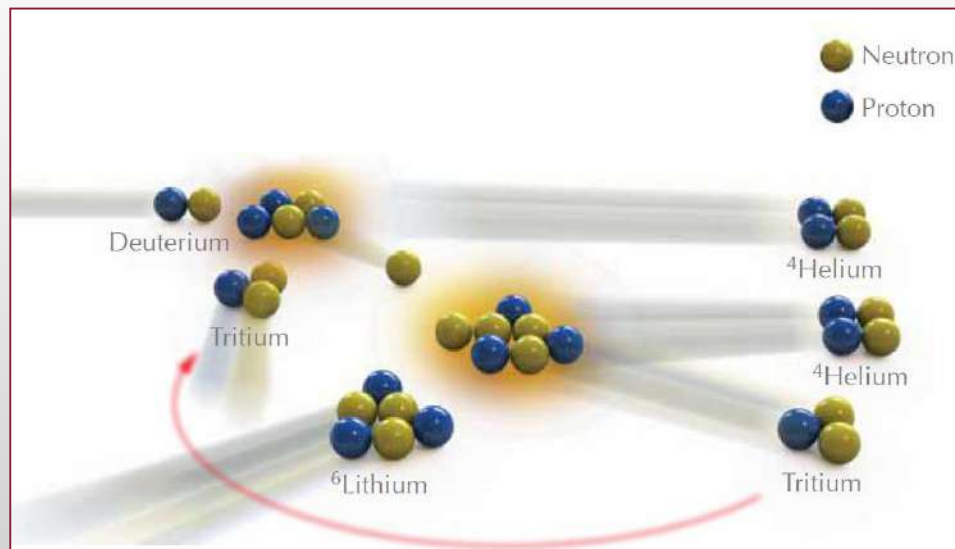


A fúzió jövője, az ITER jelene



Pokol Gergő



ESZK

2018. november 22.



Hogyan termeljük villamos energiát?

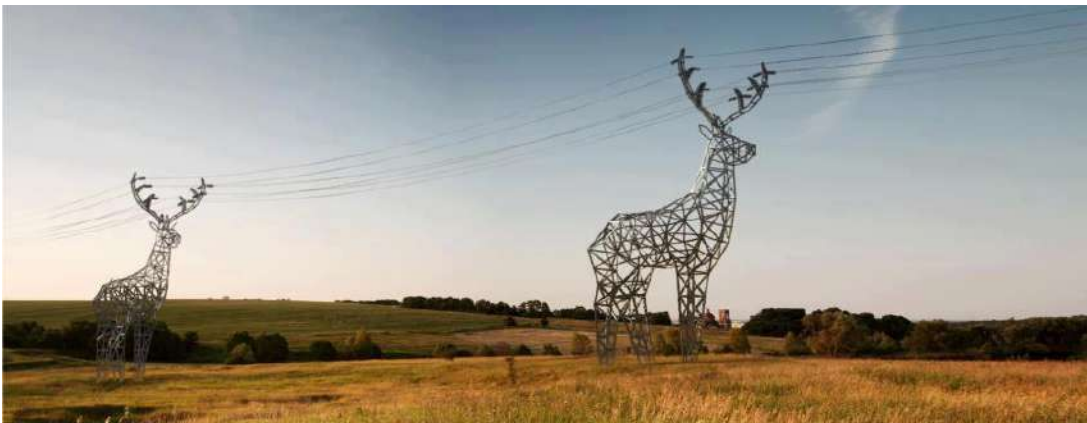


Bőséges üzemanyag: Amennyit csak akarunk, egyenletesen elosztva!

Tiszta: Ne keletkezzenek hosszú távon is szennyező anyagok, vagy változások a környezetben!

Biztonságos: Általában biztonságos és katasztrófamentes!

Szabályozott: Pont annyit elektromos teljesítményt ad, amennyire szükség van!



Hogyan termeljük villamos energiát?

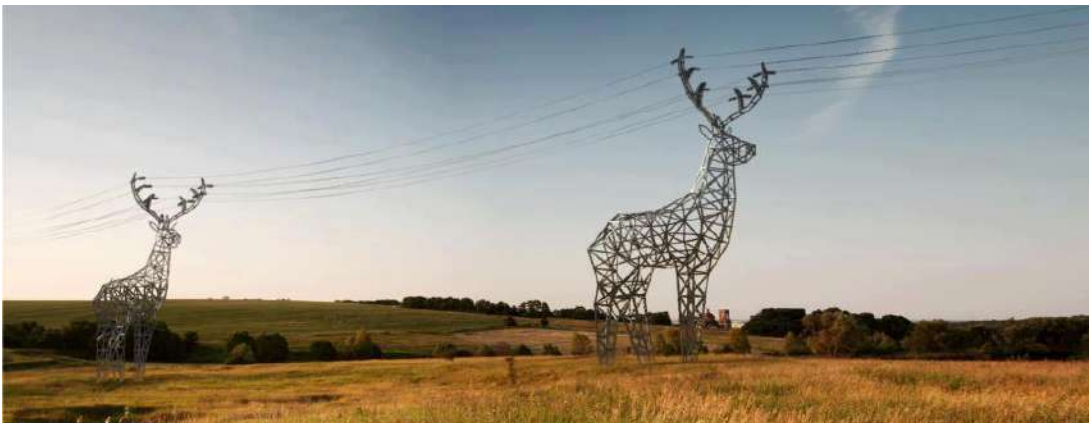
**A magfúzió mindegyik kritériumnak megfelelehet!
... valamilyen szinten... feltéve, hogy...**

Bőséges üzemanyag: Amennyit csak akarunk, egyenletesen elosztva!

Tiszta: Ne keletkezzenek hosszú távon is szennyező anyagok, vagy változások a környezetben!

Biztonságos: Általában biztonságos és katasztrófamentes!

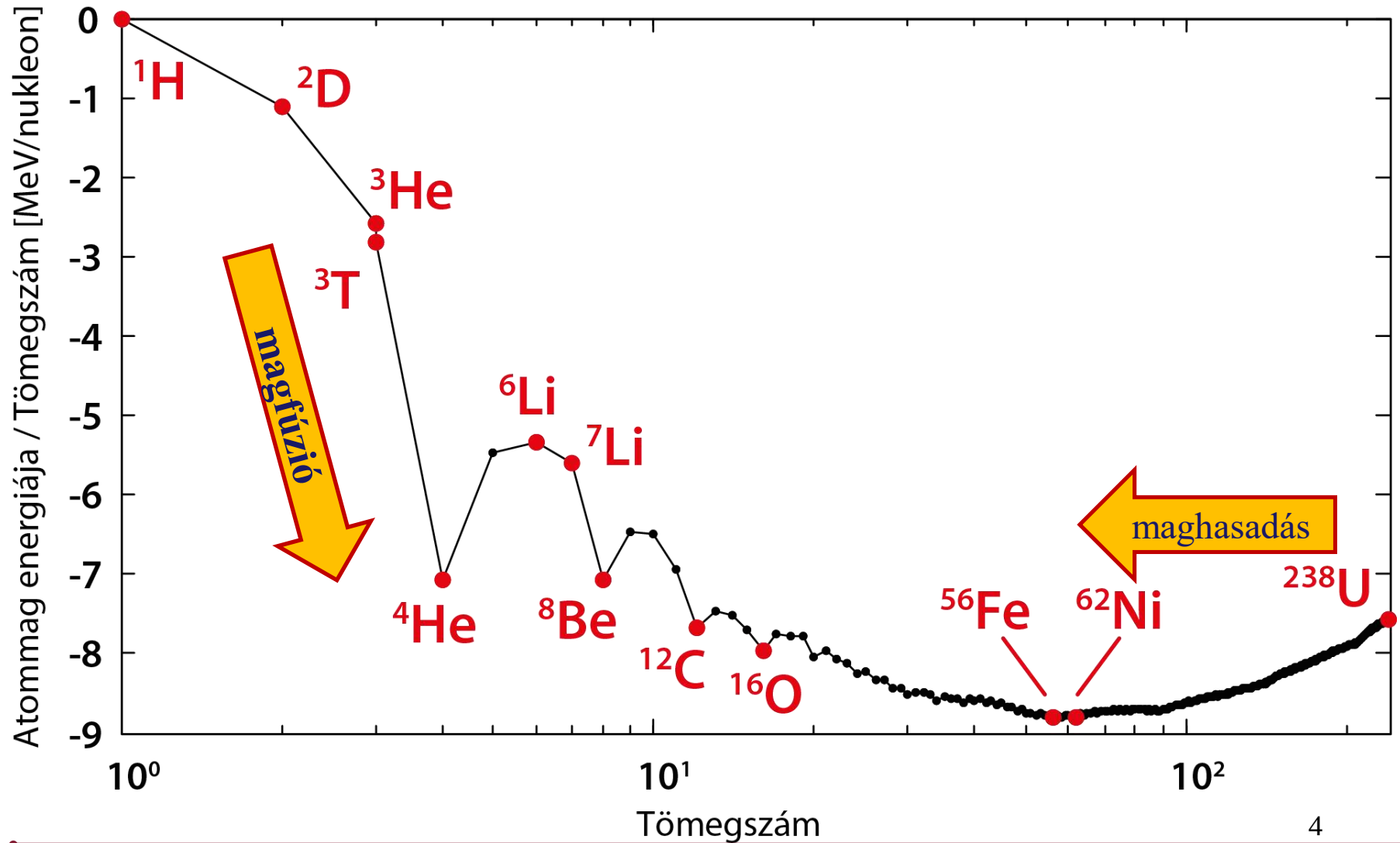
Szabályozott: Pont annyit elektromos teljesítményt ad, amennyire szükség van!





Fúziós alapok

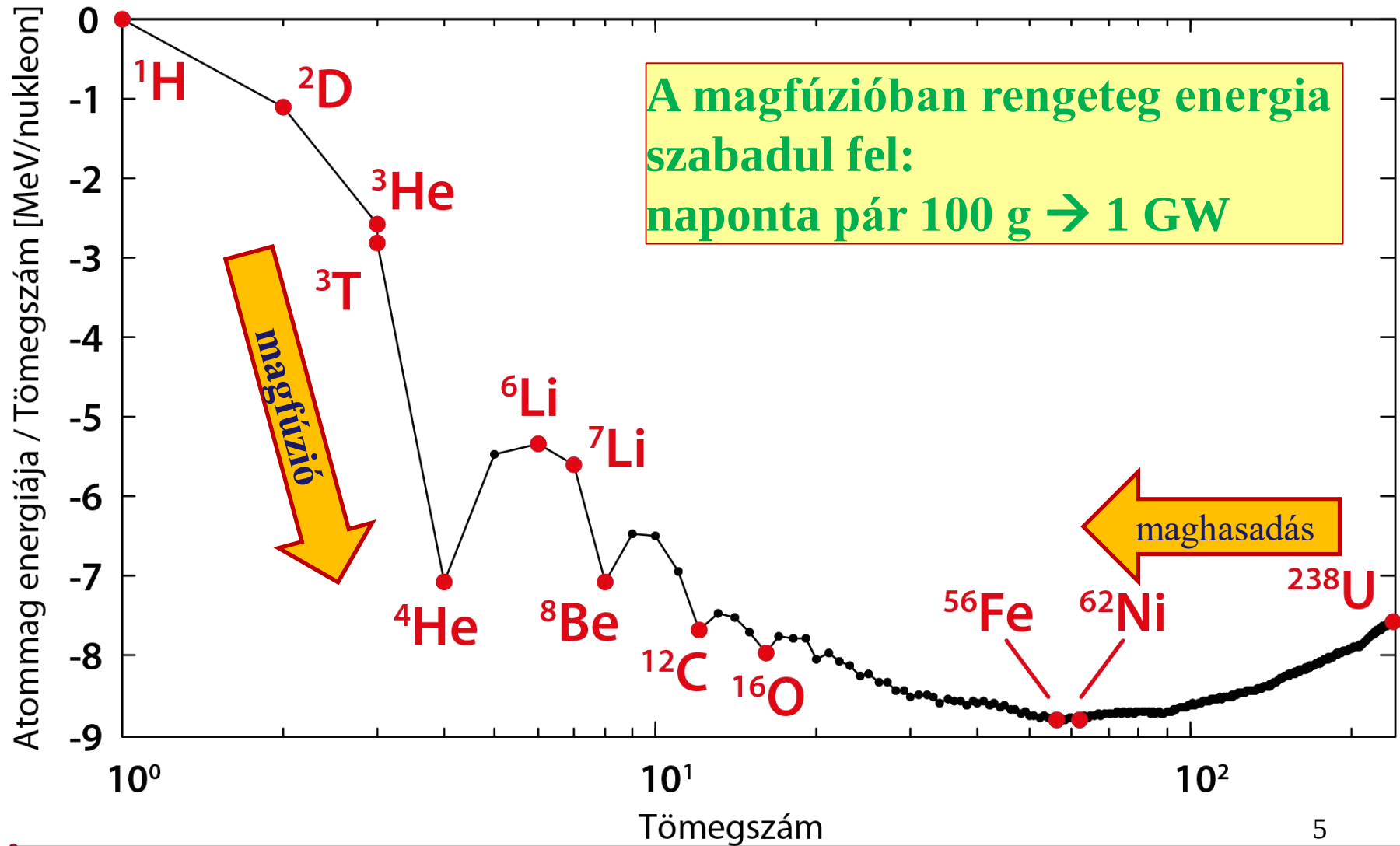
Egy nukleonra eső kötési energia



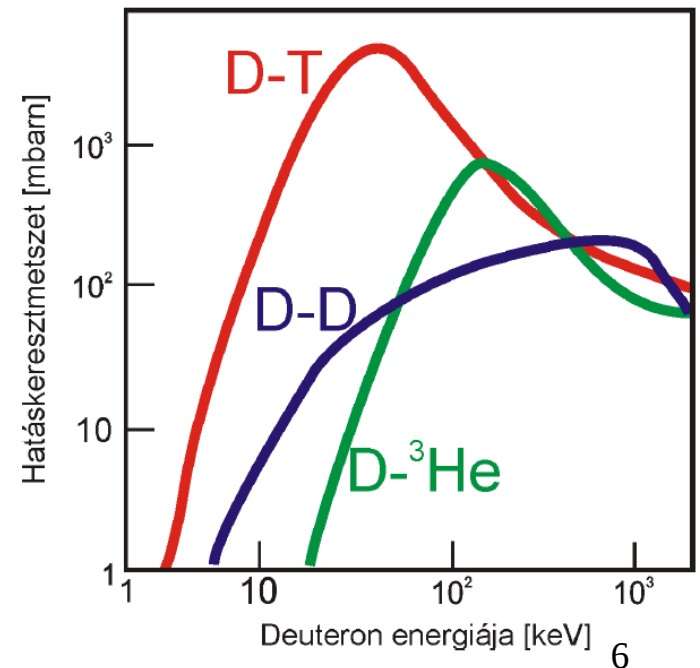
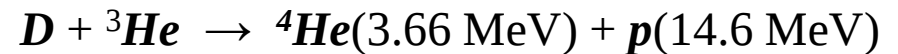
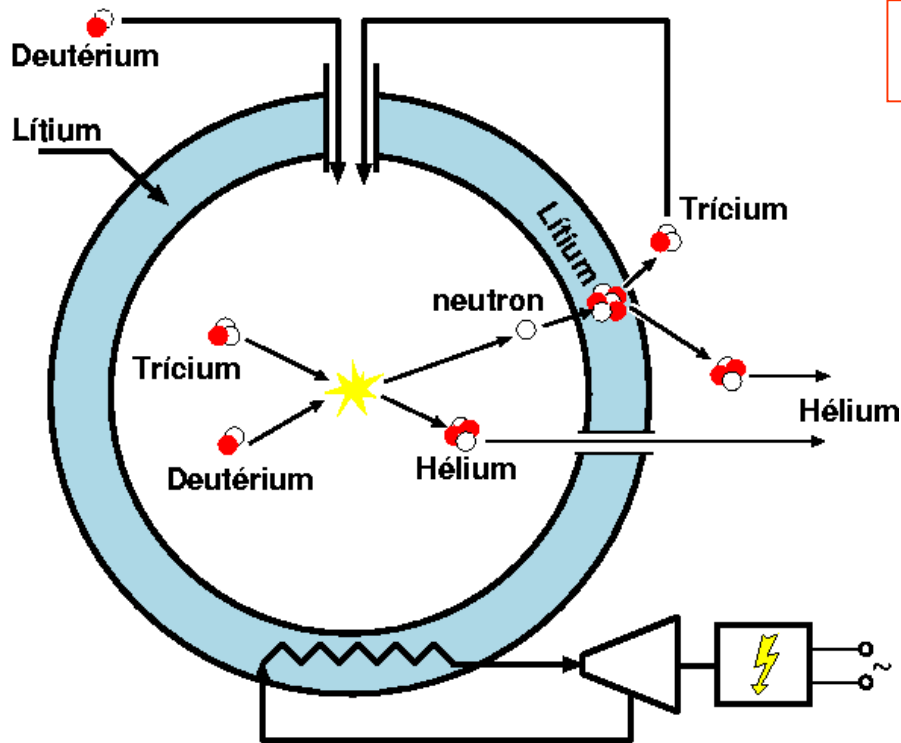


