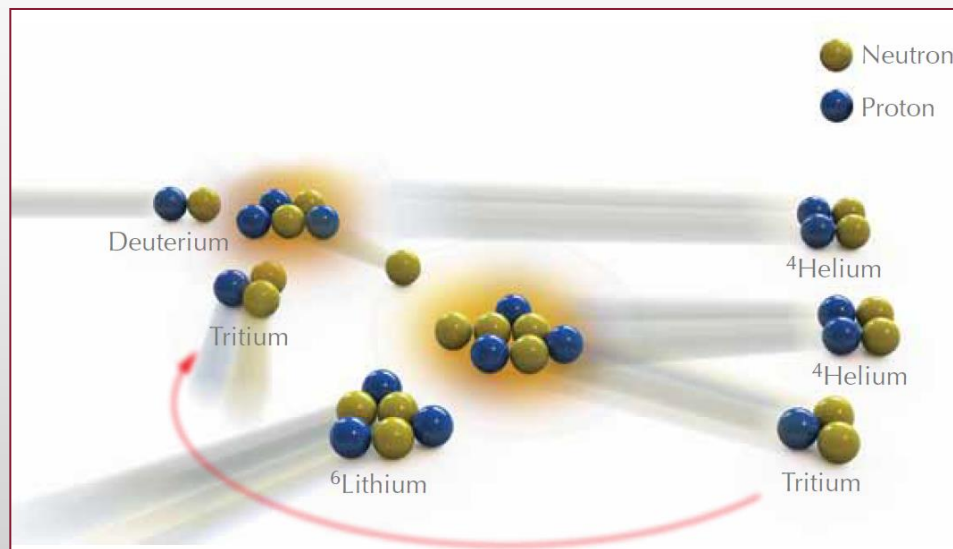
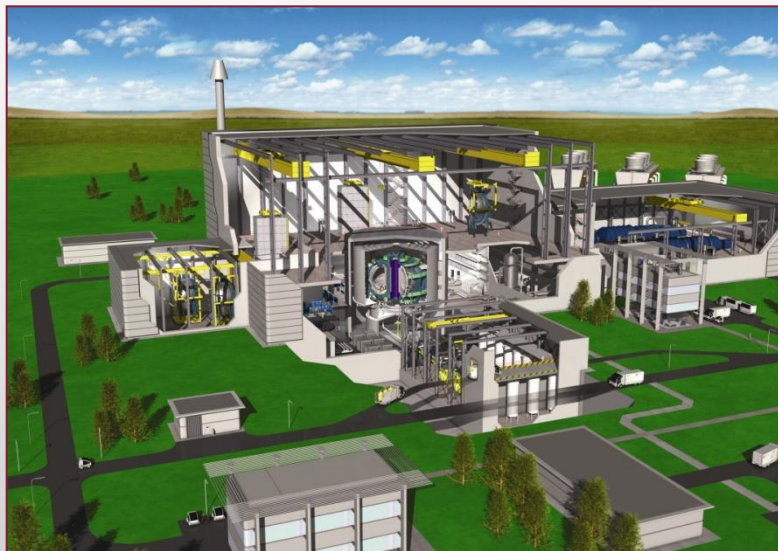


Hogyan lesz fúziós erőművünk 2050-ben?



Pokol Gergő



BME NTI

MNT Közgyűlés

2014. május 29.



Hogyan lesz fúziós erőművünk 2050-ben?

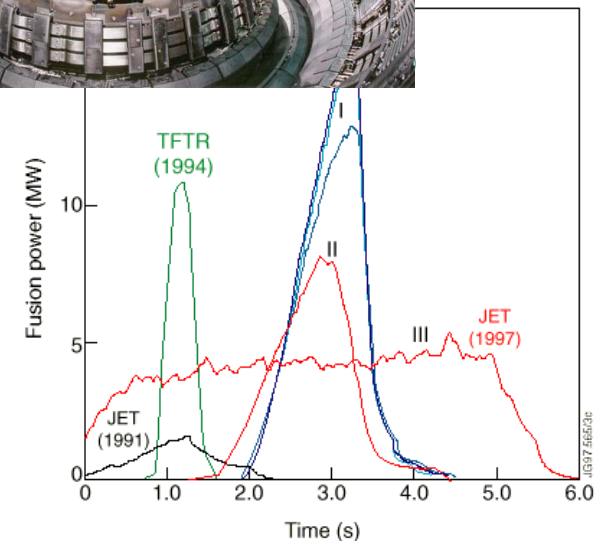
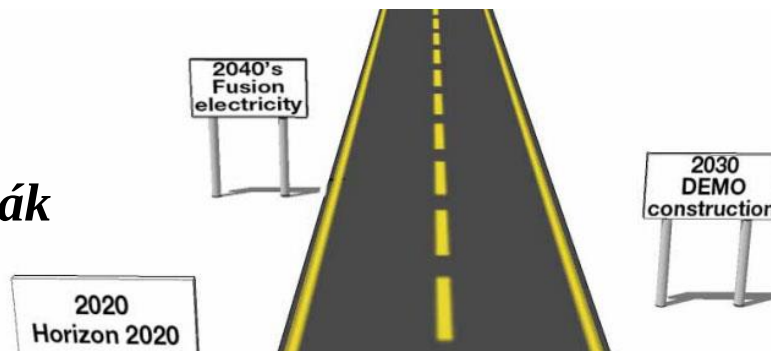
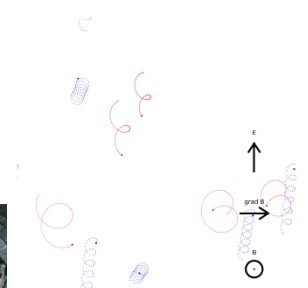
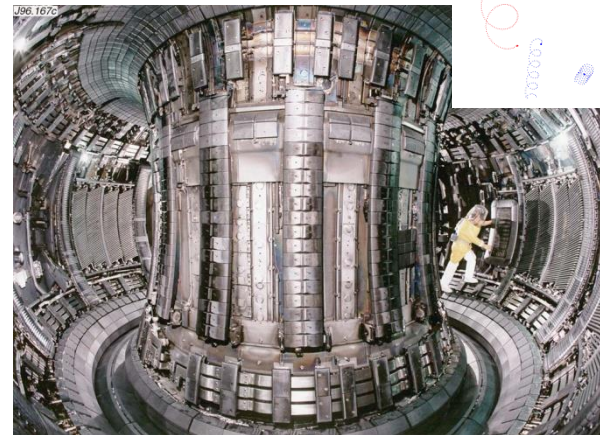
➤ *A fúziós reaktorok fizikájáról dióhéjban*

➤ *A fúziós reaktorok technológiája*

➤ *Hol tartunk ma?*

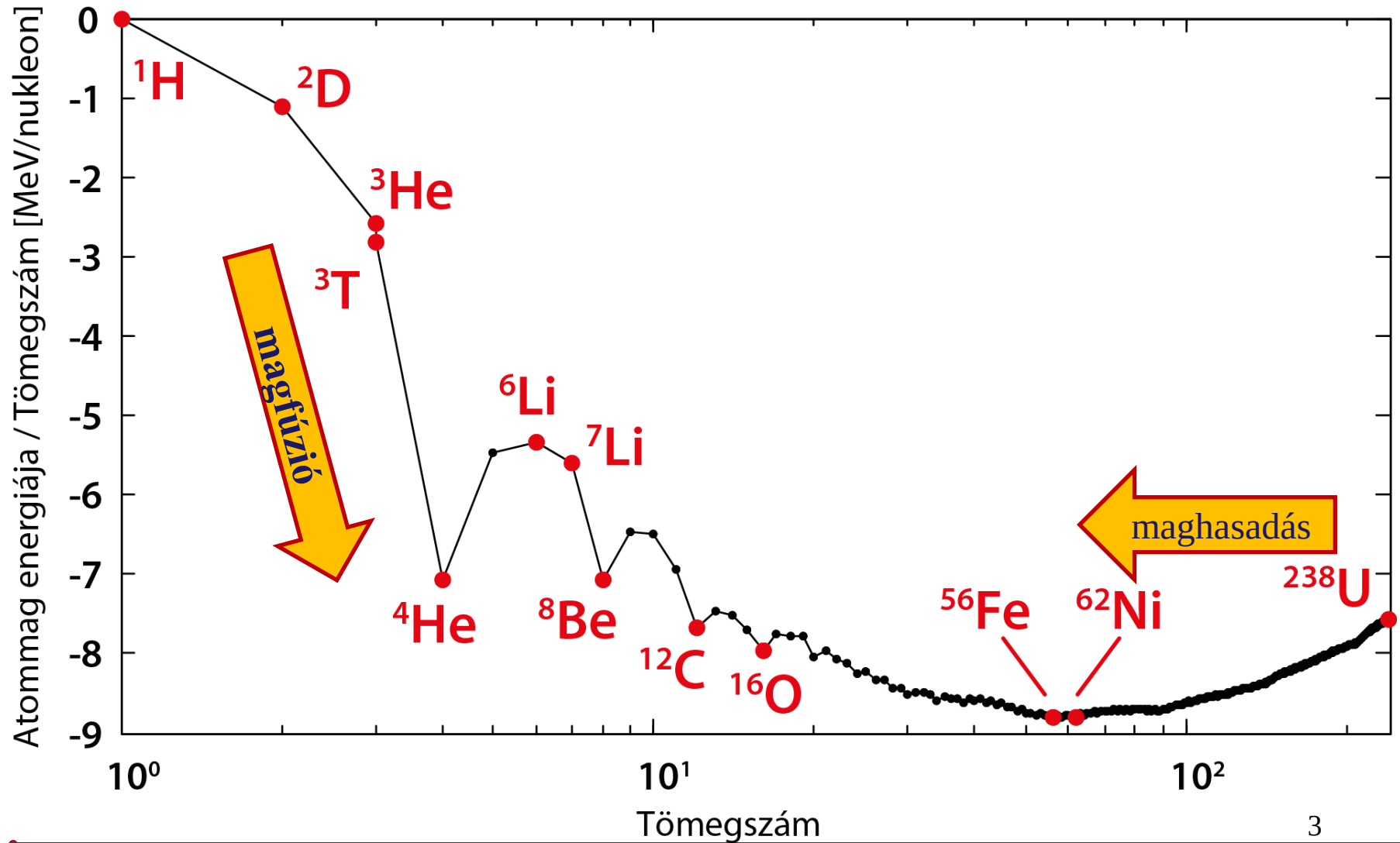
➤ *Fúziós útiterv*

➤ *BME NTI témák*

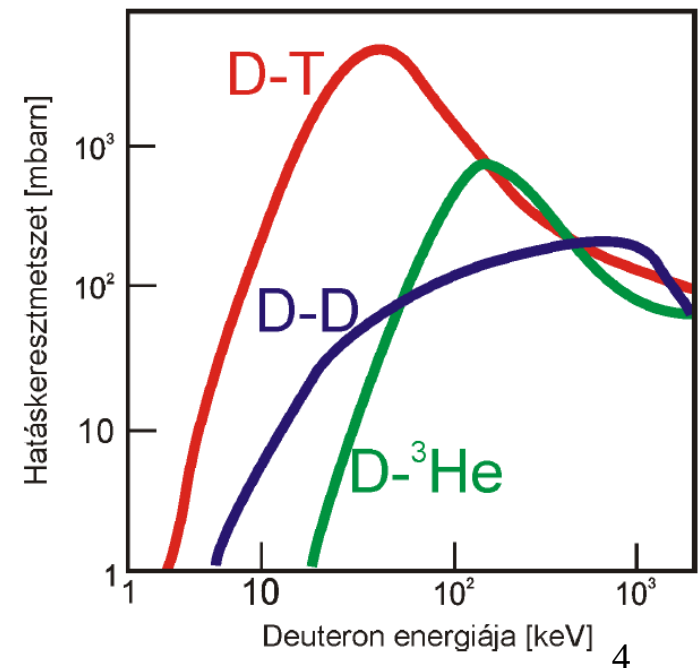
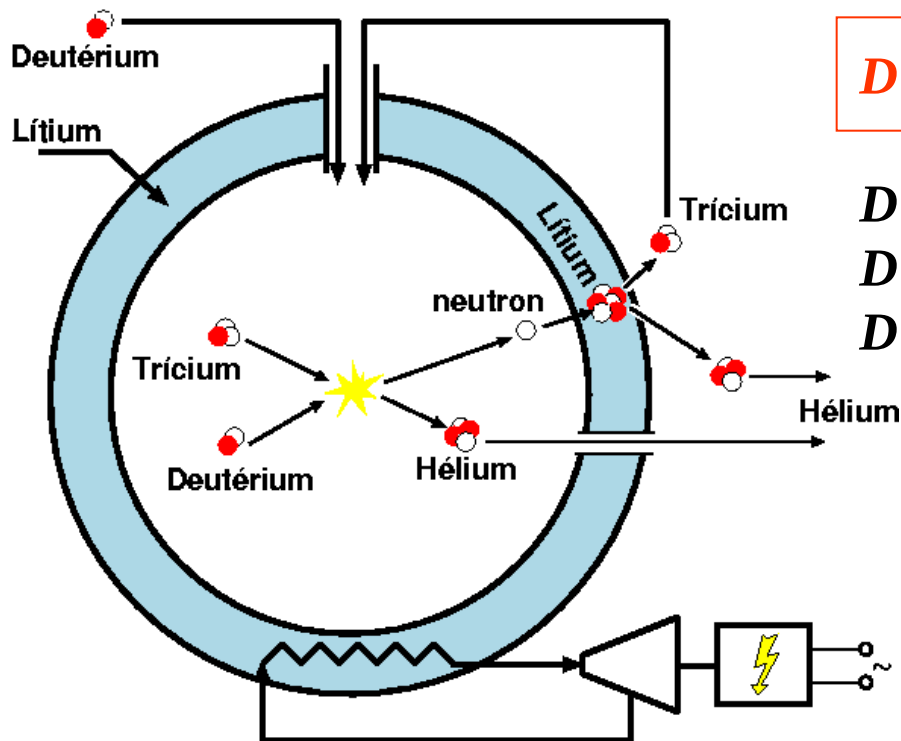


Fúziós alapok

Egy nukleonra eső kötési energia



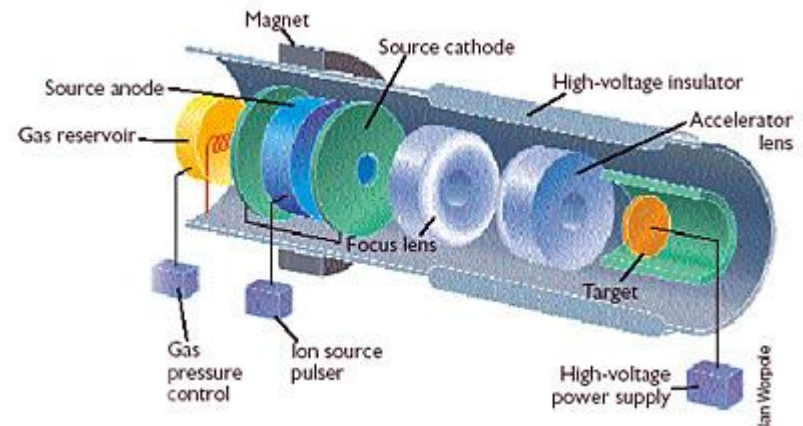
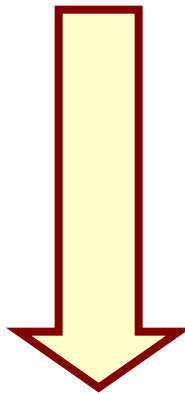
Fúziós reaktor üzemanyagciklusa



A fúziós reakcióban nem keletkeznek radioaktív izotópok!

