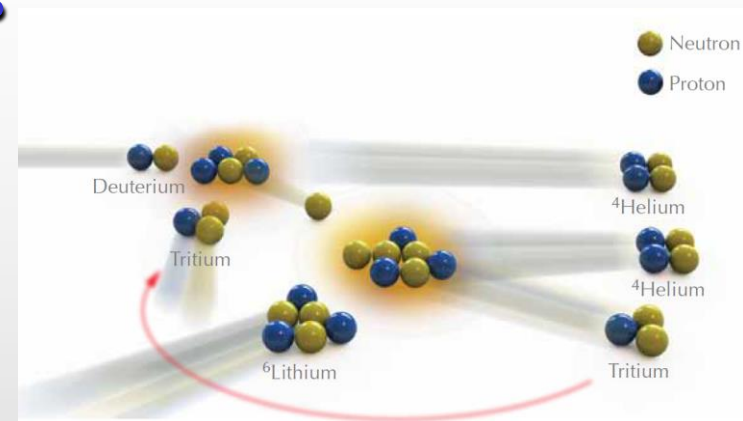


# Hogyan lesz fúziós erőművünk 2050-ben?



**Dr. Pokol Gergő**

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,  
Természettudományi Kar, Nukleáris Technikai Intézet

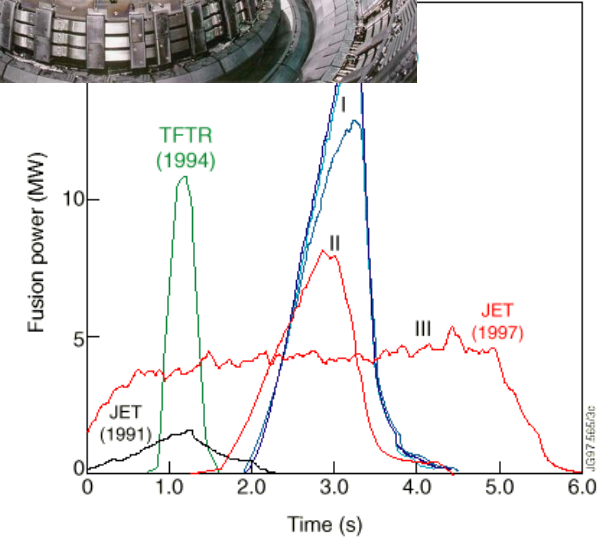
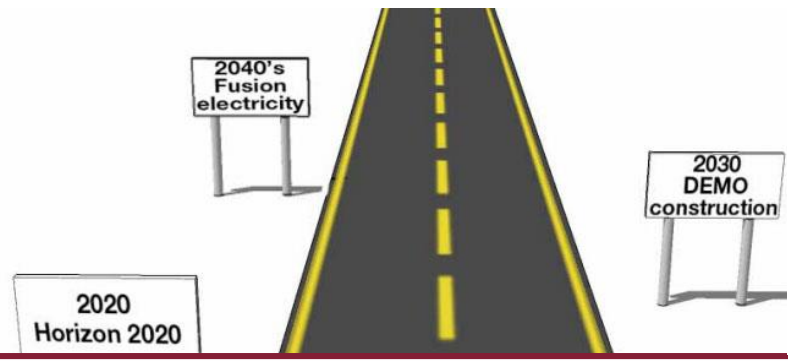
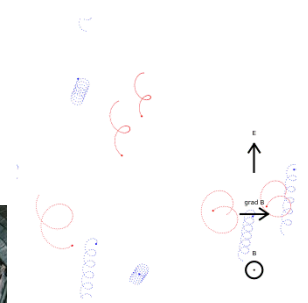
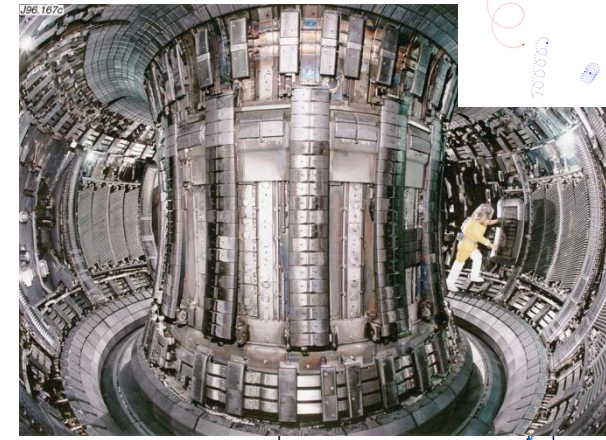
# Hogyan lesz fúziós erőművünk 2050-ben?

➤ *A fúziós reaktorok fizikájáról dióhéjban*

➤ *A fúziós reaktorok technológiája*

➤ *Hol tartunk ma?*

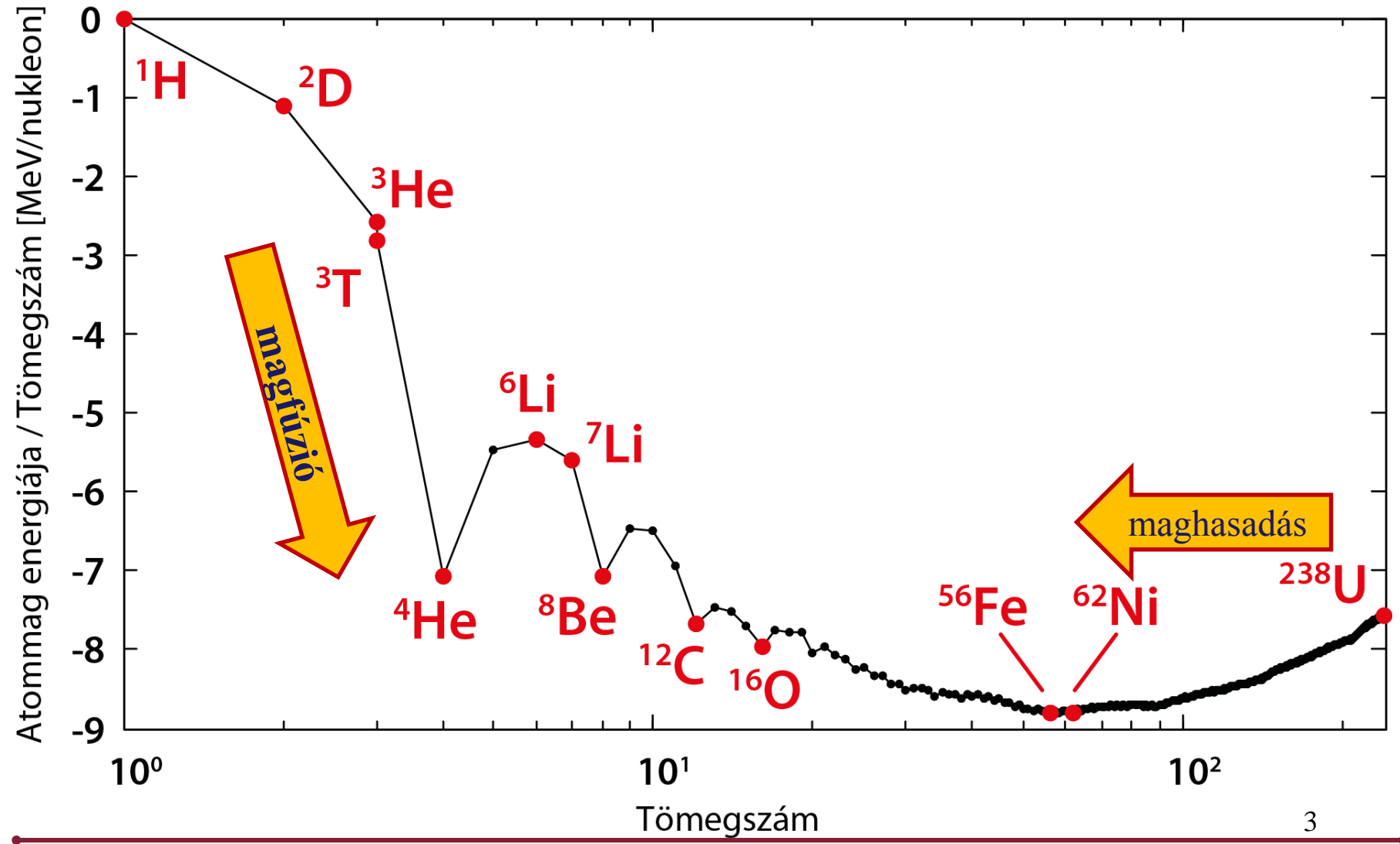
➤ *Fúziós útiterv*



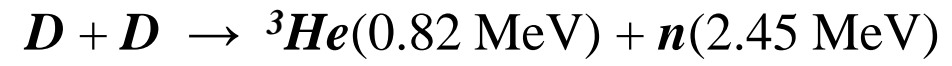
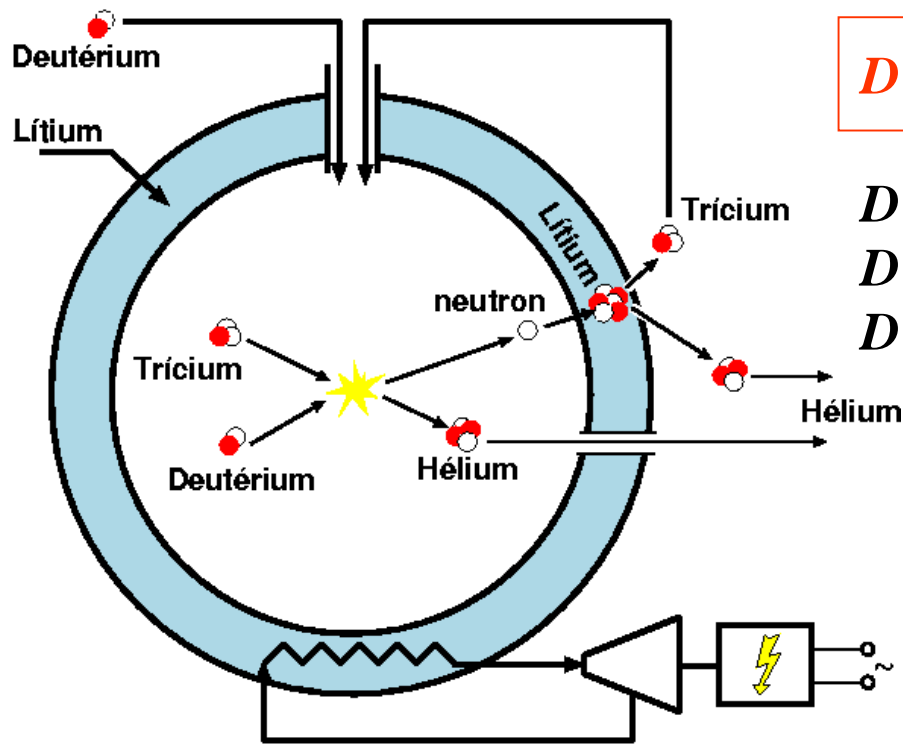


