

# Napszelidítés: *Energiatermelés Szabályozott Magfúzióval?*

Zoletnik Sándor

KFKI-Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet  
Magyar Euratom Fúziós Szövetség  
[zoletnik@rmki.kfki.hu](mailto:zoletnik@rmki.kfki.hu)



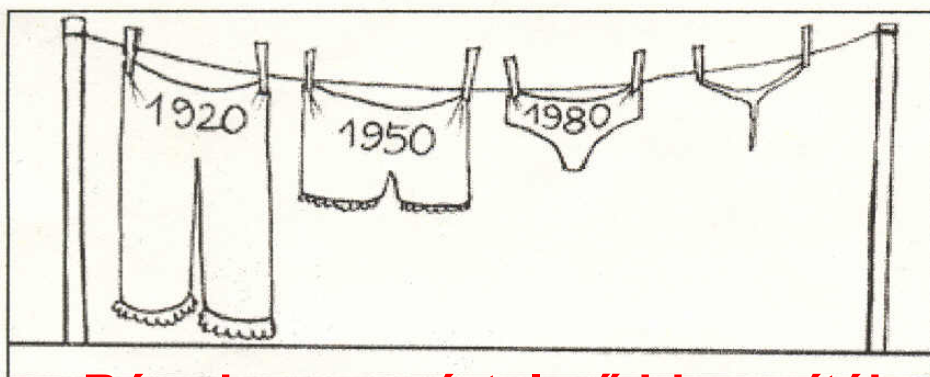
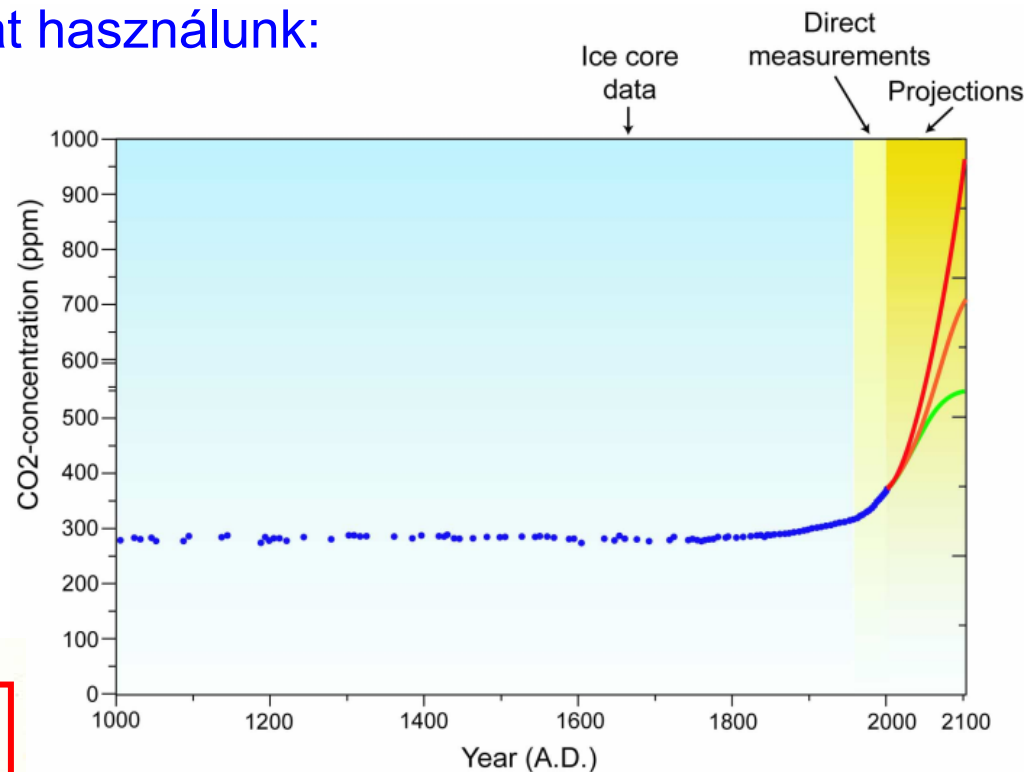
KFKI-RMKI



Magyar Euratom  
Fúziós Szövetség

## Ma dominánsan fosszilis energiaforrásokat használunk:

- Források végesek
- Globális energiafelhasználás növekszik
  - > árak emelkednek
- CO<sub>2</sub> kibocsátás:
  - koncentráció kétségtelenül növekszik
- Globális felmelegedés?



**Bár nincs egyértelmű bizonyíték, egyre több jel utal arra, hogy a globális felmelegedést az emberi tevékenység okozza.**

## CO<sub>2</sub> mentes új energiaforrások:

### • Napenergia:

Magyarországon legalább 1000 km<sup>2</sup> terület kellene (csak villamosenergiához):

1000 km<sup>2</sup>=10<sup>9</sup> m<sup>2</sup> -> **100 m<sup>2</sup>/fő**

- Beépített környezetben nem elég a hely
- Költség magas:

Nem valószínű, hogy olcsóbb lesz mint: 10000 Ft/m<sup>2</sup>

100m<sup>2</sup> -> 1 mioFt/fő 10 év élettartam -> 10x3000 kWh/fő

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



### • Szélenergia:

1MW csúcsteljesítmény, 10% kihasználtság 10<sup>6</sup> kWh/év

-> **1 szélkerék/300 fő**

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



### • Bioenergia:

Nagyságrendekkel kisebb határfok mint a direkt napenergia

-> **nagyságrendekkel nagyobb terület**



További alapvető stratégiai problémák a megújuló energiaforrásokkal:

- Időben és térben egyenetlen:

Magyarországon Balatonnyi víztároló kellene csak a napi ingadozások kiegyenlítésére.

1 m<sup>3</sup> víz 100 m magasra: 10<sup>6</sup>J    1 lakos évi energiafogyasztása: 3x10<sup>6</sup>Wh=10<sup>10</sup>J, napi 3x10<sup>7</sup>J

Ha csak 10%-ot tárolni kell, akkor naponta 3 m<sup>3</sup>/fő vizet kell 100m magasra pumpálni.

Balaton: 70x3 km, 2x10<sup>8</sup>m<sup>2</sup> → 4 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>

- 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**

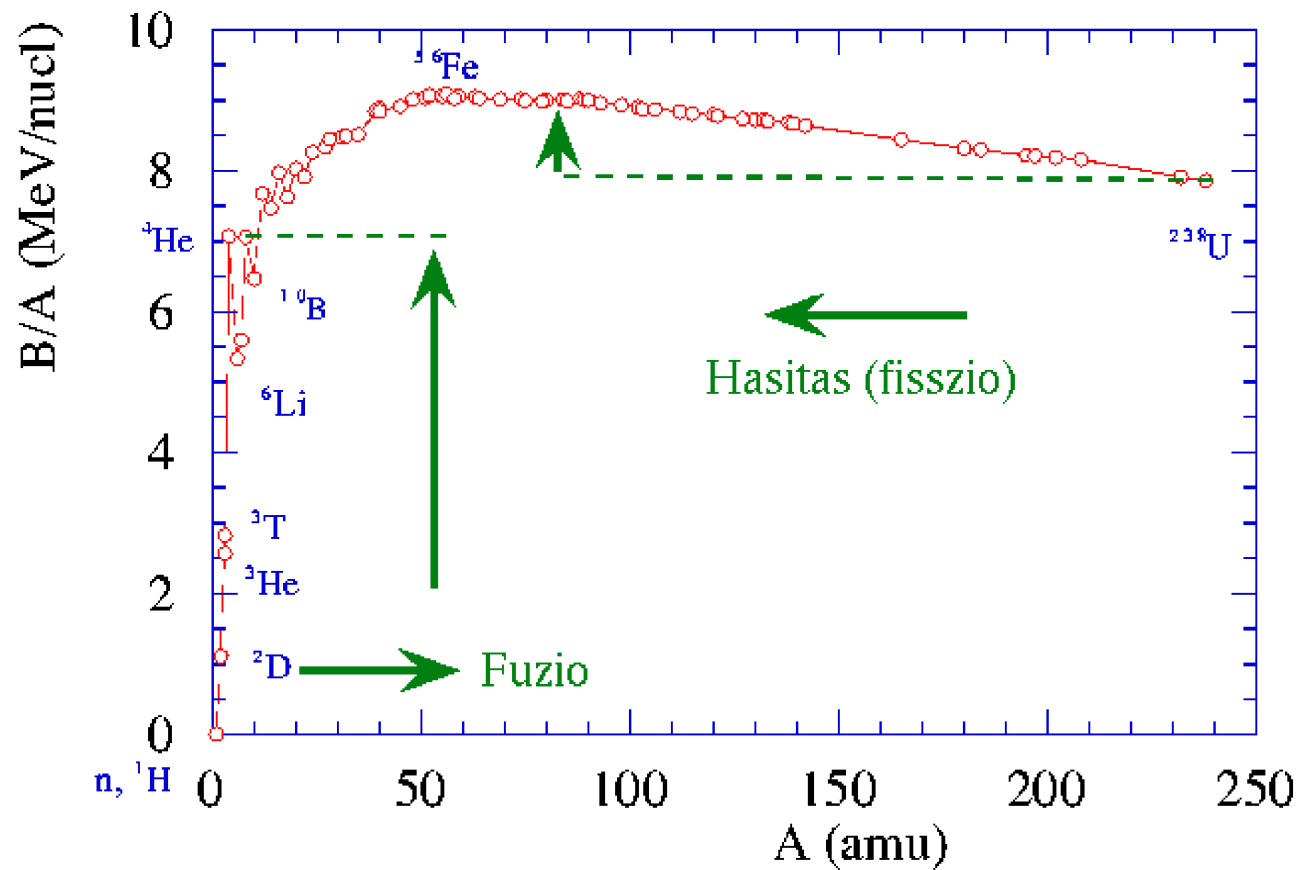
**Az összes *nem-megújuló* forrás valamilyen anyagot alakít át más anyaggá:**

