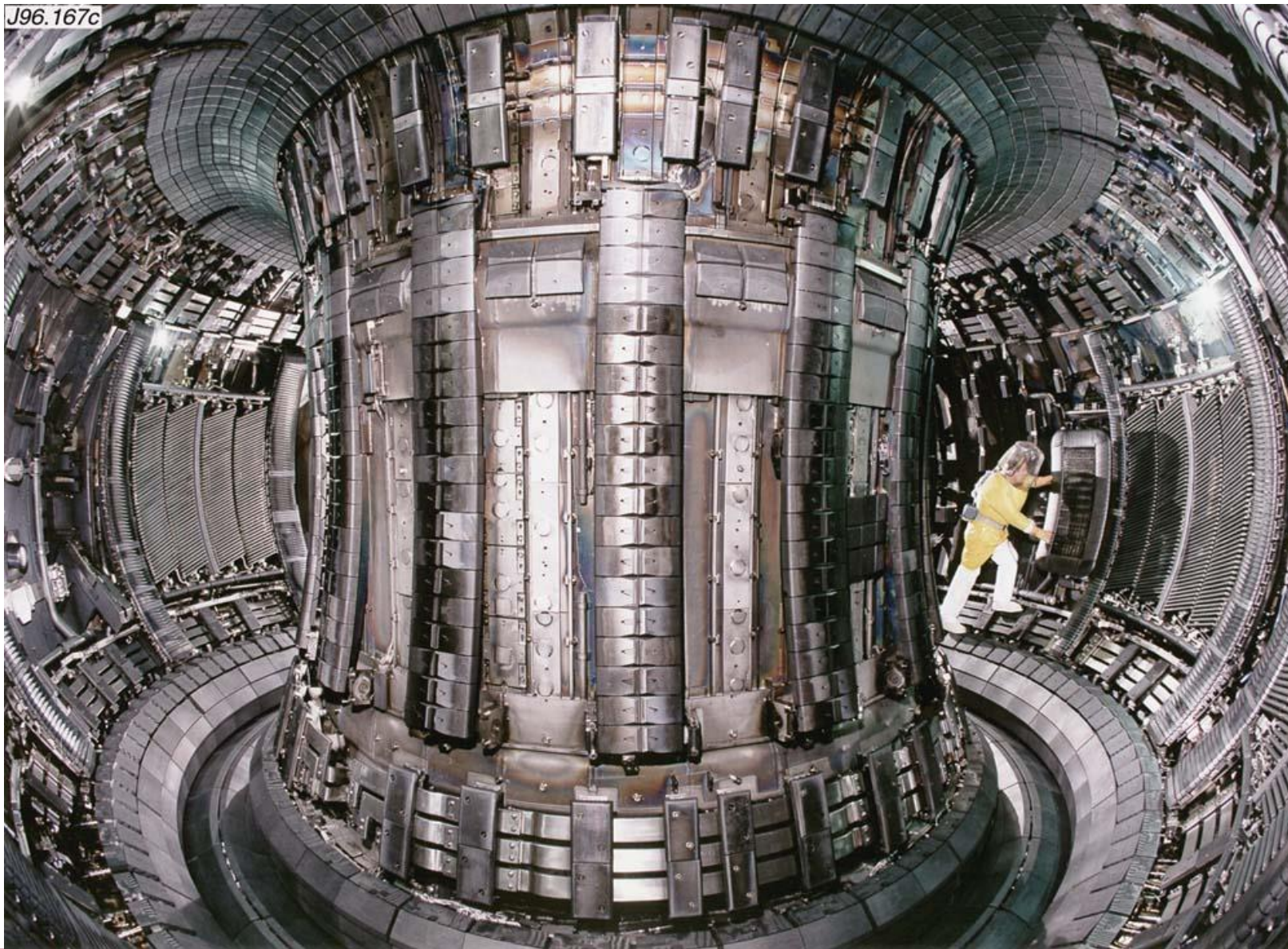
$$Q = \frac{P_f}{P_h}$$



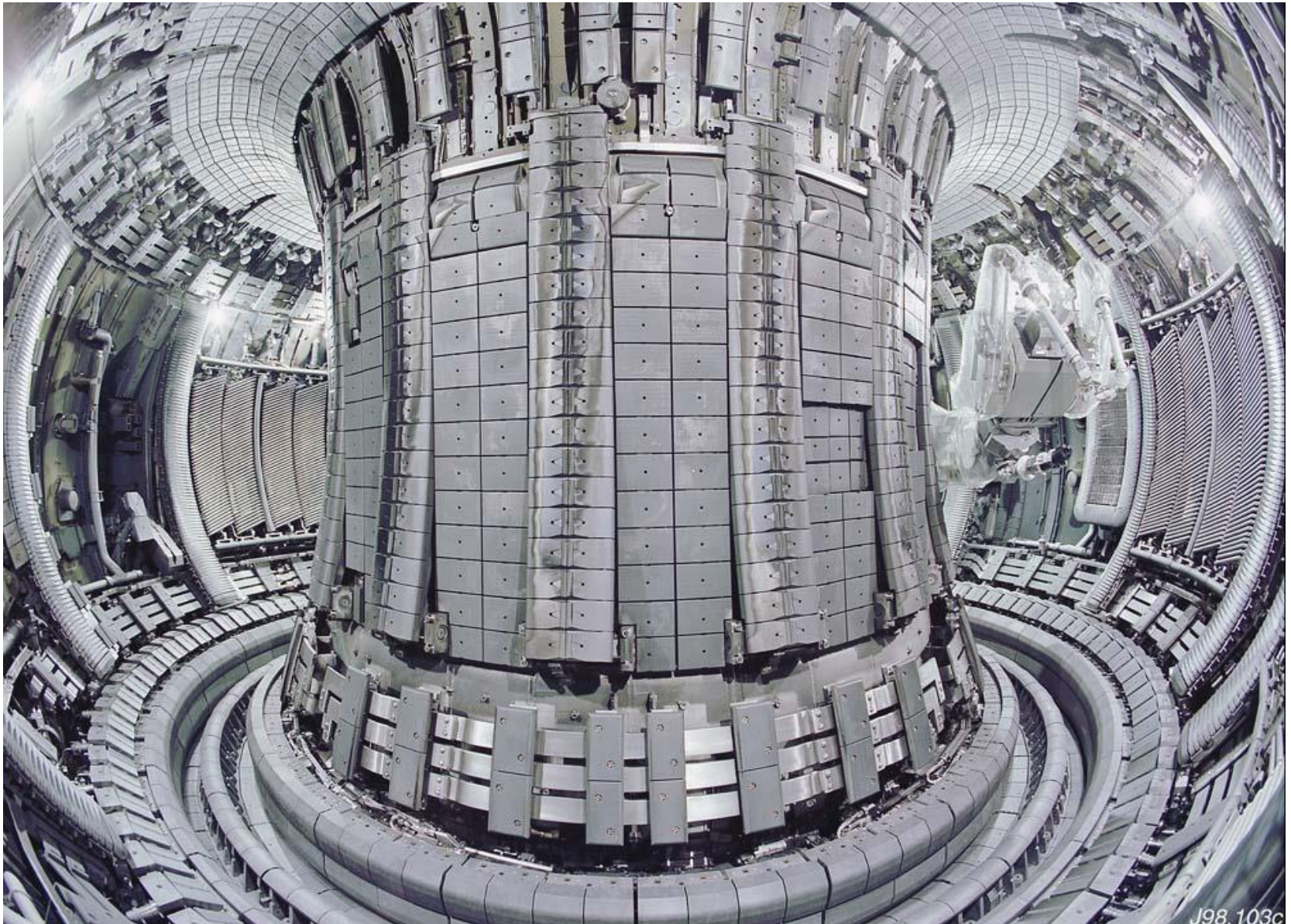
JET belső fal – 1994



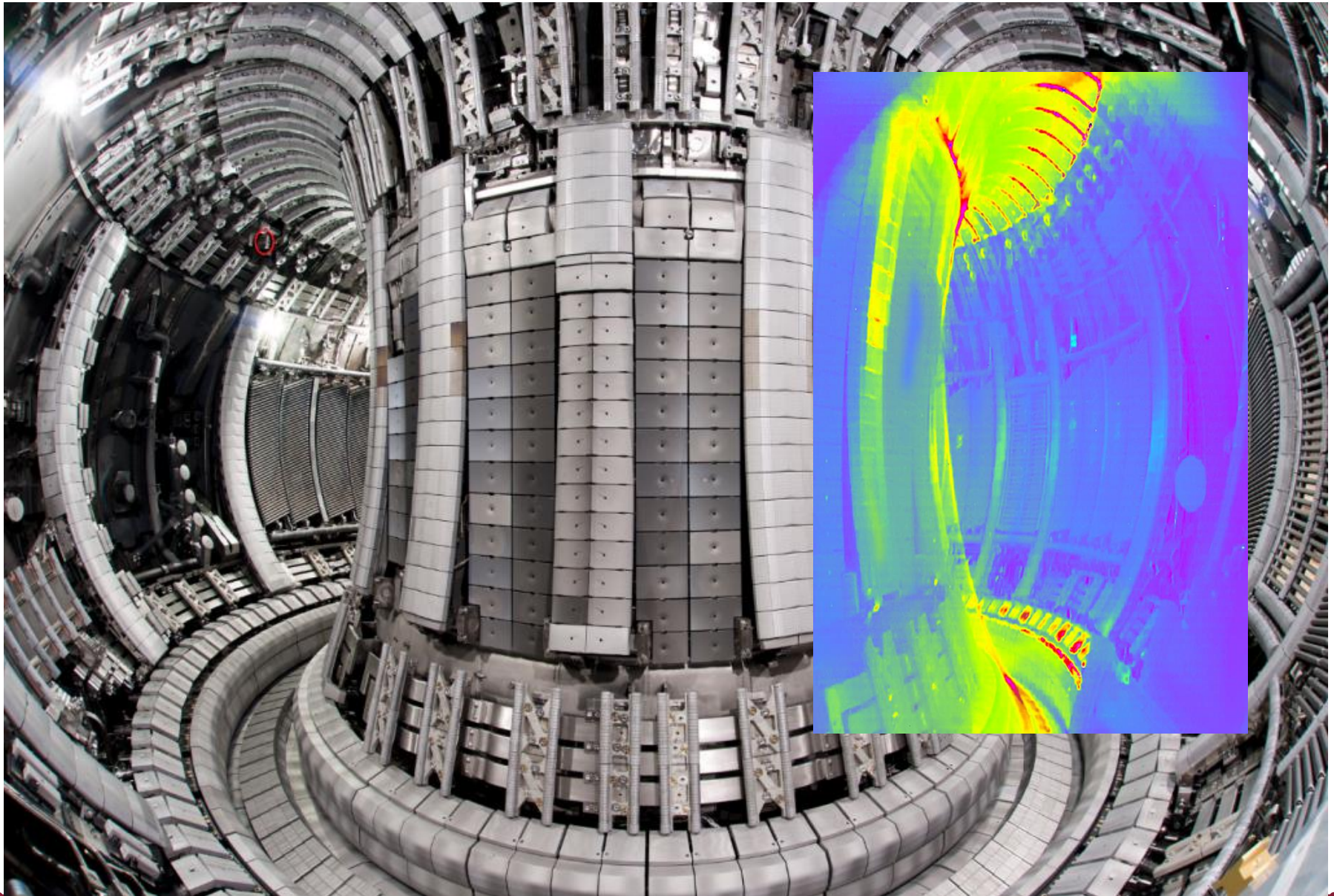
JET belső fal – 1996



JET belső fal – 1998

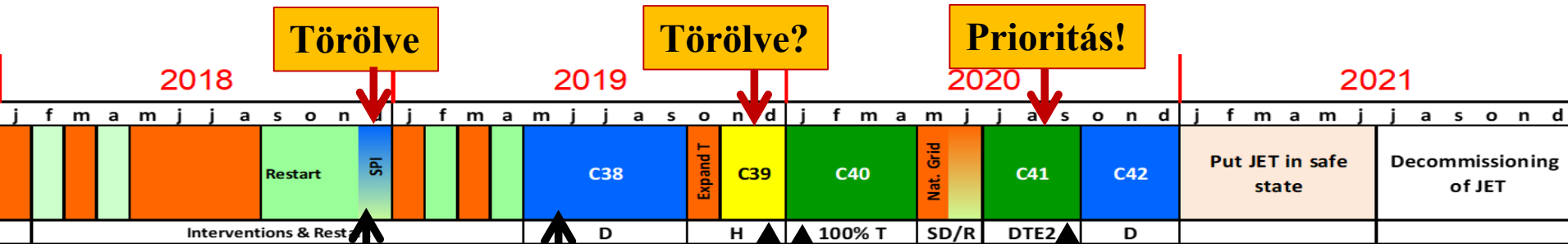


ITER-szerű fal – 2011



Korszerű nukleáris energiatermelés, 2019. szeptember 25.

