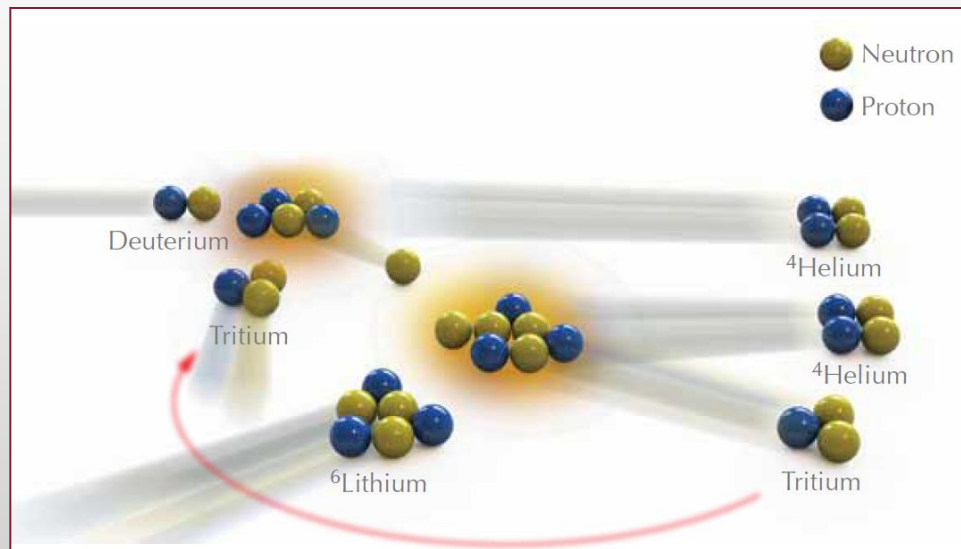
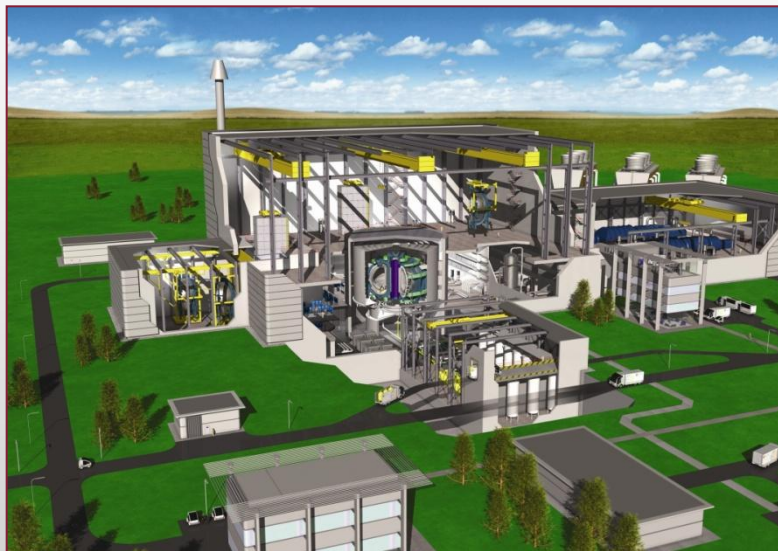


Hogyan lesz fúziós erőművünk 2050-ben?



Pokol Gergő



BME NTI

ESZK

2014. április 24.

Hogyan lesz fúziós erőművünk 2050-ben?

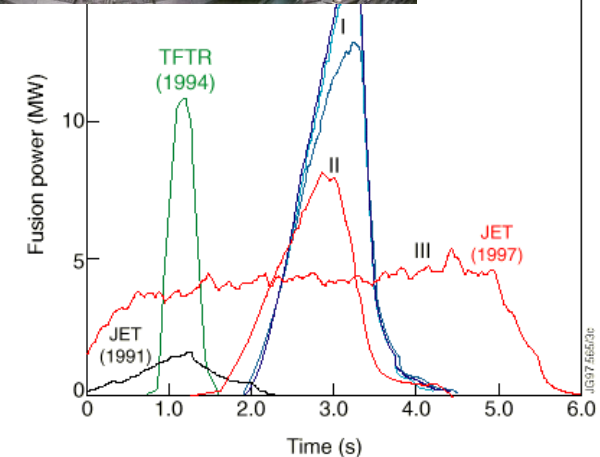
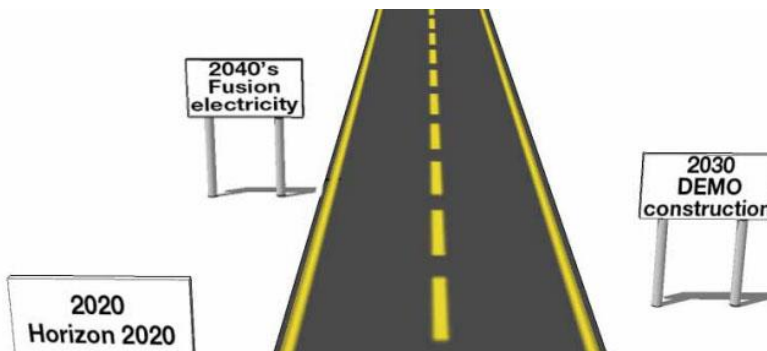
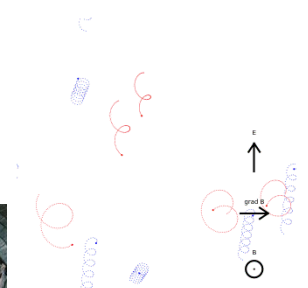
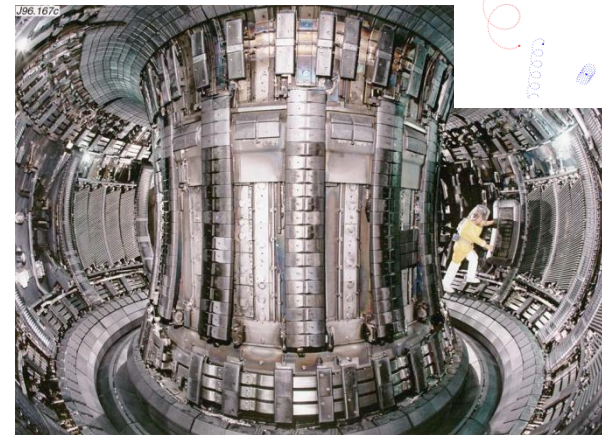
➤ *A fúziós reaktorok fizikájáról dióhéjban*

➤ *A fúziós reaktorok technológiája*

➤ *Hol tartunk ma?*

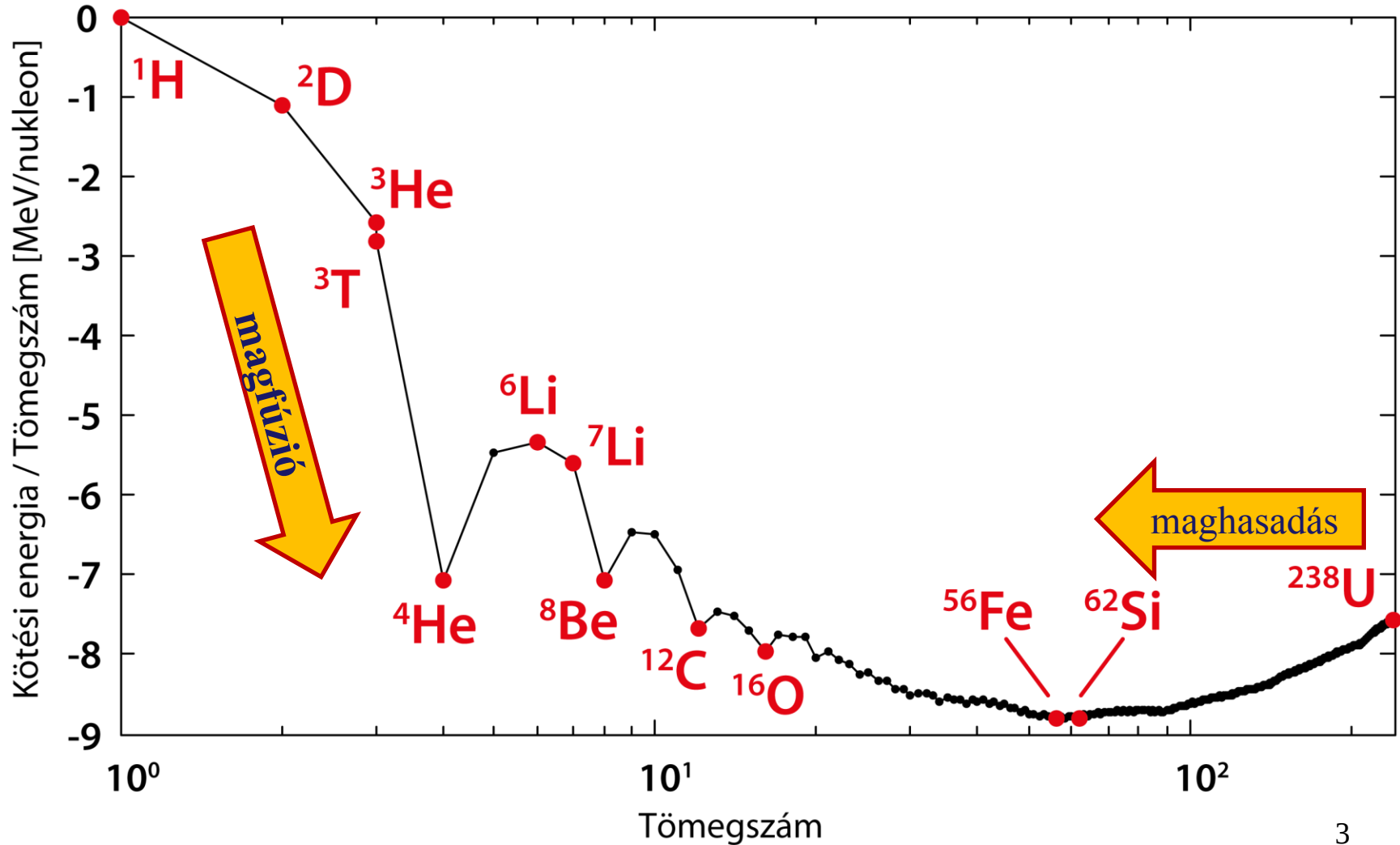
➤ *Fúziós útiterv*

➤ *Magyar témák*

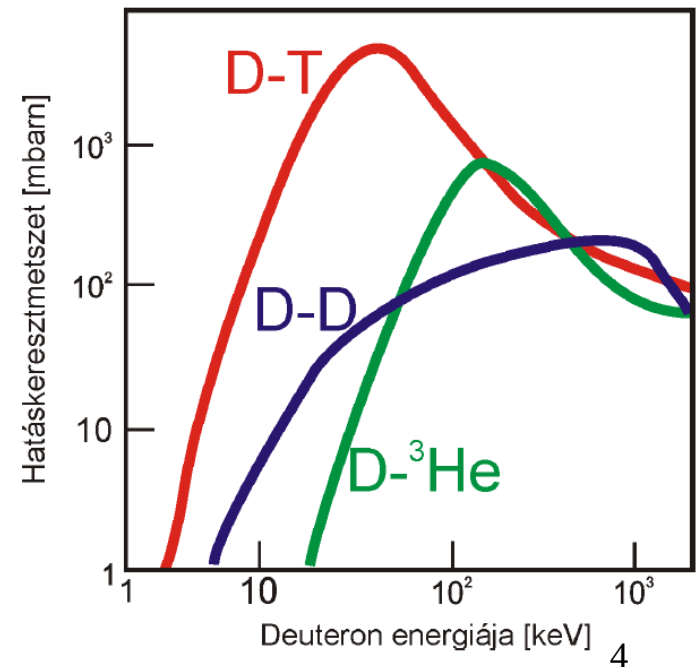
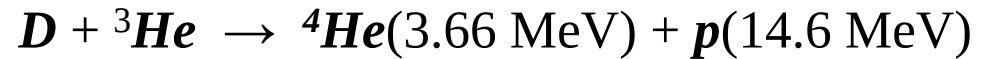
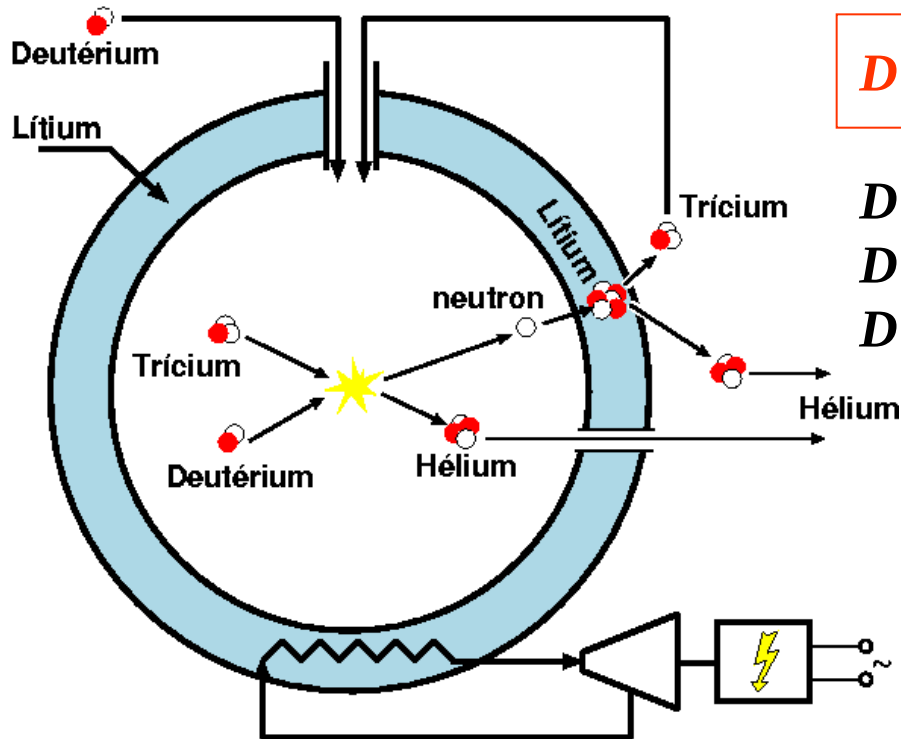


Fúziós alapok

Egy nukleonra eső kötési energia



Fúziós reaktor üzemanyagciklusa



A fúziós reakcióban nem keletkeznek radioaktív izotópok!

Lehet-e gyorsítóval energiát termelni?

A reakciók küszöbenergiája $E_0 \approx 10-100 \text{ keV}$. Gyorsítsuk föl az egyik magot erre az energiára és lőjük bele a másikba!