- Kémiai átalakulás (atomhég): <1 eV/atom -> 100-1000 kg/fő/év
- Nukleáris átalakulás (atommag): > 1 MeV/atom -> 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**



*Atommagok egy nukleonra eső kötési energiája*

**Az atommagok kötési energiája a vas környékén a legnagyobb.**

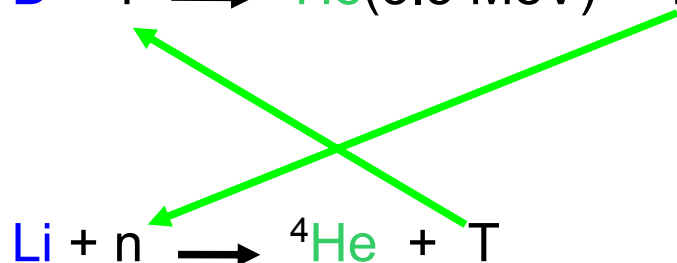
Erősebb kötést lehet elérni:

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

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

A kezdetek: hidrogénbomba, atomerőmű → **fúziós erőmű?**

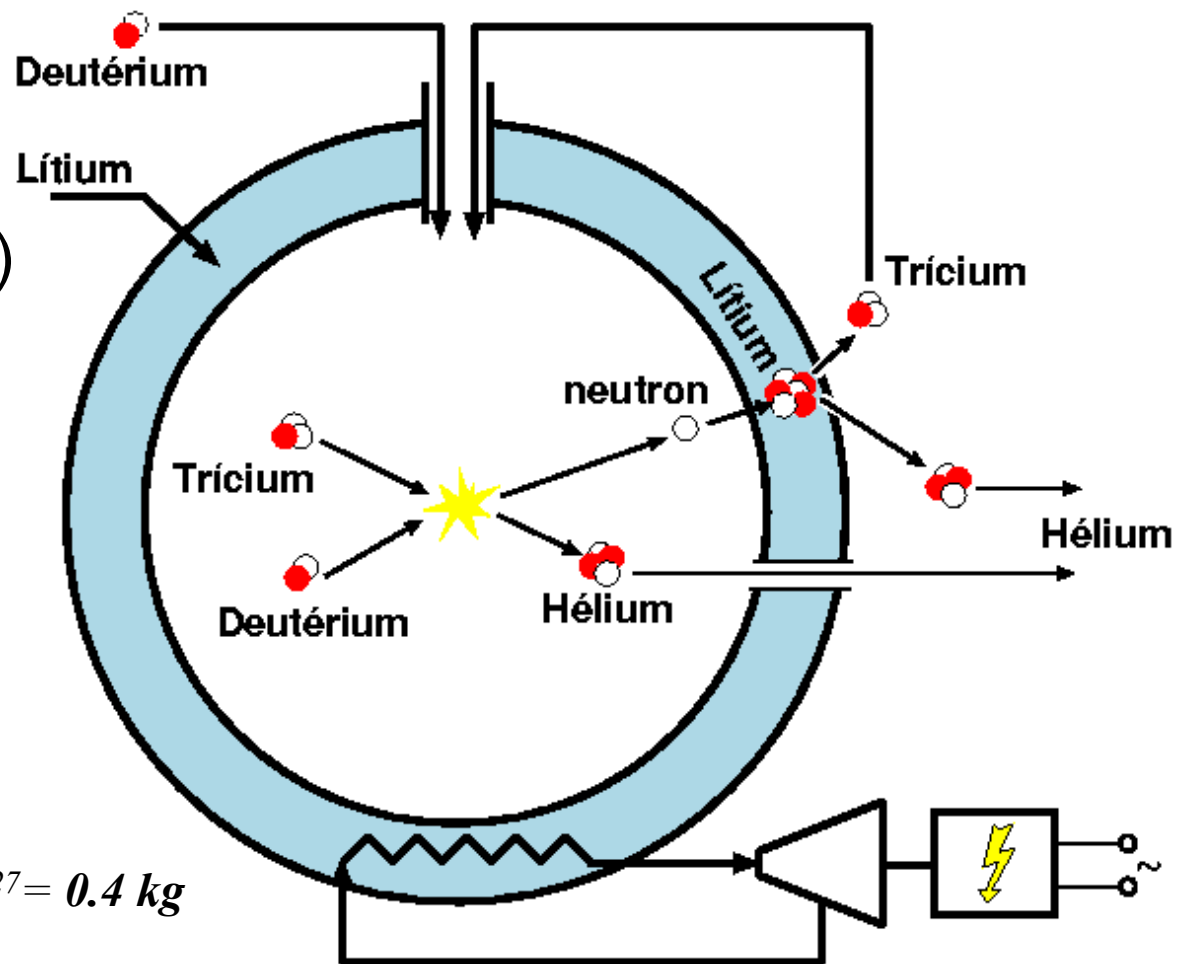
A reakciók:



Napi anyagszükséglet 1 GW-os erőműre:

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

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



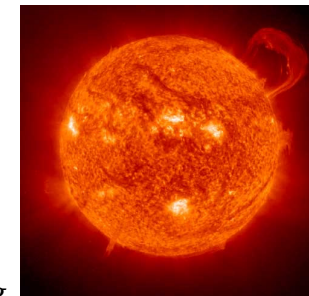
- Nincsenek radioaktív végtermékek
- Kiindulási anyagok korlátlanul és egyenletesen elosztva állnak rendelkezésre



Az atommagok taszítják egymást

→ csak gyorsan mozgó magokkal lehet fúziós reakciót létrehozni:

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

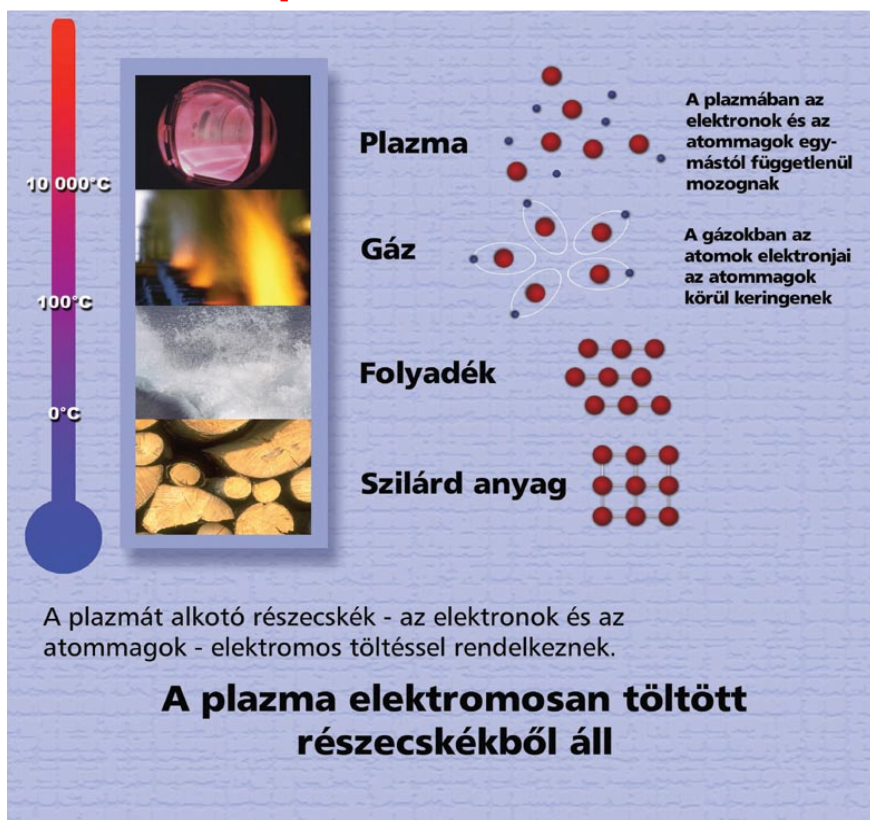


A Nap hatalmas térfogatában  
10 millió C hőmérséklet is elég

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

→ az elektronok leszakadnak az atommagokról

→ **plazma**



**Plazma** A plazmában az elektronok és az atommagok egymástól függetlenül mozognak

**Gáz** A gázokban az atomok elektronjai az atommagok körül keringenek

**Folyadék**

**Szilárd anyag**

A plazmát alkotó részecskék - az elektronok és az atommagok - elektromos töltéssel rendelkeznek.

**A plazma elektromosan töltött részecskékből áll**

## Plazma - az ismeretlen ismerős

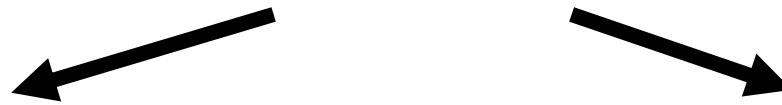
A plazmaállapot a természetben rendkívül elterjedt.  
A világegyetem anyagának több mint 99 százaléka plazma!



Itt a Földön is számtalan helyen találkozhatunk plazmával.  
Sokszor talán nem is sejtjük, hogy mennyi, a hétköznapiokból jól ismert dolognak van köze a plazmához.