Fúziós alapok

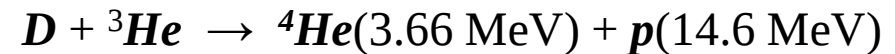
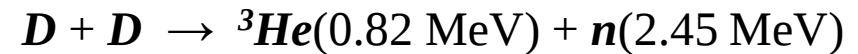
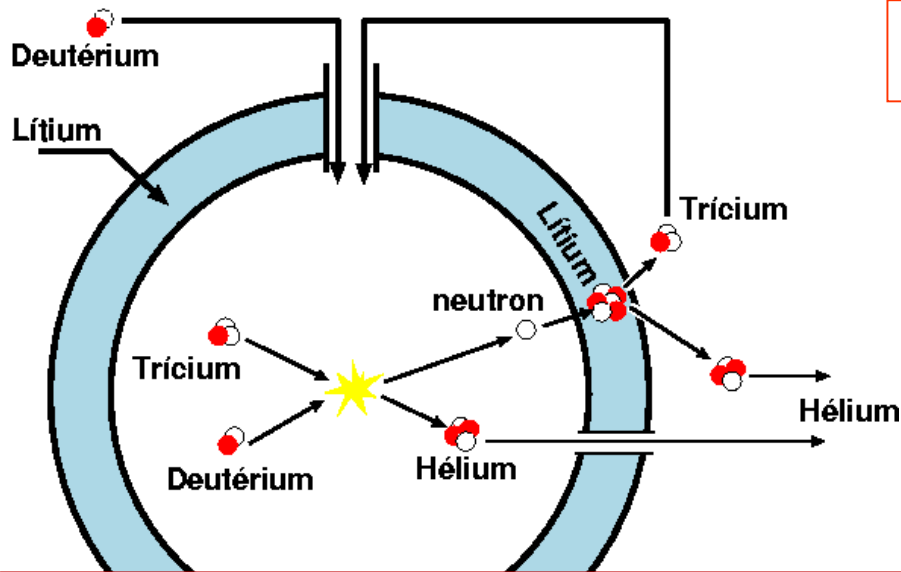
Egy nukleonra eső kötési energia



Fúziós reaktor üzemanyagciklusa



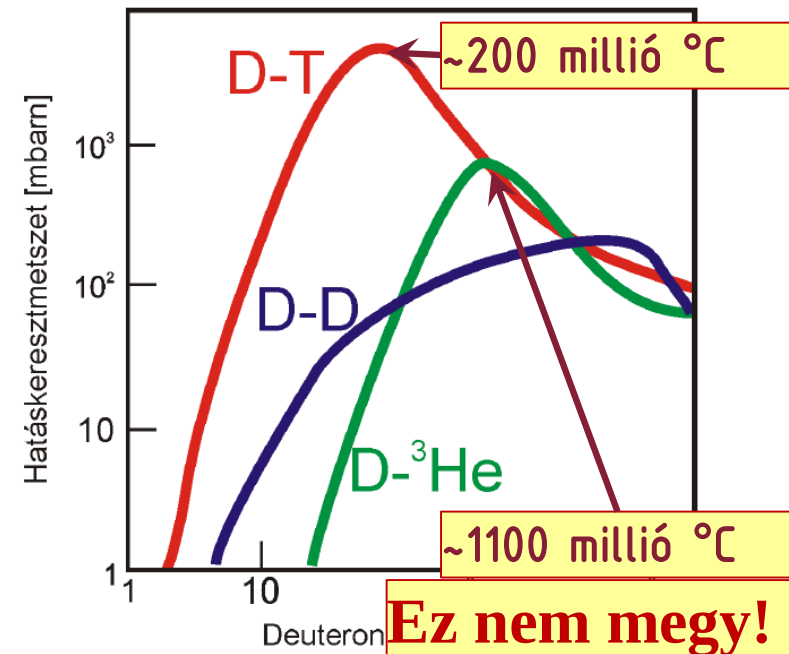
Fúziós reaktor üzemanyagciklusa



Deutérium és lítium bőven van a tengervízben.

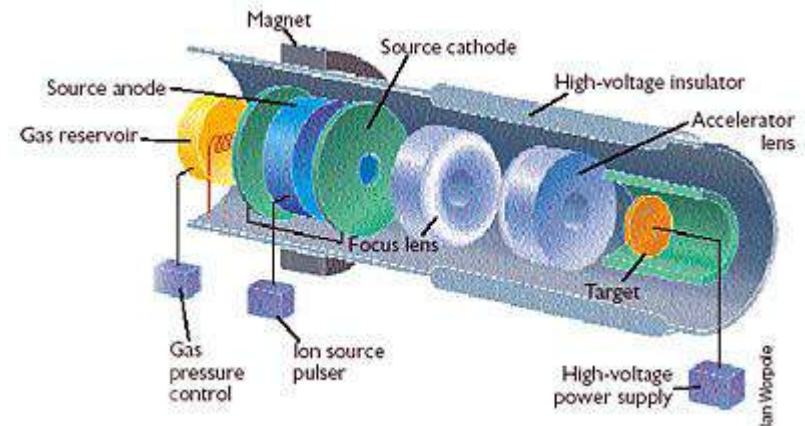
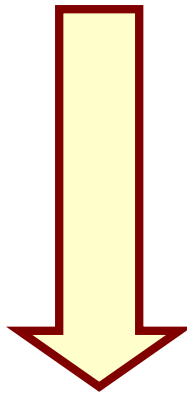
A radioaktív tríciumot meg kell termelni a köpenyben!

Az aktiválódást el kell kerülni és kezelni kell!



Lehet-e gyorsítóval energiát termelni?

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



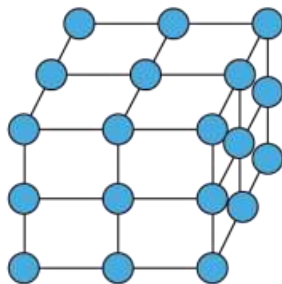
Fúziós energiát termelni csak termikus közegben lehet!

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

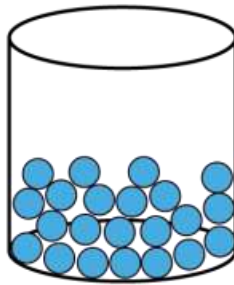
Mi a plazma?

Halmazállapotok

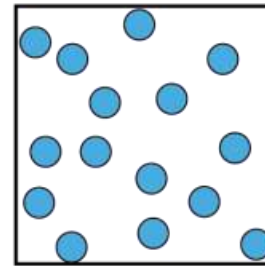
- = Atom
- + = Atommag
- = Elektron



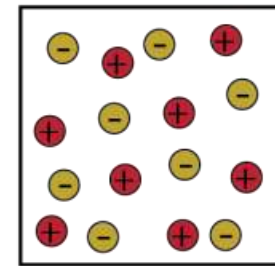
Szilárd



Folyékony



Légnemű



Plazma



Melegítés

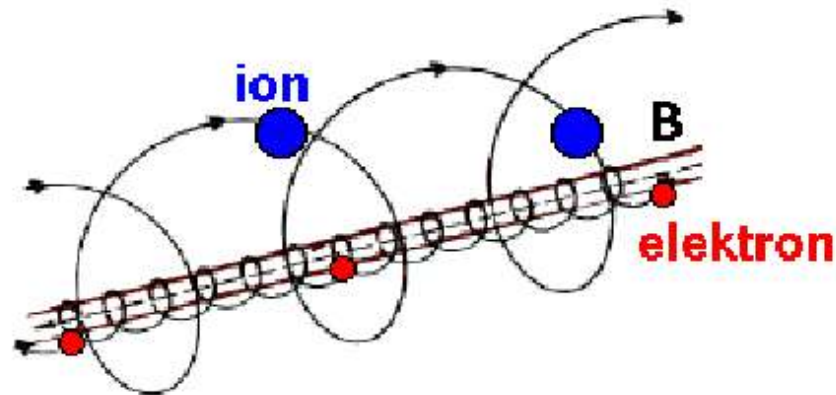
Az Univerzum látható anyagának többsége plazma halmazállapotban van, de a Földön kevés tapasztalatunk van vele!

Mágneses összetartás

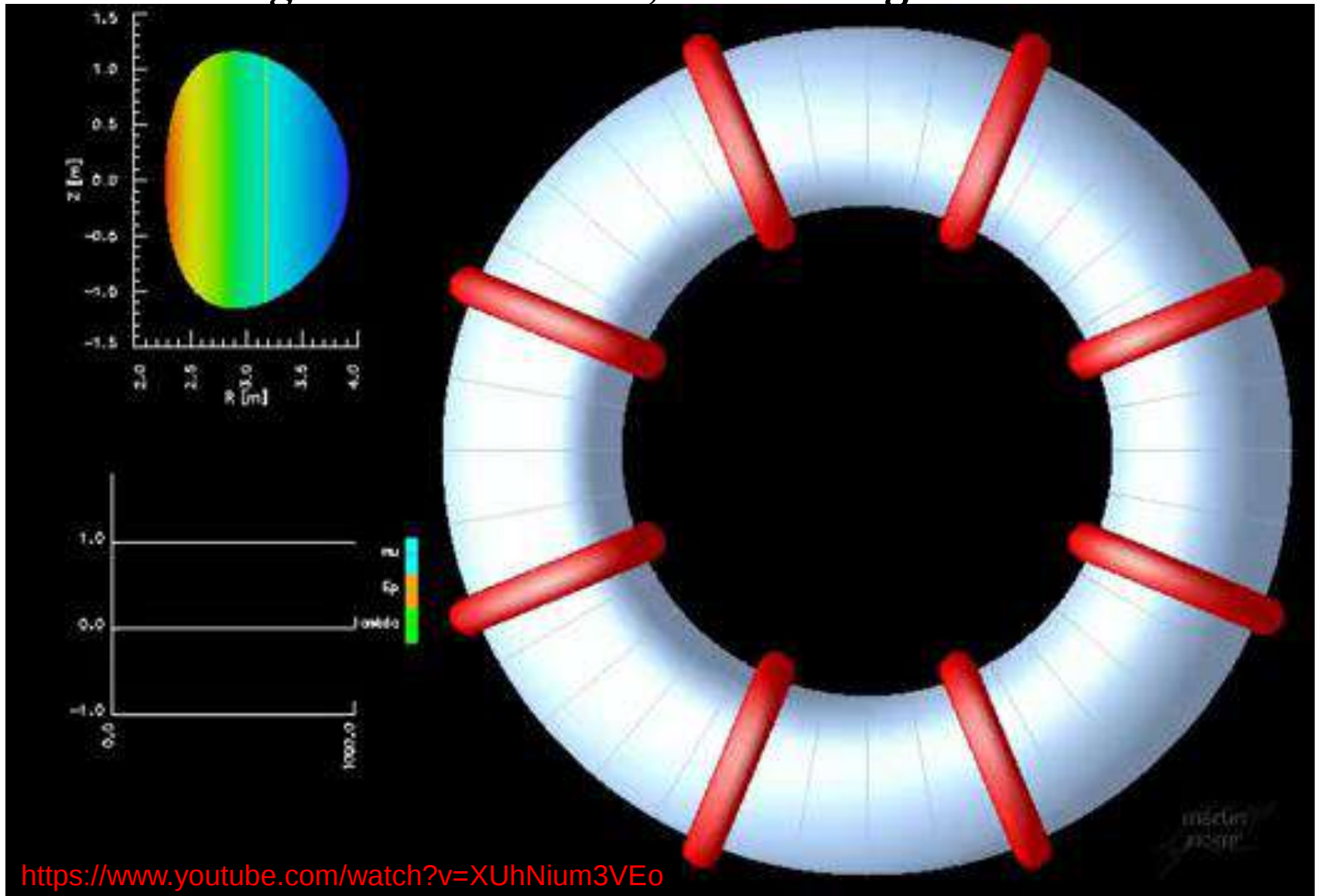
Forró, híg **plazmában** (ionok + elektronok) a részecskék szabad úthossza nagy (gyakorlatilag ütközésmentes rendszerről van szó).

A Lorentz erővel a mozgásegyenlet: $m\mathbf{a} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$