A magok σ_s hatáskeresztmetszettel szóródnak a másik mag Coulomb terében és $\sigma_f \approx 10^{-5} \sigma_s$ hatáskeresztmetszettel fuzionálnak. Amennyiben a magok fuzionálnak, $E_f \approx 10^3 E_0$ energia szabadul föl. Az energiamérleg másodpercenként N mag gyorsítása esetén:

$$P_{ki} = NE_0 + \frac{\sigma_f}{\sigma_s + \sigma_f} NE_f = P_{be} \left(1 + \frac{\sigma_f}{\sigma_s + \sigma_f} \frac{E_f}{E_0} \right) \approx 1.01 P_{be}$$

Gyorsítóval nem lehet energiatermelő reaktort építeni!

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

Fúziós energiát termelni csak termikus közegben lehet!

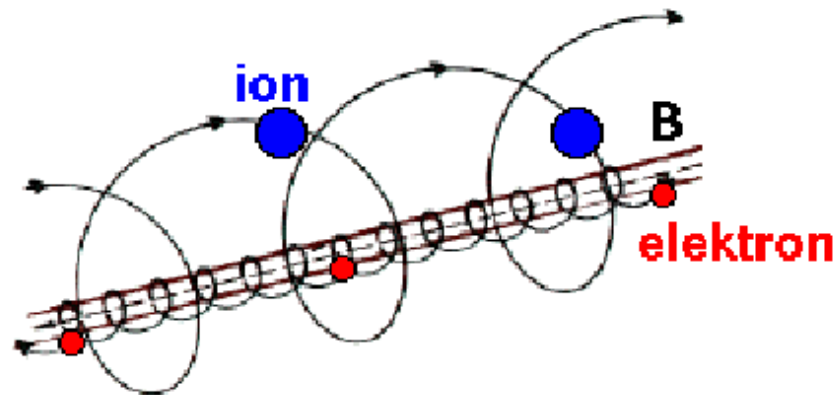
Mágneses összetartás

Forró, híg plazmában a részecskék szabad úthossza nagy (gyakorlatilag ütközésmentes rendszerről van szó).

Tekintsük szabad, töltött részecskék mozgását!

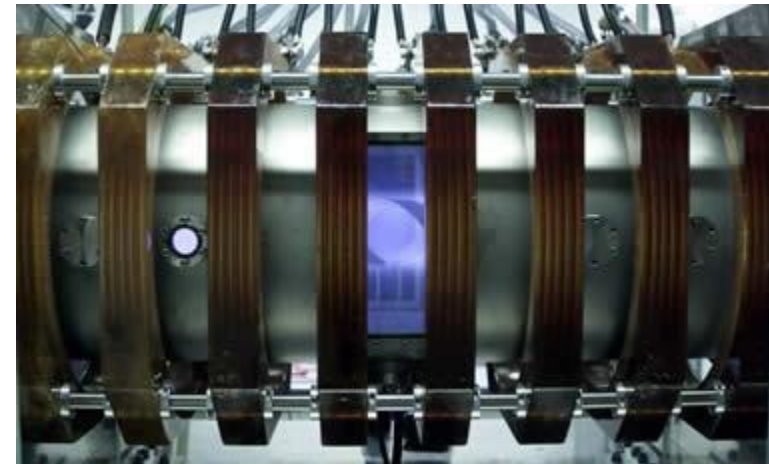
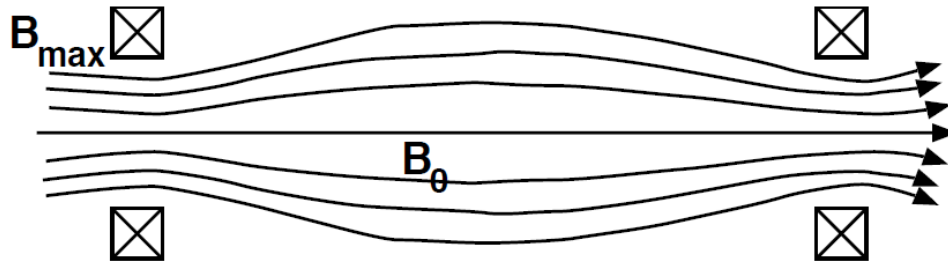
A Lorentz erővel a mozgásegyenlet:
$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Ha $E=0$, spirál pálya a mágneses erővonal mentén.



Mágneses összetartás, lineáris geometria

Ha grad B párhuzamos $\mathbf{B}$ -vel, úgynevezett **mágneses palackot** kapunk, amiben a részecskék az összesűrűsödő erővonalak tartományáról visszaverődnek.



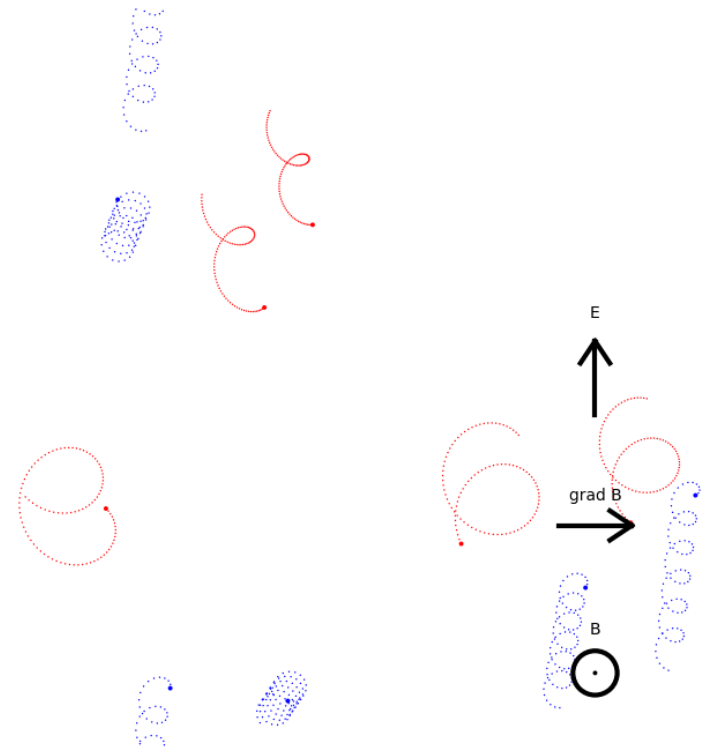
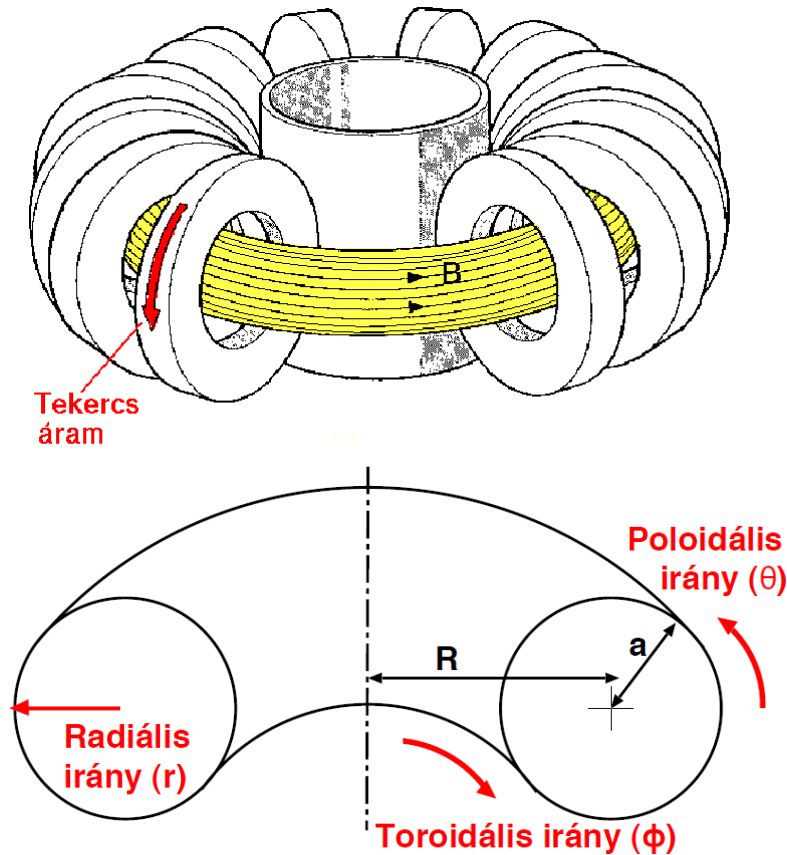
A közel mágneses térrel párhuzamosan mozgó részecskékre nincs hatással

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

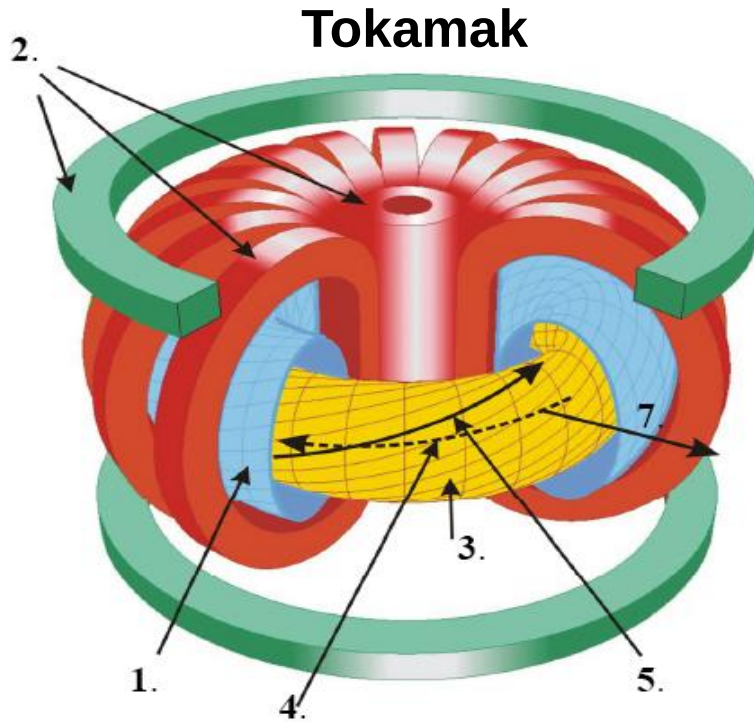
<https://deep.reak.bme.hu:8080/home/pub/14/>

Mágneses összetartás, toroidális geometria

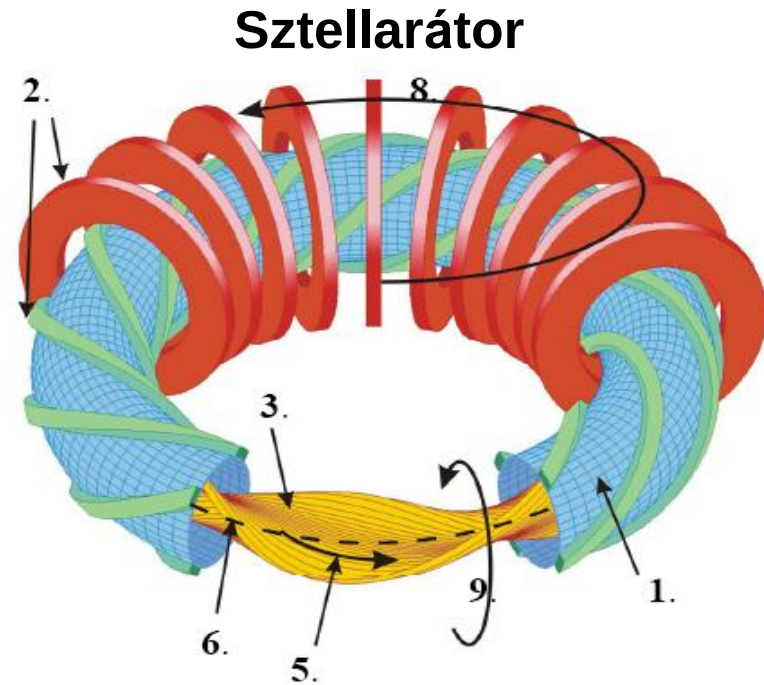
A lineáris berendezést tórusz alakúra alakítva a végeffektusok elkerülhetők. Ekkor egy tórusz alakú plazmagyűrűt kapunk. Driftek!



