

Fúziós laborkísérletek

Zoletnik Sándor

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont
zoletnik.sandor@wigner.mta.hu



Alapvető nagyságrendek

Plazma nyomása:

Lawson kritérium szerint 1 s energiaösszetartási időre: $n=10^{20} \text{ m}^{-3}$

Hőmérséklet adott: $10 \text{ [keV]}=10^{-15}[\text{J}] \rightarrow nT=10^5 \text{ [Pa]} = 1 \text{ [atm]}$

Plazma sűrűsége:

Normál légköri sűrűség: $10^{25} \rightarrow \text{plazma sűrűség} = 10^{-5} \text{ légköri sűrűség}$

Toroidális mágneses tér:

Mivel $P/(B^2/2\mu_0) \ll 1$ ezért $B^2/2\mu_0 > 10^6 \rightarrow B > 1.5 \text{ [T]}$

Áram a toroidális tér előállítására:

$$\text{rot } B = \mu_0 I$$

$$2\pi R B = 10^{-6} I, R=1\text{m} \rightarrow I=10 \text{ [MA]}$$

Vákuum, vákuumkamra

A kis plazmasűrűség miatt vákuum kell a reaktorkamrában:

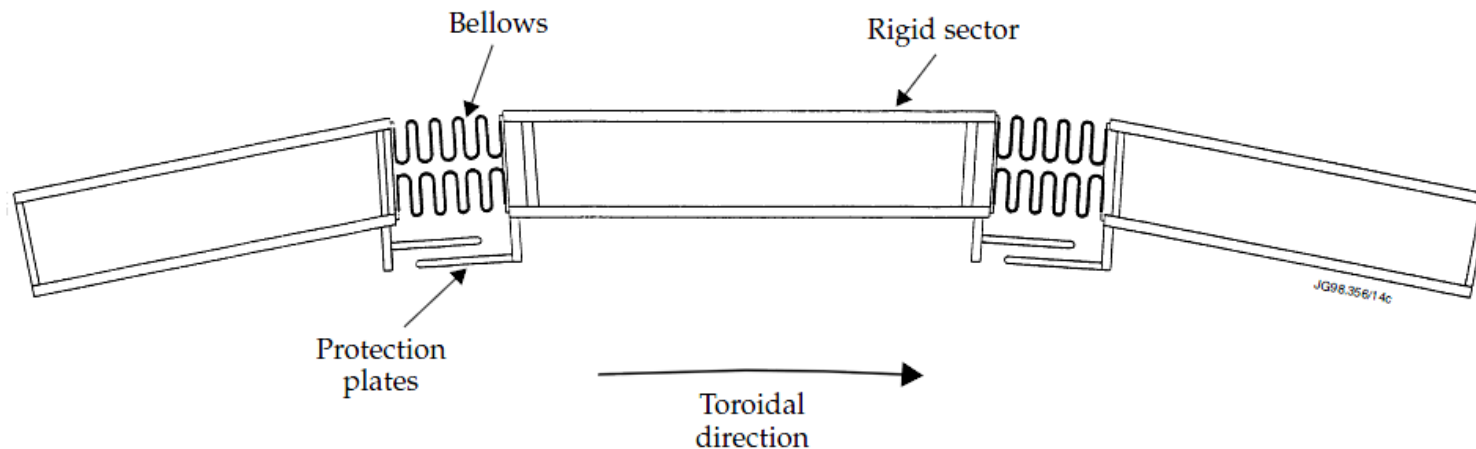
Min 10^{-9} atm = 10^{-6} mBar

Ez már nagyvákuum ha nem is extrém nagy

→ kétlépcsős vákuum rendszer: rotációs, turbo, kriogén szivattyúk

- A falon megkötődő szennyezések a kritikusak
- Egy vákuum nyitás után több hetes procedúra az előkészítés:
 - Szívás
 - Kifűtés akár 1 hét
 - Fal tisztítás, glimm kisüléssel

A légköri nyomás $10\text{Tonna}/\text{m}^2$ → vákuumkamra kellően szilárd kell legyen
Ugyanakkor kifűtés miatt hőtágulás jelentős, kellő rugalmasság is kell



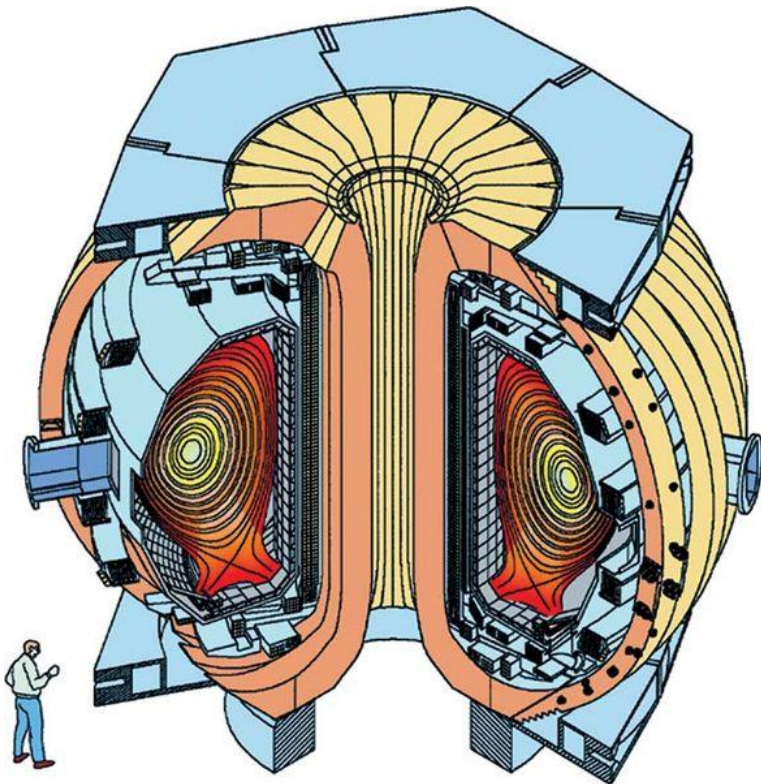
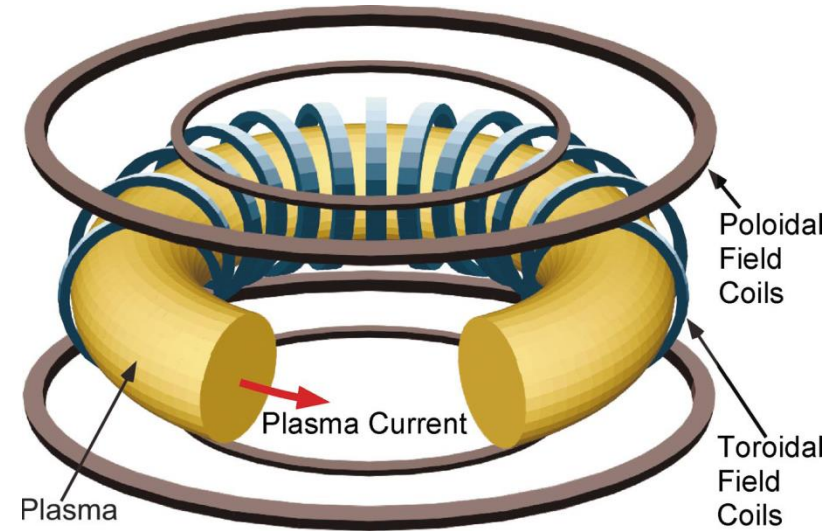
Plazma összetartás: tokamak

Ma toroidális berendezések dominálnak:

Tokamak, kompakt tokamak, sztellarátor, RFP

Tokamak: toroidális Z-pinch erős mágneses térrel

- R/a kb. 3-4
- $R=0.5 \cdots 3\text{m}$
- Általában nem kör keresztmetszet



Toroidális mágneses tekercsek

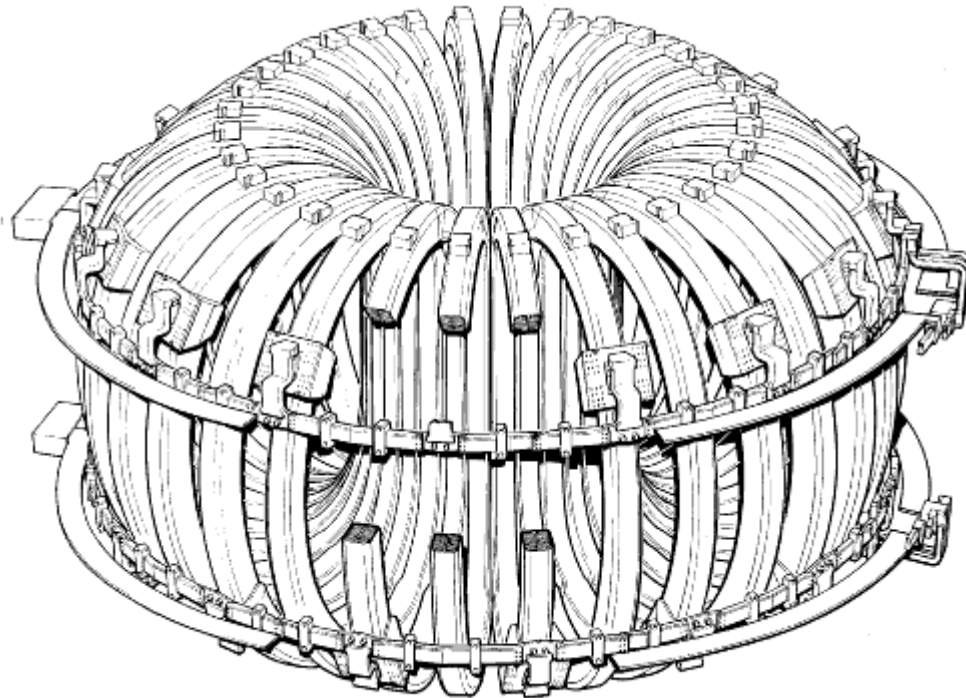
10 MA/ \sim 20 tekercs \rightarrow 0.5MA/tekercs

Erő: $1.5T \times 0.5MA \sim 1MN/m = 100T/m$ (minimum)

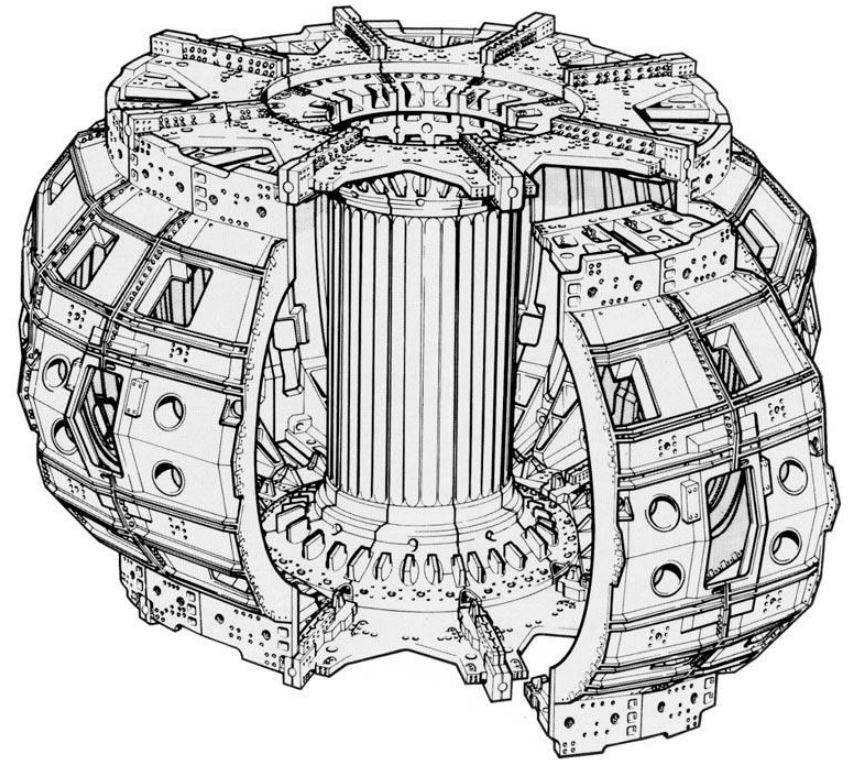
A tekercset jelentős erővel kell összetartani, mechanika stabilitás kritikus

Tekercseken disszipálódó teljesítmény óriási lehet: JET max. 800 MW!!!

Tekercseknek aktív hűtés kell vagy szupervezető tekercs.



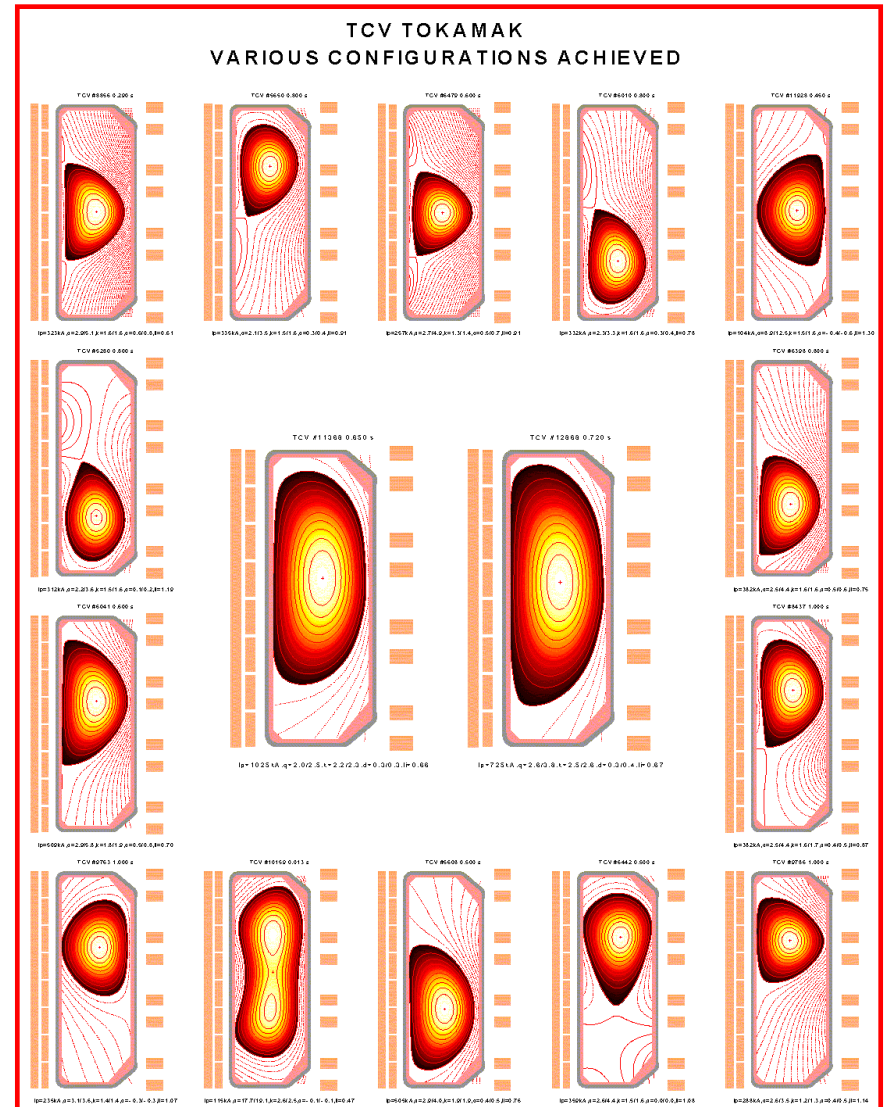
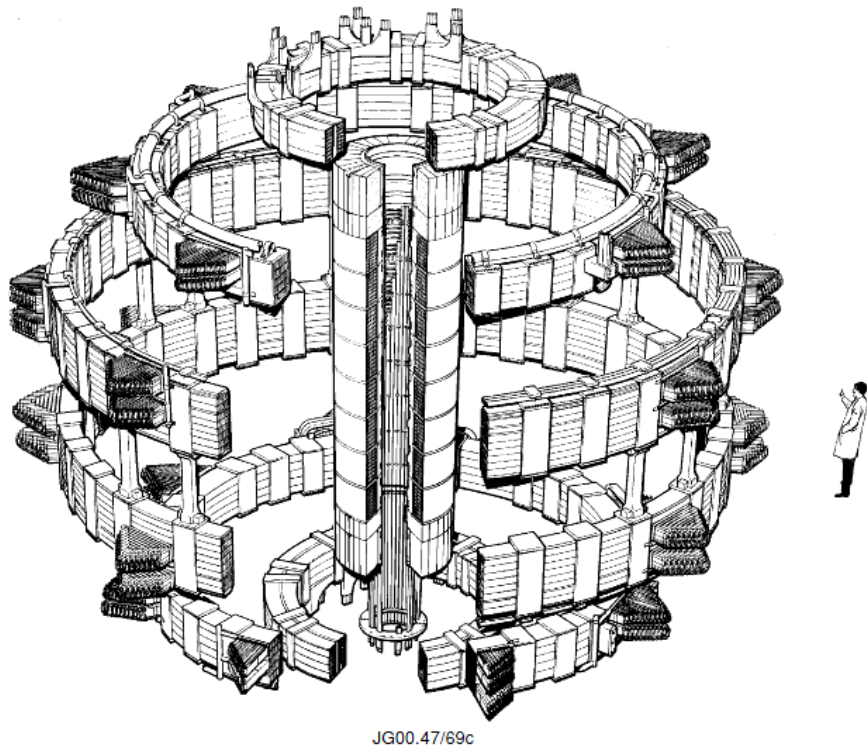
JG00.47/67c



