

Mágneses Nap a laboratóriumban - szabályozott magfúziós kutatások

Zoletnik Sándor

KFKI-Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet
Magyar Euratom Fúziós Szövetség
zoletnik@rmki.kfki.hu



KFKI-RMKI



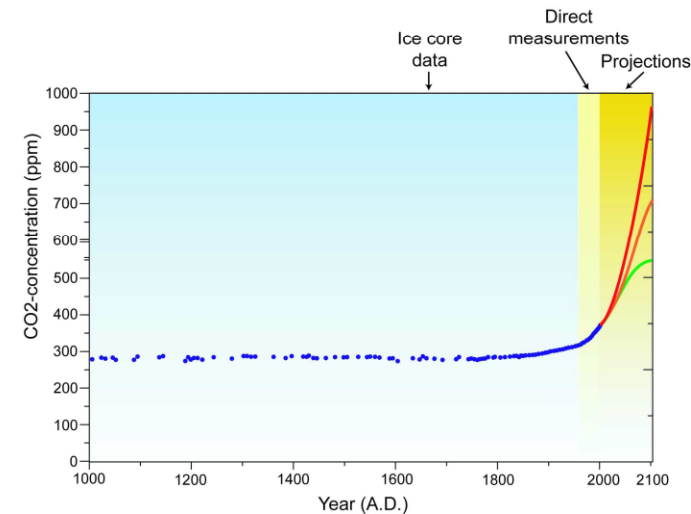
Magyar Euratom
Fúziós Szövetség

Ma dominánsan fosszilis energiaforrásokat használunk:

- Források végesek
- Globális energiafelhasználás növekszik
-> árak emelkednek
- CO₂ kibocsátás -> üvegházhatás(?)

CO₂ mentes új energiaforrások:

- Napenergia:



Magyarországon legalább 1000 km² felület kellene (csak villamosenergiához):

1000 km²=10⁹ m² -> **100 m²/fő**

- Beépített környezetben nem elég a hely
- Költség magas:

Nem valószínű, hogy olcsóbb lesz mint: 10000 Ft/m²

100m² -> 1 mioFt/fő 10 év élettartam -> 10x3000 kWh/fő

-> 30 Ft/kWh (átmeneti tárolás, fenntartás, földbérlet, ...stb nélkül)

- Szélenergia:

1MW csúcsteljesítmény, 10% kihasználtság 10⁶ kWh/év

-> **1 szélkerék/300 fő**

- Magyarországon nincs elég szél
- Nincs elég hely
- Hogyan tároljuk az energiát?

- Bioenergia:

Nagyságrendekkel kisebb hatásfok mint a direkt napenergia

-> **nagyságrendekkel nagyobb terület**



További alapvető stratégiai problémák a megújuló energiaforrásokkal:

- Időben és térben egyenetlen:

Magyarországon több Balatonnyi víztároló kellene csak a napi ingadozások kiegyenlítésére.

- Az embertől független források
- Éppen akkor esnek ki ha megváltozik a környezet
(éghajlatváltozás, vulkánkitörés, ...)

Nem valószínű, hogy a megújuló források valaha is pár 10%-nál többel járuljanak hozzá az energiaszükséglet fedezéséhez

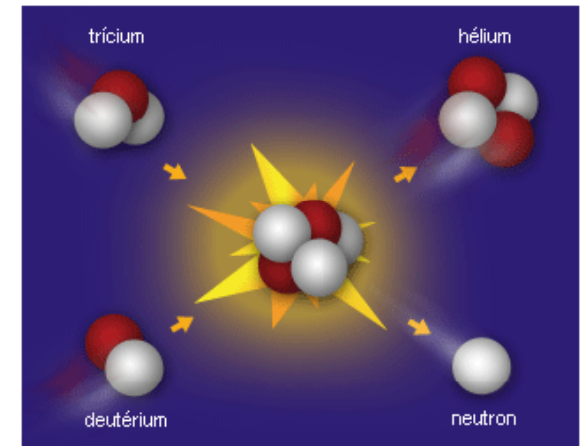
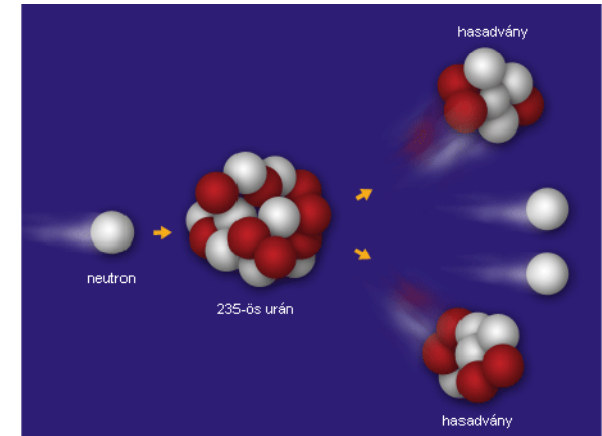
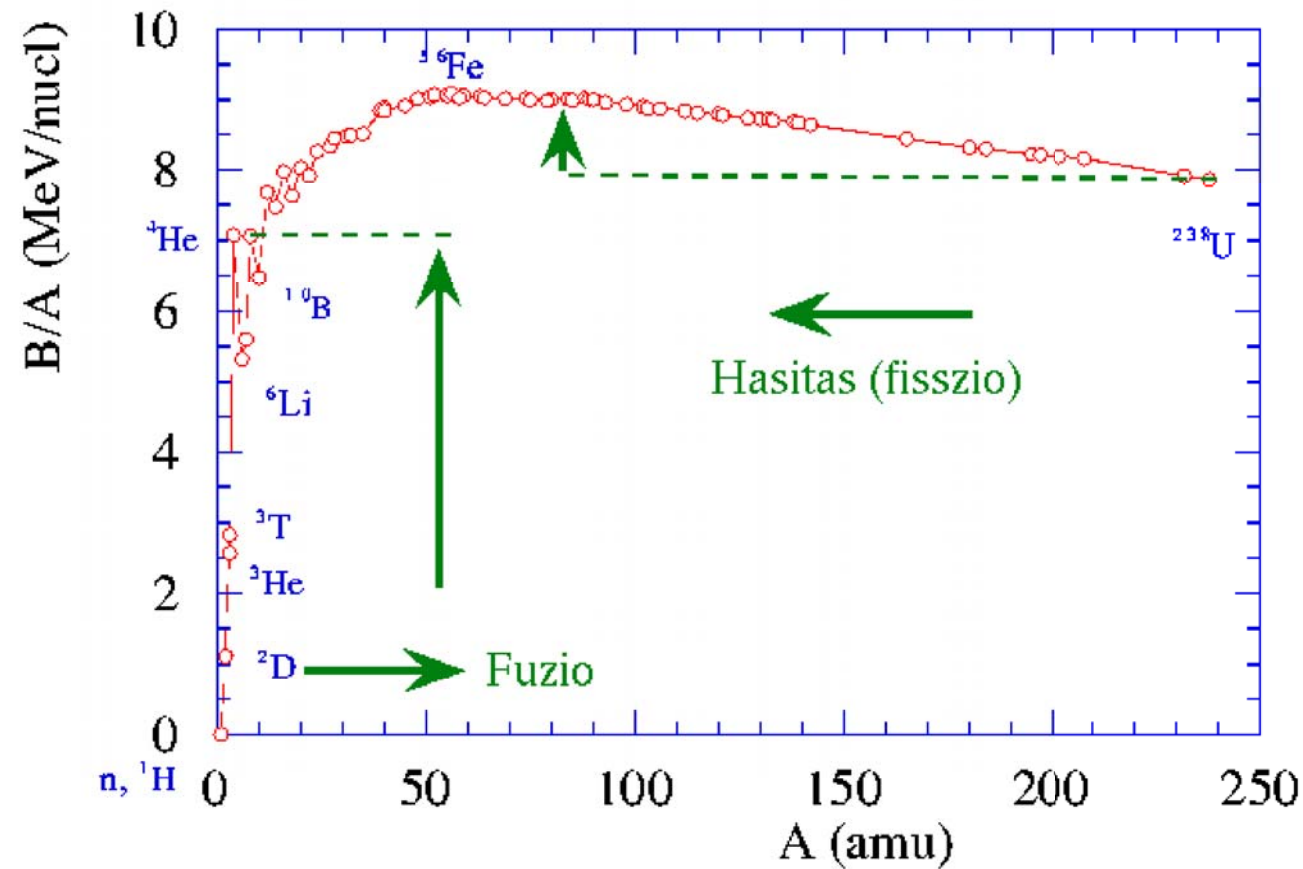
Az összes *nem-megújuló* forrás valamilyen anyagot alakít át más anyaggá:

- Kémiai átalakulás (atomhéj): $< 1 \text{ eV/atom}$ \rightarrow 100-1000 kg/fő/év
- Nukleáris átalakulás (atommag): $> 1 \text{ MeV/atom}$ \rightarrow 1g/fő/év

A kémiai átalakuláson alapuló energiatermelési sémák mindenképpen óriási anyagmennyiséget igényelnek:

- Források végesek
- Óriási hulladékmennyiség

Hosszú távlatban mindenképpen meghatározó kell, hogy legyen a nukleáris energetika



Az atommagok kötési energiája a vas környékén a legnagyobb.

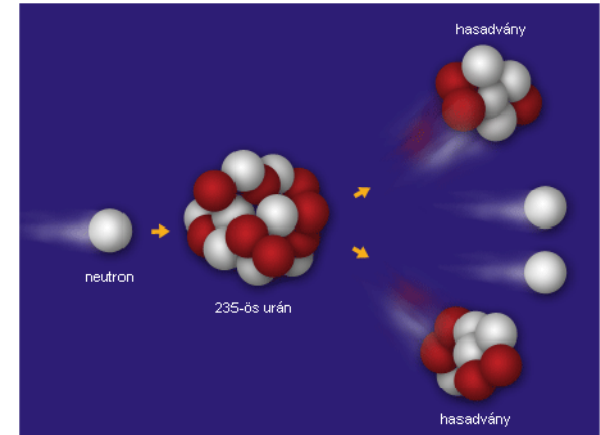
Erősebb kötést lehet elérni:

- Nagyobb magok hasításával (fisszió)
- Kisebb magok egyesítésével (fúzió)

A kiinduló magok és a végtermék magok kötési energiájának különbségét hasznosítjuk.