→ **spirál pálya a mágneses erővonal mentén.**

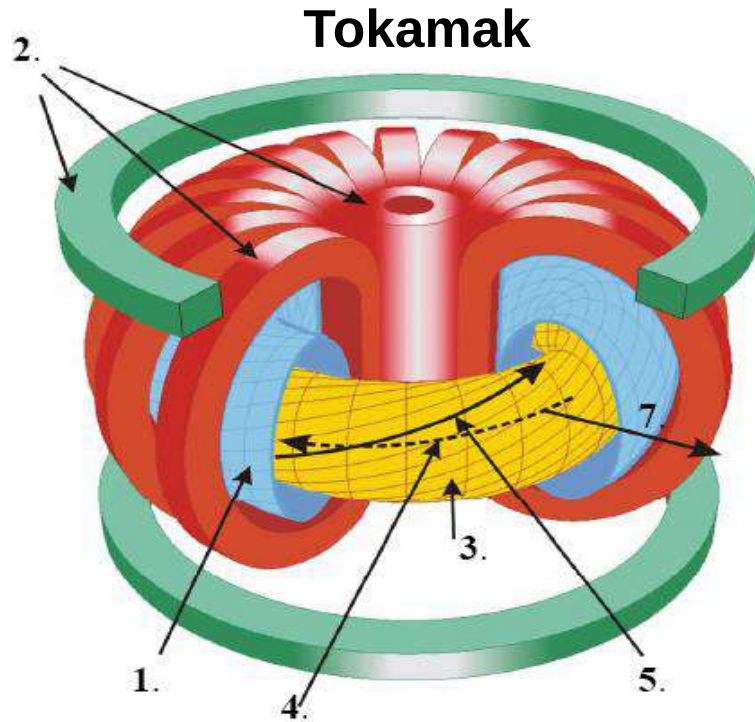


Mágneses összetartás, toroidális geometria

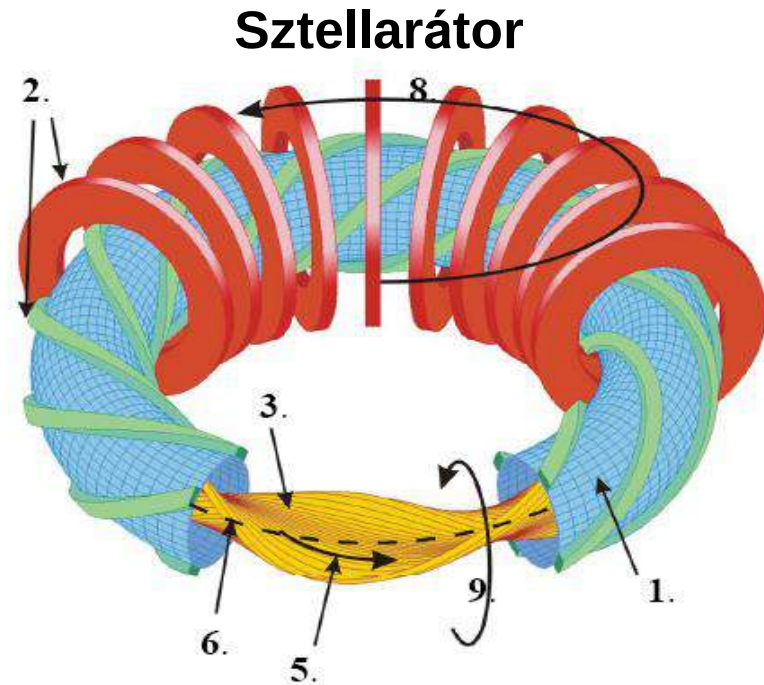


<https://www.youtube.com/watch?v=XUhNium3VEo>

Mágneses összetartás berendezéstípusai

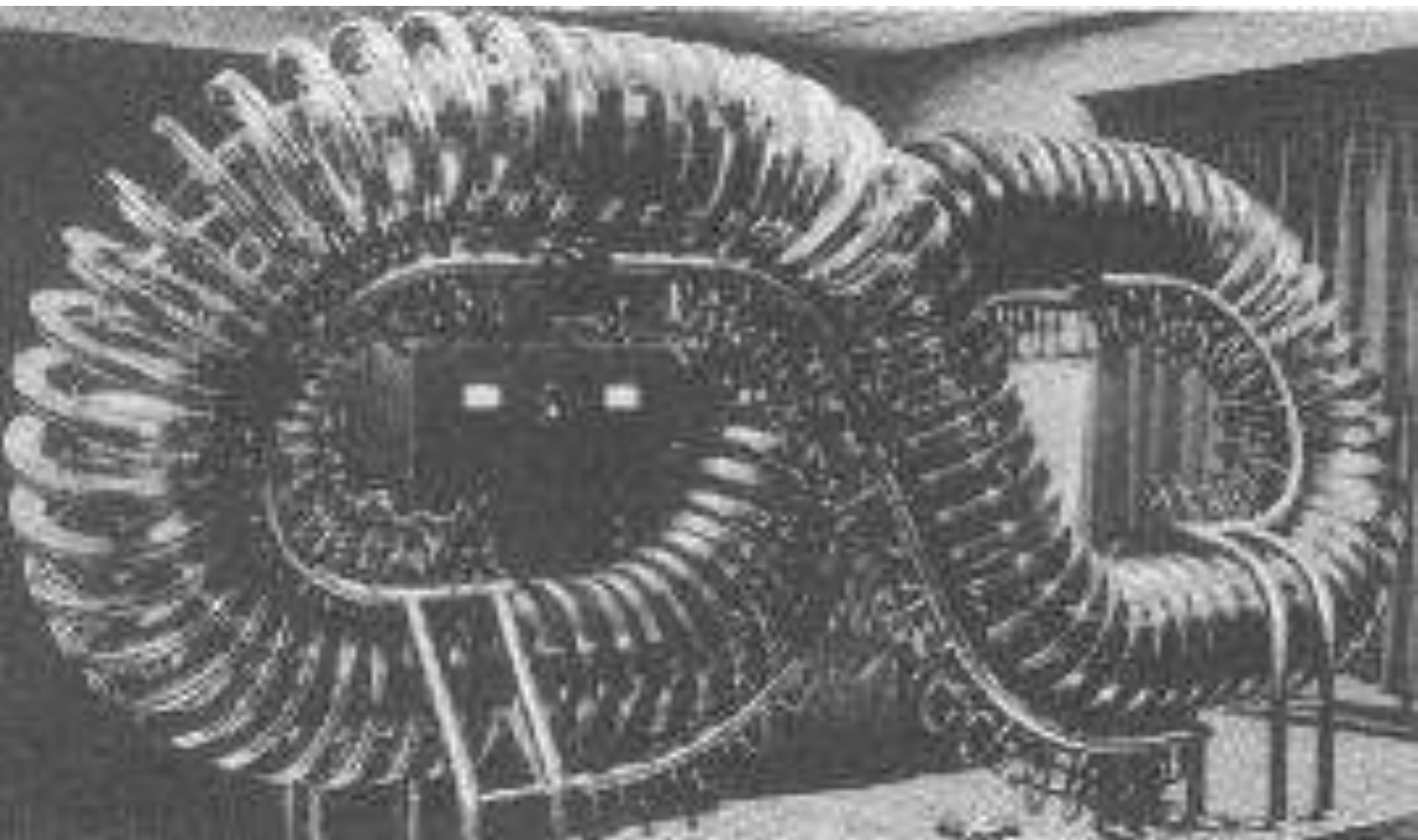


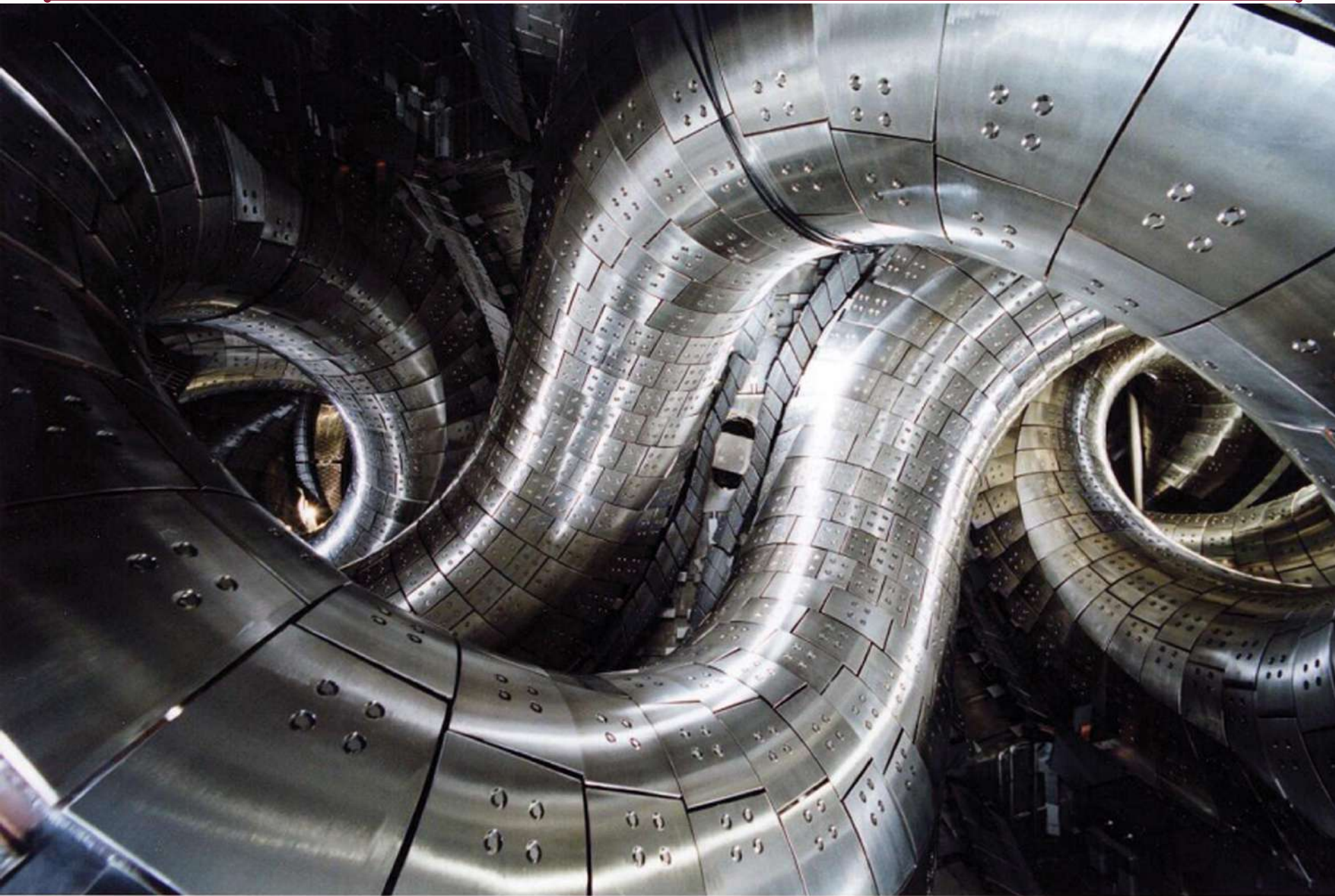
Toroidális plazmaáram

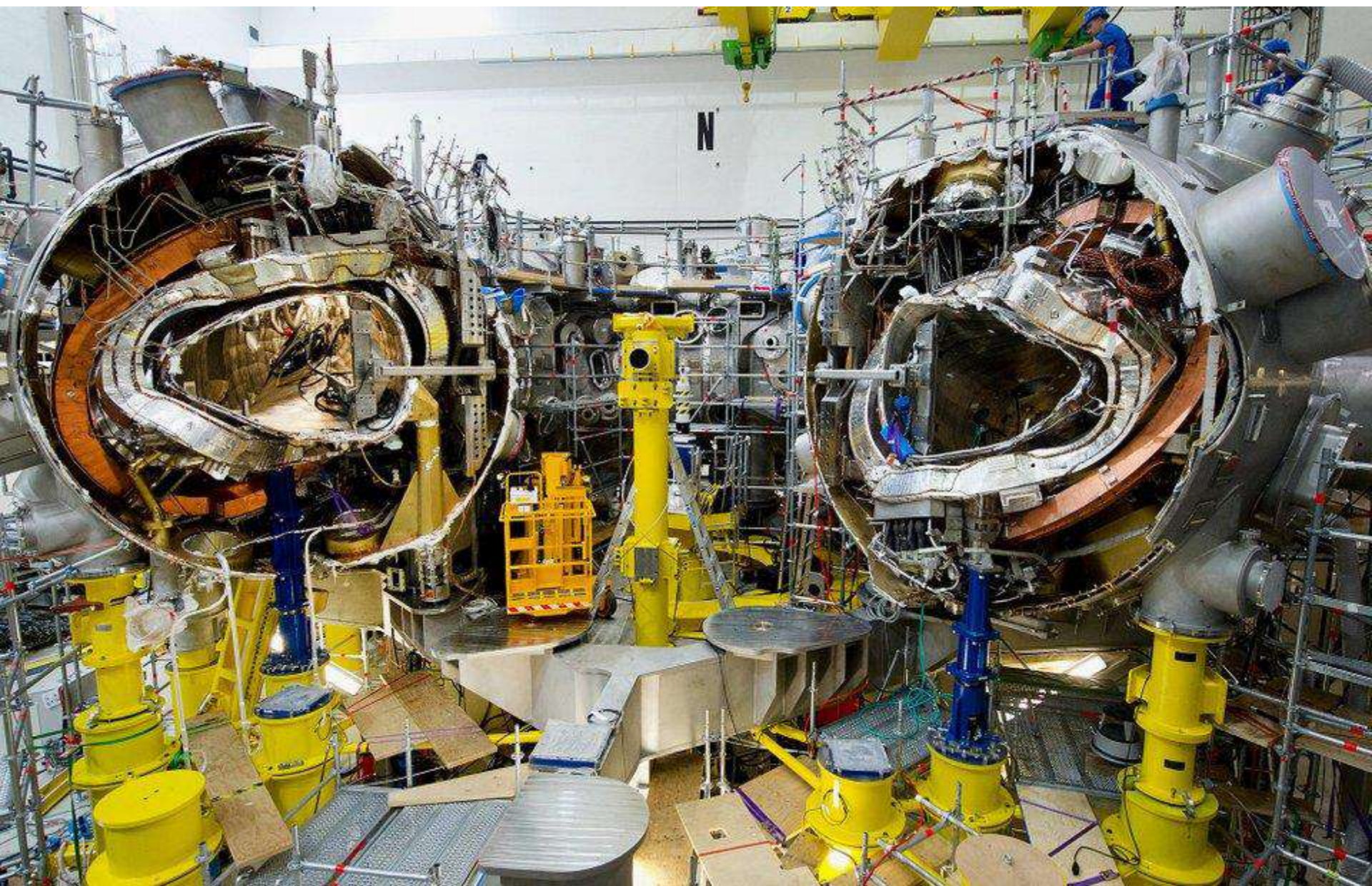


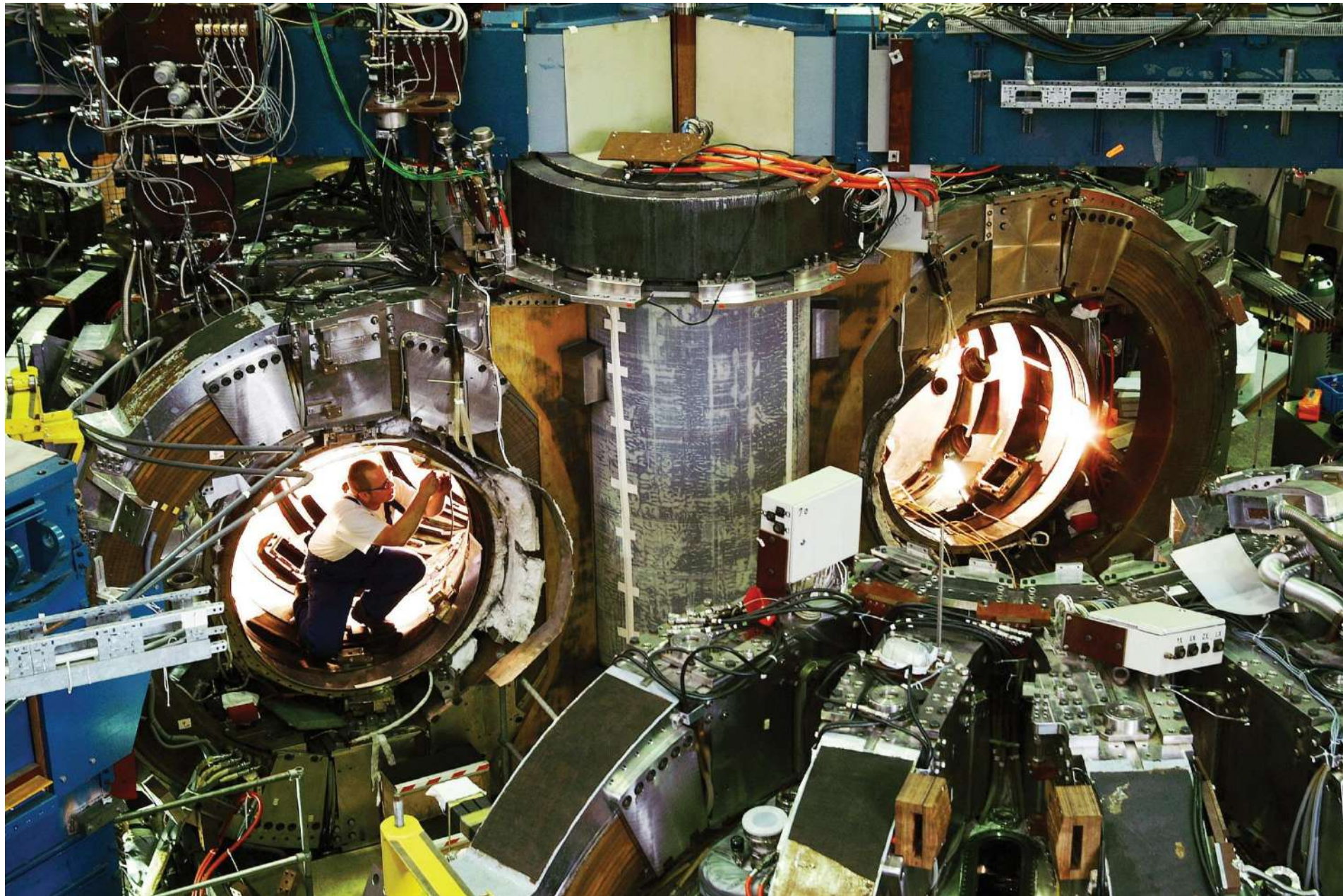
Helikális tekercsek

- (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, 2018. november 22.





LTCR 23:59:59:20

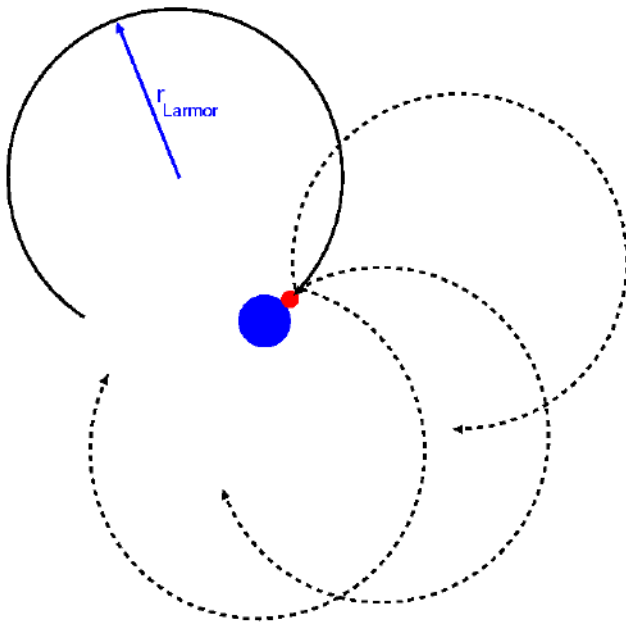


LTCR 23:59:59

A plazma mágneses összetartása működik!
A réz tekercsek több 100 MW-ot fogyasztanak és melegednek → szupravezető tekercsek kellenek!
A plazma maga is kelt mágneses teret, így erősen nemlineáris rendszert alkot → nem triviális szabályozni, és a stabil üzemmódok között lavírozni!