Mágneses összetartás berendezéstípusai

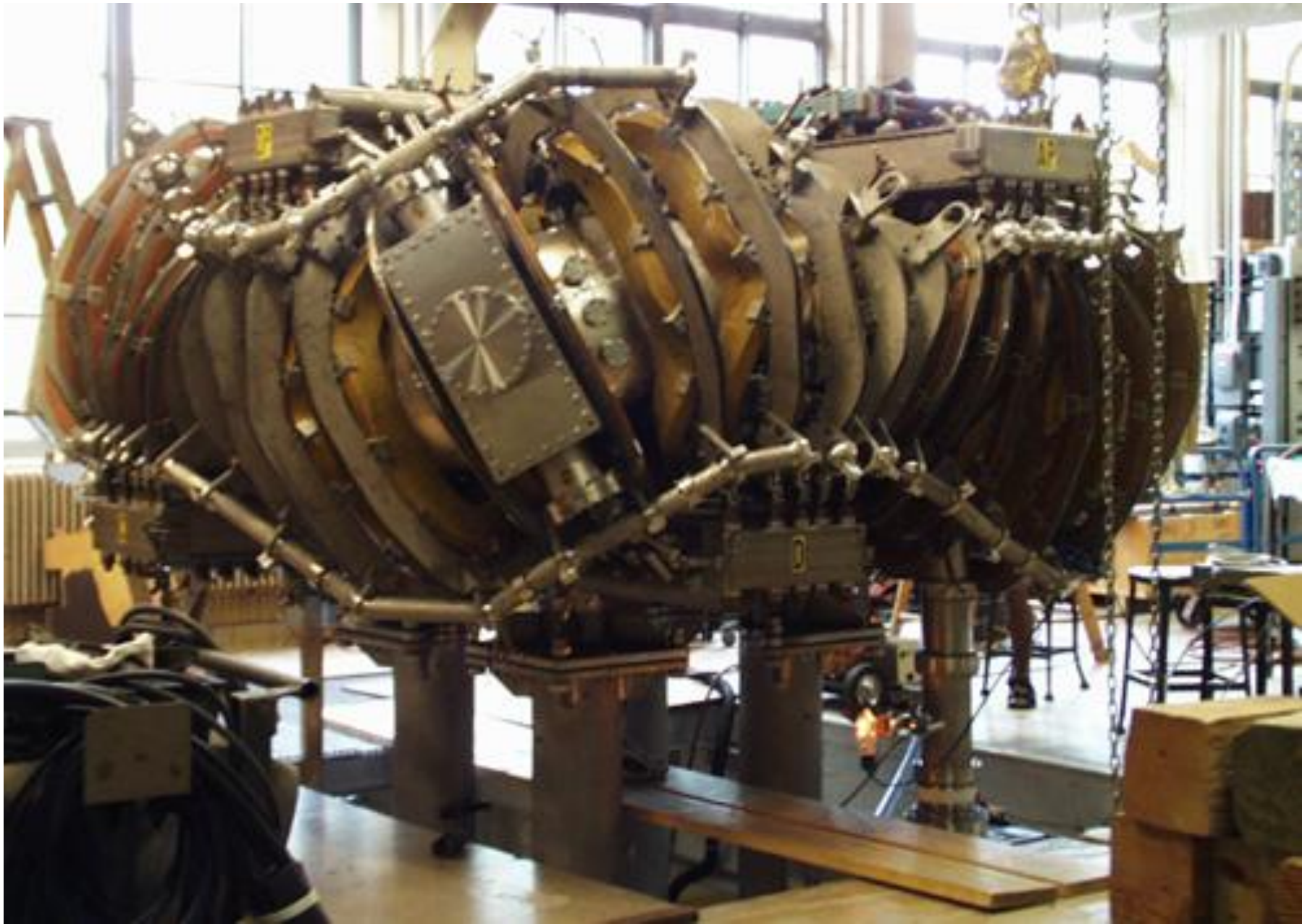


Toroidális plazmaáram

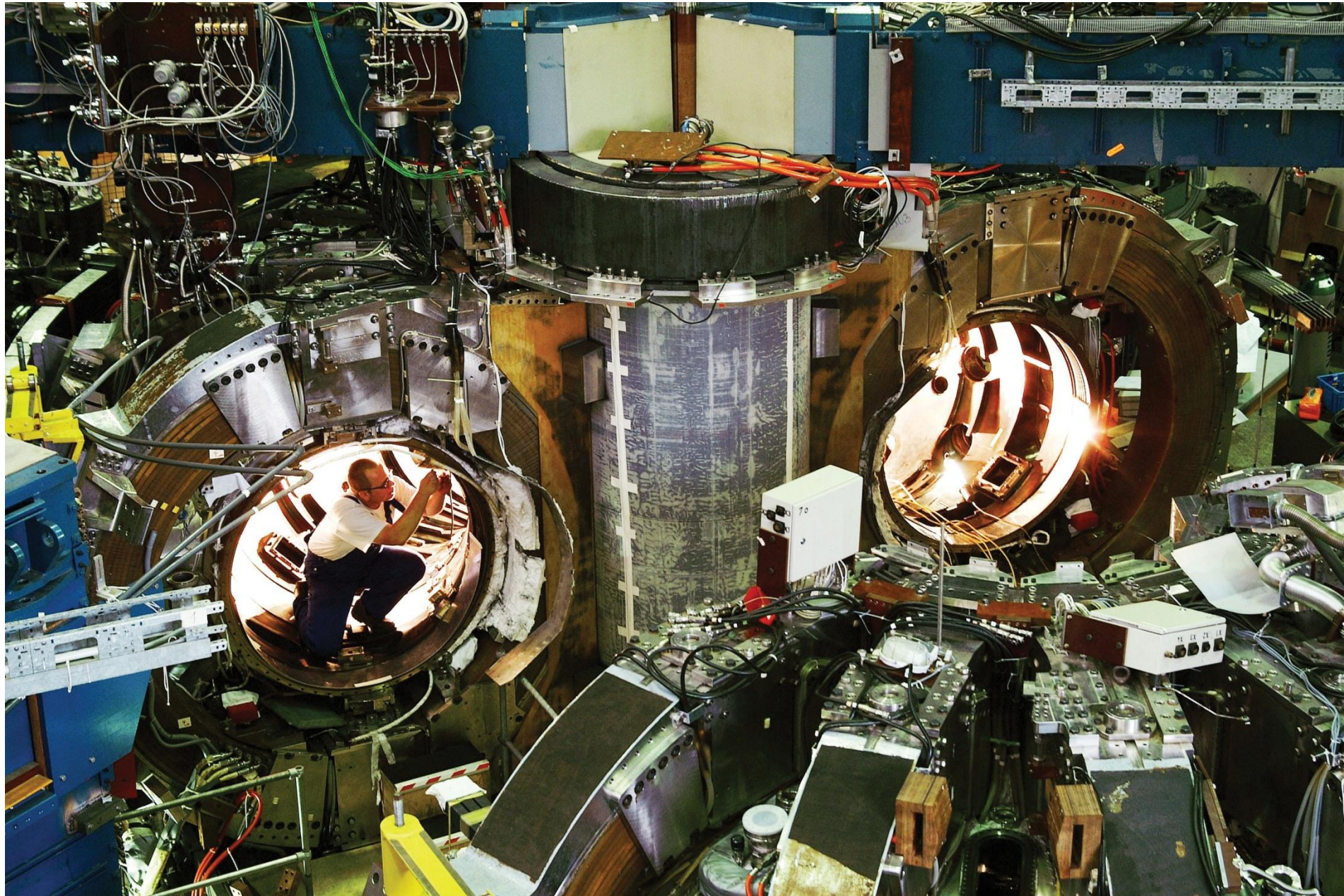


Helikális tekercsek

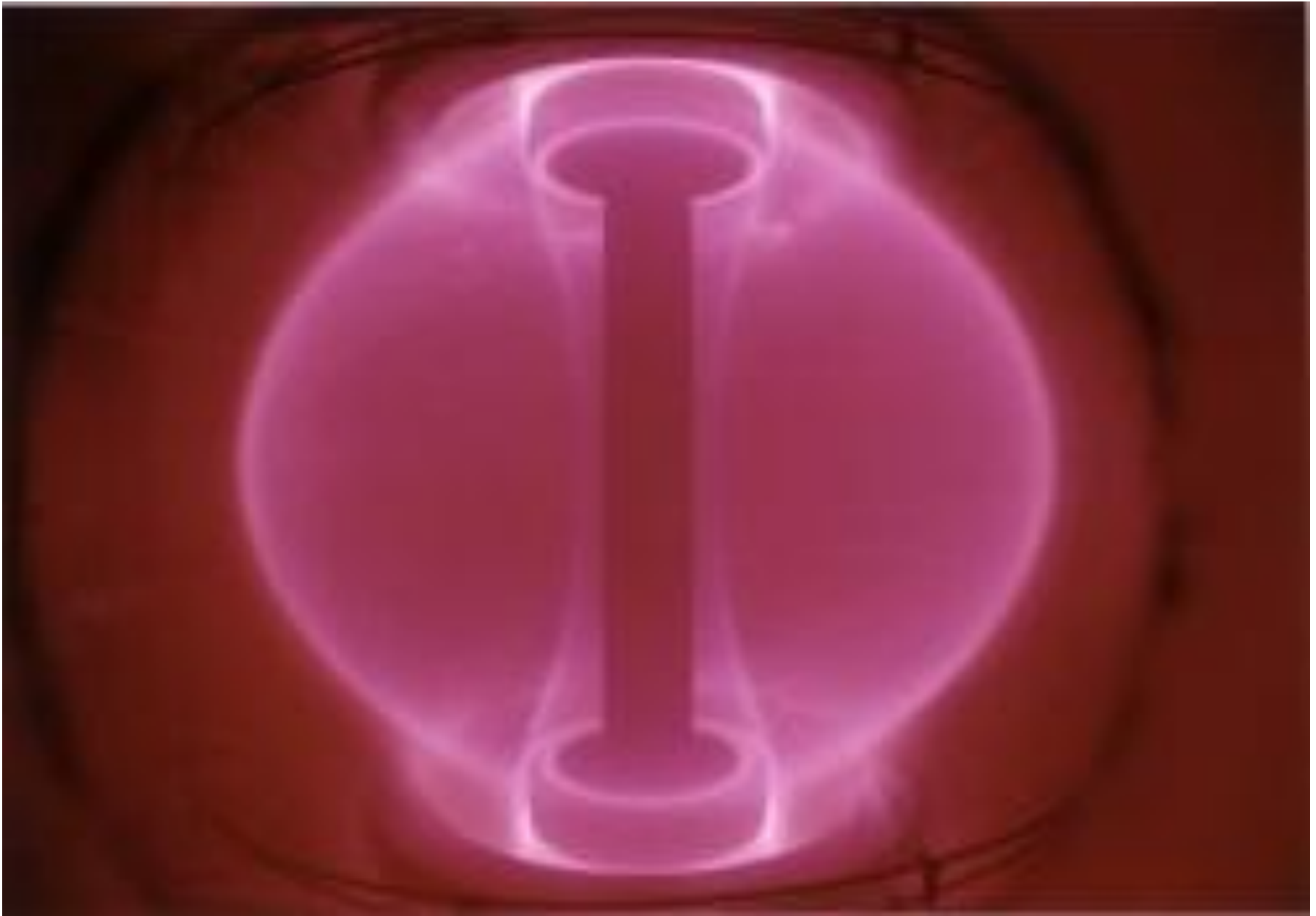
- (1) vákuumkamra, (2) mágneses tekercsek, (3) plazma,
 (4) plazmaáram, (5) mágneses erővonal, (6) mágneses tengely,
 (7) radiális irány, (8) toroidális irány, (9) poloidális irány



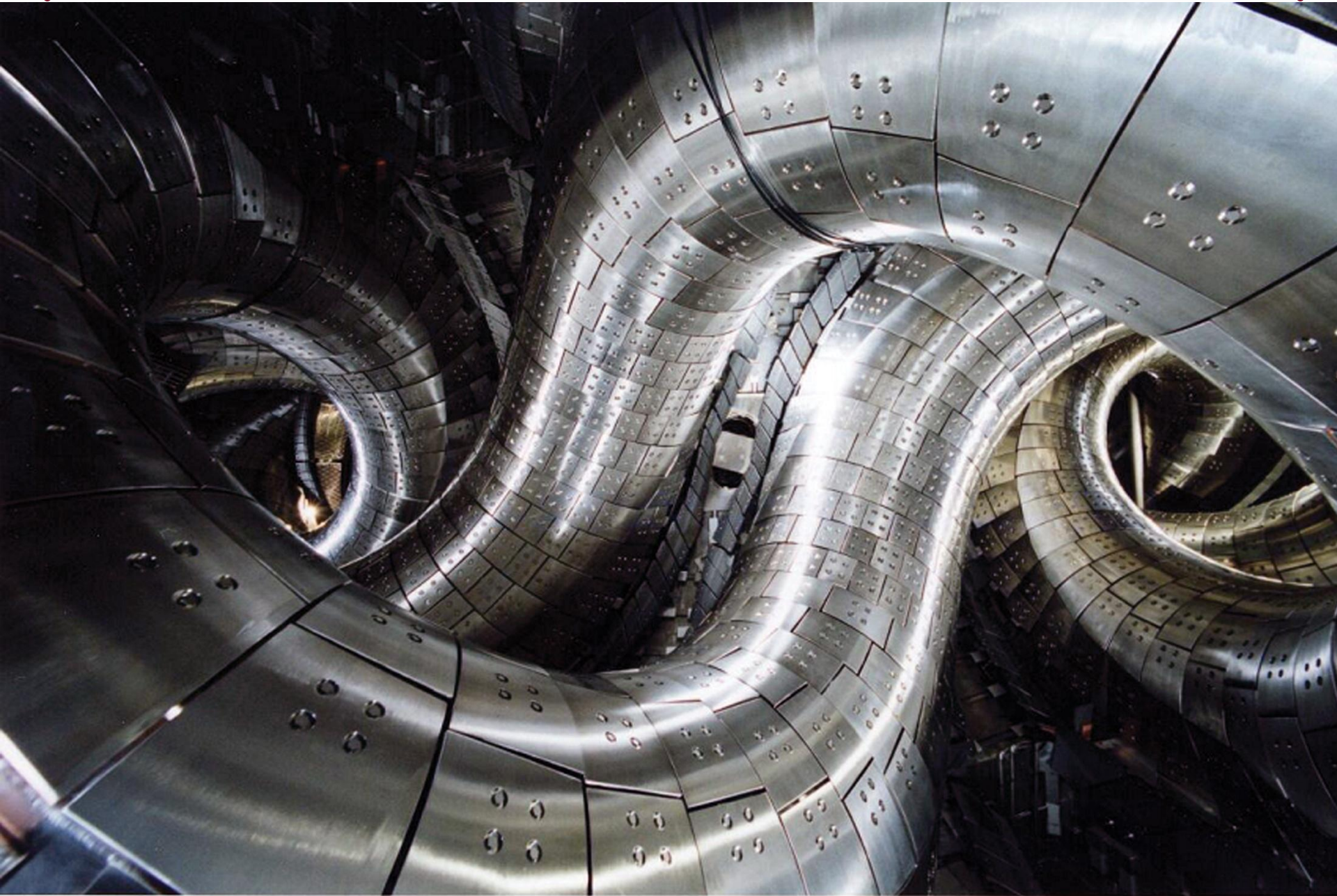
ESZK, 2014. április 24.



ESZK, 2014. április 24.



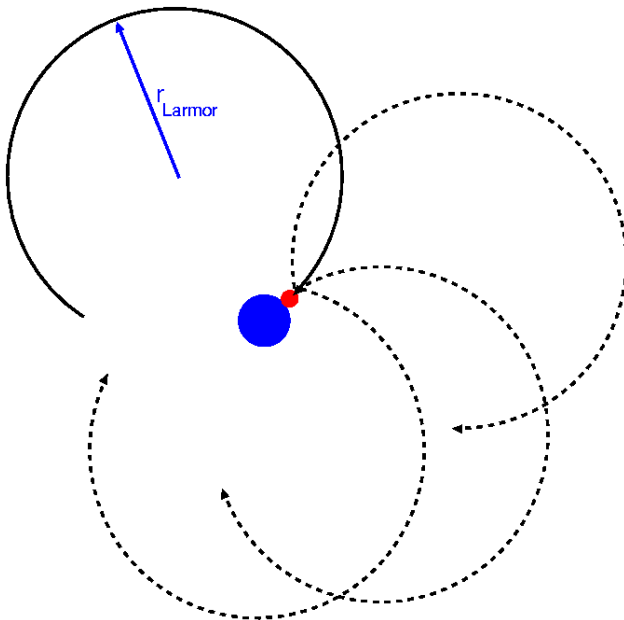
ESZK, 2014. április 24.



ESZK, 2014. április 24.