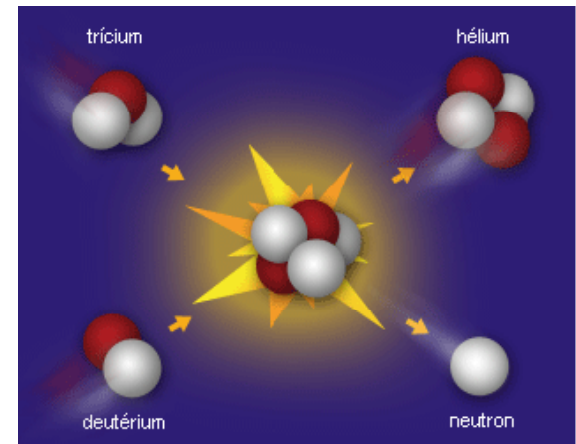
A fissziós reakció szinte „adja magát”

→ A megfelelő anyagok összerakásakor kevés neutron hatására megindul



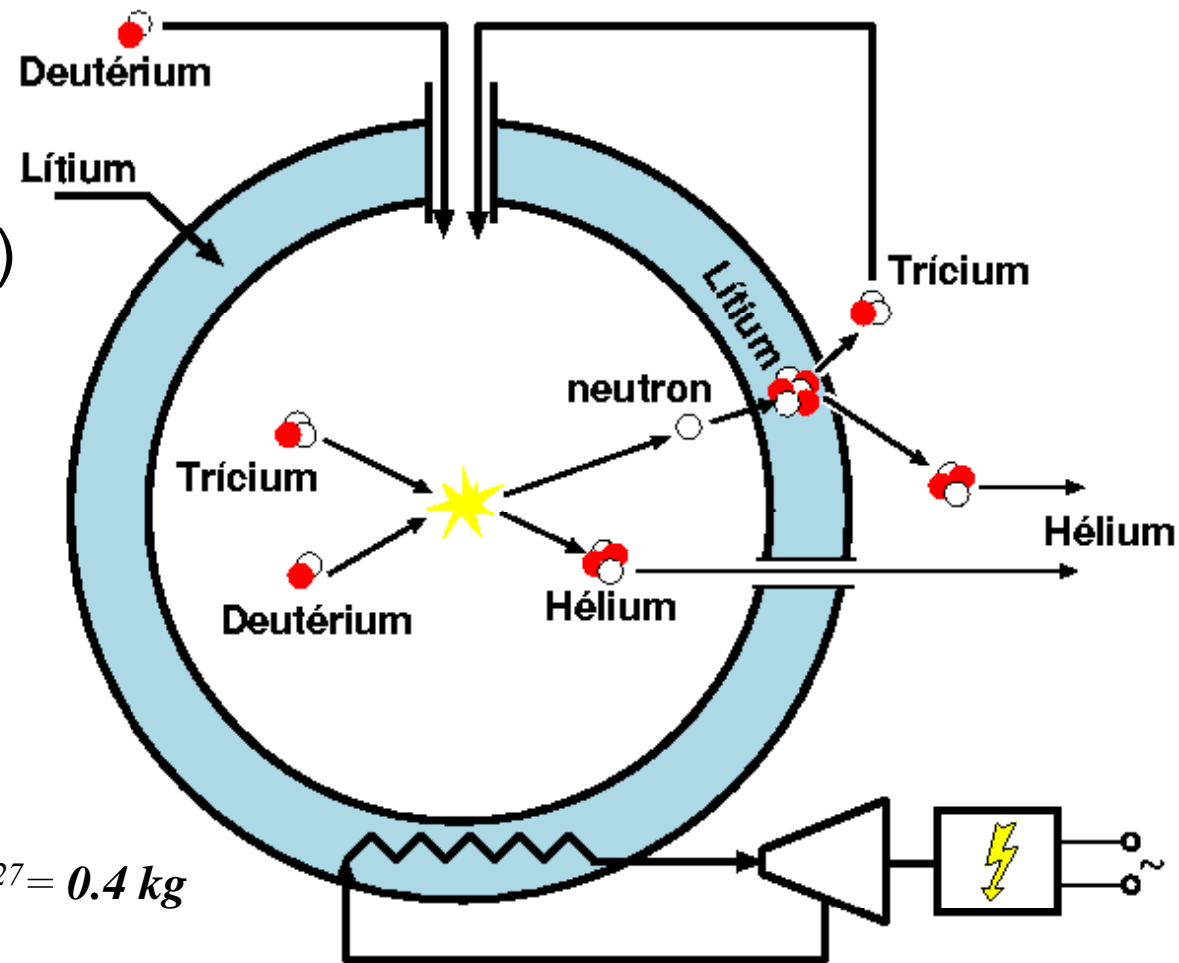
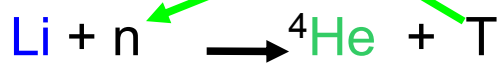
A fúziós reakcióhoz az atommagoknak közel kell egymáshoz kerülniük:

- Elektrosztatikus taszítás akadályozza
- Kellően gyors részecskék kellene
 - részecskegyorsító
 - nagyon magas hőmérséklet



hidrogénbomba, atomerőmű → **fúziós erőmű?**

A reakciók:

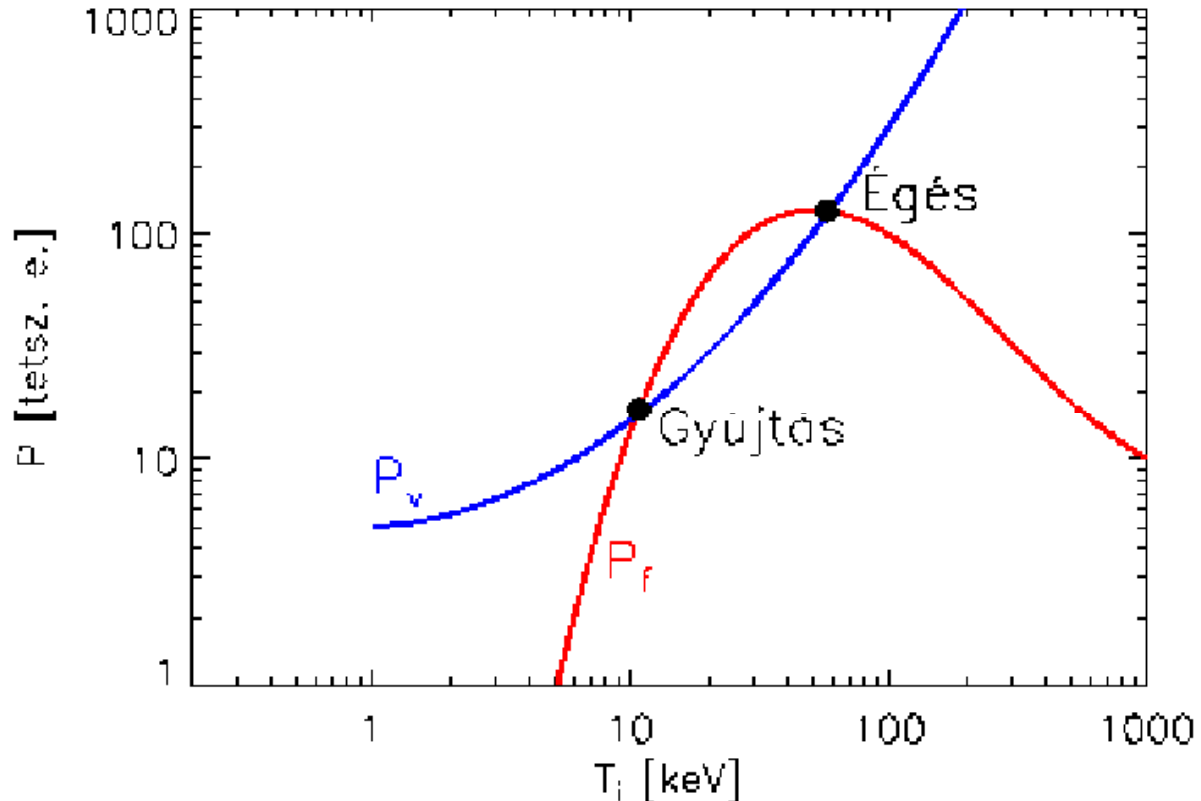


Napi anyagszükséglet 1 GW-os erőműre:

$$(1 \text{ GW} \times 1 \text{ nap} / 17 \text{ MeV}) \times 8 m_p =$$

$$10^9 \times 3600 \times 24 / (1.7 \cdot 10^7 \times 1.6 \cdot 10^{-19}) \times 8 \times 1.6 \cdot 10^{-27} = 0.4 \text{ kg}$$

- ✓ Nincsenek radioaktív végtermékek
- ✓ Kiindulási anyagok korlátlanul és egyenletesen elosztva állnak rendelkezésre

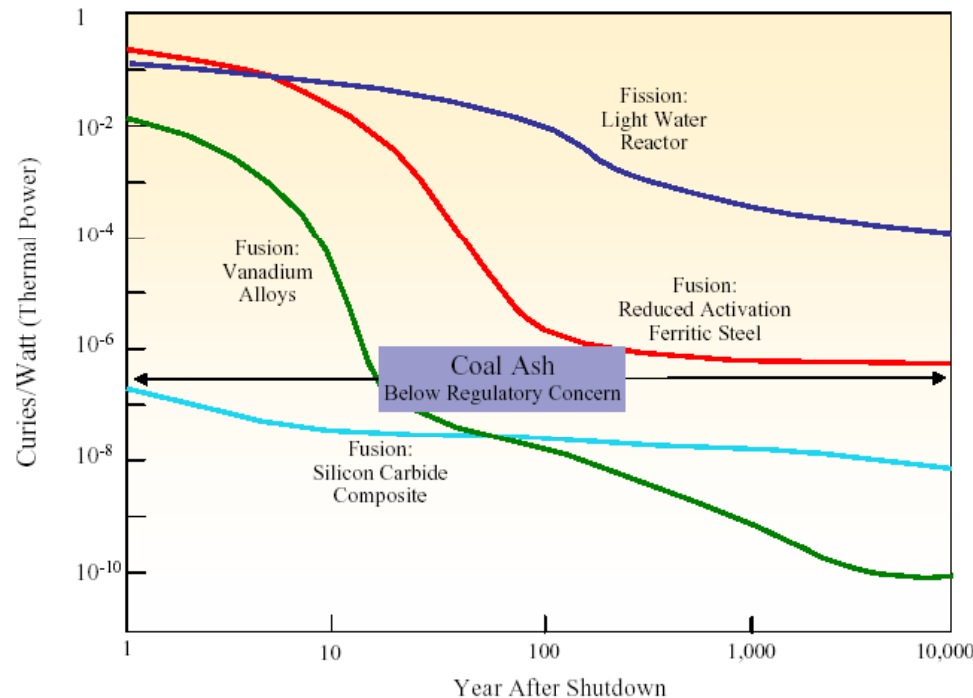


A plazma hőmérsékletének emelésével a veszteségek mindig nőnek, a fúziós teljesítménynek maximuma van:

- Ha elég kicsik a veszteségek, akkor magától stabil pontba áll be a plazma
- Ha nagyok a veszteségek, nincs önfenntartó reakció.

Nem lehetséges megszaladás.

A plazmában csak kb. 10 mg Trícium van: teljesen veszélytelen a környezetre.
Az egész fúziós erőműben kb. 1 kg Trícium lesz: súlyos baleset esetén sem kell kiüríteni a környéket



A fúziós reakcióban keletkező neutronok magreakciókat váltanak ki a szerkezeti anyagokban: **felaktiválódás**

(Maguk a neutronok 1/2 óra alatt hidrogénné alakulnak)

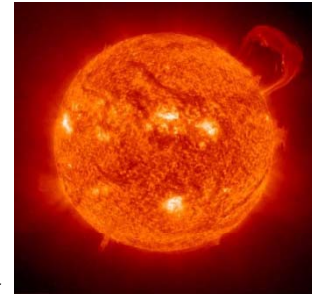
- Hagyományos (EUROFER) anyagokkal kb. 100 év alatt bomlanak le a radioaktív anyagok
- Fejlettebb anyagokkal minimális radioaktivitás maradna vissza.