Lehet-e gyorsítóval energiát termelni?

Nem, mert a **fúziós reakciók** **hatáskeresztszete** sok nagyságrenddel kisebb a **Coulomb szórásénál**.



Fúziós energiát termelni csak termikus közegben lehet!

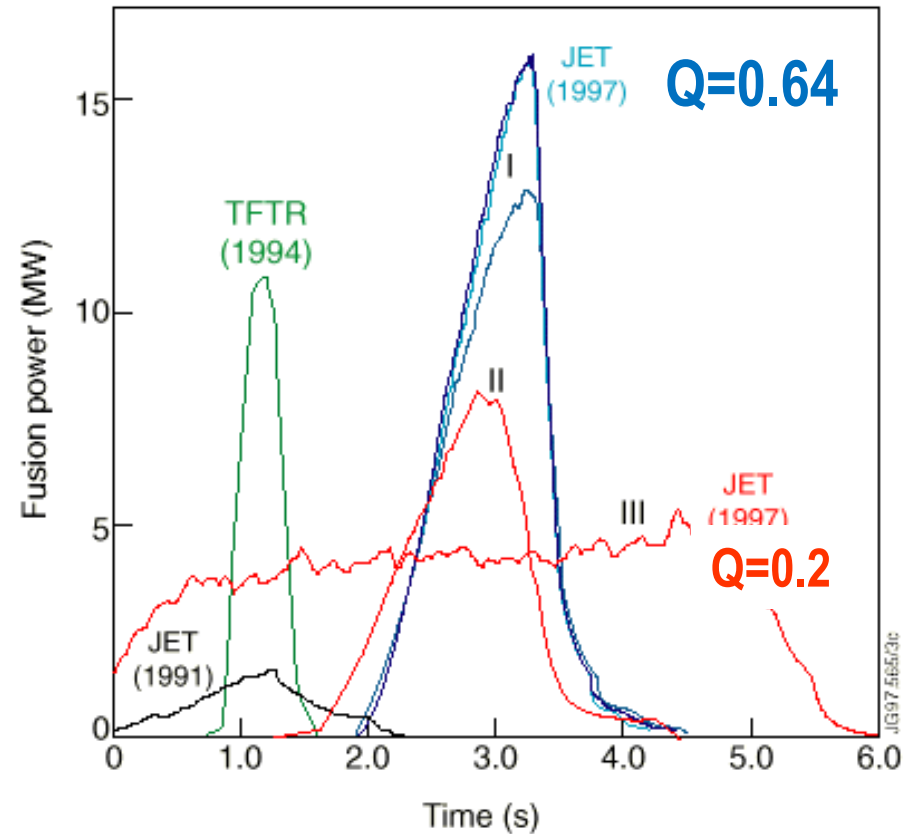
Ha a céltárgy termikus egyensúlyba kerül a nyalábbal, akkor az ütközések során az átlagos energiacsere nulla.

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.



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

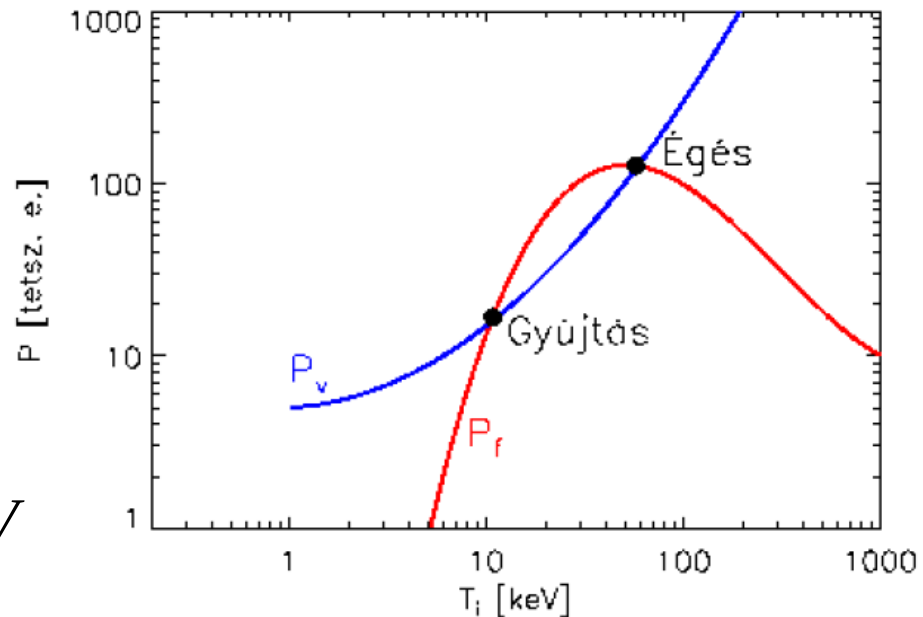
Fúziós plazma energiamérlege

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:

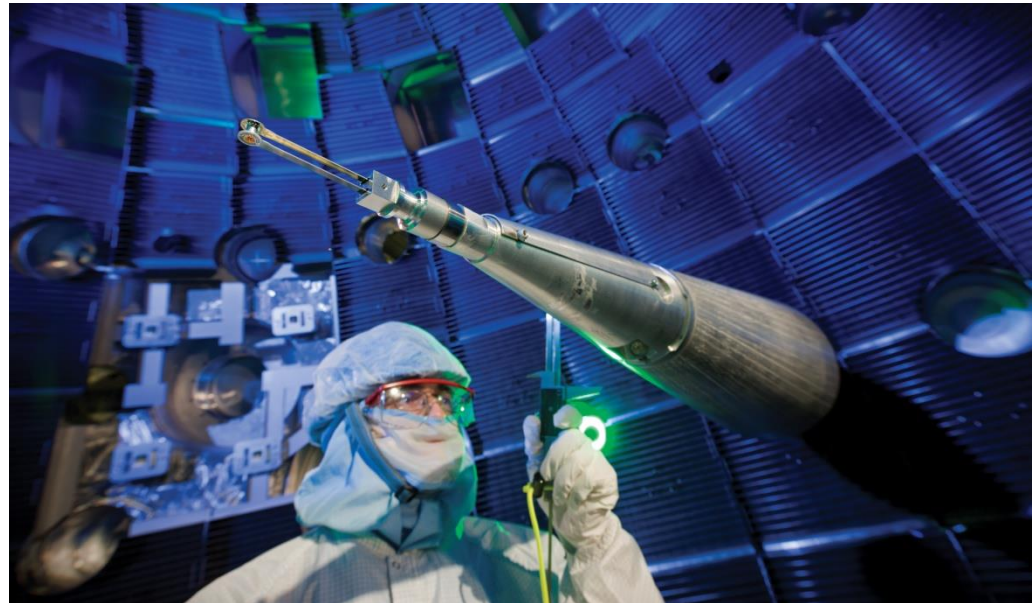
- **Mágneses összetartás (Magnetic confinement).**

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/>)



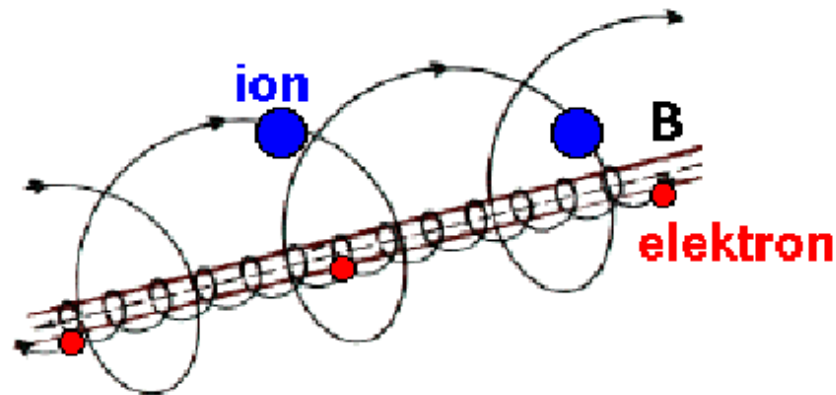
Mágneses összetartás

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

Tekintsük szabad, töltött részecskék mozgását!

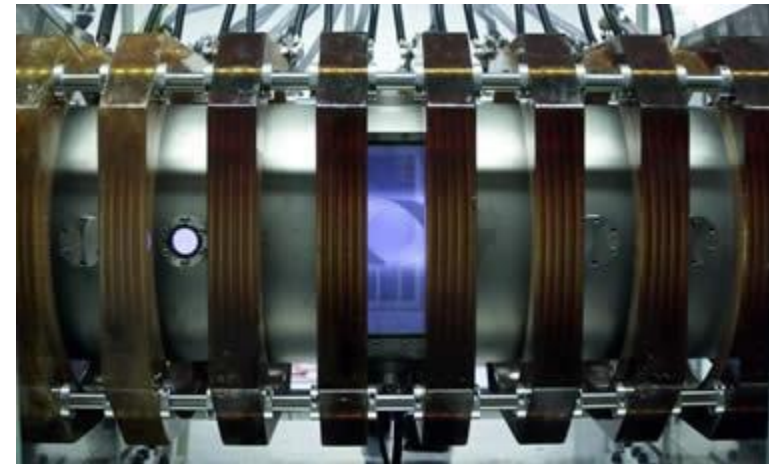
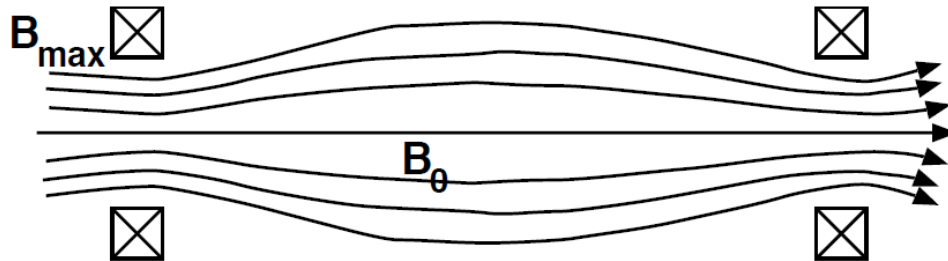
A Lorentz erővel a mozgásegyenlet:
$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

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.

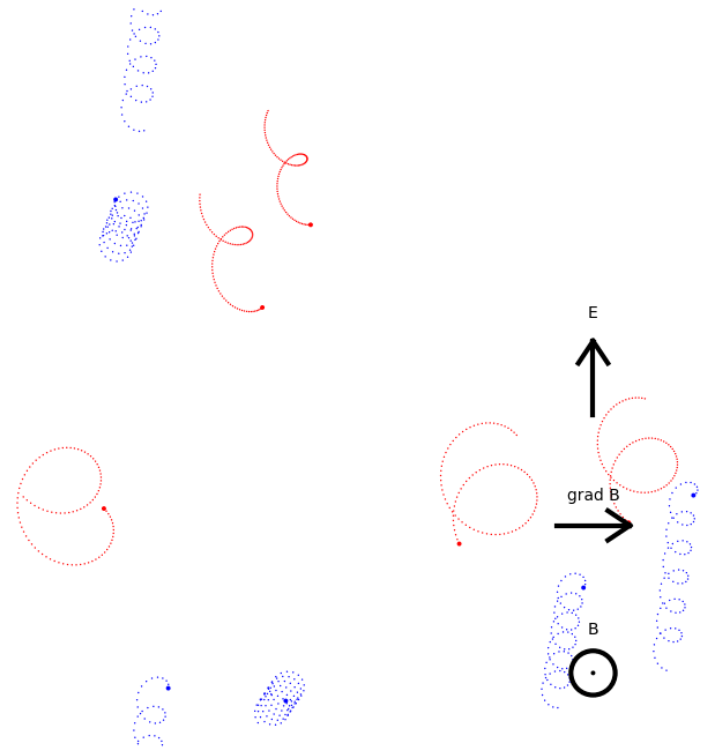
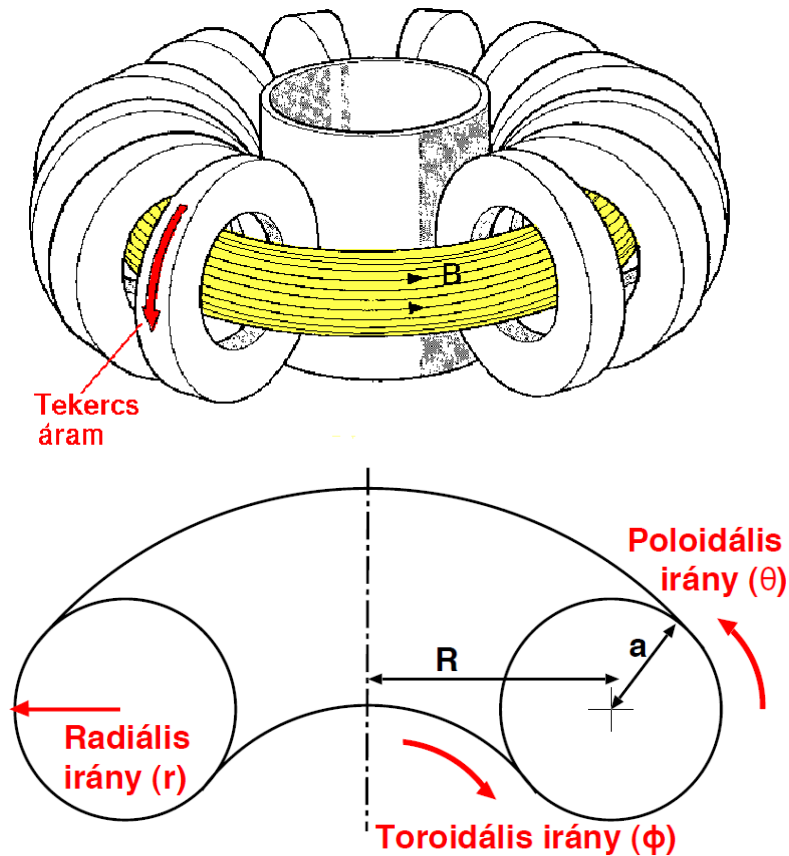