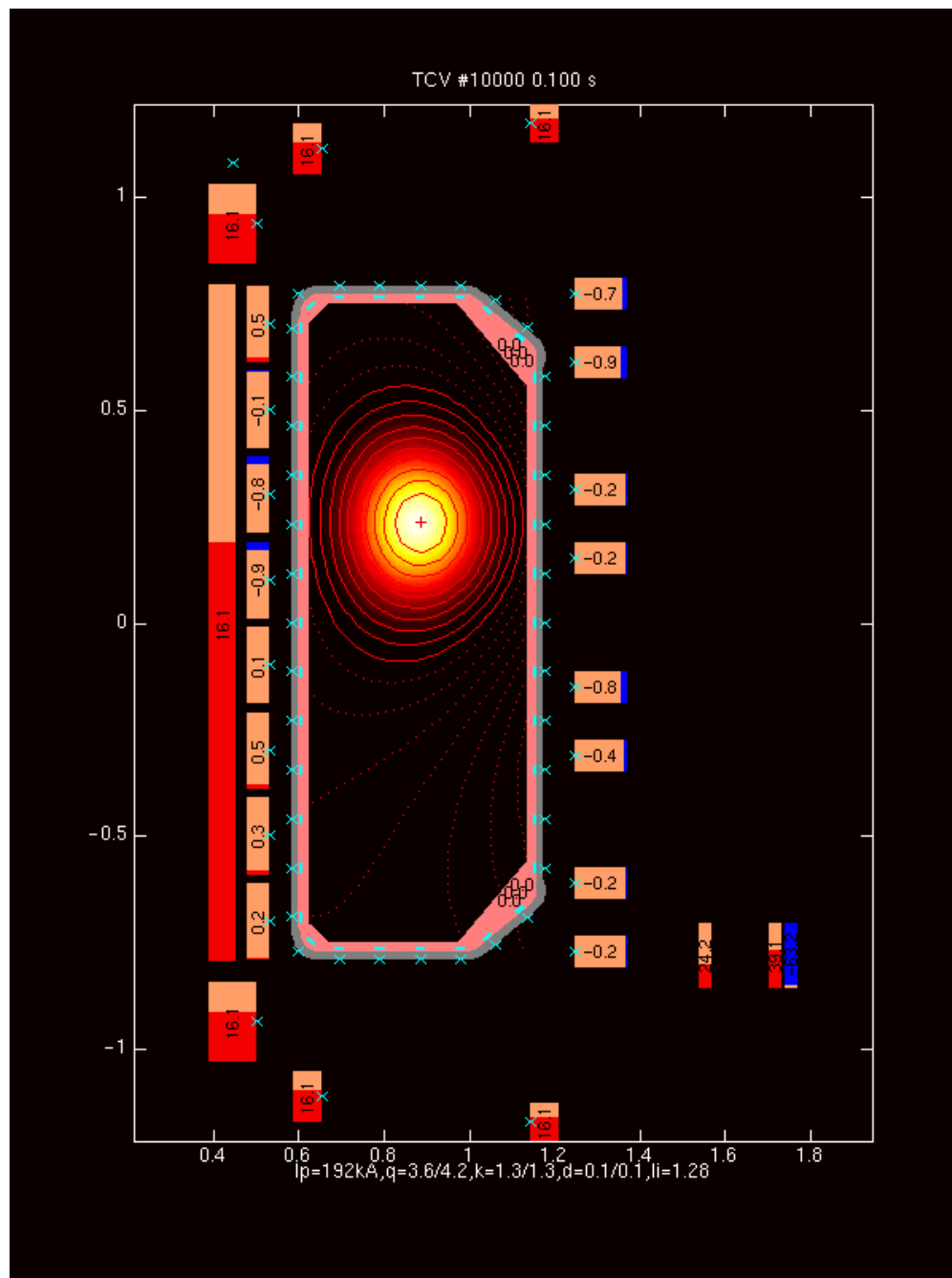
Poloidális mágneses tér

- Előállítja a vertikális és radiális szabályzó tereket.
- Indukálja a plazmaáramot (központi szolenoid)

Aktív szabályzás a plazmaalak vezérléshez



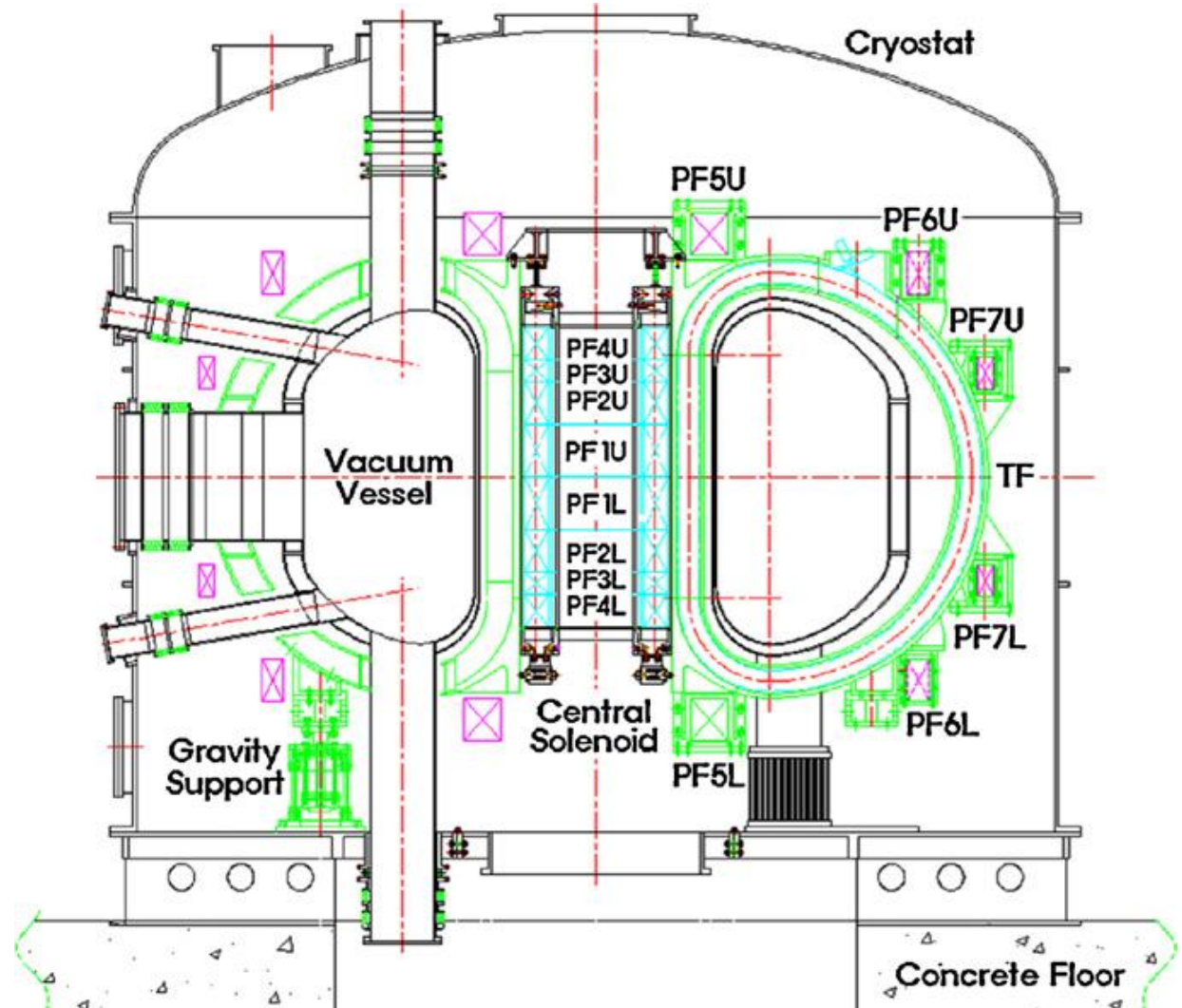
Poloidális tekercsek működése



Szupravezető tekercsek

Dupla vákuumrendszer:

1. kriosztát (tekercseknek)
2. Plazma vákuumkamra



Szupravezetők

A mai berendezésekben általában réz tekercsek vannak, de a jövőben szupravezető kell.

A szupravezetők egy kritikus tartományban működnek az I, B, T, ϵ tartományban.

Bármelyik határon átesik \rightarrow quench



Hagyományos szupravezetők:

NbSn: törékeny de magasabb mágneses térig jó

NbTi: könnyebben kezelhető, de kisebb teret bír

Működési hőmérséklet: $\sim 5K$

Magas hőmérsékletű szupravezető lehet kedvezőbb is: He hűtés: nagyobb tér

LN hűtés: egyszerűbb technológia

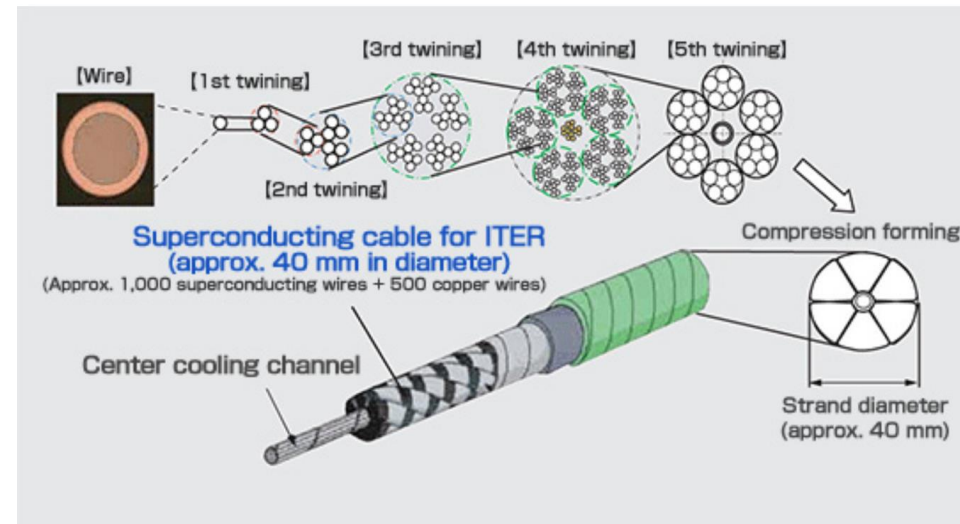
SPARC, ARC: Új MIT terv (REBCO)

Cable in conduit:

A törékeny szupravezető szálakat köteggé fonják és acél csőbe húzzák.

Réz szálak vezetik az áramot, ha kiesik a szupravezetésből

Folyékony He áramlik a szálak közt.



Áramhajtás

Tokamak alapvető feltétele, hogy a plazmaáram meghatározott értéken legyen.

Áramhajtás:

- Induktív (vasmaggal vagy anélkül)

$$\Delta\Phi/\Delta t = \text{rot } E = U_{\text{loop}} = R_{\text{plasma}} \times I_p$$

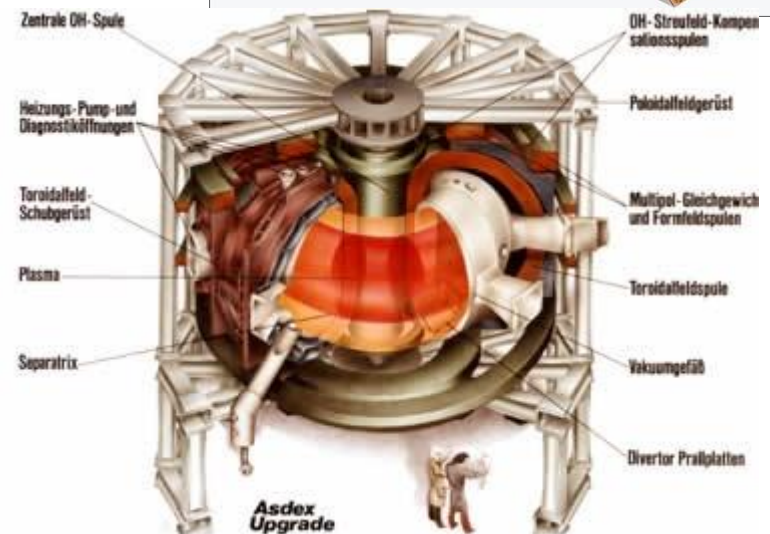
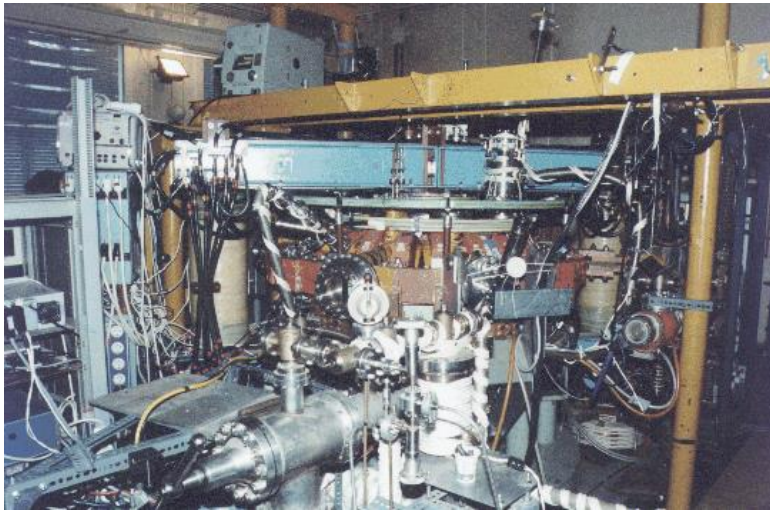
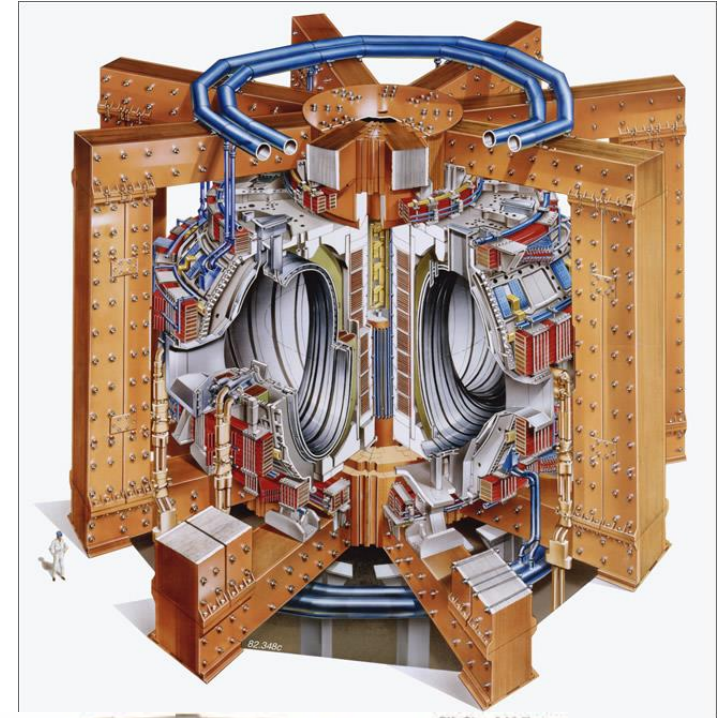
A mágneses fluxus csak egy min-max között változhat:

$$\Phi_{\text{max}} - \Phi_{\text{min}} = \int U_{\text{loop}} dt \quad [\text{Vs}]$$

Adott plazma ellenállás és áram mellett az idő véges.

A kisülés eleje kritikus lehet

→ „Vs saving”



Nem-induktív áramhajtás

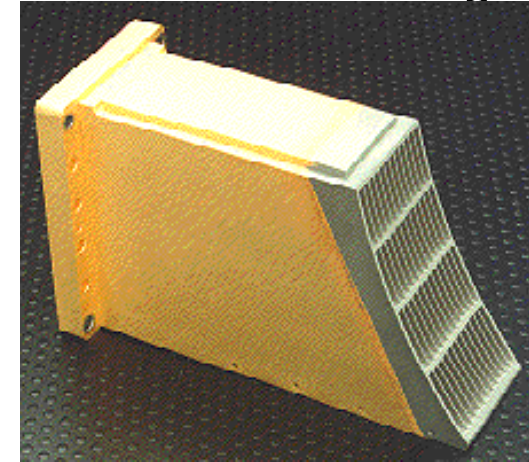
Bármilyen eljárás alkalmas lehet amely elektronokat és ionokat más hatásokkal mozgat toroidálisan: a kérdés a hatások A/W

Lower Hybrid áramhajtás:

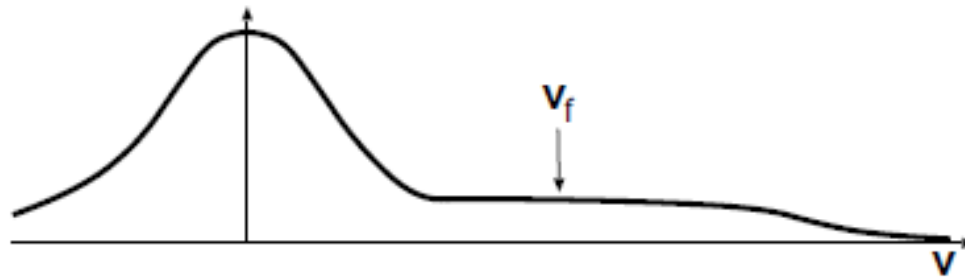
1 GHz körüli hullámokat indukálnak hullámvezető mátrixsal

Az elektronok termikus sebessége rezonál a hullámmal:

Landau damping \rightarrow elektronok energiát nyernek



A hullám csak a plazma széléig terjed: nagy berendezésen kétséges



Bootstrap áram: a plazma saját áramhajtása

- Banán pályán mozgó részecskék különböző tartományú területeket kötnek össze
- Sebesség aszimmetria a banán pályán befogott részecskékre
- Pumpálja a nem-befogott részecskék sebességeloszlását is

$I \sim \text{grad } p \rightarrow$ a plazma közepén 0

Önmagában nem elég, de nagynyomású berendezésben több 10% lehet

Tokamak berendezések

Az első tokamakok: 195x (Kurcsatov intézet, Moszkva) $R \sim 0.5$ m
Kis-közepes tokamak kísérletek: 196x-7x $R=0.5 \dots 2$ m

Óriás tokamakok: 1980- (R=3m)