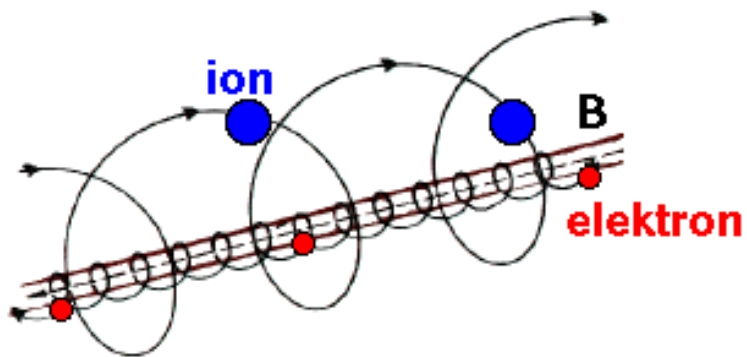


Lawson kritérium:  $n\tau_E > 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$



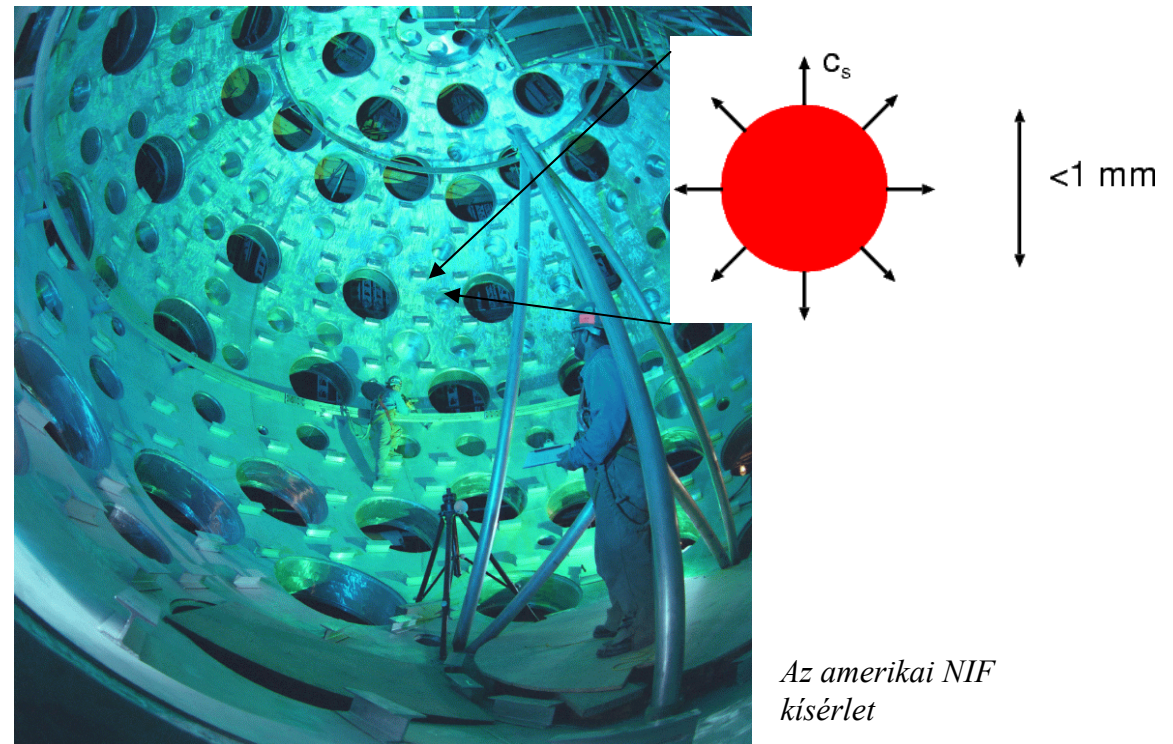
## Mágneses plazmaösszetartás:

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



## Tehetlenségi összetartás:

$\tau_E = r/c_s$ , kompresszió kell

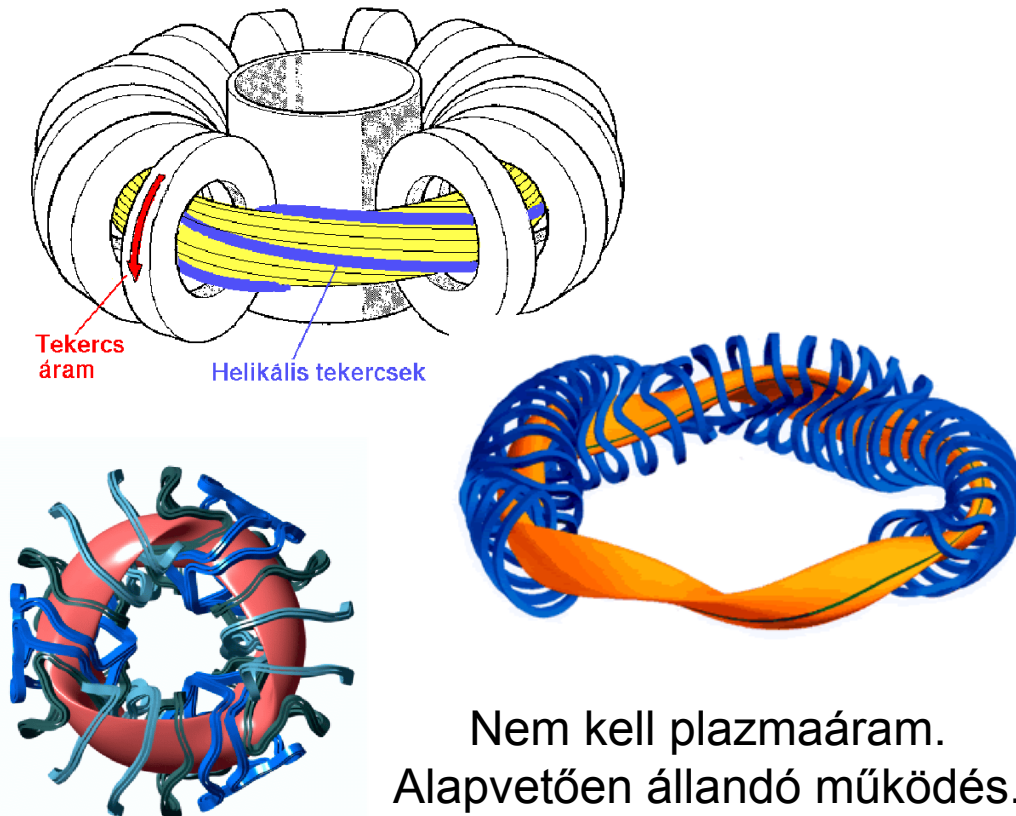




A mágneses erővonalak zárásával tórusz alakú berendezéseket kapunk. A tér görbülete miatt a részecskék mozgása kissé letér az erővonalakról: helikálisan felcsavart erővonalak kellene.

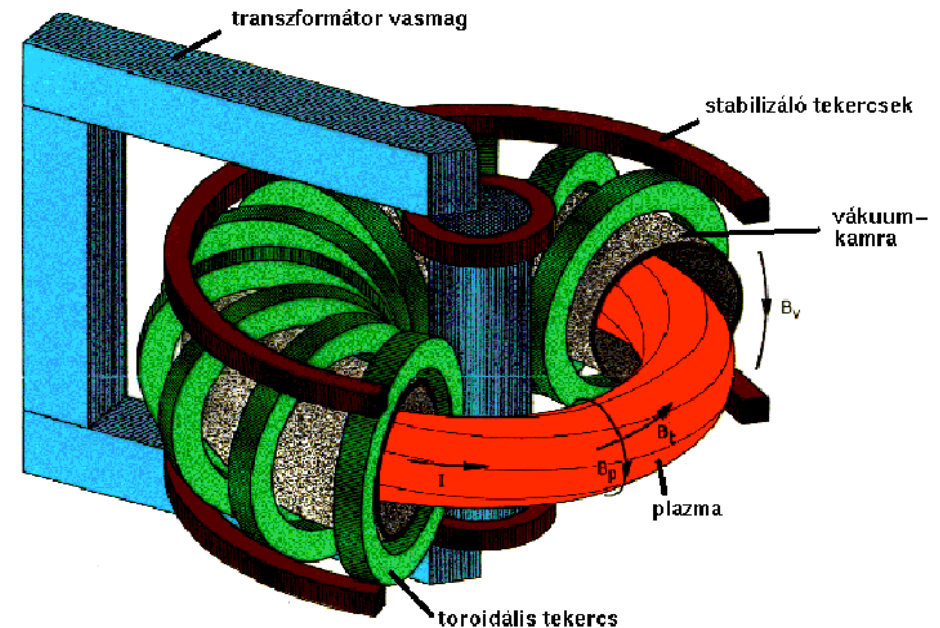
**Az összes mai berendezés helikális mágneses teret használ.**