A közel mágneses térrel párhuzamosan mozgó részecskékre nincs hatással

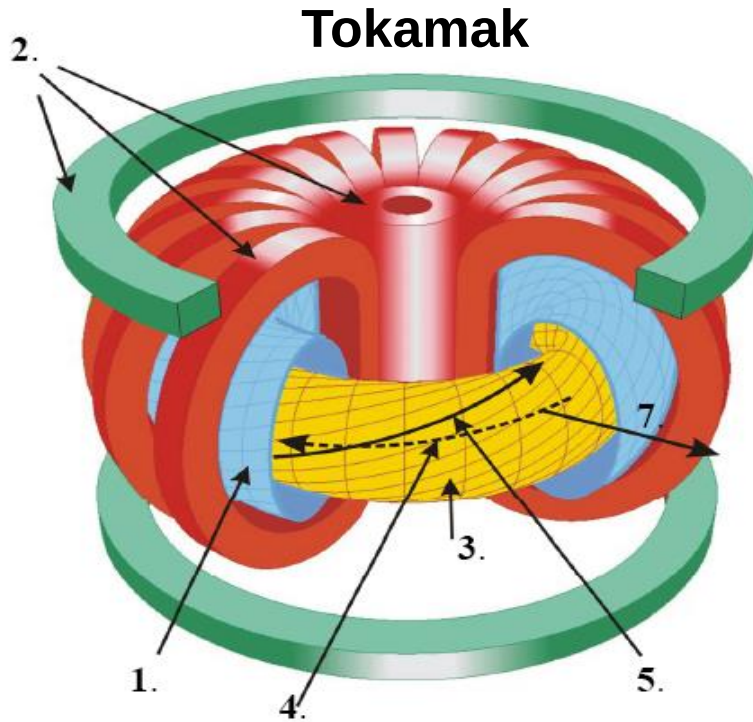
➔ **veszteségek a végeken+ stabilitási problémák.**

Mágneses összetartás, toroidális geometria

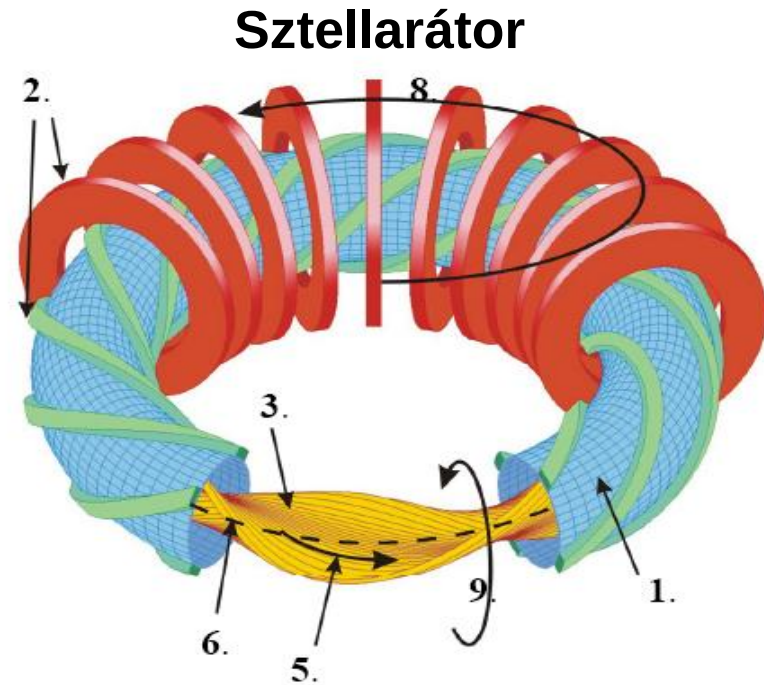
A lineáris berendezést tórusz alakúra alakítva a végeffektusok elkerülhetők. Ekkor egy tórusz alakú plazmagyűrűt kapunk. Driftek!