Transzport mágnesesen összetartott fúziós plazmákban (véges összetartás)

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



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



Plazma turbulencia

Plazma turbulencia

DIII-D Shot 121717

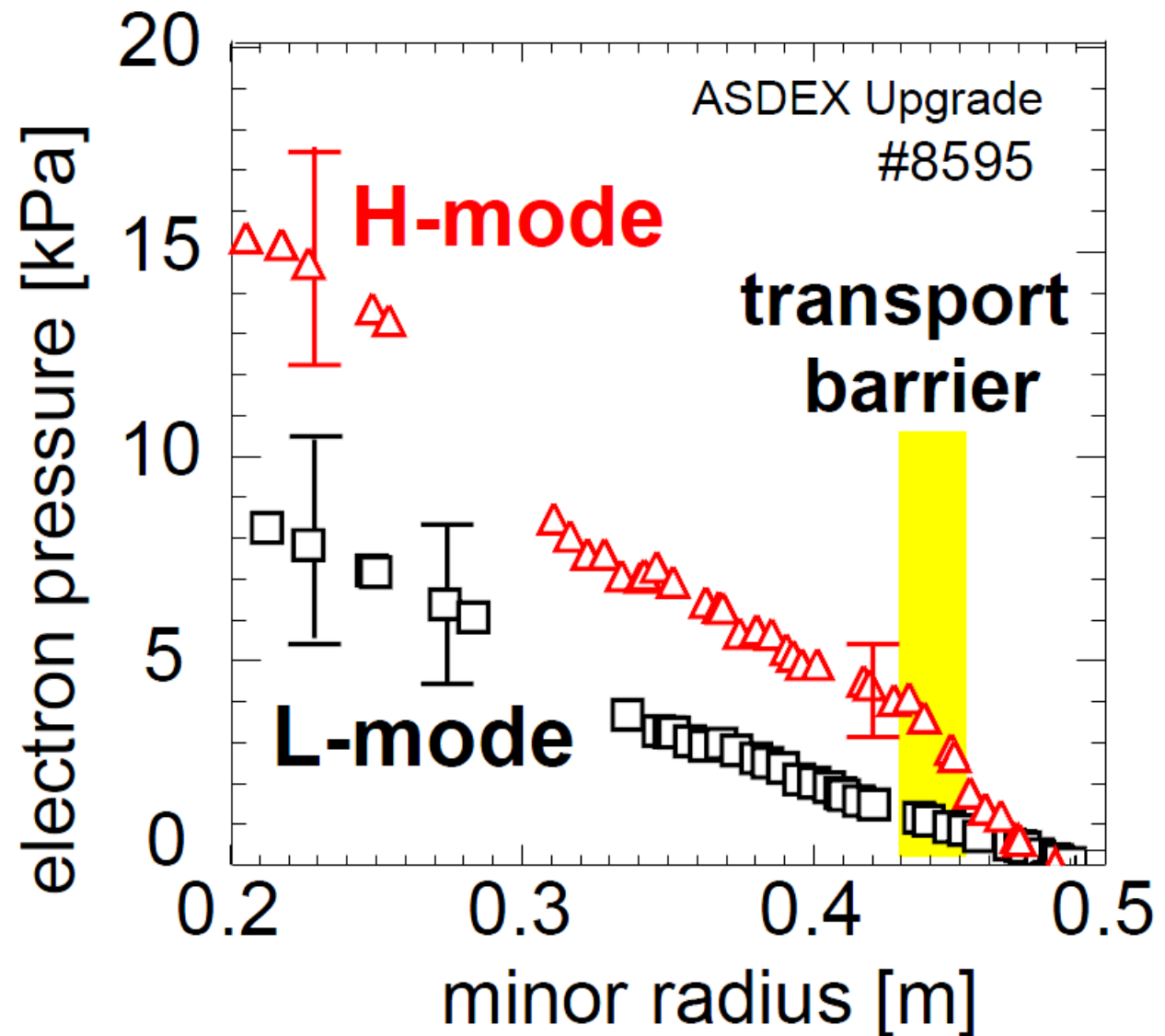
GYRO Simulation
Cray X1E, 256 MSPs

L-mód H-mód

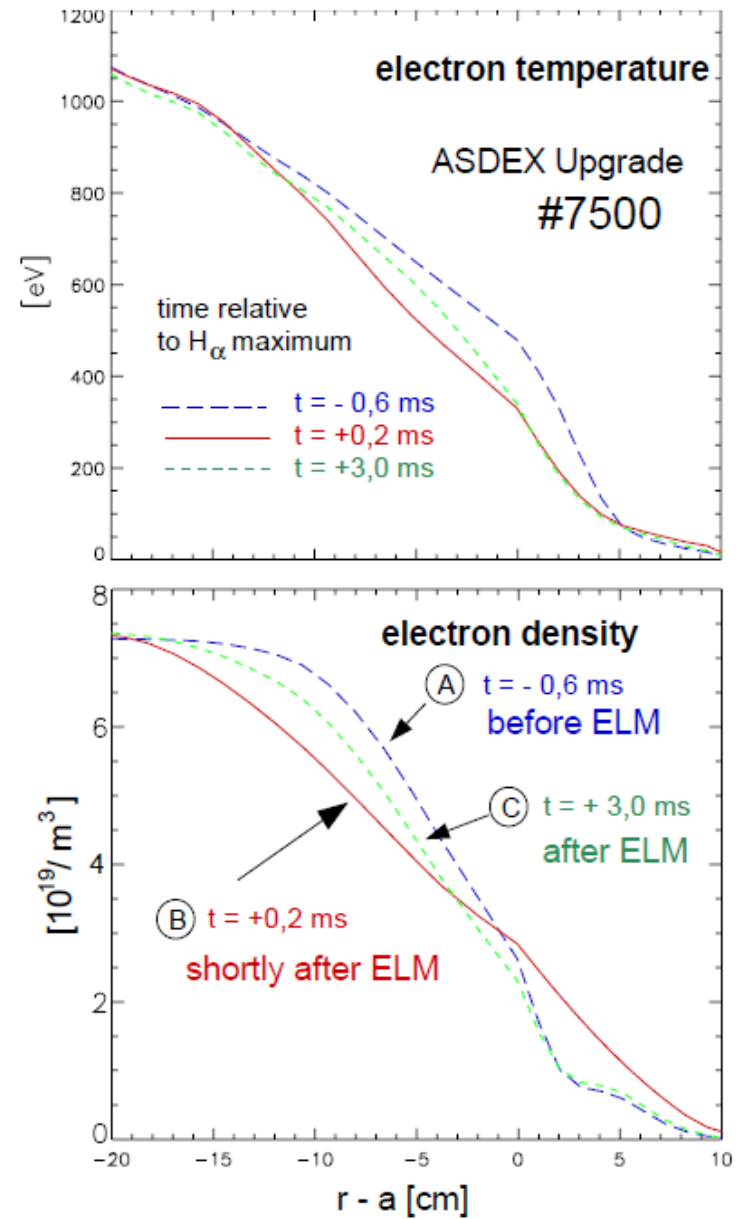
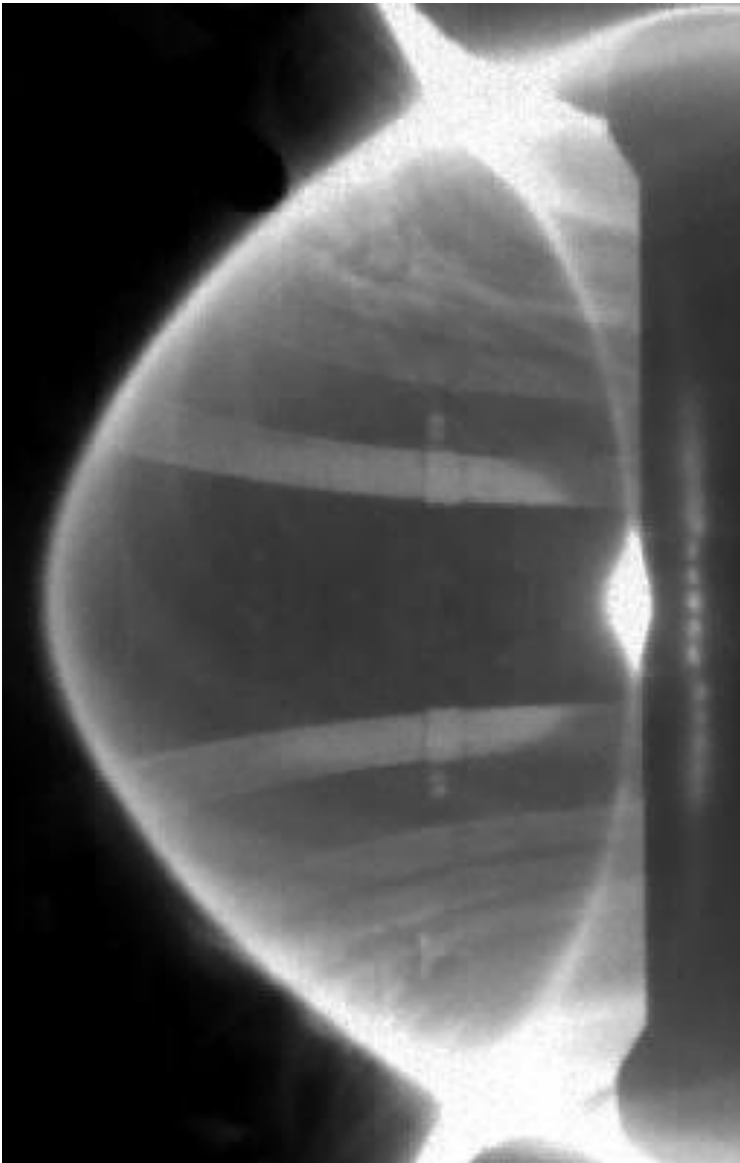
H-mód: high confinement mode

Feltételek:

- Jó fal
- Megfelelő sűrűség
- Nagy fűtési teljesítmény
- ...



ELM-ek

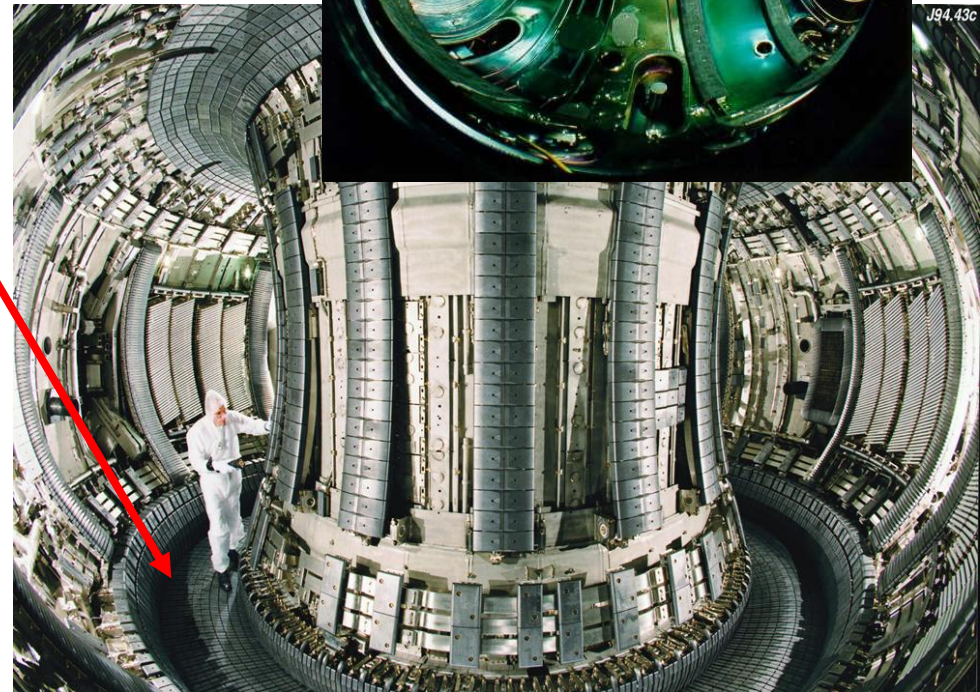
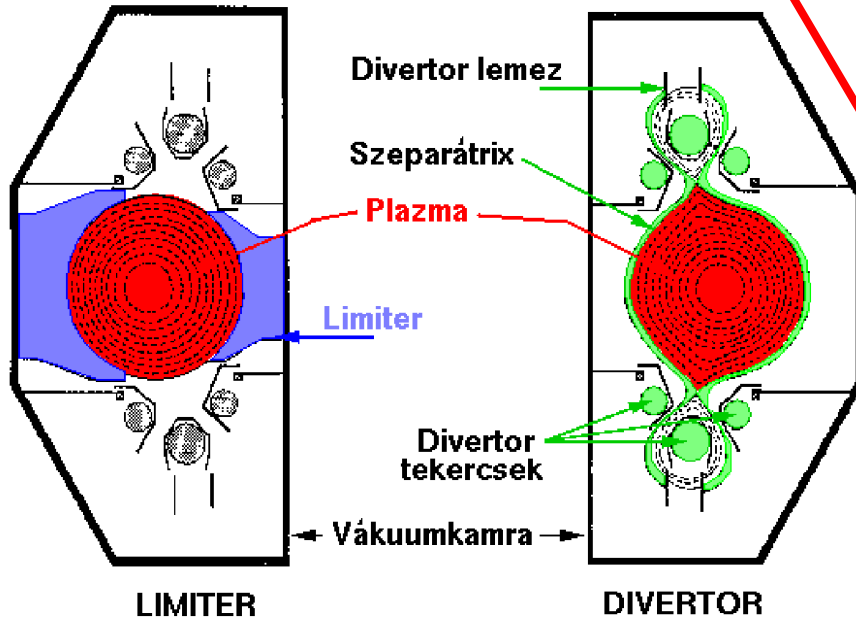


Plazmahatároló elemek

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

t = 3.0
s

CTL 00:49:51:09



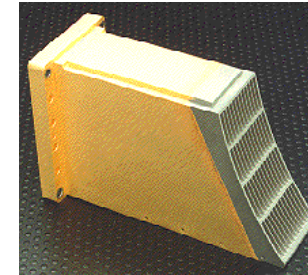
t = 12.0 s

CTL 00:50:03:09

Fúziós technológiák: fűtés, áramhajtás

Áram (tokamak):

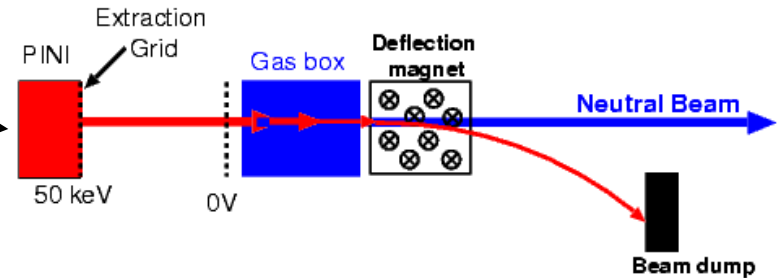
- Induktív áramgerjesztés (csak impulzus < 10 sec)
- Mikrohullámú áramhajtás (1 GHz-100 GHz, 1MW)



*Mikrohullámú
(alsó hibrid)
antenna*

Fűtés:

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



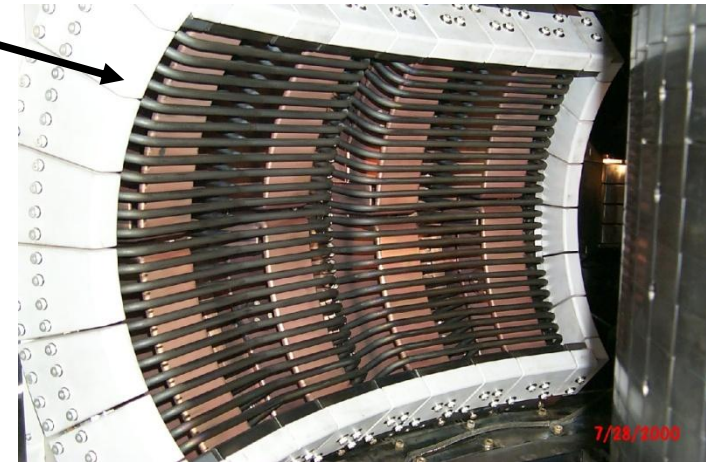
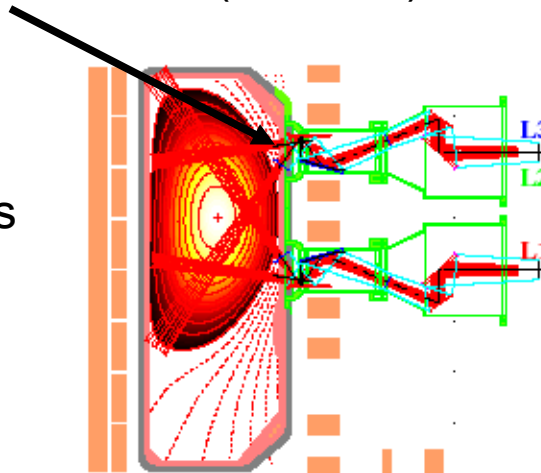
- Ion-ciklotron frekvencia (30 MHz)
- Elektron-ciklotron frekvencia (100GHz)

Teljesítmények:

0.5-10 MW/blokk
 < 40 MW/berendezés

Anyagutánpótlás:

gázbeeresztés, NBI
 pelletek



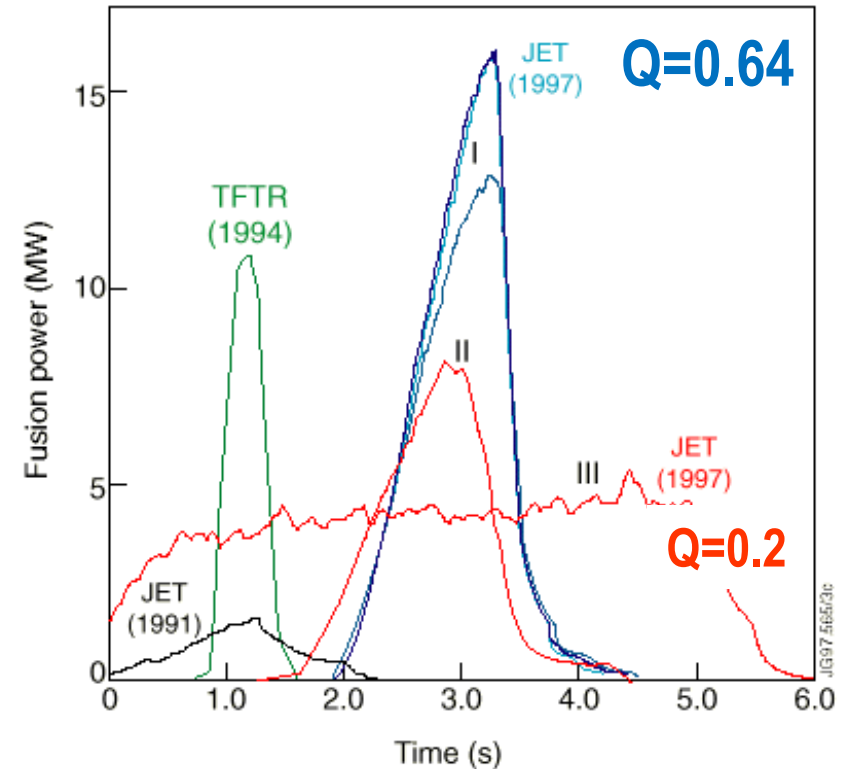
21

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.



A $Q=1$ pontot „**break even**”-nek nevezzük. A reaktor üzemeltetése szempontjából ennek nincs jelentősége.

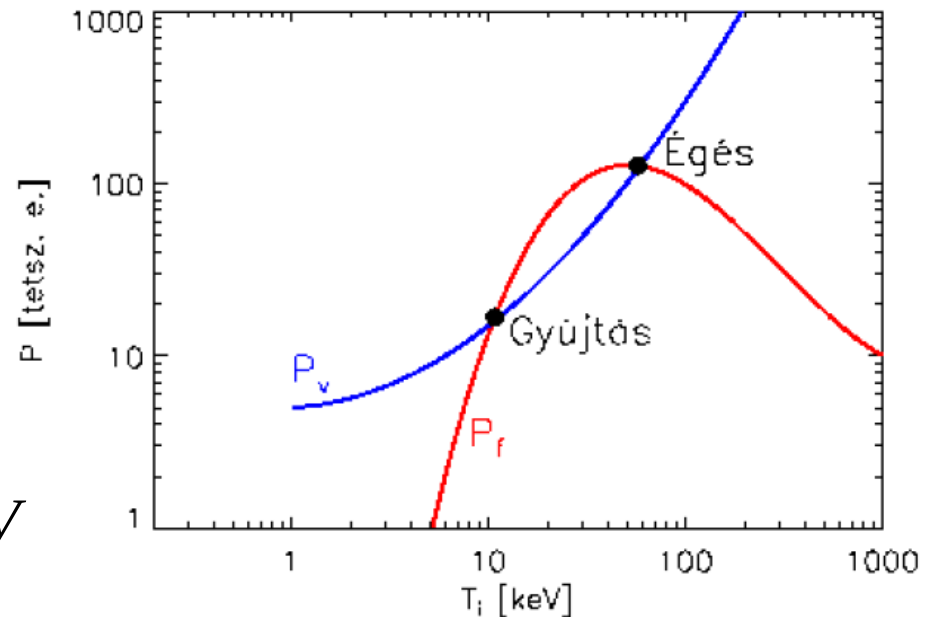
Fúziós plazma energiamérlege

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

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

Lawson-kritérium:

$$n\tau_e \geq 10^{20} \text{ sm}^{-3} \quad T_i = 25 \text{ keV}$$



Amikor ez bekövetkezik, akkor a plazma **begyújt** (ignition). 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:

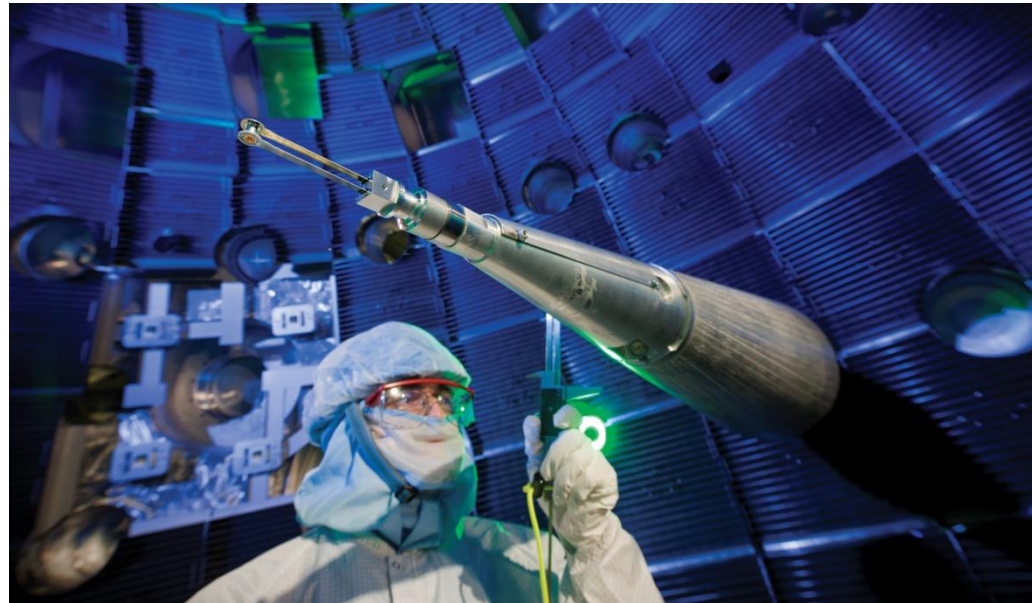
- **Mágneses összetartás** (Magnetic confinement).

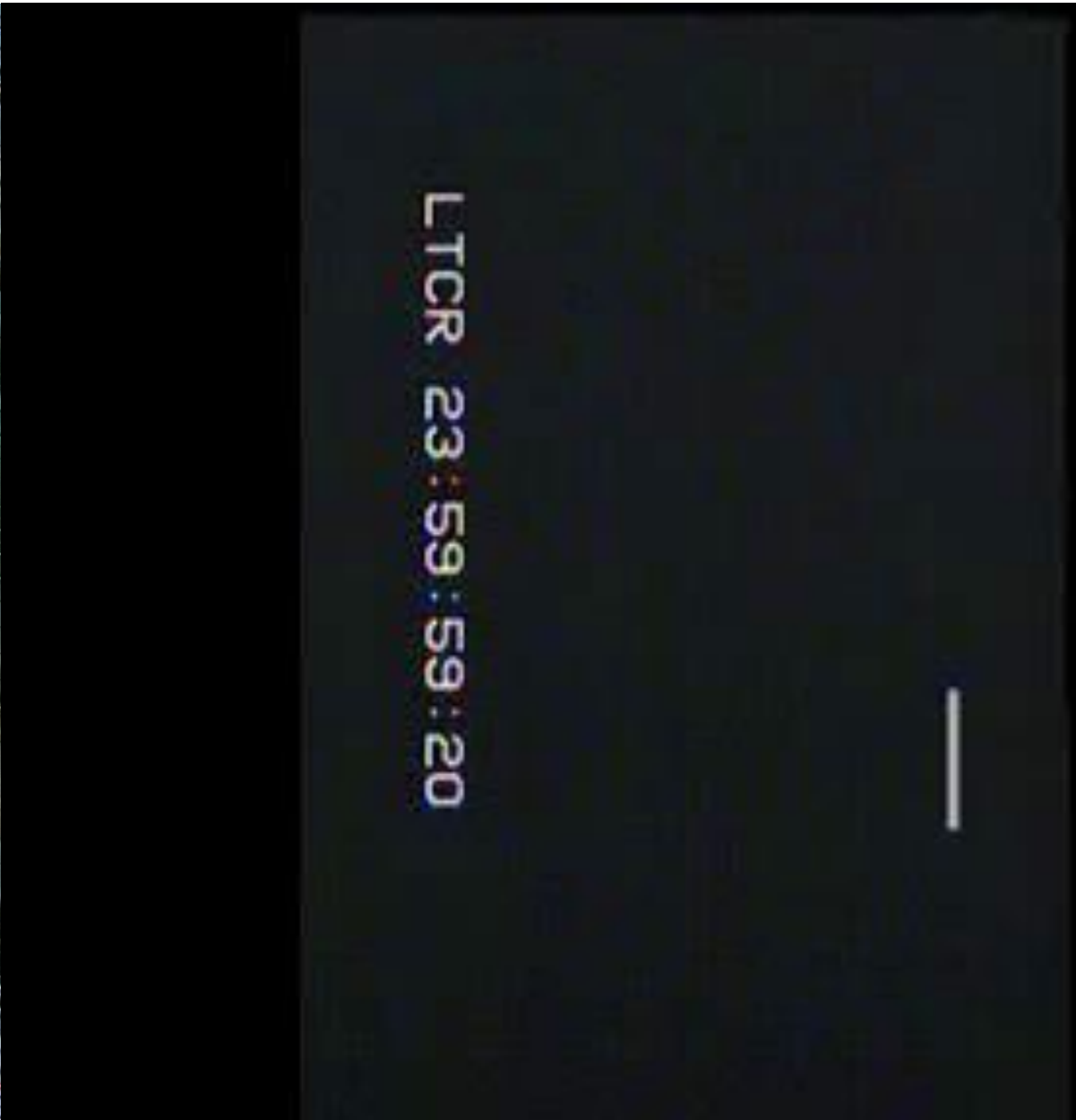
A plazmát mágneses térrel tartjuk össze. A sűrűséget az alkalmazott mágneses tér szabja meg, az energiatermeléshez egy kritikus energiaösszetartási időt kell elérni alacsony sűrűség mellett.