DT tokamakok

TFTR: Princeton (USA) -1997

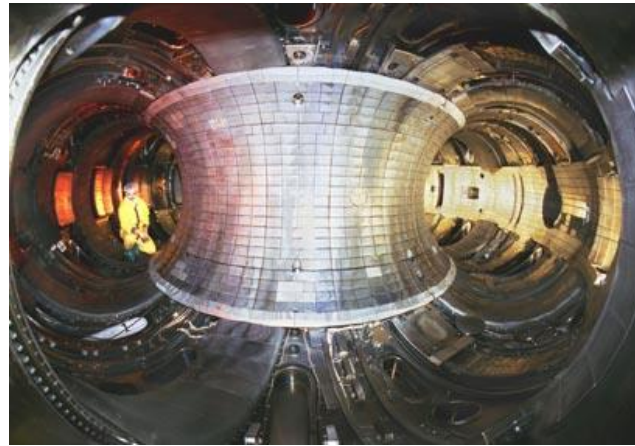
kerek kamra

DT működés

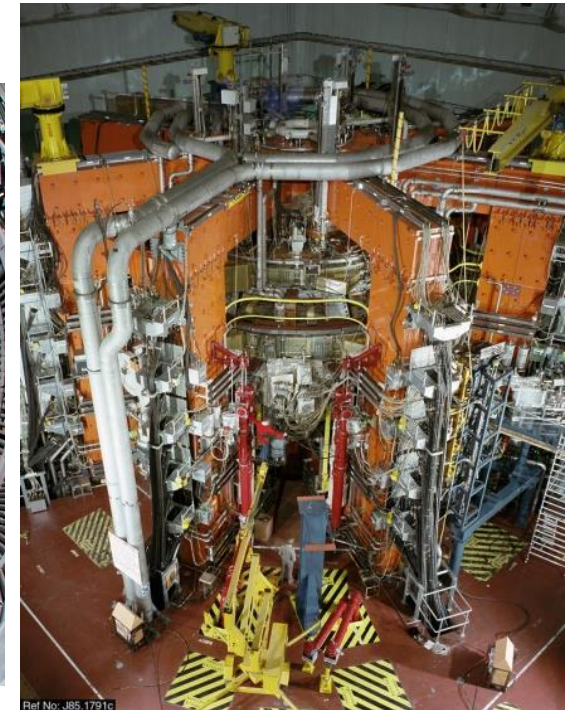
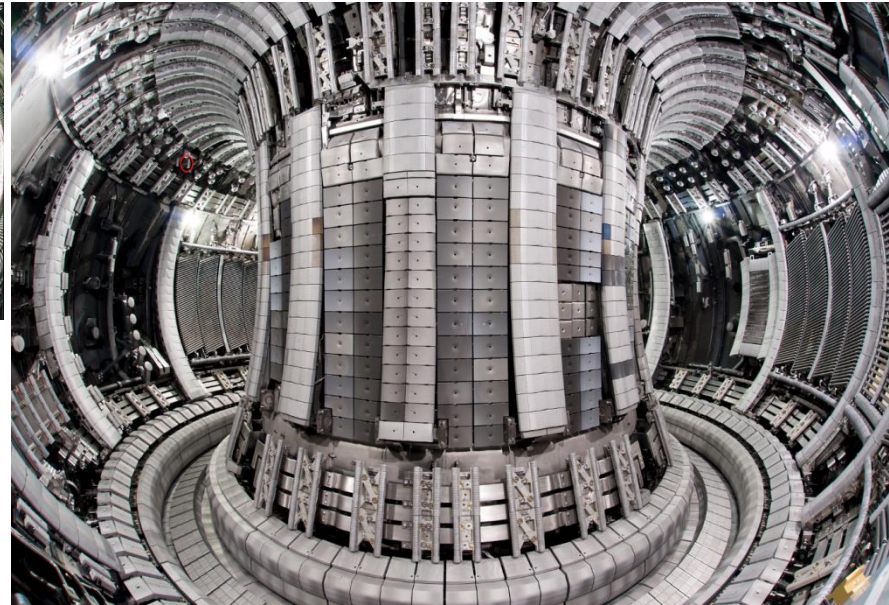
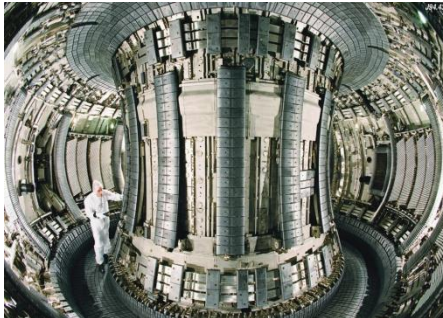
JET: Culham (EU)

D alakú kamra

DT működés



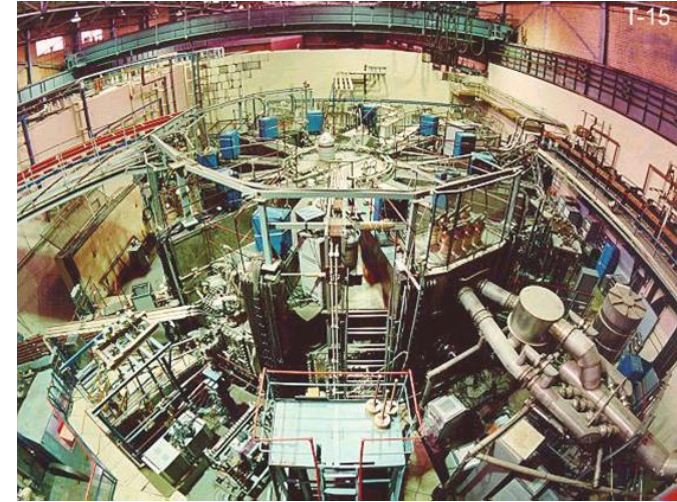
The Tokamak Fusion Test Reactor in 1989.



Ref No. J85.1791c

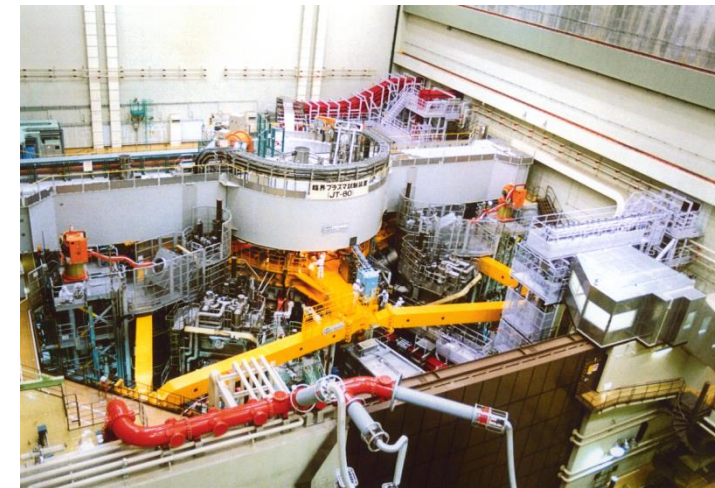
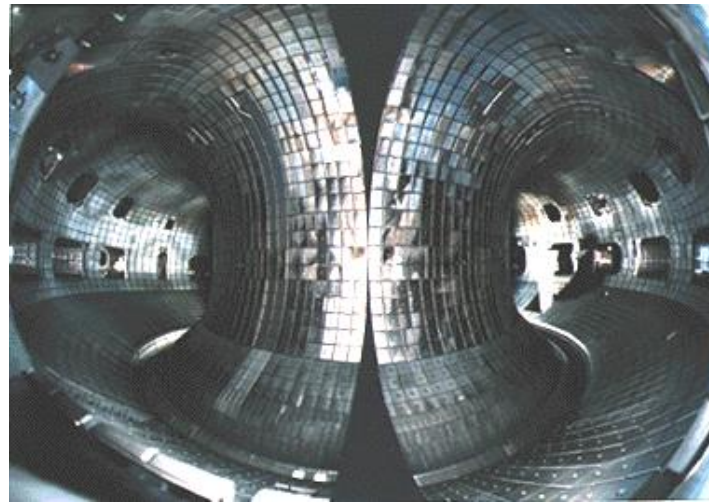
További óriás tokamakok

T-15: Kurcsatov int (Moszkva)
szupravezető
nem működött teljesen



JT-60: Naka (Japán)
jelenleg szétszedve

→ JT-60SA
2020-ban indul



Mai nagyobb tokamakok

A vezető páros ($R \sim 2\text{m}$, D alak)

DIII-D: San Diego (USA)

ASDEX Upgrade (Garching, D)

TCV (Lausanne, CH): flexibilis alak

COMPASS (Prága)

MAST (UK)

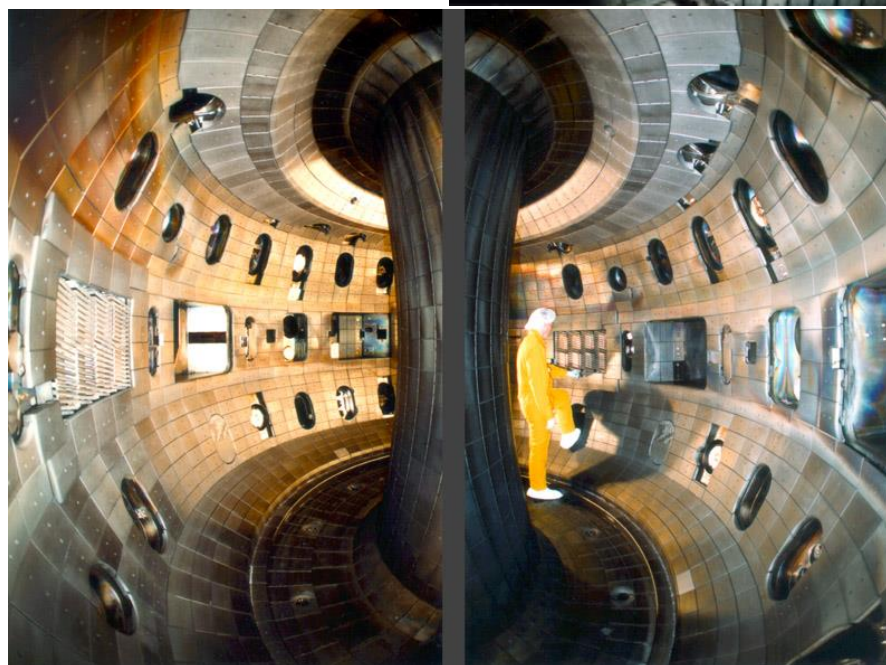
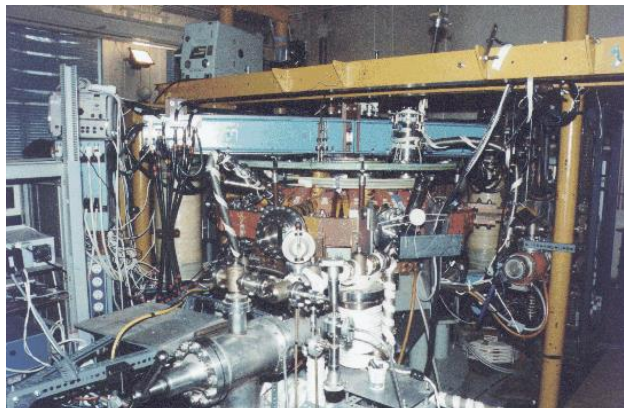
NSTX (Princeton, USA)

HL-2A (Kína, volt ASDEX)

ASDEX Upgrade



*Ha kicsi is, meg régi is,
de a mienk ... volt
MT-1M (RMKI, 1978-1998)*



Doublet III D (DIII-D)

Szupravezető tokamakok

WEST (F): kör keresztmetszet

KSTAR (Korea)

EAST (Kína)

SST-1 India: épül...épül

JT-60SA: Közös EU-Japán



Kompakt (szférikus) tokamak

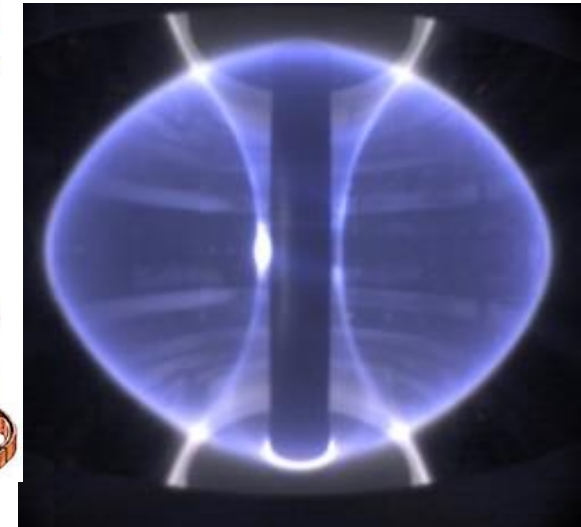
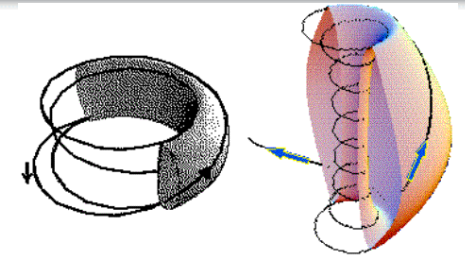
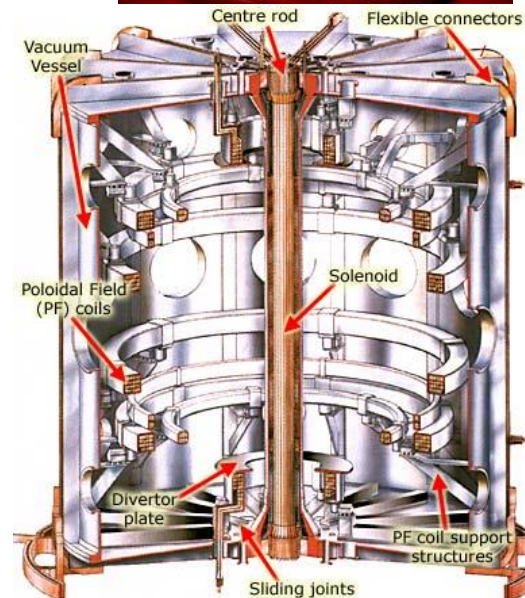
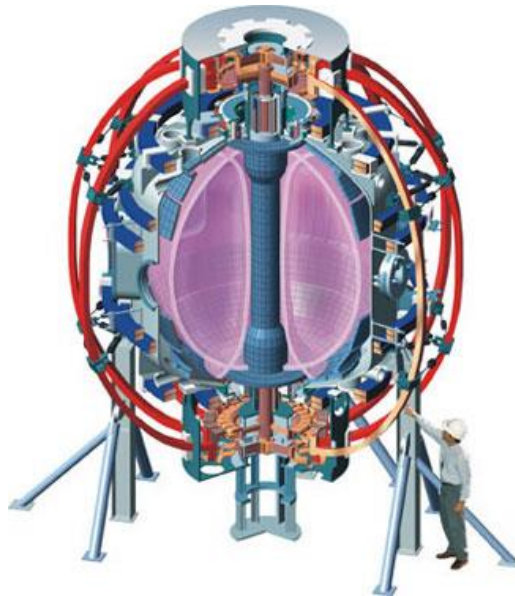
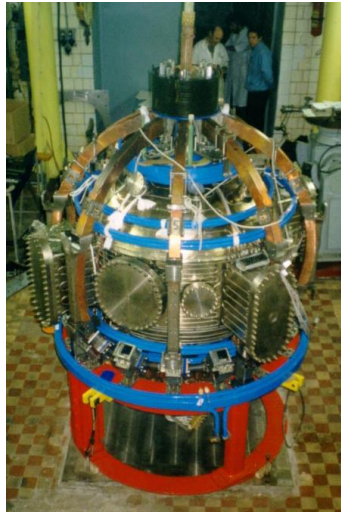
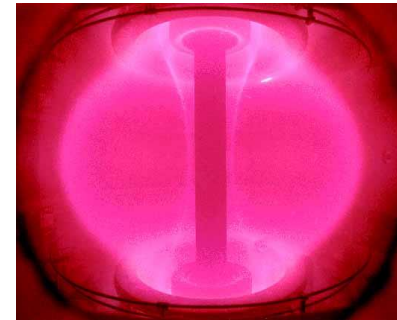
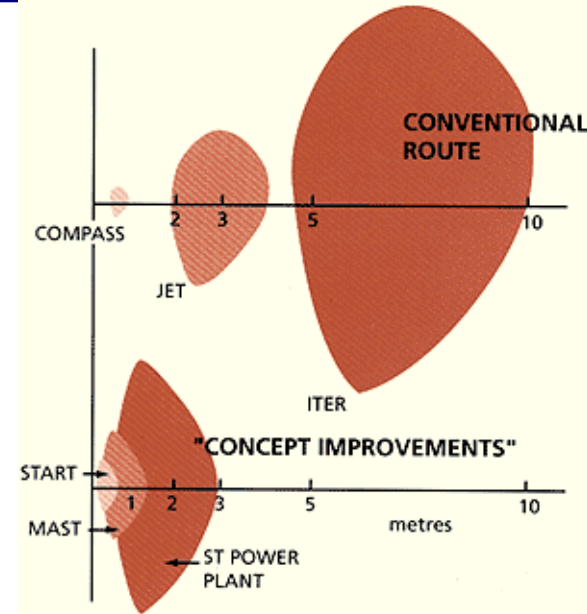
Az R/a arány csökkentése több dolgot javíthat:

- Erővonal hosszabb ideig van a stabil belső oldalon: magasabb nyomásig stabil a plazma
- Az átlagos mágneses térerősség kisebb lehet
- Kompaktabb berendezés, kisebb ár

Első kompakt tokamak:

Start (Culham): maredékokból összerakva

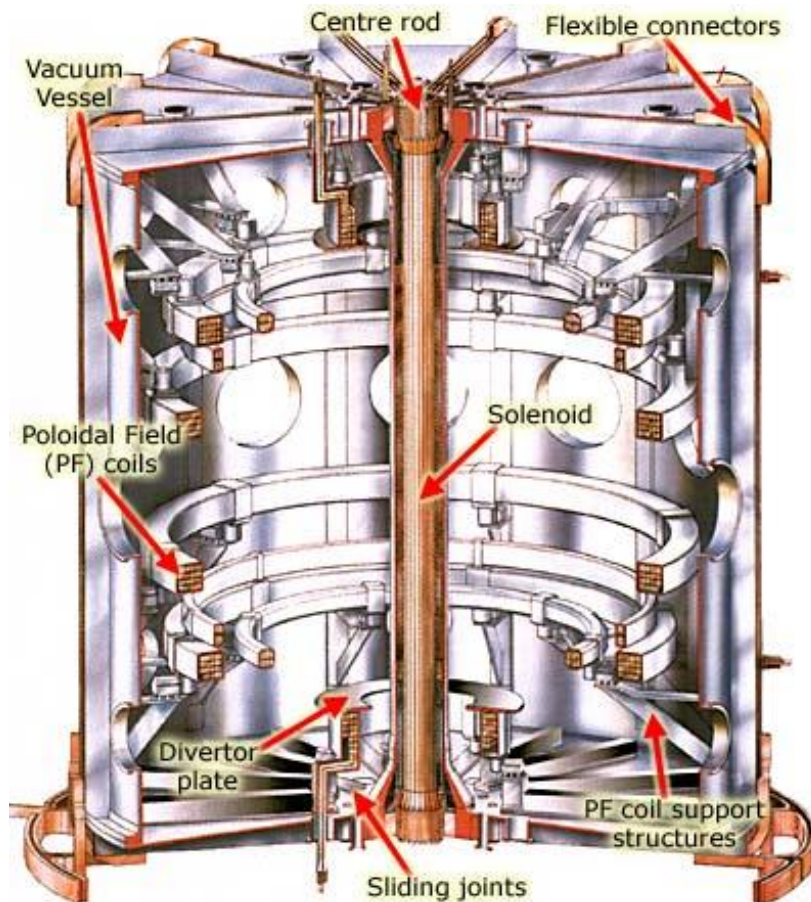
Jelenleg kb. 5–10 kompakt tokamak üzemel



Kompakt (szférikus) tokamak

Kompakt tokamak alapvető problémái:

- Toroidális tekercsek árama + központi szolenoid egy nagyon kicsi központi oszlopban
- Kis szolenoid \rightarrow kis V_s a plazmaáram indukálására
 \rightarrow valamilyen alternatív áramhajtás kell
- Reaktorban nem lesz hely a belső oszlop védelmére



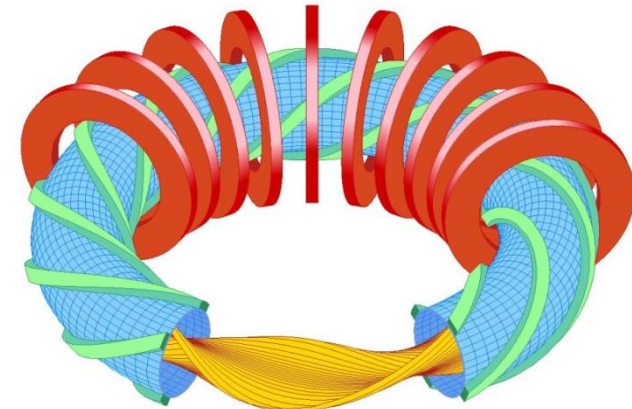
Sztellarátorok

A tokamak forradalom kezdetén a sztellarátorok népszerűtlenné lettek

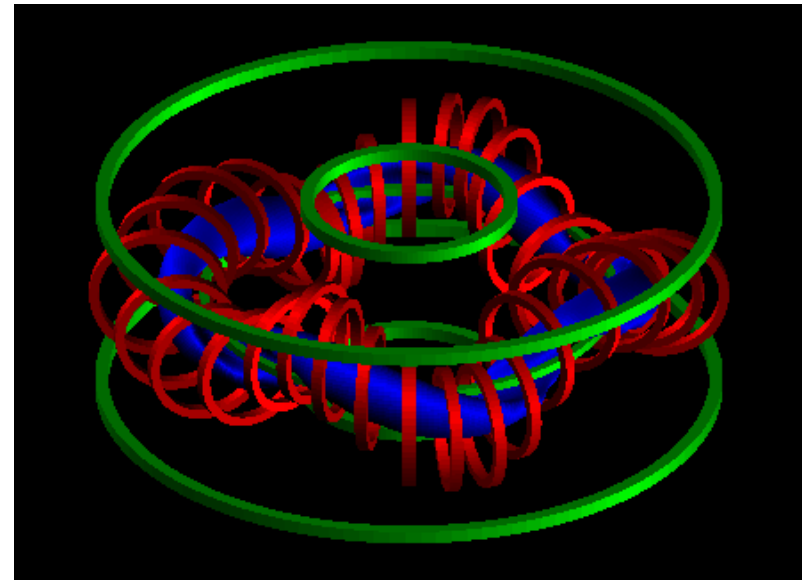
A klasszikus sztellarátorban lokális mágneses tükrök vannak, sok a veszteség

Torsatron (heliotron):

Kombinált toroidális–helikális tekercsek



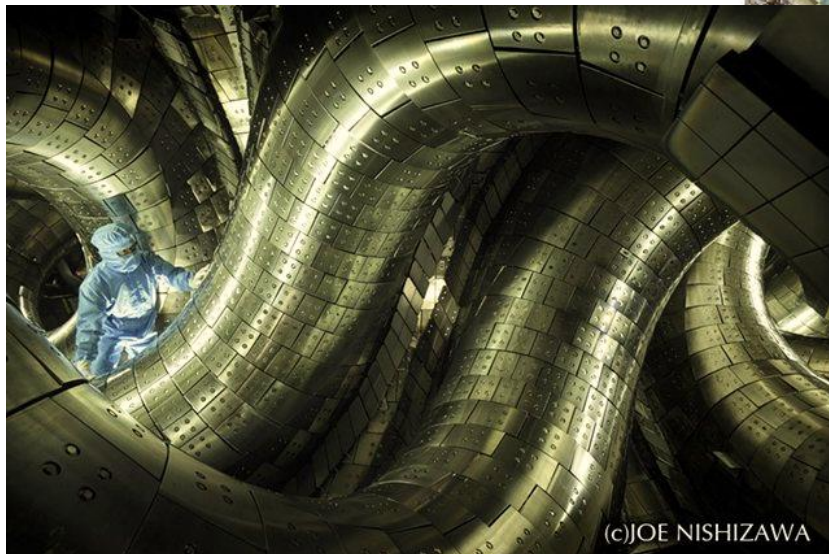
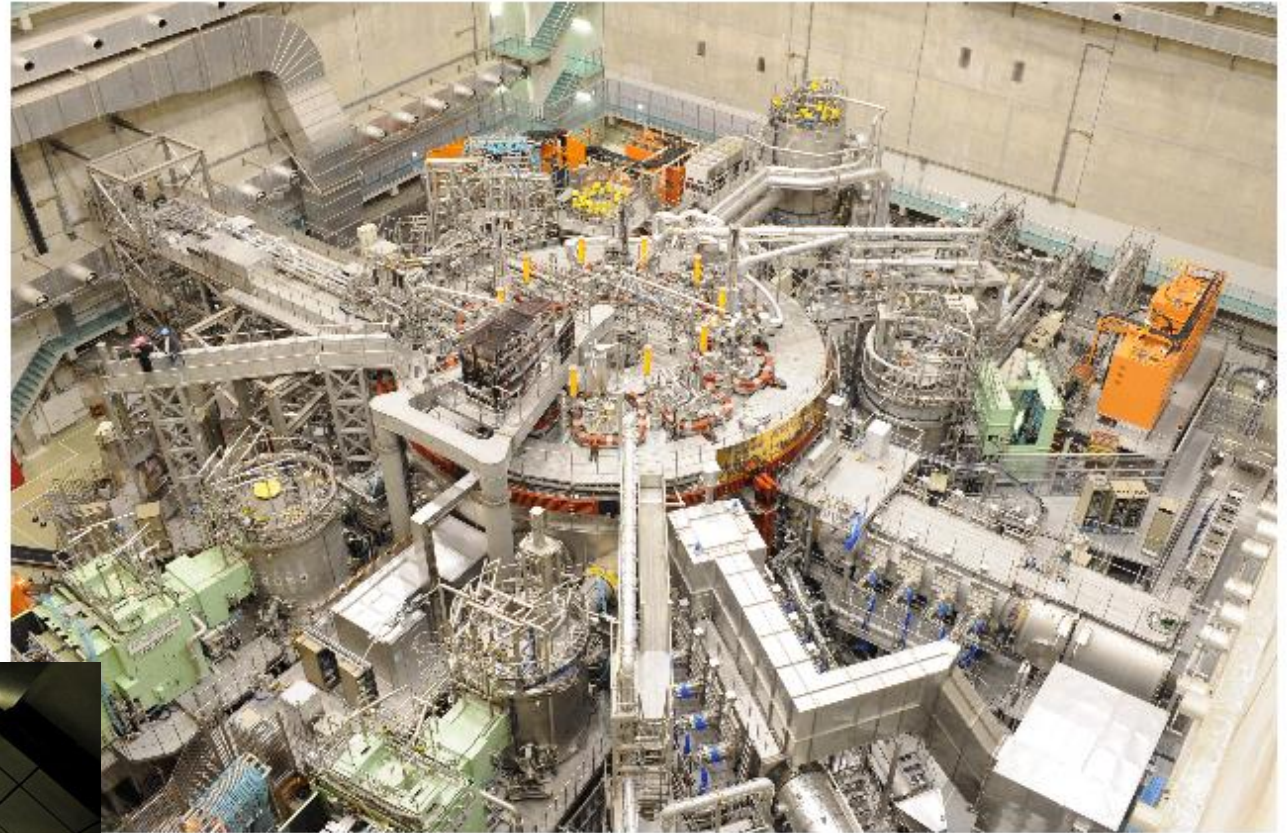
Heliac: helikálisan eltolított helyzetű tekercsek, a plazma egy vezető köré tekerve



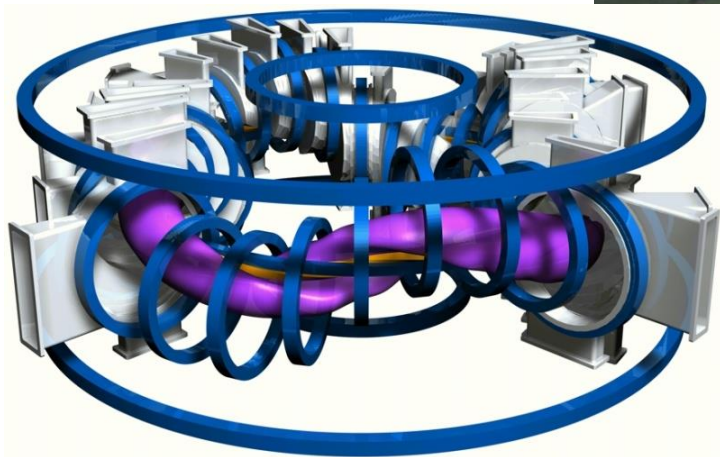
LHD

Egy óriási Heliotron Japánban

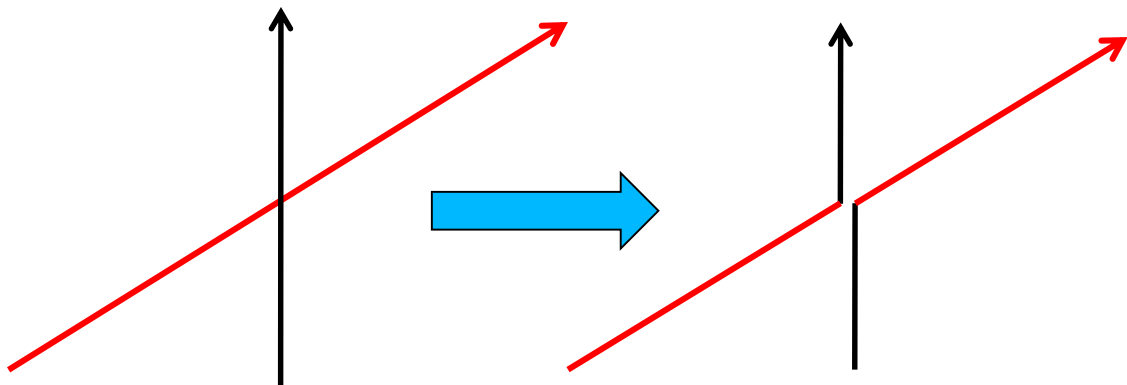
LHDの写真



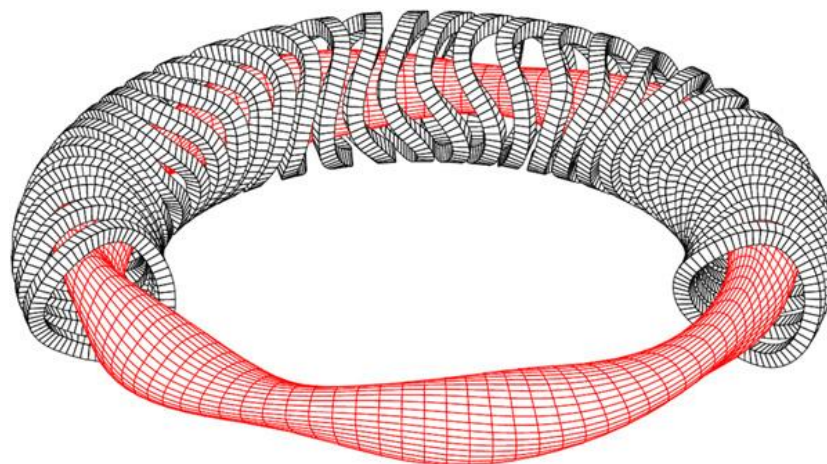
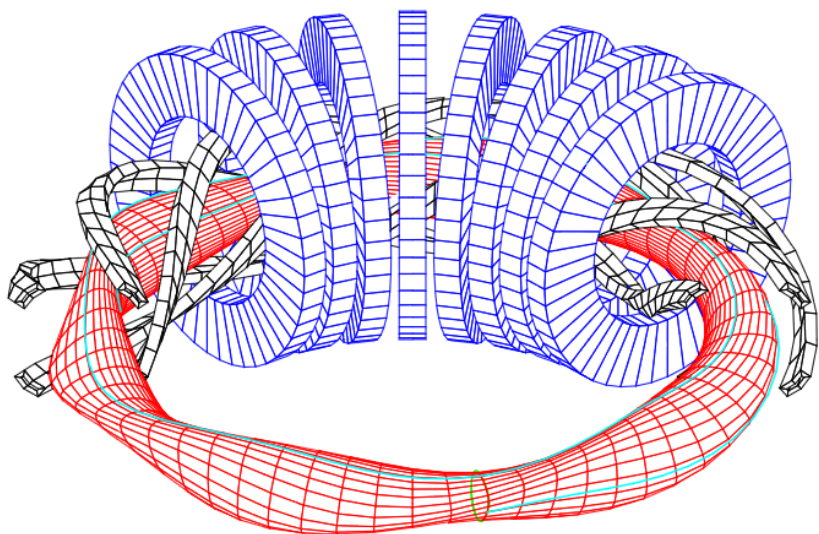
Egy Helic Madridban



Moduláris sztellarátorok



A toroidális és a helikális tekercsek átalakíthatók nem-síkbeli tekercsekké: **moduláris sztellarátor**. Az alábbi két konfiguráció lényegében ugyanannak a mágneses konfigurációnak a megvalósítása klasszikus és moduláris tekercsekkel.