JET menetrend



D kampány

- Diszrupciók
- D-T scenáriófejlesztés

Törött pellet belövő



H & T

- Izotóp effektus kampány

D-T kampány

- 15 MW fúziós teljesítmény 5s stacioner módban
- Alfa-részecske fizika

Source: E. Joffrin: 27th IAEA Fusion Energy Conference 22–27 October 2018
Ahmedabad, India

JET – world's largest tokamak

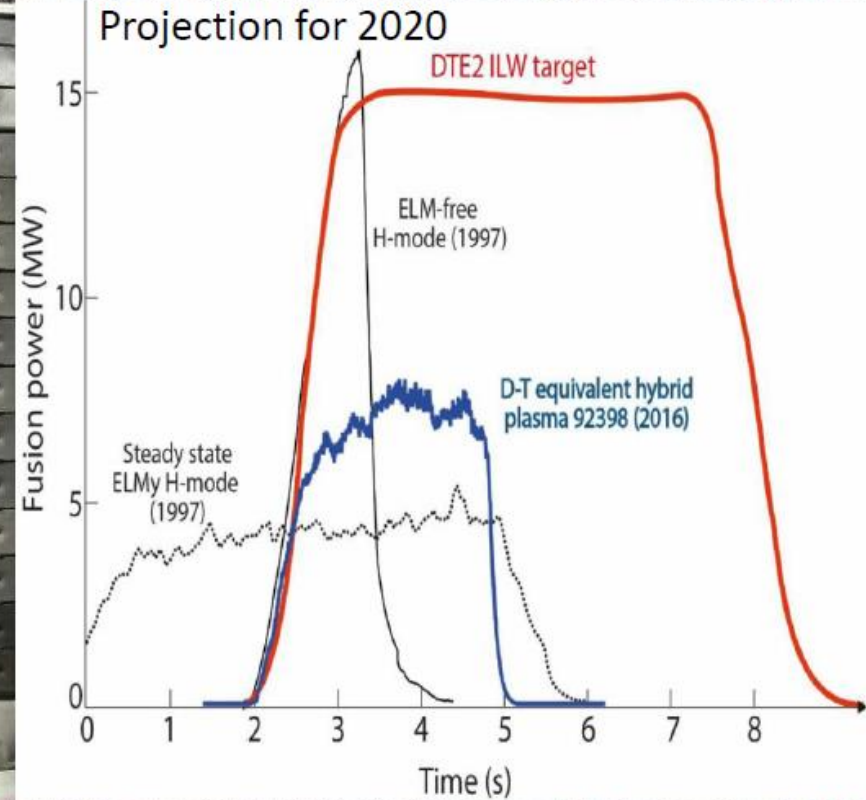
Unique ITER-Relevance:

- Be-wall, W-divertor
- Only device currently able to use tritium

- Remote Handling
- Closest in performance

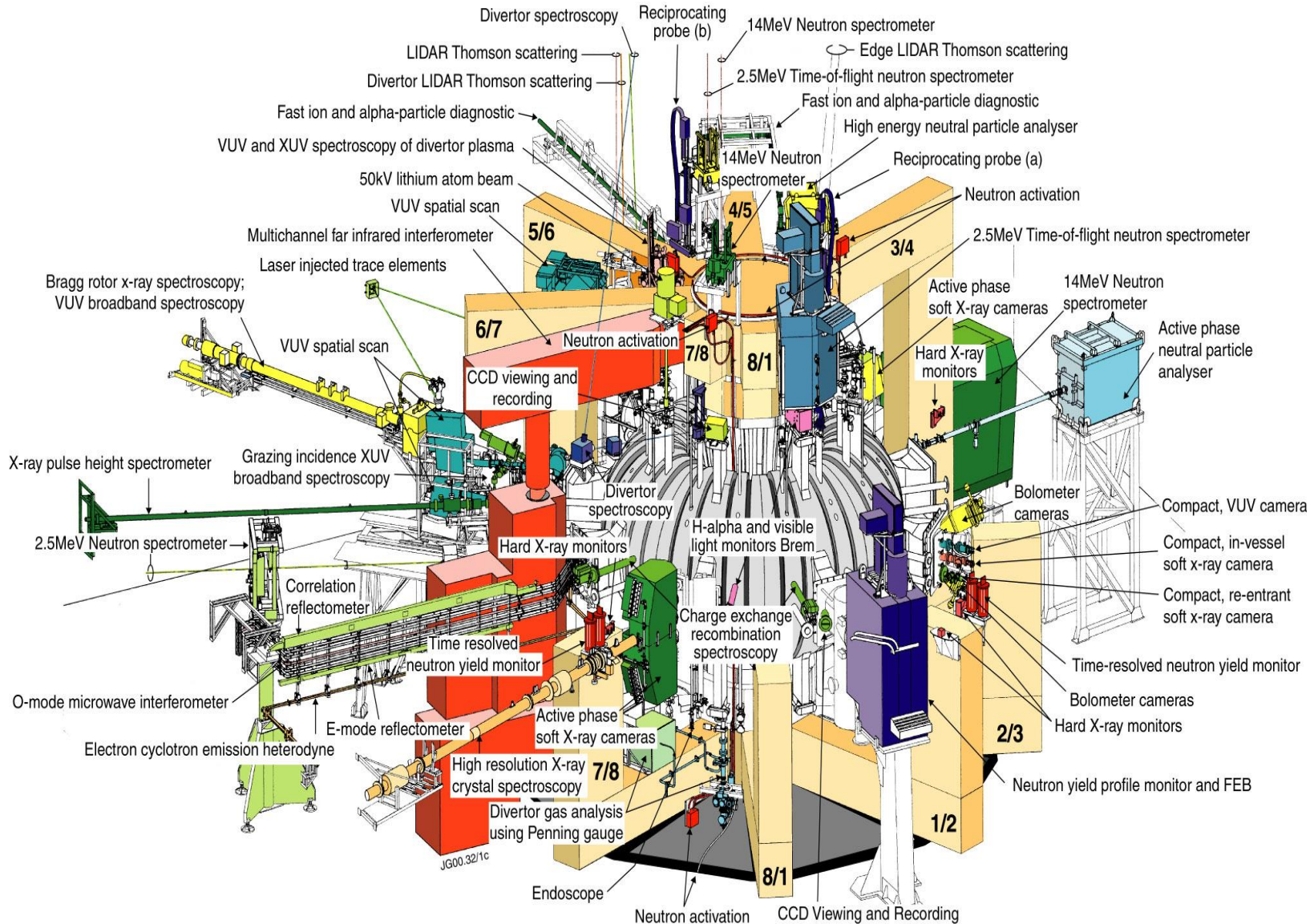
Programme

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



A. Donne, ISFNT-14 (2019)

JET diagnosztikák



Mit akarunk mérni?

- A plazma minden egyes pontján, a kisülés minden egyes időpontjában **lokális paraméterek**:
 - Hőmérsékletek,
 - Sűrűségek,
 - Reakciósűrűségek,
 - Nyomások,
 - Áramsűrűség,
 - Elektromos és mágneses tér,
 - Forgás és egyéb makroszkopikus áramlások,
- Minden időpontban **globális paraméterek**:
 - Összetartási idők,
 - Anyagmérleg,
 - Energiamérleg.
- **Technológia állapota.**

Miért akarjuk mérni?

1a: Szabályozás és védelem:

- plazma pozíció
- hőterhelés a plazmára néző elemeken
- B_t , I_p , n_e , teljes nyomás (stabilitási határok)
- ...

1b: Finom szabályozás:

- hőmérséklet profilok
- He sűrűség
- ...

2. Teljesítmény értékelése, fizikai megértés:

- T_e , n_e fluktuációk
- radiális elektromos tér
- ...

Hogyan tudjuk mérni?

Passzív diagnosztikák

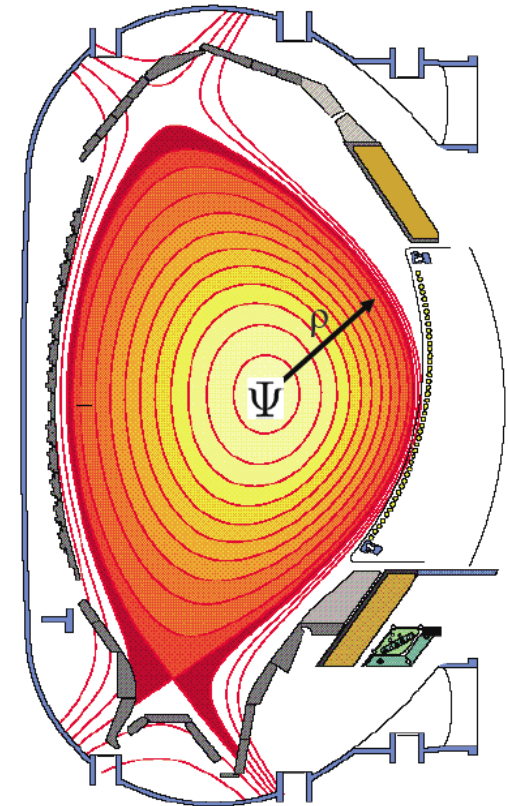
- Mágneses tekercsek (integrális mérés)
- Passzív spektroszkópia (vonalintegrált mérés)
- Semleges részecske analizátor (integrális mérés)
- Termográfia (lokális mérés)
- Langmuir-szonda (lokális mérés)

Aktív diagnosztikák

- Interferometria (vonalintegrált mérés)
- Reflektometria (lokális mérés)
- Thomson szórás (lokális mérés)
- Atomnyaláb diagnosztikák (lokális mérés)
- Nehézion nyaláb szonda (lokális mérés)