# Fúziós alapok

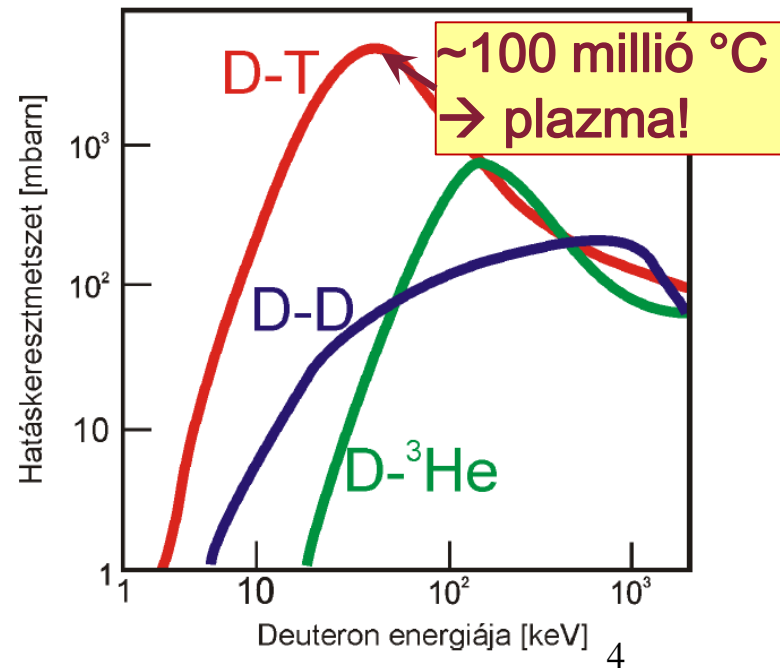
## Egy nukleonra eső kötési energia



# Fúziós reaktor üzemanyagciklusa

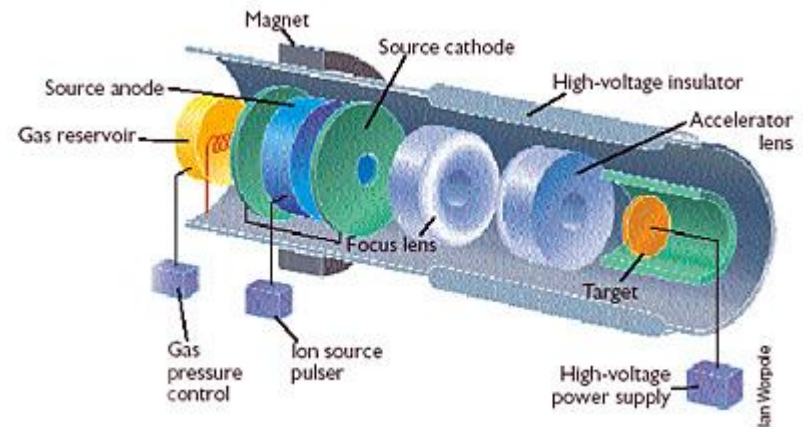
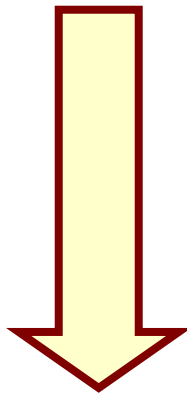


A fúziós reakcióban nem keletkeznek radioaktív izotópok!



## Lehet-e gyorsítóval energiát termelni?

Nem, mert a **fúziós reakciók valószínűsége** sok nagyságrenddel kisebb a **rugalmas szórásénál**.



**Fúziós energiát termelni csak termikus közegben lehet!**

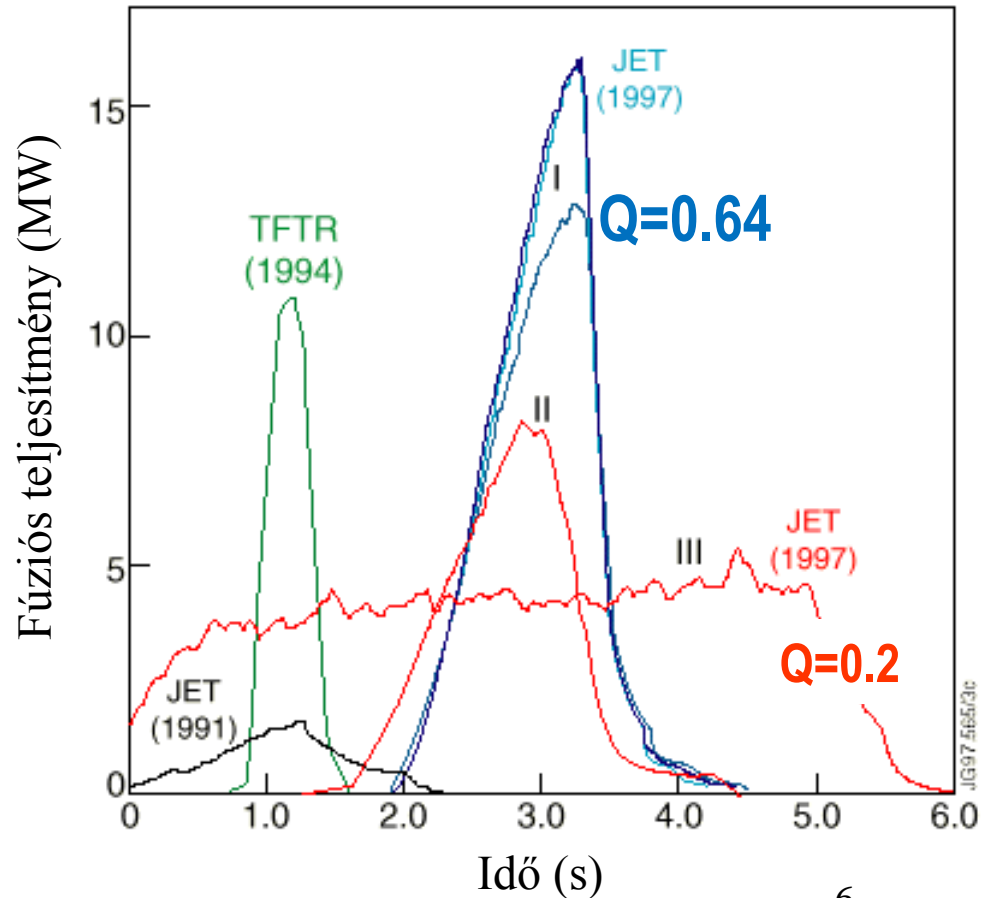
Ha a céltárgy termikus egyensúlyba kerül a nyalábbal, akkor az ütközések során az átlagos energiacsere nulla.

## Fúziós reaktor energiamérlege

A fúziós reaktor energiaszorzását a  $Q$  tényezővel szokás jellemezni:

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

ahol  $P_h$  a külső plazmafűtés teljesítménye,  $P_f$  a felszabaduló fúziós teljesítmény.



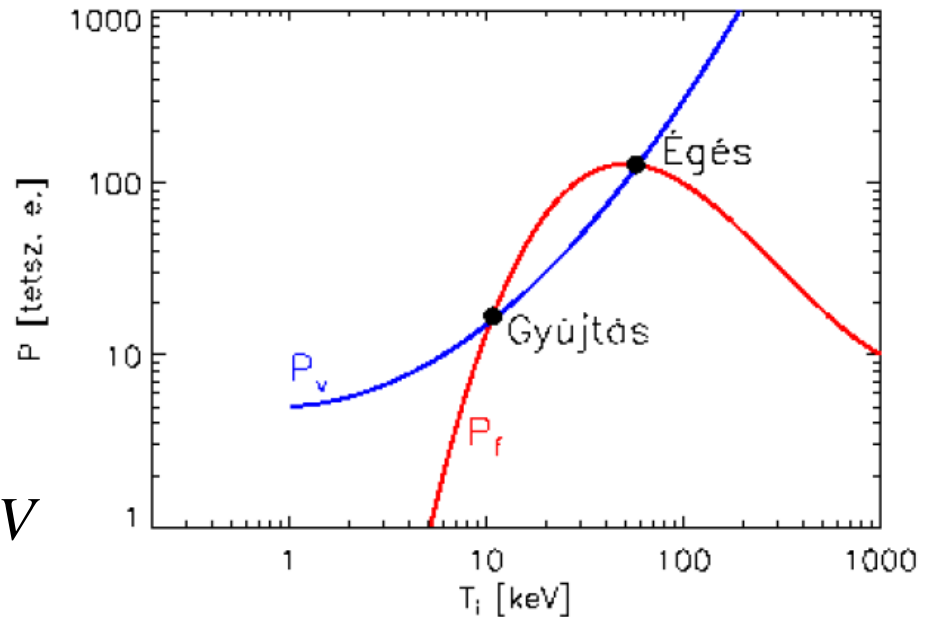
## Fúziós plazma energiamérlege

A fúziós reakcióban felszabaduló energia jelentős részét (~20%) az  $\alpha$ -részecskék viszik el. Ha ezeket a plazma többi töltött részecskéjével együtt össze tudjuk tartani, akkor az  **$\alpha$ -részecske fűtés** meghaladhatja a veszteségeket.

Mivel ekkor nem kell külső plazmafűtés, ezért  $Q = \infty$ .

**Lawson-kritérium:**

$$n\tau_e \geq 10^{20} \text{ s/m}^3 \quad T_i = 25 \text{ keV}$$



Amikor ez bekövetkezik, akkor a plazma **begyűjt**. Az **égési pontban** a plazma stabil állapotban marad, amíg a gázösszetételt és más körülményeket fenn tudjuk tartani.

## Fúziós plazma összetartásának módjai

A Lawson kritérium két lehetséges, szélsőséges esetet kínál:

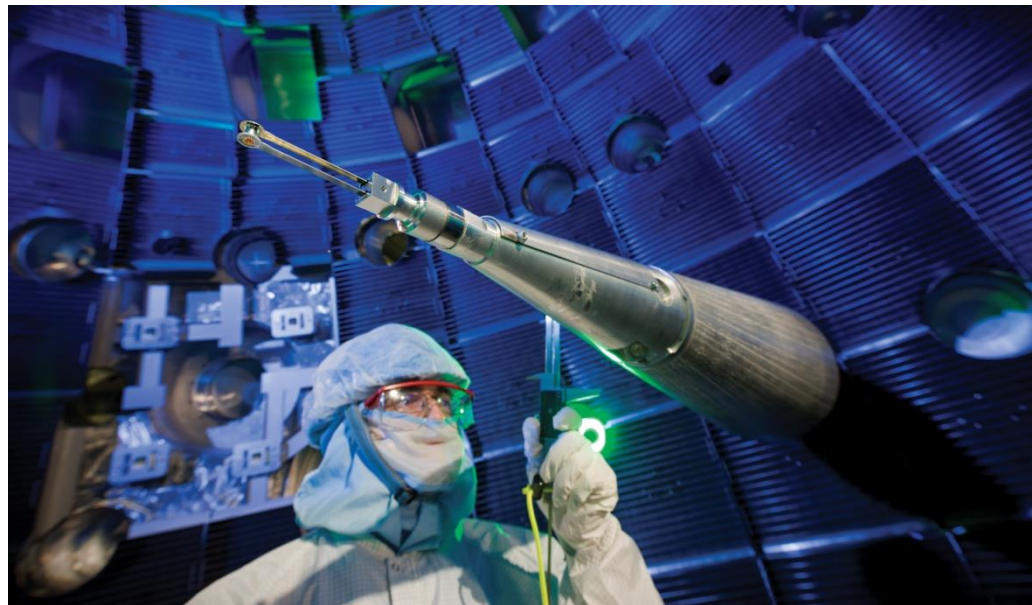
- **Mágneses összetartás (Magnetic confinement).**

A plazmát mágneses térrel tartjuk össze. A sűrűséget az alkalmazott mágneses tér szabja meg, az energiatermeléshez egy kritikus energiaösszetartási időt kell elérni alacsony sűrűség mellett.