Mágneses összetartás berendezéstípusai

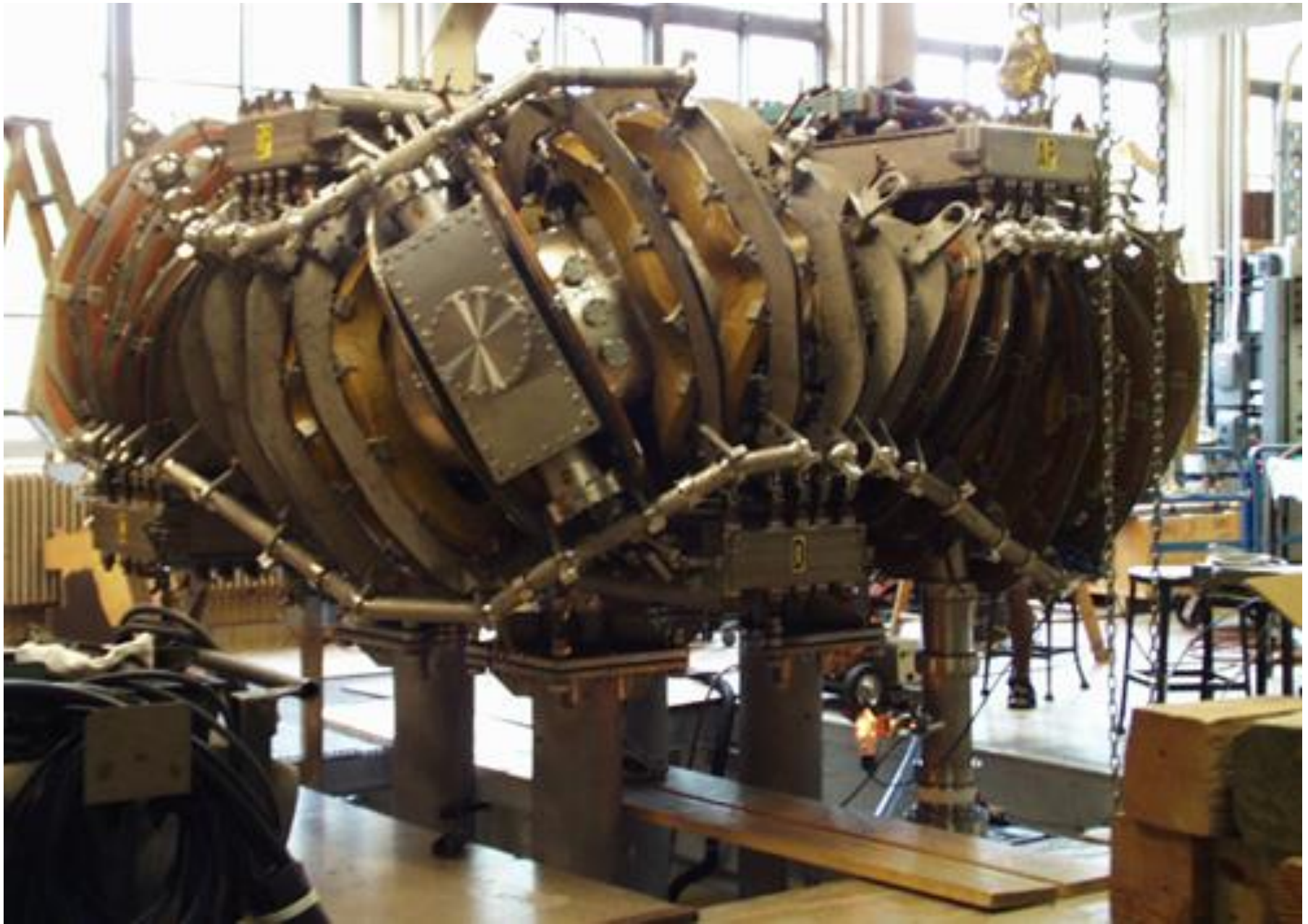


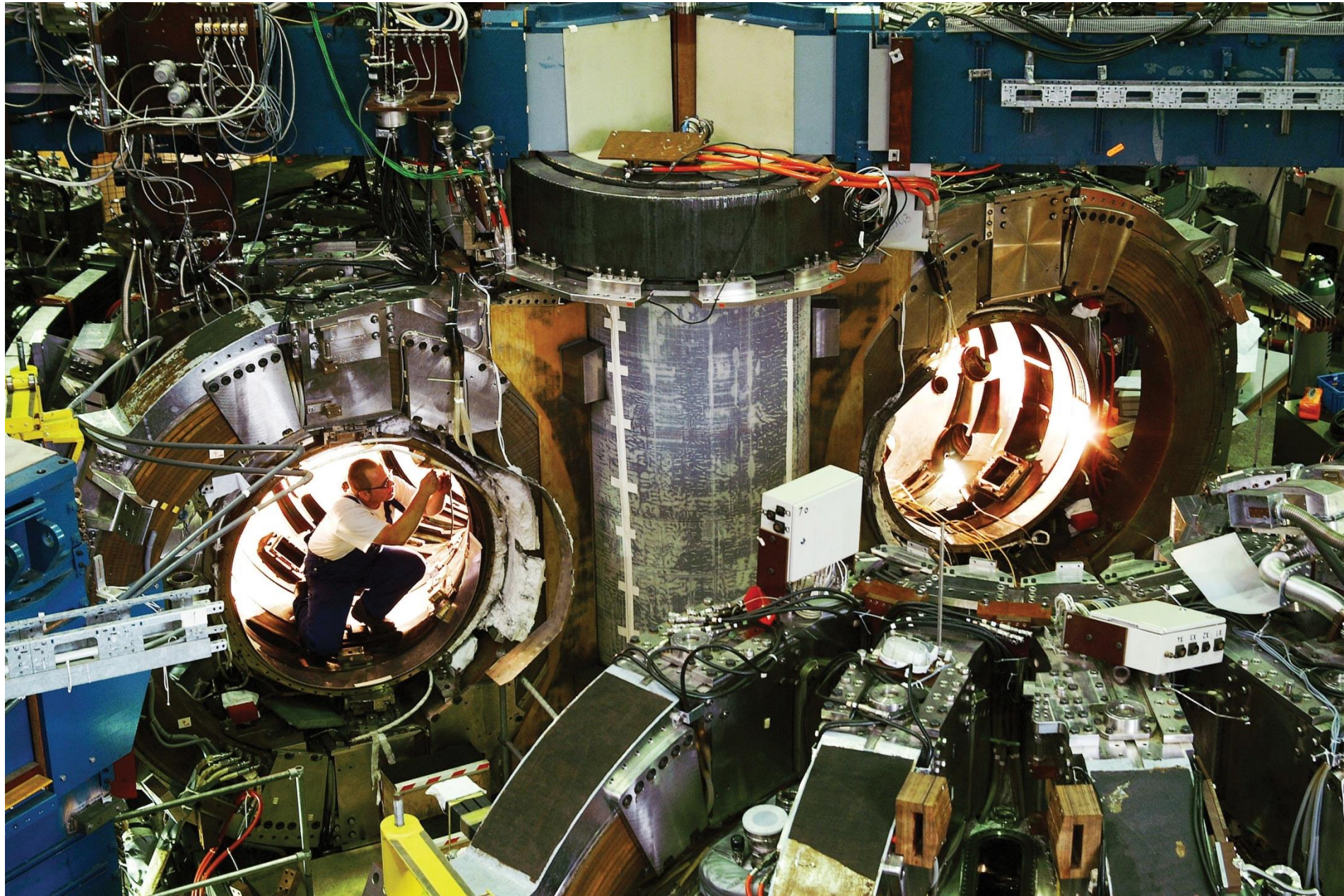
Toroidális plazmaáram

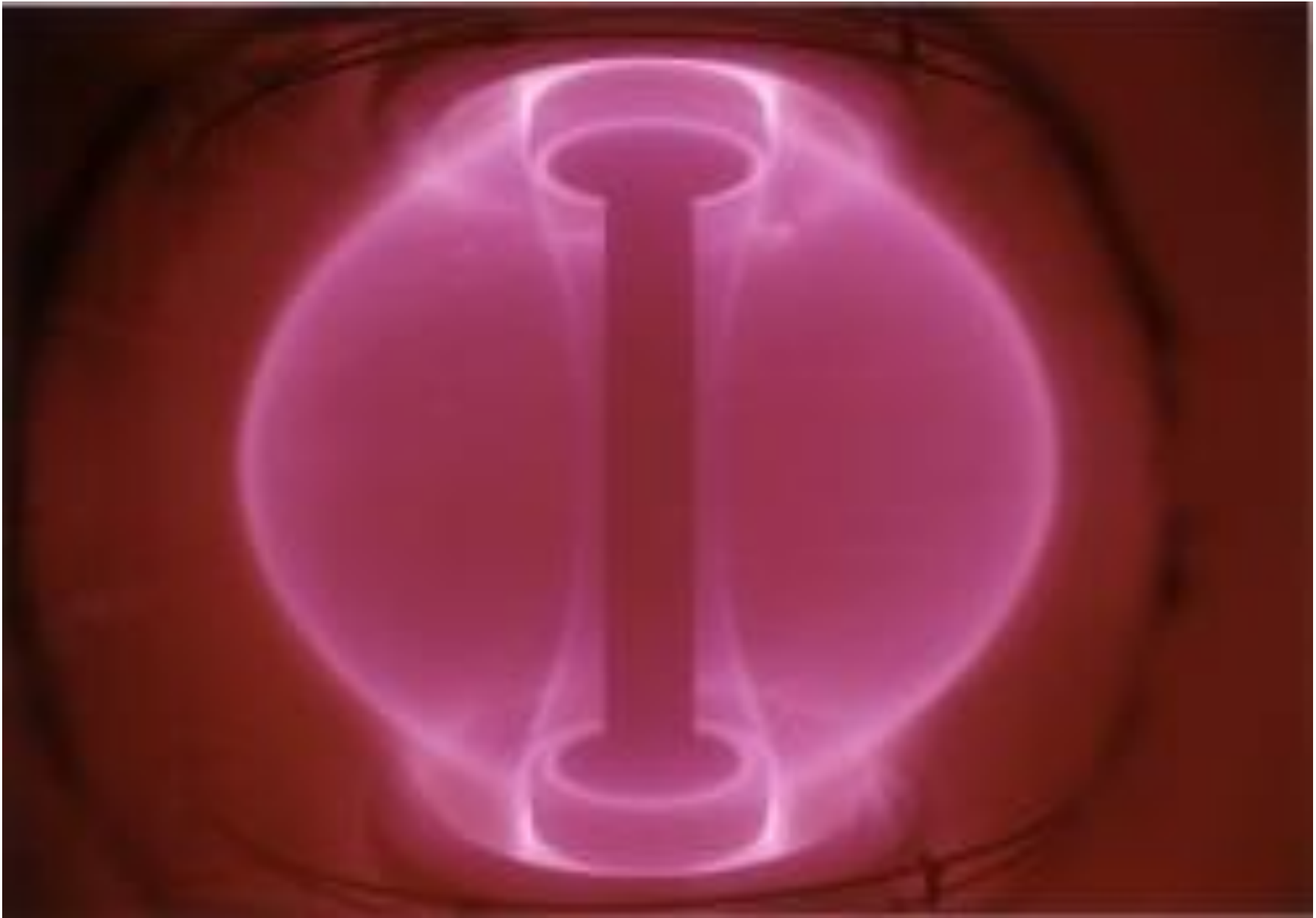


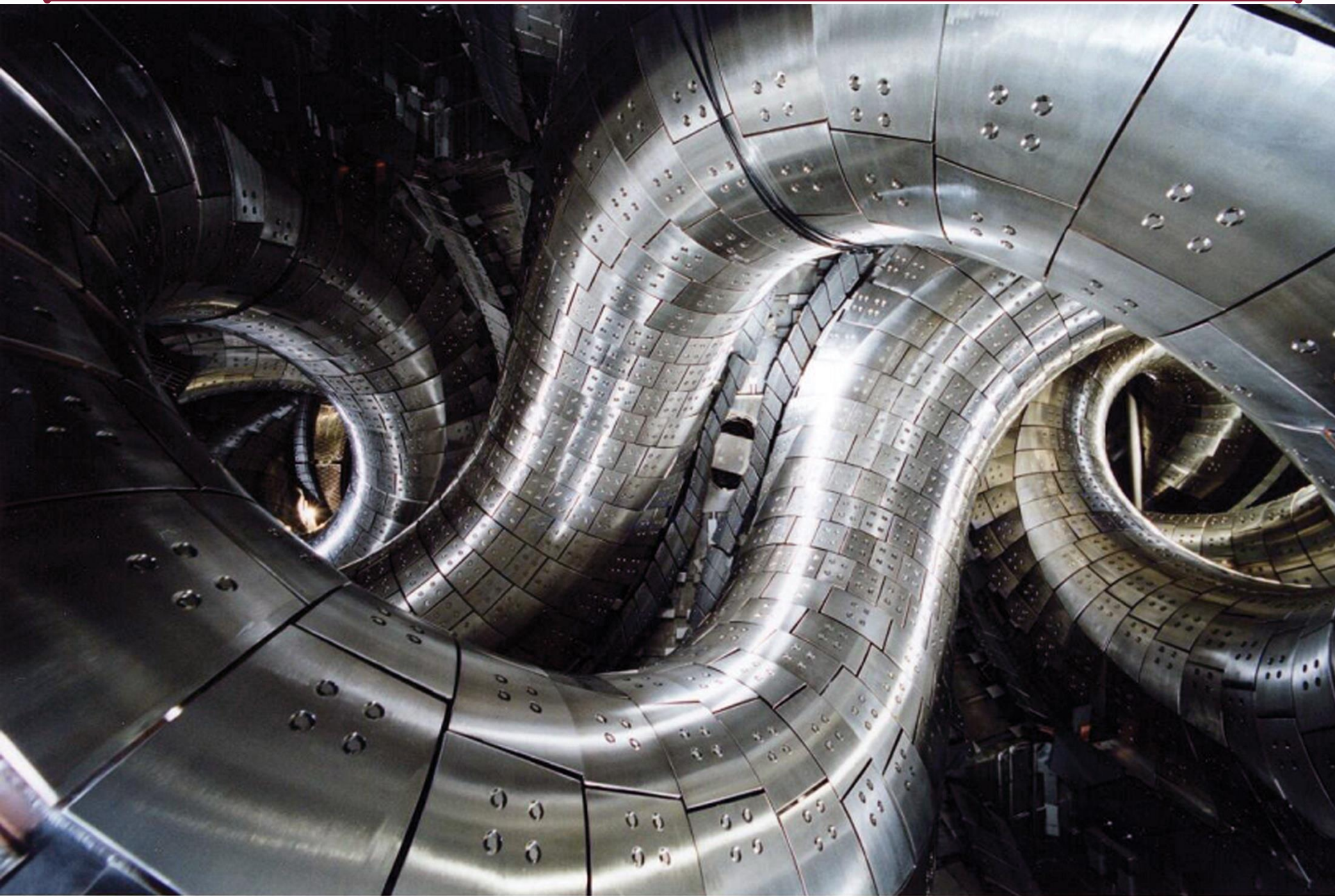
Helikális tekercsek

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



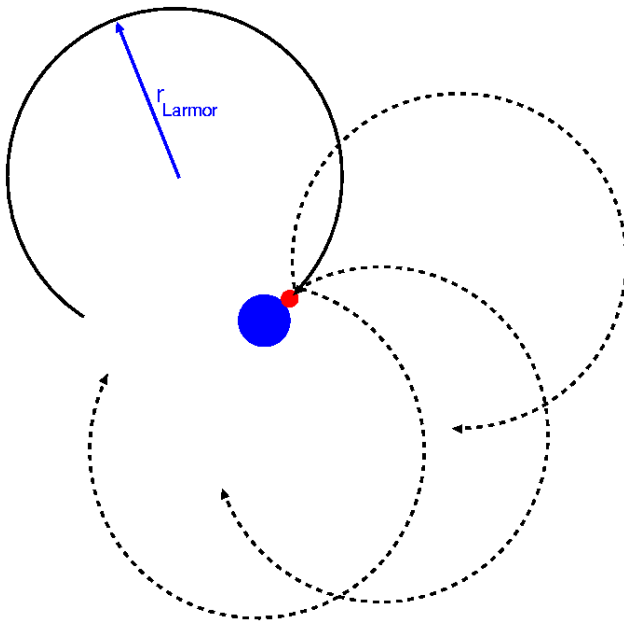






Transzport mágnesesen összetartott fúziós plazmákban (véges összetartás)

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

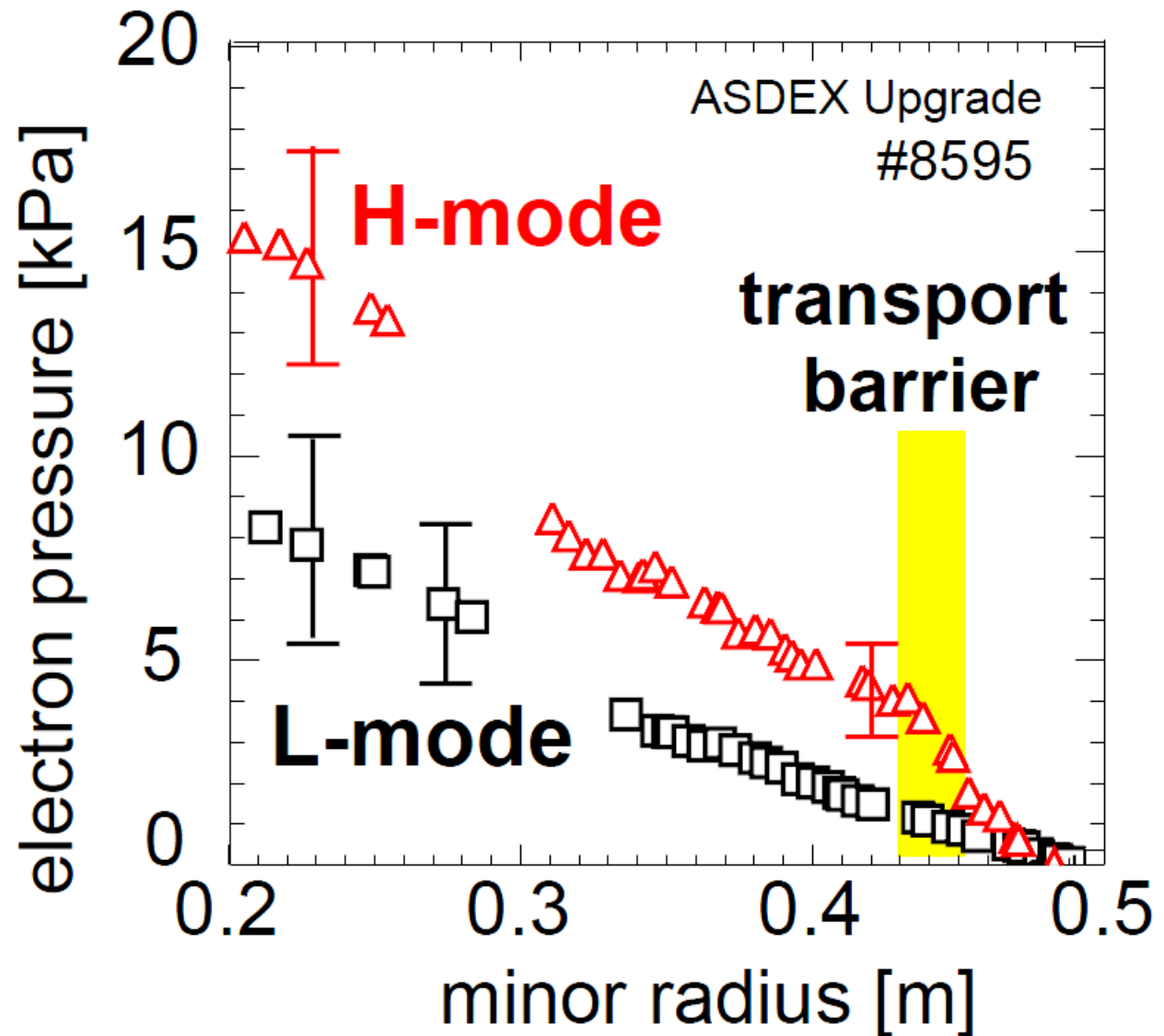
<https://fusion.gat.com/theory/Gyro>

L-mód H-mód

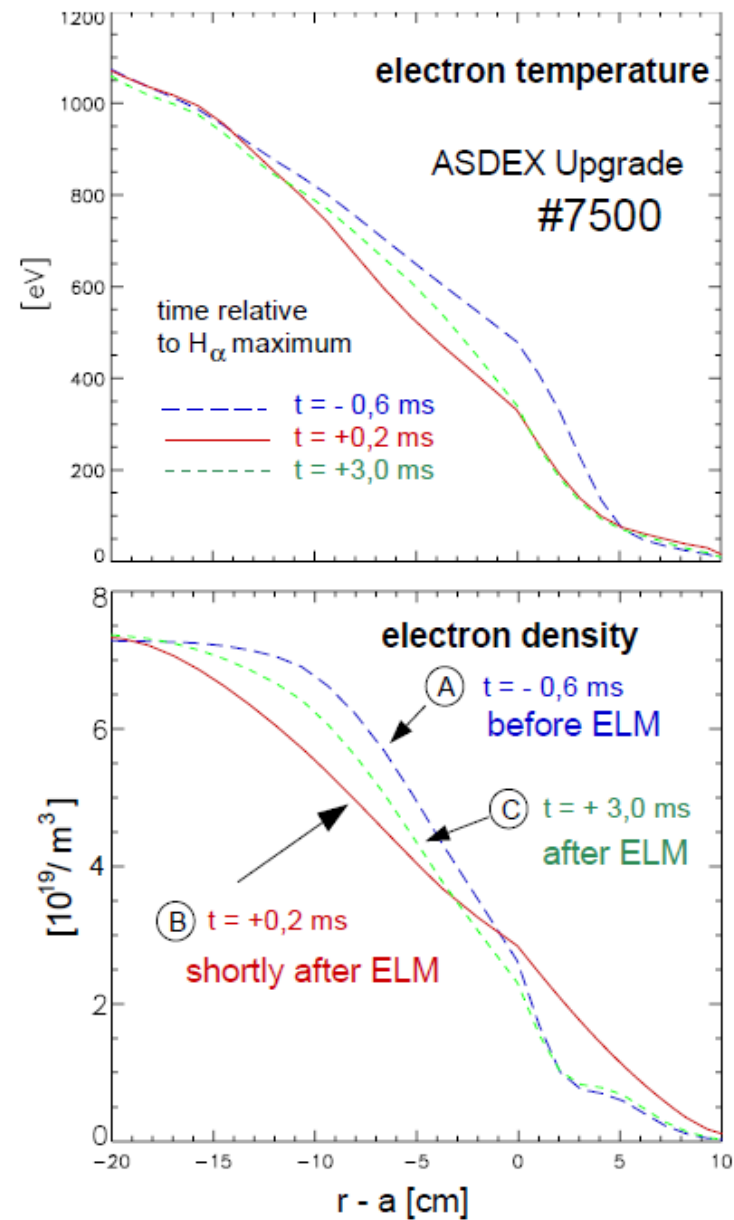
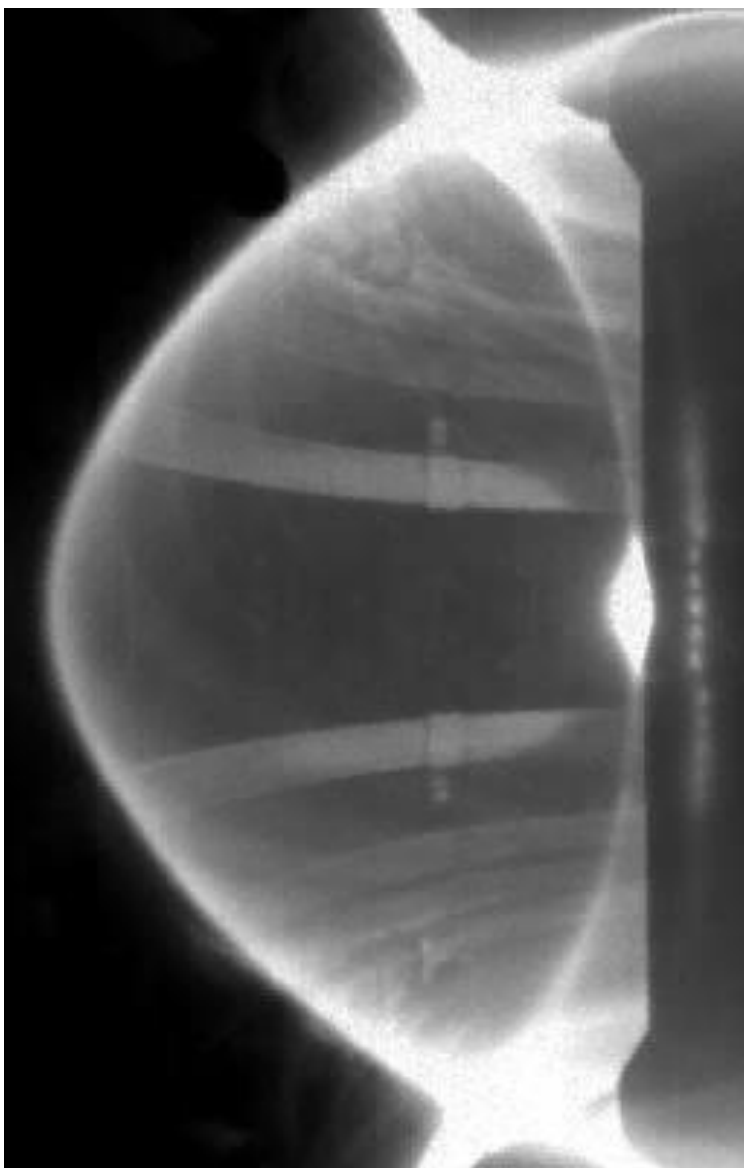
H-mód: high confinement mode