Transzport mágnesesen összetartott fúziós plazmákban (véges összetartás)

Bár a részecskék közötti ütközések ritkák (a szabad úthossz 10-1000 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

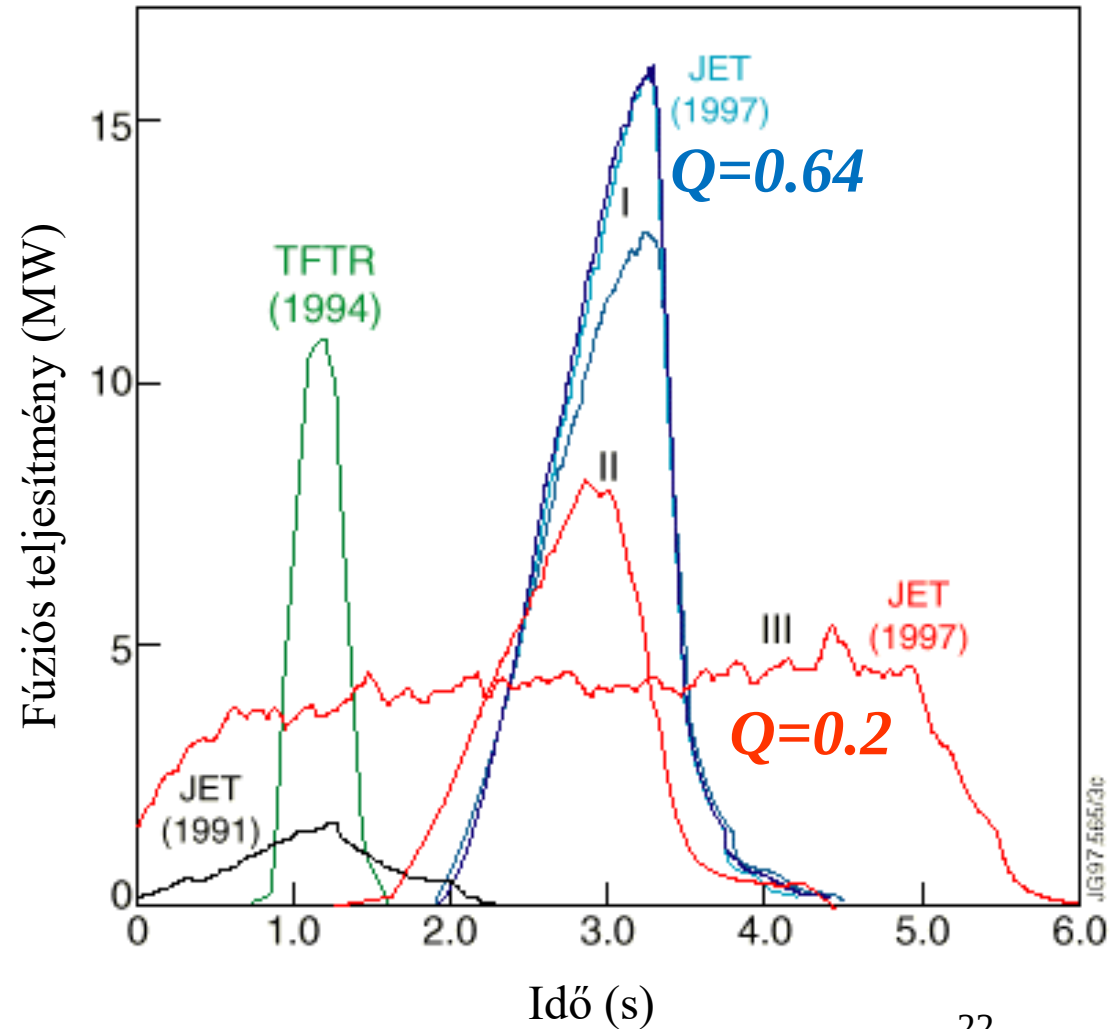
<https://fusion.gat.com/theory/Gyro>

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**.

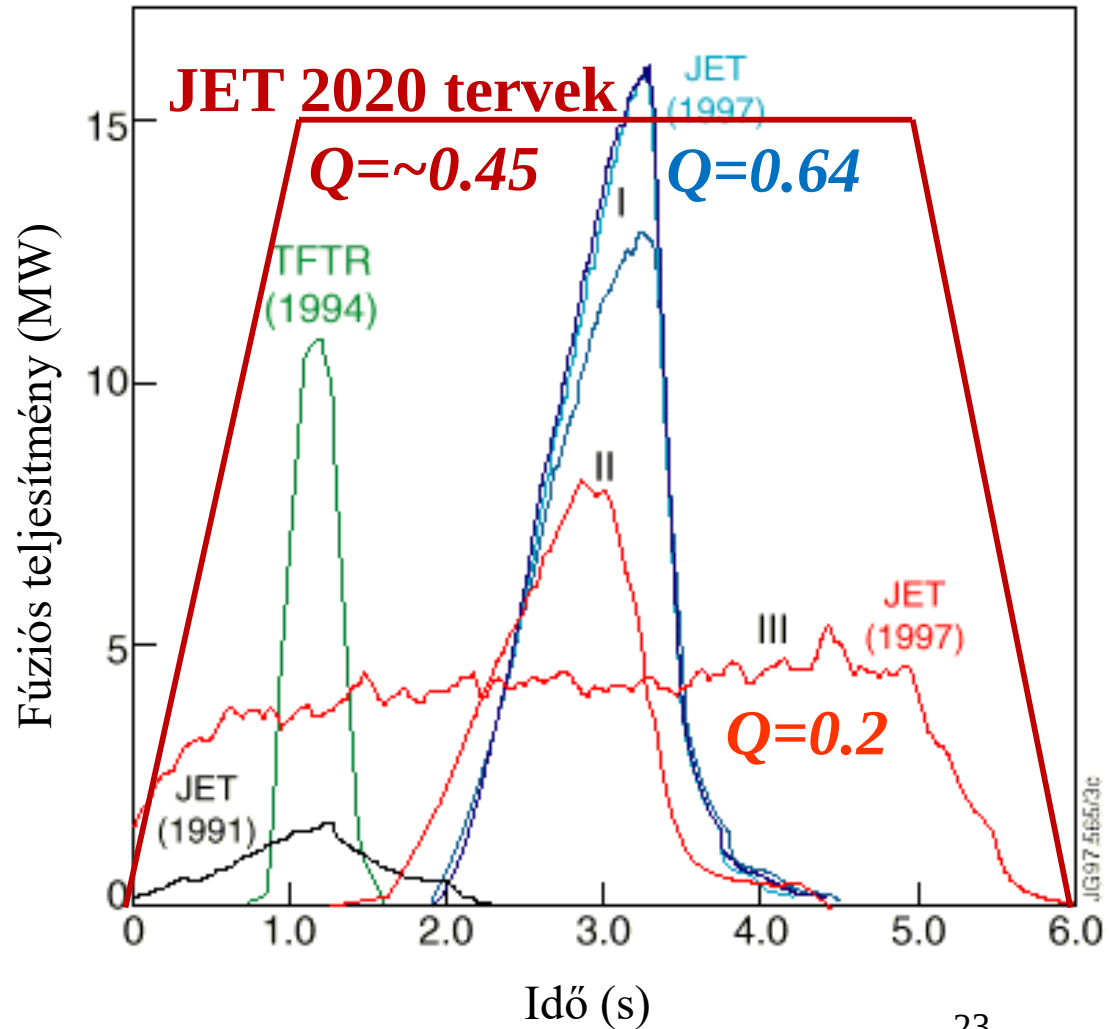


Fúziós reaktor energiamérlege

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

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

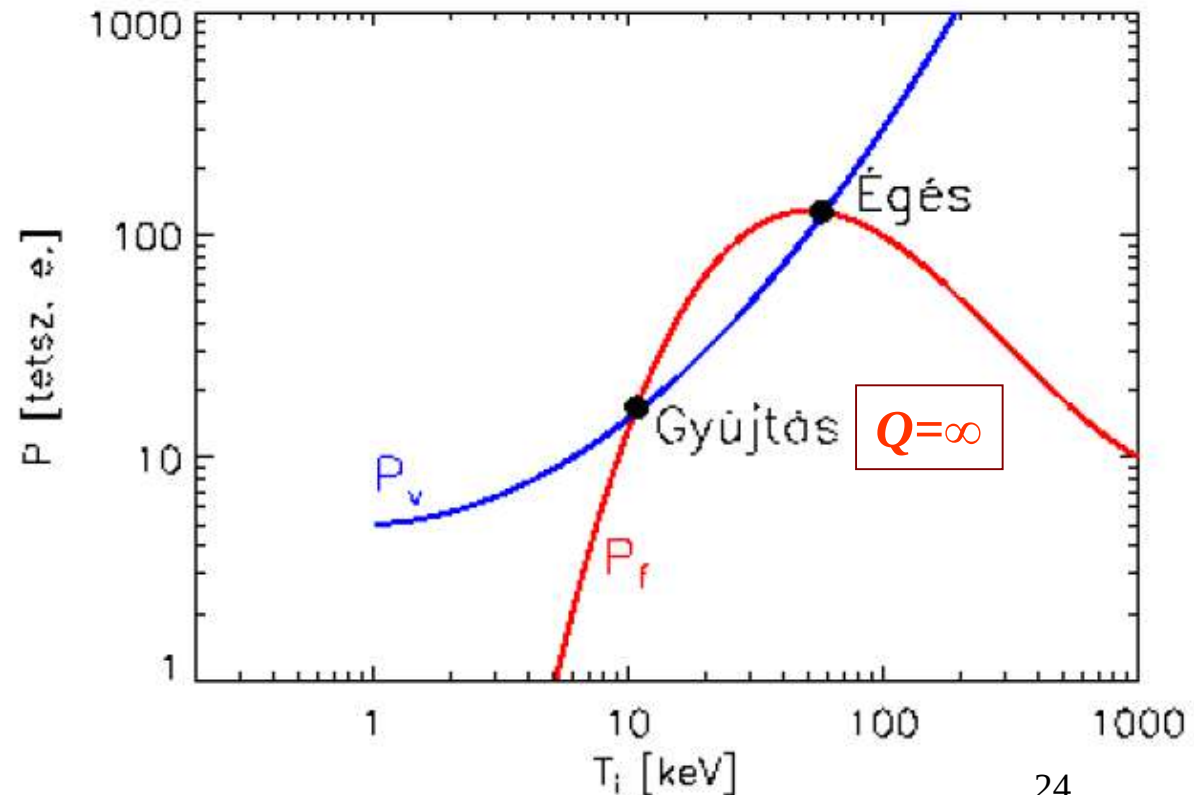
ahol P_h a **külső plazmafűtés** teljesítménye, P_f a **felszabaduló fúziós** teljesítmény.



Fúziós plazma energiamérlege

A fúziós reakcióban felszabaduló energia 20%-át az α -részecskék viszik el. Ha ezeket a plazma többi töltött részecskéjével együtt össze tudjuk tartani, akkor az **α -részecskék ütközések által fűtik a plazmát.**

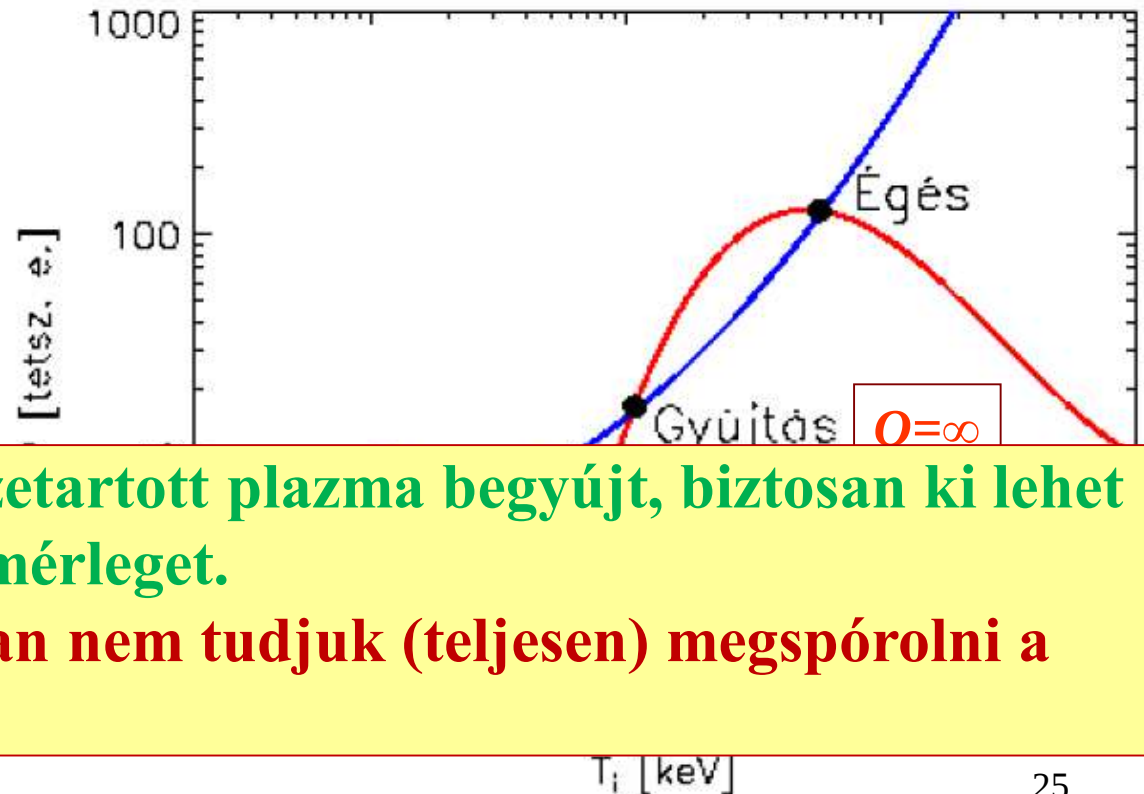
Ha jól szigeteljük a plazmánkat, az **begyűjthat.** Az **égési pontban a plazma stabil állapotban marad,** amíg a gázösszetételt és más körülményeket fenn tudjuk tartani.



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.

Amikor ez bekövetkezik, akkor a plazma **begyűjt**. Az **égési pontban a plazma stabil állapotban marad**, amíg a



Ha a mágnesesen összetartott plazma begyűjt, biztosan ki lehet hozni pozitív energiamérleget.

Impulzus üzemmódban nem tudjuk (teljesen) megspórolni a felfűtés költségét!