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

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

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





Európai fúziós kutatások

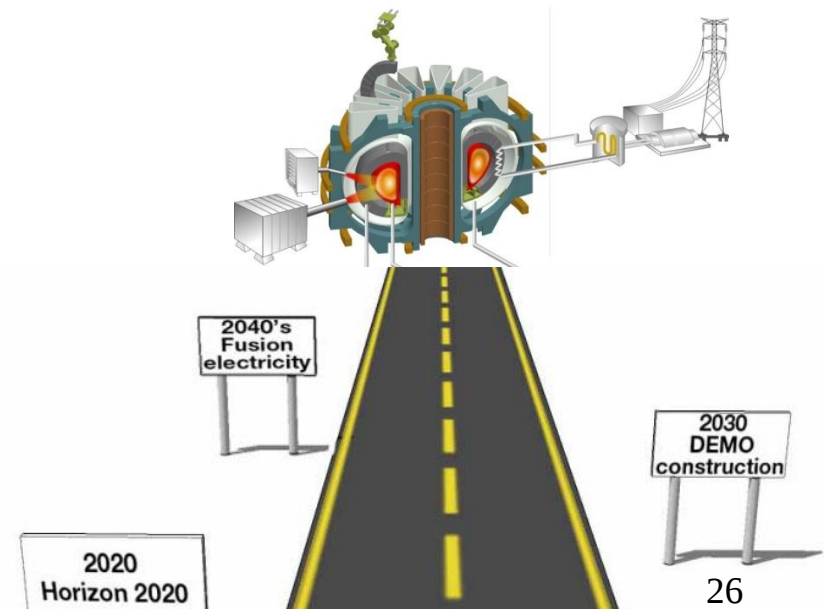
ITER tokamak

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



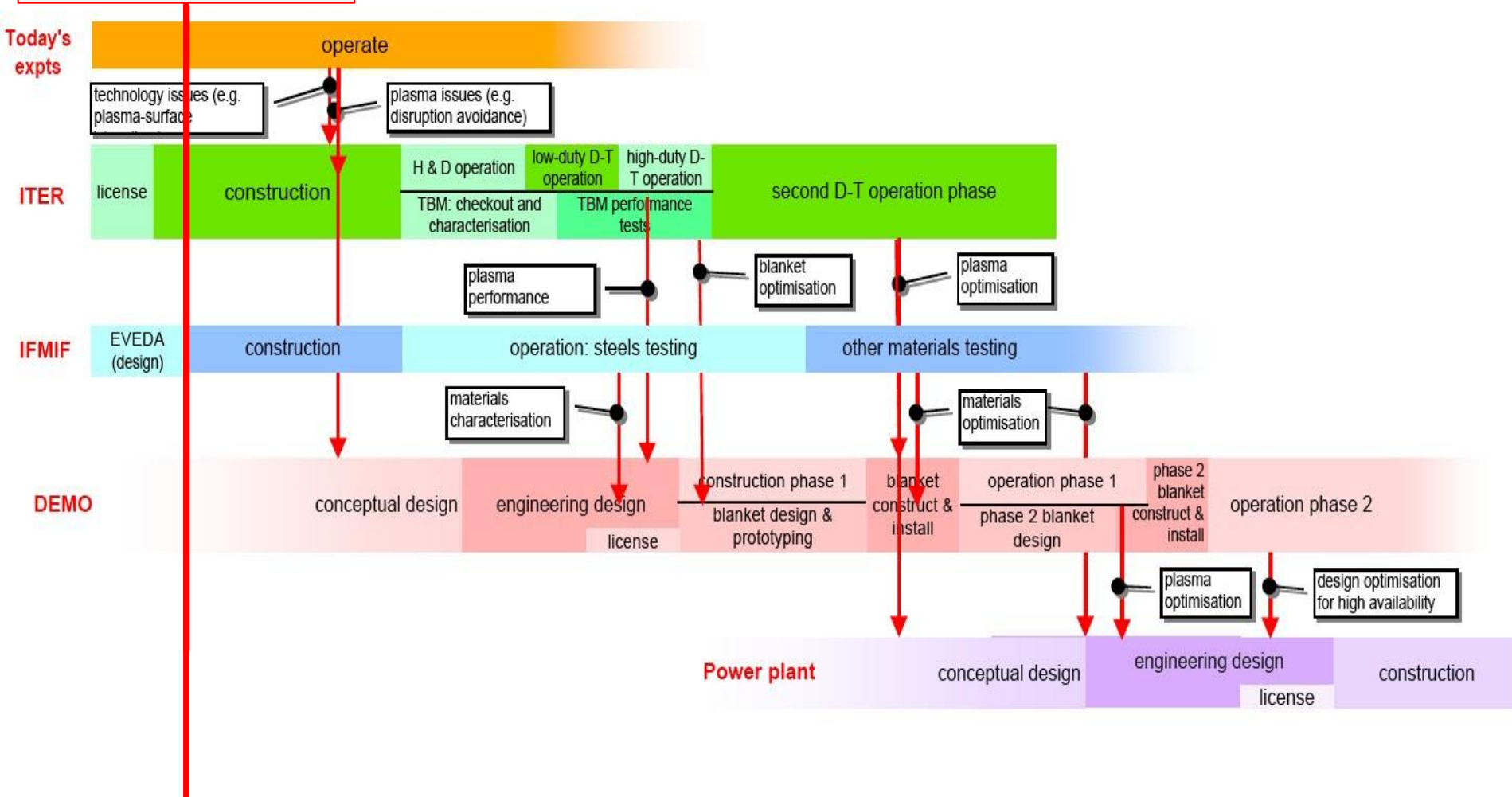
Fusion Roadmap

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



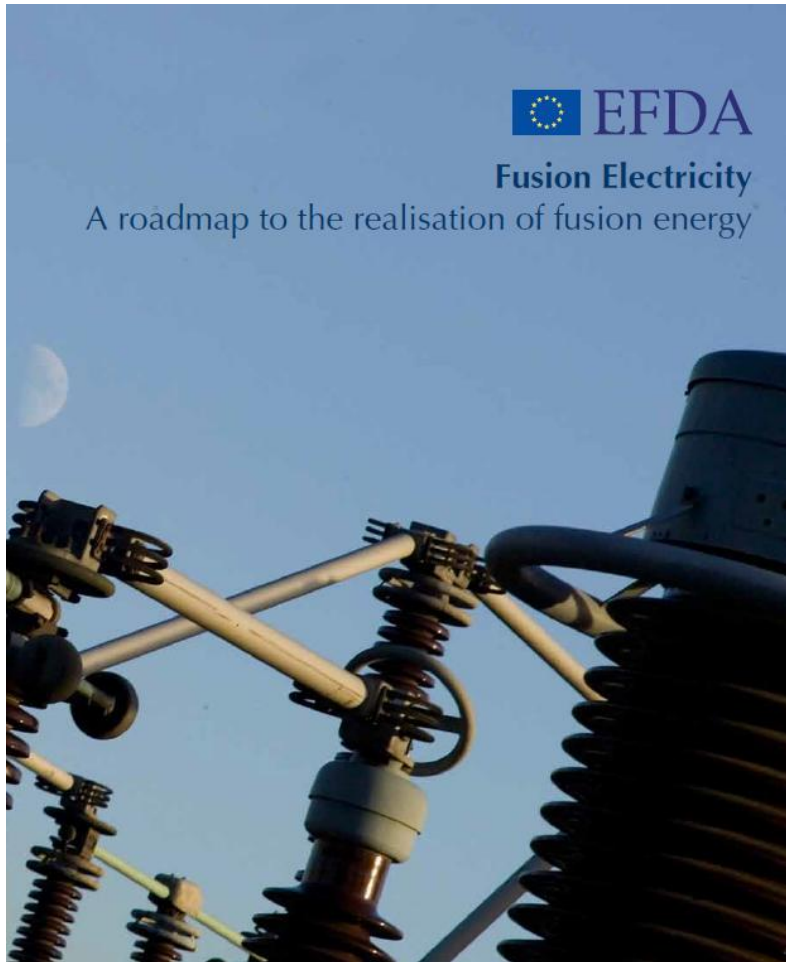
Út a fúziós energiatermeléshez

helyzet 2014-ben



Fusion Roadmap (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)
- Magas lesugárzott energiahányad, ugyanakkor jó összetartás

Eszközök:

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



2. Hőelvezető rendszerek

Cél:

- Divertor hőterhelés kezelése

Eszközök:

- Alap elképzelés: lecsatolt plazma üzemállapot (ELM-eket nem szereti)
- TCV tokamak: hópehely divertor
- MAST Upgrade: szuper-X divertor
- Folyékony fém divertor
- Divertor Tokamak Test berendezés (nem biztos!)



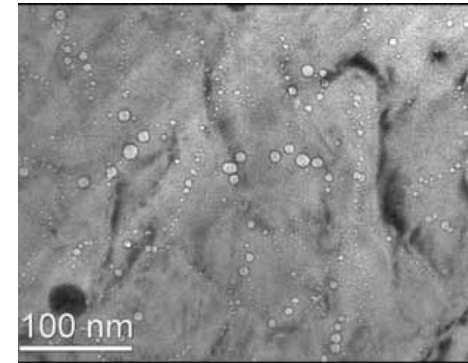
3. Neutronsugárzásnak ellenálló anyagok

Cél:

- Ideális szerkezeti anyag keresése: erős, nem aktiválódik, magas hőmérsékleten is szilárd, bírja a neutronokat

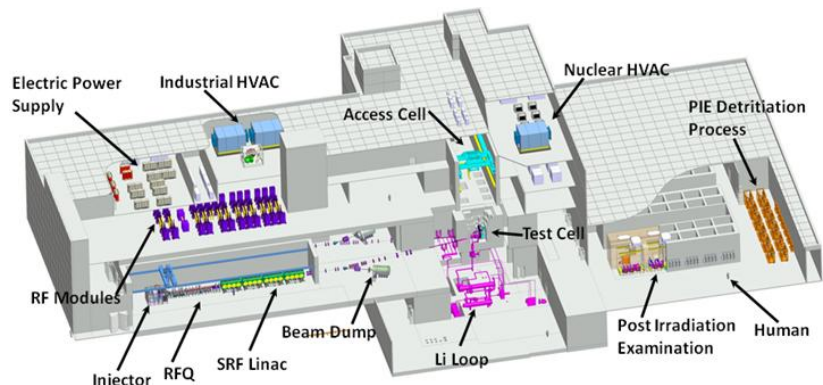
Eszközök:

- Ferrites-martenzites acélok: EUROFER
- ODS acélok
- IFMIF-szerű kisebb berendezés (IFMIF később lenne)
- Együttműködések fúzió kívül

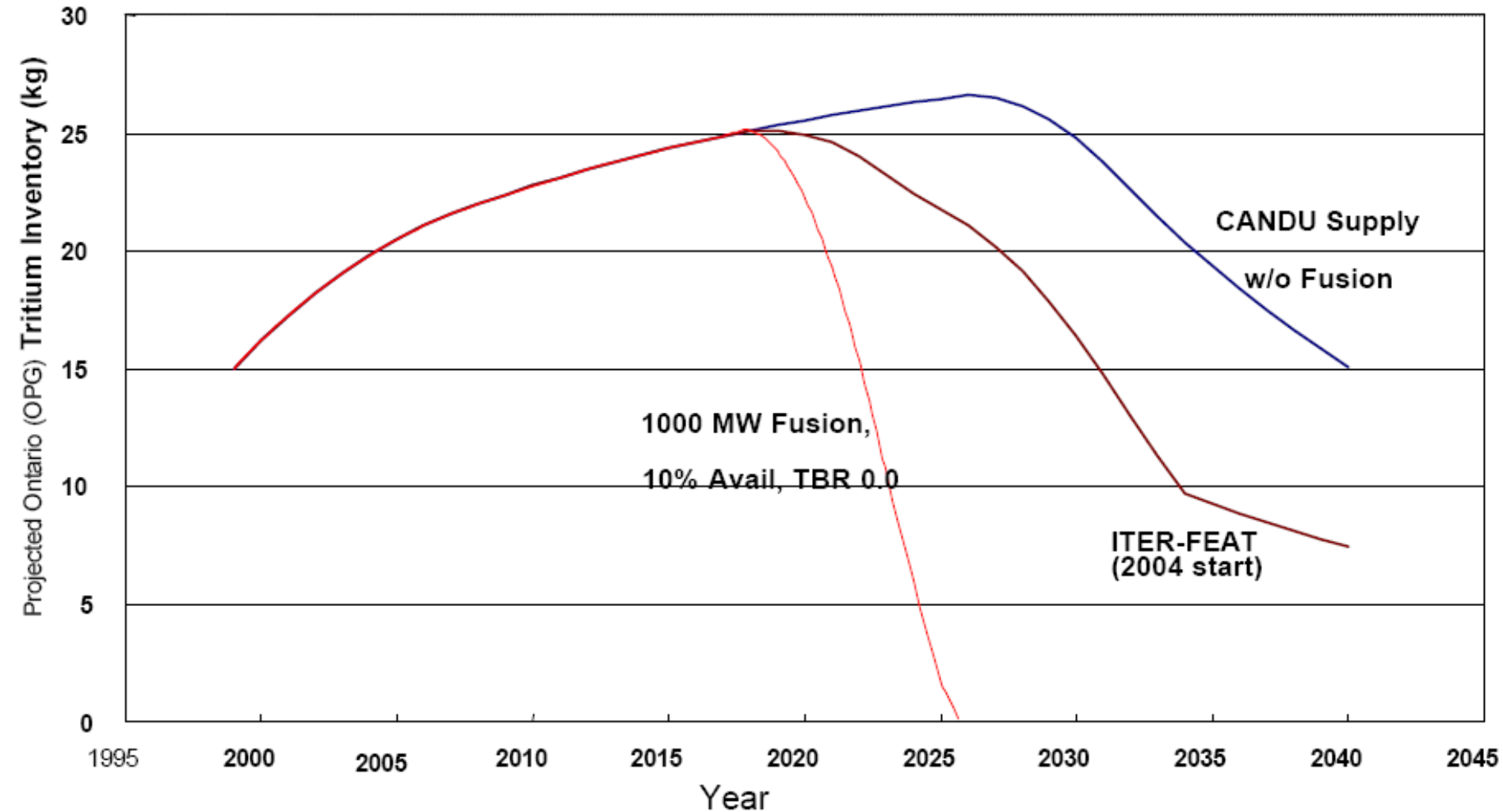


IFMIF: International Fusion Material Irradiation Facility (EU, Japán):

<http://www.ifmif.org>



4. Trícium önellátás



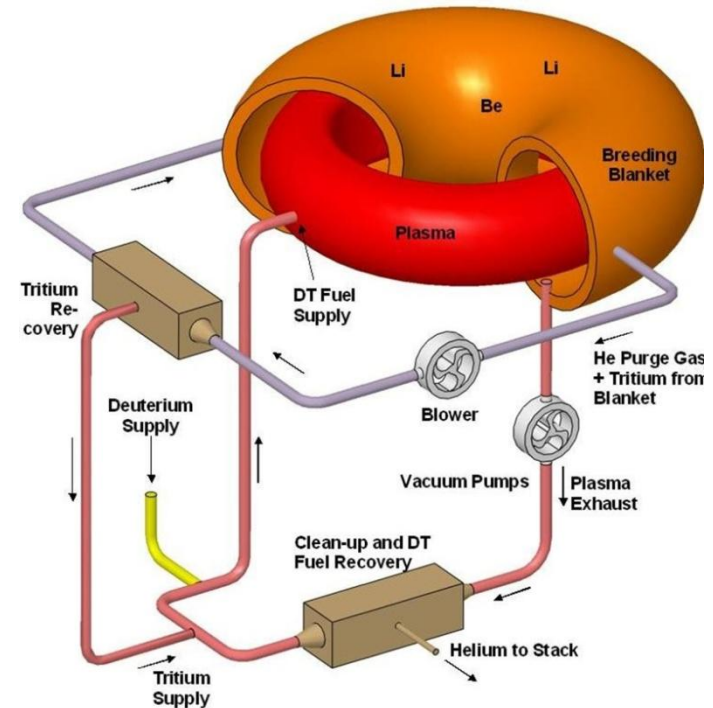
Milyen köpeny modulok hozhatóak létre?

Az előzőek alapján egy köpeny modulnak tartalmaznia kell:

- szaporító anyag (szilárd vagy folyékony)
- neutronsokszorozó (szilárd vagy folyékony)
- hűtőközeg (He, víz, folyékony fém)
- szerkezeti anyag

Köpeny modul tervezési kritériumok:

- megfelelő mennyiségű trícium előállítása
- acélszerkezet megfelelő hűtése
- komponensekben a megengedett hőmérséklet limitek biztosítása
- magas hűtőközeg kilépő hőmérséklet biztosítása
- könnyen cserélhető



Az ITER TBM portjainak kialakítása

Port cella:

- Trícium kivonó rendszer
- He hűtőkör
- LiPb kör

szállítórendszer

rugalmas
csőrendszer

pajzs

2 TBM

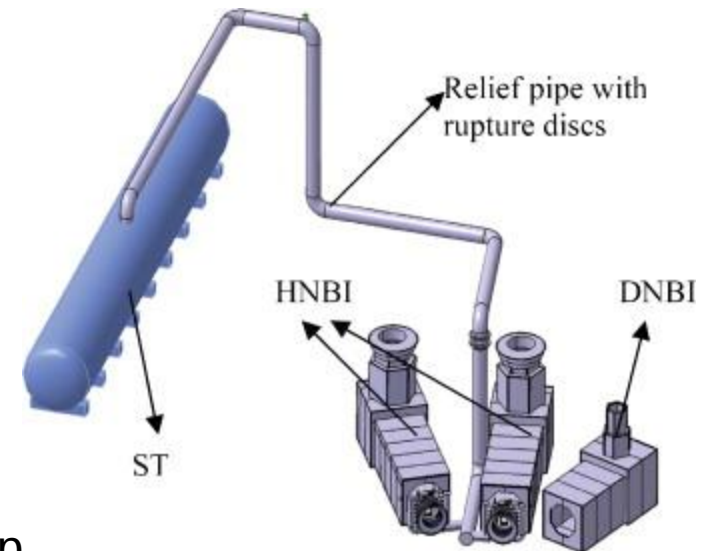
5. Inherens biztonság

Cél:

- Passzív biztonsági filozófia érvényesítése a kezdetektől

Eszközök:

- ITER nukleáris engedélyeztetése kapcsán már bizonyítani kellett az inherens biztonság meglétét
- Kevés anyag a reakciótérben
- Hiba esetén azonnal leáll
- Vákuumkamra az esődleges mérnöki gát
- Mélységi védelem
- Trícium-kezelésben kell fejlődni!