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

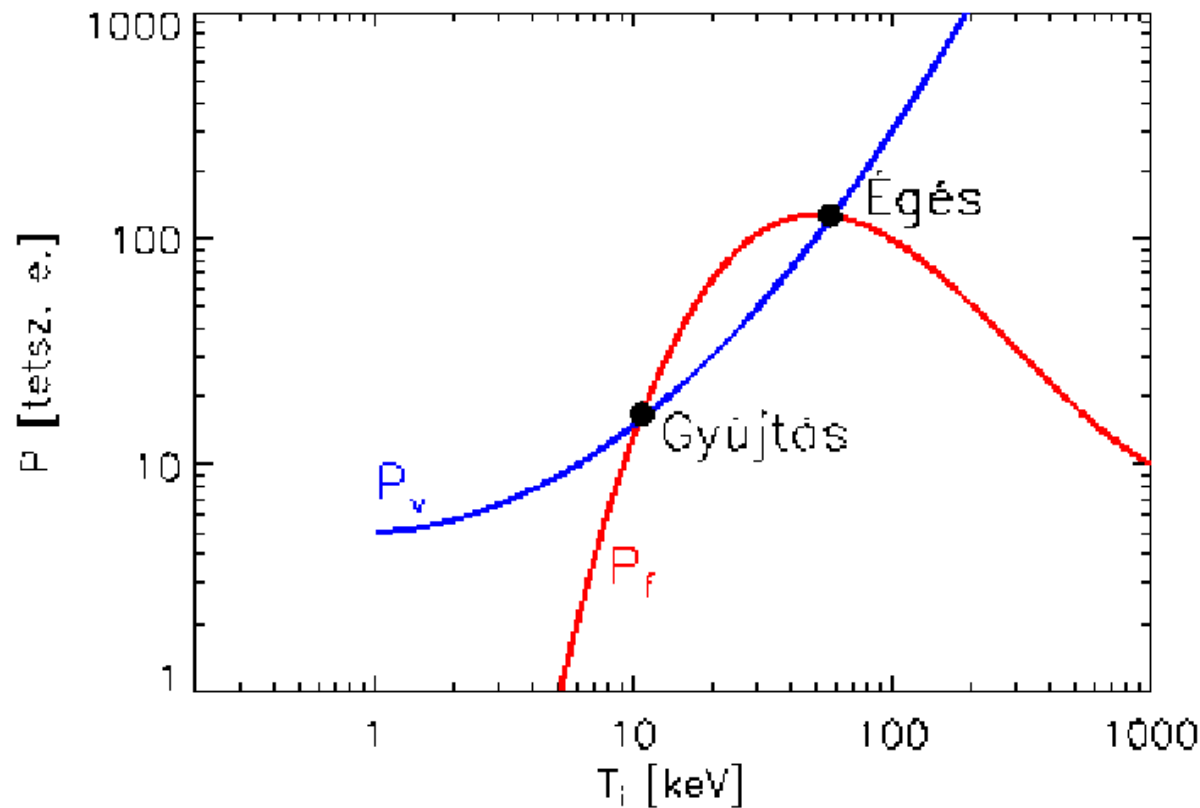


Nem kell plazmaáram.  
Alapvetően állandó működés.  
Bonyolult geometria

Helikális tér plazmaárammal:  
**Tokamak**



A plazmaáram szükséges a  
mágneses konfigurációhoz.  
Egyszerű geometria



A fúzióban keletkező He atommagokat a mágneses tér csapdába ejti és fűtik a plazmát:

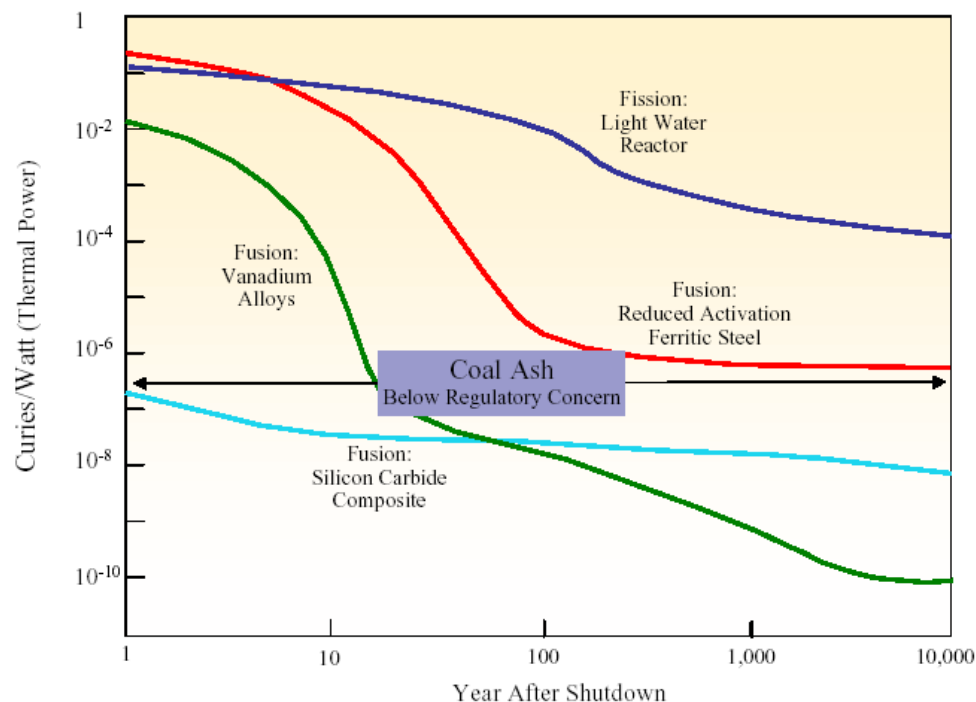
**fúziós égés**

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**

Tanulmány az első generációs kereskedelmi fúziós reaktorok megvalósításáról:

## Power Plant Conceptual Study

4 megoldást tanulmányoztak:

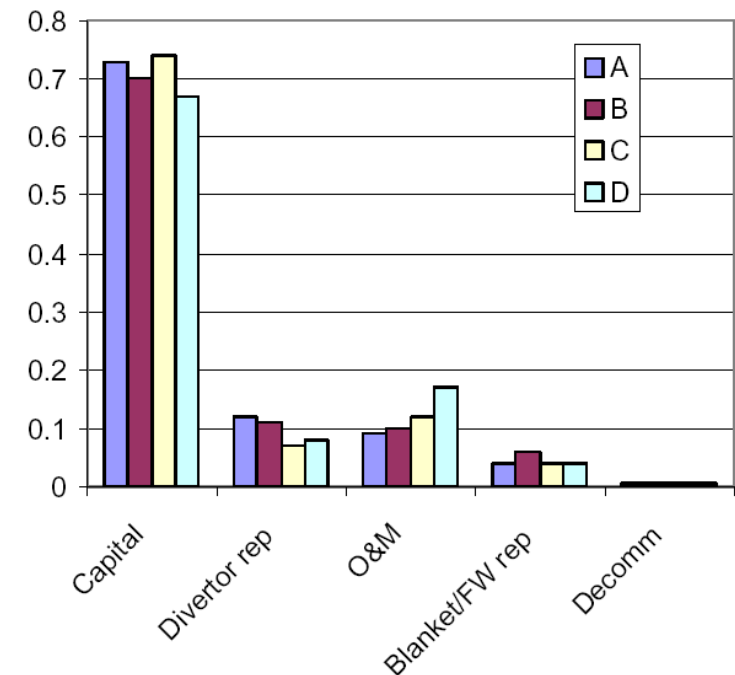
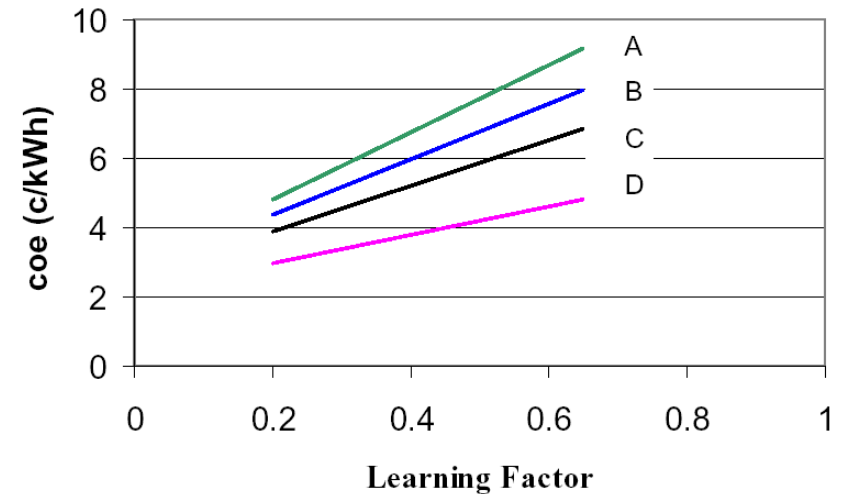
- A-C: Standard technológia különböző hűtési és trícium szaporítási opciókkal
- D: SiC szerkezeti anyagok