Optimalizált sztellarátorok

Moduláris tekercsekkel végtelen sok konfiguráció megvalósítható, optimalizálni lehet a teret. Optimalizálási szempontok:

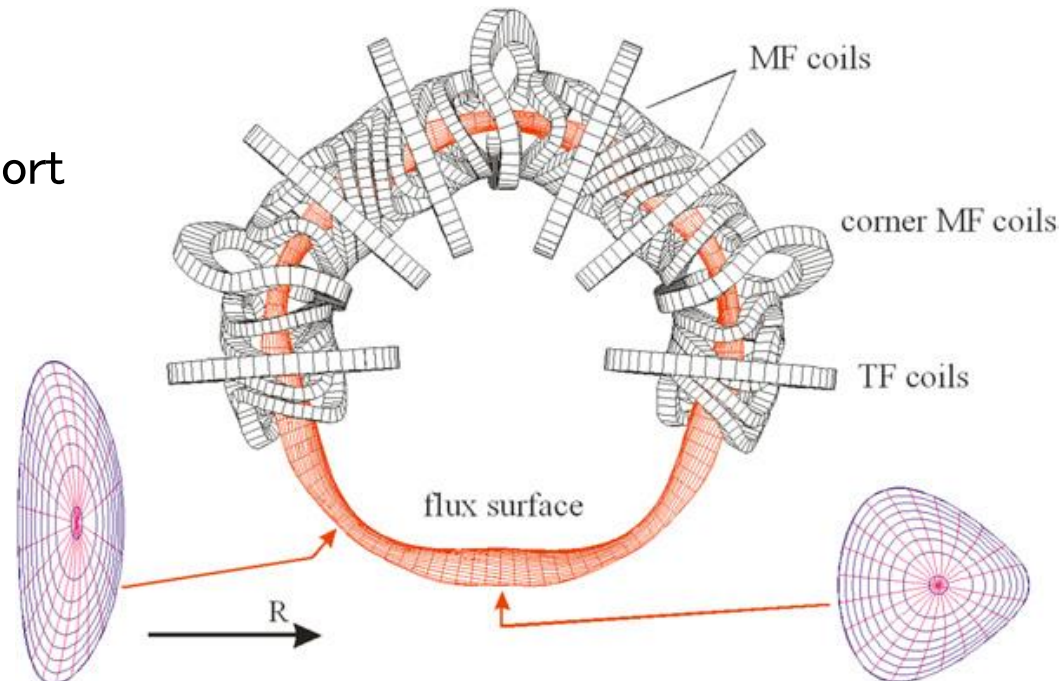
- grad-B drift lehetőleg a mágneses felületen belül legyen: kis részecsketranszport
- A minimális mágneses terű tartományokban legyen kicsi a görbület:
→ befogott részecskék lassan driftelnek
- A parallel áramokat minimalizálni kell, hogy a felületek eltolódását minimalizálják

Eljárás:

- Mágneses térszerkezet optimalizálás valamilyen szempont szerint
- Mágneses térnek megfelelő áramsűrűség eloszlás meghatározása a határfelületen
- Áramsűrűség diszkretizálása áramfonalakká

Wendelstein 7-AS:

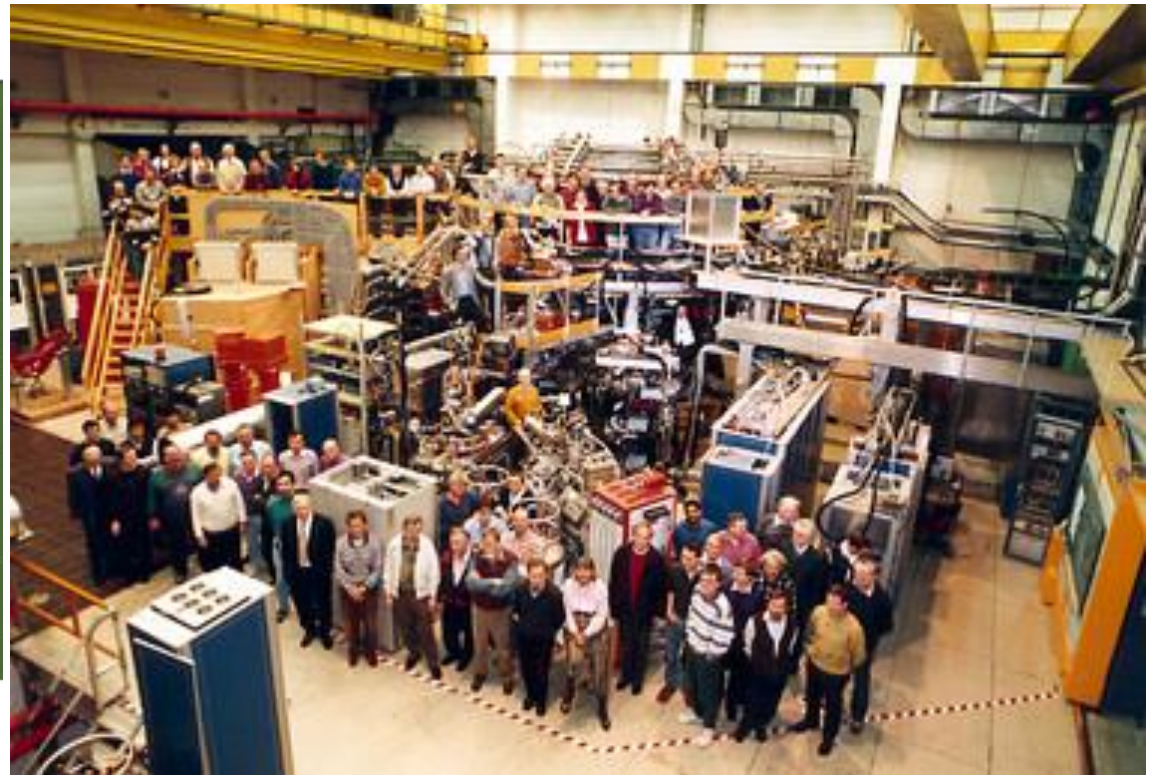
- Klasszikus sztellarátornál jobb neokl. transzport
- Moduláris + toroidális tekercsek
- 5-ös szimmetria
- $I_p=0$
- $R=2m$
- Változó plazma alak



Wendelstein 7-AS

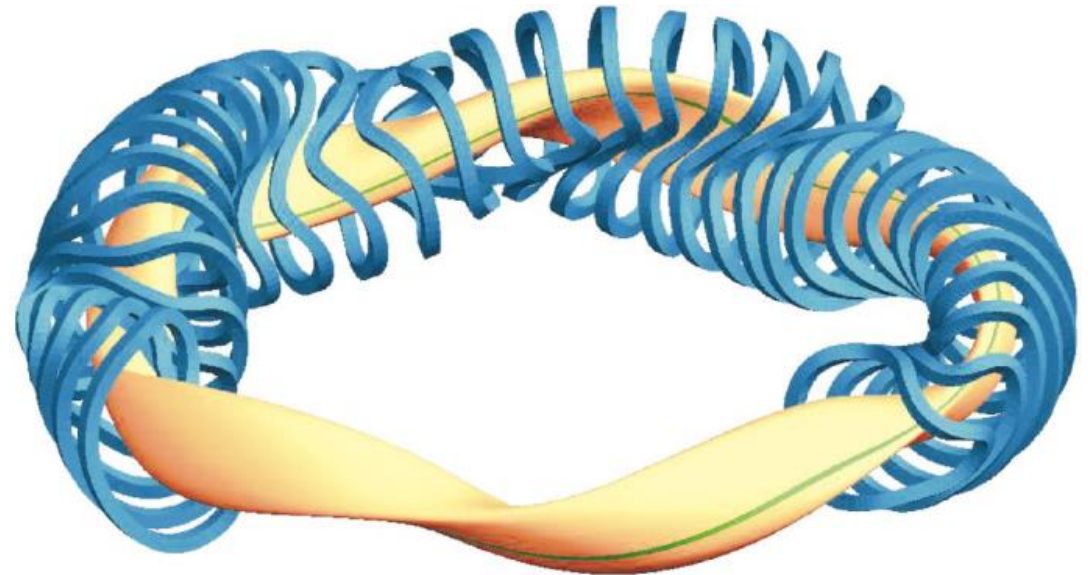
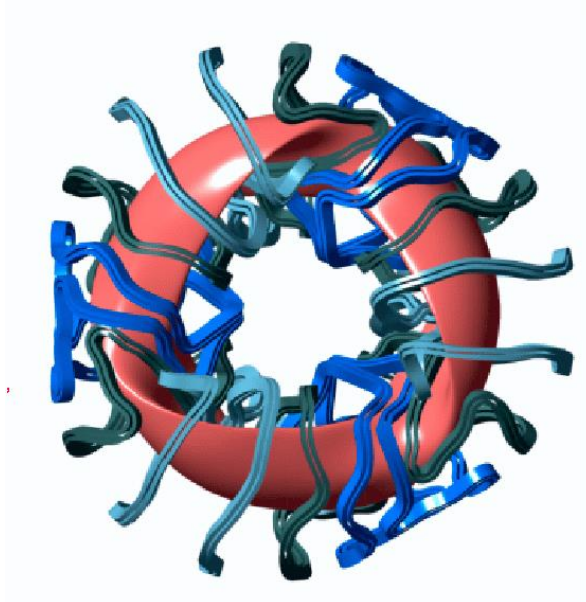
1985–2002:

- $R=2\text{m}$
- Optimalizált sztellarátor koncepció és moduláris tekercsek demonstrálása
- Árammentes konfigurációk
- Tokamakhoz hasonló összetartási idők
- Alap egy szupravezető sztellarátorhoz



További optimalizált sztellarátorok

Az optimalizálás szempontja lehet különböző, így különböző geometriát kaphatunk

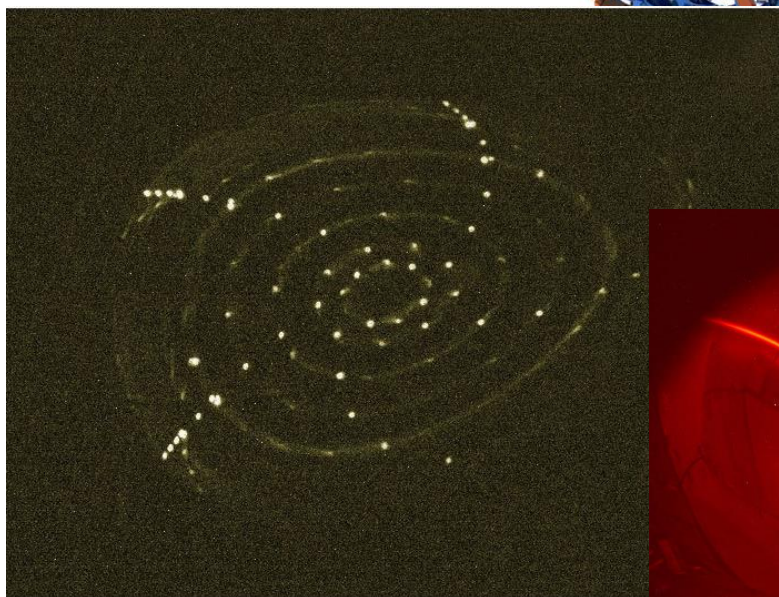
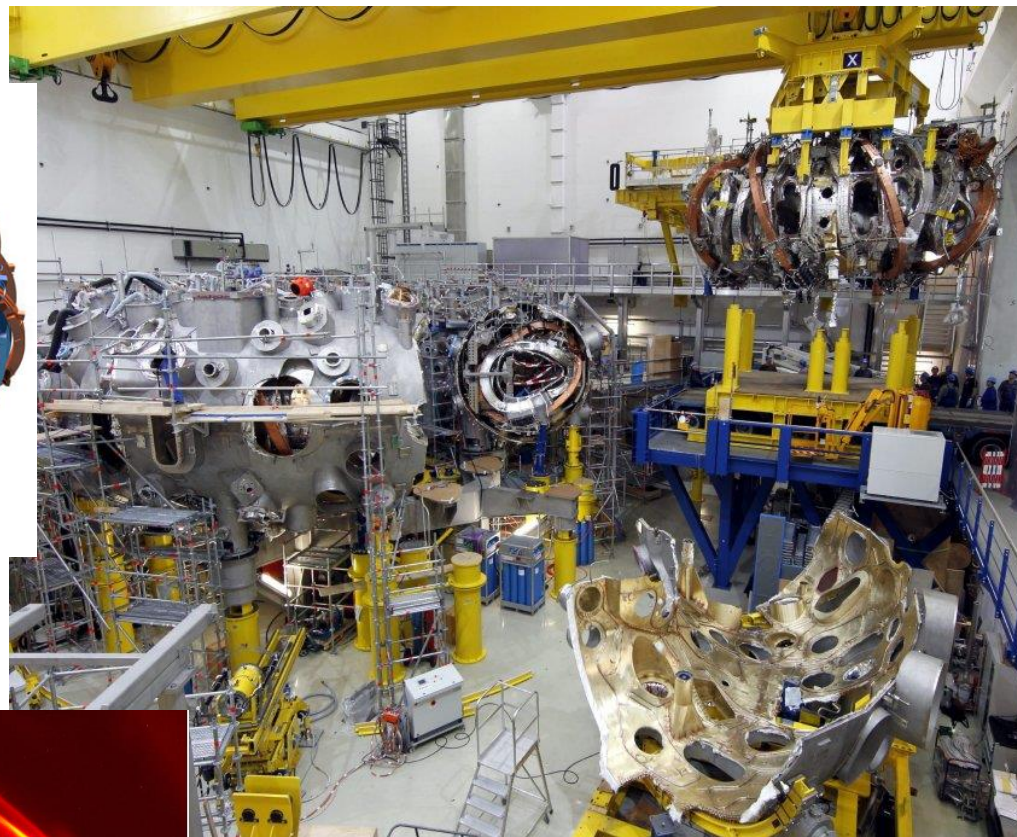
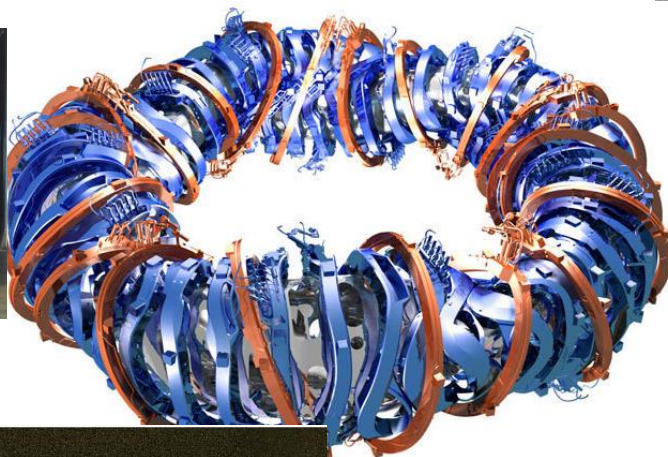


Wendelstein 7-X

A W7-AS folytatása 2-szeres méretben, szupravezető tekercsekkel, további optimalizálással:

Óriási technikai nehézségek a tekercsekkel

Első mérési kapmányok 2016-18



Wendelstein 7-X

A 2017–18-as kísérletekben kipróbálták a berendezés minden egységét rövid mérésekkel: tipikusan 5–10 sec, de max 100 sec. Korlát: nincs aktív hűtés.

A 2021–22-es kampányban már aktív hűtés lesz minden plazma közeli elemen: akár 30 perces kisüléseket terveznek.



A Wendelstein 7 csapat az utolsó 2018-as mérés után. Bekarikázva a magyar résztvevők

Tokamak vs. sztellarátor

Tokamak

- Axiális szimmetria
- Egyszerű geometria
- Plazma áram kell
- A plazma maga csinálja meg a térszerkezetet → instabil lehet
- Alapvetően impulzus működés

Sztellarátor

- Csak kvázi-axiális szimmetria lehetséges
- Nagyon bonyolult geometria
- Nem kell plazma áram
- Konfiguráció szabályozható:
A külső mágneses tekercsek csinálják a teret
- Alapvetően alkalmas állandó működésre
- Kevésbé kompakt mint a tokamak

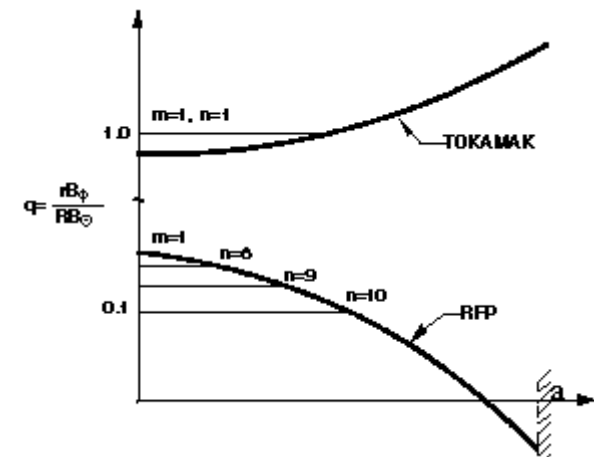
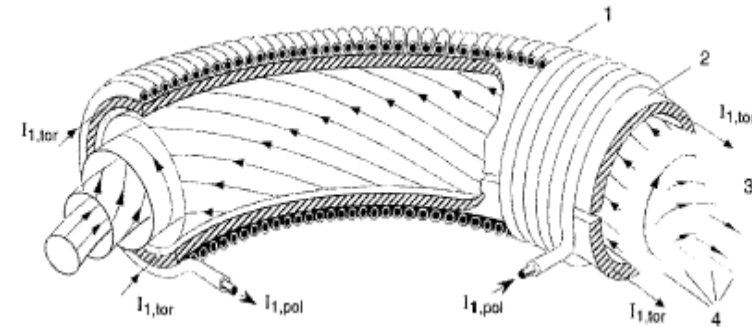
Reversed Field Pinch

Erős nyírás a mágneses tér irányában előnyös a stabilitáshoz:

Nyírás nélkül erős mágneses tér kell a kink instabilitások elnyomásához → tokamak

Kísérletileg azt találták, hogy a plazma egy olyan erősen nyírt állapotba relaxál, mikor a mágneses tér előjelet vált a plazma szélén: Reversed Field Pinch

- Gyenge toroidális tér
- Erős poloidális tér
- Nagyon magas béta: gazdaságosabb lenne erőműnek
- Sok racionális felület: helyi MHD instabilitások
- Instabilitások kaotikus kölcsönhatása



RFX

Az RFX kísérlet (Pádua) egy nagy RFP:

- Aktív MHD instabilitás szabályzás
- Quasi-single helicity state:
a plazma egy sztellarátor-szerű konfigurációba áll be.