- **Tehetetlenségi összetartás (Inertial confinement, ICF).**

A plazma szabadon tágul, a Lawson kritérium teljesüléséhez egy kritikus sűrűséget kell elérni, rövid ideig.

(NIF, <https://lasers.llnl.gov/>)



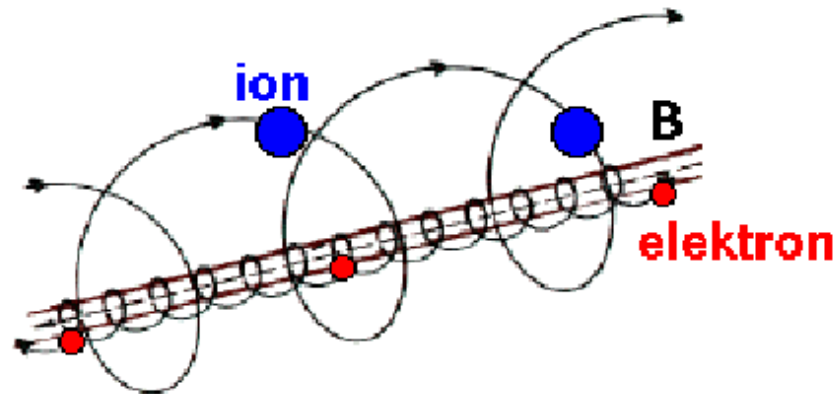


## Mágneses összetartás

Forró, híg **plazmában** (ionok + elektronok) a részecskék szabad úthossza nagy (gyakorlatilag ütközésmentes rendszerről van szó). Tekintsük szabad, töltött részecskék mozgását!

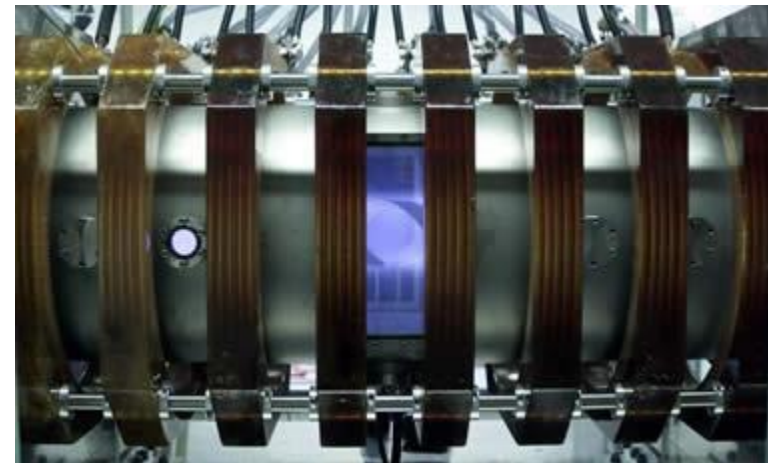
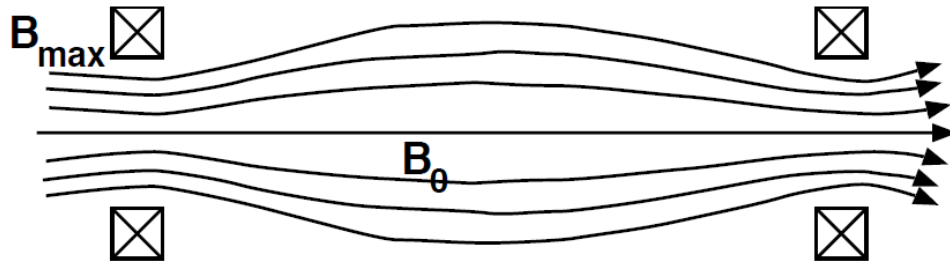
Lorentz-erő: töltött részecske mozgására és a mágneses térre merőleges erő.

**Spirál pálya a mágneses erővonal mentén.**



## Mágneses összetartás, lineáris geometria

Ha a mágneses tér megnő a berendezés végein, úgynevezett **mágneses palackot** kapunk, amiben a részecskék az összesűrűsödő erővonalak tartományáról visszaverődnek.

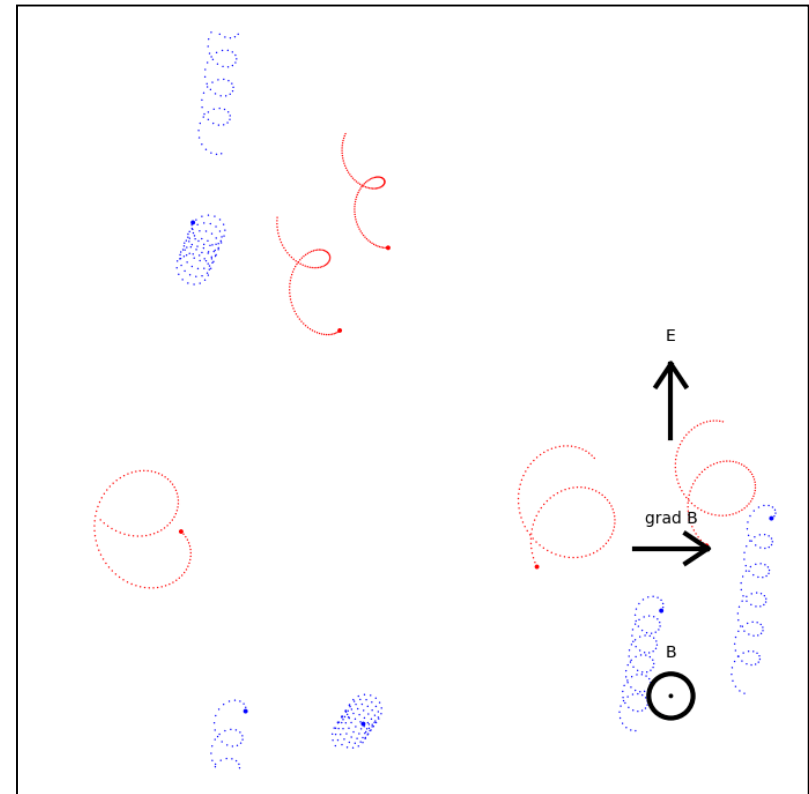
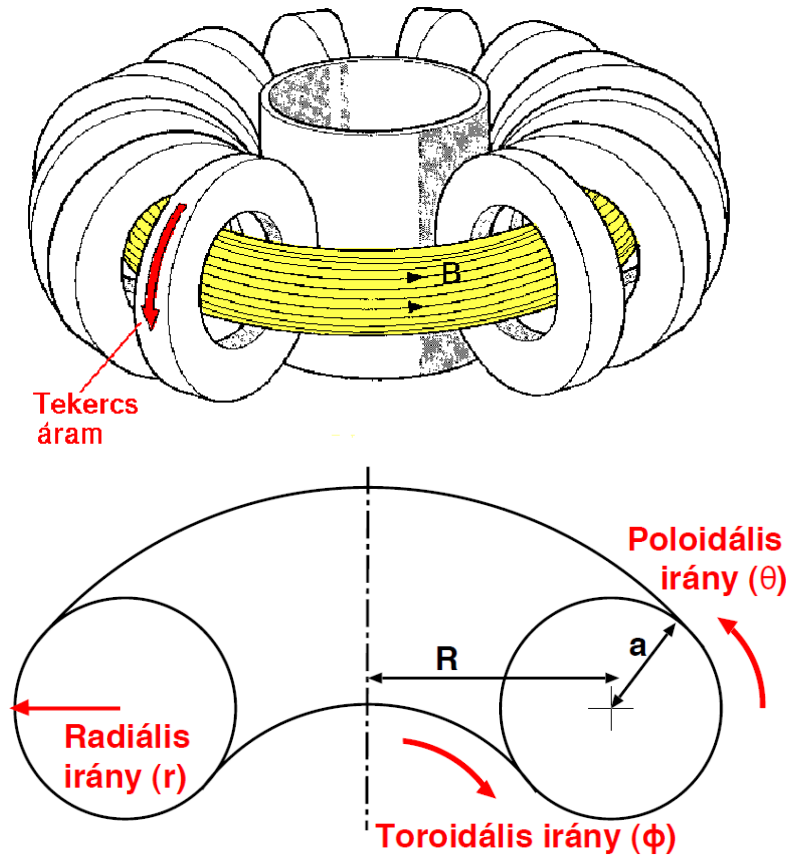


A közel mágneses térrel párhuzamosan mozgó részecskékre nincs hatással

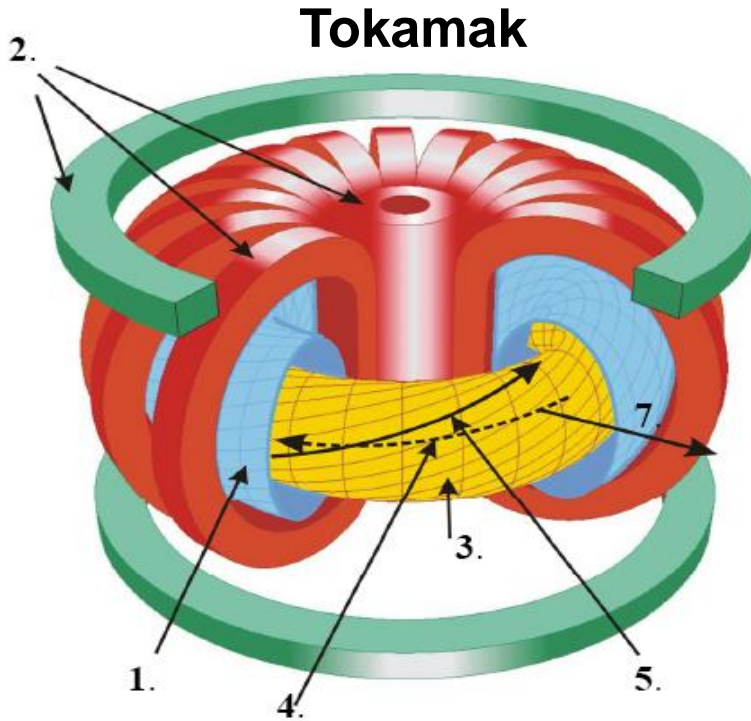
➔ **veszteségek a végeken+ stabilitási problémák.**