A radioaktivitás kezelhető

Az atommagok taszítják egymást

→ csak gyorsan mozgó magokkal lehet fúziós reakciót létrehozni:

- Gyorsító: a megreakciókat kiválóan lehet vizsgálni
- Termikus mozgás: 100 millió C

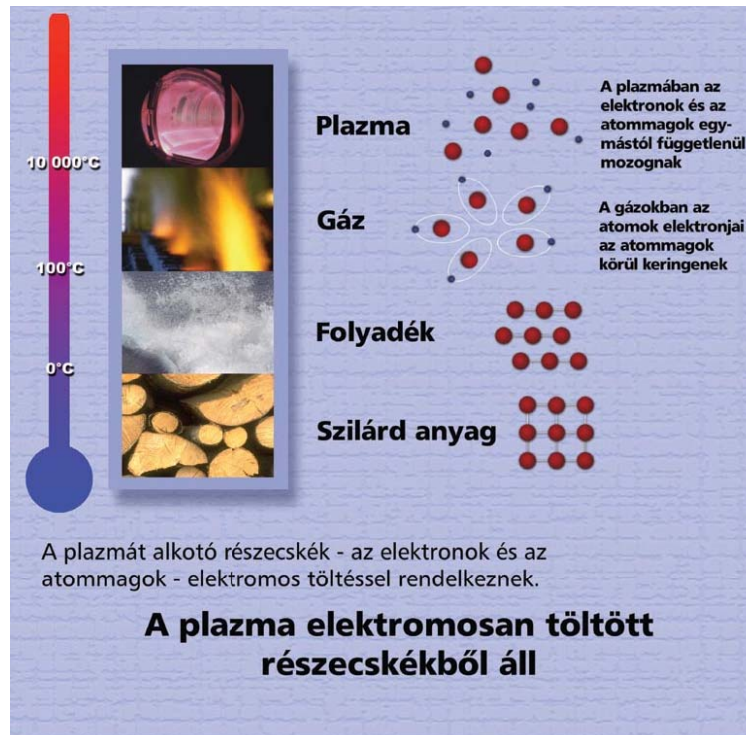


*A Nap hatalmas térfogatában
10 millió C hőmérséklet is elég*

100 millió C-on az atomok mozgási energiája sokkal nagyobb mint az elektronok kötési energiája

→ az elektronok leszakadnak az atommagokról

→ **plazma**



Ritka gázban a szabad elektronokat az elektromos tér akkora sebességre gyorsítja, hogy egy gáztommal ütközve le tudnak ütni egy újabb elektront

→ elektron lavina, ionizáció

Ez az elektromos kisülés létrehoz szabad elektronokat és ionokat

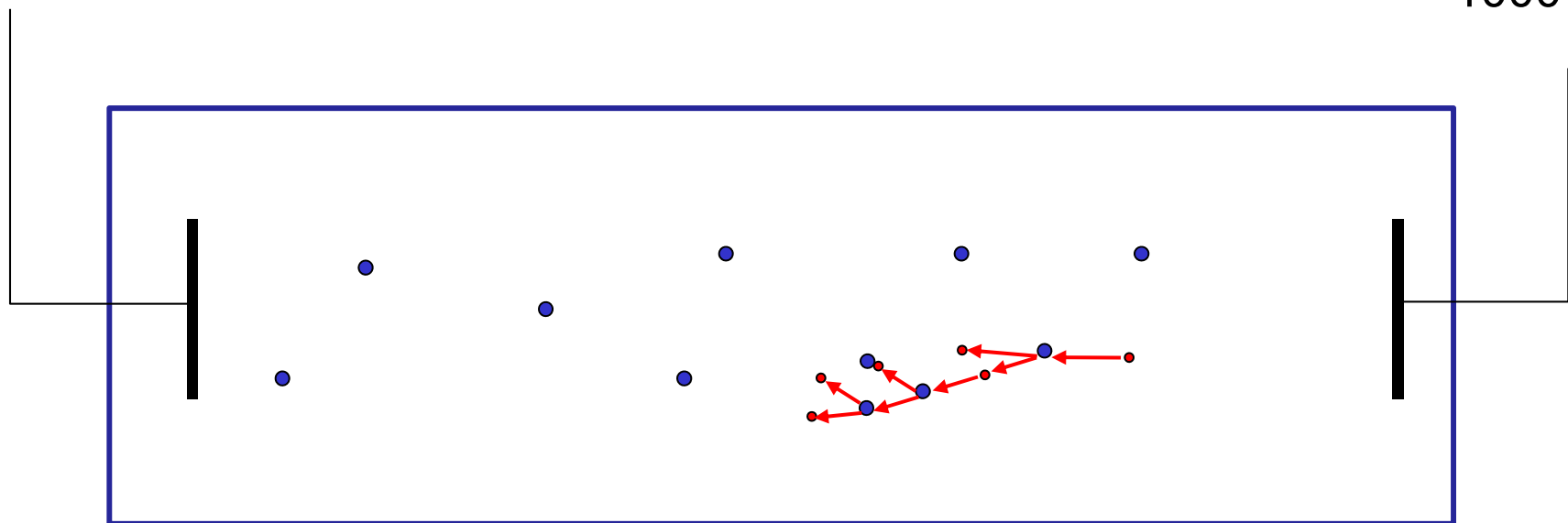
→ plazma

Az elektronok gerjesztik is a gáztomokat, a keletkező fényt látjuk

A plazma töltött részecskéinek mozgását mágneses tér befolyásolja

1000V+

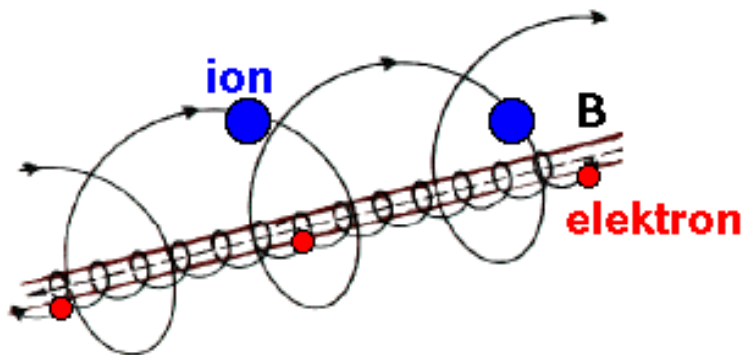
1000V-



Lawson kritérium: $n\tau_E > 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$

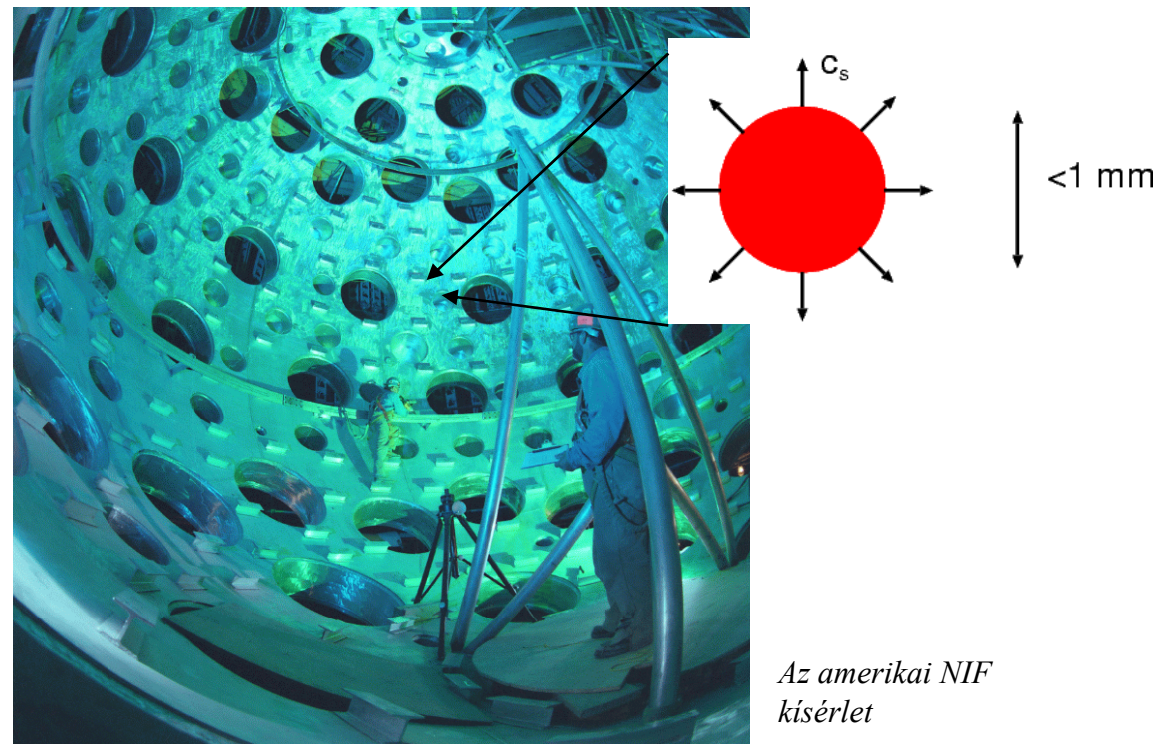
Mágneses plazmaösszetartás:

- Larmor mozgás a tér mentén
- Diffúzió az ütközések miatt a térre merőlegesen.



Tehetlenségi összetartás:

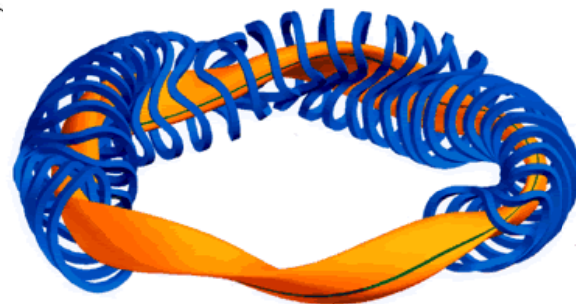
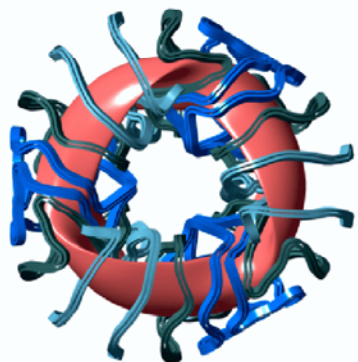
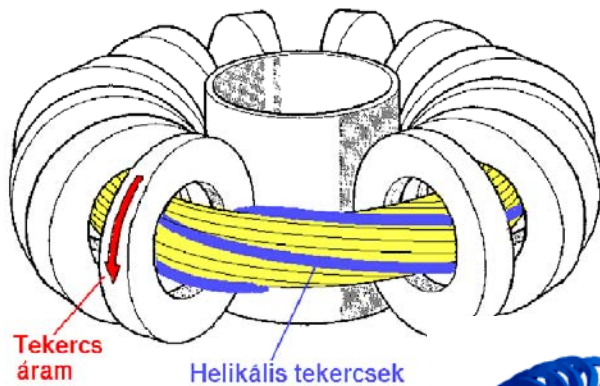
◆ $\tau_E = r/c_s$, kompresszió kell



A mágneses erővonalak zárásával tórusz alakú berendezéseket kapunk. A tér görbülete miatt a részecskék mozgása kissé letér az erővonalokról: helikálisan felcsavart erővonalak kellene.

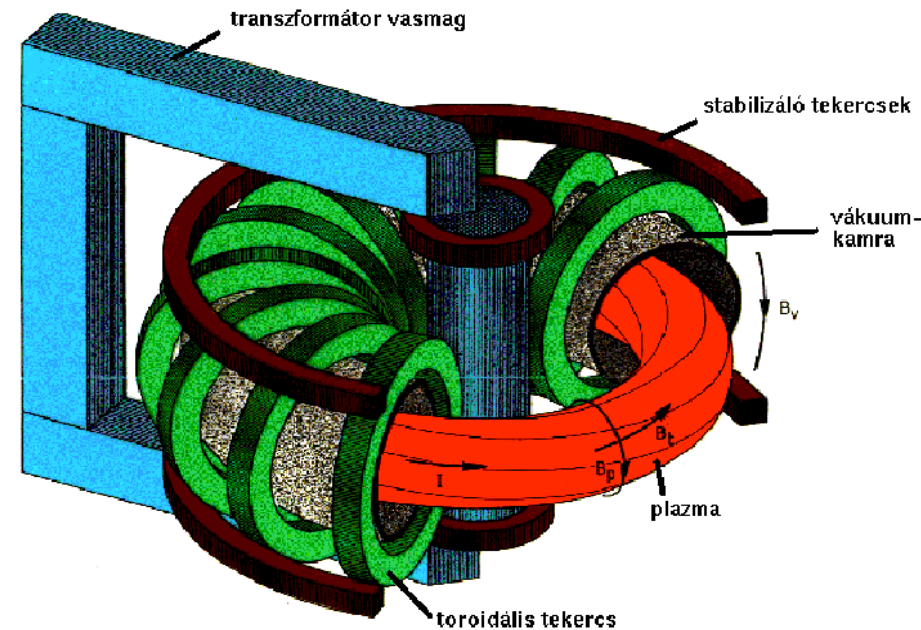
Az összes mai berendezés helikális mágneses teret használ.