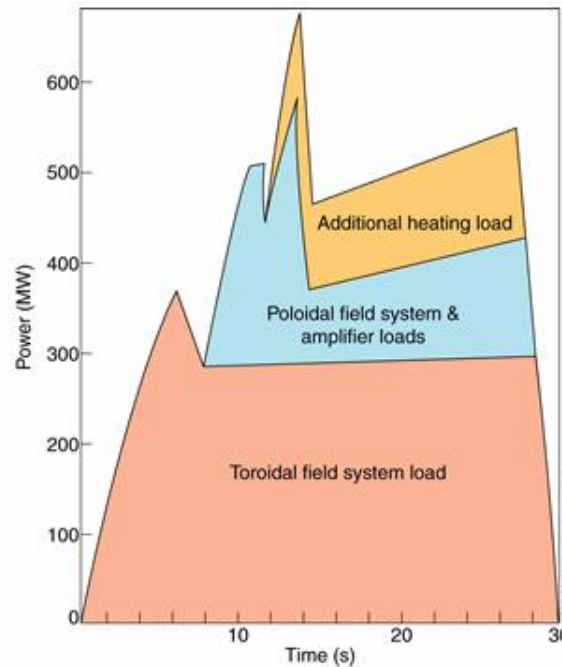
Energetika

A mai berendezések energiaigénye $10 \cdots 800$ MW \rightarrow impulzus üzem

Energiatárolás:

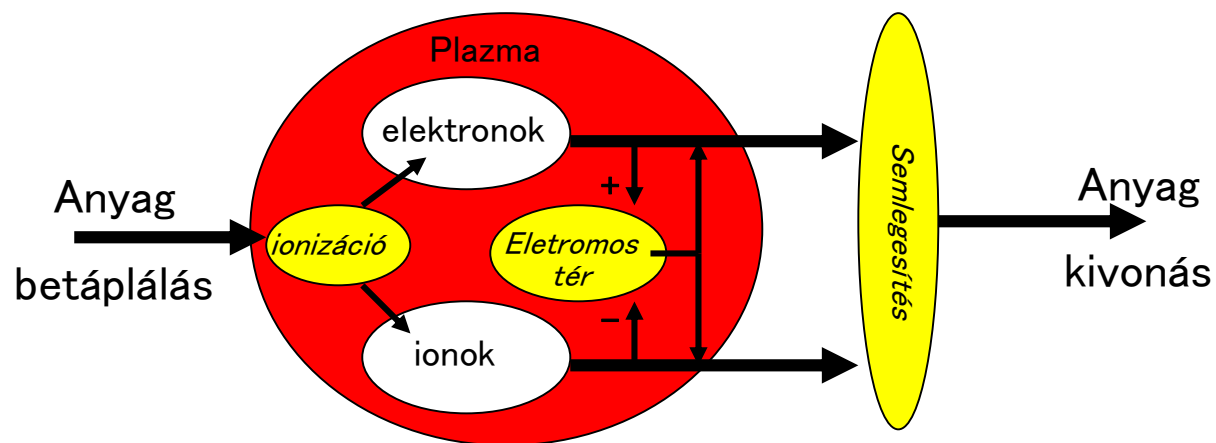
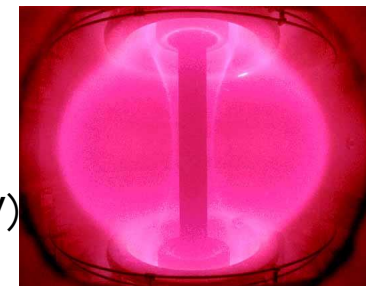
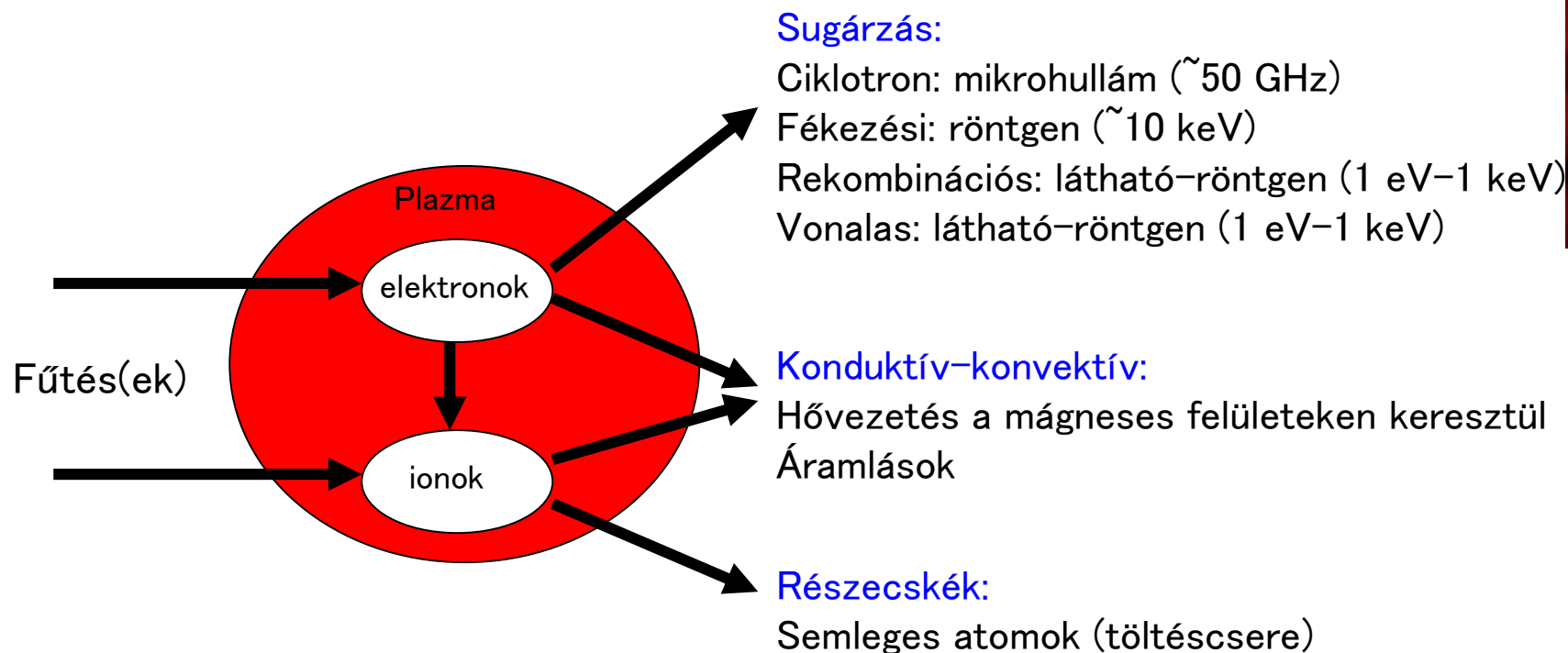
- Kondenzátorok (régii kisebb berendezésen)
- Lendkerék

Energiaszabályzásra,
elosztásra standard ipari
technológiák



Energia- és anyagháztartás

A fűtés(ek) és veszteségek különböznek az elektronokra és ionokra:



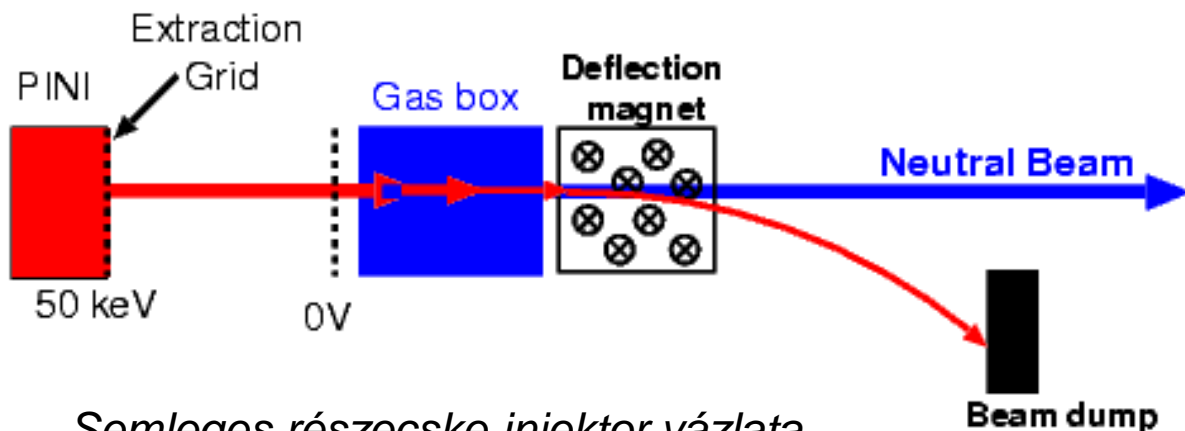


Semleges részecske fűtés

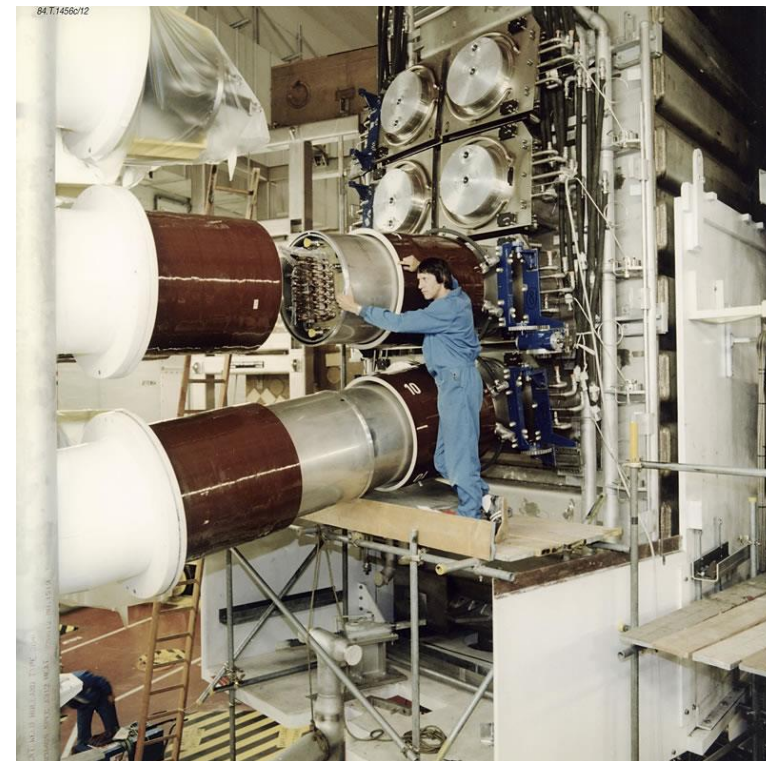
Fűtés:

Ohmikus fűtés $R \sim T_e^{-3/2} \rightarrow$ kevés a reaktorhoz

Semleges részecske (NBI) fűtés

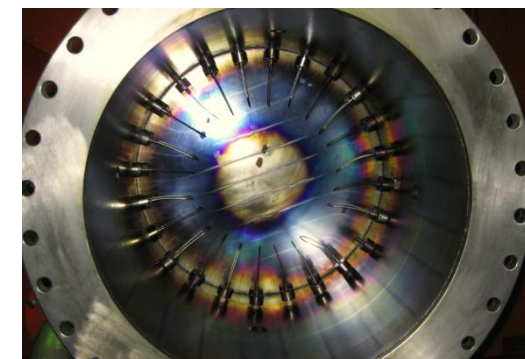


Semleges részecske injektor vázlat



Ionforrás (PINI):

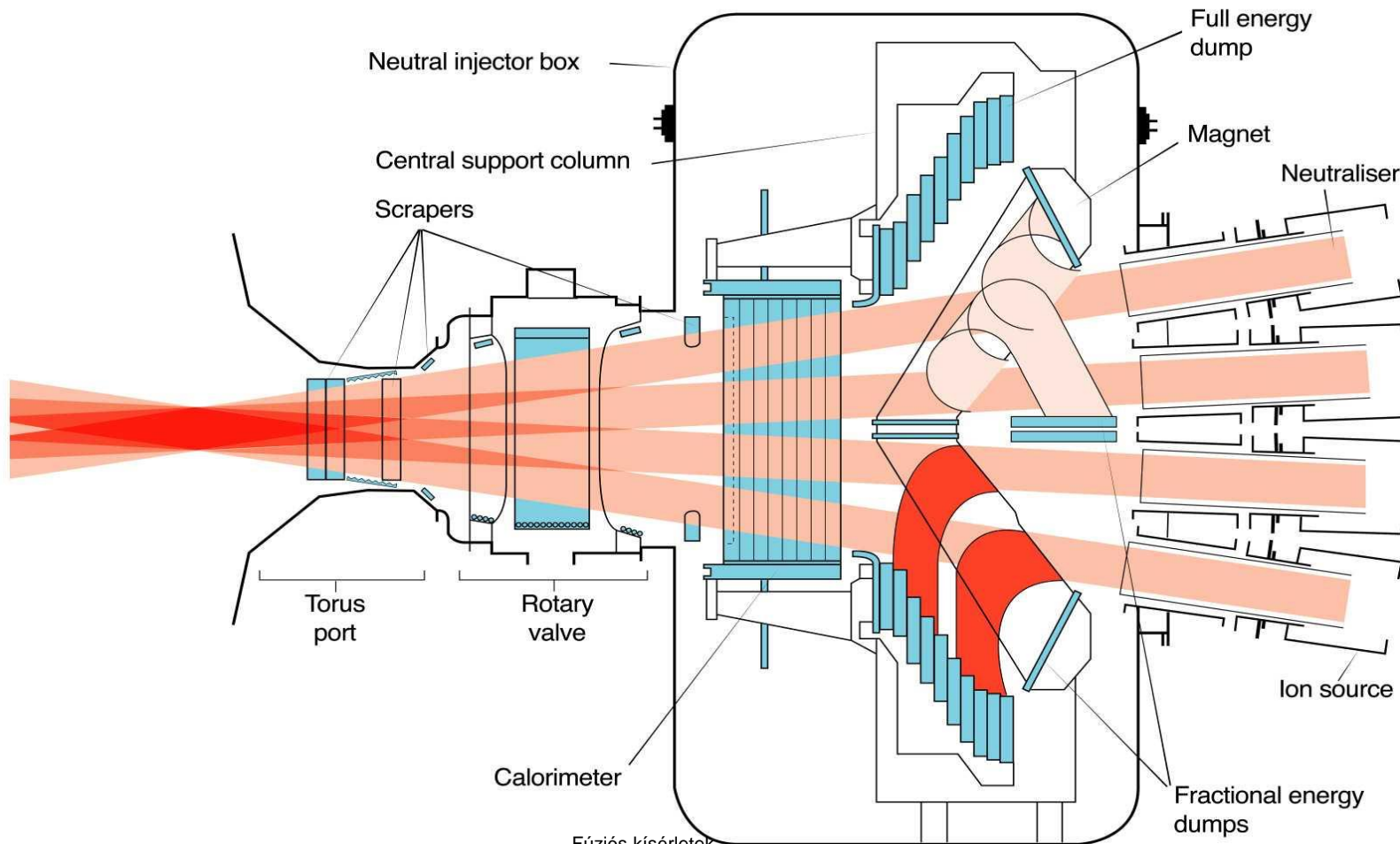
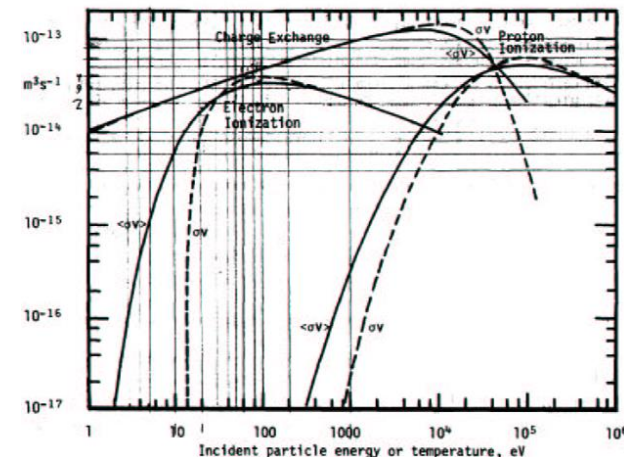
- RF hajtott alacsony hőmérsékletű plazmakisülés
- Ionokat rácson keresztül húzzák ki.
- Elektronokat izzószálak pótolják
- Mindig többféle ion van:
 H^+ , H_2^+ , H_3^+ (vagy megfelelő D, T)
- Gáz cserélhető





Semlegesítés

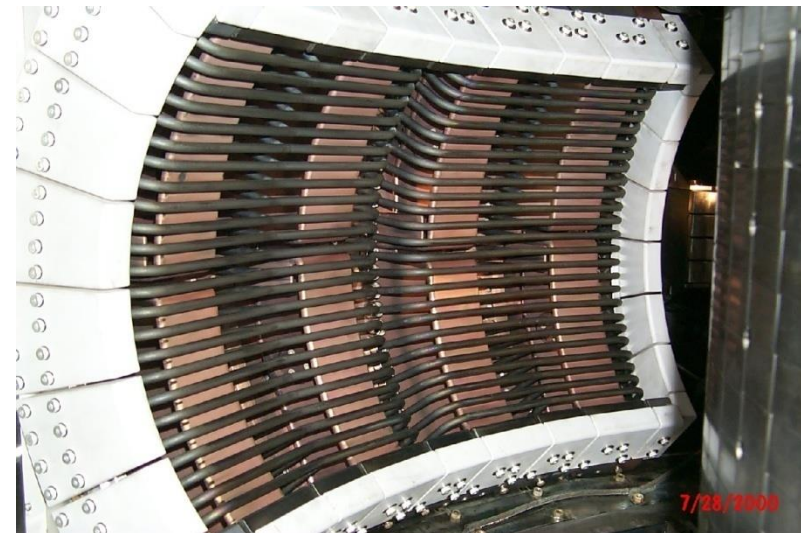
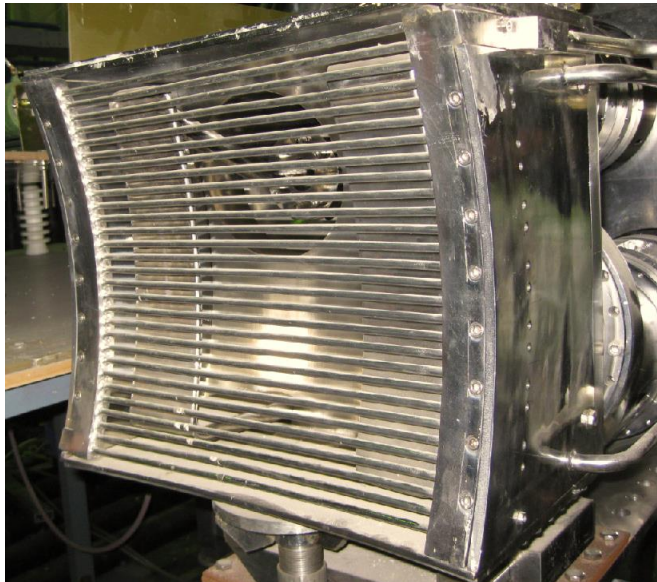
- Semlegesítés gázcellában Charge-Exchange folyamattal
- Hatásfok: 50–80%, 100 keV felett gyakorlatilag 0
- A maradék ionok energiáját el kell vezetni
- Különböző energiájú ionok különböző helyen jelennek meg
- A semlegesített gázt el kell szívni: kriopumpa



ICRH

Az ionok ciklotron frekvenciájával rezonáló hullámok elnyelődhetnek a plazmában és fűthetik: **Ion-ciklotron rezonancia (ICRH):**