## Mágneses összetartás, toroidális geometria

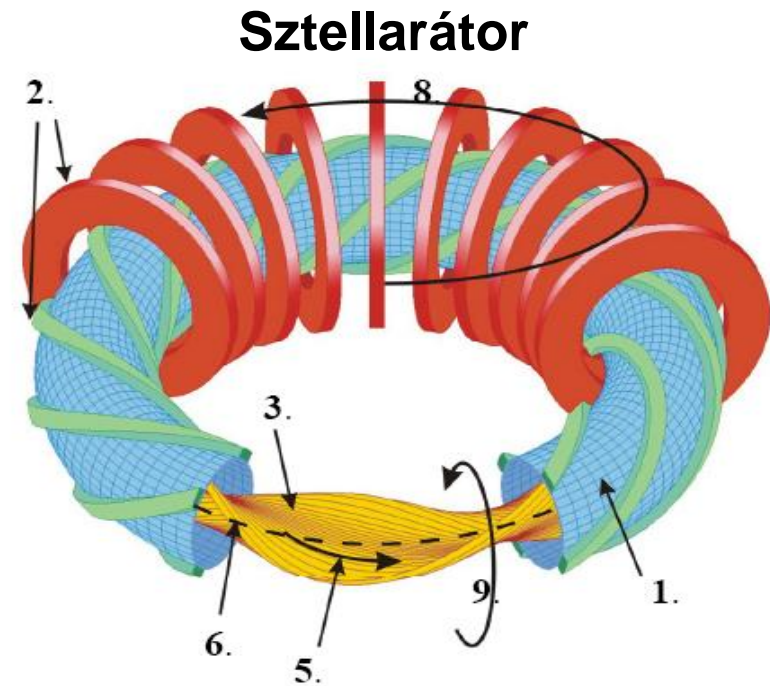
A lineáris berendezést tórusz alakúra alakítva a végeffektusok elkerülhetők. Ekkor egy **tórusz alakú plazmagyűrűt** kapunk. Driftek!