Európai fúziós kutatások

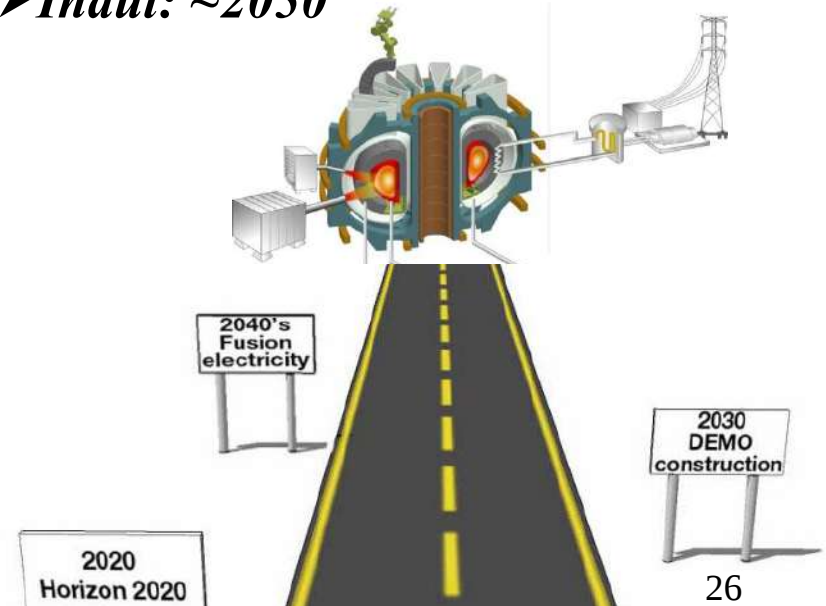
ITER tokamak

- Cadarache, Franciaország
- Világ méretű összefogásban
- Célja **10-szeres energiaszorzás**, reaktor technológiák tesztelése
- Indul: 2025. november 25. 12:00

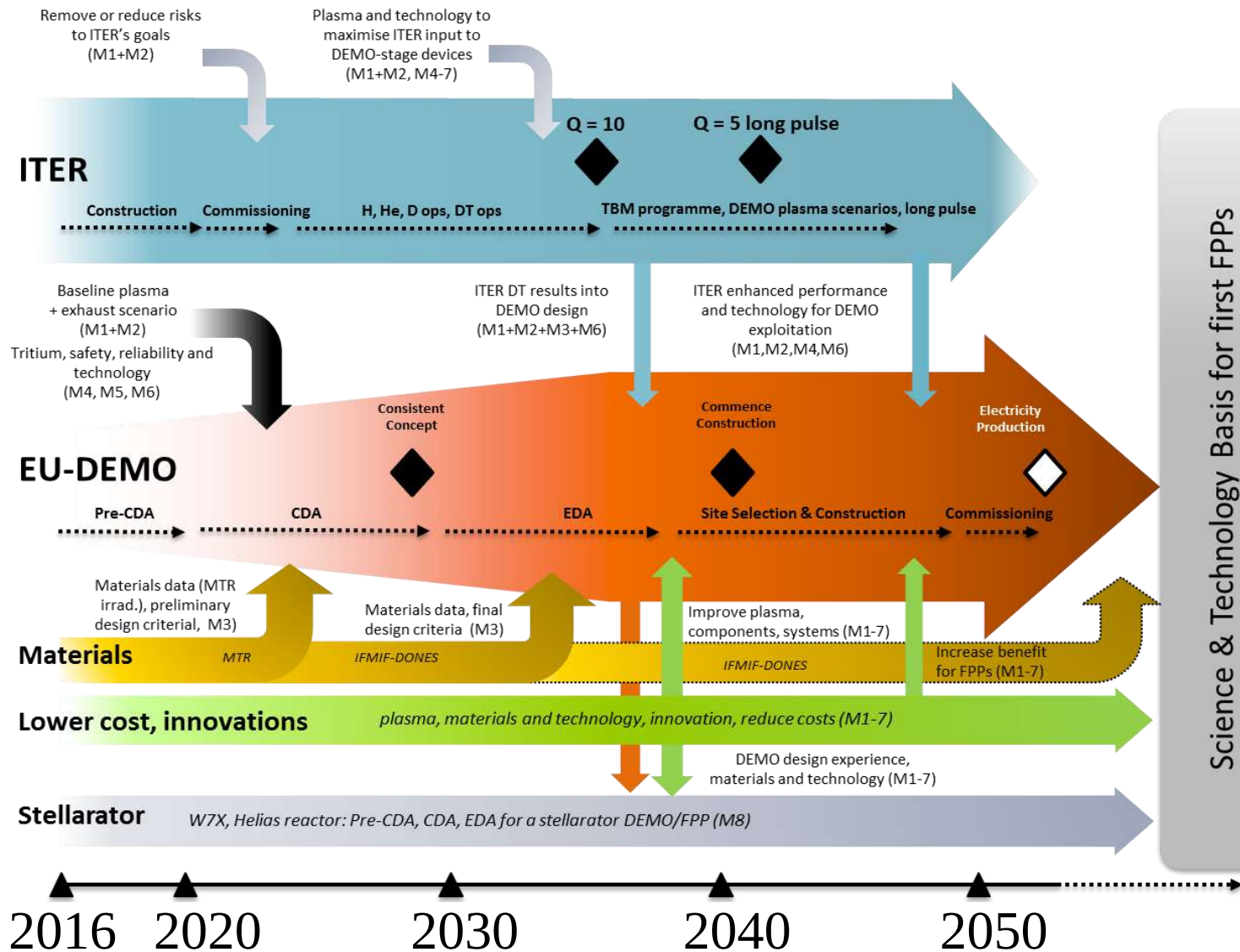


Európai A fúzió jövője, az ITER jelene

- Európai (EURATOM) program
- Célja 2050' körül ~100 MW **elektromos áramot hálózatra termelni** DEMO reaktorral
- Indul: ~2050'



Út a fúziós energiatermeléshez



1. Plazma üzemállapotok

Cél:

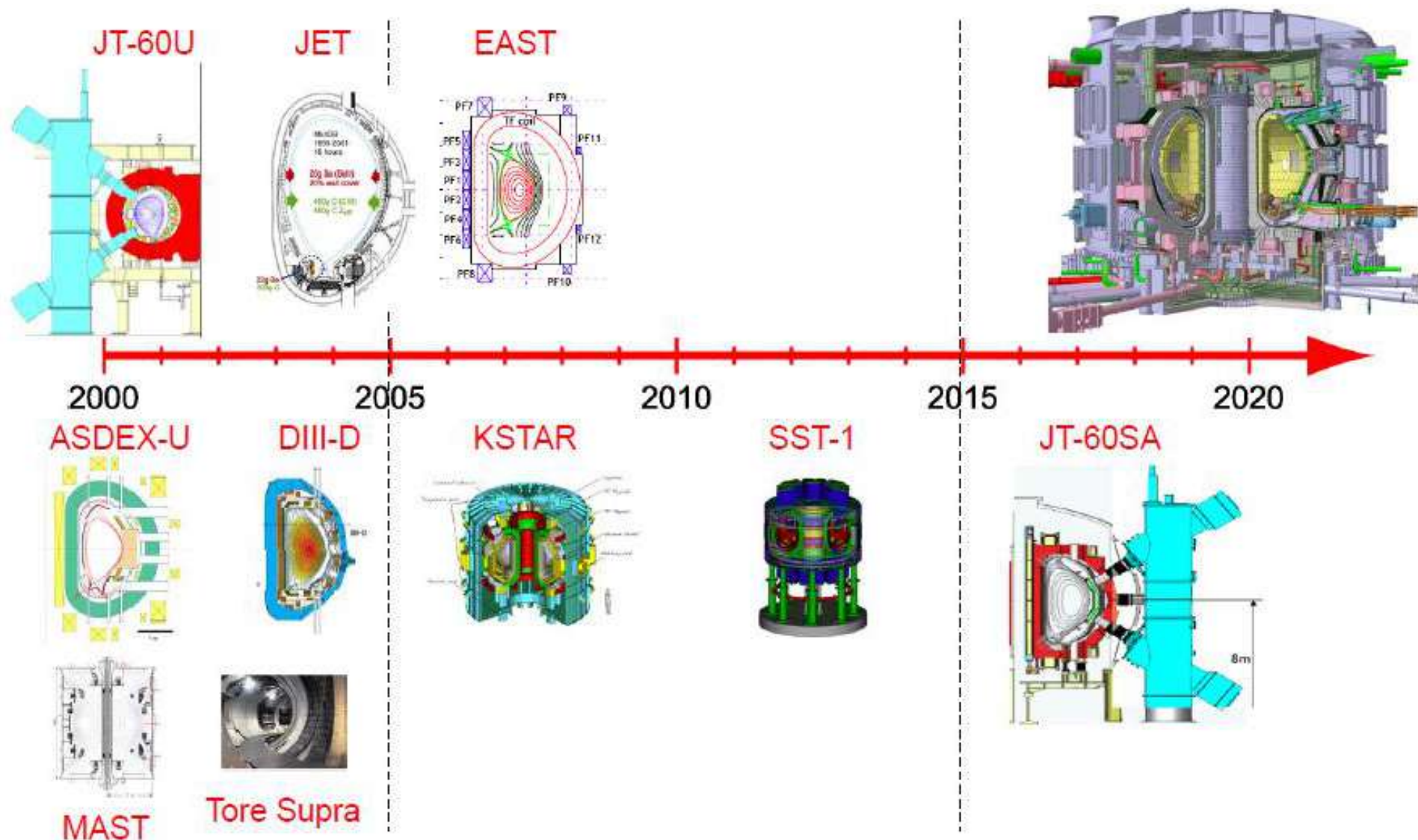
- Reaktor-kompatibilis plazma üzemállapotok kifejlesztése 
- Állandósult állapotú tokamak üzemmód (DEMO: több órás kisülések)
- Magas lesugárzott energiahányad, ugyanakkor jó összetartás

Eszközök:

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

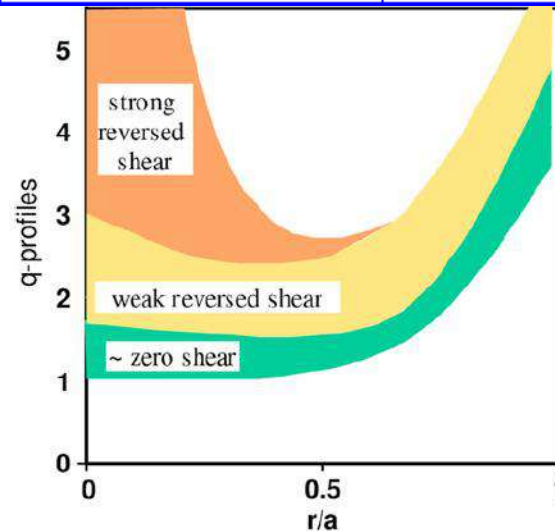


ITER és kísérő program



ITER szcenáriók

Parameter	Inductive Operation	Hybrid Operation	Non-inductive Operation
Plasma Current, I_p (MA)	15	13.8	9
Safety Factor, q_{95}	3.0	3.3	5.3
Confinement Time, τ_E (s)	3.4	2.7	3.1
Fusion Power, P_{fus} (MW)	500	400	360
Power Multiplication, Q	10	5.4	6
Burn time (s)	300 – 500	1000	3000



Alternatív plazma scenáriók

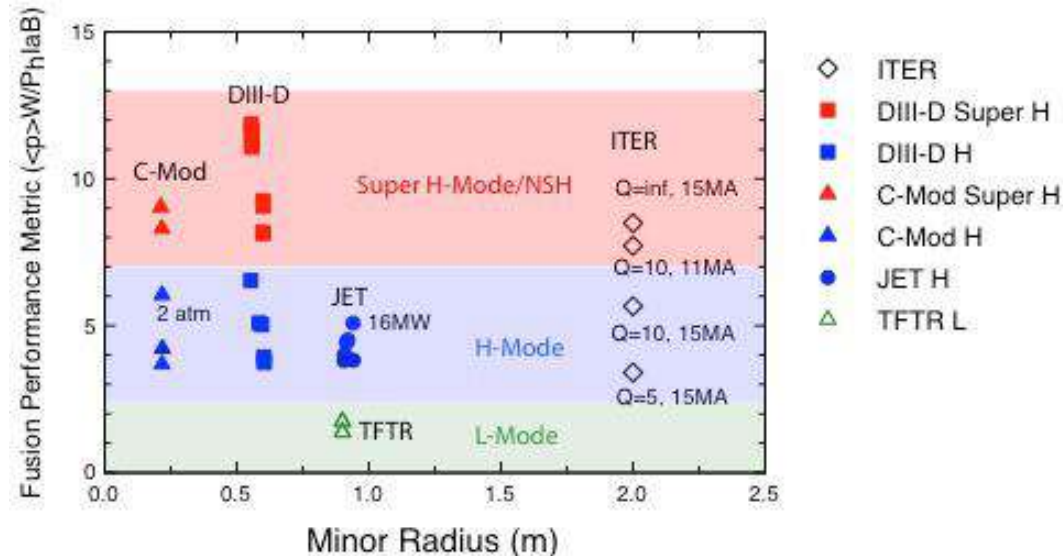
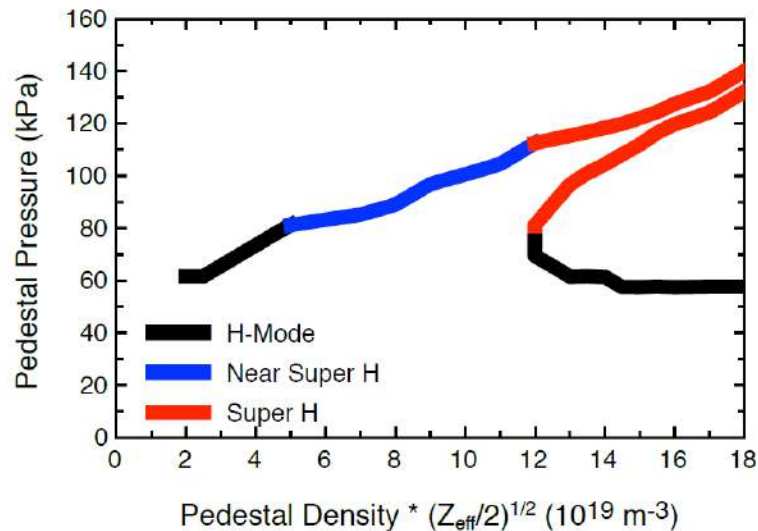
Vannak olyan üzemmódok, amiben:

1. Nincsenek ELM instabilitások, mégis jó az energiaösszetartás (QH-mód)
2. Nincsenek ELM instabilitások, mert L-módban van a plazma (RT L-mód)
3. A részecske összetartás nem jó, csak az energiaösszetartás (I-mód)

és van a

4. Szuper H-mód is!

EPED Predicted Pedestal Height vs Density for ITER Baseline



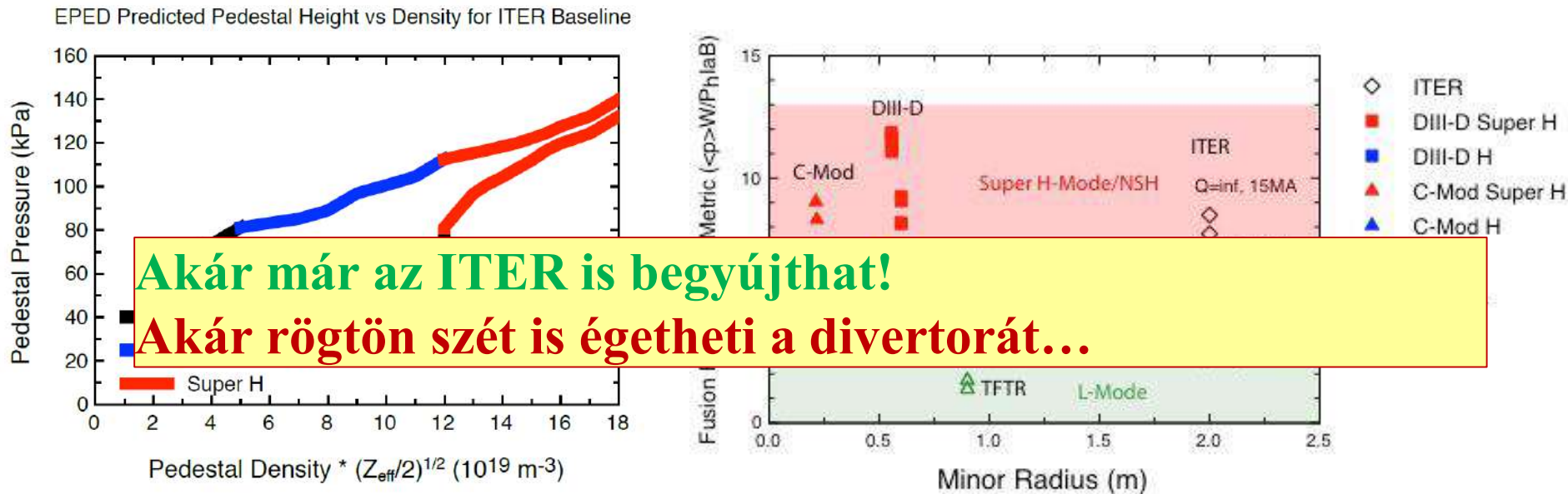
Alternatív plazma scenáriók

Vannak olyan üzemmódok, amiben:

1. Nincsenek ELM instabilitások, mégis jó az energiaösszetartás (QH-mód)
2. Nincsenek ELM instabilitások, mert L-módban van a plazma (RT L-mód)
3. A részecske összetartás nem jó, csak az energiaösszetartás (I-mód)

és van a

4. Szuper H-mód is!



2. Hőelvezető rendszerek

Cél:

- Divertor hőterhelés kezelése

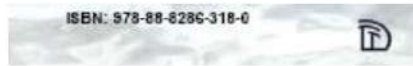
Eszközök:

- 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!)