A becsült Cost Of Electricity (coe) költségek a 3-9 c/kW tartományba esnek

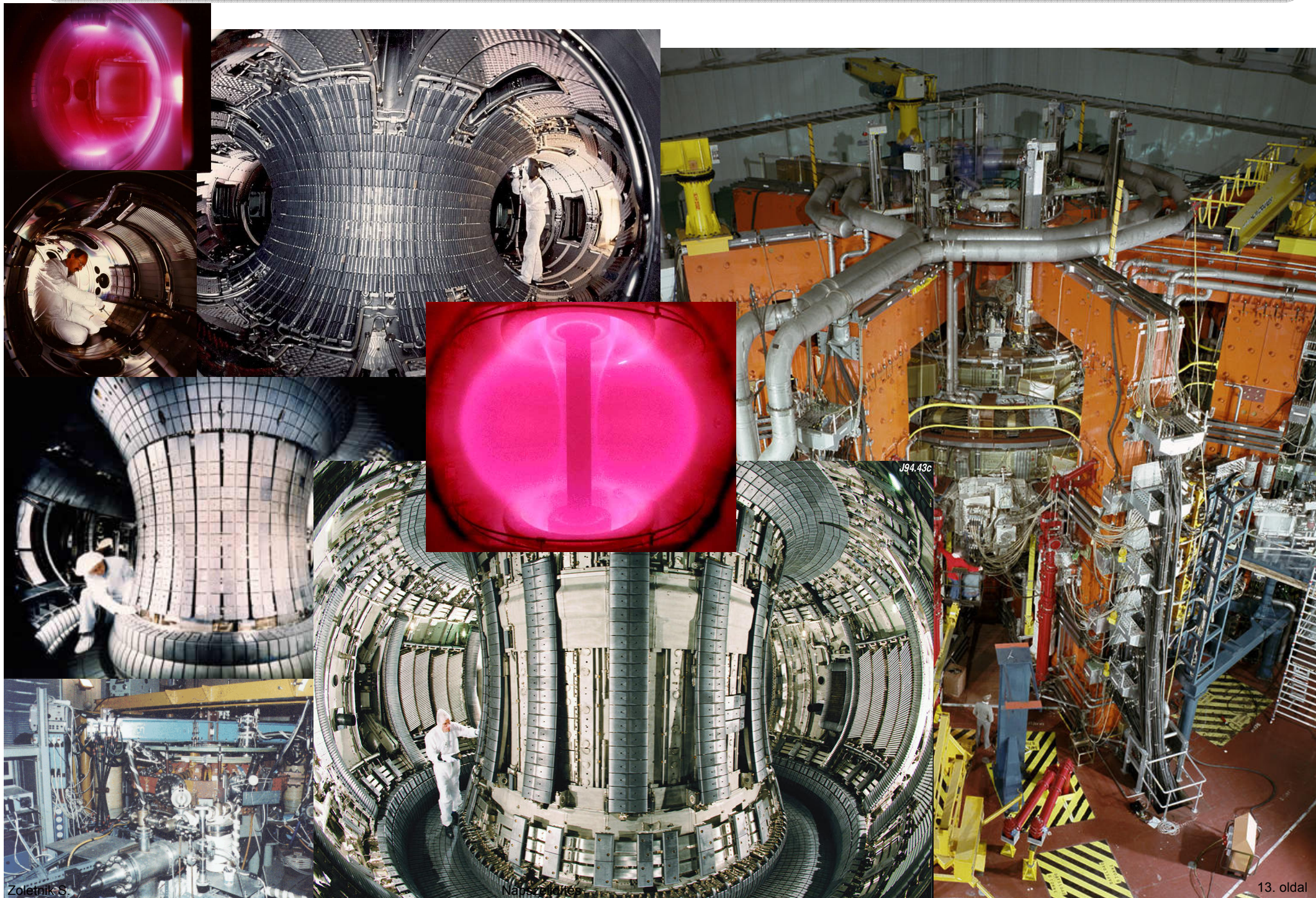
-> versenyképes lehet hosszútávon

A költség 65-75%-a beruházási költség

-> technológiai fejlődés valószínűleg csökkenti









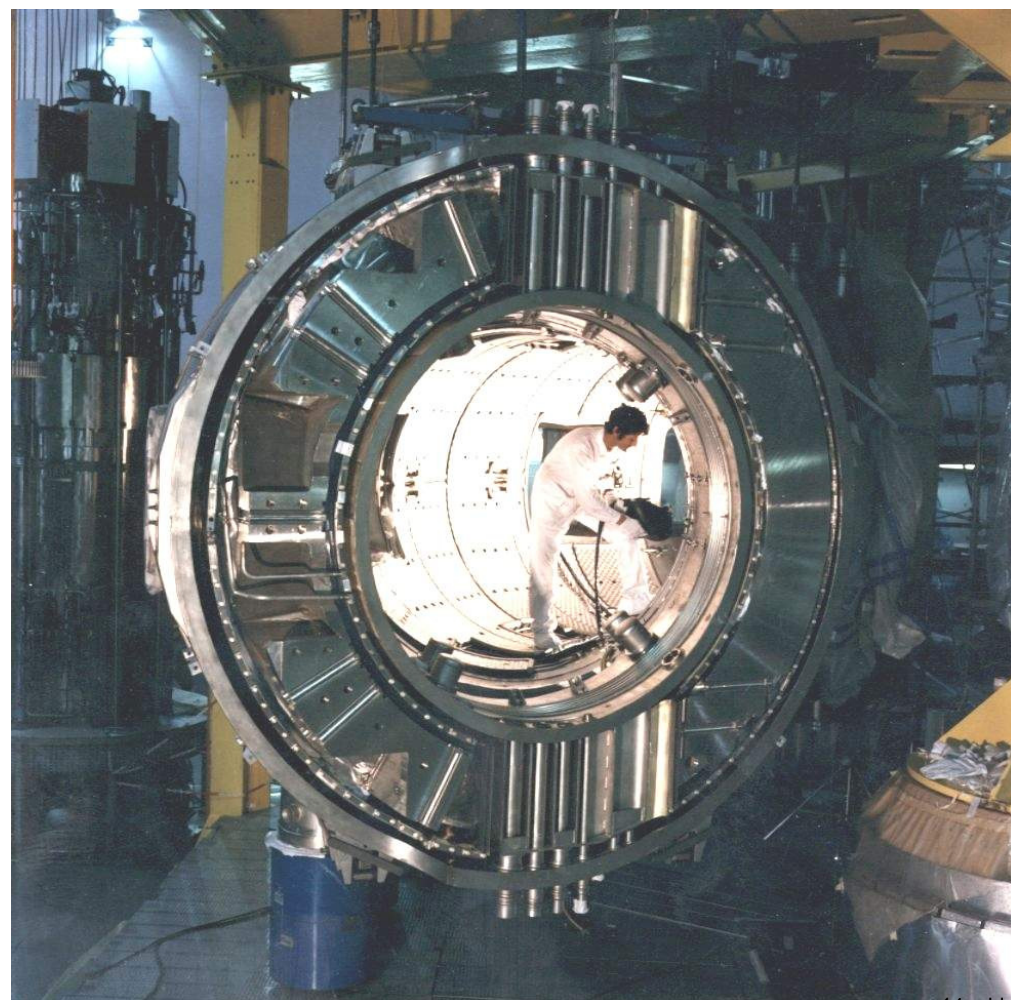
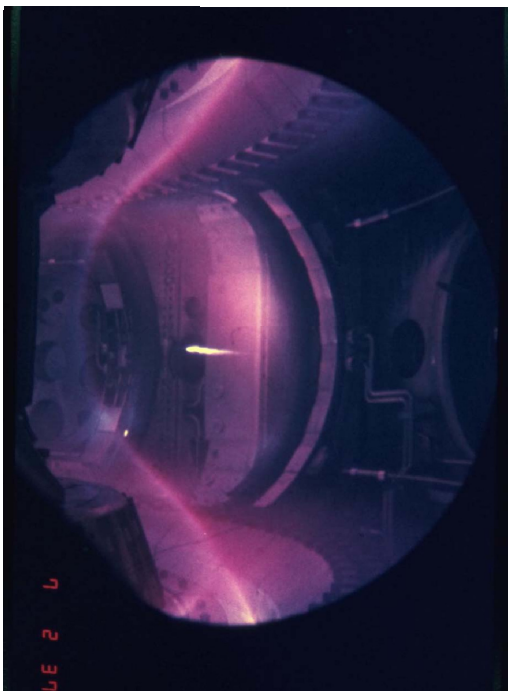
**Vákuum:** A plazma igen ritka, kb. 1/100000 légköri sűrűségű ezért vákuumrendszer kell