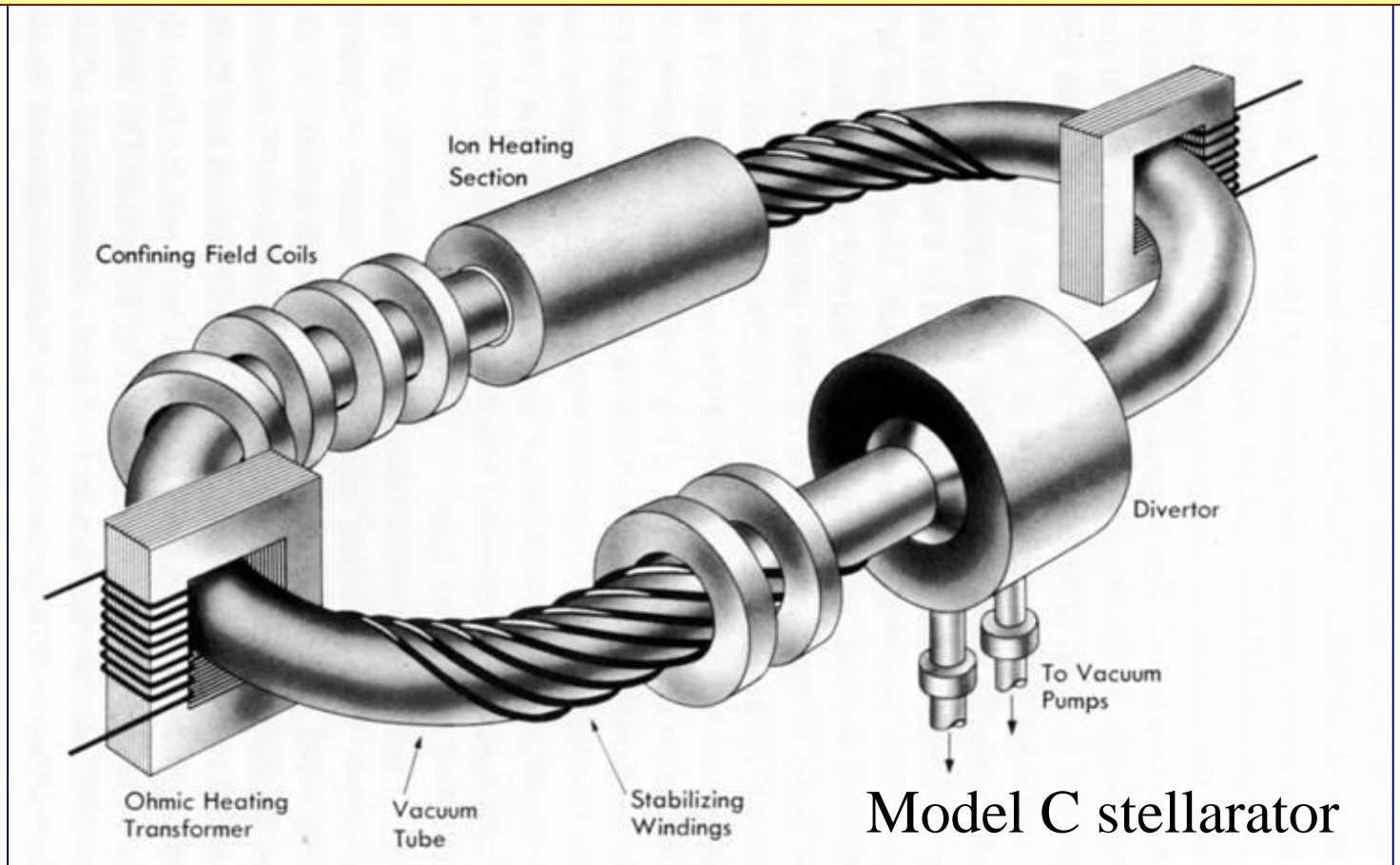
...

Hosszabb időskálákon a mért paraméterek kiterjeszthetők a mágneses felületek mentén!

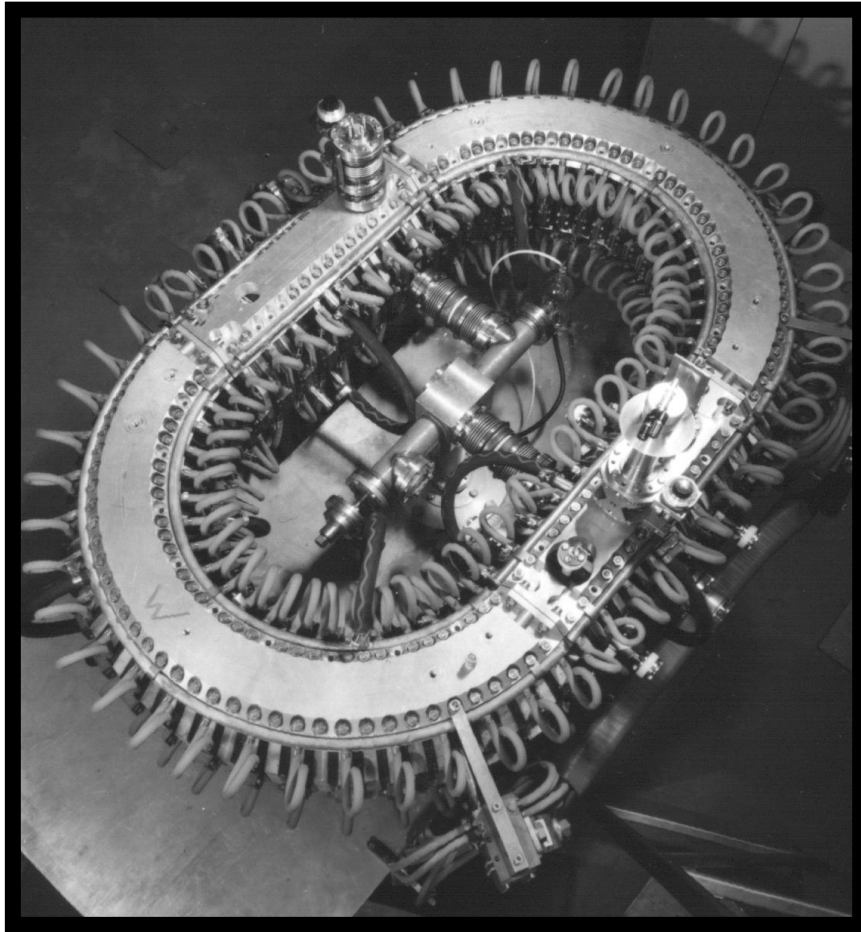


Sztellarátor

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



Wendelstein sztellarátorok



Wendelstein I-A (1961):

„Versenypálya” geometria

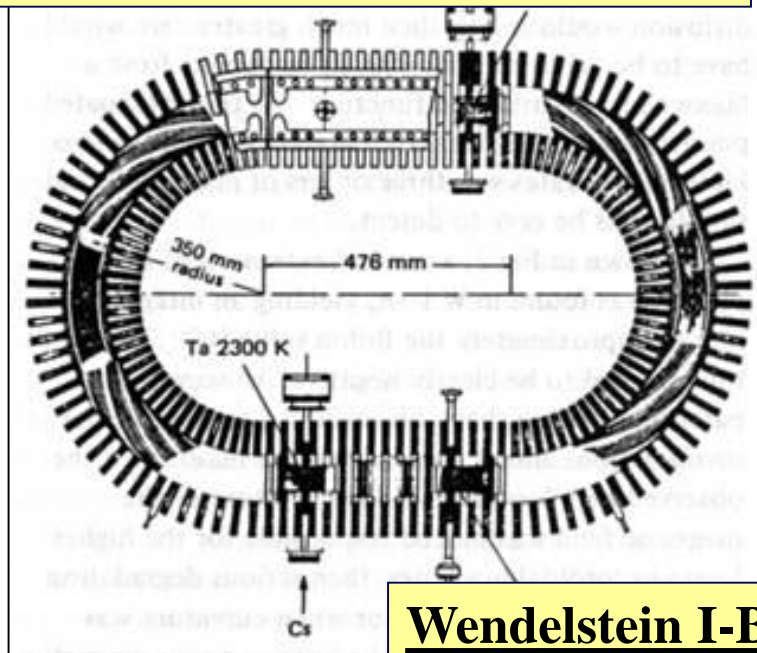
Nagy sugár: 35 cm

Kis sugár: 2 cm

Mágneses tér: 1 T

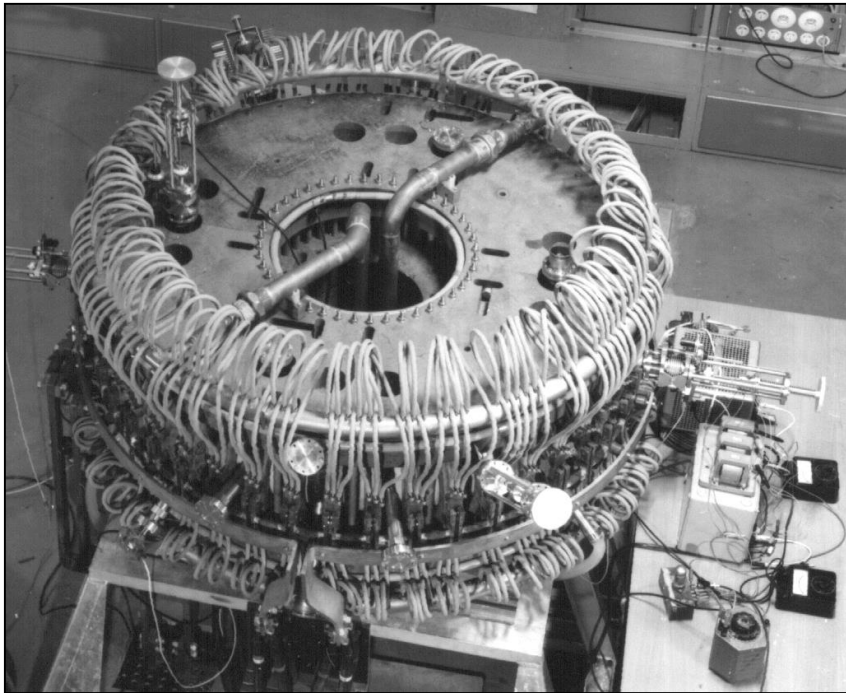
Cézium plazma

Ohmikus fűtés



Wendelstein I-B

Wendelstein sztellarátorok



Wendelstein II-A (1968):

Tórusz geometria

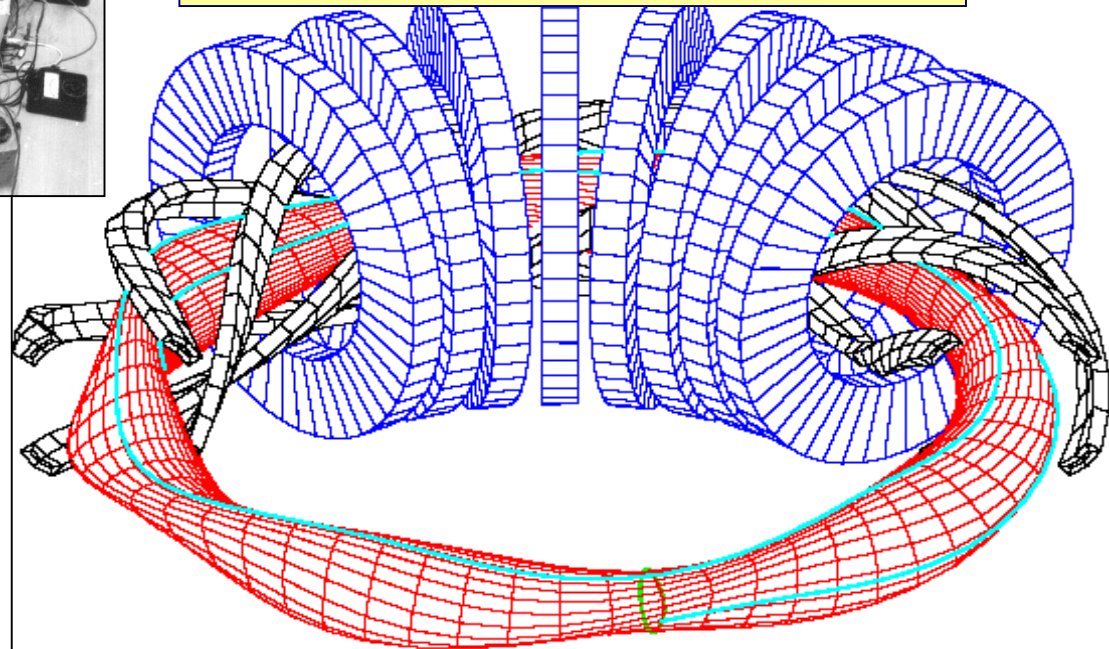
Nagy sugár: 50 cm

Kis sugár: 5 cm

Mágneses tér: 0,6 T

Bárium plazma

RF fűtés



Wendelstein sztellarátorok

Wendelstein 7-A (1976):