<https://www.youtube.com/watch?v=2Gn0wtieMWo>

Divetror test Tokamak



<http://fsn-fusphy.frascati.enea.it/DTT>

July 2015

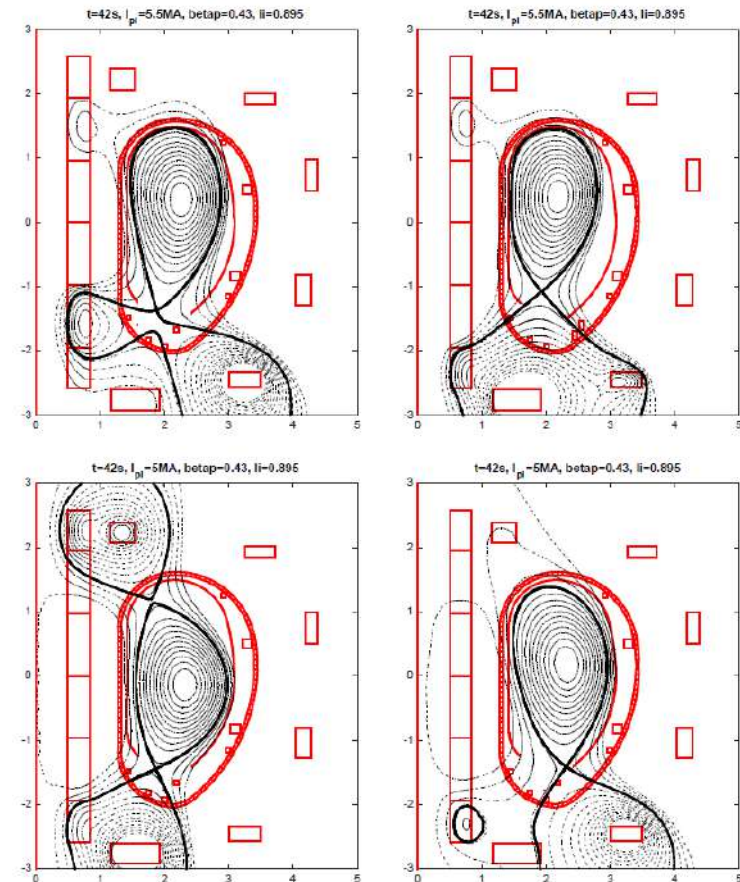
What is and what is not the DTT facility proposal?

- DTT is not a series of experiments capable to face single specific issues: these could give useful indications but cannot be extrapolated to a reactor automatically.
- DTT is a flexible test bed capable to tackle plasma exhaust issues in a fairly integrated fashion, according to EU Fusion Roadmap Mission:

Since the extrapolation from proof-of-principle devices to ITER/DEMO based on modelling alone is considered too large, a dedicated test on specifically upgraded existing facilities or on a dedicated Divertor Tokamak Test (DTT) facility will be necessary

from "Fusion Electricity – A roadmap to the realisation of fusion energy", November 2012
(http://users.euro-fusion.org/iterphysicswiki/images/9/9b/EFDA_Fusion_Roadmap_2M8JBG_v1_0.pdf)

R. Albanese et al., 15.3 - Design and definition of a Divertor Tokamak Test facility, 29th SOFT, Prague, 9 Sept. 2016 | PAGE 5



R. Albanese, SOFT2016

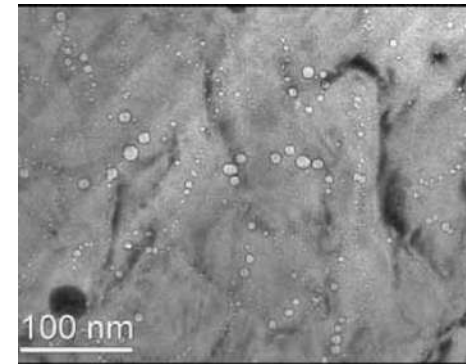
3. Neutronsugárzásnak ellenálló anyagok

Cél:

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

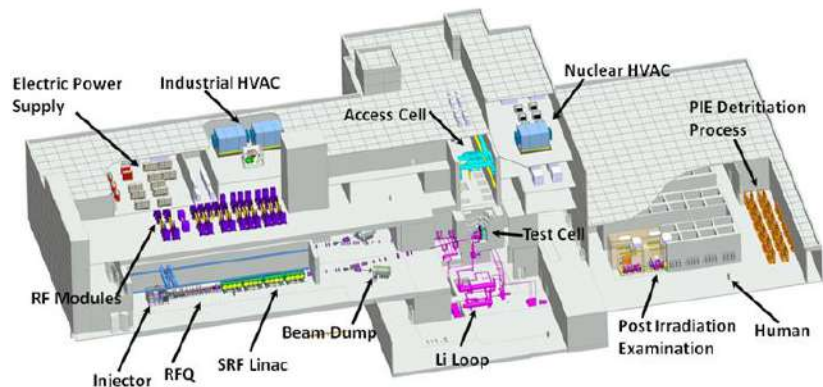
Eszközök:

- 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>



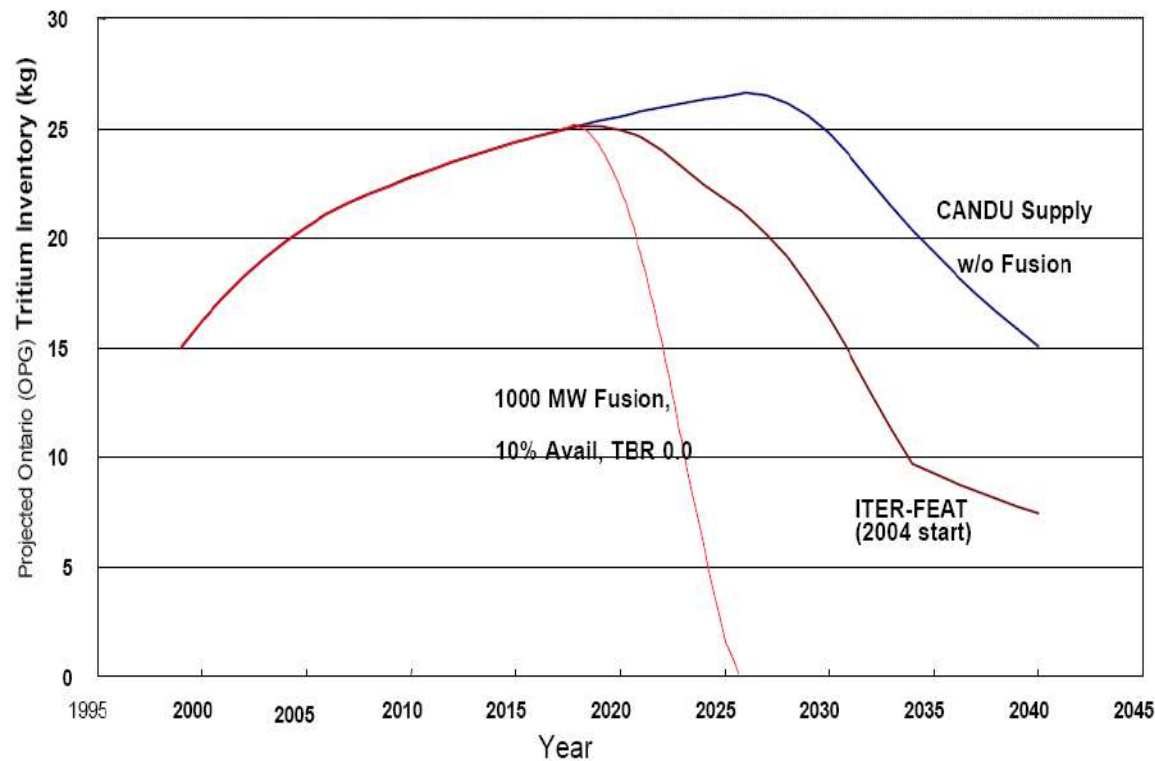
4. Trícium önellátás

Cél:

- Egy fúziós erőműben a fúziós neutront felhasználva a köpenyben meg kell termelni az elégetett trícium mennyiségét.

Eszközök:

- ITER:
teszt köpeny modulok (TBM) – alapvető technológia teszt
- DEMO:
teljes tríciumtermelő köpeny – nagy modulok karbantartásra optimalizálva



Tríciumszaporítás tesztelése az ITER-en

Port cella:

- Trícium kivonó rendszer
- He hűtőkör
- LiPb kör

szállítórendszer

rugalmas
csőrendszer

pajzs

2 TBM

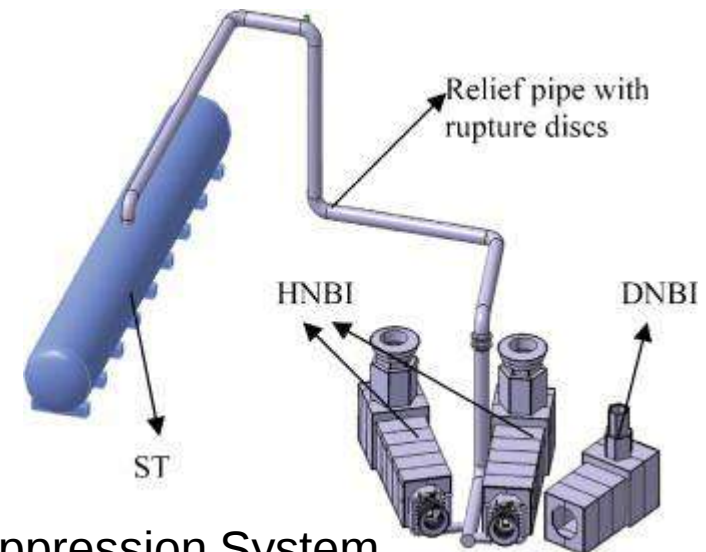
5. Inherens biztonság

Cél:

- A fizikai folyamatok elég biztonságosak...
- Passzív biztonsági filozófia érvényesítése a kezdetektől

Eszközök:

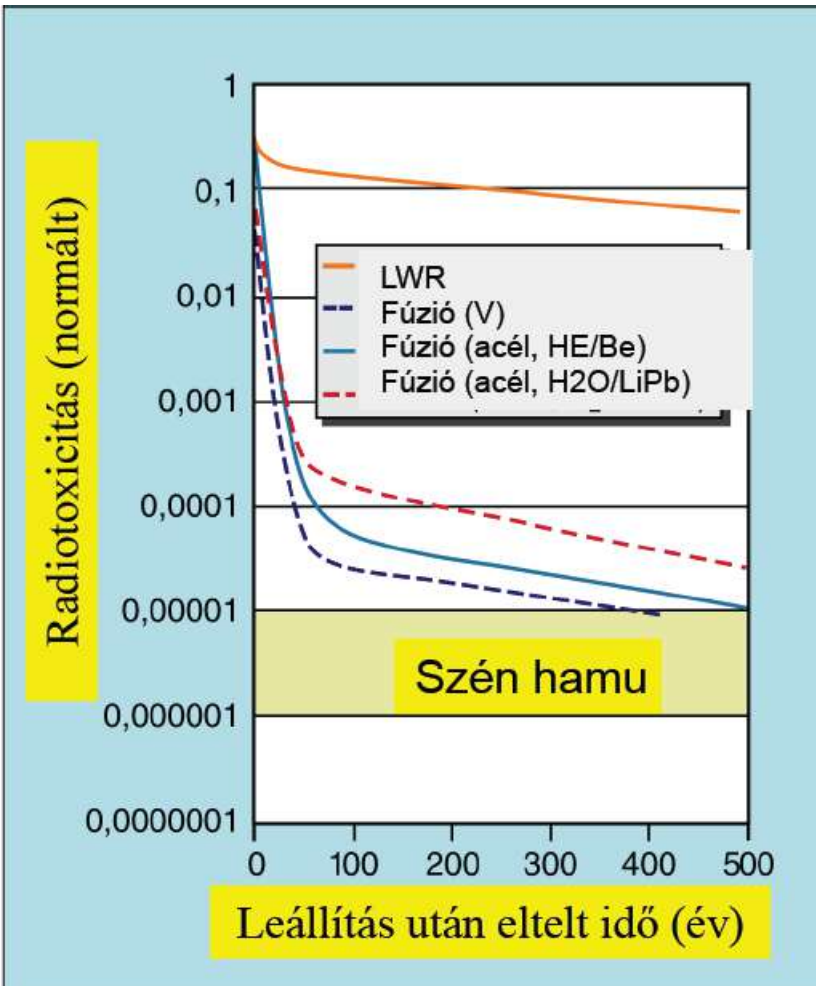
- **ITER nukleáris engedélyeztetése kapcsán már bizonyítani kellett az inherens biztonság meglétét.**
- Kevés anyag a reakciótérben
- Hiba esetén azonnal leáll
- Vákuumkamra az elsődleges mérnöki gát
- Mélységi védelem
- **Trícium-kezelésben kell fejlődni!**



ITER Vacuum Vessel Pressure Suppression System

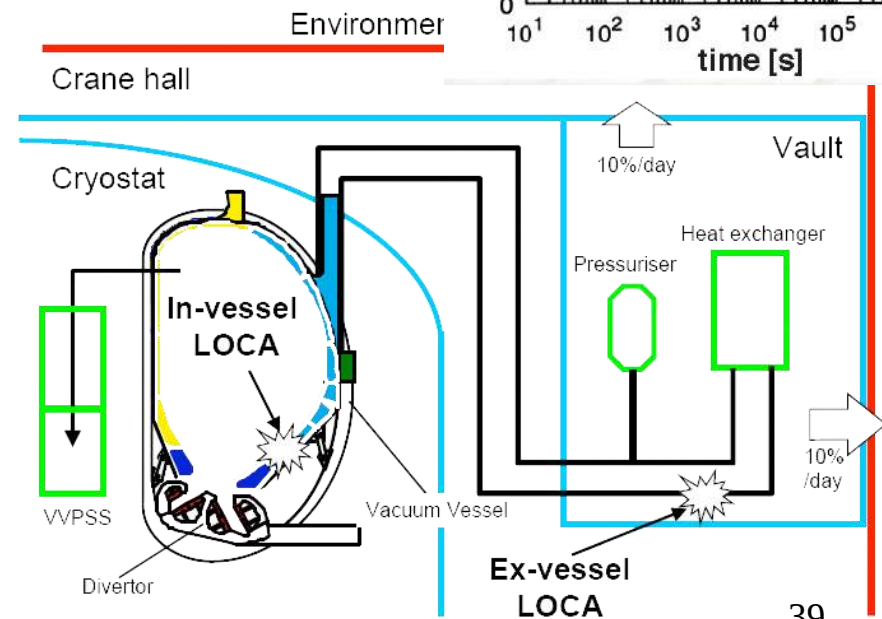
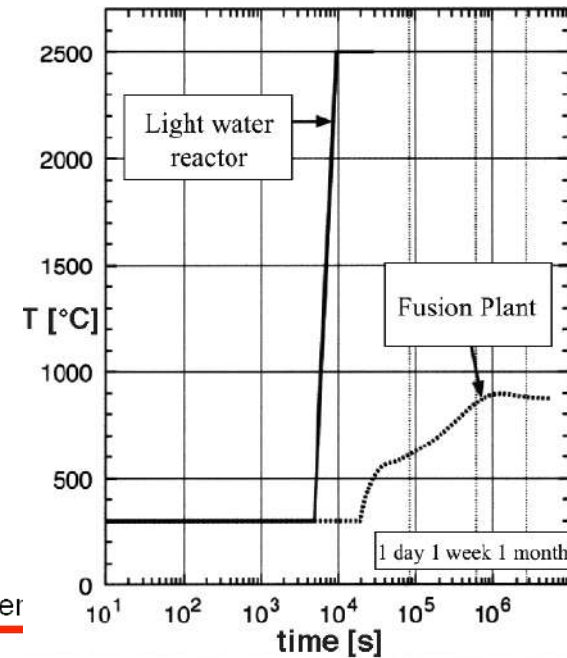
Hulladékok, balesetek

Az aktiváció megfelelő szerkezeti anyagokkal kordában tartható.



A remanens hő nem okoz problémát LOCA esetén sem.