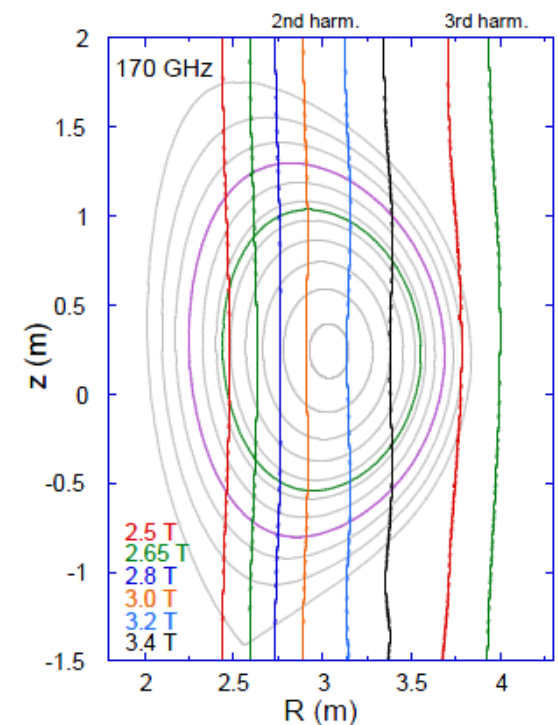
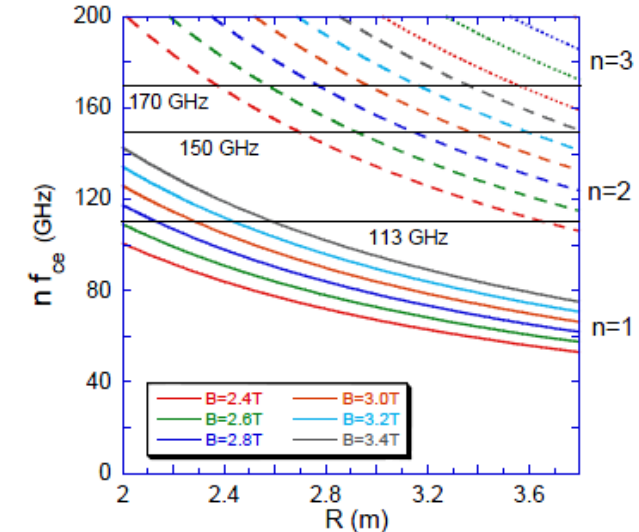
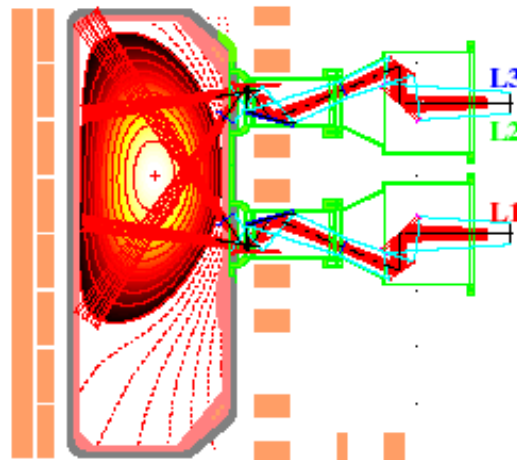
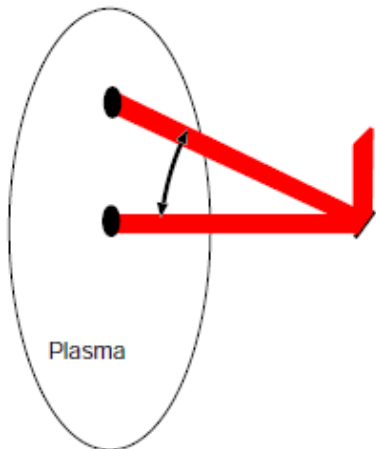
- Frekvencia: 10–50 MHz
- hullámhossz: >10 m \rightarrow koaxiális kábeles táplálás
- Hurok antenna a plazma közelében
- Hullámimpedanciával kell lezárni: plazma változásai változtatják az impedanciát
- Nagy elektromos terek: kisülések \rightarrow Faraday kalitka



ECRH

Az elektronok ciklotron frekvenciájával rezonáló hullámok elnyelődhetnek a plazmában és fűthetik: **Elektron-ciklotron rezonancia (ECRH):**

- Frekvencia: 70–150 GHz
- Hullám terjed a plazmában ha sűrűség nem túl nagy
- $Bt \sim 1/R \rightarrow$ lokális rezonancia
- Helyi abszorpció: lokális fűtés
- Hullámhossz 2–5 mm:
 - hullámvezetőben vezethető
 - kvázioptikai eszközökkel irányítható (tükrök)



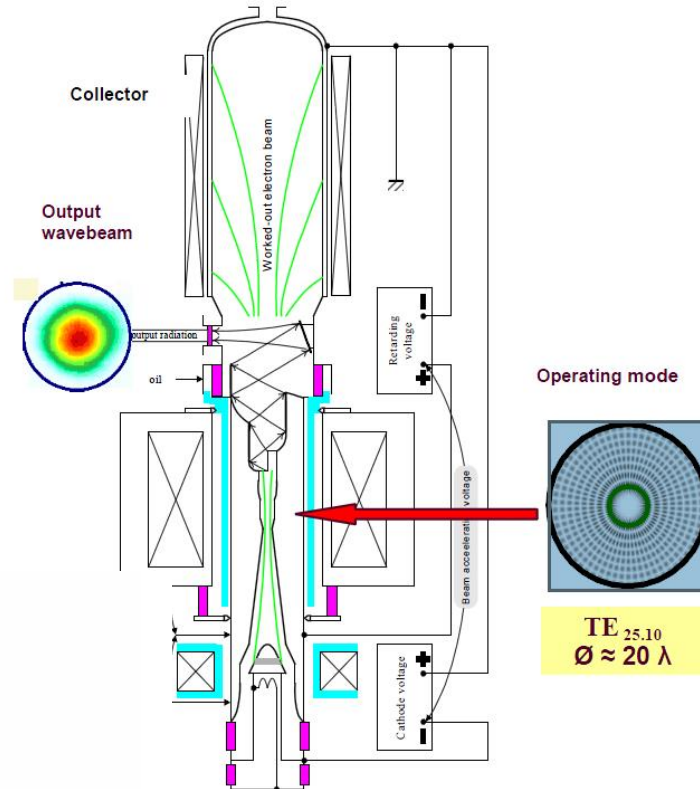
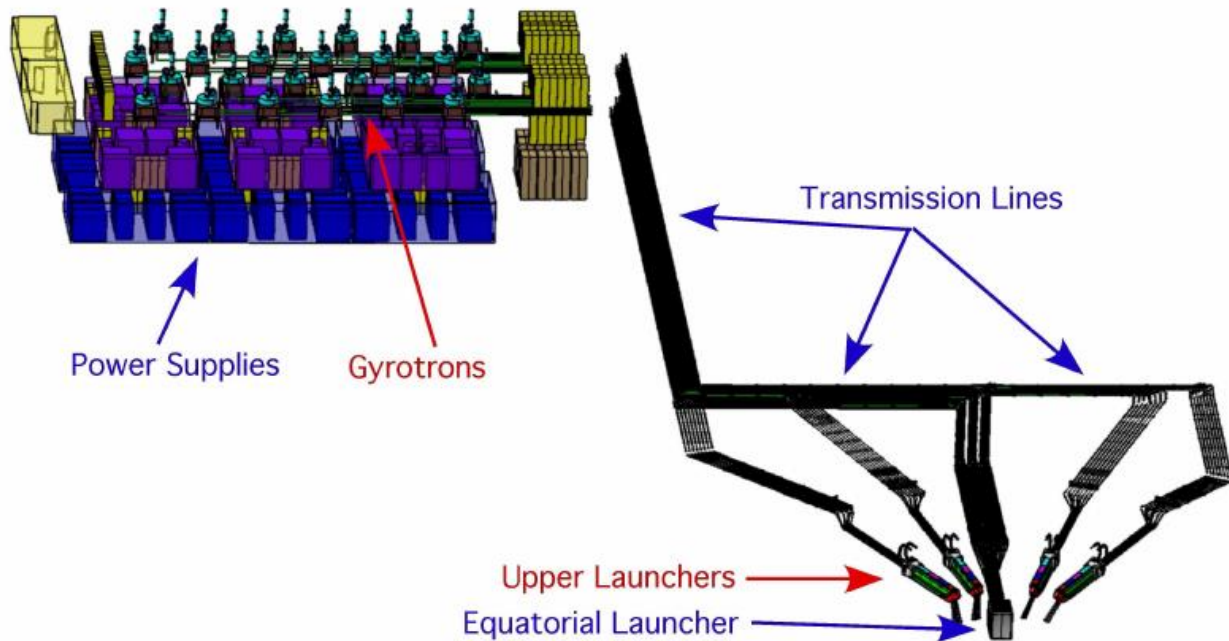
ECRH technológia

Forrás: girotron

Elektronnyaláb energiáját alakítja hullámmá

1 (2) MW/egység

Több egységet kombinálnak egy berendezéshez



Anyagutánpótlás

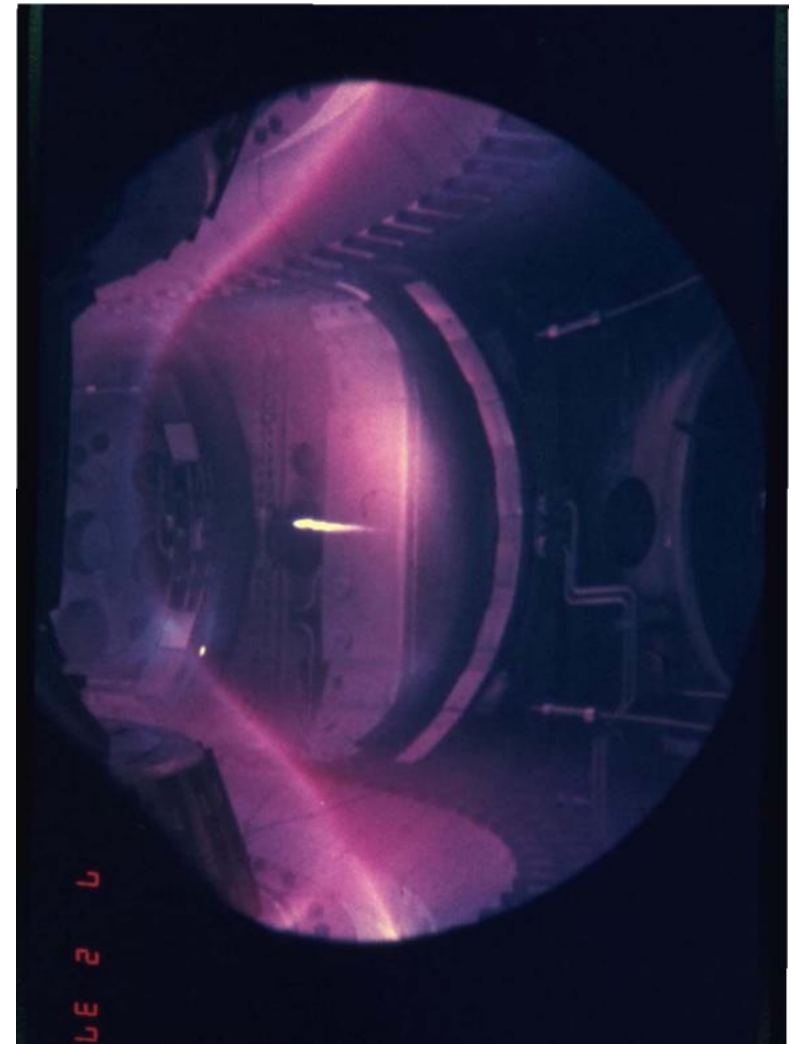
Gázbeeresztés (nem hatékony)

Hidrogén jég (pellet) belövés: $v = \text{km/s}$, $f = 10\text{Hz}$

Pellet abláció: a pelletet a saját gázfelhője védi

Pellet gyorsítók:

gázáram (fűvócső)
centrifuga





A plazmakisülés indítása

Vákuum, mágneses tér

Gázbeeresztés: $\sim 10^{-4}$ mBar

Tokamakban:

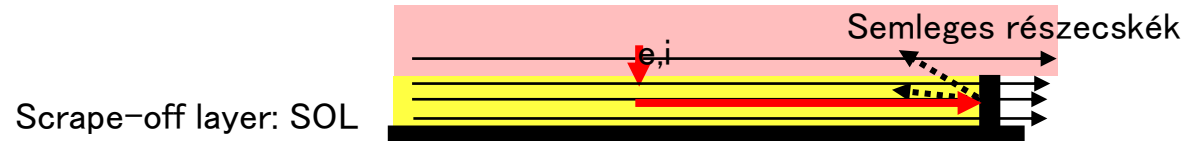
- központi szolenoid hurokfeszültséget indukál
- Átütés a gázban (breakdown), áram megindul
- Mágneses térnek nem szabad vertikális komponense legyen
- Áram megcsinálja a helikális térszerkezetet: bezárul a tér
- Áram és vezérlőterek lassan mennek fel
- Áram fűti a plazmát, vezetőképesség javul
- Kellően magas hőmérséklet esetén NBI, ECRH, ICRH

Sztellarátorban:

- Gyenge ECRH nyaláb ionizálja a plazmát
- ECRH teljesítmény fel
- Amint megfelelő hőmérsékletű a plazma NBI, ICRH

Scrape-Off Layer

A nyílt erővonalakra kikerülő részecskék gyorsan elmennek a falig



→ a SOL-on keresztül a sűrűség és hőmérséklet exponenciálisan esik
Atomi folyamatok (rekombináció, ionizáció, sugárzás) jelentősek

Az elektron-ion sebességkülönbség áramot eredményez a falra:

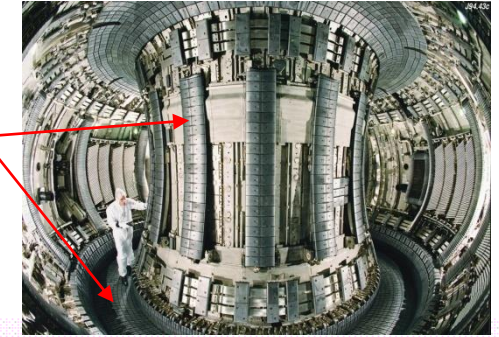
- Töltésszétválás
- Potenciál a fal közelében (sheath): ionokat gyorsítja
- Becsapódó ionok részecskéket váltanak ki a falból

A SOL egy nagyon bonyolult réteg ahol atomfizika, szilárdtestfizika és plazmafizika találkozik

Plazma-fal kölcsönhatás

A plazmának kitett anyagok kiválasztása kritikus.

Jelenleg C alapú (CFC) burkolatok vannak a berendezéseken



Az utóbbi években kiderült, hogy C burkolat reaktorban nem lehetséges:

- Kémiai porlasztás (chemical sputtering)
- Lerakás laza CH réteggént → tríciumos por

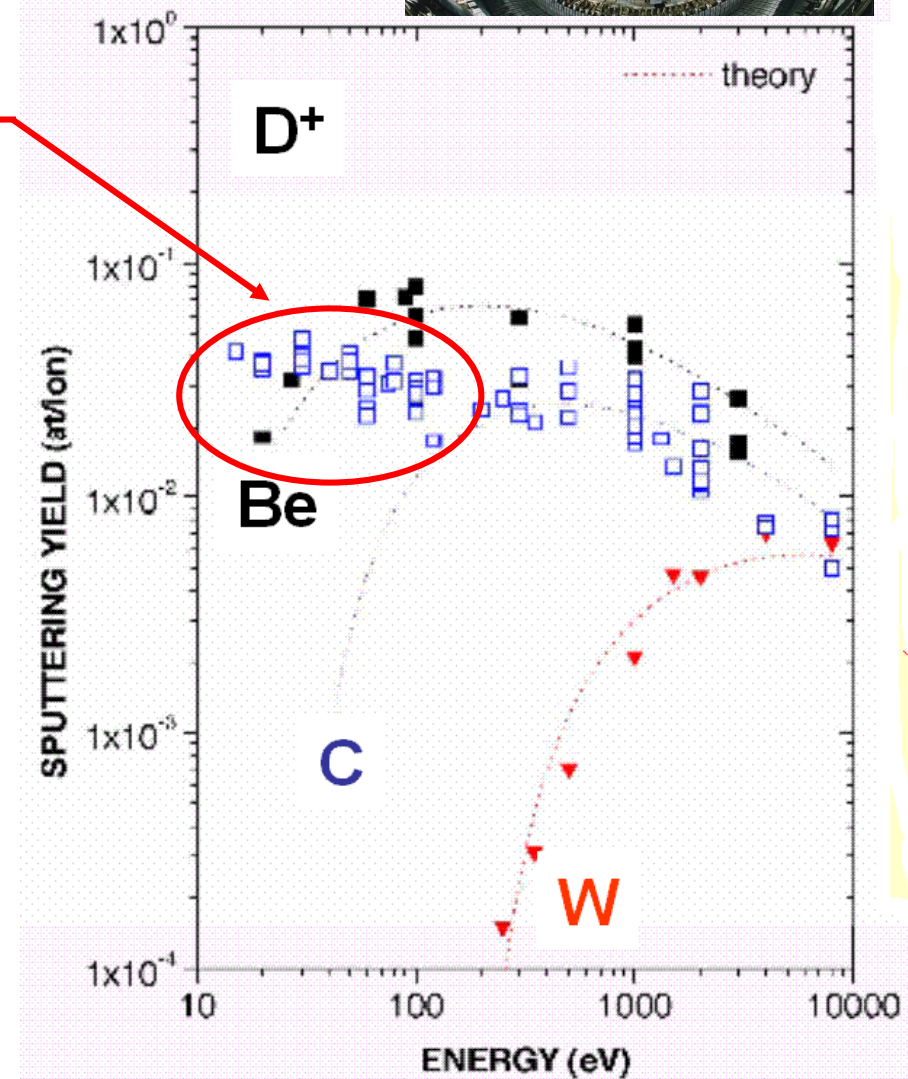
Más lehetőségek:

Wolfram:

- + Magas olvadáspont
- + Alacsony porlódás
- Nagy rendszám (sugárzás)
- Mi lesz ha megolvad a felülete?