**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:  
 $v = \text{km/s}$ ,  $f = 10\text{Hz}$

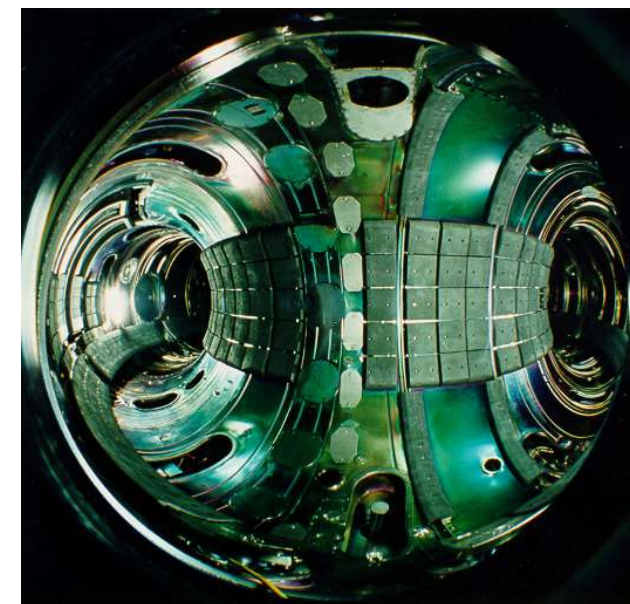
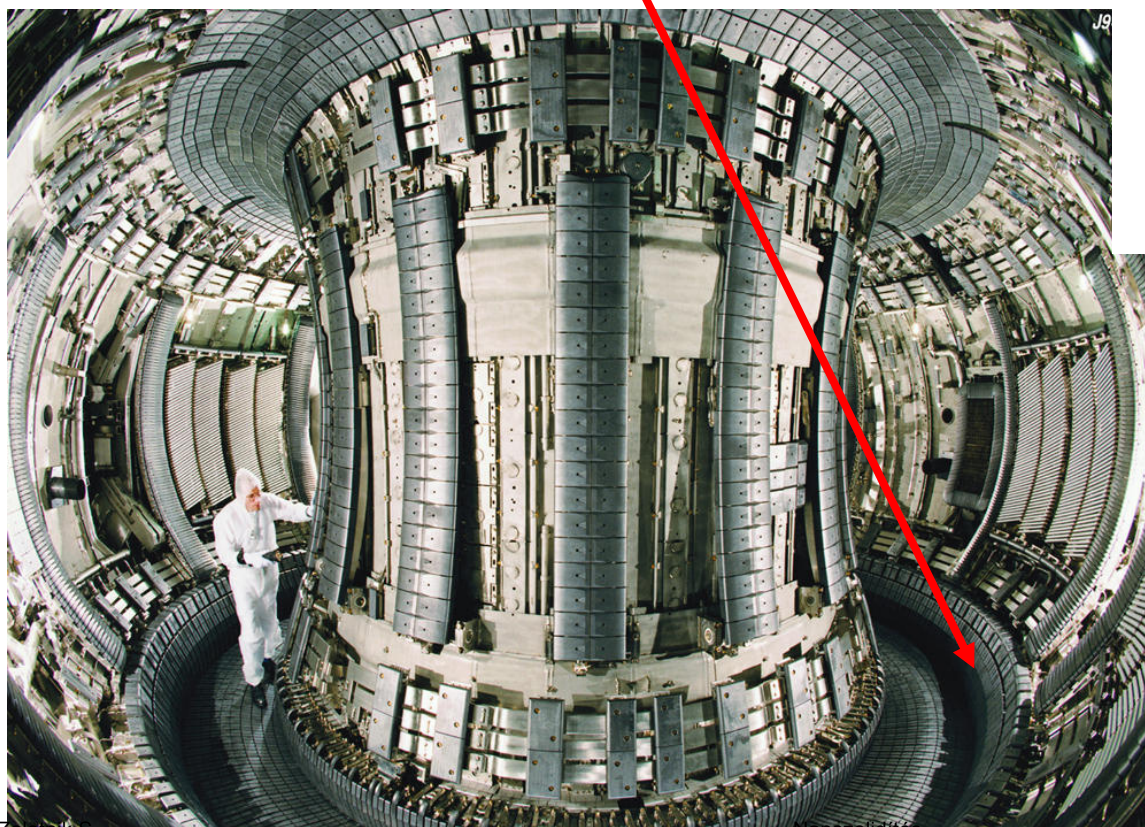
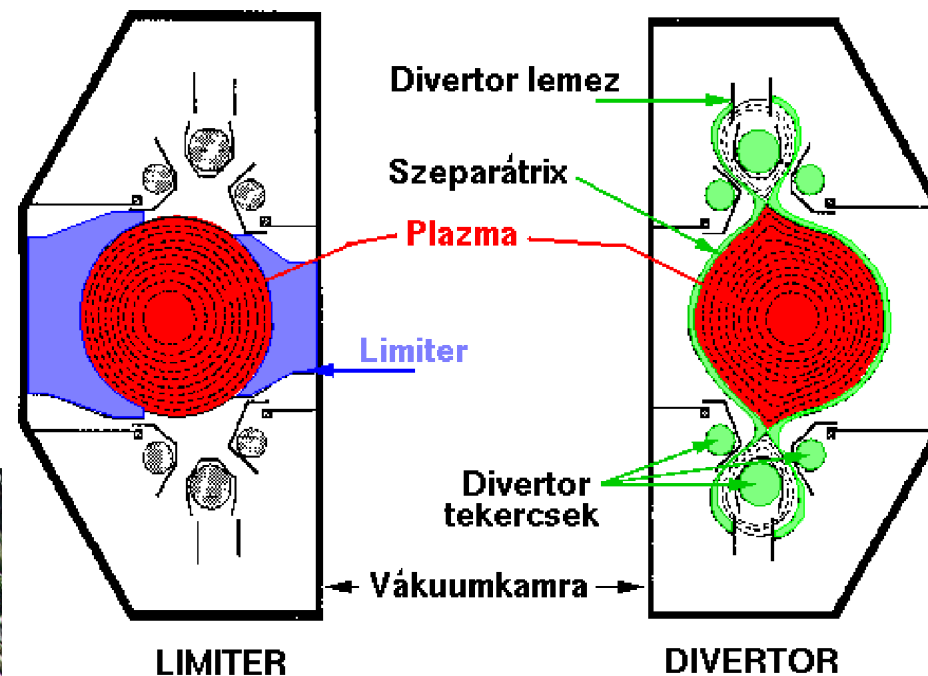




A plazma szélére kijutó részecskék bombázzák a falat amelynek anyaga szennyezi a plazmát.

Kontrollált plazma-fal kölcsönhatás:  
**divertor**

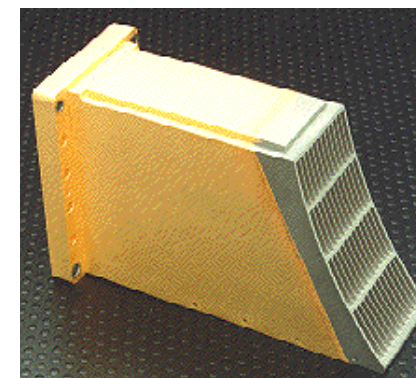
Tipikus hőterhelés  $1-100 \text{ MW/m}^2$





## Áram (tokamak):

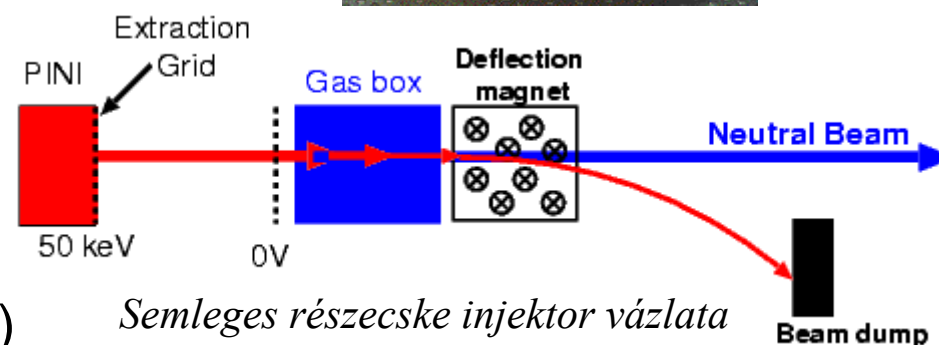
- Induktív áramgerjesztés (csak impulzus <10 sec)
- Mikrohullámú áramhajtás (1 GHz-100 GHz, 1MW)



*Mikrohullámú  
(lower hibrid)  
antenna*

## Fűtés:

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

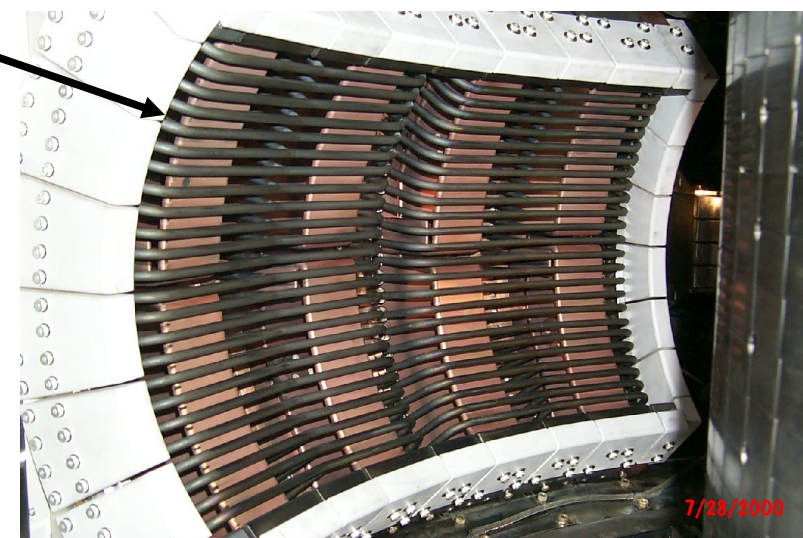
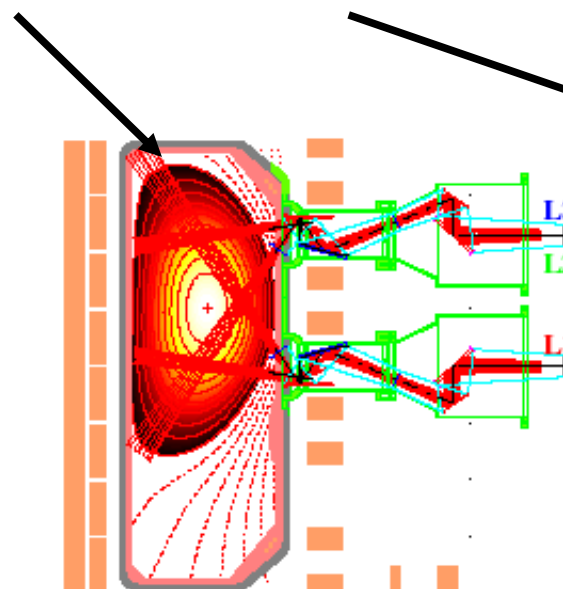