A kiszabaduló T nem eredményezhet kitelepítést.



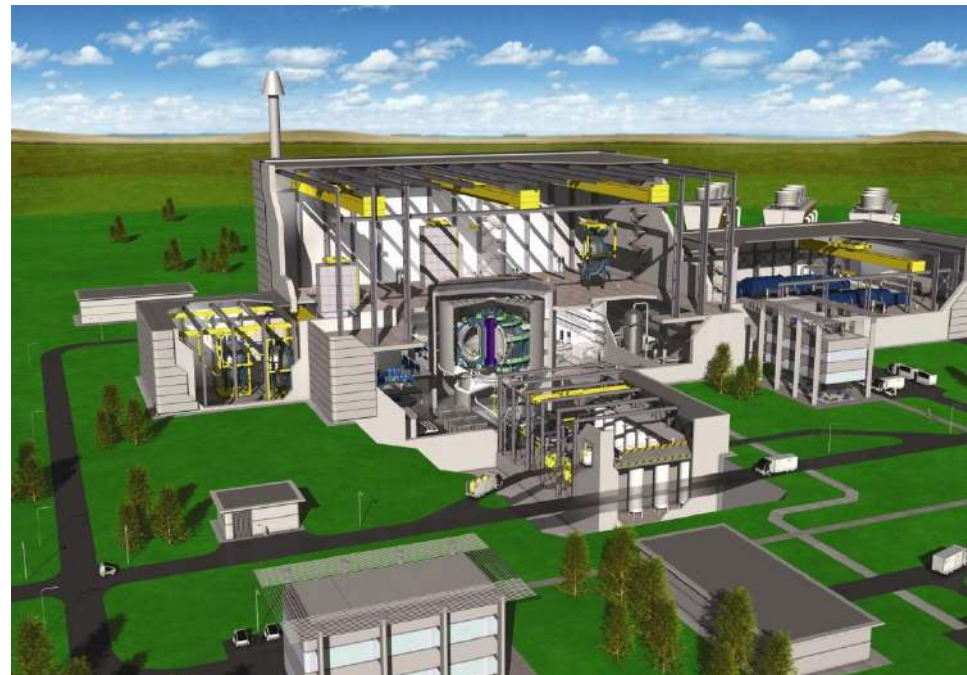
6. DEMO tervezése

Cél:

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

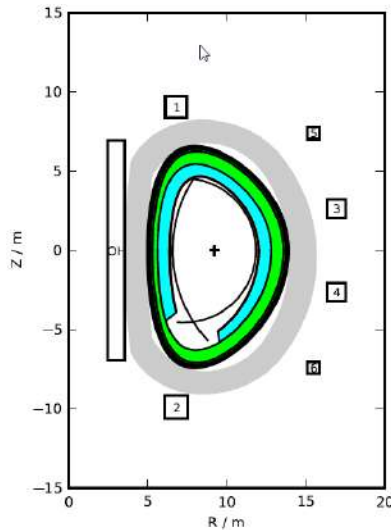
Eszközök:

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



Európai DEMO tervek

Pulsed
(Early)



$$R = 9.25\text{m}$$

$$B = 6.7\text{T}$$

$$P_{\text{AUX}} = 50\text{MW}$$

$$P_{\text{F}} = 2.0\text{GW}$$

$$\beta_{\text{N}} = 2.5$$

$$a = 2.64\text{m}$$

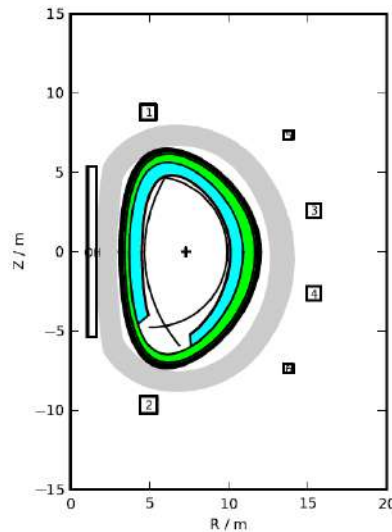
$$I = 18.3\text{MA}$$

$$H_{98\text{Y}2} = 1.1$$

$$P_{\text{th}} = 2.4\text{GW}$$

$$n/n_{\text{G}} = 1.2$$

Steady State
(Advanced)



$$R = 7.33\text{m}$$

$$B = 5.7\text{T}$$

$$P_{\text{AUX}} = 157\text{MW}$$

$$P_{\text{F}} = 2.1\text{GW}$$

$$\beta_{\text{N}} = 3.5$$

$$a = 2.62\text{m}$$

$$I = 18.6\text{MA}$$

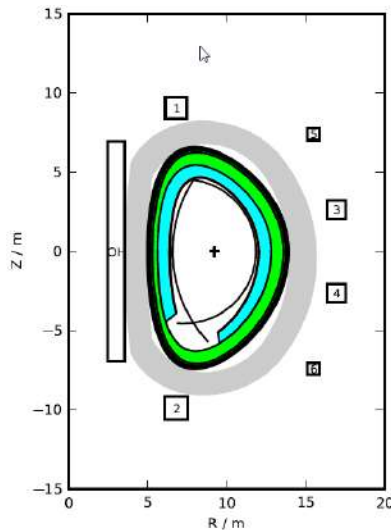
$$H_{98\text{Y}2} = 1.24$$

$$P_{\text{th}} = 2.7\text{GW}$$

$$n/n_{\text{G}} = 1.2$$

Európai DEMO tervek

Pulsed
(Early)



$$R = 9.25\text{m}$$

$$B = 6.7\text{T}$$

$$P_{\text{AUX}} = 50\text{MW}$$

$$P_{\text{F}} = 2.0\text{GW}$$

$$\beta_{\text{N}} = 2.5$$

$$a = 2.64\text{m}$$

$$I = 18.3\text{MA}$$

$$H_{98\text{Y}2} = 1.1$$

$$P_{\text{th}} = 2.4\text{GW}$$

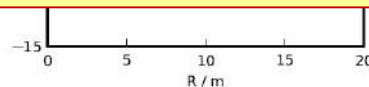
$$n/n_{\text{G}} = 1.2$$

Talán nem is kell folytonos működés?

Szabályozó funkcióban rövidebb működés is elég lehet (sok óra).

Megfelelően méretezett szekunder körben lehetne hőt tárolni az újraindítás idejére (pár 10 perc).

A technológiának és az anyagoknak is tolerálni kell a tranzienseket!



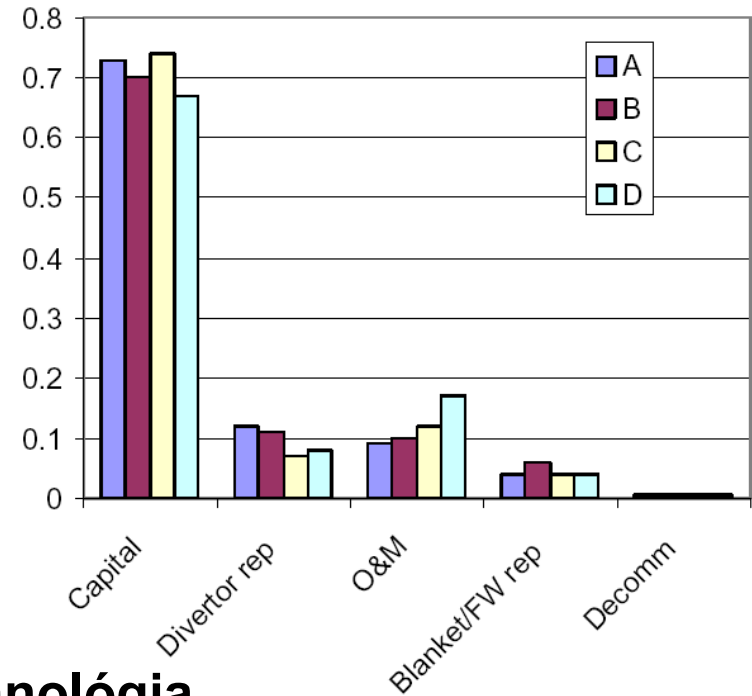
7. Költséghatékony technológiák

Cél:

- Előzetes számítások szerint nem reménytelenül drága.
- A beruházási költsége magas, a külső költsége alacsony
- Energiaár versenyképességét javító technológiák.

Eszközök:

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



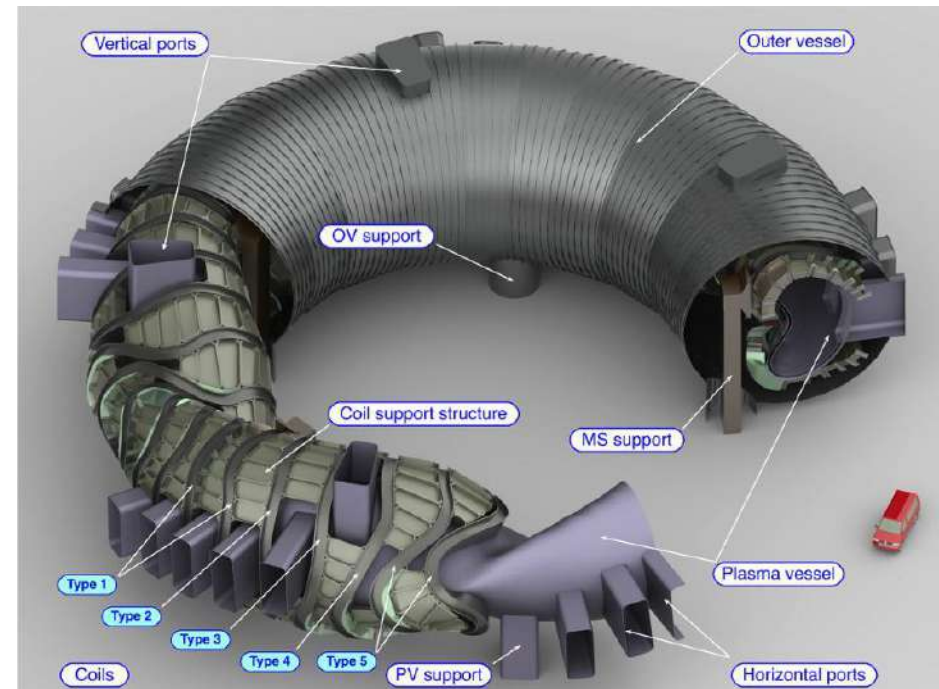
8. Sztellarátorok

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
- **Egyelőre szép eredmények!**



Európai fúziós kutatások

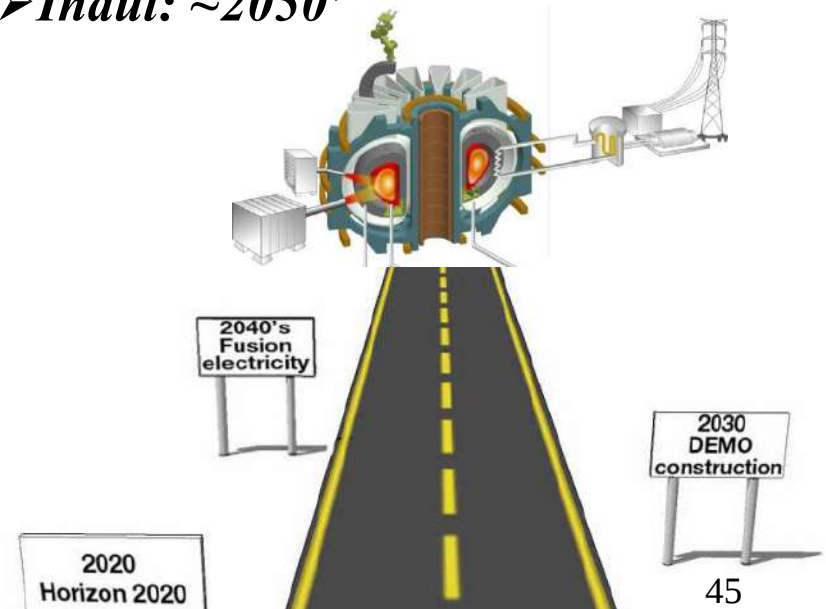
ITER tokamak

- Cadarache, Franciaország
- Világméretű összefogásban
- Célja **10-szeres energiaszorzás**, reaktor technológiák tesztelése
- Indul: 2025. november 25. 12:00



Európai A fúzió jövője, az ITER jelene

- Európai (EURATOM) program
- Célja 2050' körül ~100 MW **elektromos áramot hálózatra termelni** DEMO reaktorral
- Indul: ~2050'