Tórusz geometria

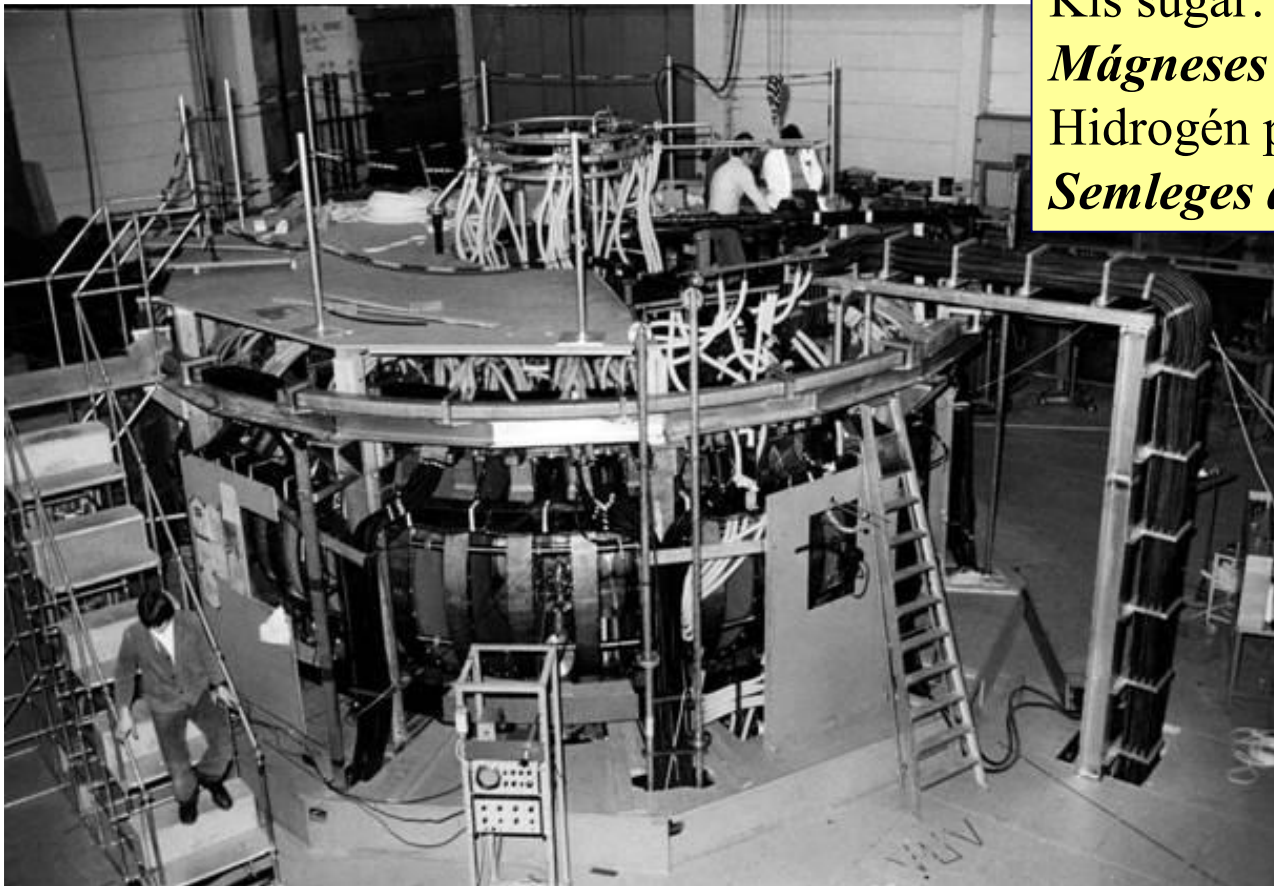
Nagy sugár: 2 m

Kis sugár: 0,1 m

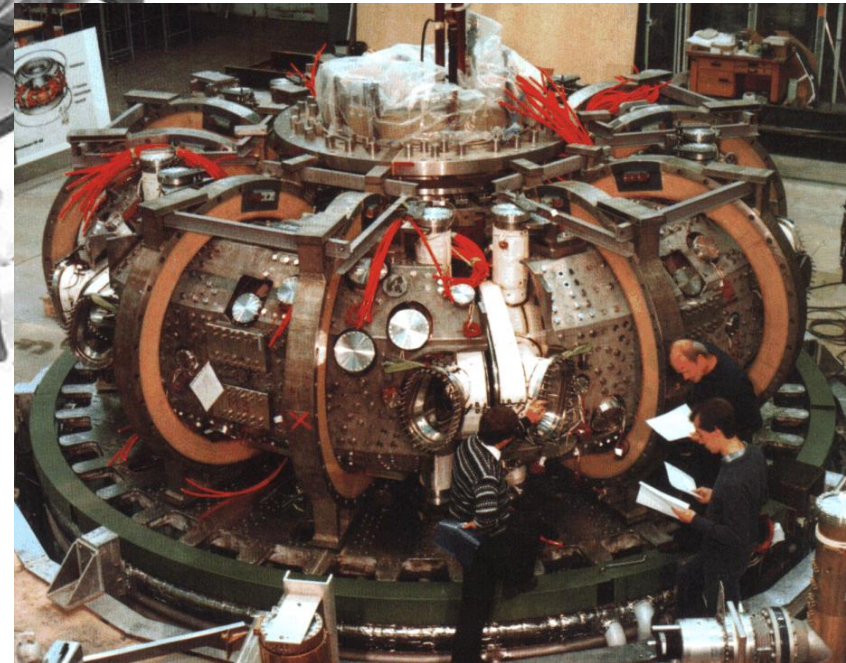
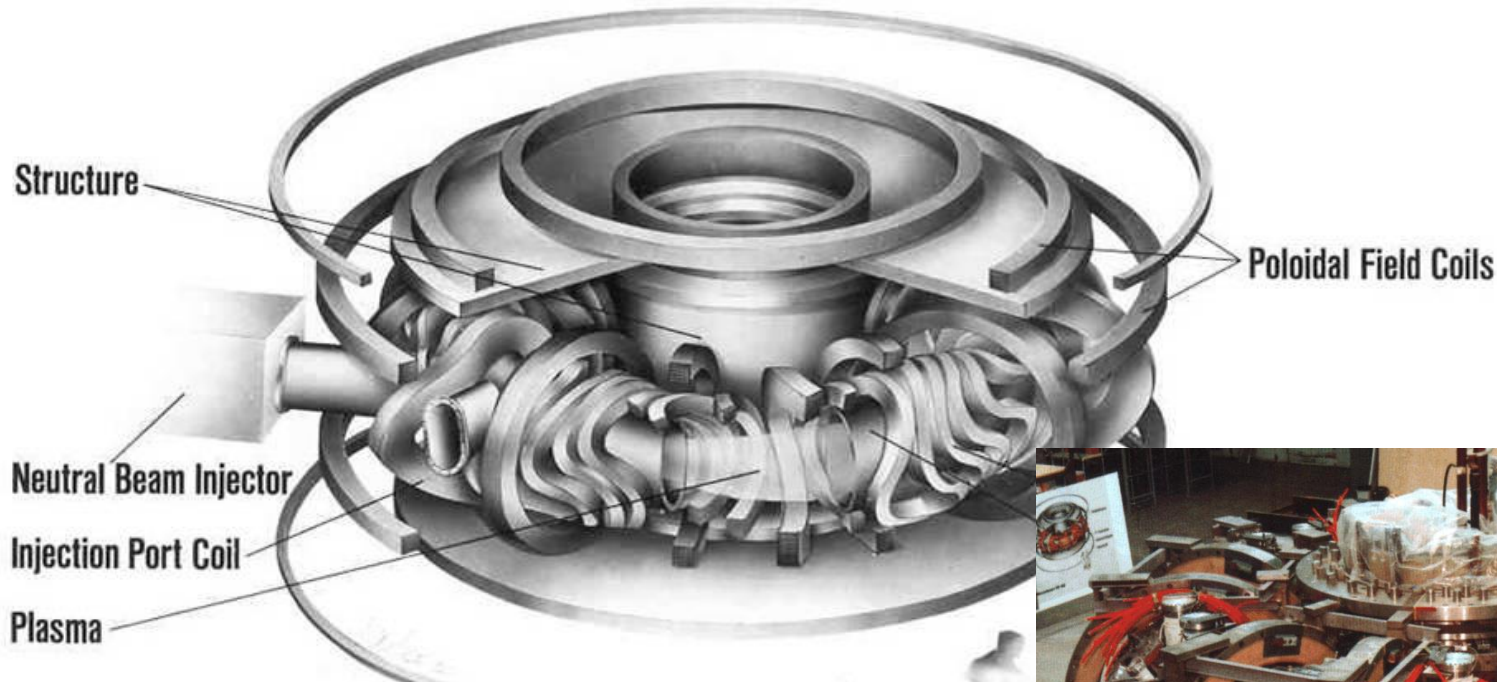
Mágneses tér: 3,4 T

Hidrogén plazma

Semleges atomnyaláb fűtés



Wendelstein sztellarátorok



Wendelstein 7-AS (1988):

Moduláris sztellarátor (5 modul)