Helikális tér külső tekercsekkel,
v. geometriával: **Sztellarátor**



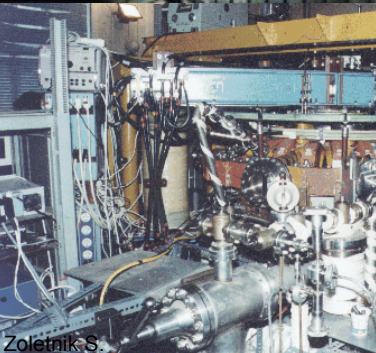
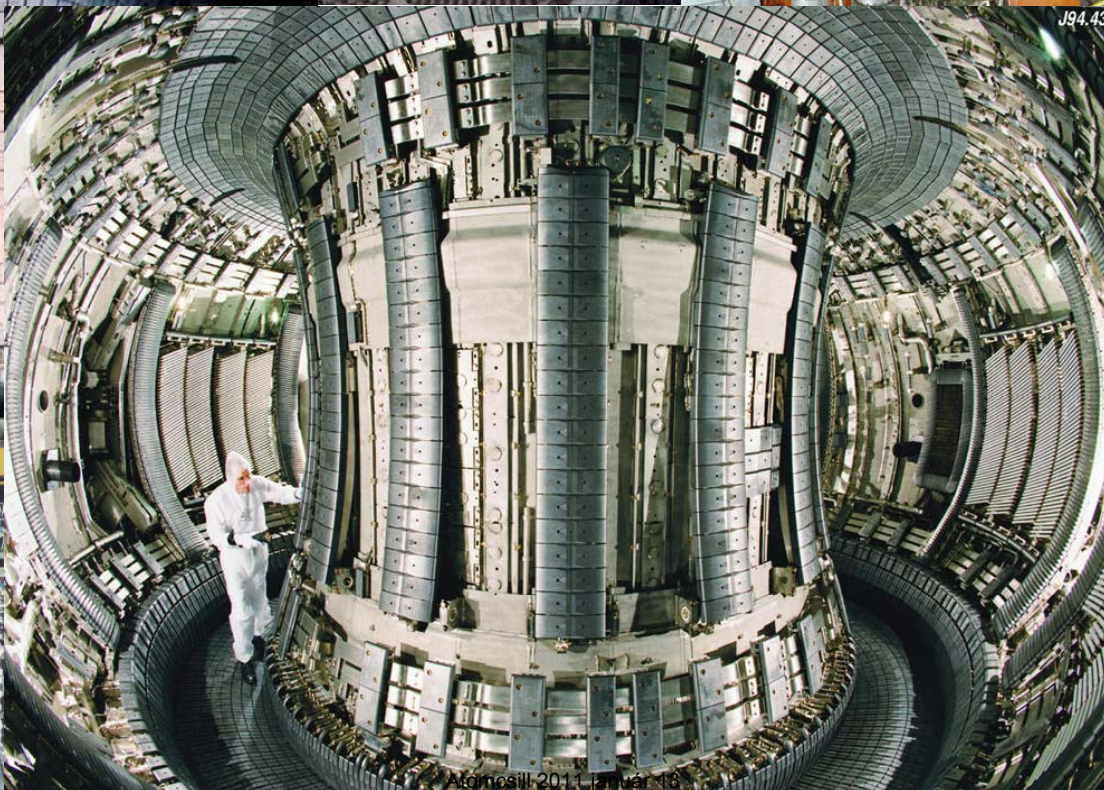
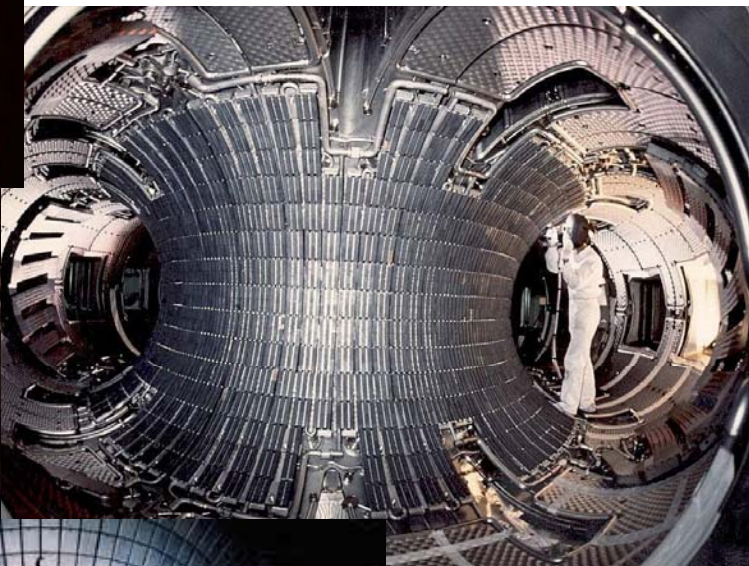
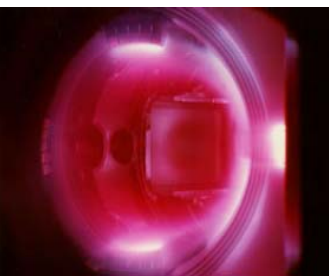
Nem kell plazmaáram.
Alapvetően állandó működés.
Bonyolult geometria

Helikális tér plazmaárammal:
Tokamak

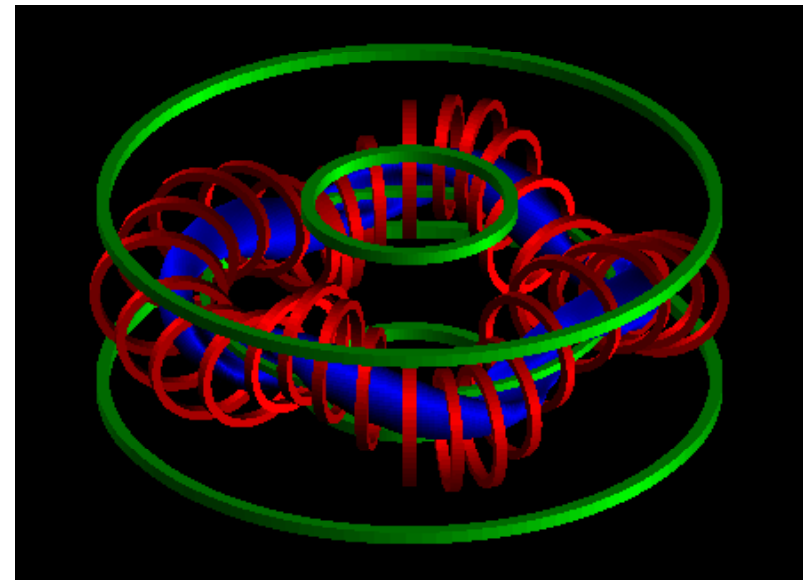
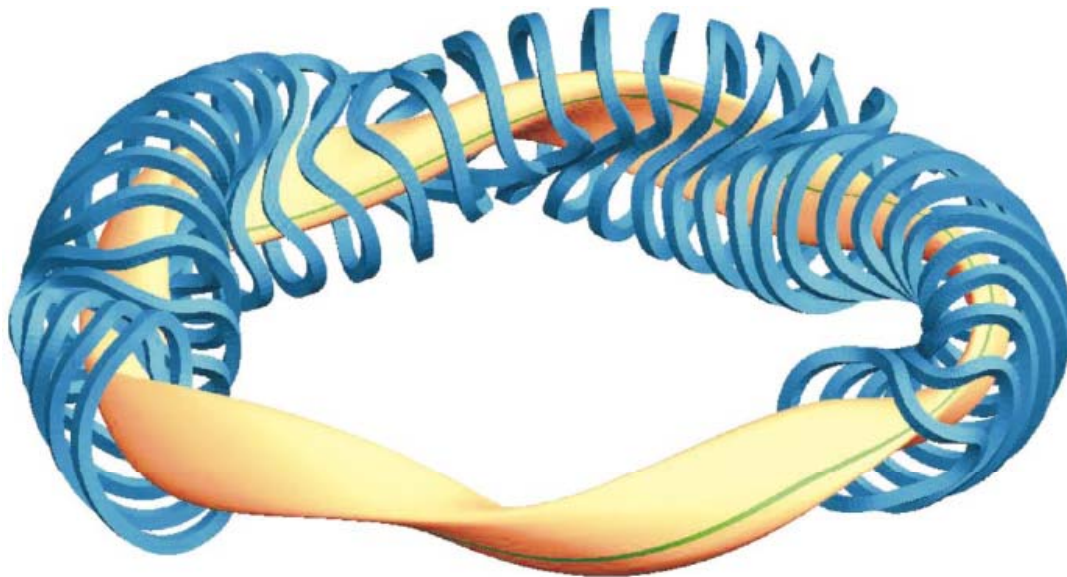
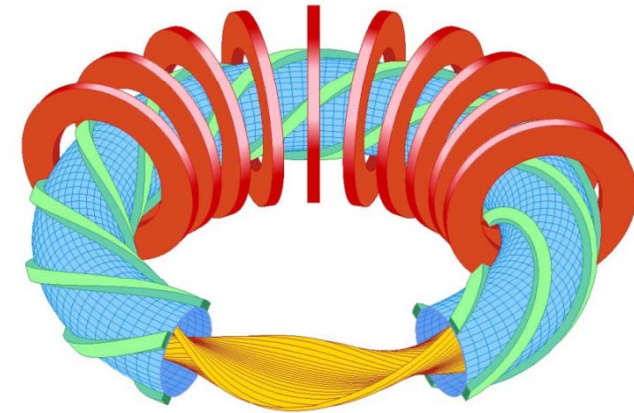
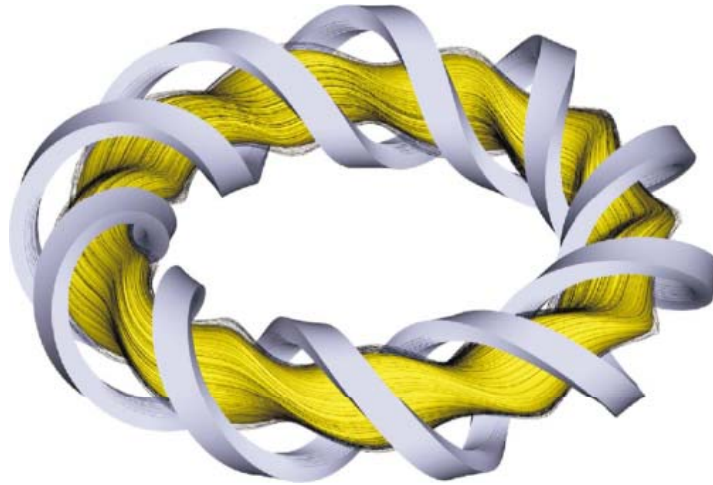