ITER ütemterv

1985: Politikai szándék

2006: ITER szerződés

2008: Földmunkák

2010: Tokamak komplexum alapítás

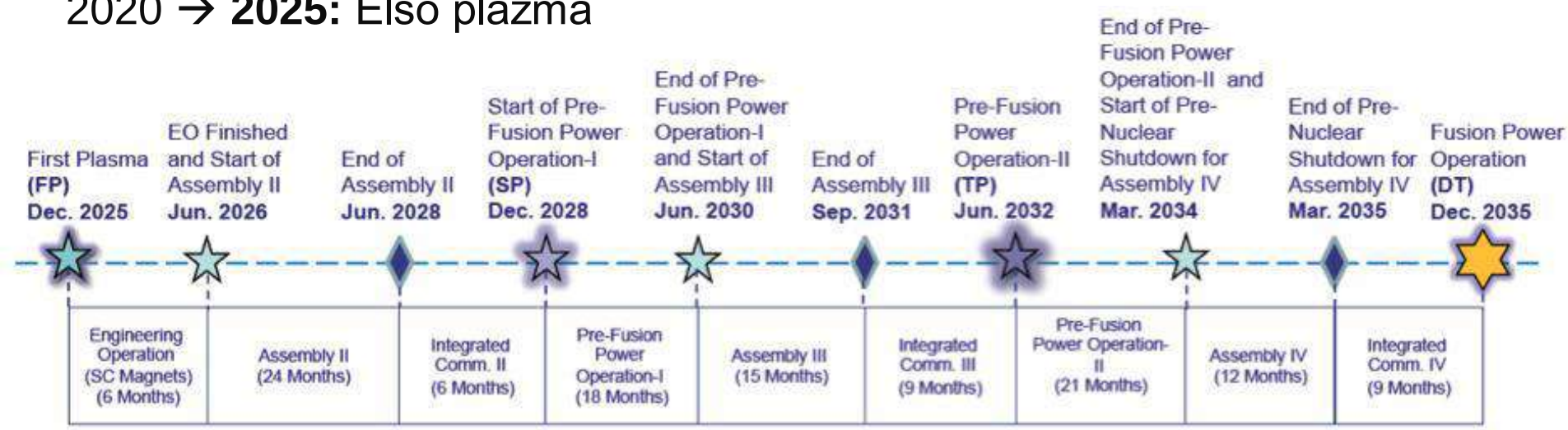
2013: Tokamak komplexum alapozás

2014: Első alkatrészek érkezése

2016 → 2021: Tokamak komplexum befejezése

2020 → 2025: Első plazma

ITER Domestic Agencies



TF Coils – A Worldwide Collaboration



ITER 2018

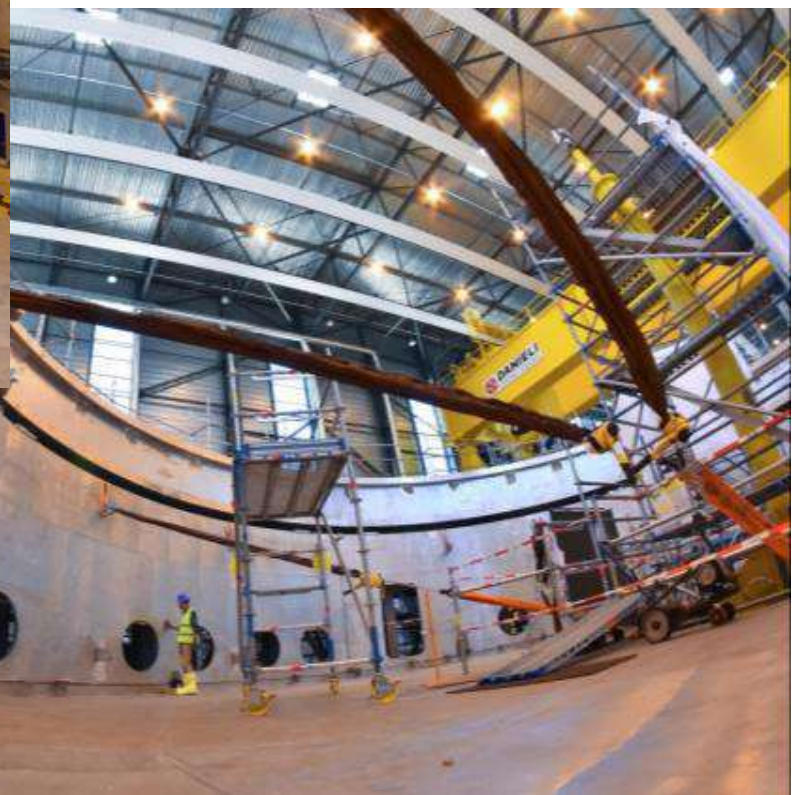


ITER 2018 – vákuumkamra



© Bigot, IAEA FEC 2018

ITER 2018 – kriosztát



ITER 2018 – hűtőgépek



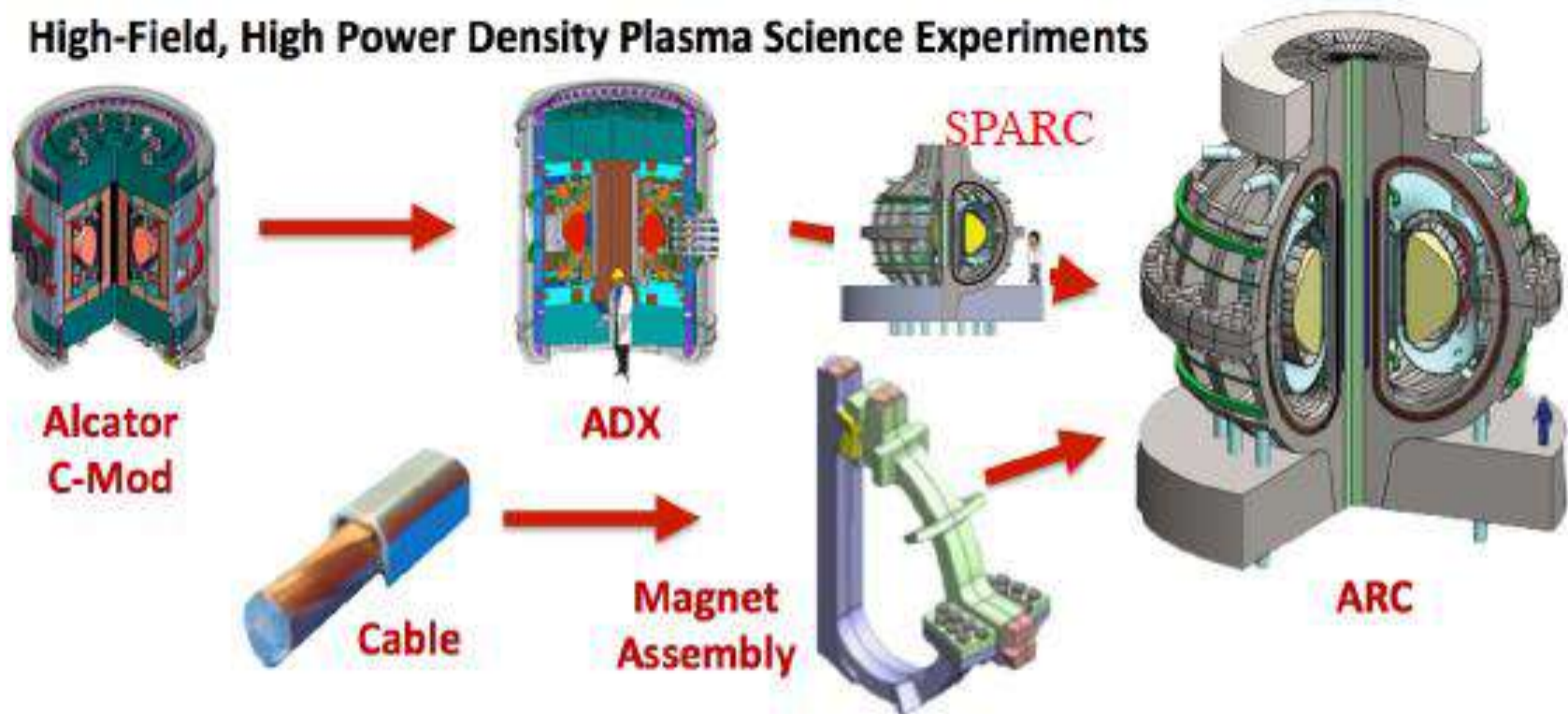
ITER 2018

https://www.youtube.com/watch?v=1-xejqkjf_c

Lehetséges-e gyorsabb út kisebb berendezésekkel?

Visszatérő gondolat, hogy **túl nagyok a fúziós reaktorok** mind a **villamosenergia-rendszer** mind a **fejlesztési ciklus** hosszának szempontjából (by Lockheed, Tokamak Energy, MIT, ... az összes ~14 piaci cég fúzióban).

High-Field, High Power Density Plasma Science Experiments



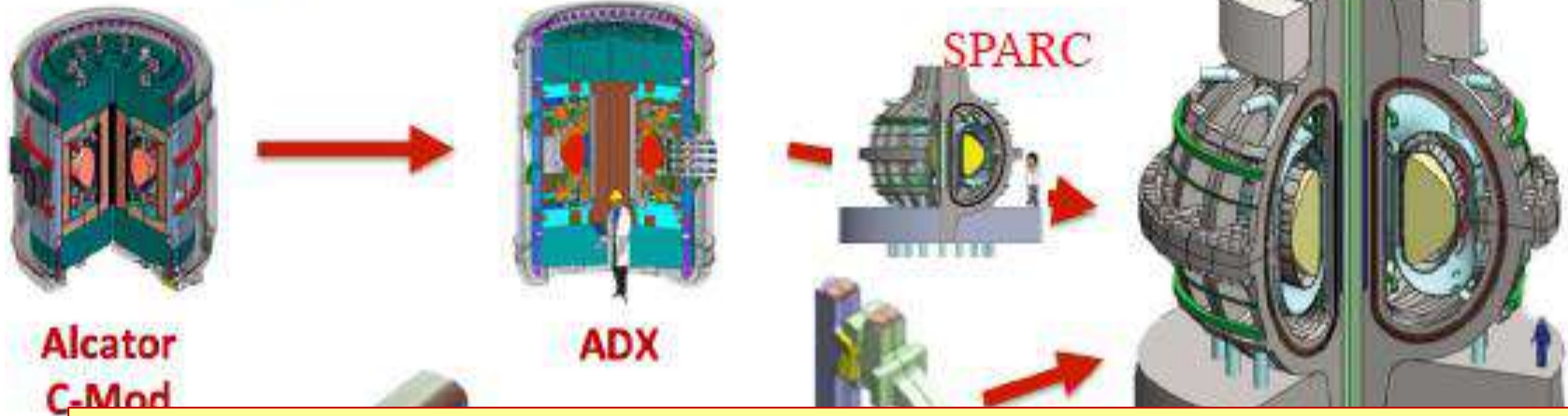
High-Field Superconducting Magnet Development

© Porkolab, MTA 2018

Lehetséges-e gyorsabb út kisebb berendezésekkel?

Visszatérő gondolat, hogy **túl nagyok a fúziós reaktorok** mind a **villamosenergia-rendszer** mind a **fejlesztési ciklus** hosszának szempontjából (by Lockheed, Tokamak Energy, **MIT**, ... az összes ~14 piaci cég fúzióban).

High-Field, High Power Density Plasma Science Experiments



MIT program: magashőmérsékletű szupravezetők → erősebb mágneses tér → kisebb berendezés.

A gyors neutronok miatt a köpenynek ugyanannyi hely kell, a hőelvezető rendszerek kritikusak!

A többi elképzelés nagyon távol áll a megvalósítástól...

Összefoglalás: a fúzió mint ideális energiaforrás...

Bőséges üzemanyag: Hihetetlenül kevés üzemanyagra van szükség (naponta pár 100 g $\rightarrow$ 1 GW). A D-T üzemanyagot magasan a legegyszerűbb használni. A deutérium valóban bőséges mindenhol, ahol van víz. Trícium gyakorlatilag nincs a természetben, lítiumból kell tenyészteni! A lítium szintén bőségesen jelen van a tengervízben, de ez ma még drága technológia, így ma koncentráltan bányásszák.

Összefoglalás: a fúzió mint ideális energiaforrás...

Bőséges üzemanyag: Hihetetlenül kevés üzemanyagra van szükség (naponta pár 100 g $\rightarrow$ 1 GW). A D-T üzemanyagot magasan a legegyszerűbb használni. A deutérium valóban bőséges mindenhol, ahol van víz. Trícium gyakorlatilag nincs a természetben, lítiumból kell tenyészteni! A lítium szintén bőségesen jelen van a tengervízben, de ez ma még drága technológia, így ma koncentráltan bányásszák.

Tiszta: Az energiatermeléshez szükséges reakciókban nem keletkeznek radioaktív izotópok. A felaktiválódással és a trícium szivárgással viszont vigyázni kell!

Összefoglalás: a fúzió mint ideális energiaforrás...

Bőséges üzemanyag: Hihetetlenül kevés üzemanyagra van szükség (naponta pár 100 g $\rightarrow$ 1 GW). A D-T üzemanyagot magasan a legegyszerűbb használni. A deutérium valóban bőséges mindenhol, ahol van víz. Trícium gyakorlatilag nincs a természetben, lítiumból kell tenyészteni! A lítium szintén bőségesen jelen van a tengervízben, de ez ma még drága technológia, így ma koncentráltan bányásszák.

Tiszta: Az energiatermeléshez szükséges reakciókban nem keletkeznek radioaktív izotópok. A felaktiválódással és a trícium szivárgással viszont vigyázni kell!

Biztonságos: Láncreakció és megszaladás nincs. A remanens hő leálláskor passzívan kezelhető. Radioaktív anyag viszont jelen van, így az erőmű működésének minden fázisában fenn kell tartani a mérnöki gátakat!

Összefoglalás: a fúzió mint ideális energiaforrás...

Bőséges üzemanyag: Hihetetlenül kevés üzemanyagra van szükség (naponta pár 100 g $\rightarrow$ 1 GW). A D-T üzemanyagot magasan a legegyszerűbb használni. A deutérium valóban bőséges mindenhol, ahol van víz. Trícium gyakorlatilag nincs a természetben, lítiumból kell tenyészteni! A lítium szintén bőségesen jelen van a tengervízben, de ez ma még drága technológia, így ma koncentráltan bányásszák.

Tiszta: Az energiatermeléshez szükséges reakciókban nem keletkeznek radioaktív izotópok. A felaktiválódással és a trícium szivárgással viszont vigyázni kell!

Biztonságos: Láncreakció és megszaladás nincs. A remanens hő leálláskor passzívan kezelhető. Radioaktív anyag viszont jelen van, így az erőmű működésének minden fázisában fenn kell tartani a mérnöki gátakat!

Szabályozott: A D-T fúzió kicsiben nem megy. A plazma teljesítménye perces időskálán változtatható, de a technológiának is tolerálnia kell. A stabil üzemállapotokat még kutatni kell, és a folyamatos működés sem magától értetődő.

Összefoglalás: a fúzió mint ideális energiaforrás...

Bőséges üzemanyag: Hihetetlenül kevés üzemanyagra van szükség (naponta pár 100 g $\rightarrow$ 1 GW). A D-T üzemanyagot magasan a legegyszerűbb használni. A deutérium valóban bőséges mindenhol, ahol van víz. Trícium gyakorlatilag nincs a természetben, lítiumból kell tenyészteni! A lítium szintén bőségesen jelen van a tengervízben, de ez ma még drága technológia, így ma koncentráltan bányásszák.

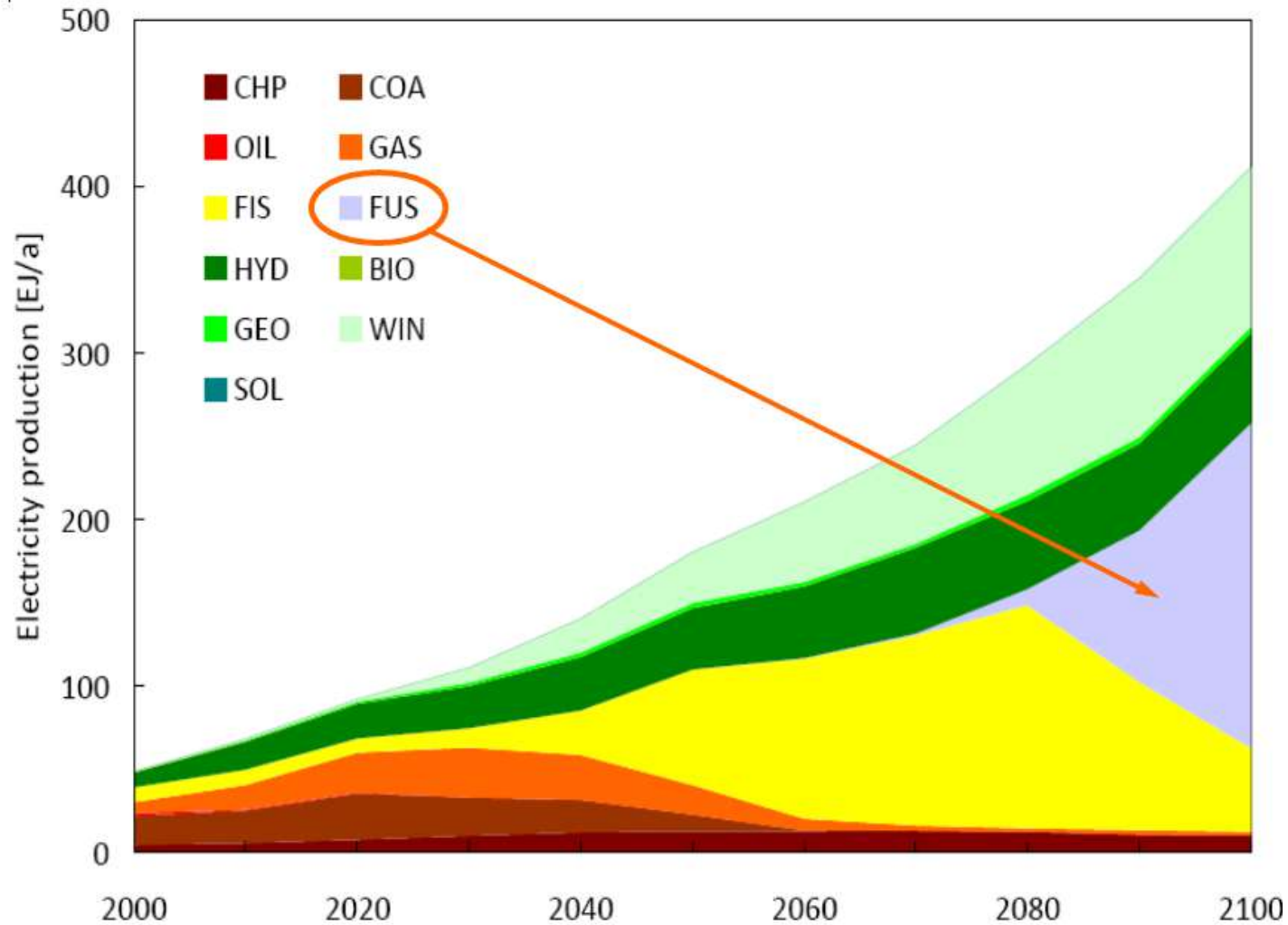
Tiszta: Az energiatermeléshez szükséges reakciókban nem keletkeznek radioaktív izotópok. A felaktiválódással és a trícium szivárgással viszont vigyázni kell!

Biztonságos: Láncreakció és megszaladás nincs. A remanens hő leálláskor passzívan kezelhető. Radioaktív anyag viszont jelen van, így az erőmű működésének minden fázisában fenn kell tartani a mérnöki gátakat!

Szabályozott: A D-T fúzió kicsiben nem megy. A plazma teljesítménye perces időskálán változtatható, de a technológiának is tolerálnia kell. A stabil üzemállapotokat még kutatni kell, és a folyamatos működés sem magától értetődő.

Mikor reális?: Első erőművek 50'-60' években, utána ha megéri!

Egy optimista verzió



Example of global energy scenario modelling using a model called EFDA/TIMES
(with a CO₂ constraint of 650ppm in air)

“Not a prediction!”

© Todd, BME lecture 2016