# Mágneses összetartás berendezéstípusai

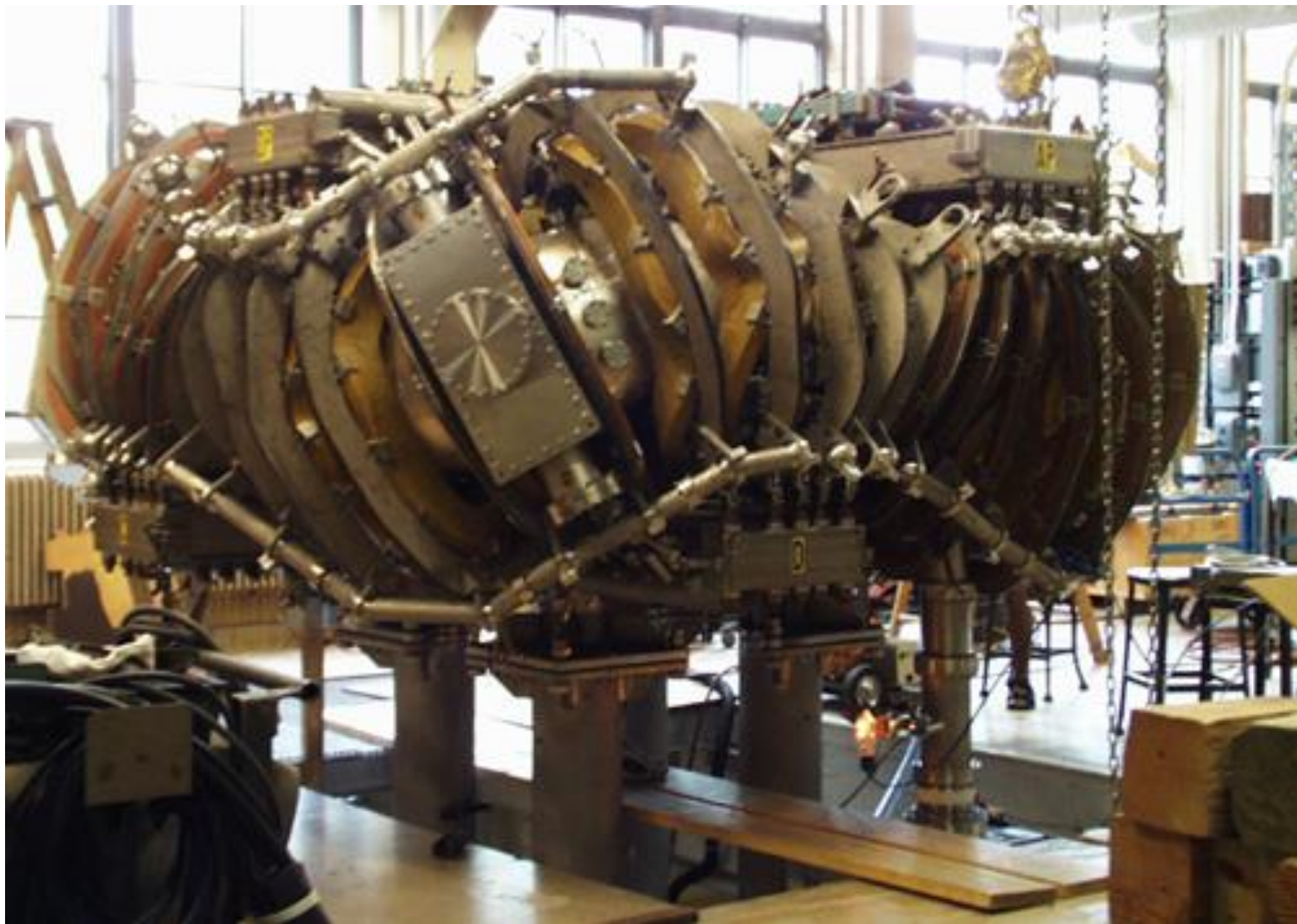


**Toroidális plazmaáram**

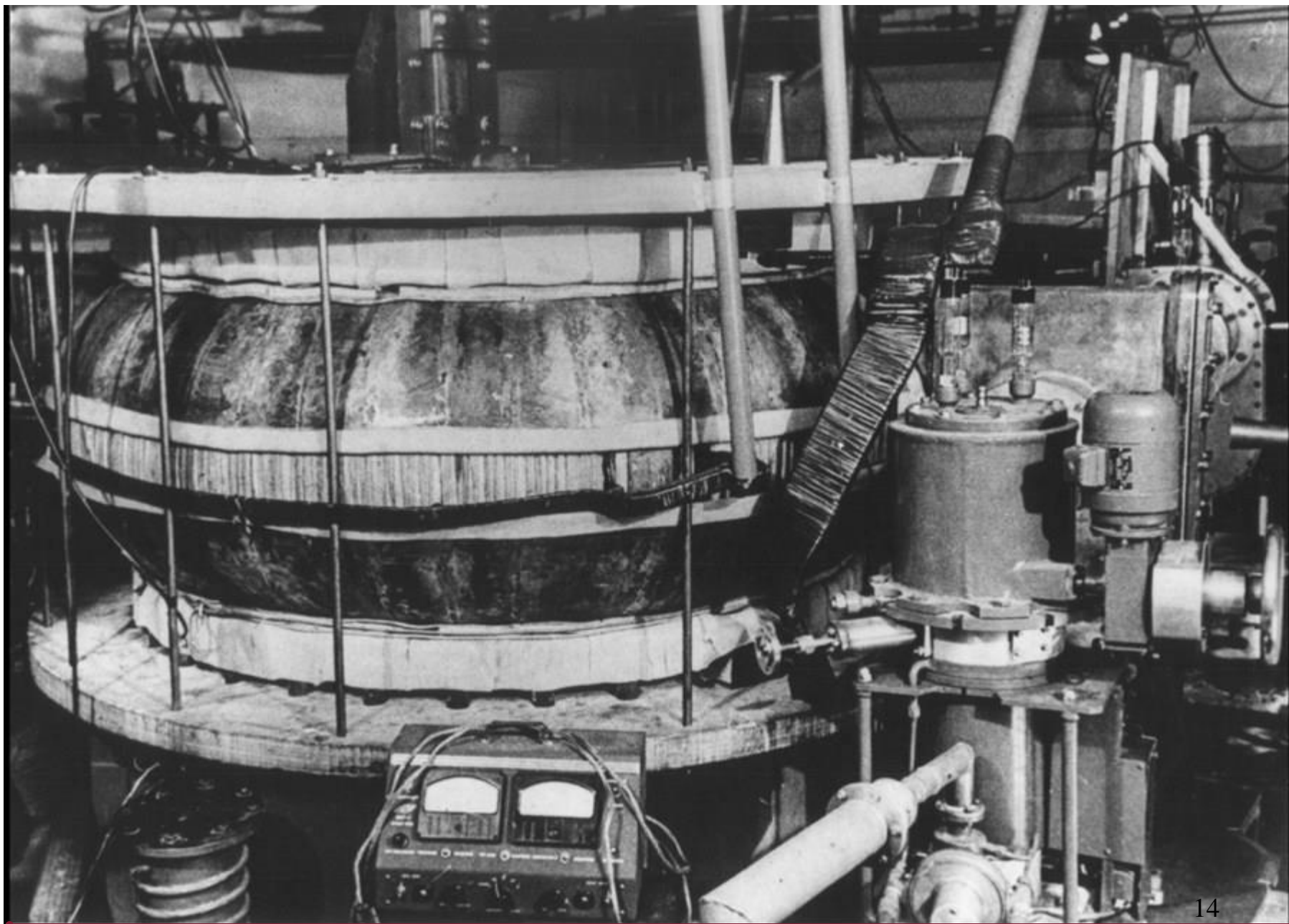


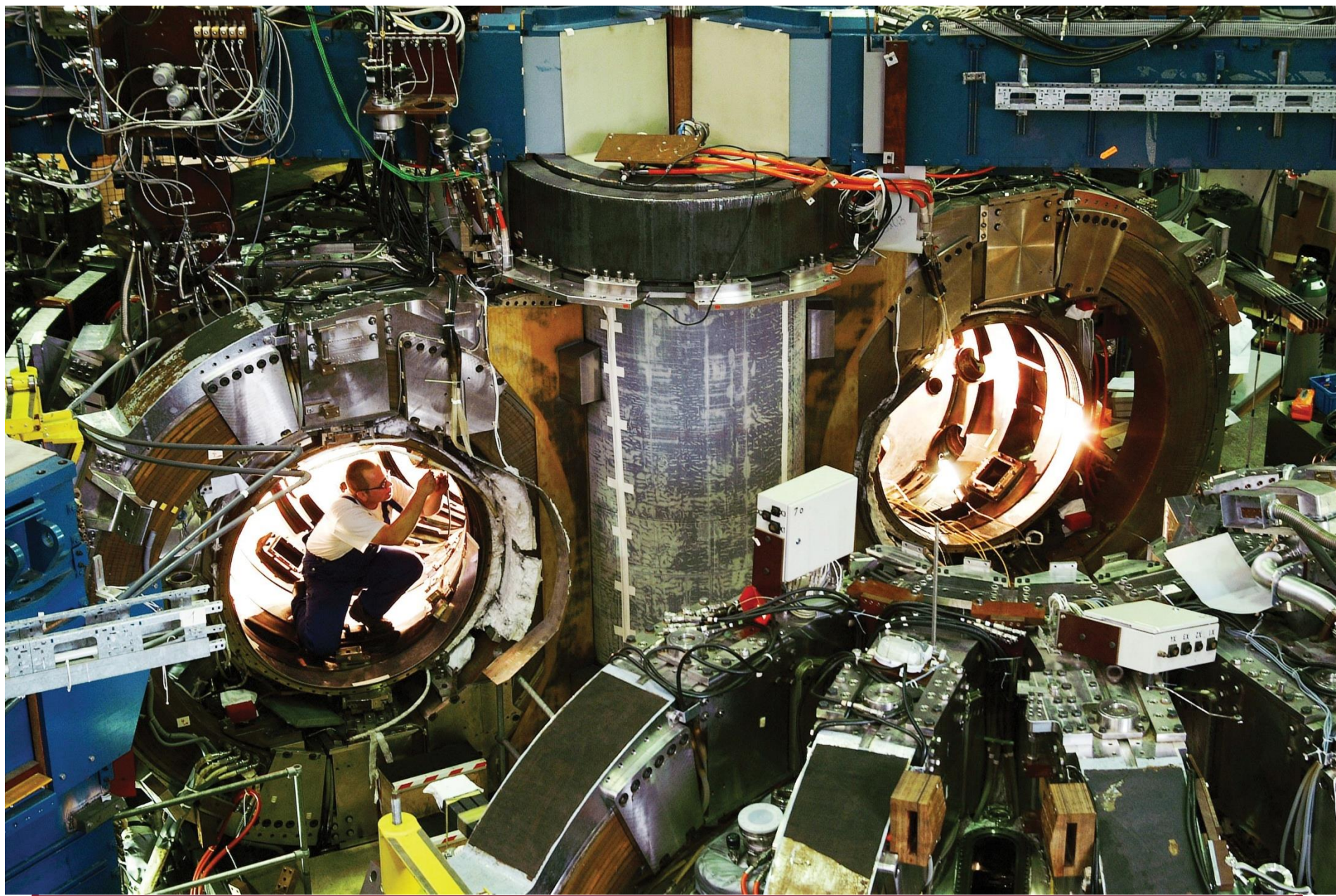
**Helikális tekercsek**

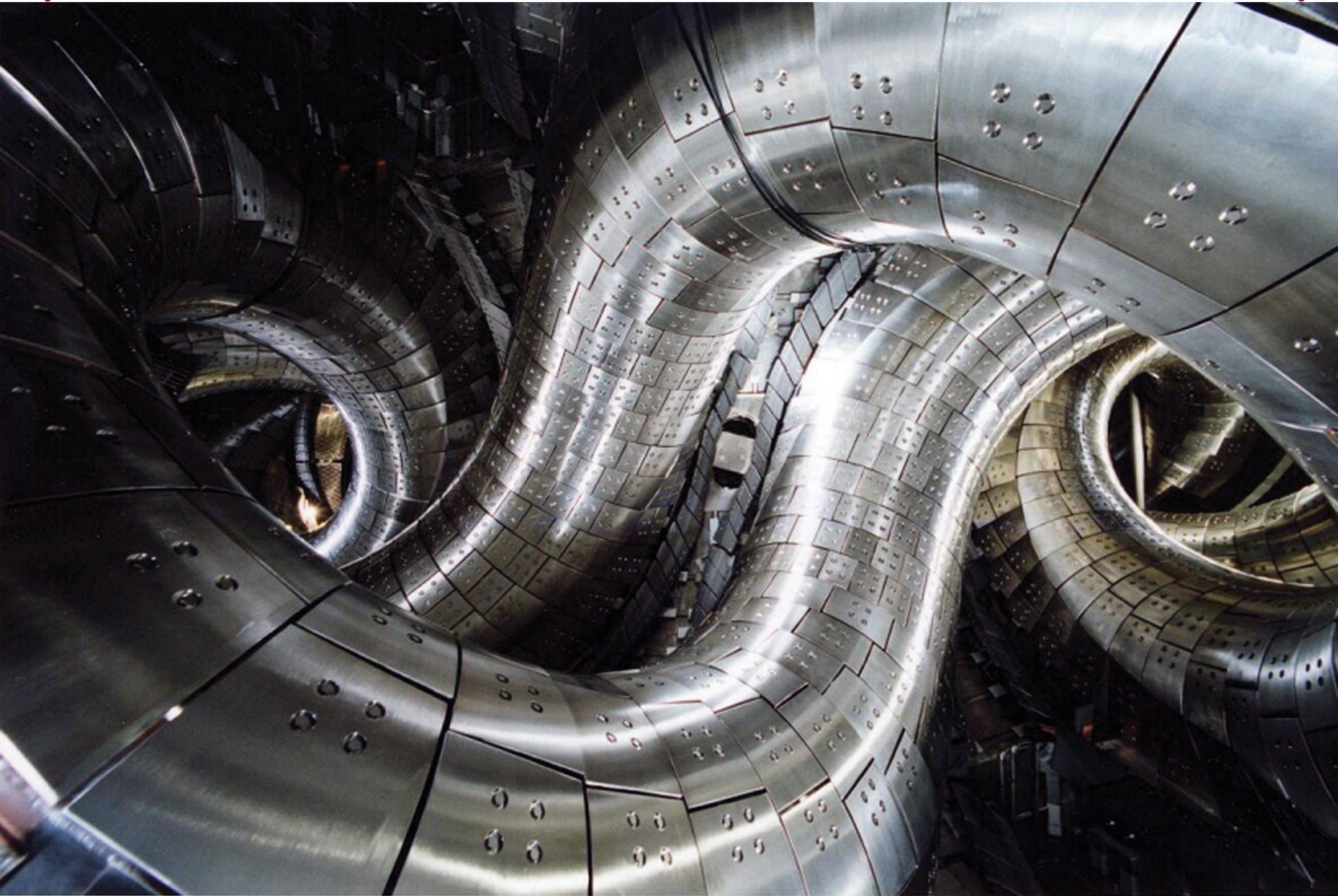
- (1) vákuumkamra, (2) mágneses tekercsek, (3) plazma,  
 (4) plazmaáram, (5) mágneses erővonal, (6) mágneses tengely,  
 (7) radiális irány, (8) toroidális irány, (9) poloidális irány



59. Országos Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató, 2016. március 13.





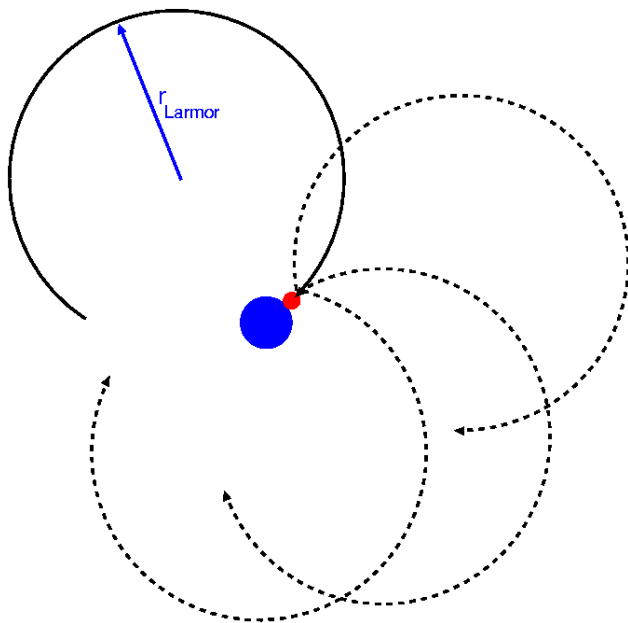






# Transzport mágnesesen összetartott fúziós plazmákban (véges összetartás)

Bár a részecskék közötti ütközések ritkák (a szabad úthossz 10-100 m), mégsem elhanyagolhatók.



- **Klasszikus transzport.** Véletlen lépések, a lépés nagysága a Larmor-sugár.
- **Neoklasszikus transzport** = klasszikus transzport+toroidális geometria
- **Anomális transzport**



**Plazma turbulencia**

## Plazma turbulencia



**DIII-D Shot 121717**

**GYRO Simulation**  
**Cray X1E, 256 MSPs**

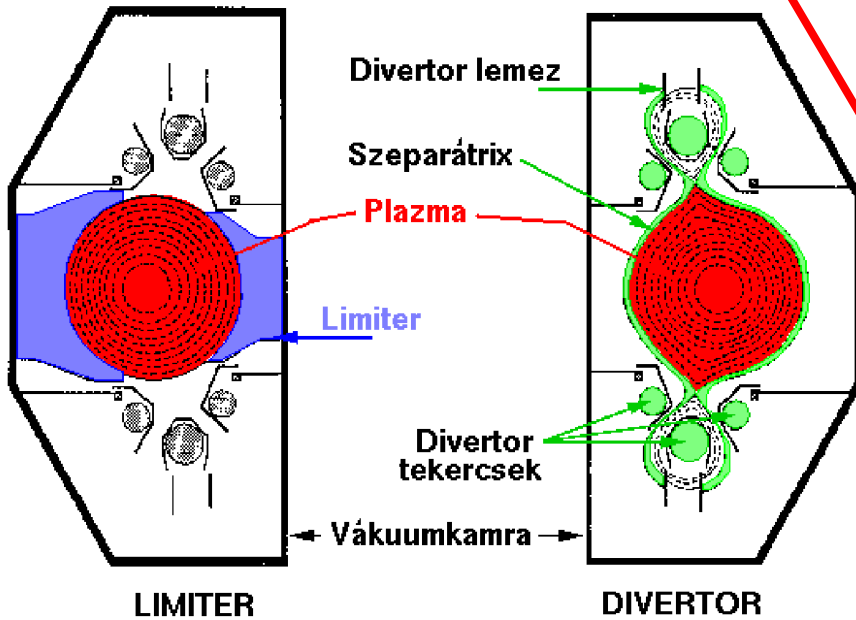
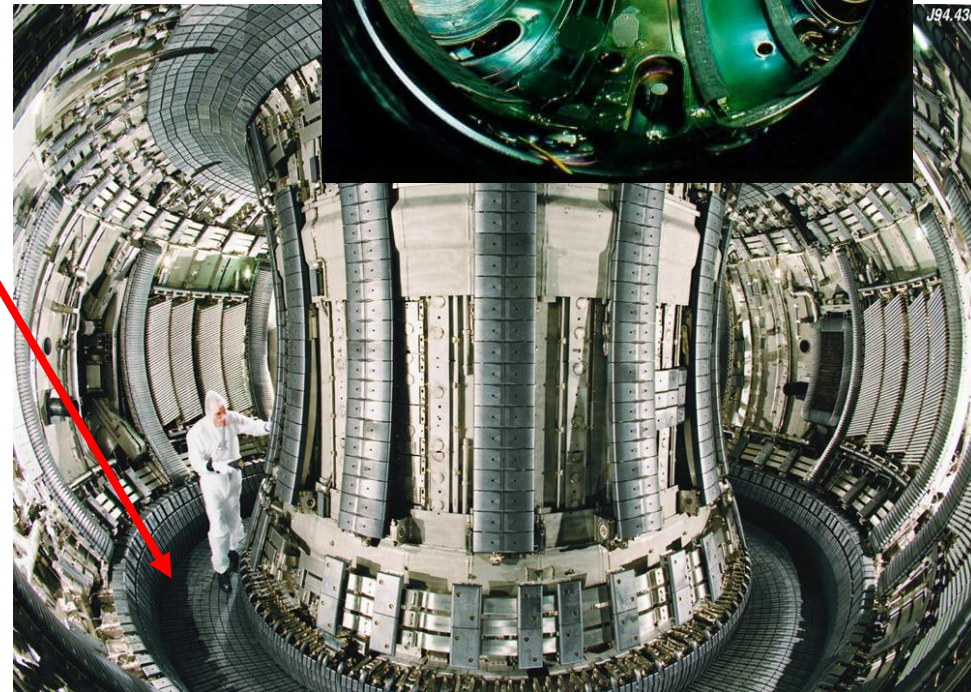
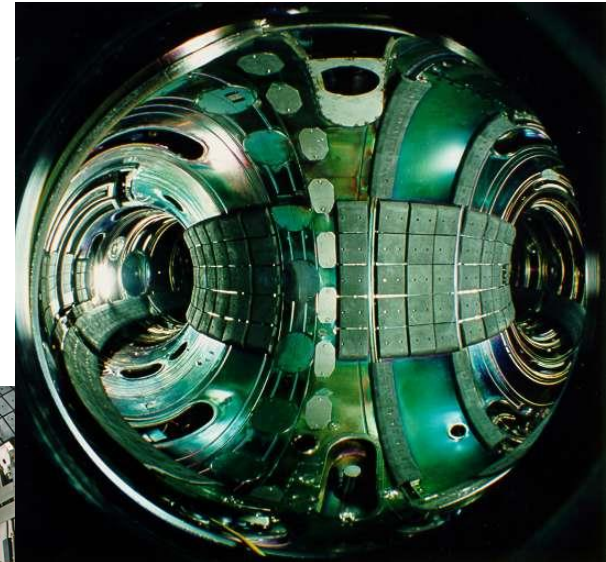
<https://fusion.gat.com/theory/Gyro>