Feltételek:

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



ELM-ek

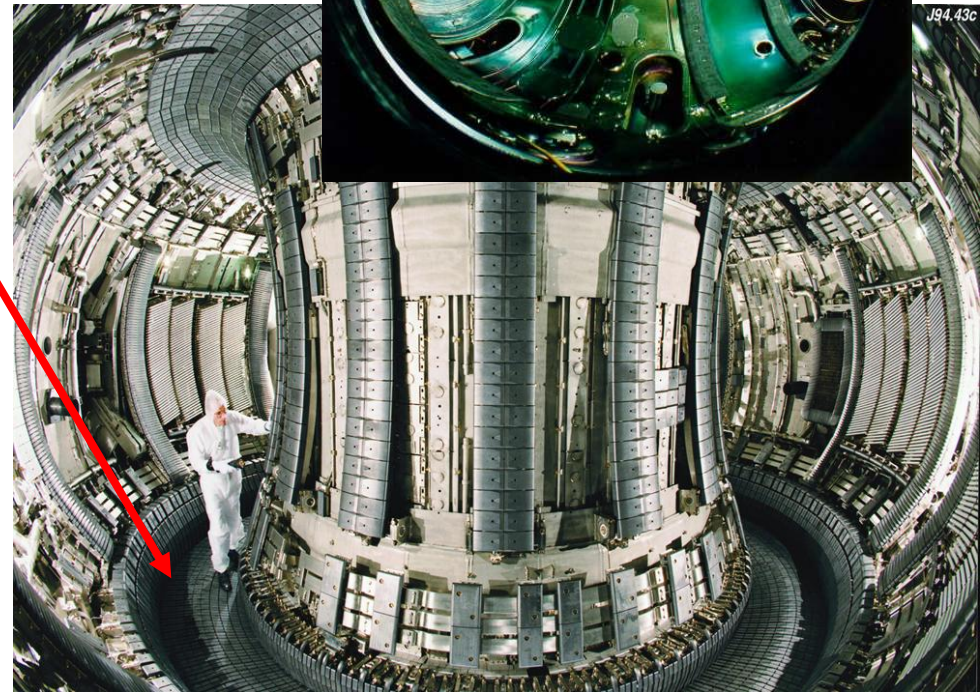
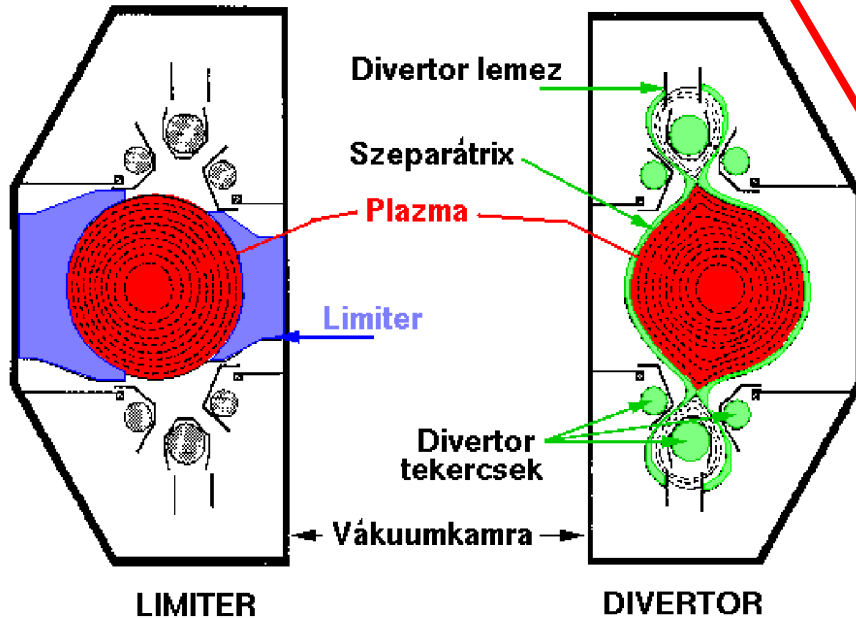


Plazmahatároló elemek

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



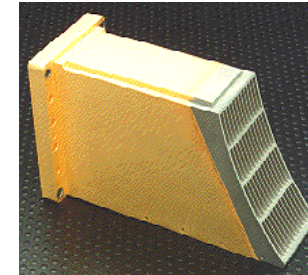
$t = 12.0$ s

CTL 00:50:03:09

Fúziós technológiák: fűtés, áramhajtás

Áram (tokamak):

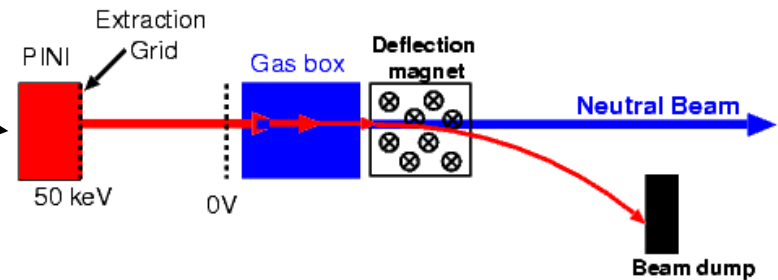
- Induktív áramgerjesztés (csak impulzus < 10 sec)
- Mikrohullámú áramhajtás (1 GHz-100 GHz, 1MW)



*Mikrohullámú
(alsó hibrid)
antenna*

Fűtés:

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



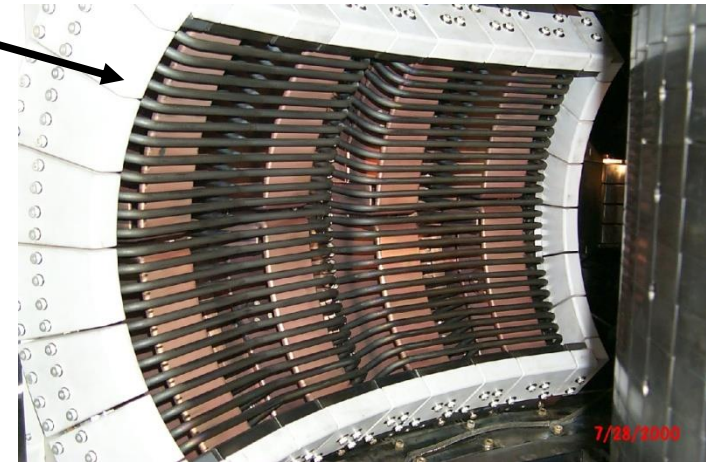
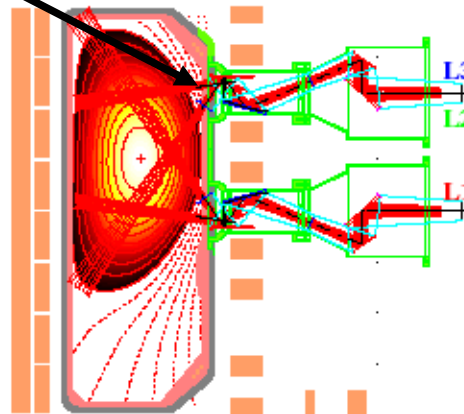
- Ion-ciklotron frekvencia (30 MHz)
- Elektron-ciklotron frekvencia (100GHz)

Teljesítmények:

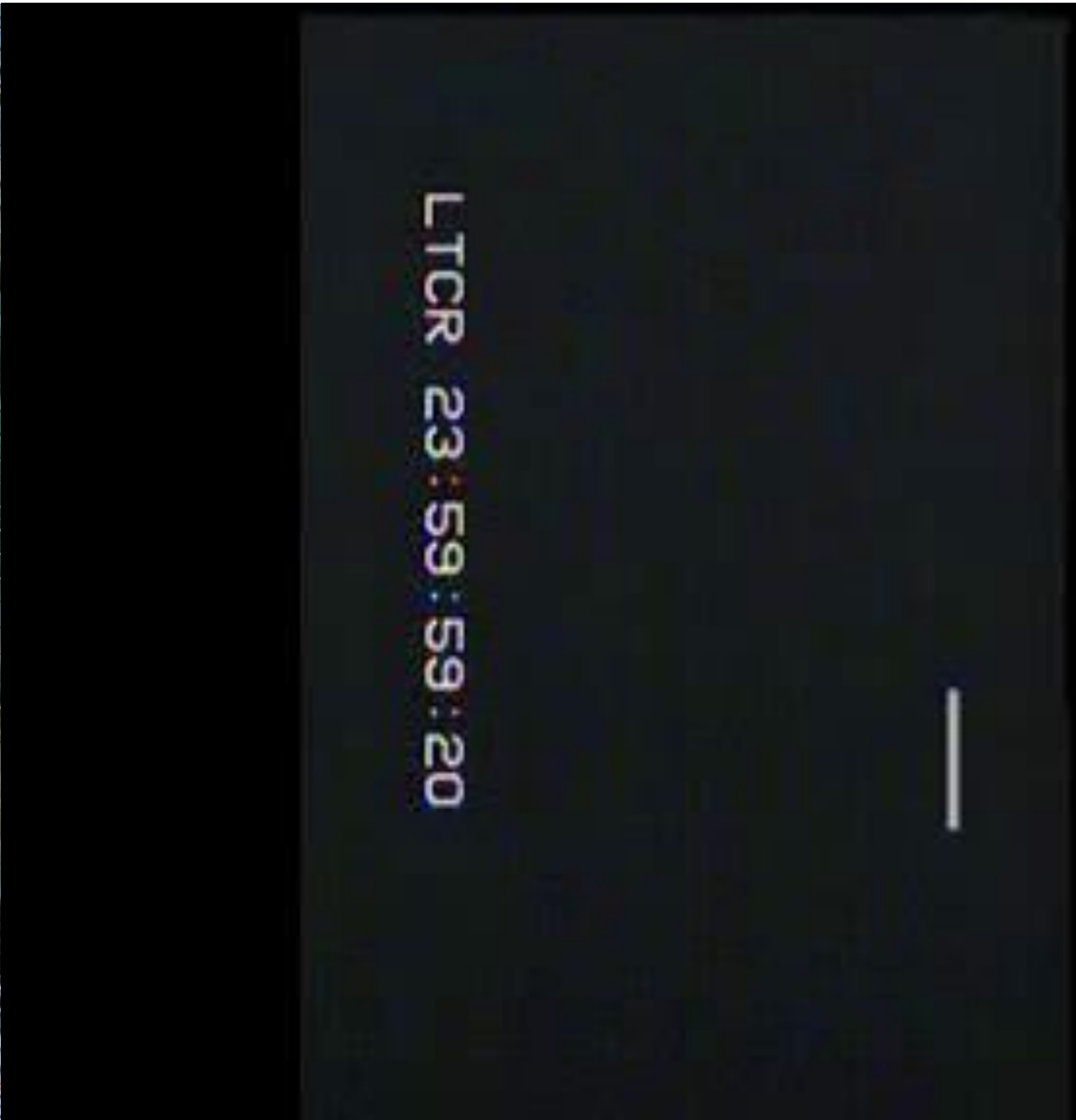
0.5-10 MW/blokk
 < 40 MW/berendezés

Anyagutánpótlás:

gázbeeresztés, NBI
 pelletek



24



Európai fúziós kutatások

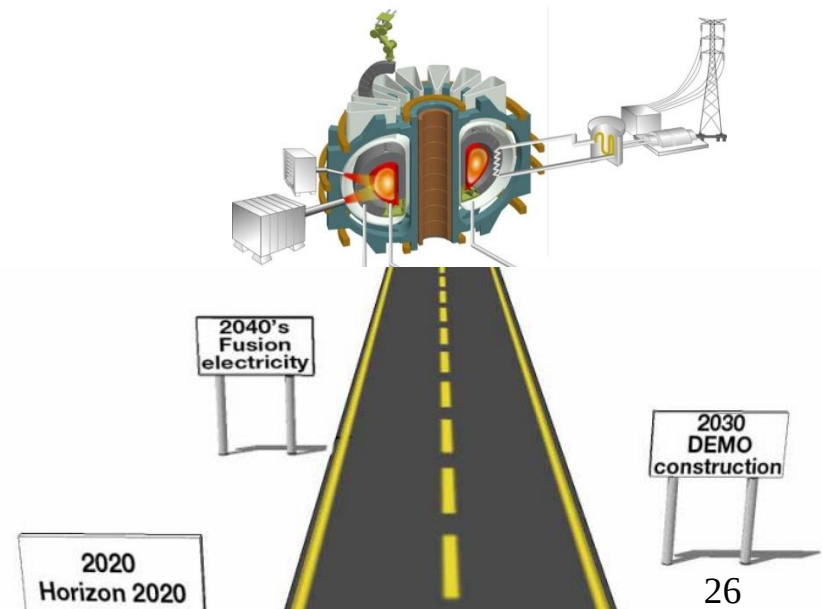
ITER tokamak

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

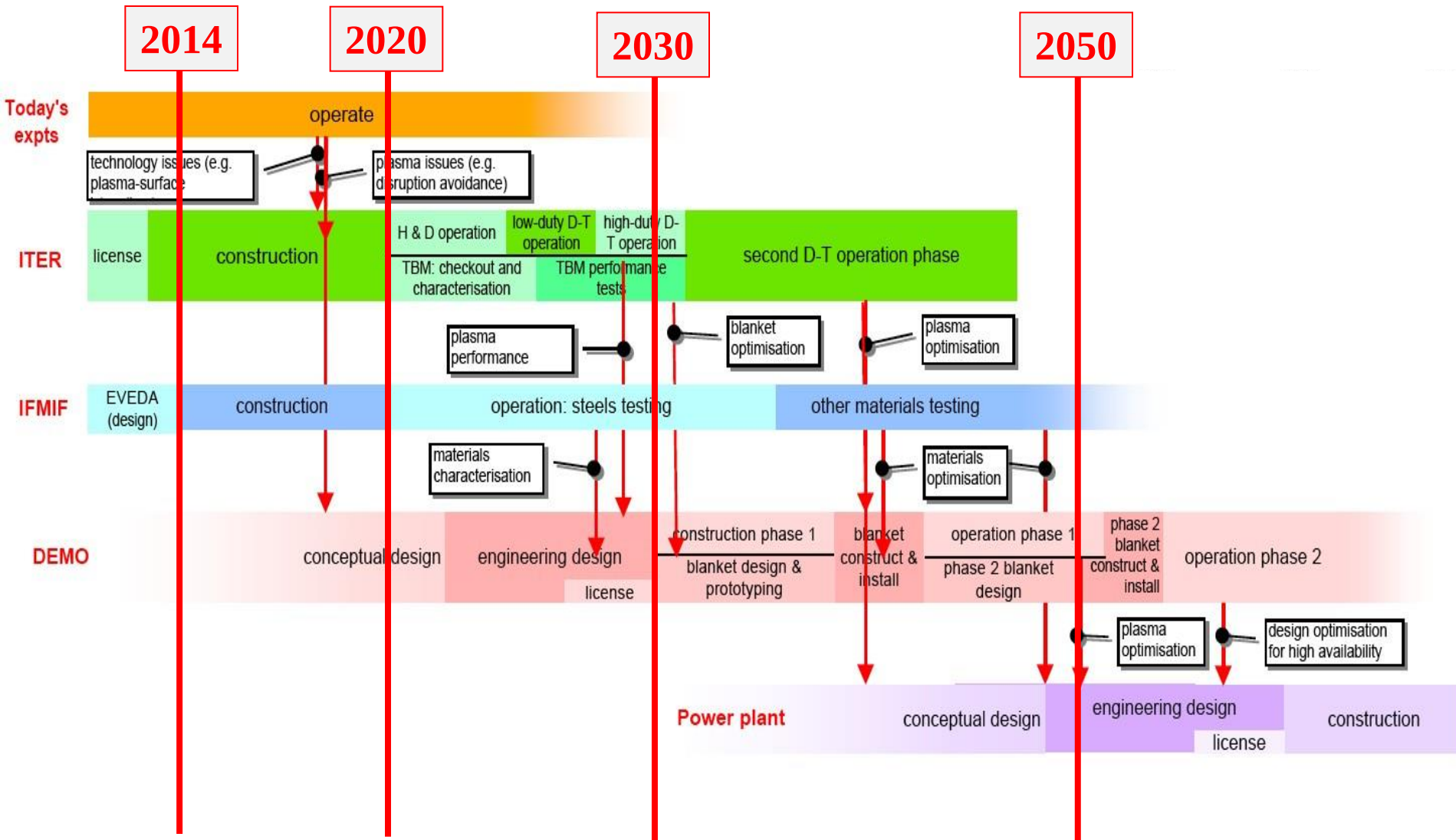


Fusion Roadmap

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

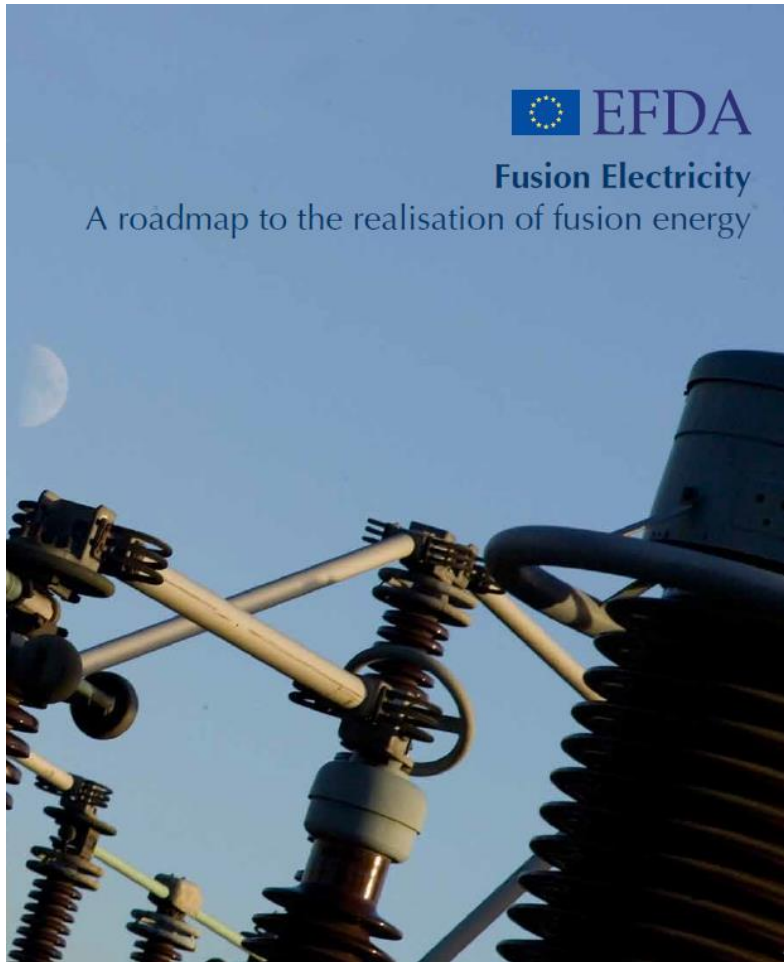


Út a fúziós energiatermeléshez



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!)



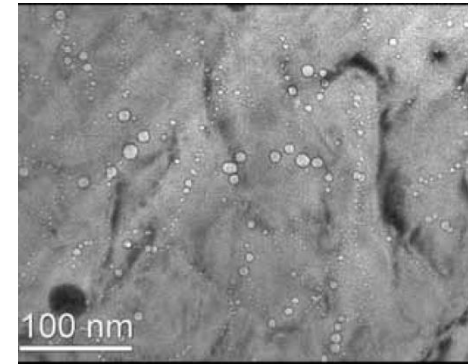
3. Neutronsugárzásnak ellenálló anyagok

Cél:

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

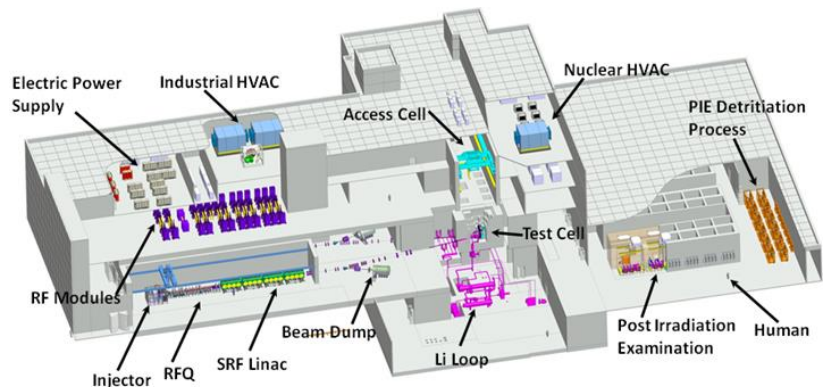
Eszközök:

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

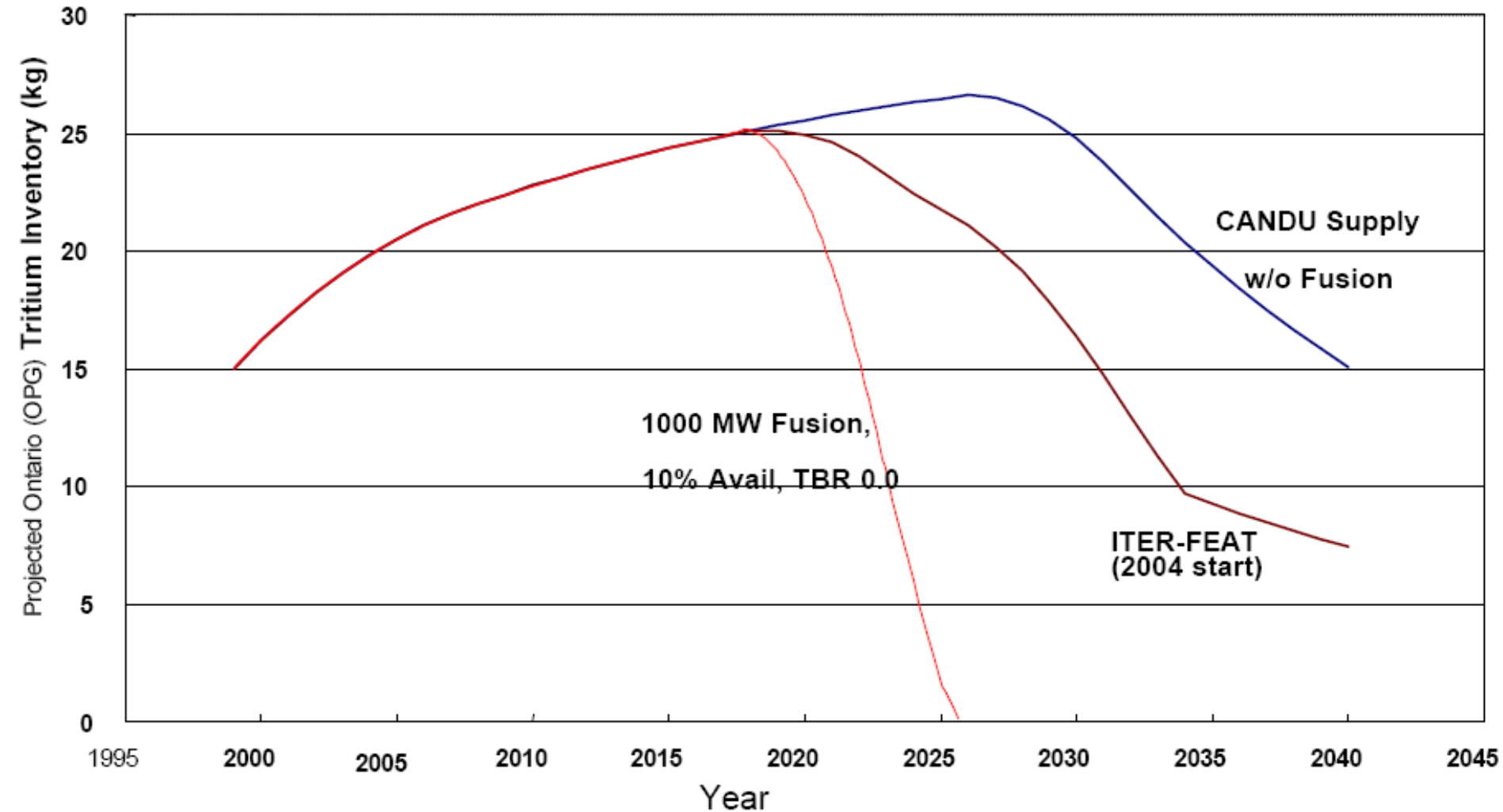


IFMIF: International Fusion Material Irradiation Facility (EU, Japán):

<http://www.ifmif.org>



4. Trícium önellátás



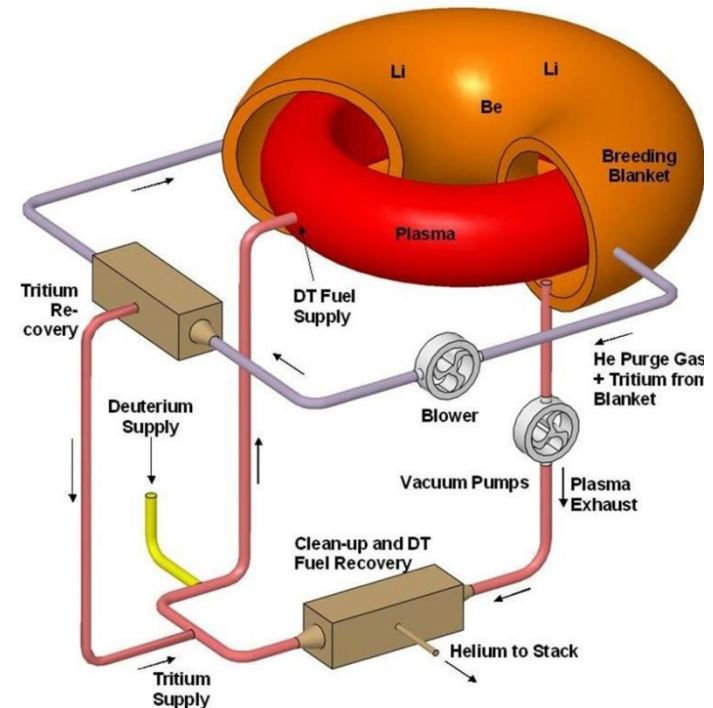
Milyen köpeny modulok hozhatóak létre?