A plazmaáram szükséges a
mágneses konfigurációhoz.
Egyszerű geometria

Létező tokamak berendezések

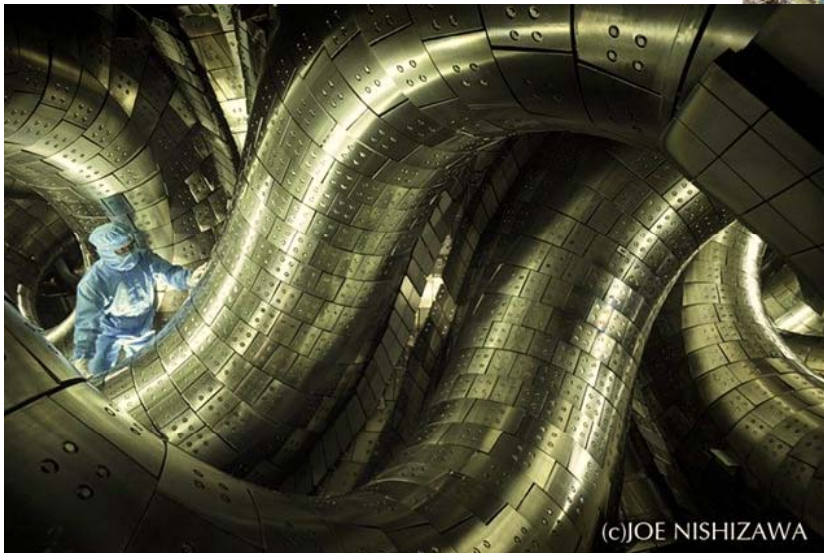
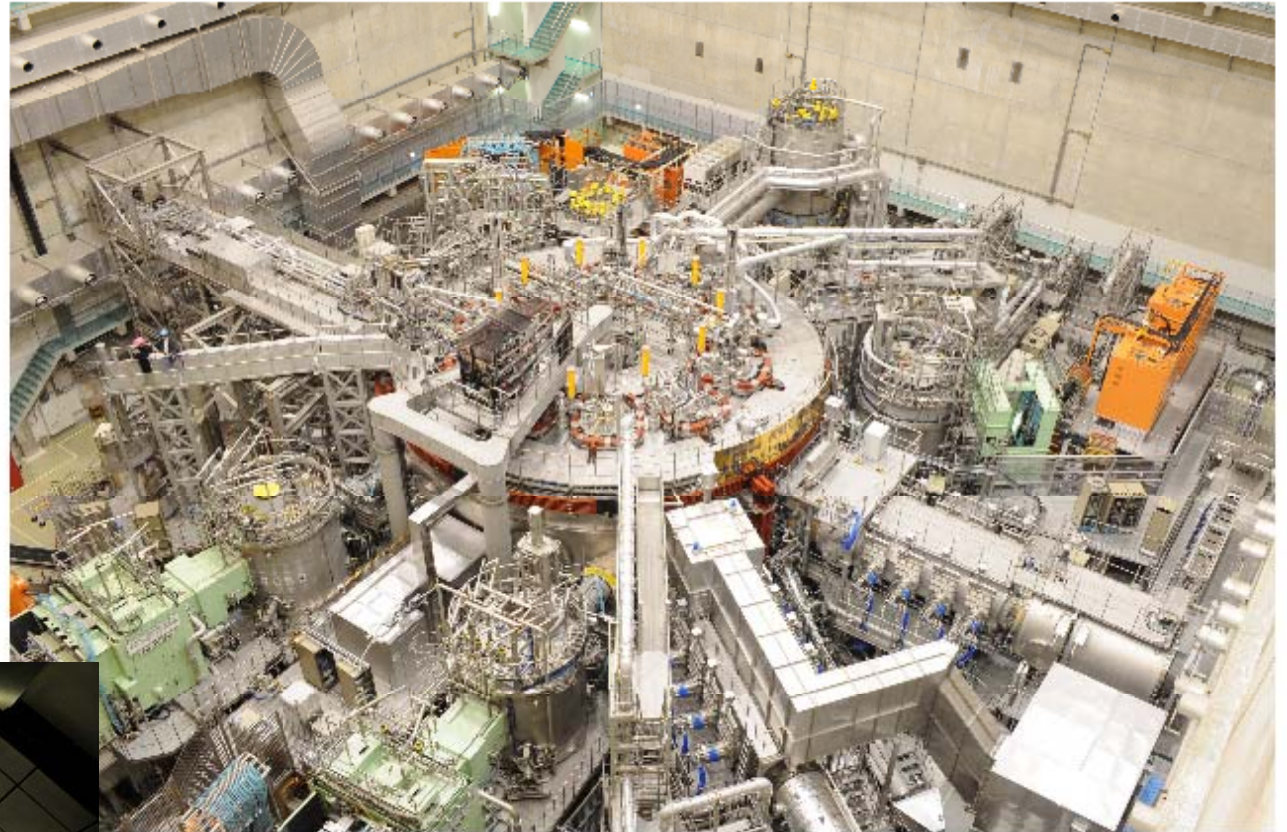


A tokamakok elterjedése után a sztellarátorok népszerűtlenek lettek
Néhány lelkes csapat továbbfejlesztette őket és lehet, hogy
A jövőben valamikor megint a tokamak versenytársai
lesznek



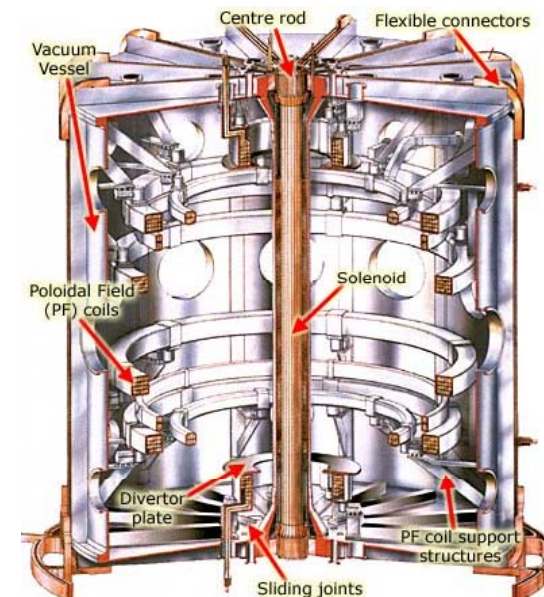
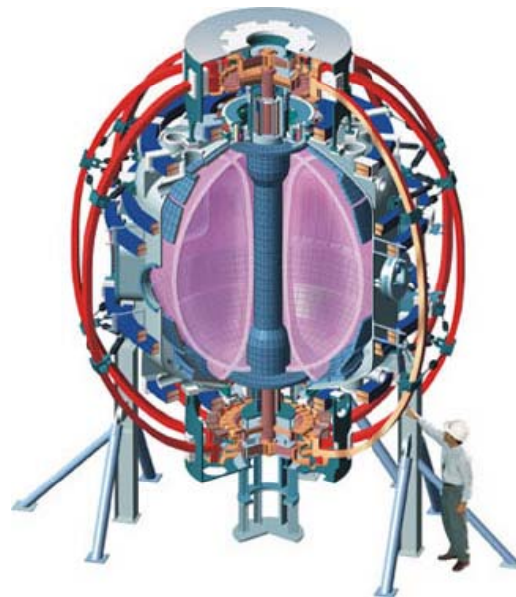
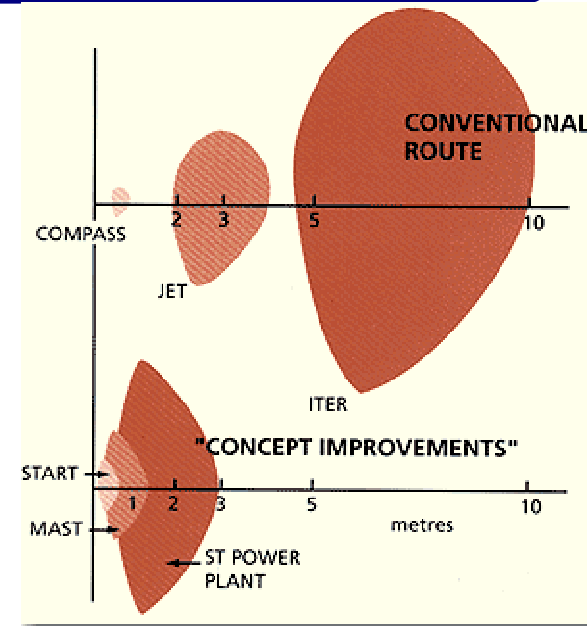
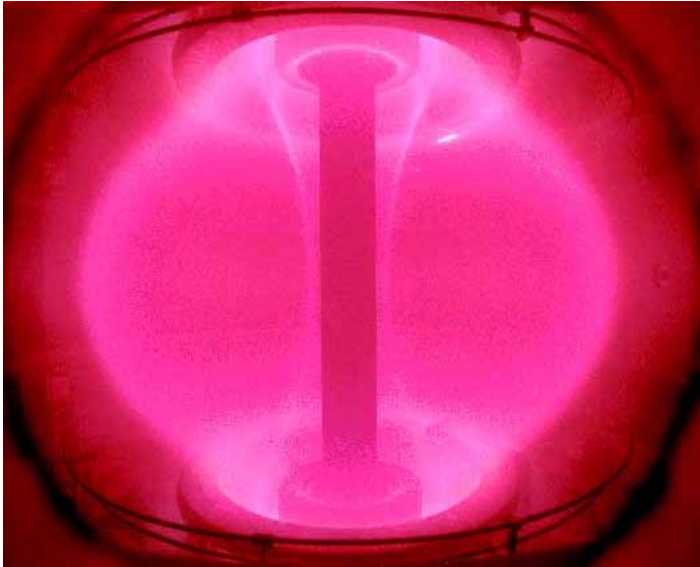
Egy óriási Heliotron Japánban

LHDの写真



Kompakt (szférikus) tokamak

A tórusz nagysugarát csökkentve majdnem gömb alakú plazmát lehet csinálni: **kompakt (szférikus) tokamak**



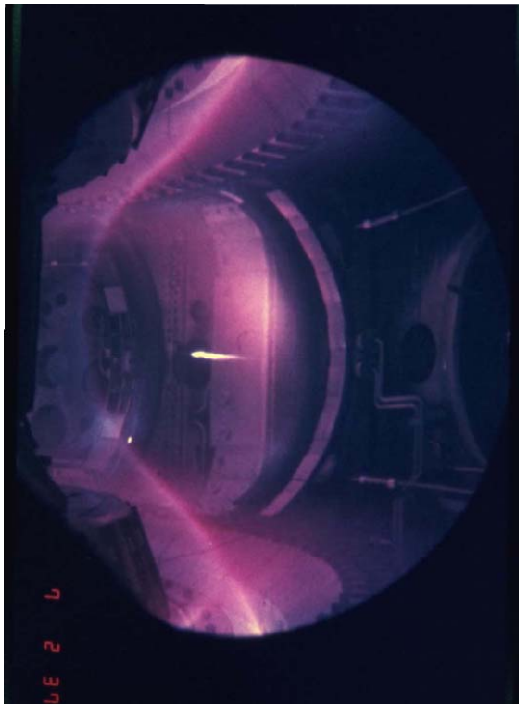
Vákuum: A plazma igen ritka, kb. 1/100000 légtörő sűrűségű ezért vákuumrendszer kell

Mágneses tér:

- Legtöbb berendezésen réz tekercs, hatalmas teljesítmény (JET: 800MW)
- Néhány berendezésen szupravezető: kiforrott technika, elhanyagolható teljesítmény

Anyagutánpótlás:

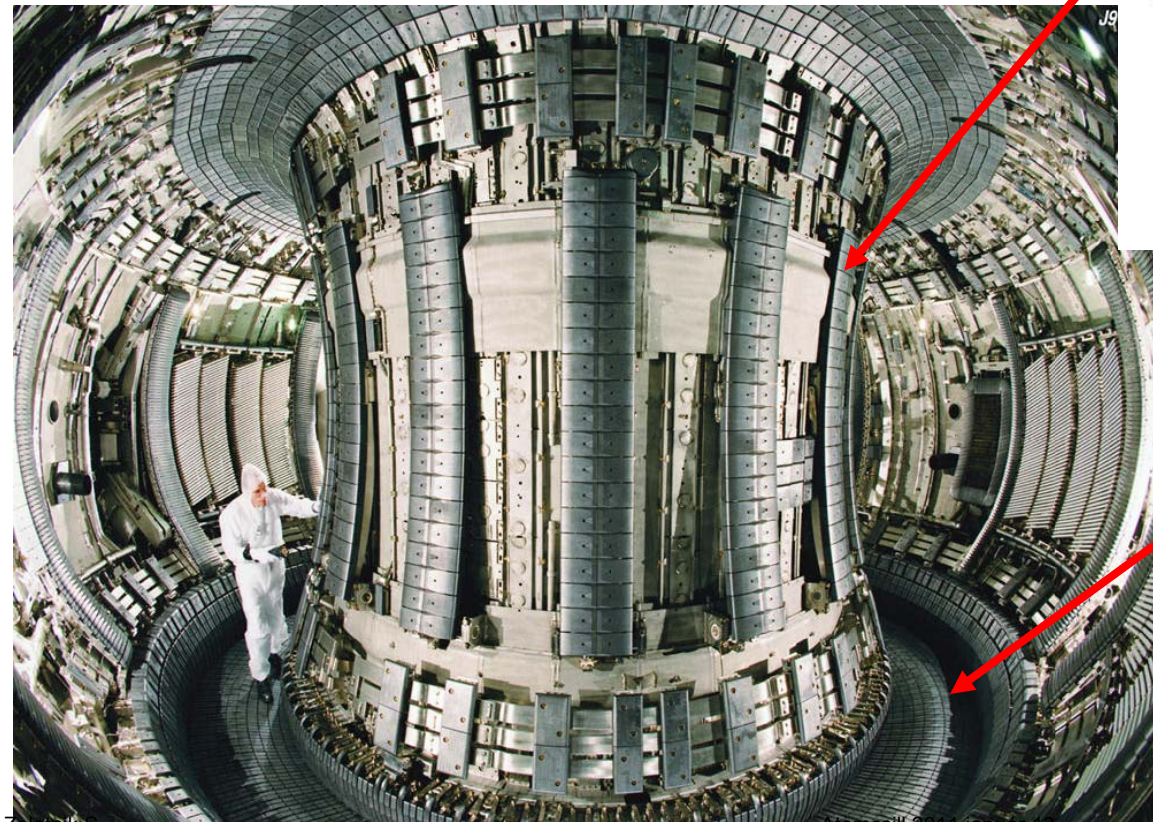
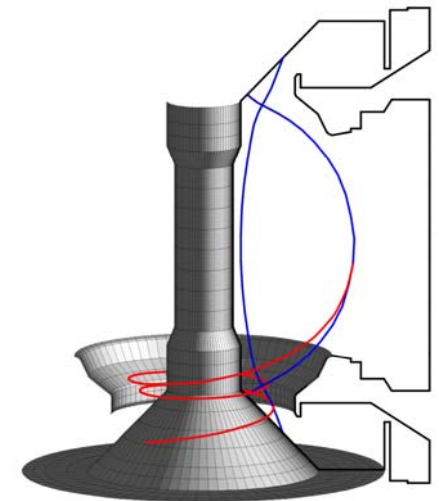
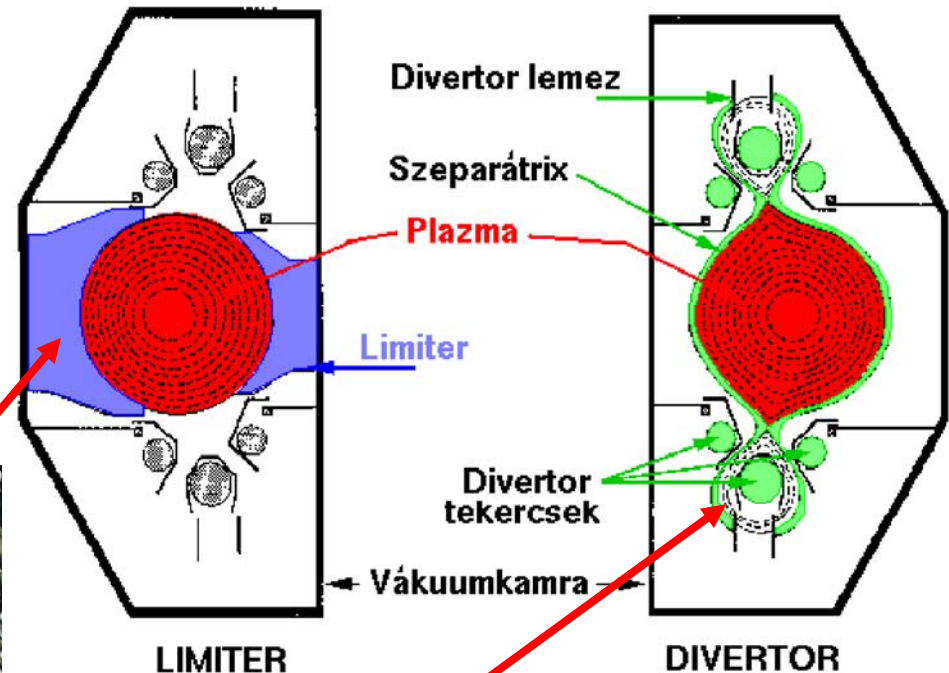
- Gázbeeresztés (nem hatékony)
- Hidrogén jég (pellet) belövés:
 $v = \text{km/s}$, $f = 10\text{Hz}$



A plazma-fal kölcsönhatás szabályozása

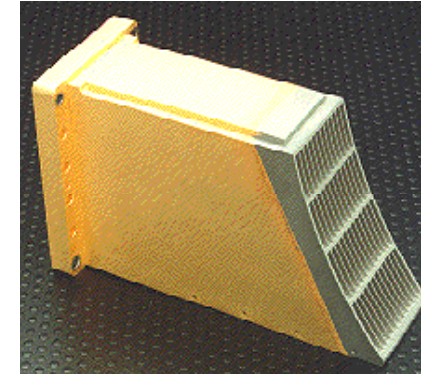
A plazma szélére kijutó részecskék bombázzák a falat amelynek anyaga szennyezi a plazmát.

Kontrollált plazma-fal kölcsönhatás:
divertor



Áram (tokamak):

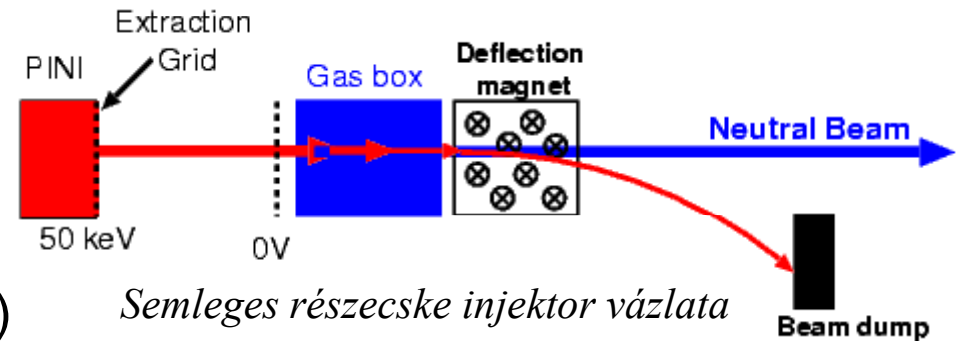
- Induktív áramgerjesztés (csak impulzus <10 sec)
- Mikrohullámú áramhajtás (1 GHz-100 GHz, 1MW)



*Mikrohullámú
(lower hibrid)
antenna*

Fűtés:

- Ohmikus fűtés (kevés a fúzióhoz)
- Semleges részecske (NBI)

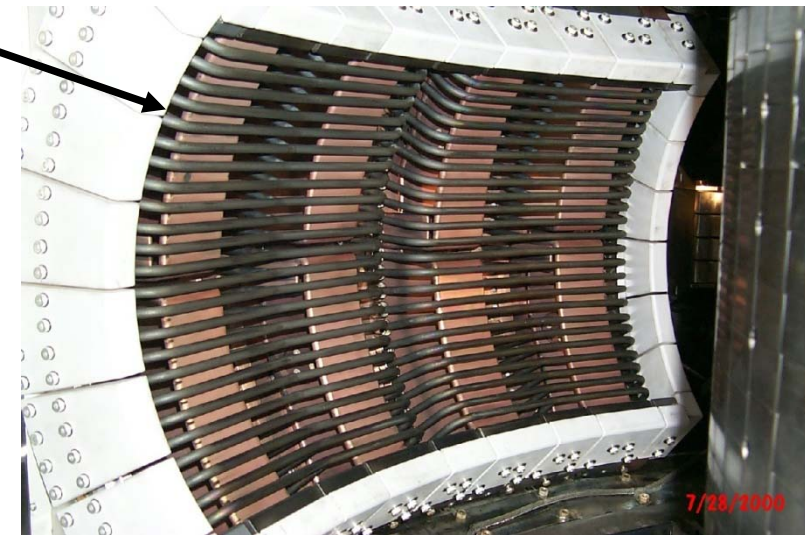
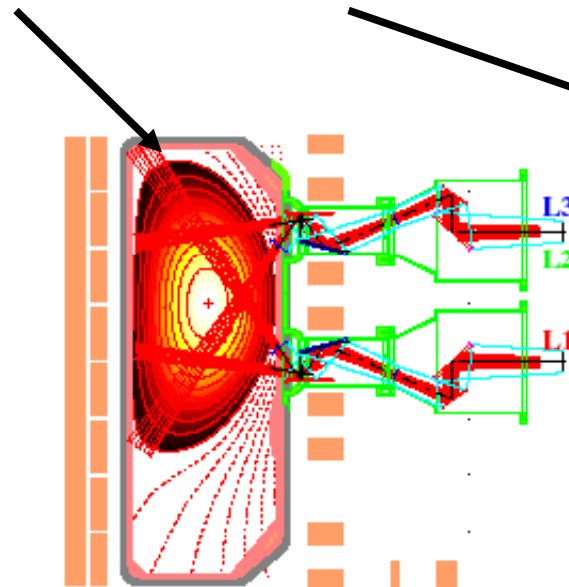


Semleges részecske injektor vázlat

- Ion-ciklotron frekvencia (30 MHz)
- Elektron-ciklotron frekvencia (100GHz)

Teljesítmények:

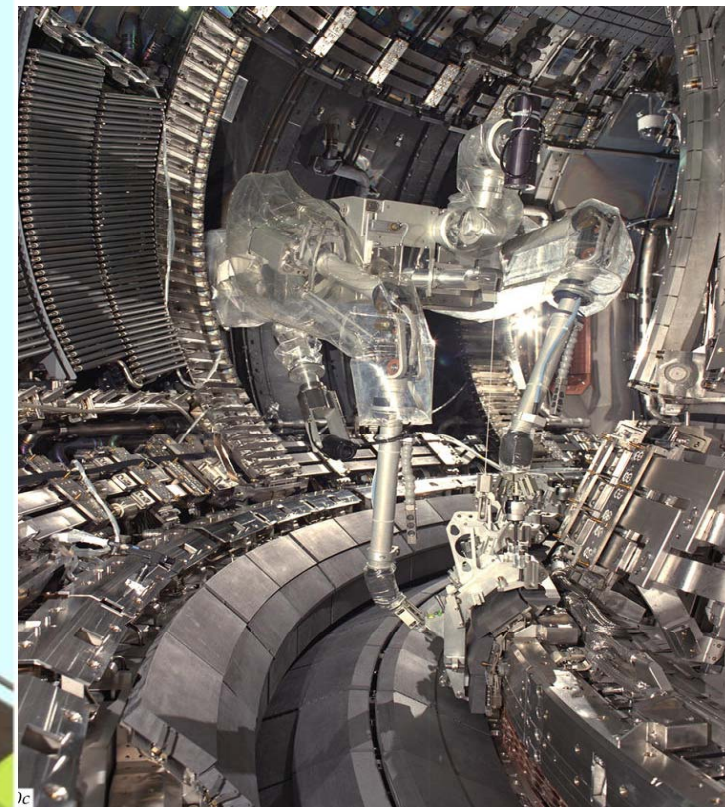
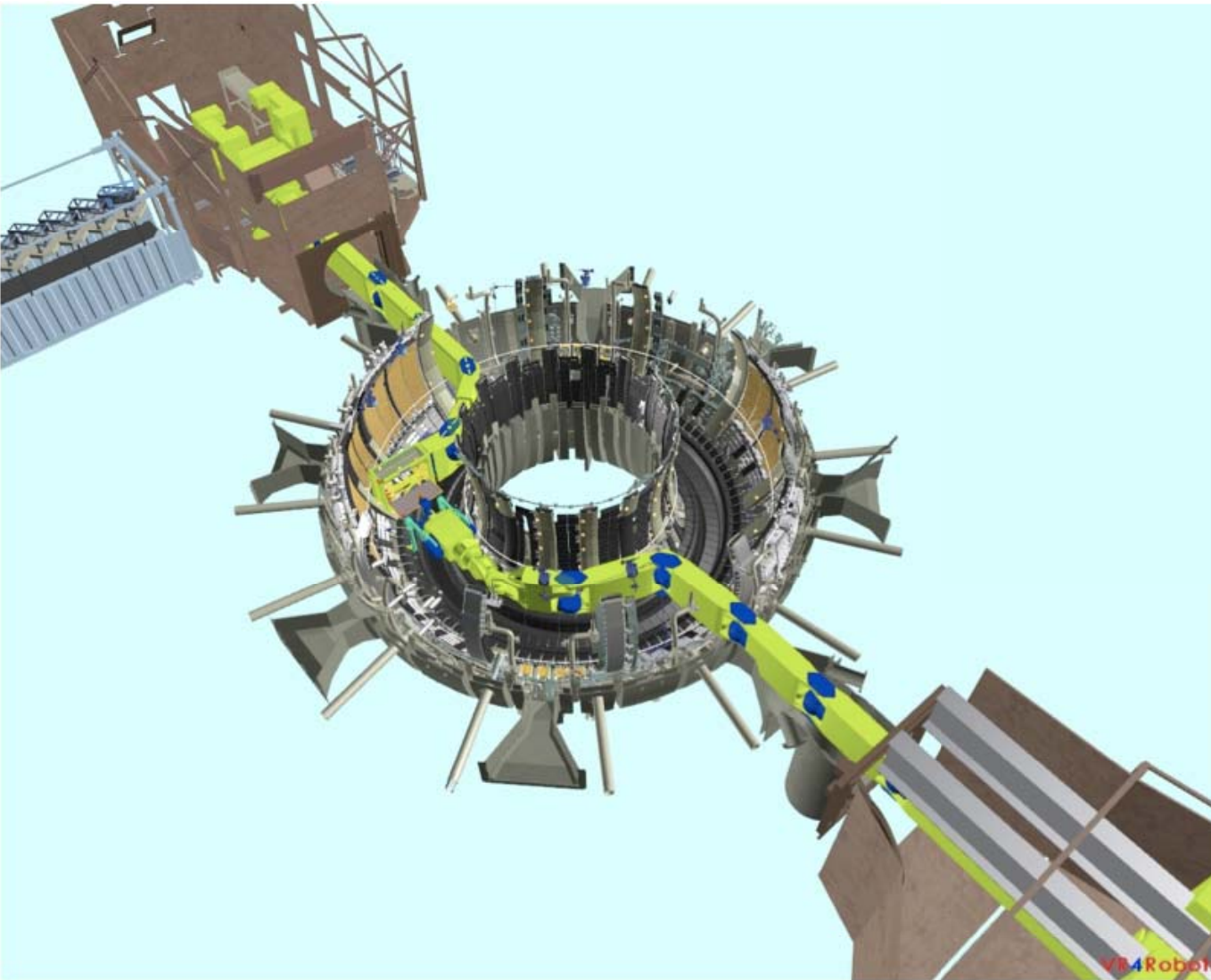
0.5-10 MW/blokk
< 40 MW/berendezés



A tokamakok nagy része csak D plazmával foglalkozik.

T kompatibilis berendezés: **JET**

T szennyezett környezetben távvezérelt szerelési módokat is kipróbáltak.



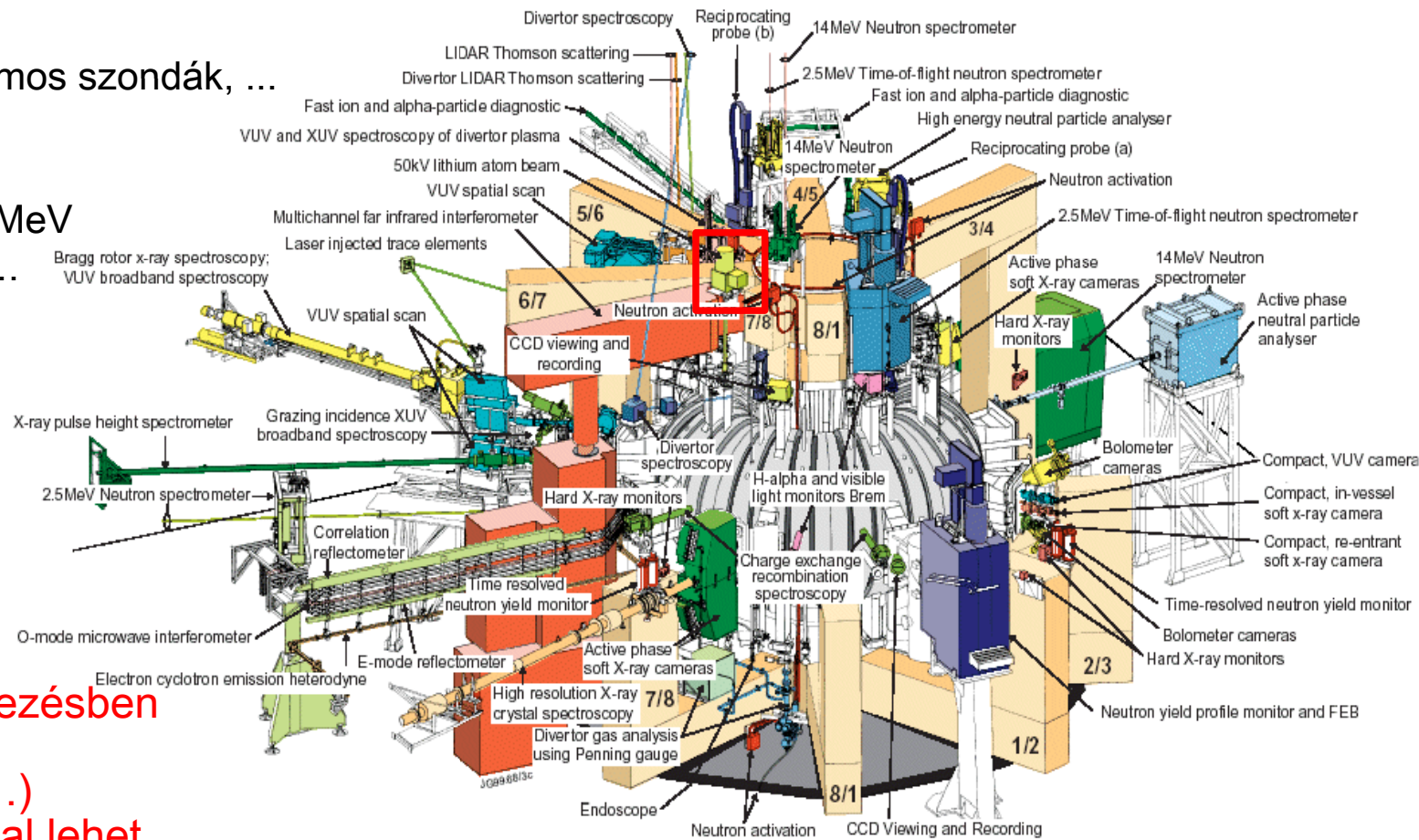
Divertor szerelés a JET-en

A fúziós kutatások első 20 évében a plazma belsejéről csak igen kevés információ volt. A szokásos fizikai mérőműszerek nem alkalmasak egy 10^6K hőmérsékletű plazmában mérni.

Speciális mérési eljárások kellene: plazmadiagnosztika

Ehhez szinte az egész fizika eszköztárát használjuk:

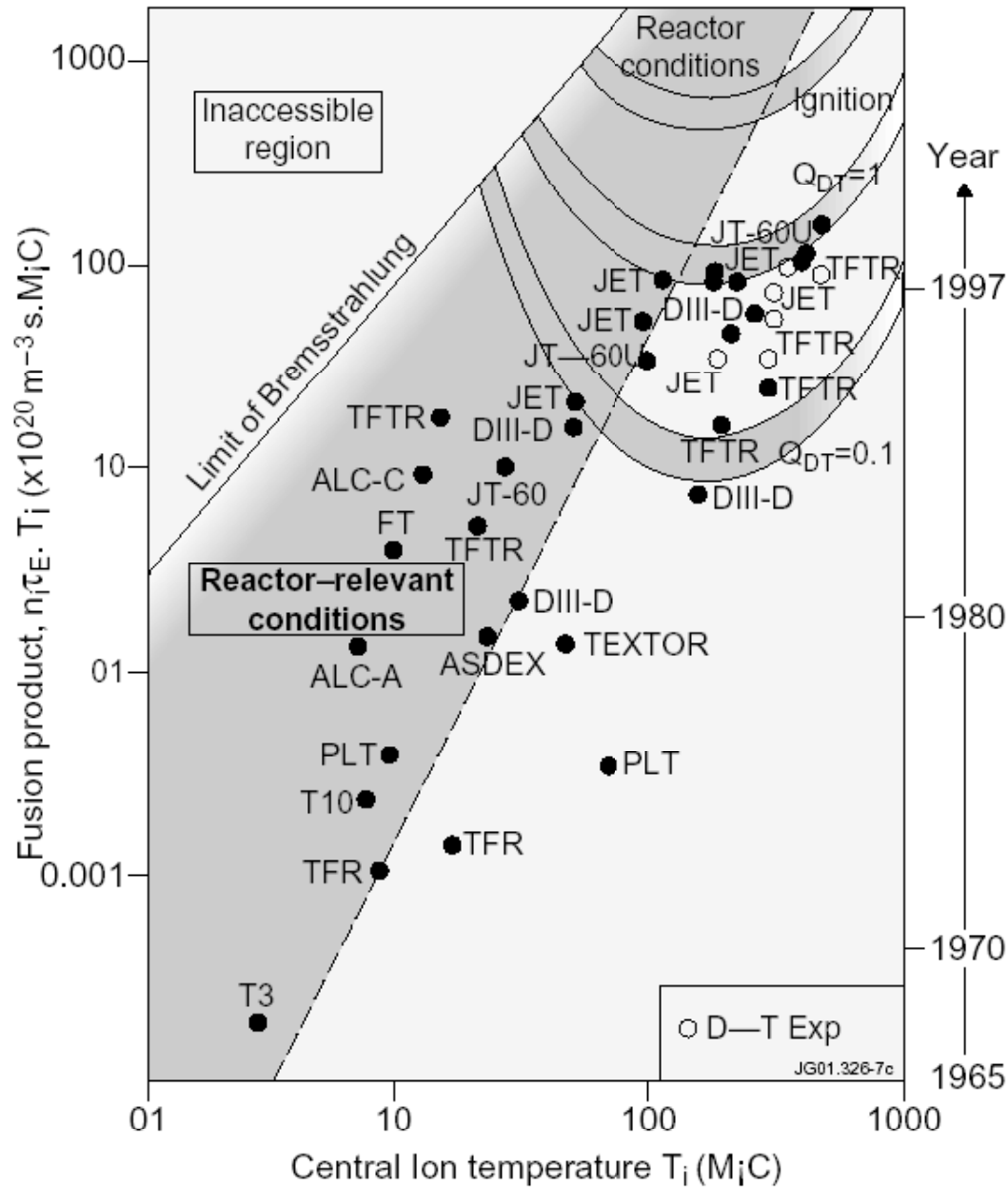
- Elektromágneses hullámok, sugárzás: 0Hz - MeV
- Mágneses hurkok, elektromos szondák, ...
- Spektroszkópia, lézerek
- Atomnyaláb szondák: termikus \rightarrow MeV
- Részecske analizátorok



Egy mai modern berendezésben a legtöbb paramétert (n_e , n_i , T_e , T_i , I_p , Z_{eff} , E , ...) tér- és időbeli felbontással lehet mérni.