# Plazmahatároló elemek

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

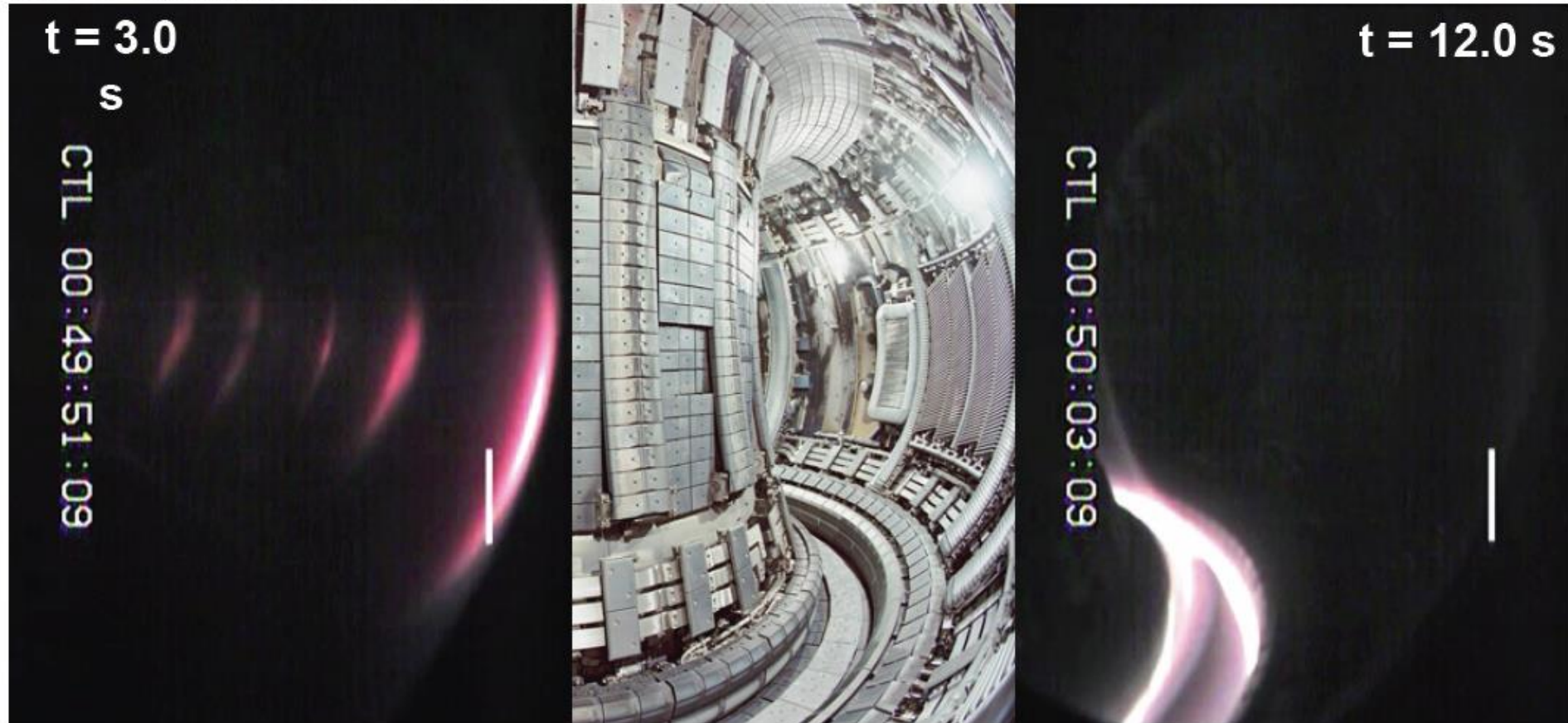
Kontrollált plazma-fal kölcsönhatás:  
**divertor**

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



# Limiter és divertor a JET tokamakban

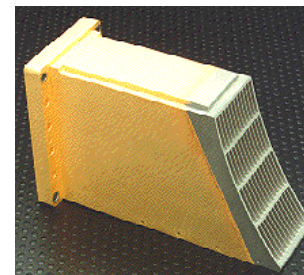
#62218: plasma visible light emission



# Fúziós technológiák: fűtés, áramhajtás

## Áram (tokamak):

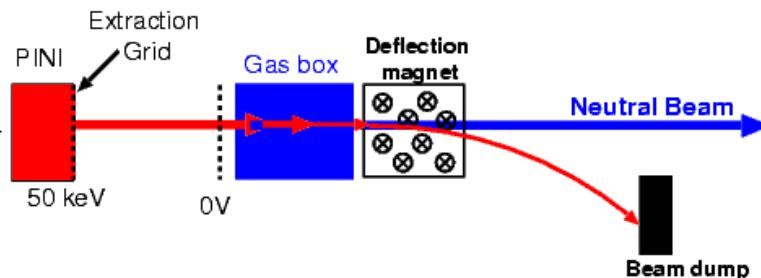
- ◆ Transzformátor tekercessel (csak impulzus <10 sec)
- ◆ Mikrohullámú áramhajtás (1 GHz-100 GHz, 1MW)



*Mikrohullámú  
(alsó hibrid)  
antenna*

## Fűtés:

- ◆ Plazmaárammal (kevés a fúzióhoz)
- ◆ Semleges részecske belövés (NBI)



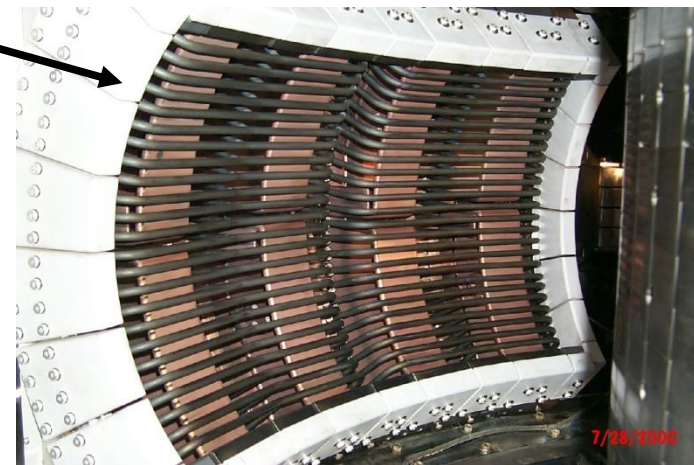
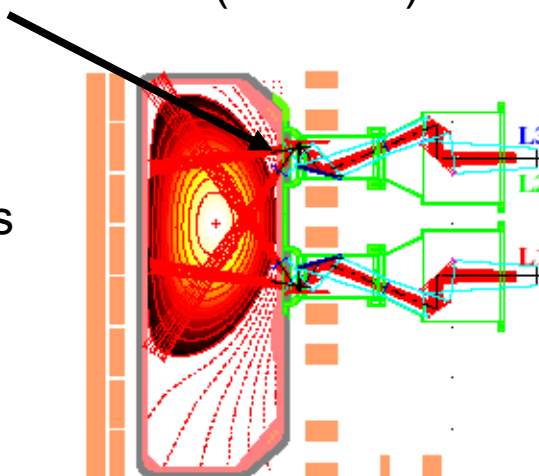
- ◆ Ion-ciklotron frekvencia (30 MHz)
- ◆ Elektron-ciklotron frekvencia (100GHz)