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:

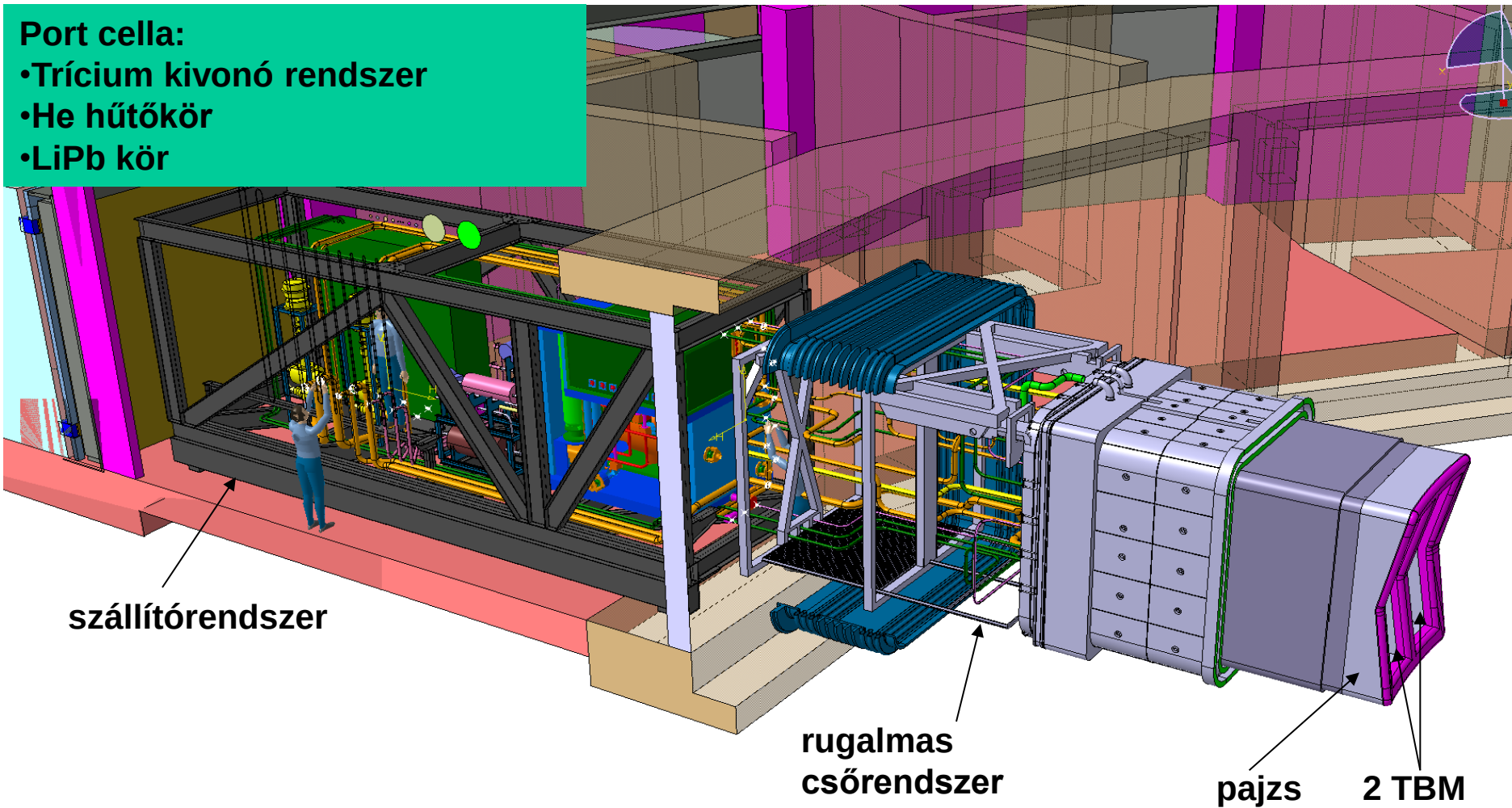
- megfelelő mennyiségű trícium előállítása
- acélszerkezet megfelelő hűtése
- komponensekben a megengedett hőmérséklet limitek biztosítása
- magas hűtőközeg kilépő hőmérséklet biztosítása
- könnyen cserélhető



Az ITER TBM portjainak kialakítása

Port cella:

- Trícium kivonó rendszer
- He hűtőkör
- LiPb kör



szállítórendszer

rugalmas
csőrendszer

pajzs

2 TBM

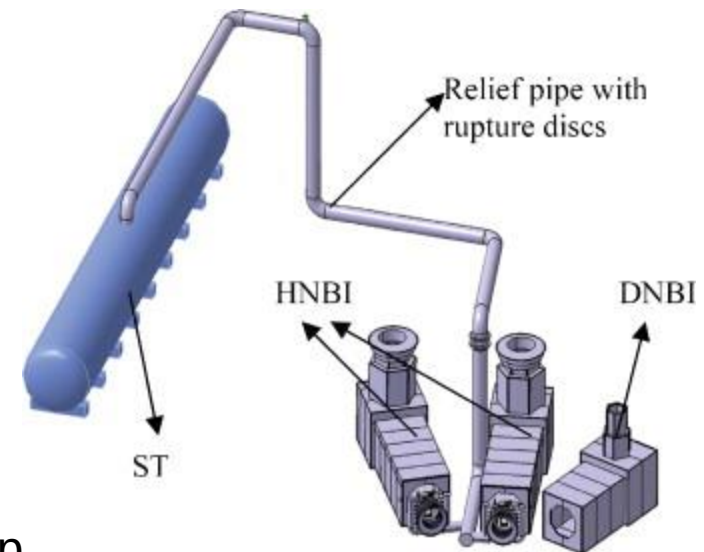
5. Inherens biztonság

Cél:

- Passzív biztonsági filozófia érvényesítése a kezdetektől

Eszközök:

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



ITER Vacuum Vessel Pressure Suppression System

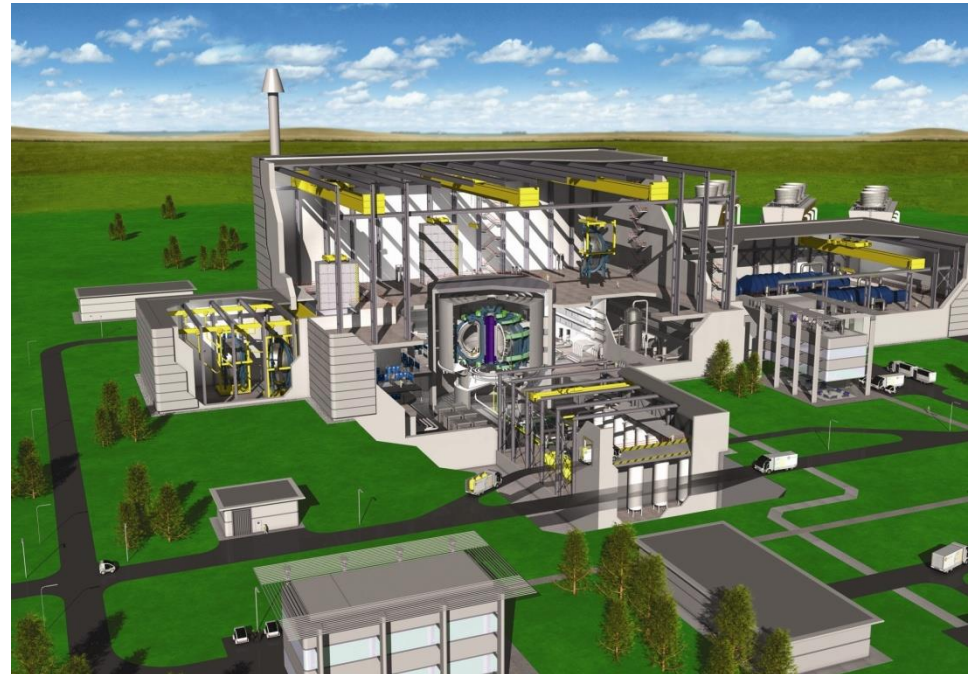
6. DEMO tervezése

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, forrókamrák
- 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



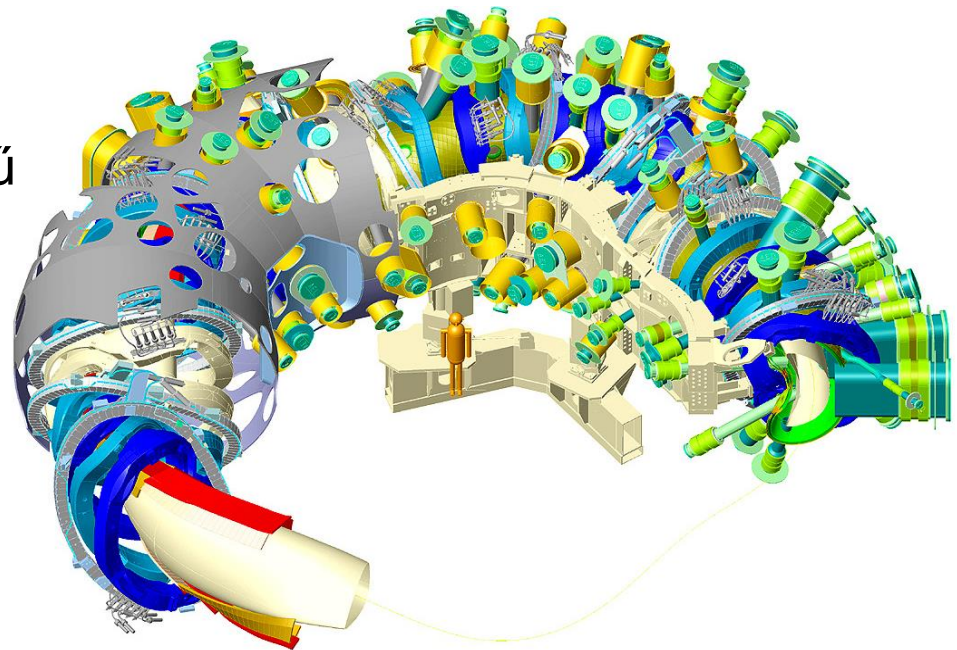
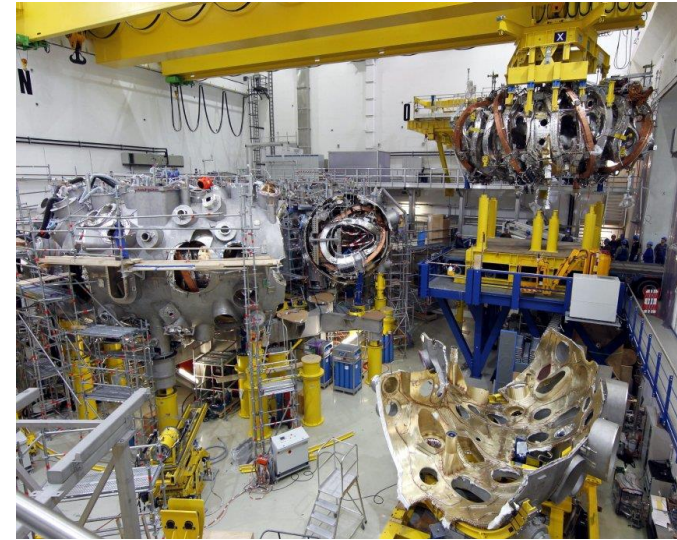
8. Sztellarátorok

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



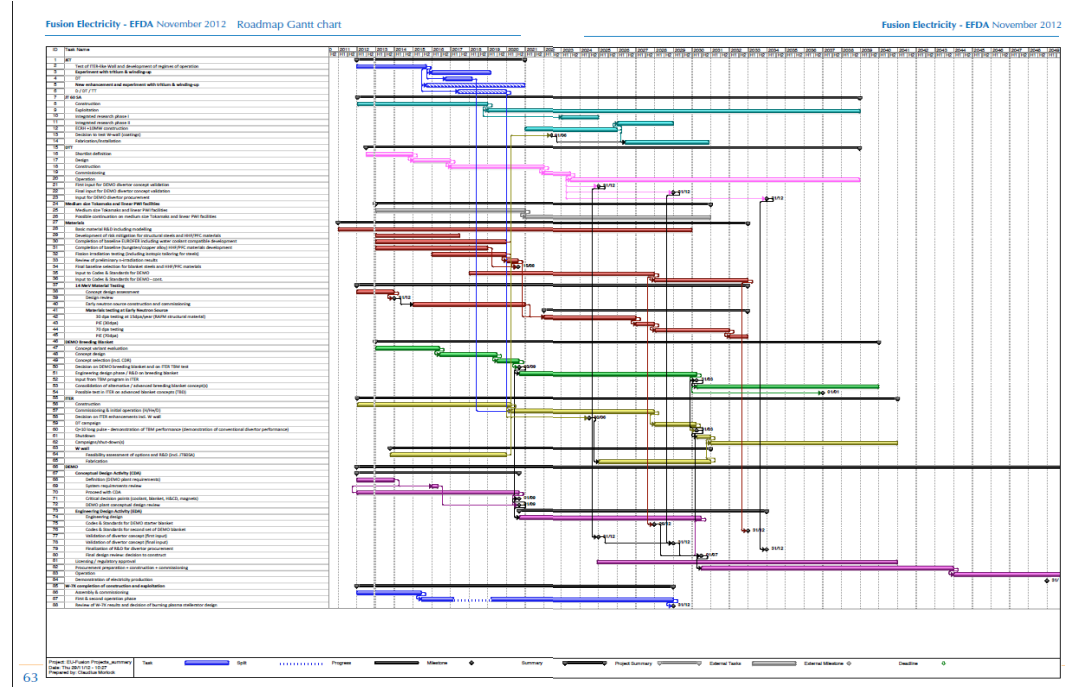
Fúziós útiterv ütemezése

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





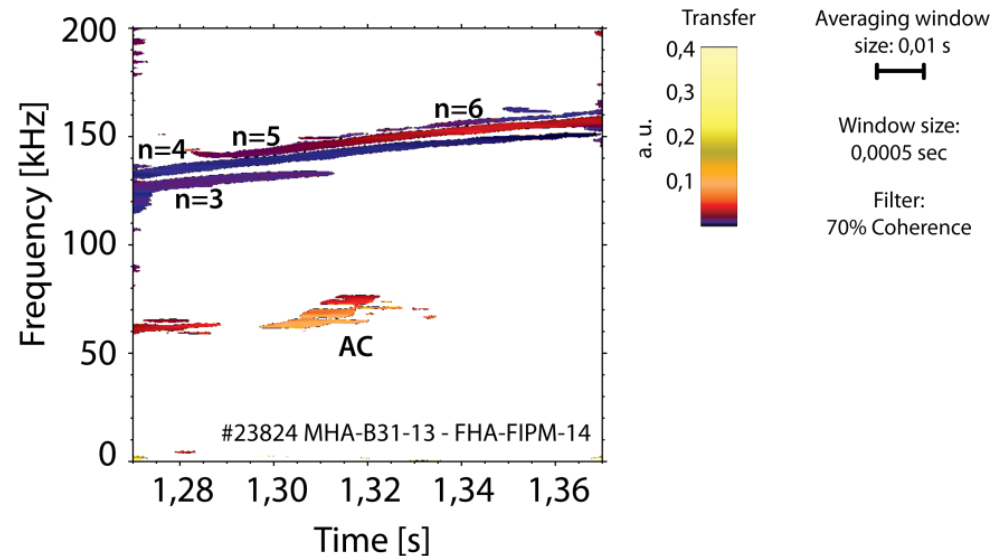
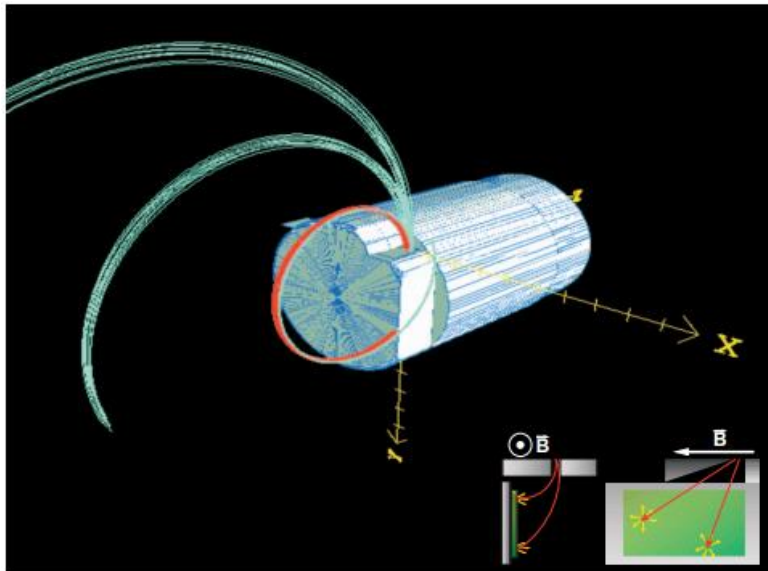
Magyar vonatkozások