A JET tokamak diagnosztikái.

Piros keretben az RMKI hozzájárulás



Amit a mai berendezések nem tudnak:

- Alfa részecse fűtés
- $Q > 1$ energiamérleg
- Trícium termelés Li-ból (tritium breeder)

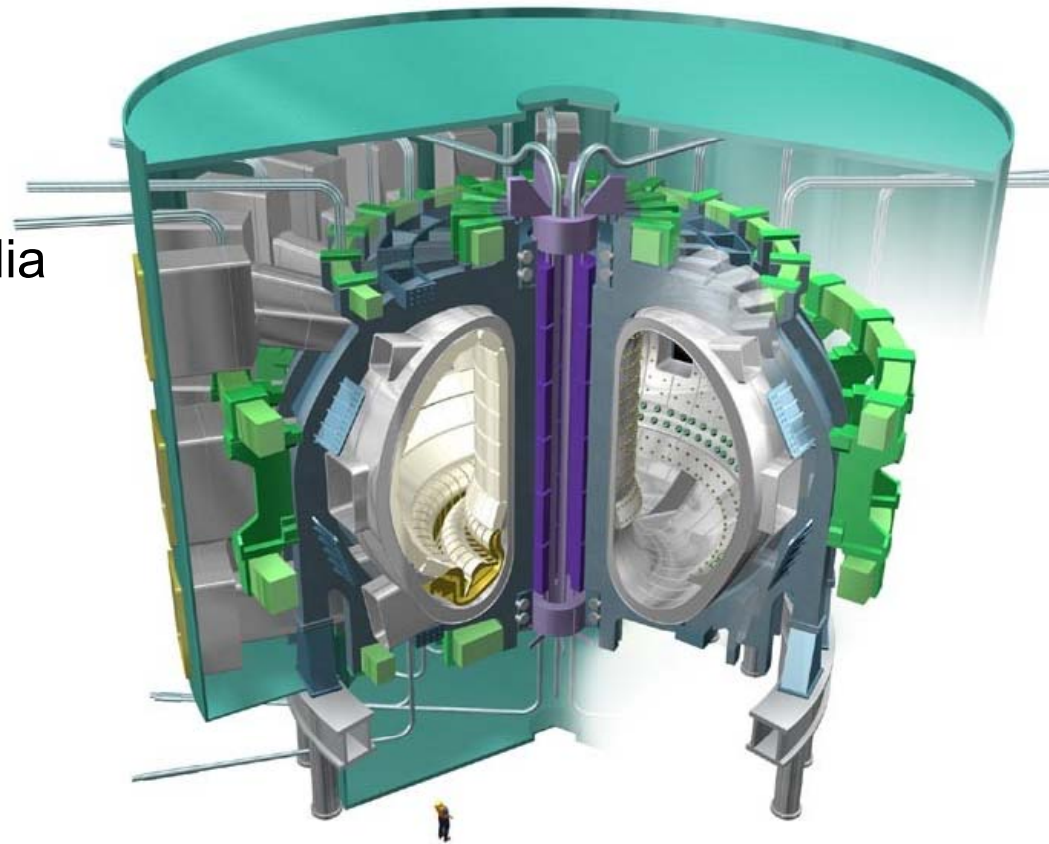
A reaktorig 1 közbenső lépés kell:

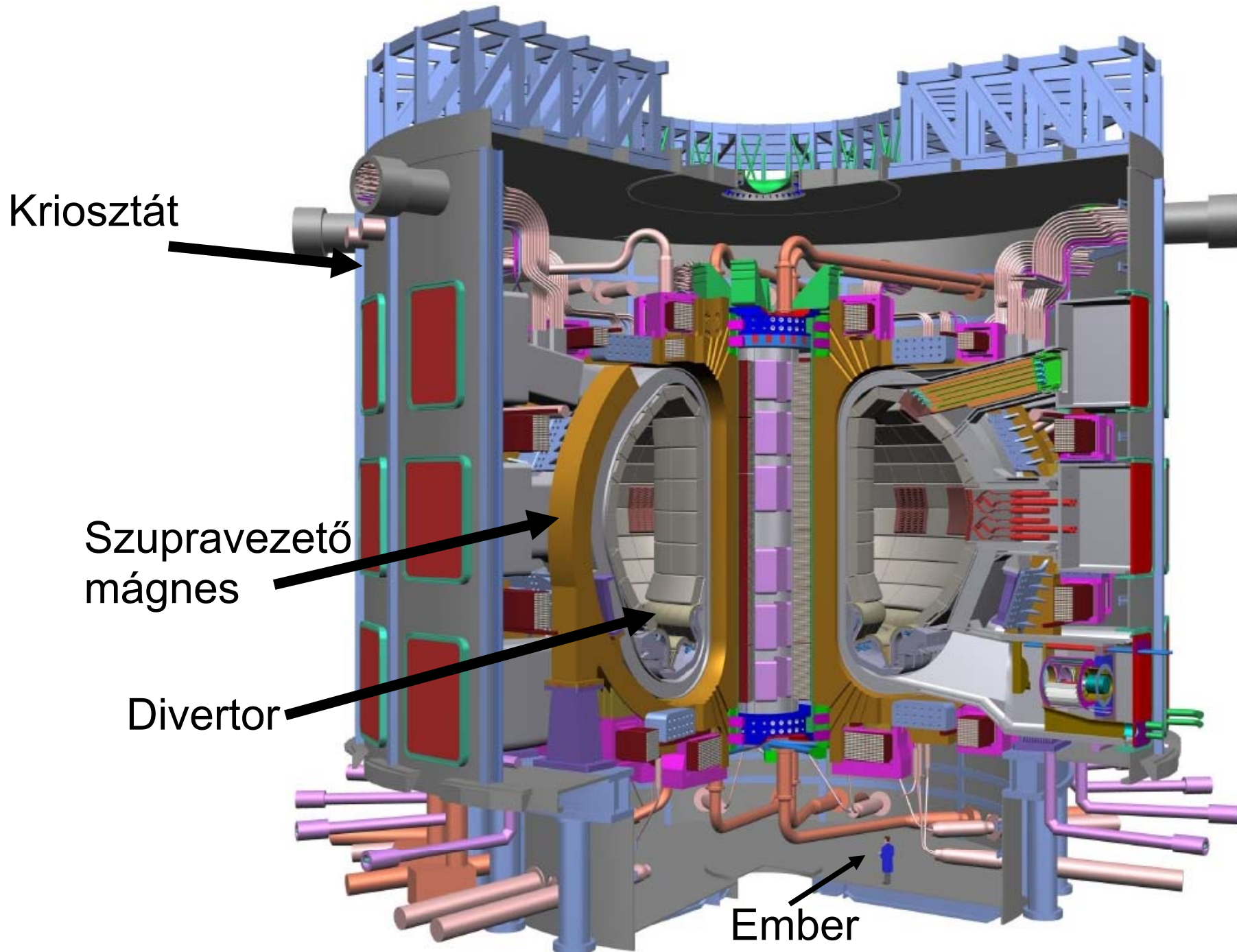
ITER

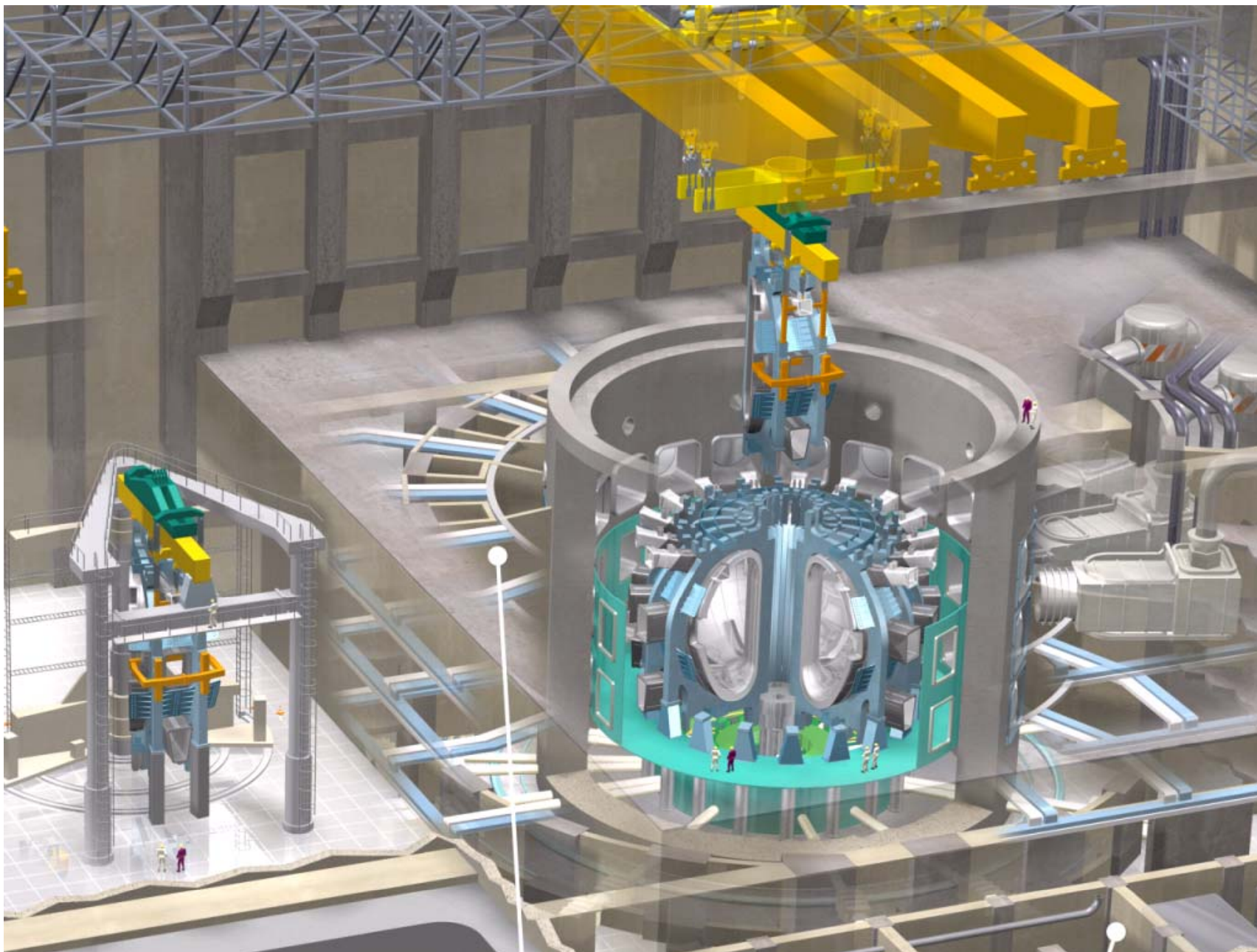
(International Thermonuclear Experimental Reactor)

- EU-Japán-Orosz-USA-Kína-Korea-India projekt
- Legalább $Q = 10$
- Tritium termelés tesztelése
- kb. $4 \cdot 10^9$ EUR, 8 év építés
- Cadarache, Franciaország

Bár a fizikában még évtizedekig sok tennivaló lesz, az ITER építésében alapvető a technológia







~100m

A fúziós energiatermelés technológiájának praktikus demonstrációja:

- Plazma előállítás, vezérlés
- Trícium termelés
- Szupravezető berendezés

Mi nem lesz:

- Áramtermelés
- Folyamatos üzem
- Sok neutron (nem roncsolják a berendezést)

Az ITER után nem lehet még kereskedelmi erőművet építeni
Kell még egy ipari demonstráció:

DEMO

Fúziós erőművek tehát csak a XXI század 2. felében lesznek.