ITER Vacuum Vessel Pressure Suppression System

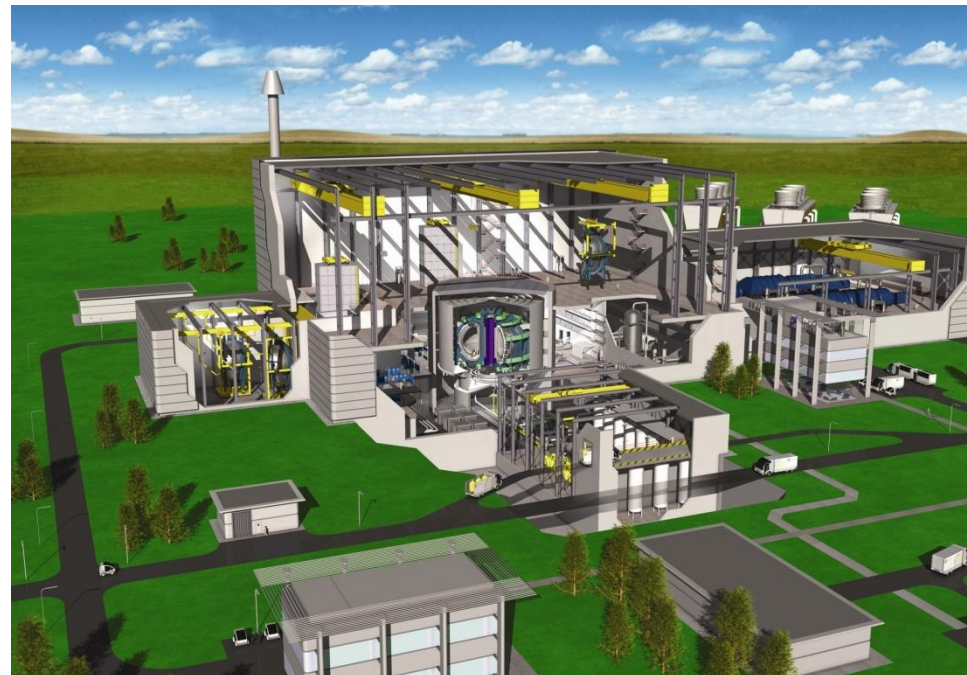
6. DEMO tervezése

Cél:

- ITER építés tapasztalatai alapján DEMO rendszerszintű tervezés és részrendszerek fejlesztése.

Eszközök:

- ITER tapasztalatok
- Fűtések hatásfokának javítása
- Leállási idők minimalizálása nagy cserélhető elemekkel.
- Távvezérelt karbantartás, főrrókamrák
- Szeparációs vákuumszivattyú



7. Költséghatékony technológiák

Cél:

- Energiaár versenyképességét javító technológiák.

Eszközök:

- Magashőmérsékletű szupravezető technológia alkalmazása
- Erőműméret csökkentése
- Magas hőmérsékletű hűtőkör
- Beruházási költségek optimalizálása
- Fűtés hatásfokának javítása – kevesebb visszatáplált energia



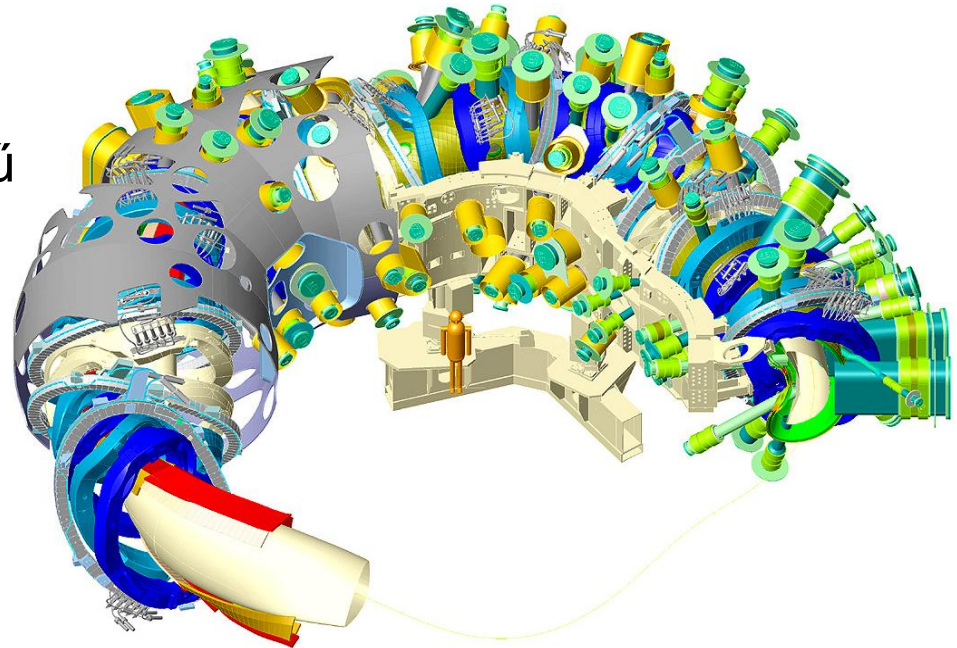
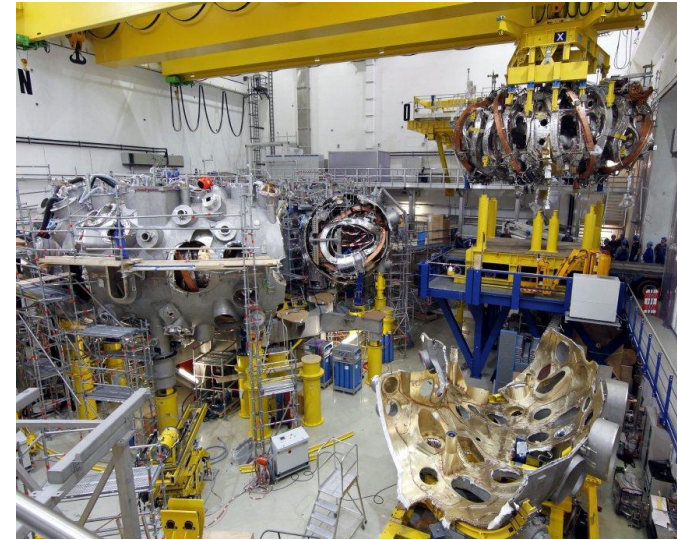
8. Sztellarátorok

Cél:

- HELIAS sztellarátor technológia fejlesztése.

Eszközök:

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



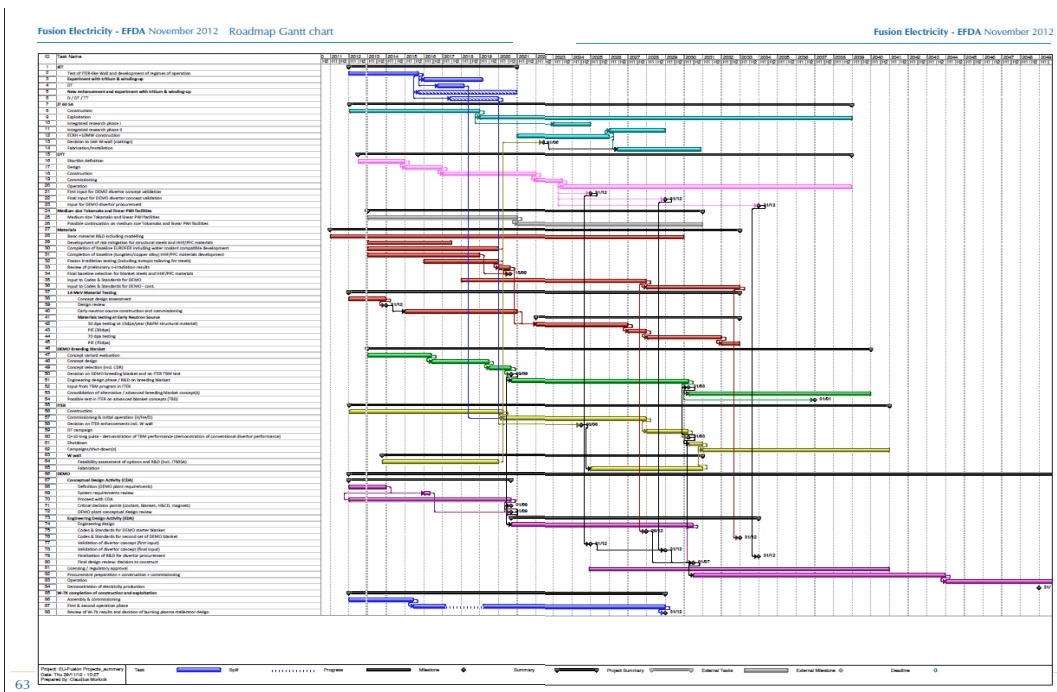
Fúziós útiterv ütemezése

Határozott tervek, projektek
2014-2018 időszakra
(Horizon 2020):
előkészületek az ITER
kihasználására, DEMO
koncepcionális tervezés

Tervek a folytatáshoz
2019-2020 időszakra
(Horizon 2020)

2020-2030 ITER
kihasználása, DEMO
tervezés

2030-2050 DEMO építés,
üzemeltetés





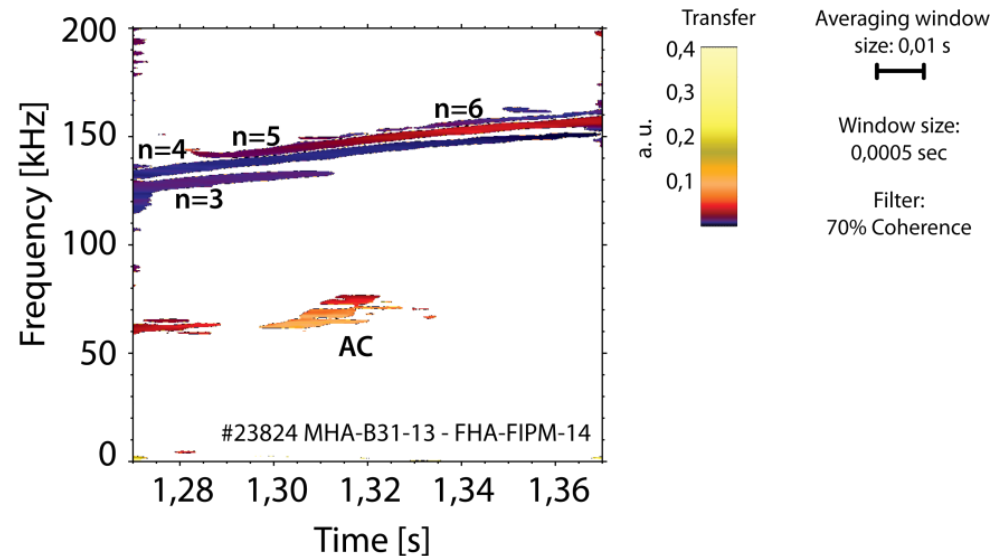
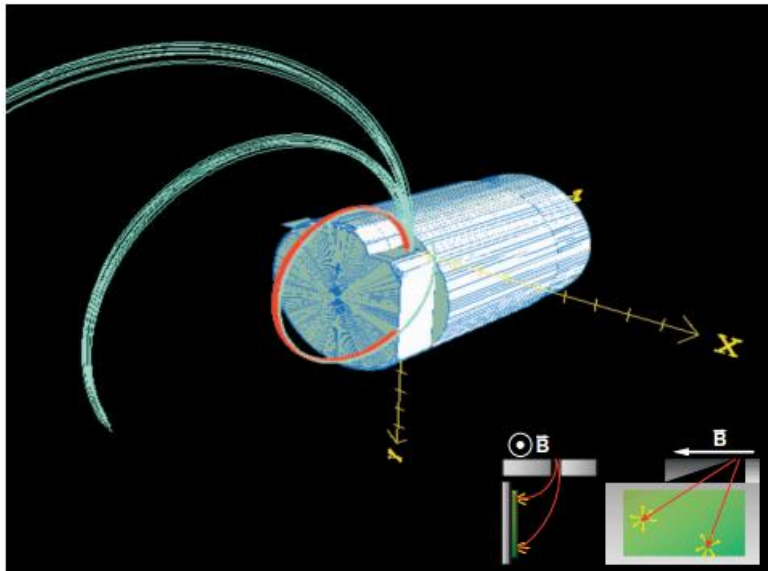
Magyar vonatkozások

- *Minden nagy nemzetközi szervezetben részt veszünk:
Fusion for Energy, EUROFUSION, FUSENET*
- *Minden projekt nemzetközi csapatban zajlik (EU, Távol-Kelet, USA)*
- *Koordinátor: MTA Wigner FK RMI*
- *Kutatóhelyek: BME, MTA EK, ATOMKI, SZE, ...*



Gyors ionok és kölcsönhatásaik

- *Kritikus téma az alfa-fűtés (és egyéb fűtések) hatásfoka miatt*
- *ASDEX Upgrade tokamakon tanulmányozzuk*
- *Diagnosztika tervezés, üzemeltetés*
 - *Gyorsion-veszteség detektorok az ASDEX Upgrade tokamakon*
- *Adatfeldolgozás:*
 - *Idő-frekvencia analízis, sok diagnosztika összehasonlítása*
 - *Egyéb tranziens események vizsgálata is: ELM, fűrészfog, ...*