- *Minden nagy európai 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

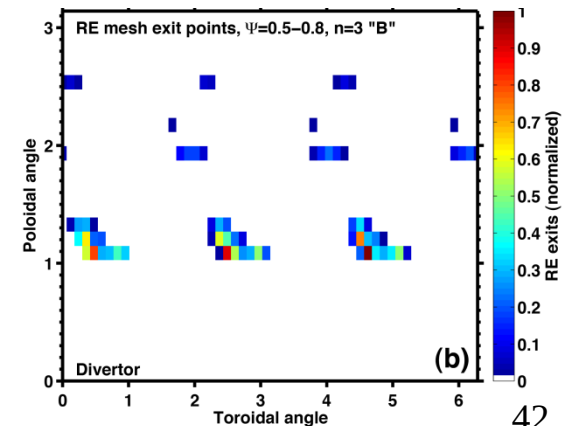
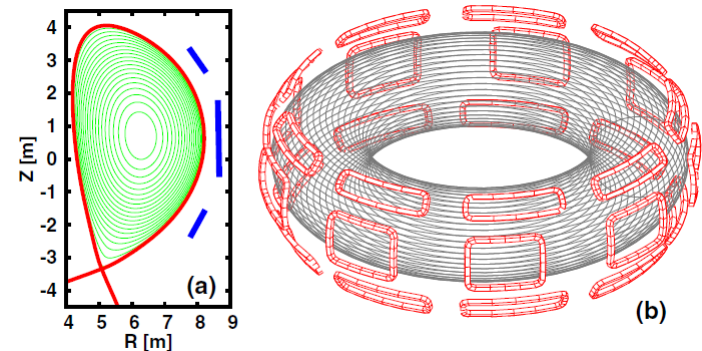
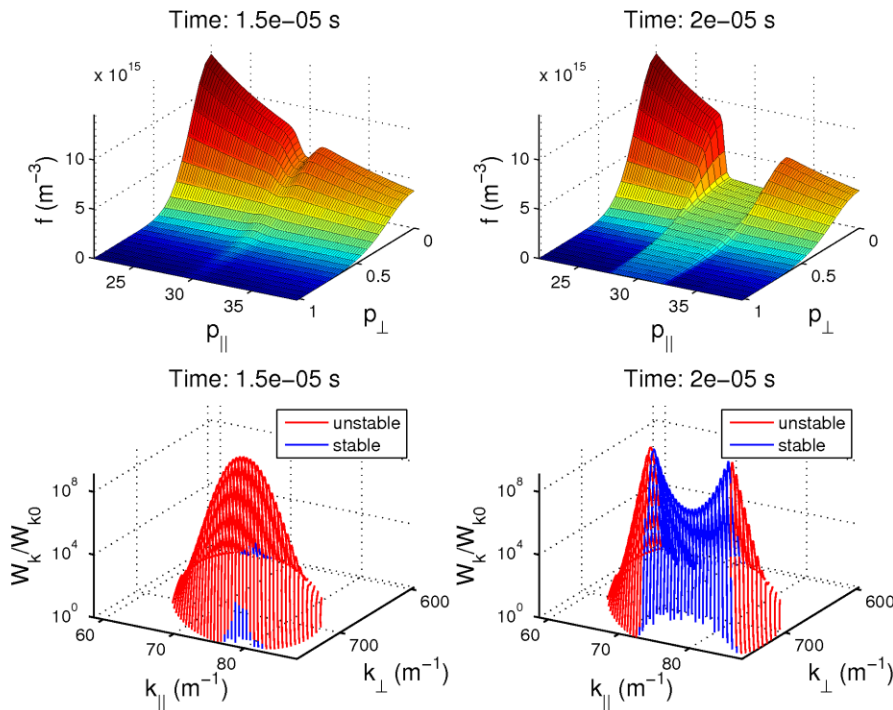
- *Kritikus téma az alfa-fűtés (és egyéb fűtések) hatásfoka miatt*
- *ASDEX Upgrade tokamakon tanulmányozzuk*
- *Diagnosztika tervezés, üzemeltetés*
 - *Gyorsion-veszteség detektorok az ASDEX Upgrade tokamakon*
- *Adatfeldolgozás:*
 - *Idő-frekvencia analízis, sok diagnosztika összehasonlítása*
 - *Egyéb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



Elfutó elektronok modellezése

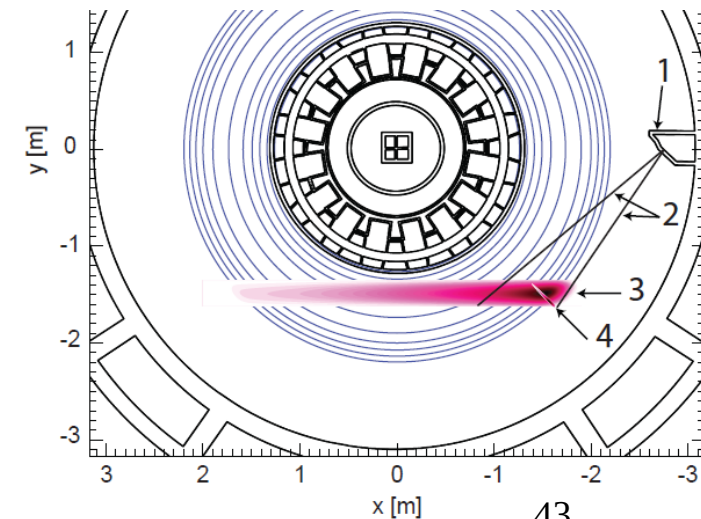
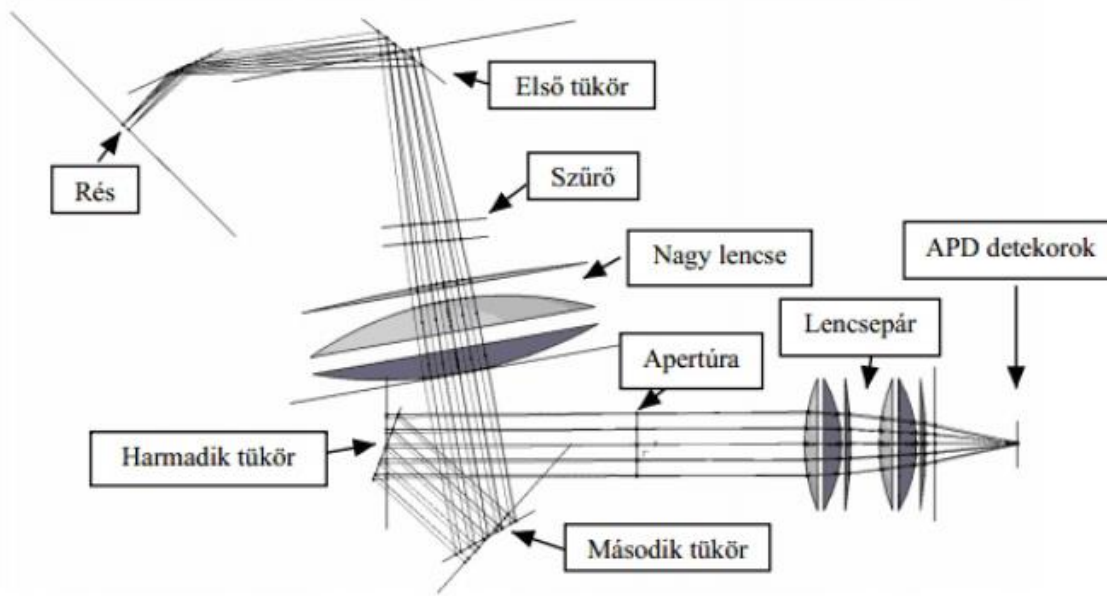
➤ Elméleti számítások és numerikus szimulációk

- Elfutó elektronok kölcsönhatása rezonáns plazmahullámokkal
- Elfutó elektronok keletkezésének modellezése plazmaösszeomlásokban
- Elfutó elektronok transzportjának modellezése
- Integrált tokamak modellezés



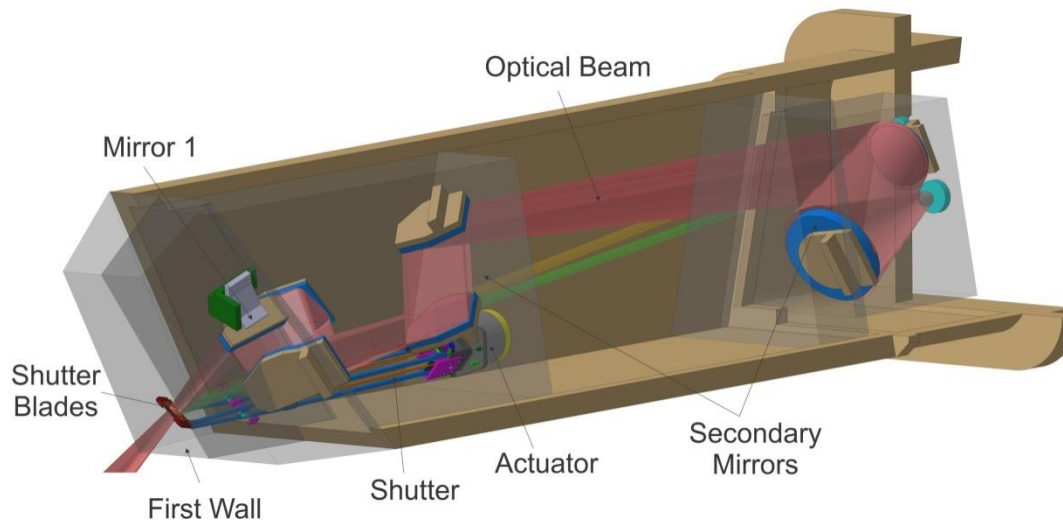
Atomnyaláb-emissziós modellezése, tervezése

- *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, ...*



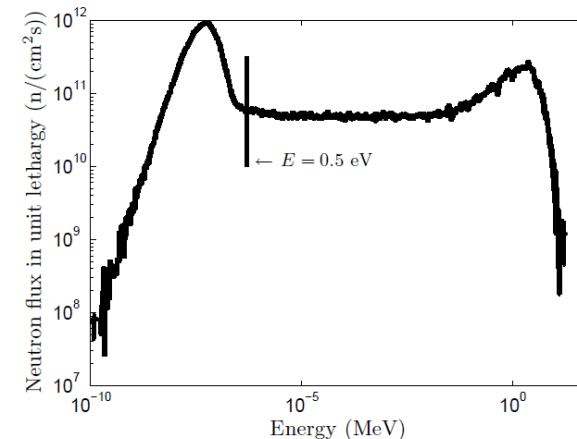
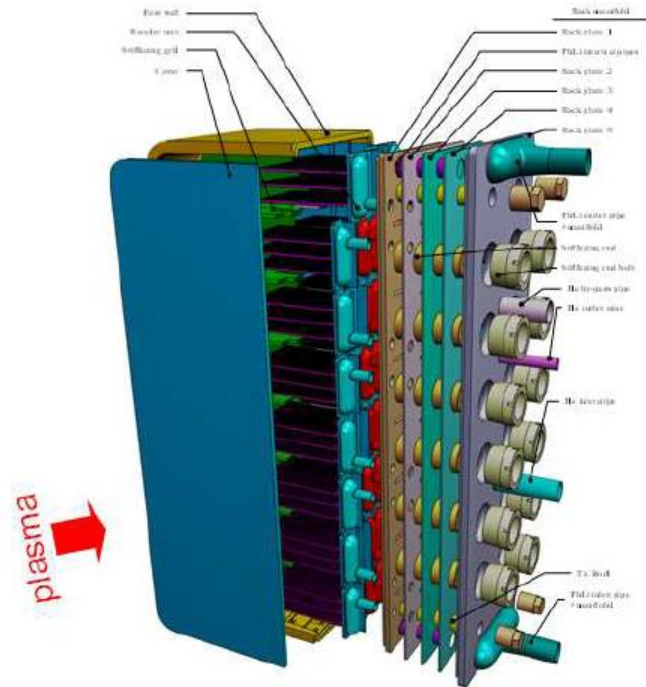
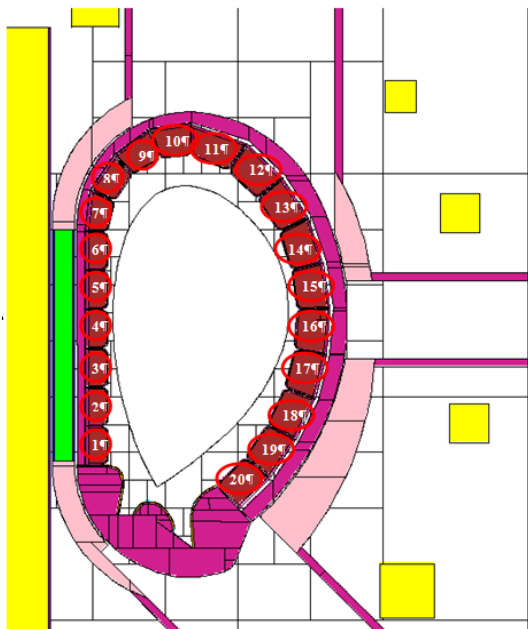
ITER plazmaközei töltéscsere diagnosztika tervezése

- *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 tantárgyak

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

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

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