Részlegesen optimaizált

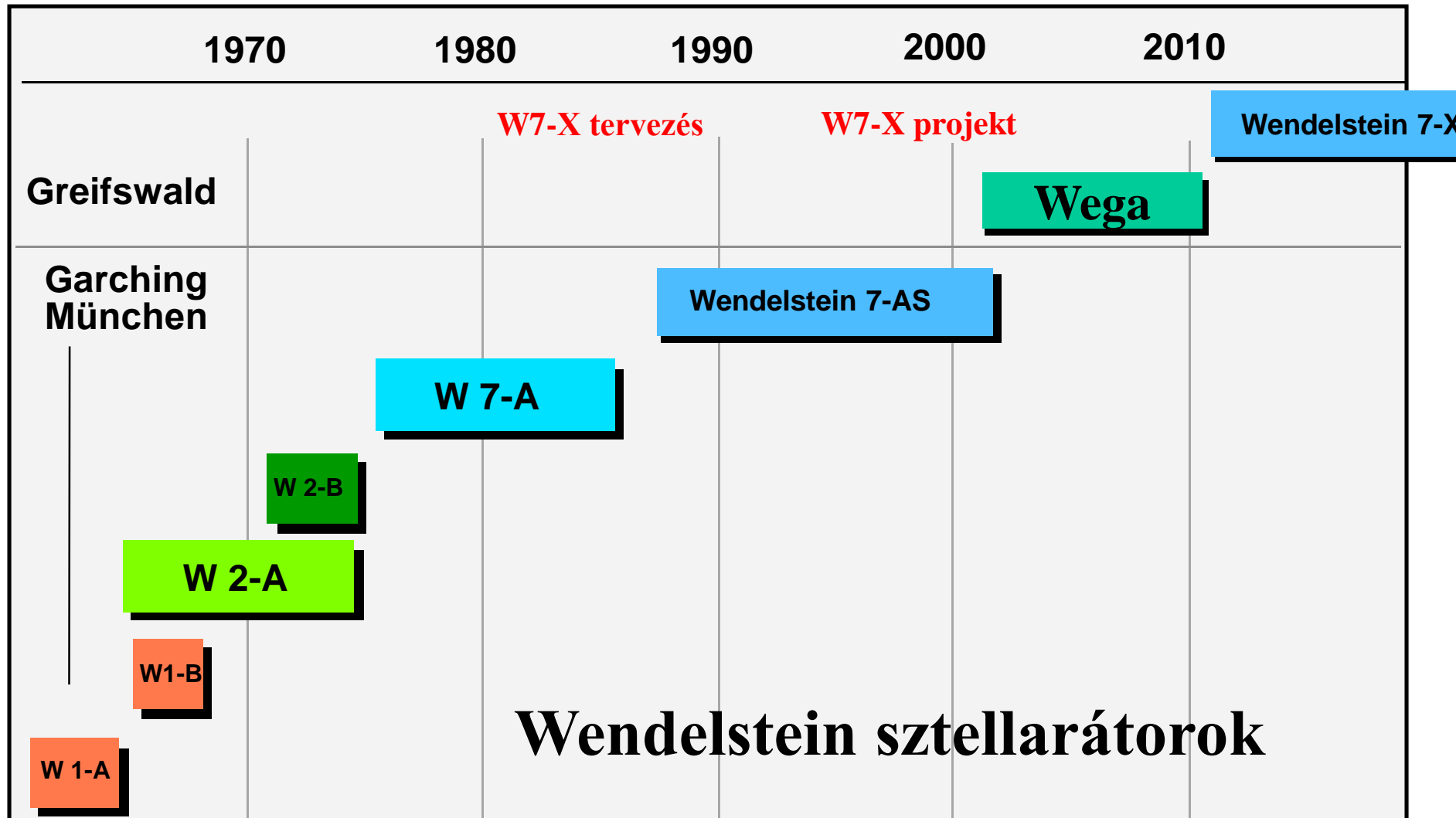
Nagy sugár: 2 m

Kis sugár: 0,18 m

Mágneses tér: 2,5 T

Hidrogén és deutérium plazma

Wendelstein sztellarátorok



Sztellarátor optimalizálás

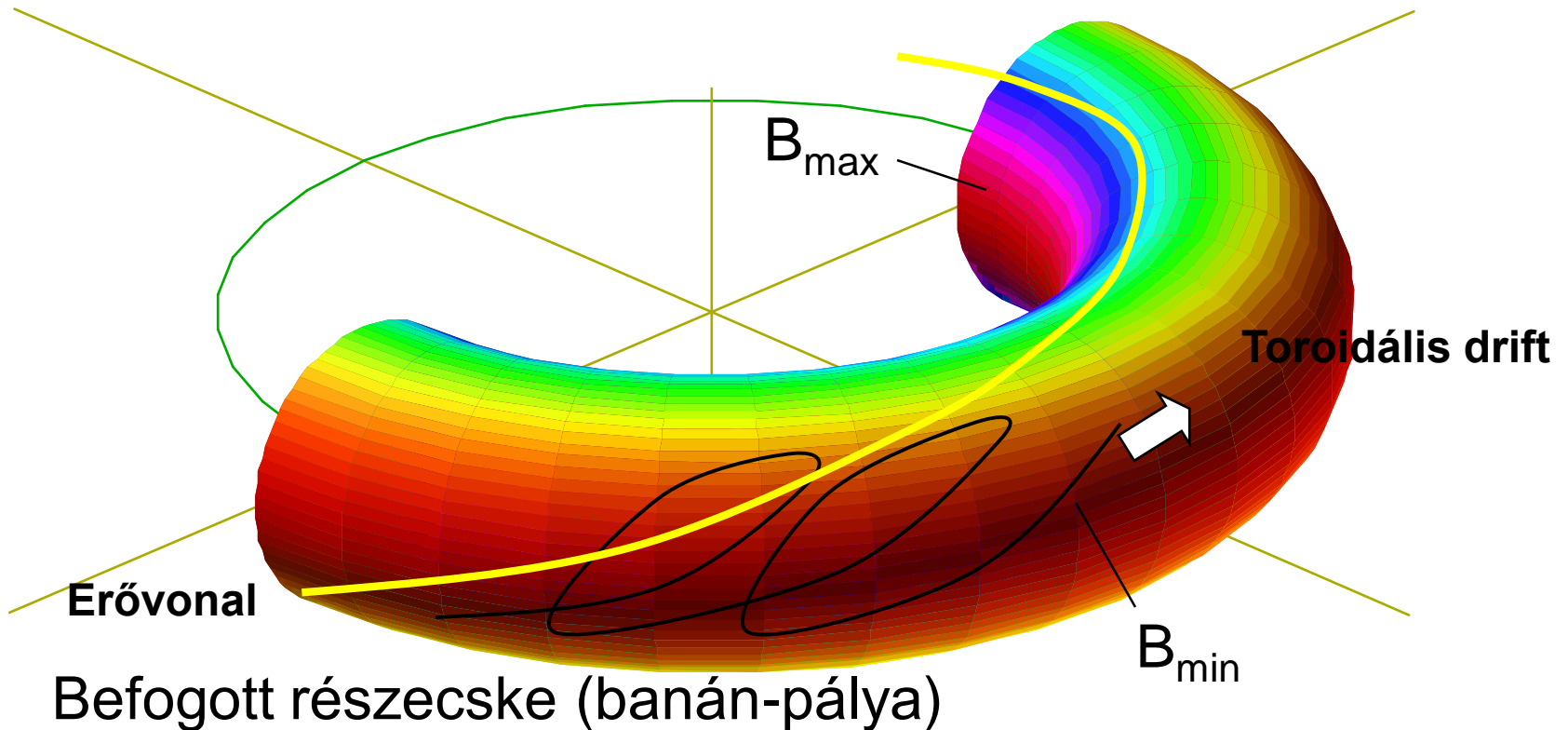
Optimalizált sztellarátor!

Az optimalizálás szempontjai:

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

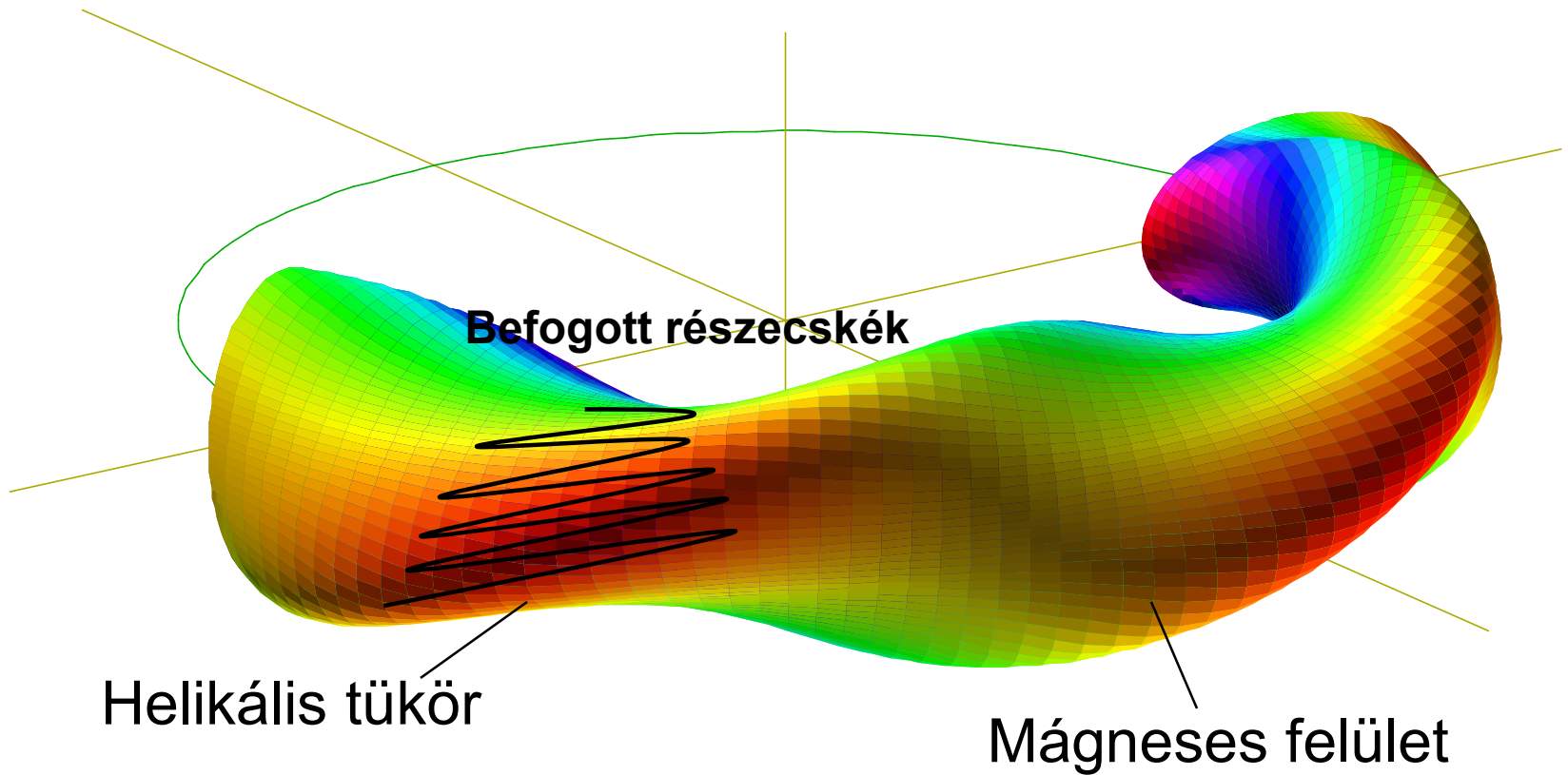
Neoklasszikus transzport tokamakban

Tokamak



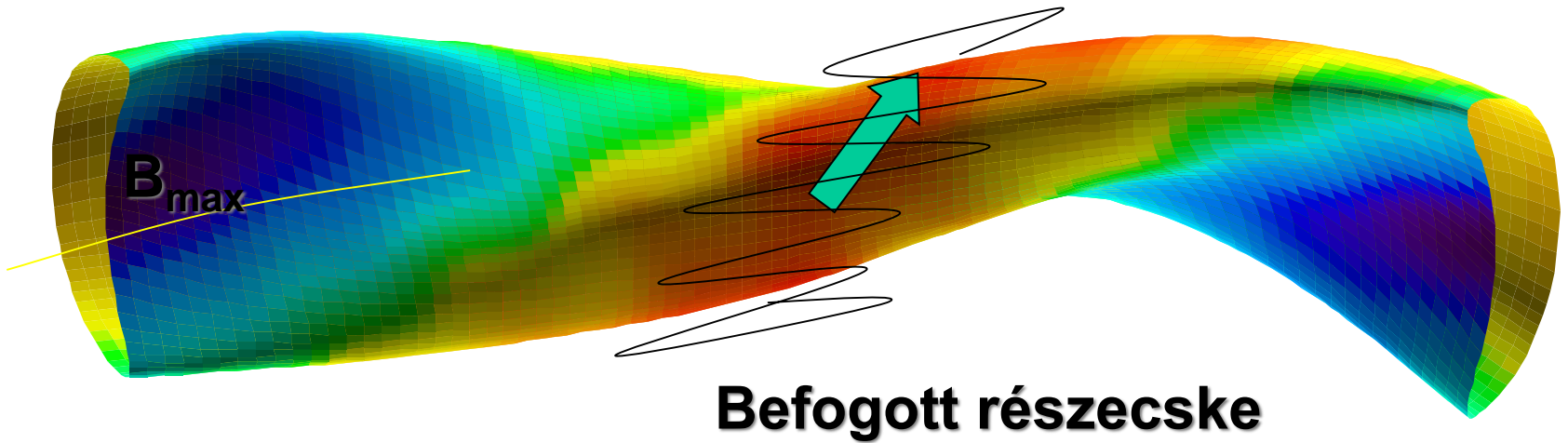
Neoklasszikus transzport sztellarátorban

L = 2 Stellarator



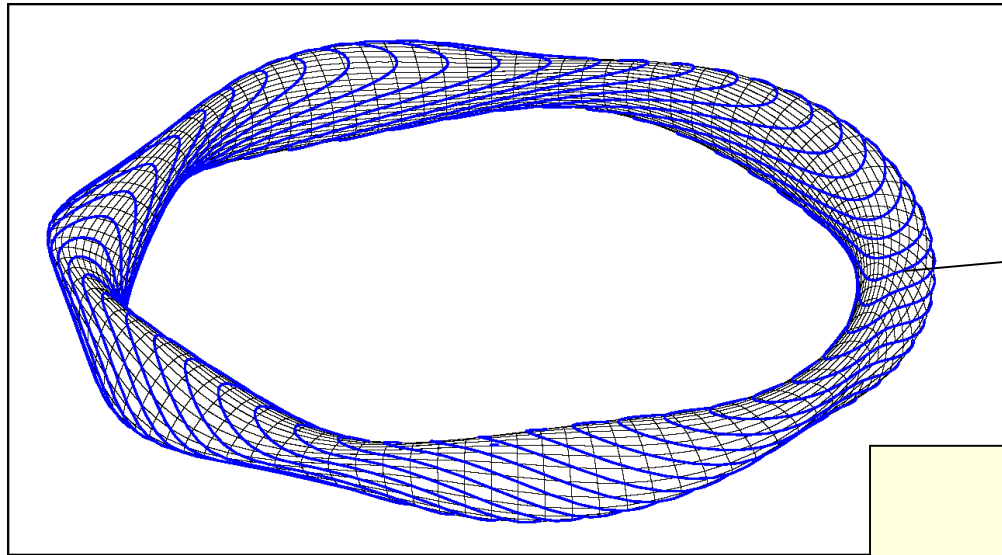
Csökkentett neoklasszikus transzport a W7-X-ben