## Teljesítmények:

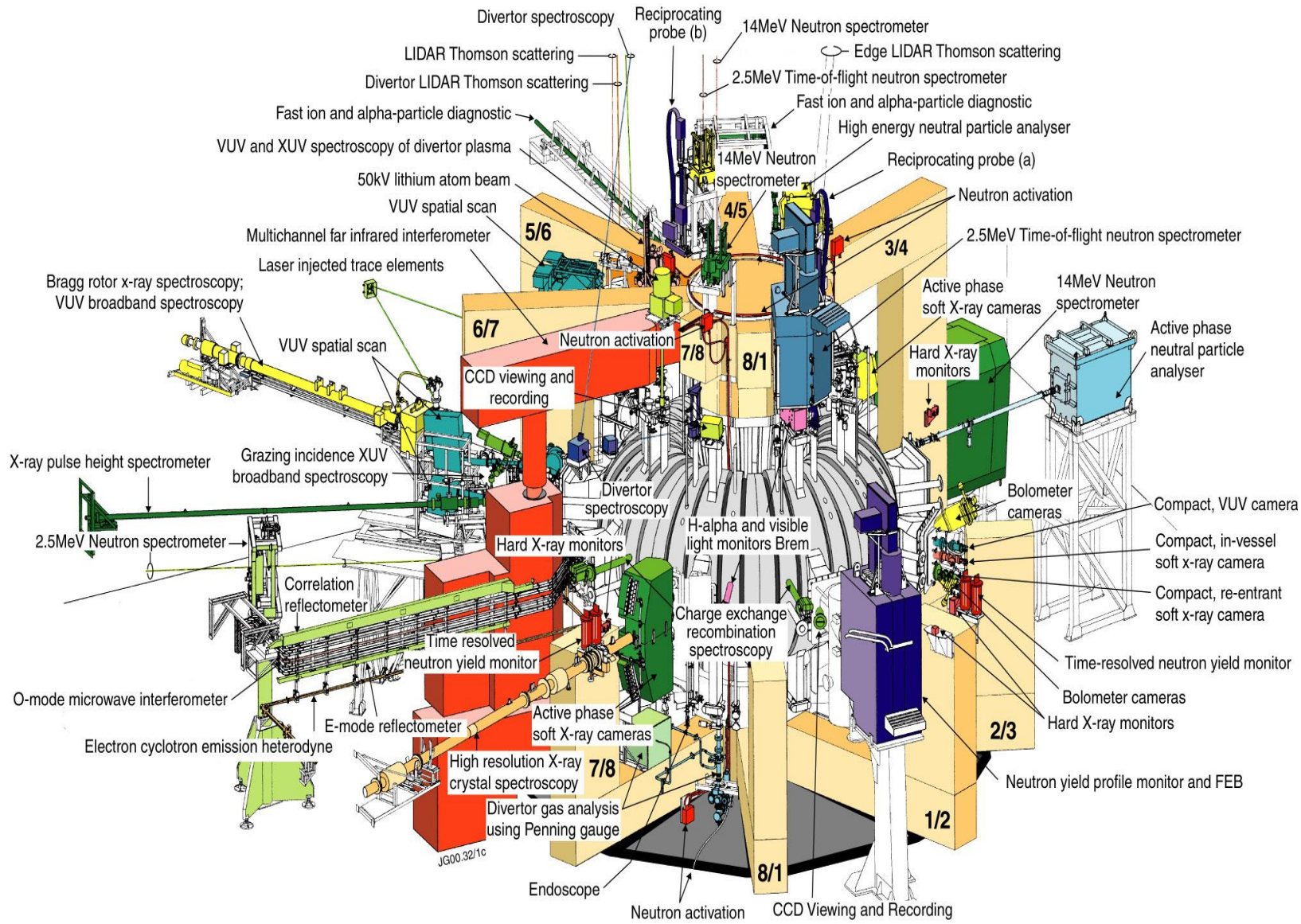
0.5-10 MW/blokk  
< 40 MW/berendezés

## Anyagutánpótlás:

gázbeeresztés, NBI  
pelletek



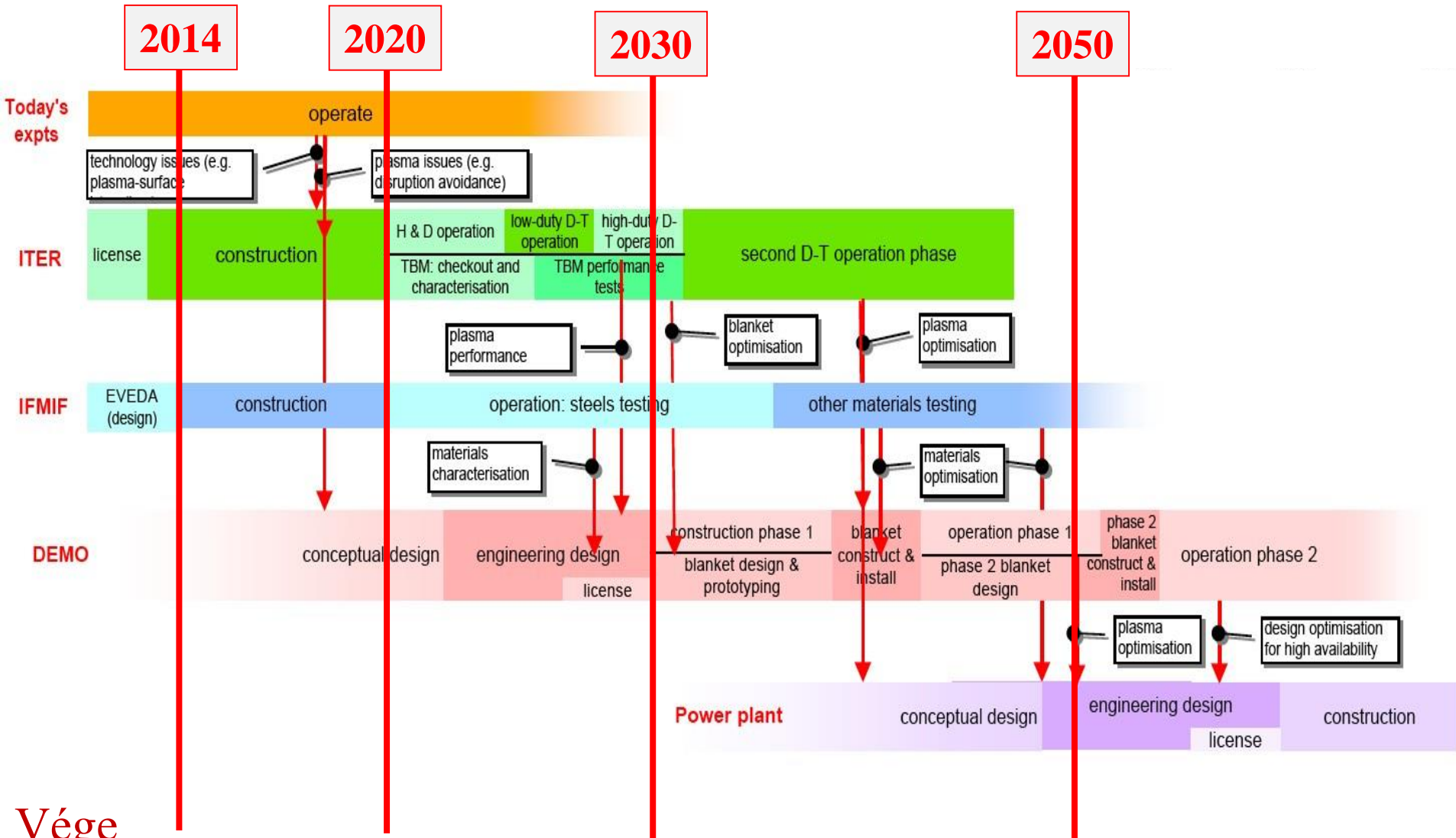
# Mérőrendszerek, diagnosztikák







# Út a fúziós energiatermeléshez (hivatalos időterv)

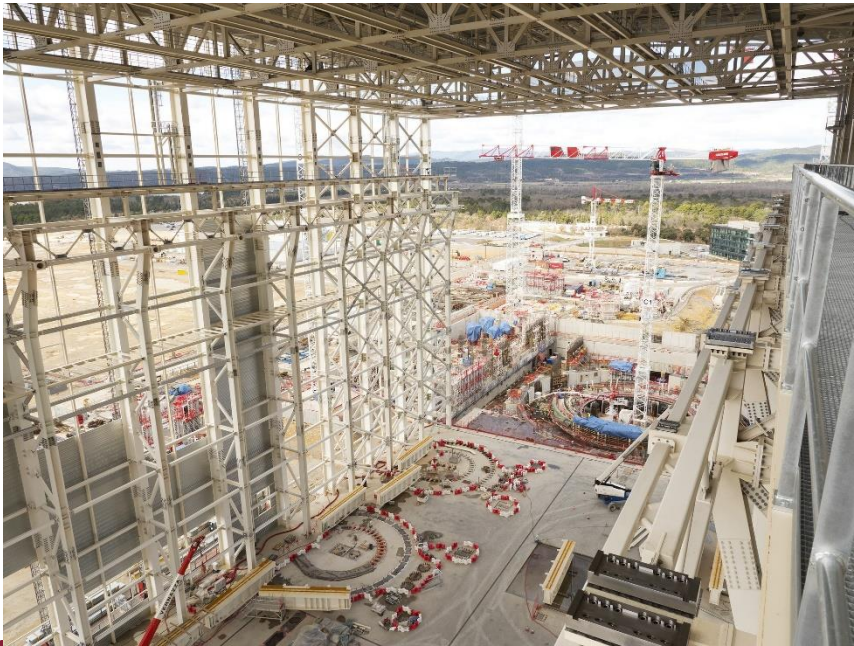


Vége

## Európai fúziós kutatások

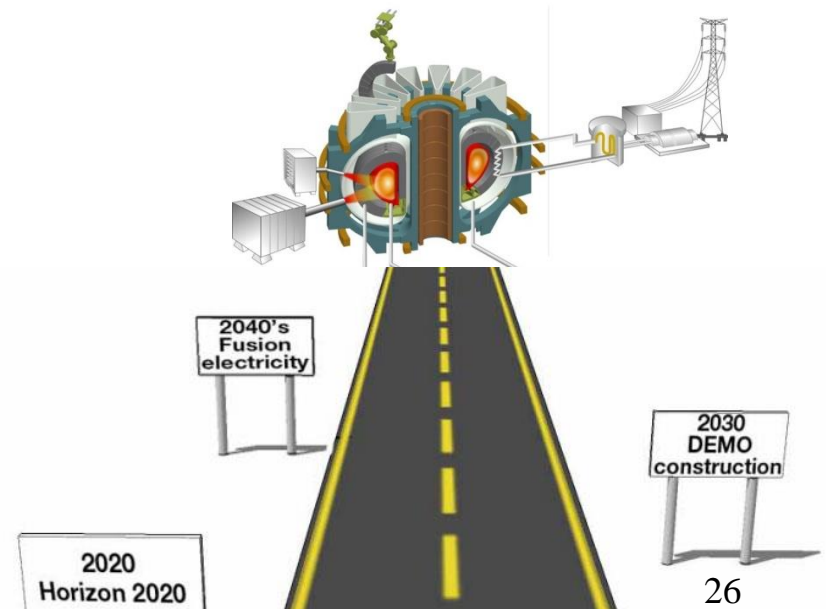
### ITER tokamak

- *Cadarache, Franciaország*
- *Építi EU (F4E), USA, Oroszo., Kína, Dél-Korea, India, Japán*
- *Célja 10-szeres energiasokszorozás, reaktor technológiák tesztelése*



### Fúziós útiterv

- *Európai (EURATOM) program*
- *Célja 2050 előtt hálózatra elektromos áramot termelni DEMO reaktorral*
- *Célzott kutatási projektek*