*Semleges részecske injektor vázolata*

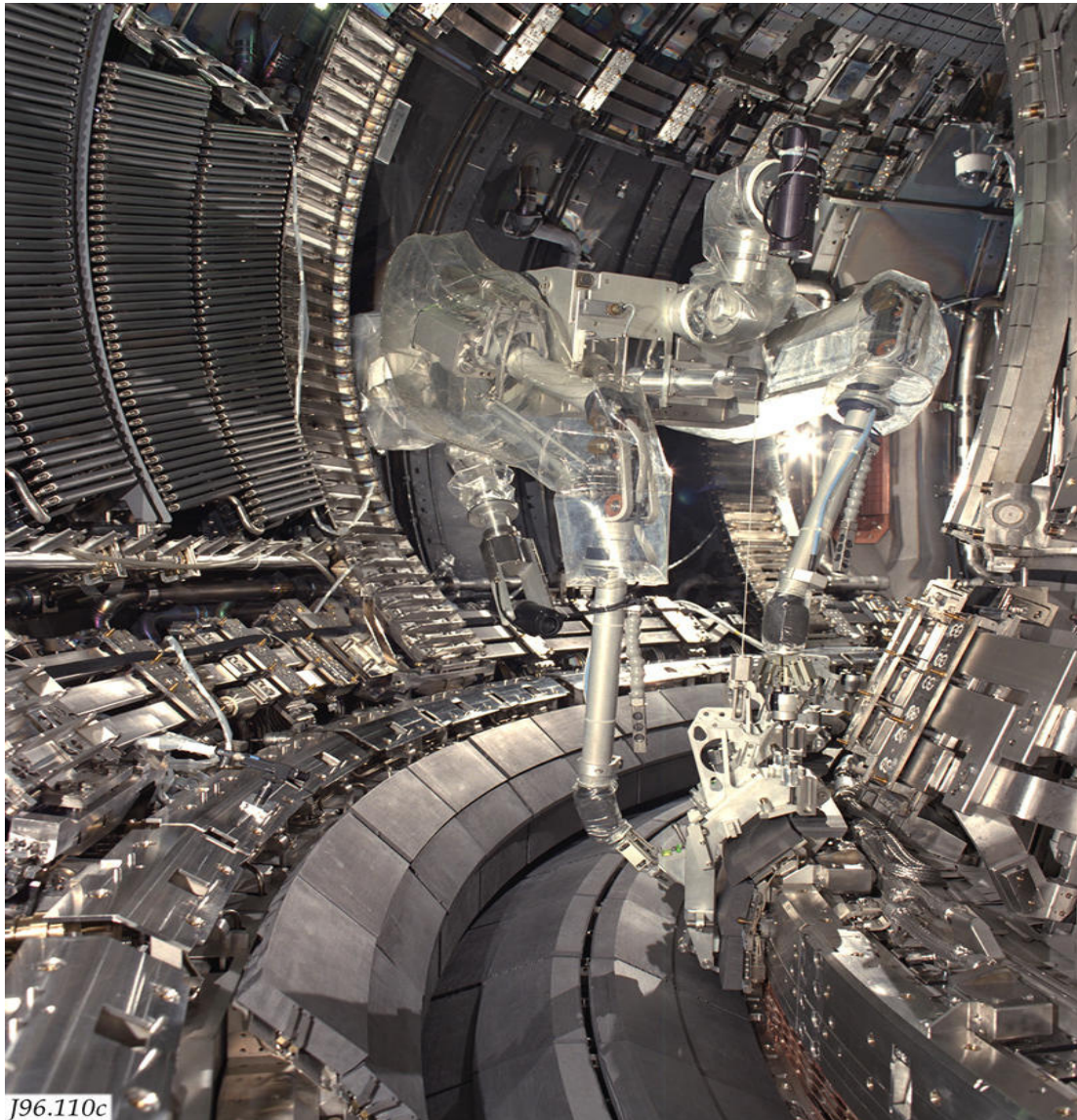
- Ion-ciklotron frekvencia (30 MHz)
- Elektron-ciklotron frekvencia (100GHz)

## 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*

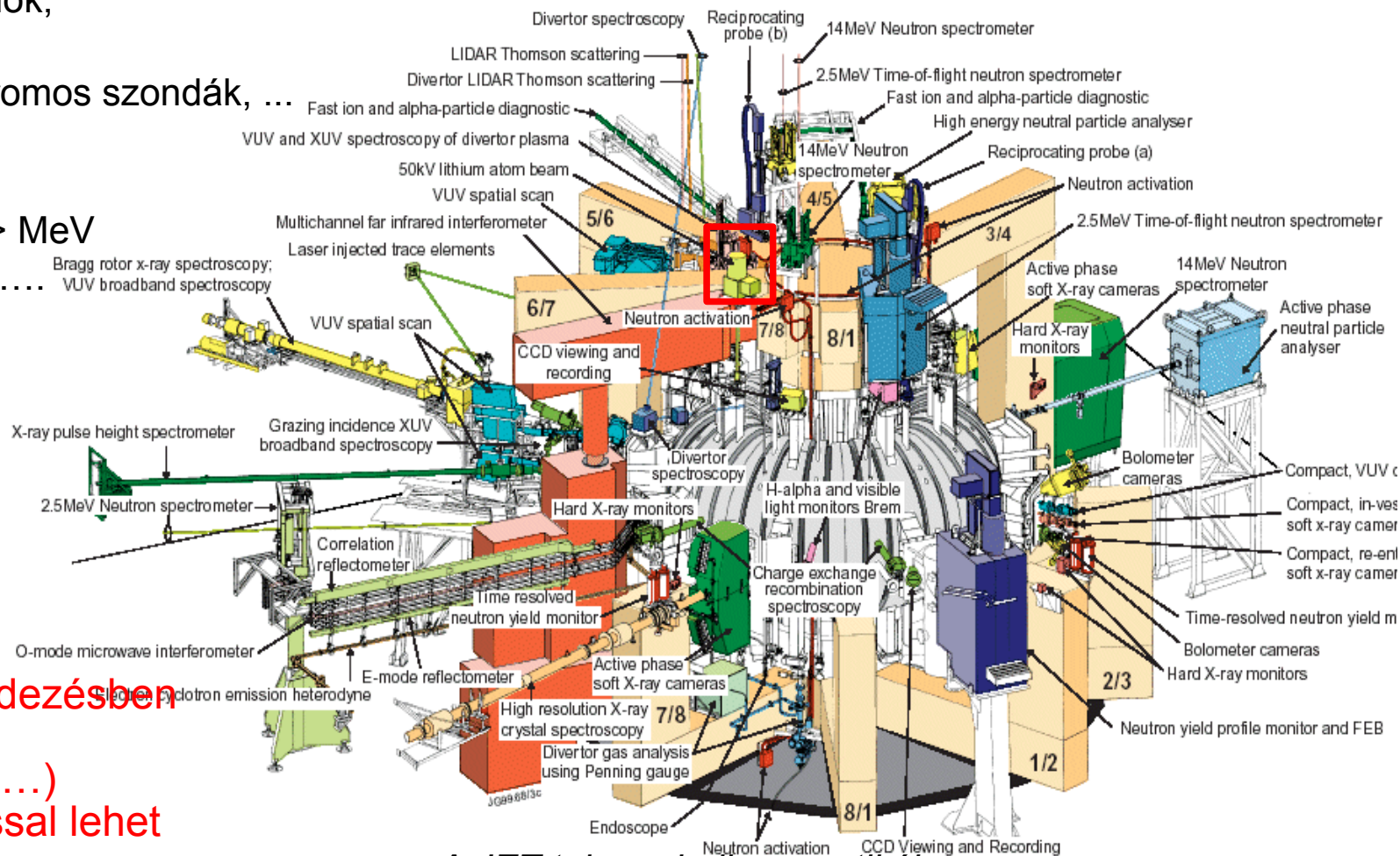


A fúziós kutatások első 20 évében a plazma belsejéről csak igen kevés információ volt. A szokásos fizikai mérőműszerek nem alkalmasak egy  $10^8\text{K}$  hőmérsékletű plazmában mérni.

**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 ....



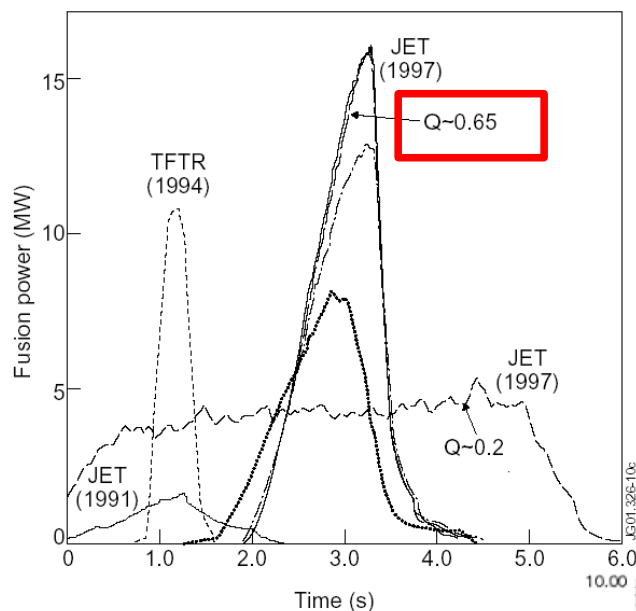
A JET tokamak diagnosztikái.