Mágneses felület (1 Periódus)

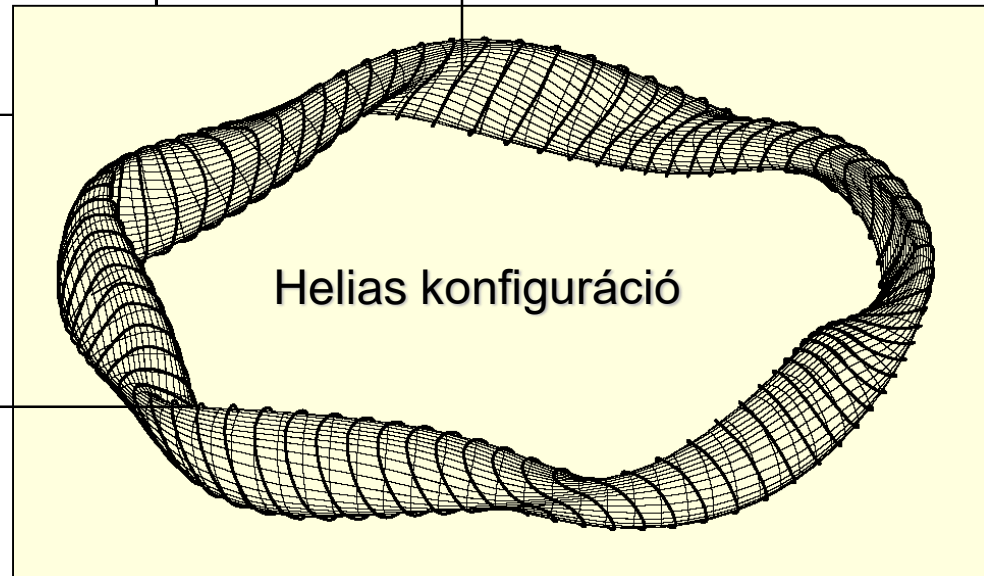


Csökkentett párhuzamos plazmaáram a W7-X-ben

L = 2 Sztellarátor



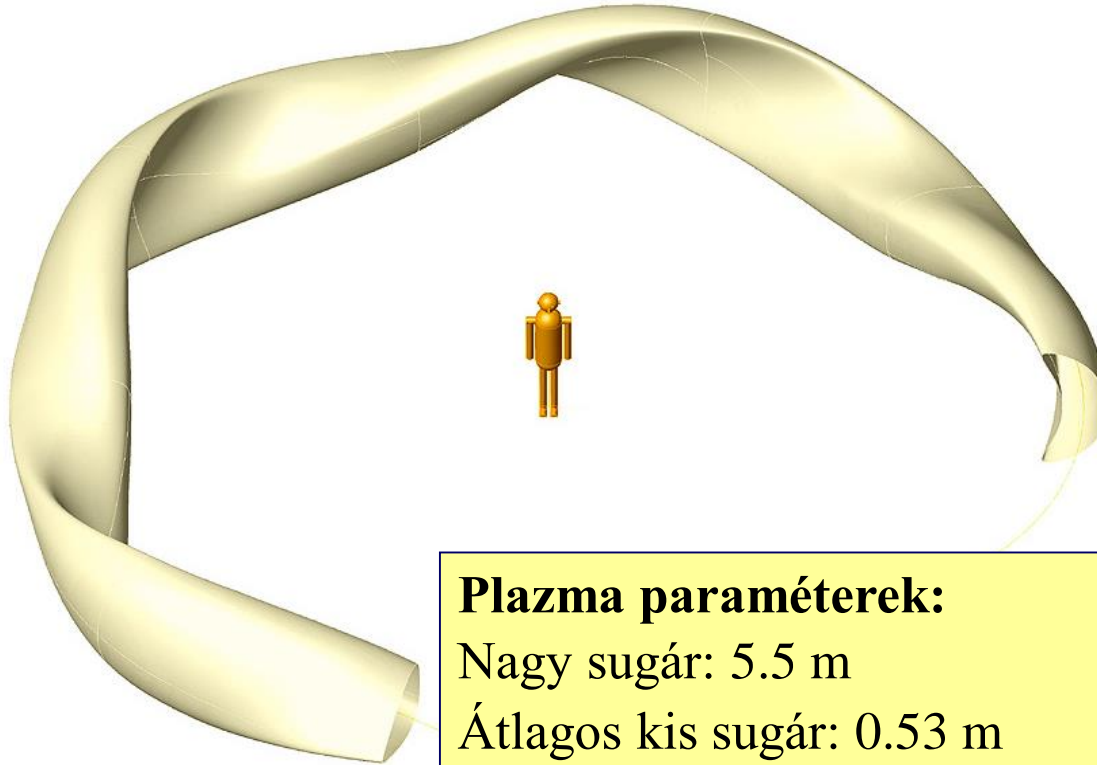
Plazma áramvonalak



Helias konfiguráció

Mágneses erővonalak

W7-X felépítése



Plazma paraméterek:

Nagy sugár: 5.5 m

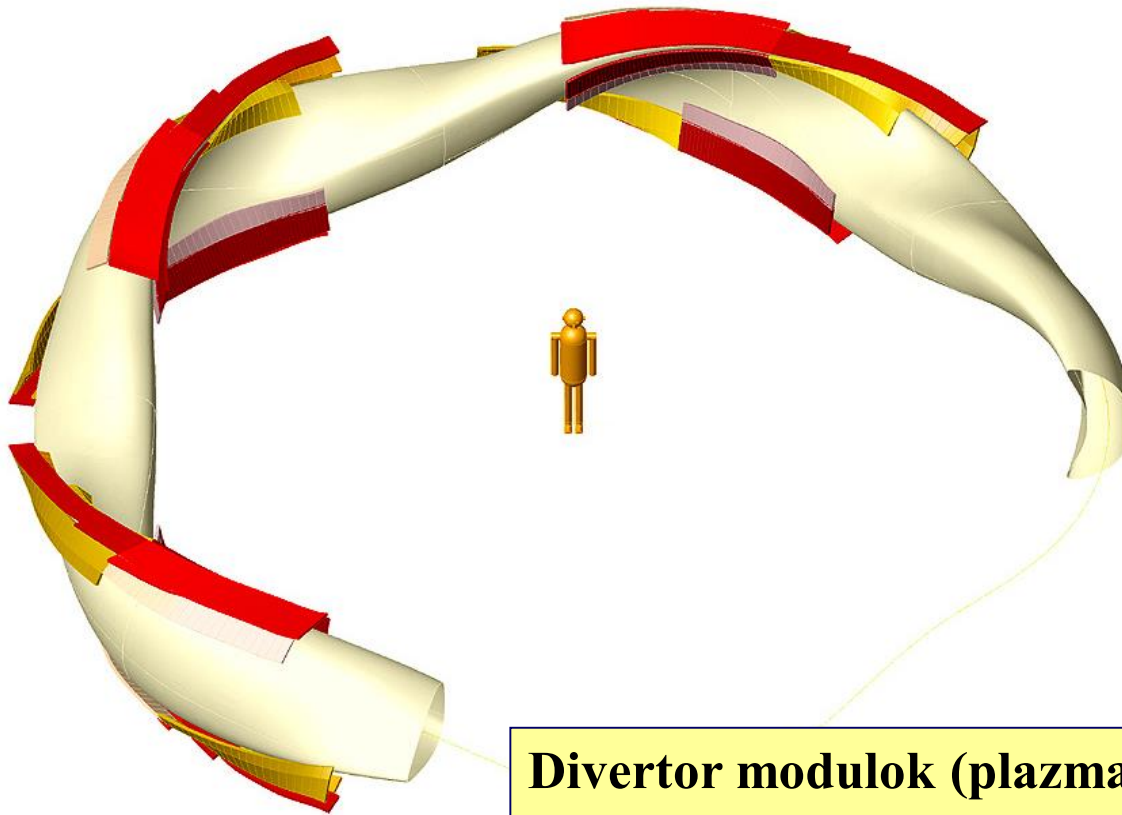
Átlagos kis sugár: 0.53 m

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

Középponti elektronhőmérséklet: 5-10 keV

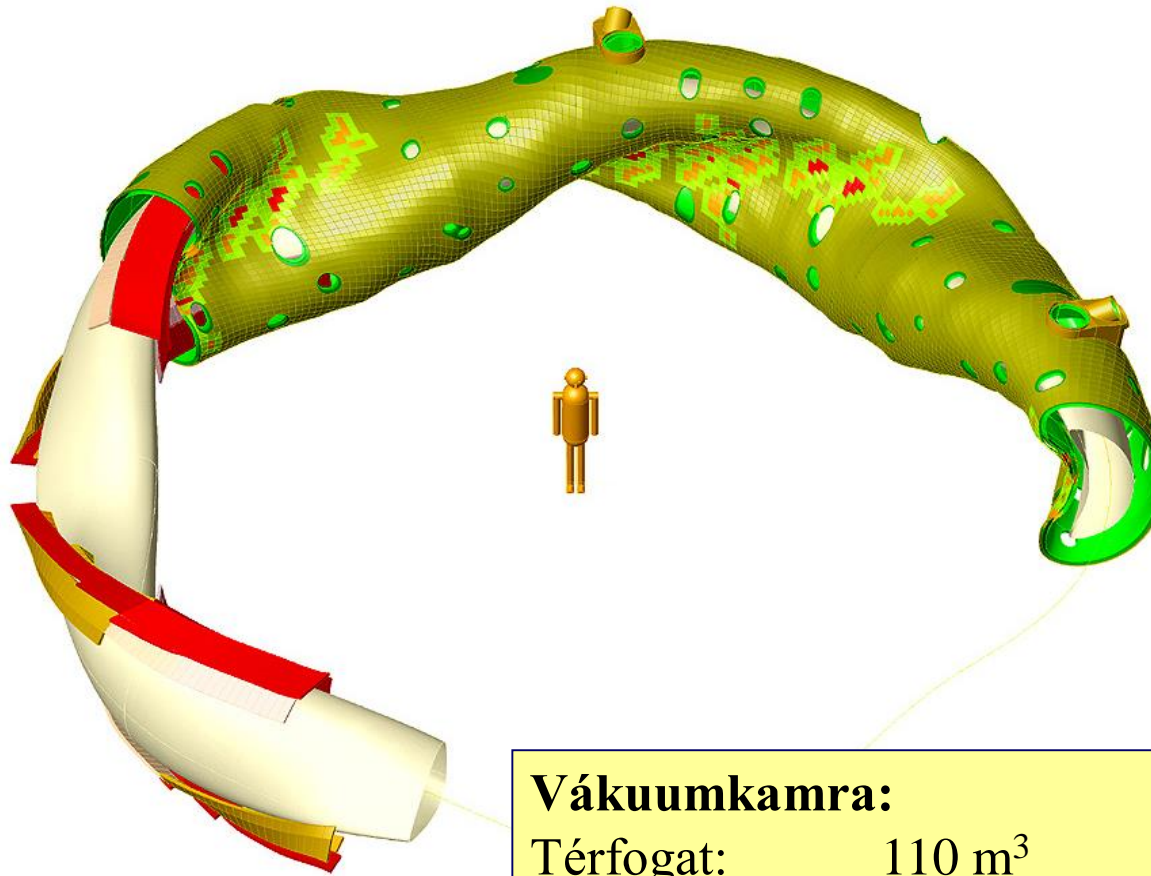
Hidrogén és deutérium plazma

W7-X felépítése



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

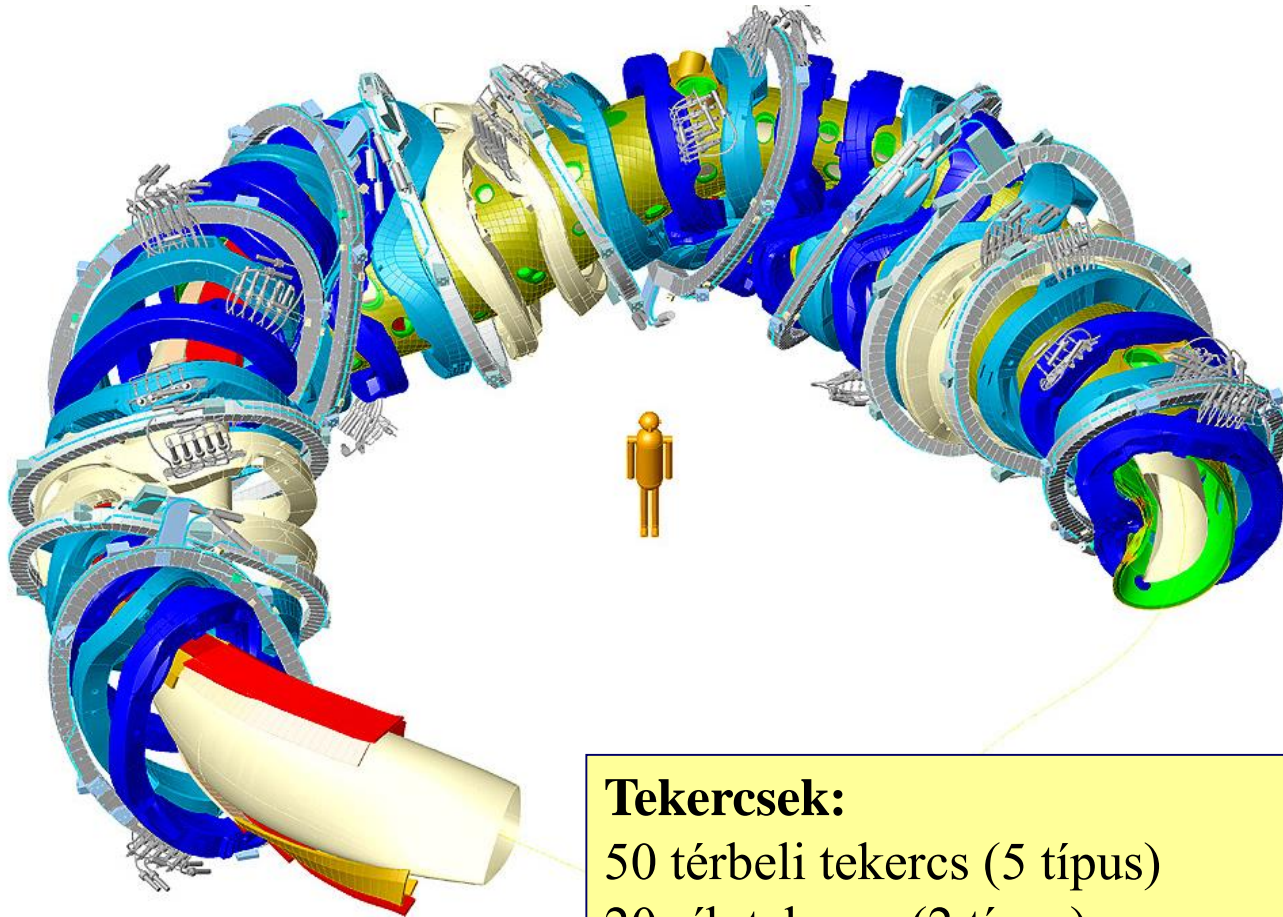
W7-X felépítése



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)

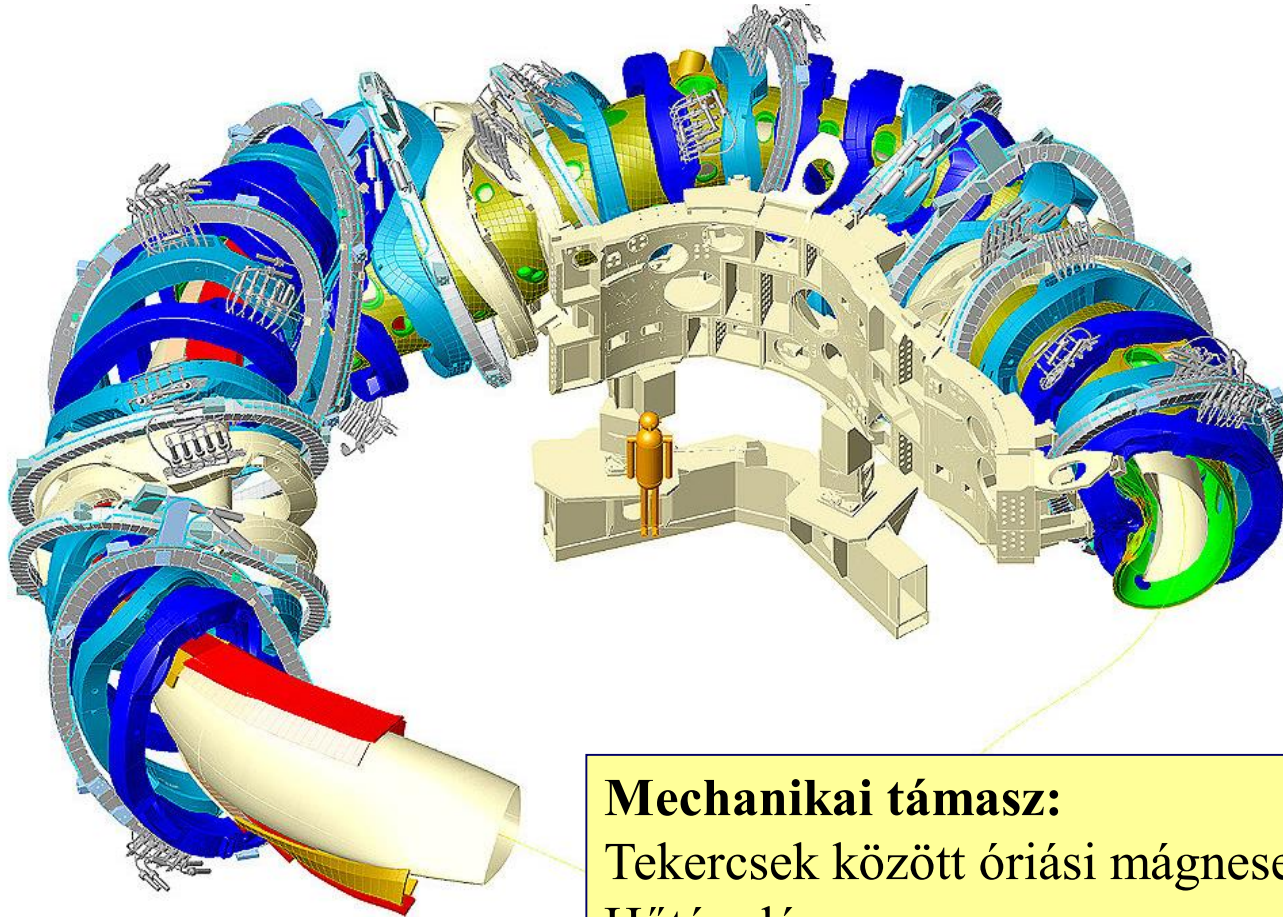
20 sík tekercs (2 típus)

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



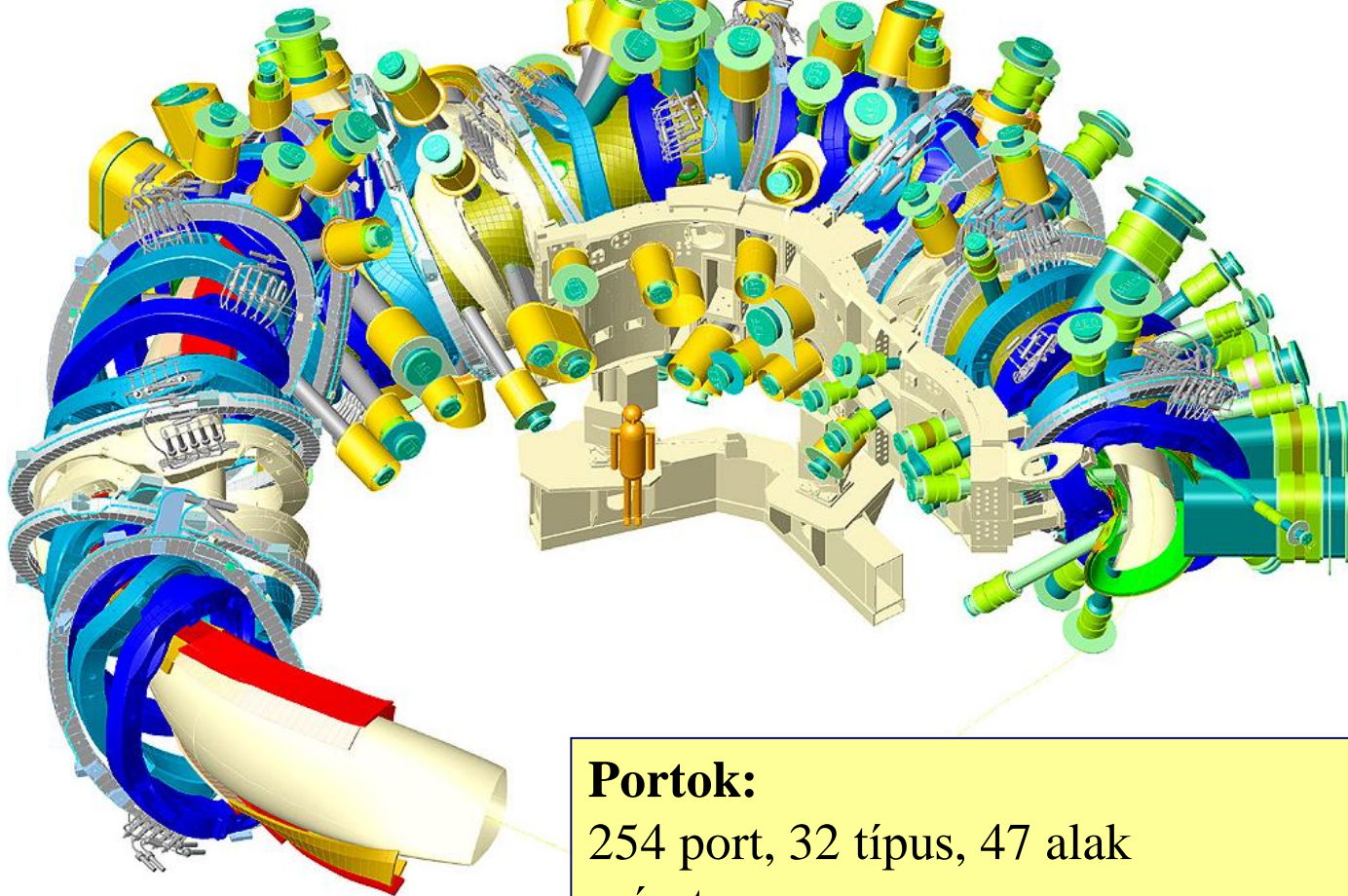
Mechanikai támasz:

Tekercsek között óriási mágneses erők

Hőtágulás

Középponti elrendezés

W7-X felépítése



Portok:

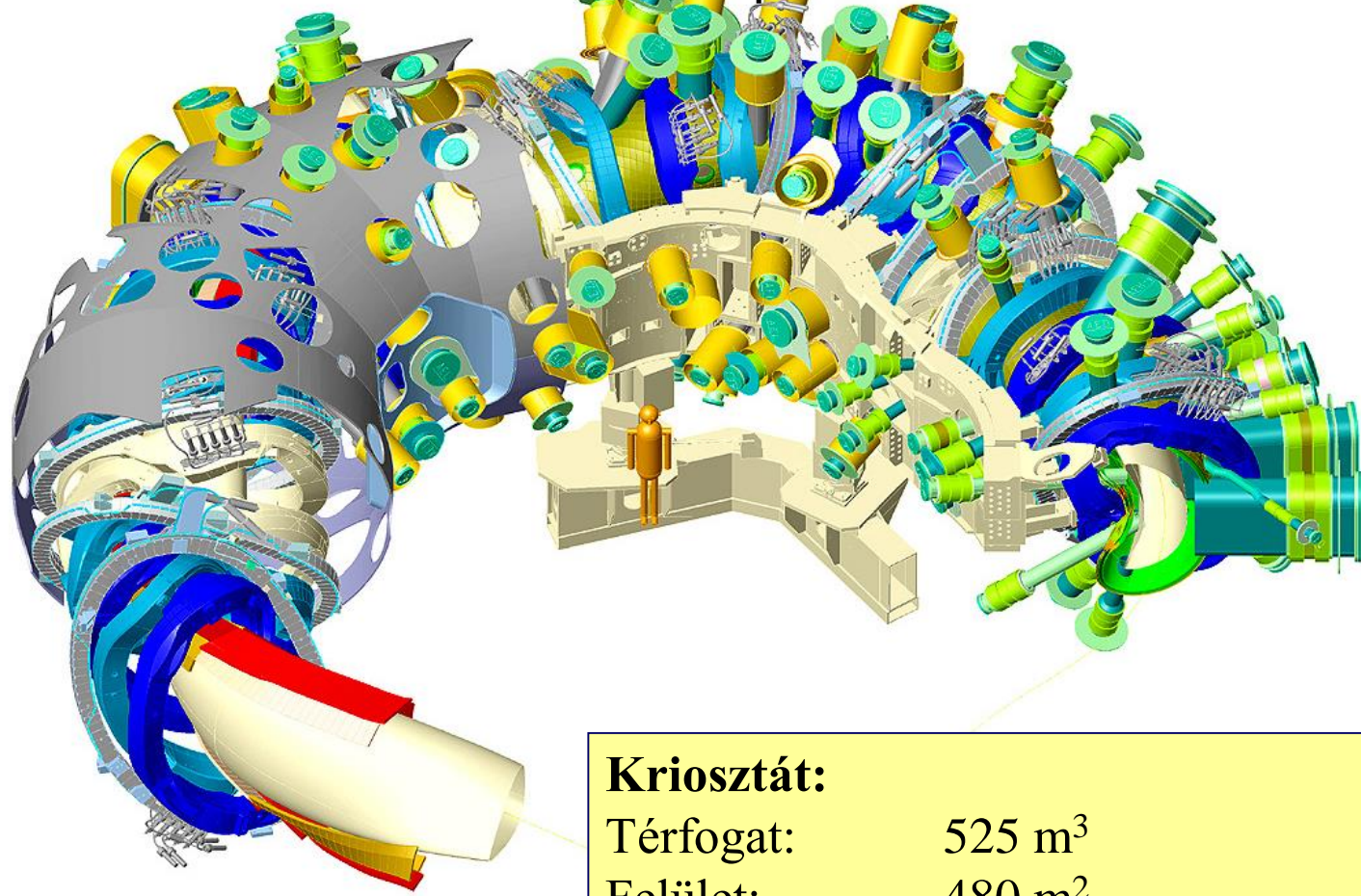
254 port, 32 típus, 47 alak

méret:

ø 100–400 mm vagy

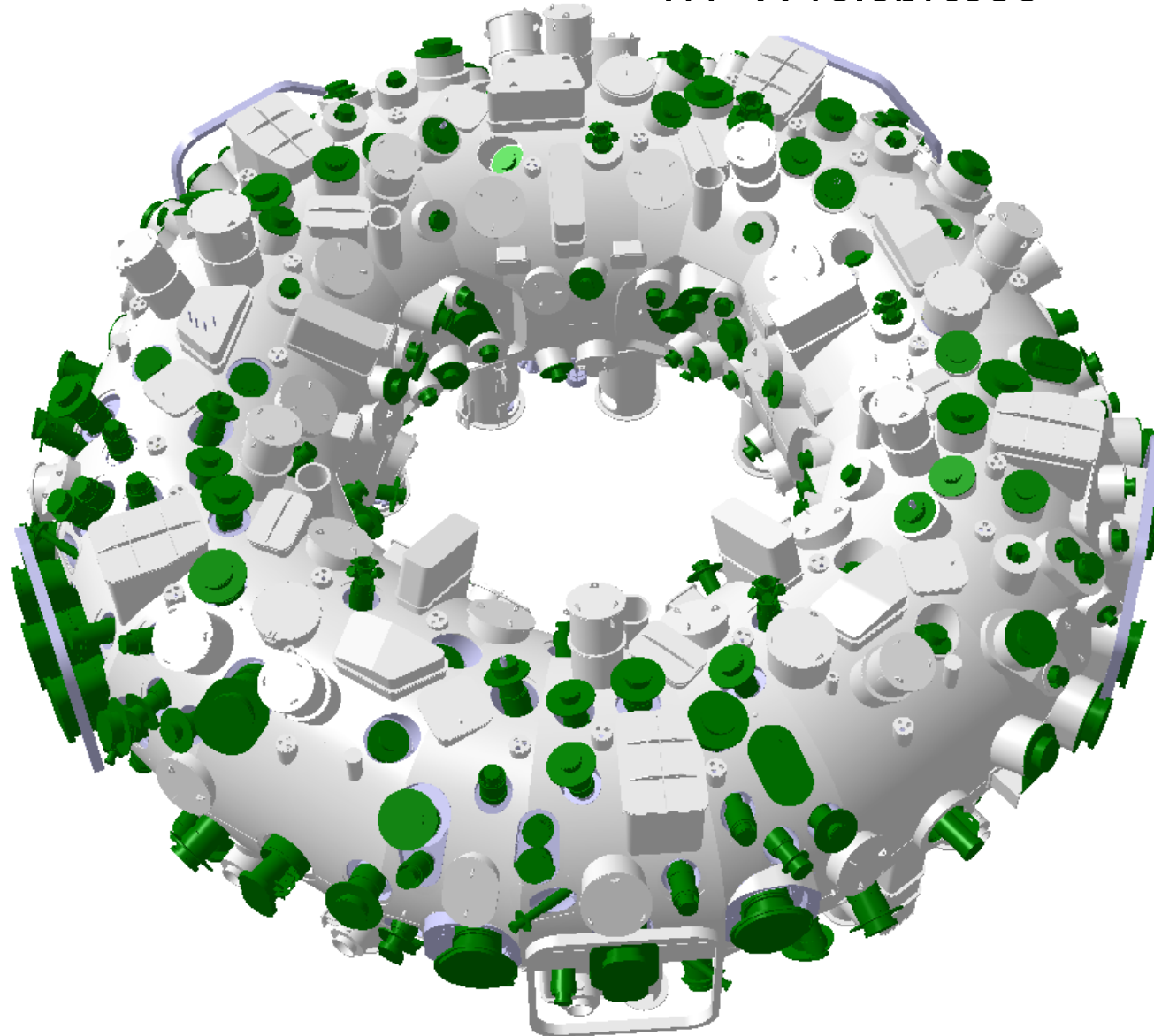
150x400–400x1000 mm²

W7-X felépítése



Kriosztát:	
Térfogat:	525 m ³
Felület:	480 m ²
Vákuum:	< 10 ⁻⁵ mbar
Tömeg:	150 t
Termikus szigetelés minden felületen	

W7-X felépítése



Alapszerkezet:

Magasság:

4.5 m

Átmérő:

16 m

Tömeg:

725 t

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

Korszerű nukleáris energiatermelés, 2019. szeptember 25.

W7-X üzemeltetése

Építés
elkészül
2014

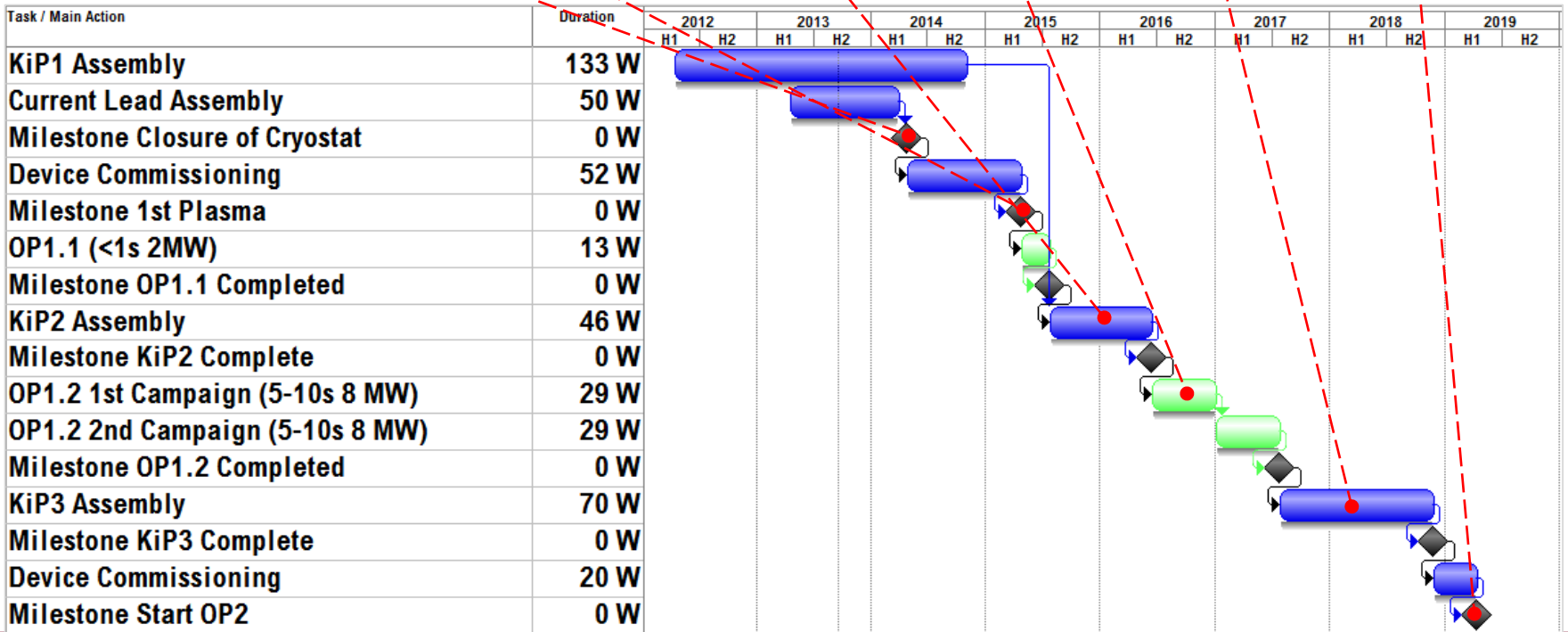
Első plazma
2015

Passzív divertor
építése

20 MW, ~5 sec
1 MW, 60 sec
2017, 2018

Hűtött divertor
építése

10 MW, 30 perc
> 20 MW, ~ 10 sec
2021



W7-X első H plazma – 2016.02.03.



Első kampányok:

- *Jó összetartás*
- *Optimalizálás sikeres*
- *Rekord hármasszorzat*
- *Anomális transzport nagy*
- *Új optimalizálási algoritmusok*



1. Telefon elővesz
2. WiFi jelszó: wigner2008, vagy mobilnet
3. Böngészőbe: Kahoot.it
4. Kód: kivetítőn
5. Név: Neptun kód !!!



6. Értékelés:

- Az összes kérdésre hibátlan megoldás → **+1 pont**
- Többiek között az elért ponttal arányos eséllyel **2 x +1 pont sorsolás**