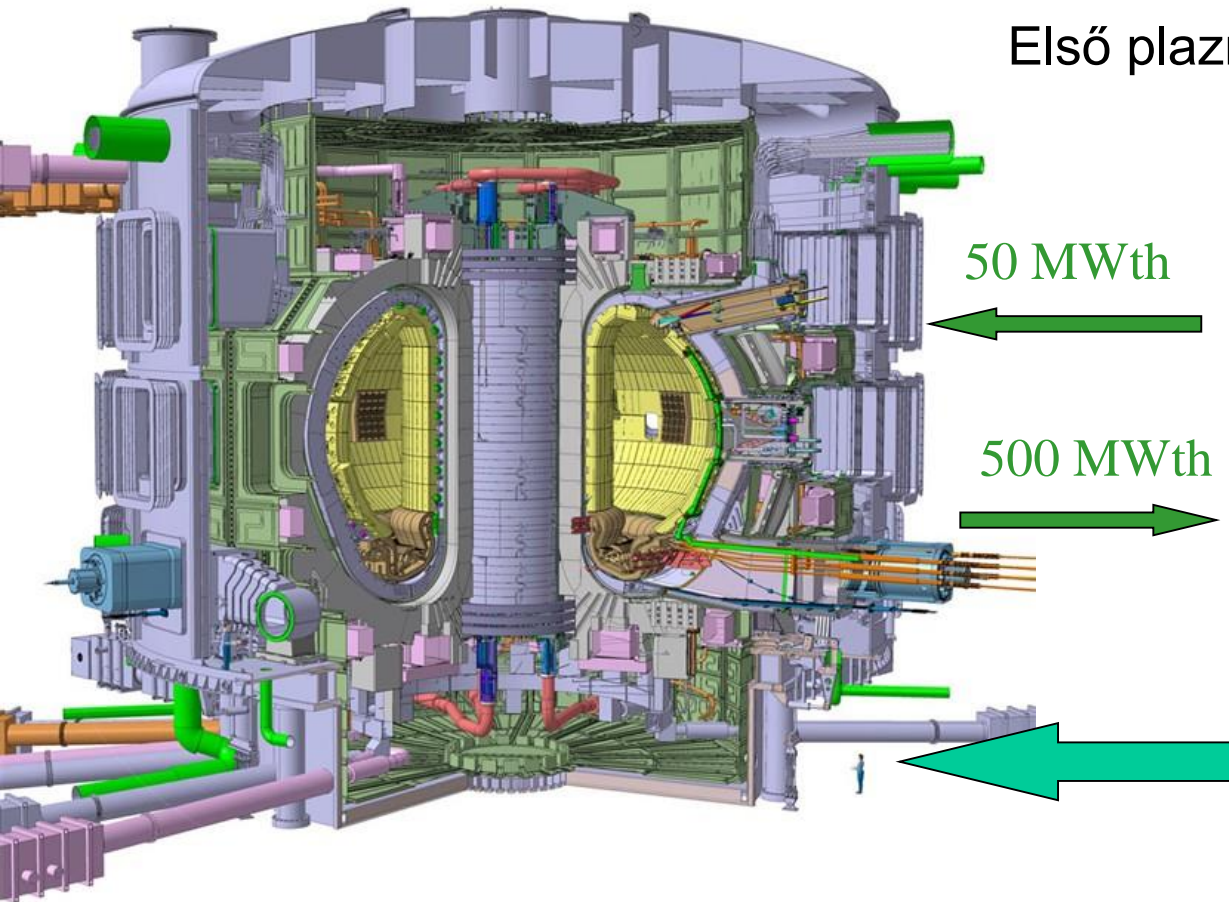
# ITER

(International Thermonuclear Experimental Reactor) → *az út*

Cadarache-ban épül Franciaországban.

Első plazma 2020-ban (tavalyi adat)

2025-ben (idei adat?!)



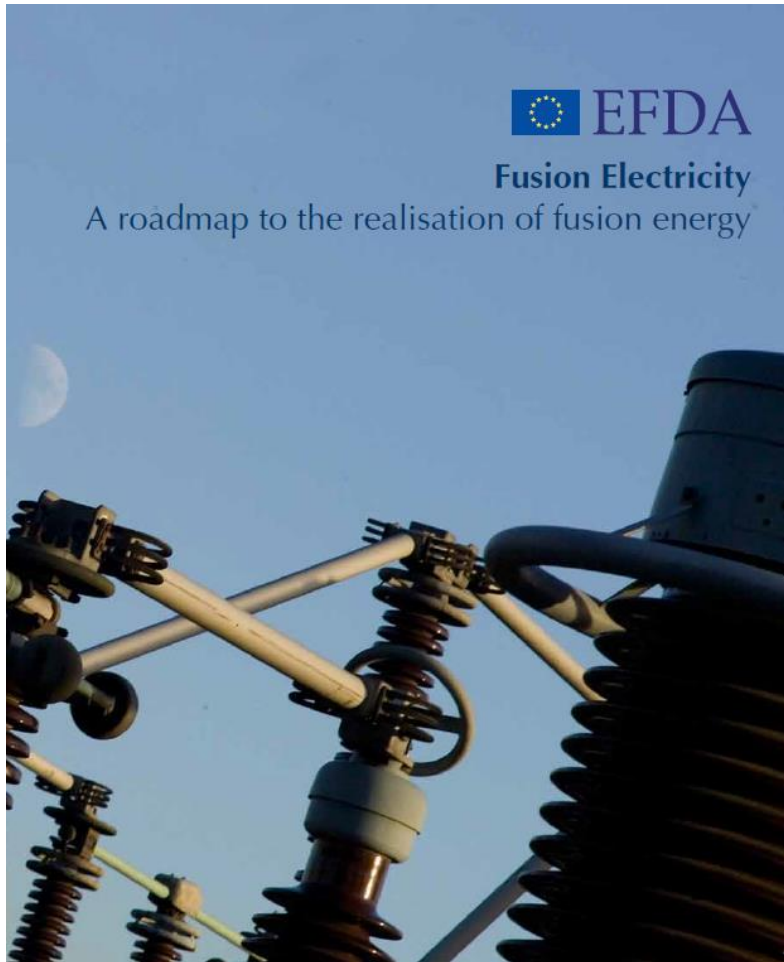
Cél:

$$Q \geq 10$$

átlag francia mérnök

## Fúziós útiterv (2012 vége)

**Cél:** pár 100 MW fúziós energia hálózatra termelése 2050 előtt



### Küldetések:

1. **Plazma üzemállapotok**
2. Hőelvezető rendszerek
3. Neutronsugárzásnak ellenálló anyagok
4. Trícium önellátás
5. Inherens biztonság
6. DEMO tervezése
7. Költséghatékony technológiák
8. **Sztellarátorok**

# 1. Plazma üzemállapotok

## Cél:

- Reaktor-kompatibilis plazma üzemállapotok kifejlesztése
- Állandósult állapotú tokamak üzem mód (DEMO: több órás kisülések)

## Eszközök:

- ***ITER egyik fő feladata***
- JET: impulzus üzem mód
- JT-60SA: állandó üzem mód
- Kis és közepes méretű tokamakok (ASDEX Upgrade): teljes volfrám fal
- Instabilitások, diszrupciók, elfutó elektronok



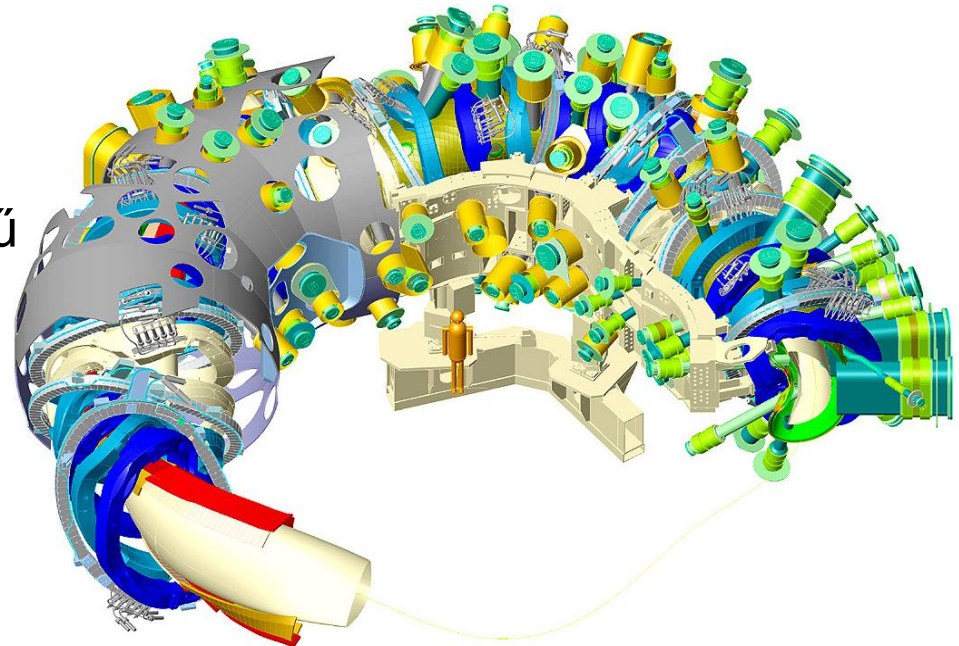
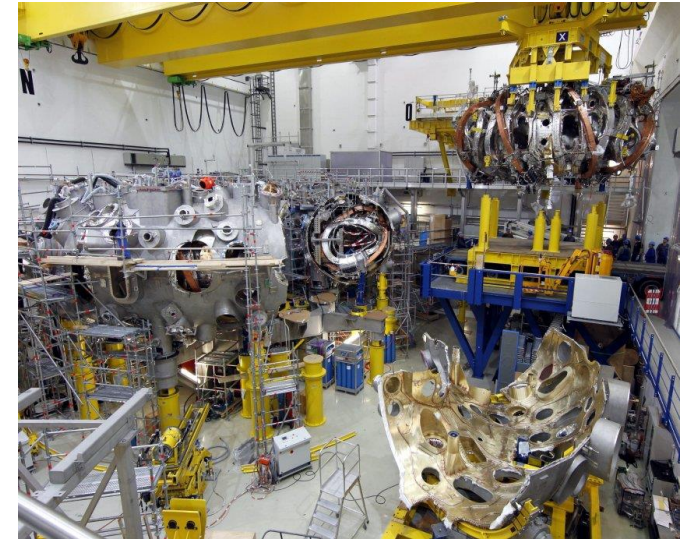
## 8. Sztellarátorok

### Cél:

- HELIAS sztellarátor technológia fejlesztése.

### Eszközök:

- W7-X (Greifswald) kihasználása **(2015-ben indult!)**
- W7-X eredményektől függ a jövő
- DEMO nem lesz sztellarátor, de később lehet sztellarátor erőmű
- Heliotron fejlesztések Japánnal
- Kompakt sztellarátor fejlesztések USA-val



## Összefoglalás

A magfúzióból **óriási energia** szabadítható fel.

Deutérium korlátlanul rendelkezésre áll, de **a tríciumot lítiumból kell megtermelni** a reaktor köpenyében.

A **reakció végterméke stabil izotóp**, nem radioaktív ( $^4\text{He}$ ).

Lehet **tehetetlenségi és mágneses összetartás**.

A mágneses összetartás tórusz alakú **tokamakban vagy sztellarátorban** történhet.

A **fúziós energiatermelést demonstrálták** (JET, 1997).

Az **energiasokszorozás demonstrálására épül az ITER** (~2025).

Elektromos hálózatra termelő **erőmű lesz a DEMO** (~2050).

A **gazdaságosság** nagyrészt a magashőmérsékletű szupravezető- és az anyagtechnológia fejlődésén múlik.

## Kapcsolat

BME NTI: Pokol Gergő, [pokol@reak.bme.hu](mailto:pokol@reak.bme.hu), [www.reak.bme.hu/pokol](http://www.reak.bme.hu/pokol)

## Ajánlott irodalom

Fúziós útiterv:

<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 Newsline: <http://www.iter.org/newsline>

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

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