Elfutó elektronok modellezése

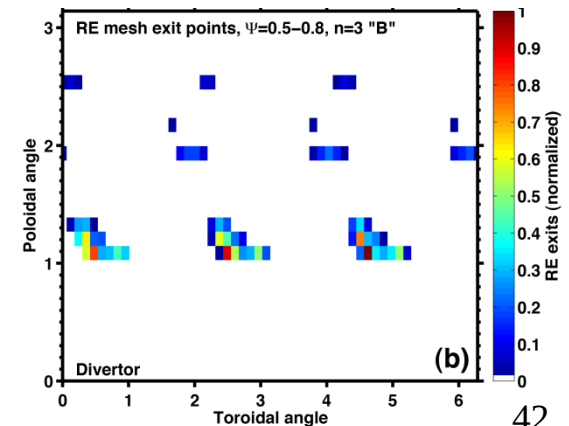
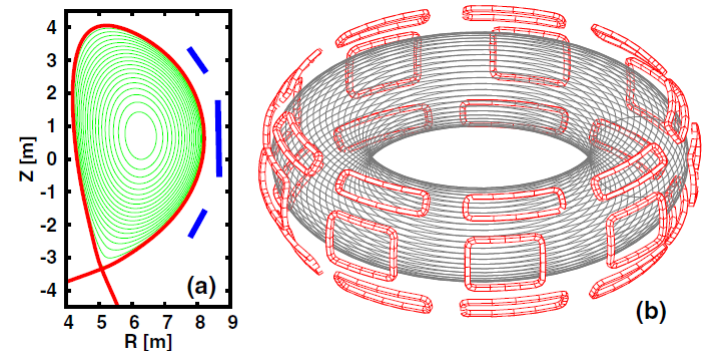
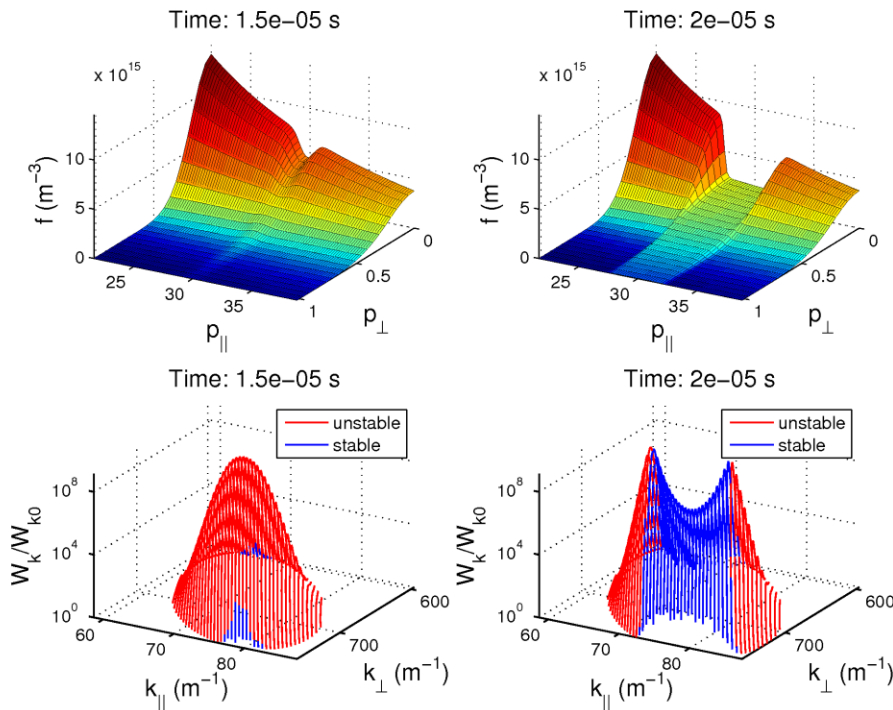
➤ Elméleti számítások és numerikus szimulációk

➤ Elfutó elektronok kölcsönhatása rezonáns plazmahullámokkal

➤ Elfutó elektronok keletkezésének modellezése plazmaösszeomlásokban

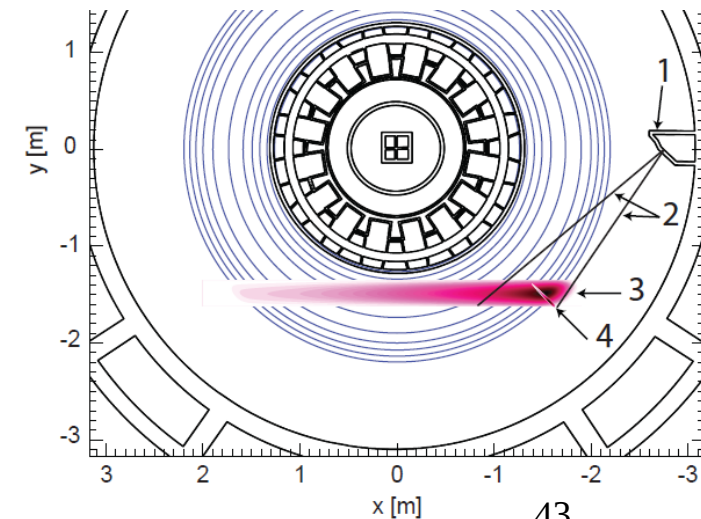
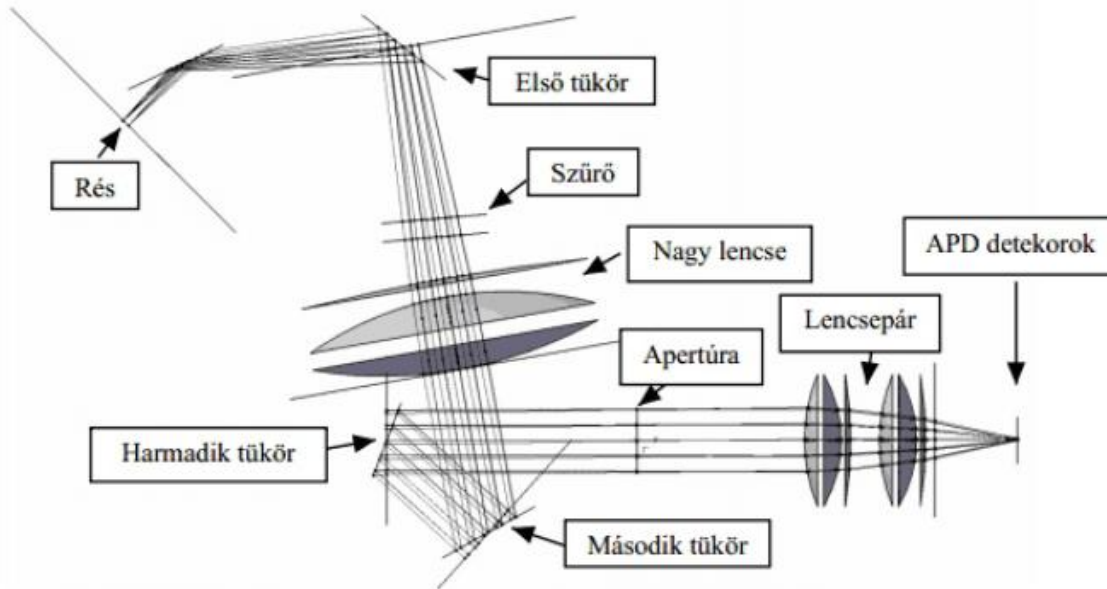
➤ Elfutó elektronok transzportjának modellezése

➤ Integrált tokamak modellezés



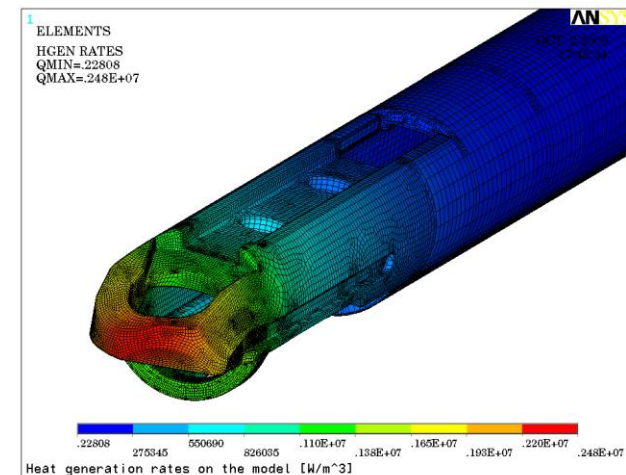
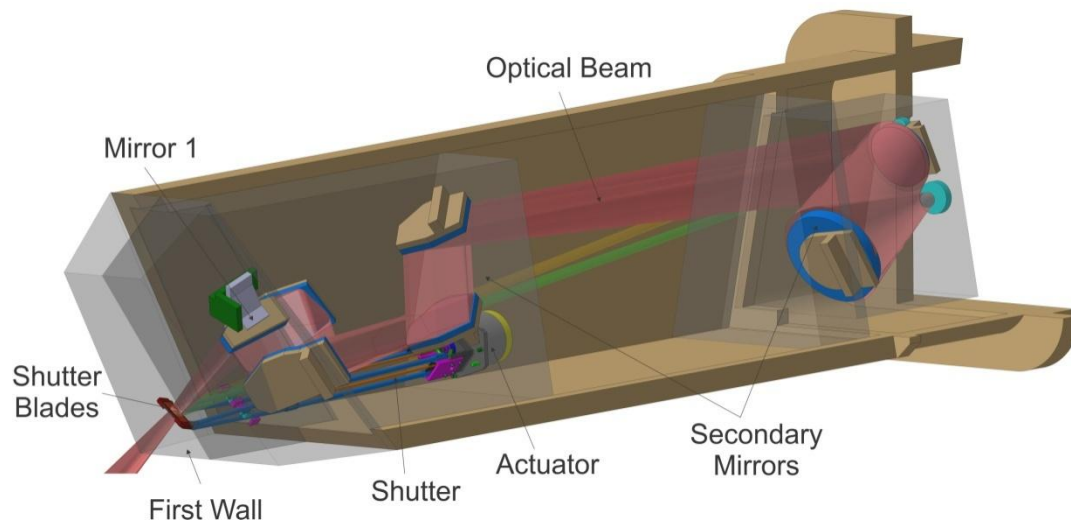
Atomnyaláb-emissziós modellezése, tervezése

- *Modellezés a RENATE programcsomaggal*
 - *Teljes rendszer modellezése: nyaláb-plazma kölcsönhatás, optika*
 - *Cél a tervezés és interpretáció segítése*
- *Optikai tervezés az Atomfizika Tanszékkal együttműködve*
- *Mechanikai tervezés MTA Wigner FK-val együttműködve*
- *COMPASS, ITER, KSTAR, ASDEX Upgrade, EAST rendszerek, ...*



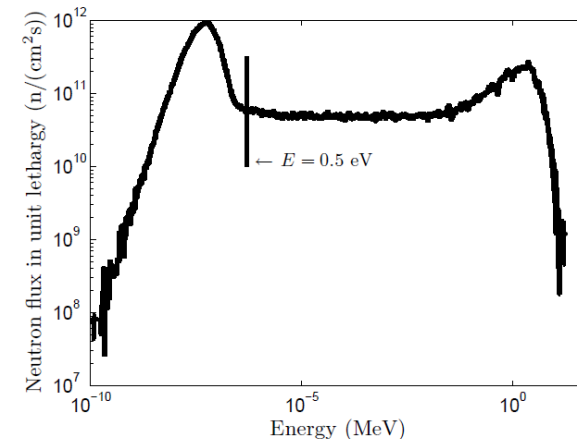
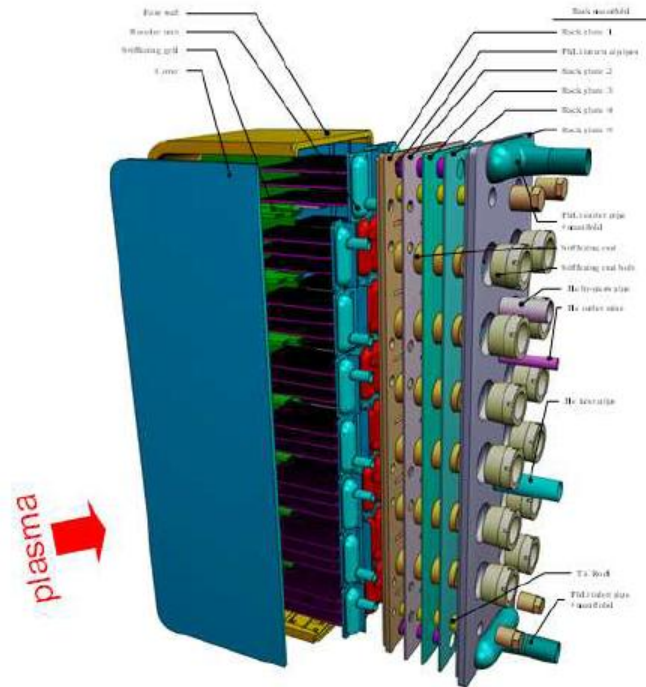
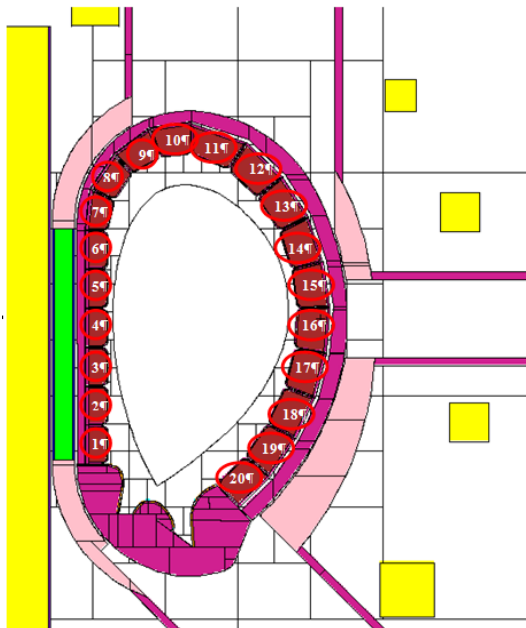
ITER plazmaközei töltéscsere diagnosztika tervezése

- *Atomnyaláb-plazma kölcsönhatást megfigyelő optikai diagnosztika*
- *Nemzetközi konzorcium, BME a második legnagyobb partner:*
 - *Funkcionális tervezés*
 - *Neutron- és gammatranszport számítások*
 - *Periszkóp hűtésének szimulációja*
- *Wigner FK, Optimal Optik Kft. BME alvállalkozója:*
 - *Periszkóp optikai tervezés, vezérlések*



Egyéb fúziós technológiai fejlesztések, számítások

- *Kamerák sugárkárosodása (pl. W7-X sztellarátor)*
- *Detektorrendszerek tervezése (pl. köpeny modulok diagnosztikája)*
- *Sugárvédelmi számítások (pl. ITER forrókamra)*
- *Hűtőkörök termohidraulikai modellezése és tervezése (pl. ITER)*
- *DEMO tríciumszaporítás modellezése*



Kapcsolat

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

MTA Wigner FK: Veres Gábor, veres.gabor@wigner.mta.hu

BME tárgyak: Fúziós nagyberendezések, Korszerű nukleáris energiatermelés

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/newsline>

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

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