*Piros keretben az RMKI hozzájárulás*

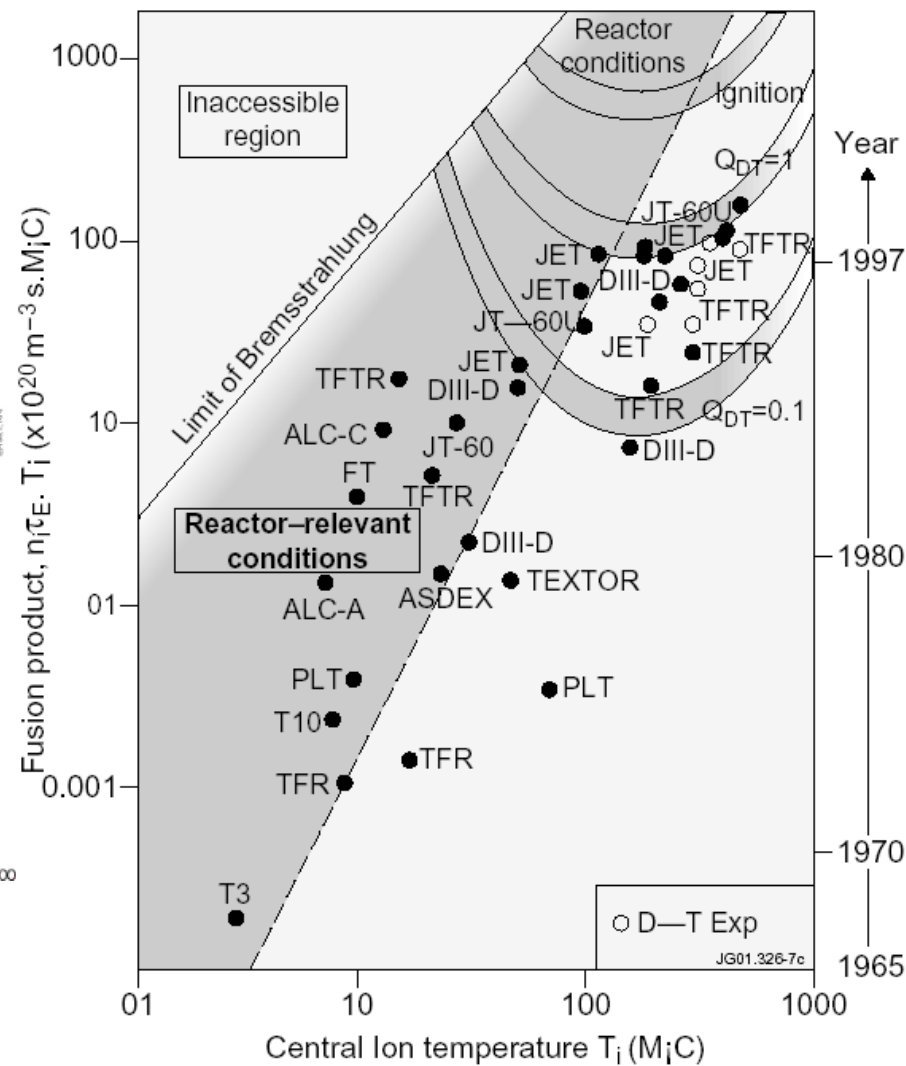
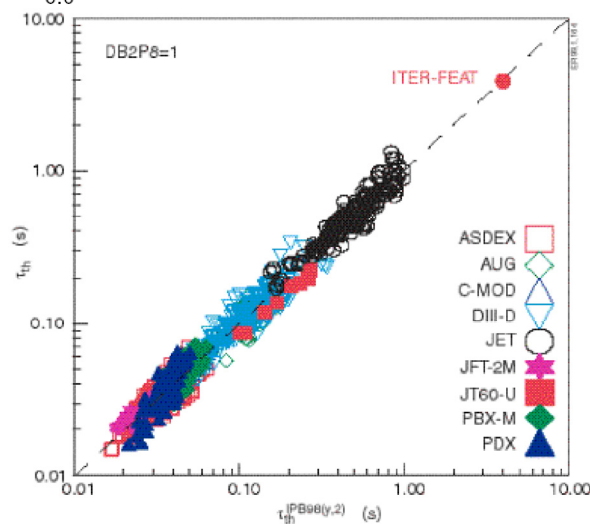
Egy mai modern berendezésben a legtöbb paramétert ( $n_e, n_i, T_e, T_i, I_p, Z_{eff}, E, \dots$ ) tér- és időbeli felbontással lehet mérni.



# Hol tartunk ma?



A berendezésekben elért plazmaparaméterek megközelítik a reaktortartományt.



Az elméleti alapokat úgy tűnik értjük  
A kísérleteket tudjuk extrapolálni

## 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

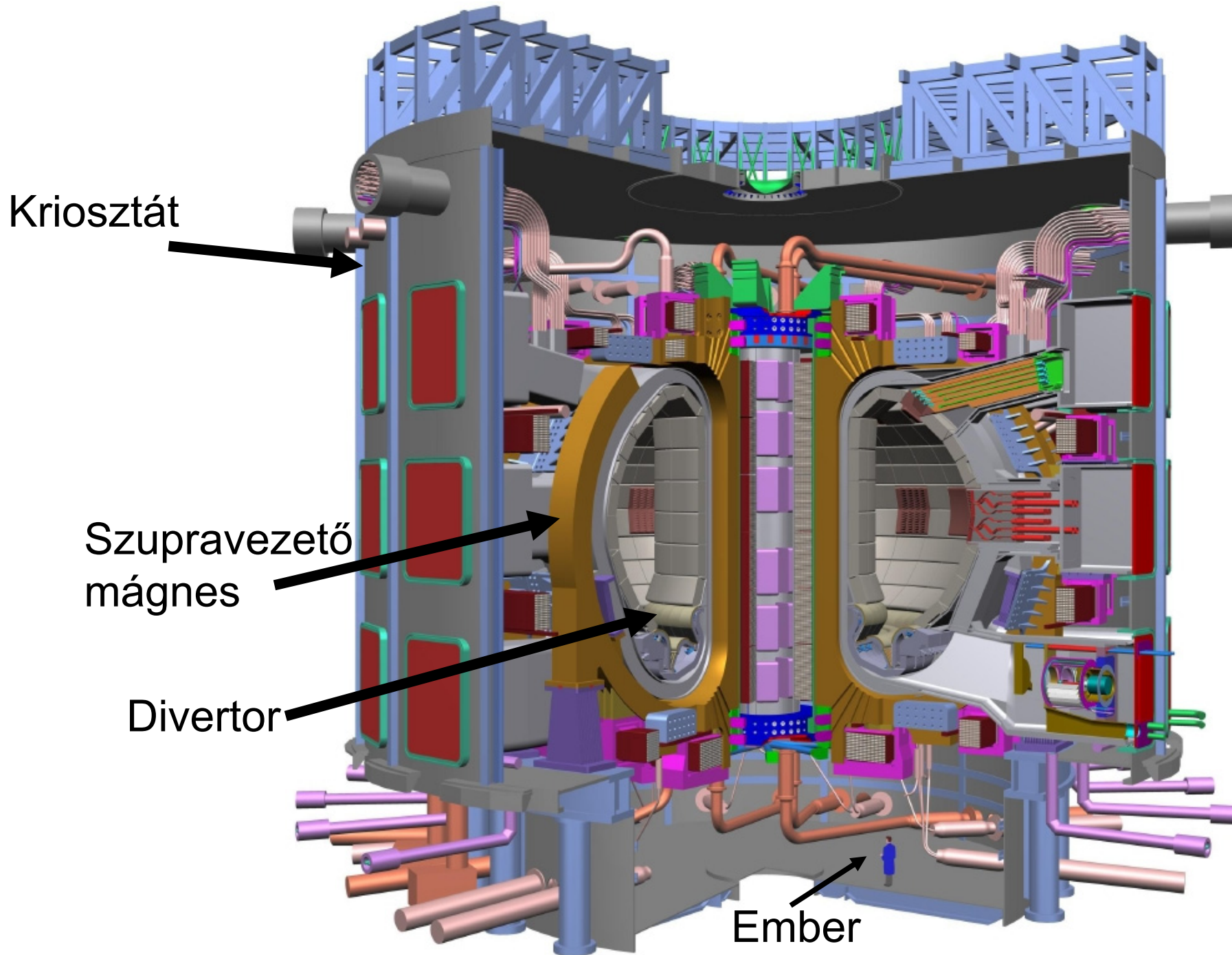
(International Thermonuclear Experimental Reactor)

- EU-Japán-Orosz-USA-Kína-Korea-India projekt
- Mérnöki tervek készen vannak
- Legalább  $Q=10$
- Tritium breeder, reaktor divertor, reaktor sugárterhelés
- kb.  $4 \cdot 10^9$  EUR, 8 év építés

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

Az ITER kulcsalkatrészeit megépítették és tesztelték: mágnes, divertor alkatrészek







Az ITER kísérlet helyszíne eldőlt: Cadarache, Franciaország

## A jövő:

2005-7 : Feladat elosztás, engedélyezés

2007-2008: Építés megkezdése

2016 : Első plazma

2016-2021: D plazmák, paramétertartomány  
feltérképezése

2022-2027: D-T működés, reaktor paraméter  
tartomány teszt

2025- DEMO tervezés

2030-2035: DEMO építés

**2035: DEMO: az első áramtermelő reaktor(ok)**