Berillium:

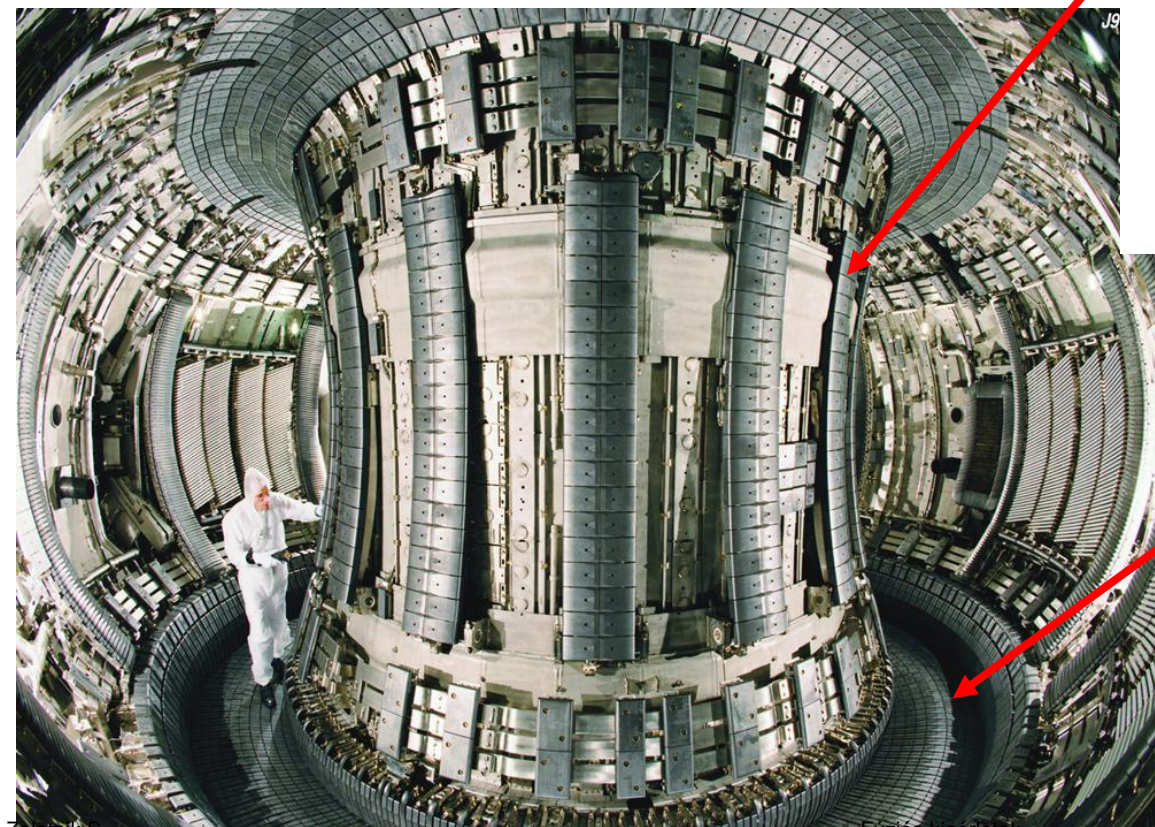
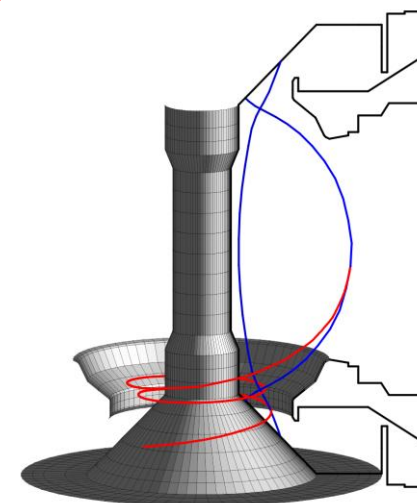
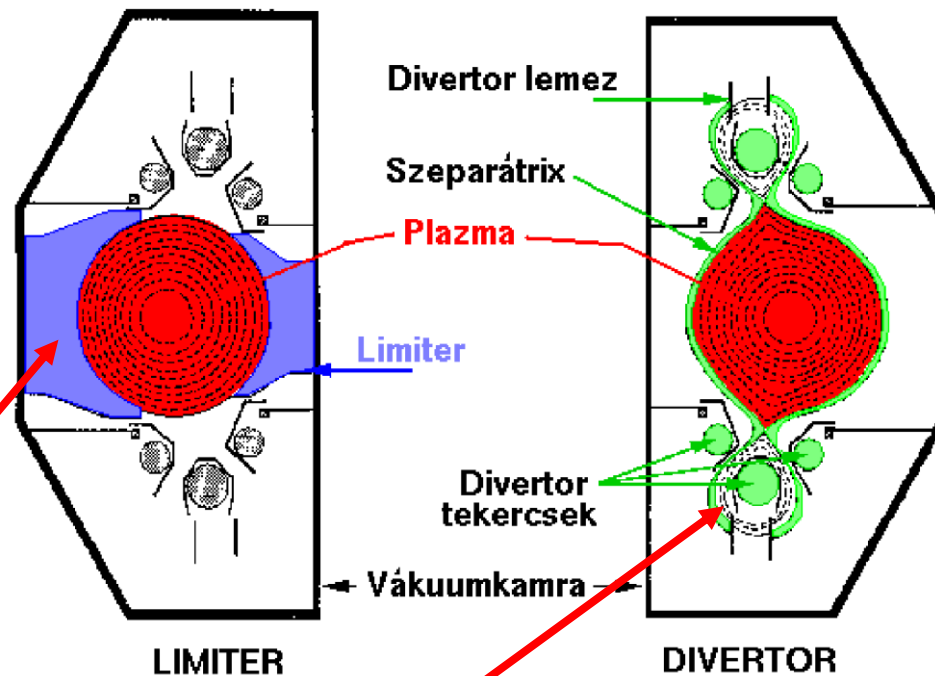
- + Kis rendszám (sugárzás)
- Nagy porlódás
- Alacsony olvadáspont
- Drága, mérgező



A plazma-fal kölcsönhatás szabályzása

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

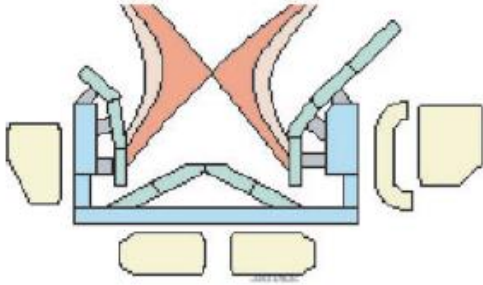
Kontrollált plazma-fal kölcsönhatás:
divertor



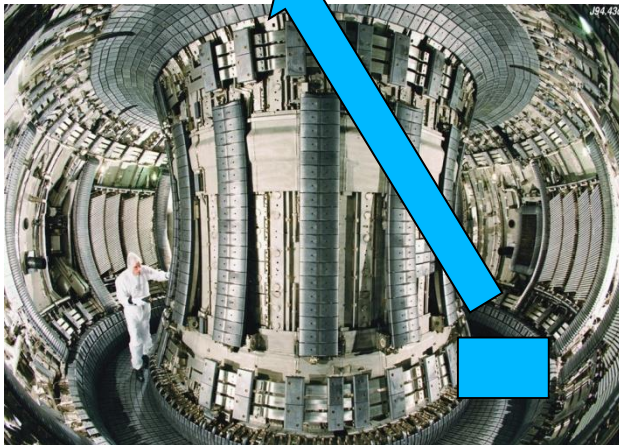
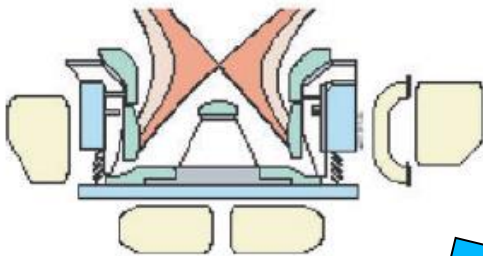
Divertor konfigurációk

Igazi divertor variációk:
Kompromisszum a lehetséges plazma
alakok és a jó szívás között

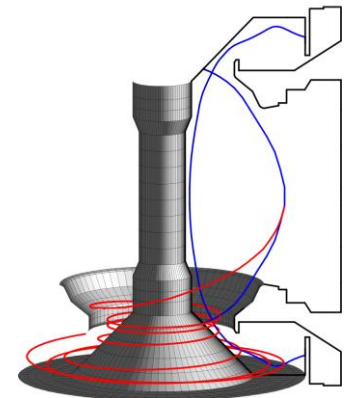
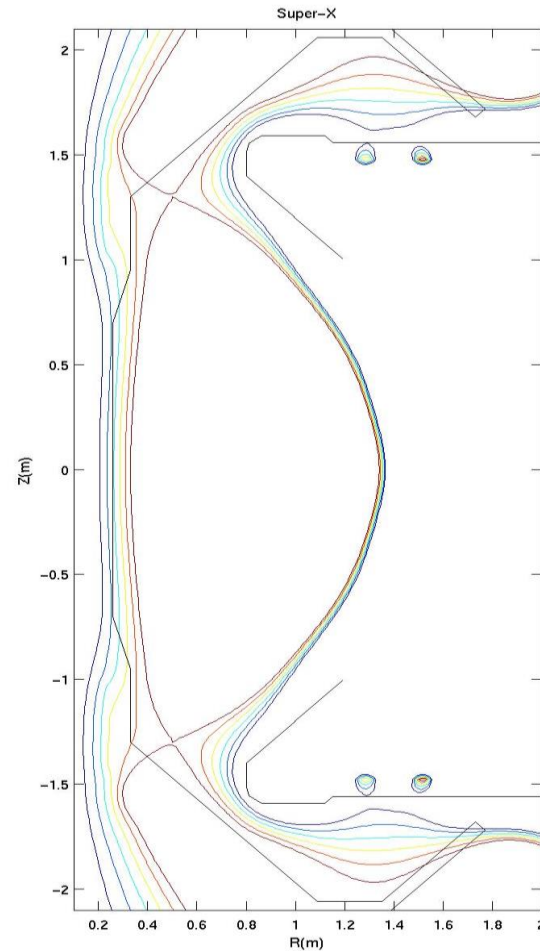
JET MkIIA Divertor



JET MkIIGB Divertor



Egy egzotikus új elgondolás:
Super X divertor



Divertor a sztellarátorban?

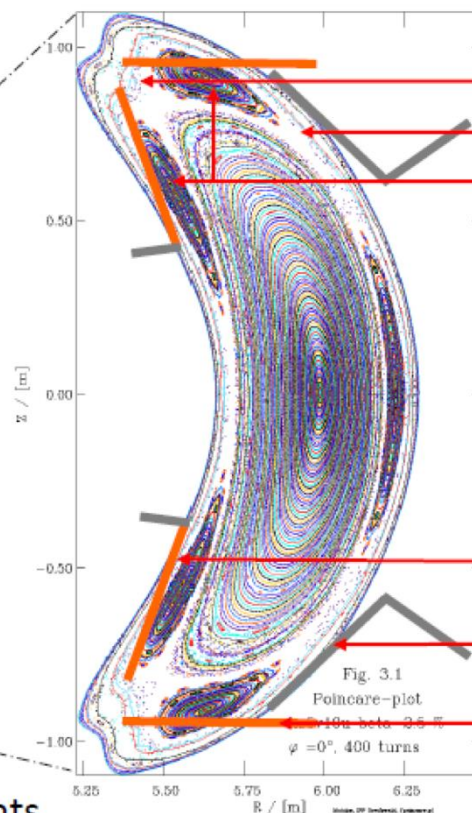
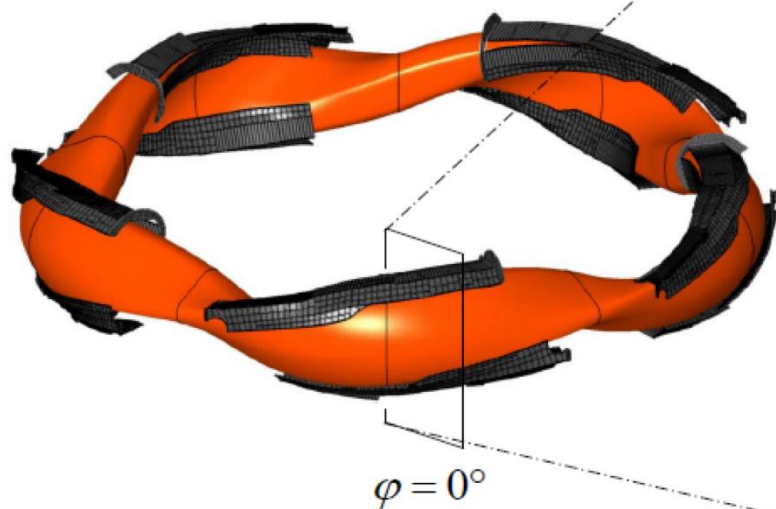
Egy sztellarátor nem axiálisan szimmetrikus, tehát nem lehet benne olyan divertort csinálni mint a tokamakban.

Mágneses sziget divertor: a plazma szélén egy sziget sort kelt maga a sztellarátor tér. A szigeteket helyenként elvágják a divertor lemezekkel.

The island divertor concept



10 island divertor modules
@ bean-shaped cross sections



X-point

ergodic region

islands

total target area 19 m²

heat flux ≤ 10 MW/m²

connection lengths ≤ 500 m

incidence angles 2-3°

vertical target

baffle

horizontal target

initial setup with un-cooled graphite elements
future setup with water-cooled CFC elements

Divertor védelem

A divertor óriási hőterhelésnek lehet kitéve:

Mai berendezéseken 1–10 MW/m²

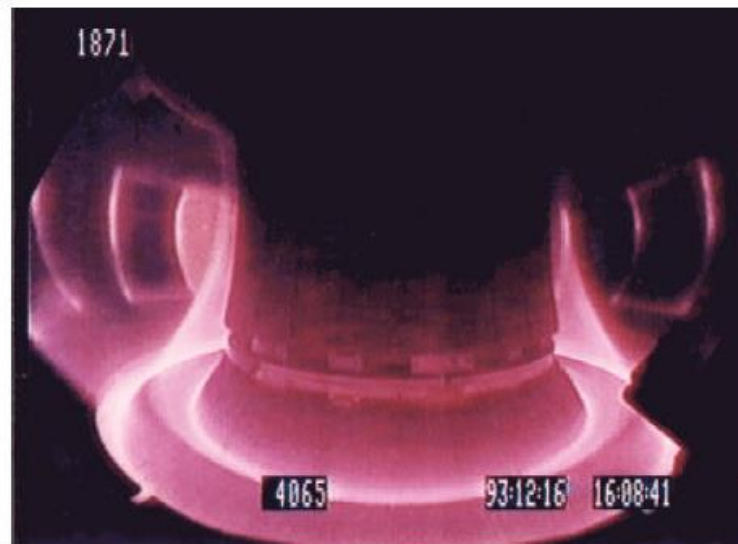
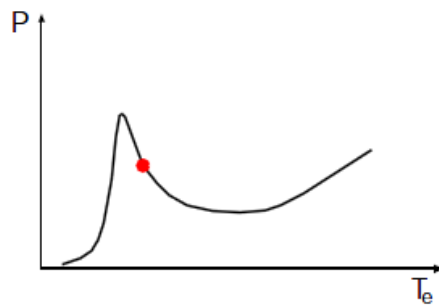
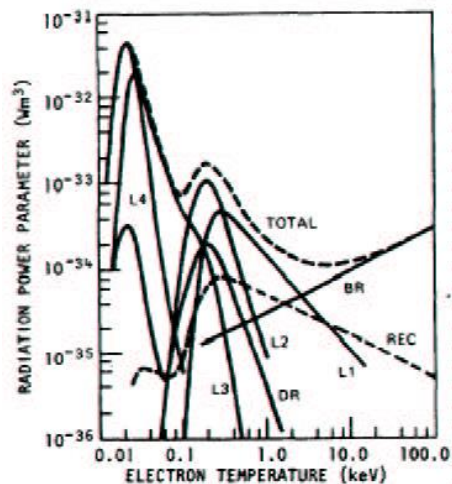
A divertor felülete: $\sim R$

A hőterhelés: $\sim R^2$ (legalább)

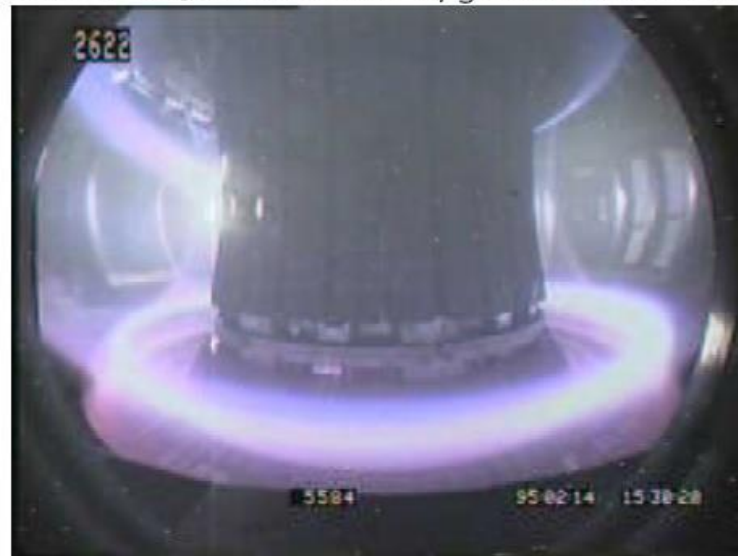
→ nagyobb berendezésen a helyzet romlik

A divertort valahogyan védeni kell:

- Beeső ionok szén atomokat váltanak ki
- A sugárzás az ionizációs és sugárzási folyamatok bonyolult függvénye
- Vannak tartományok ahol $dP/dT < 0$
- Itt a plazma le tudja sugározni az energiát
→ detached plasma



Divertor kisülés az Asdex Upgrade tokamakban.

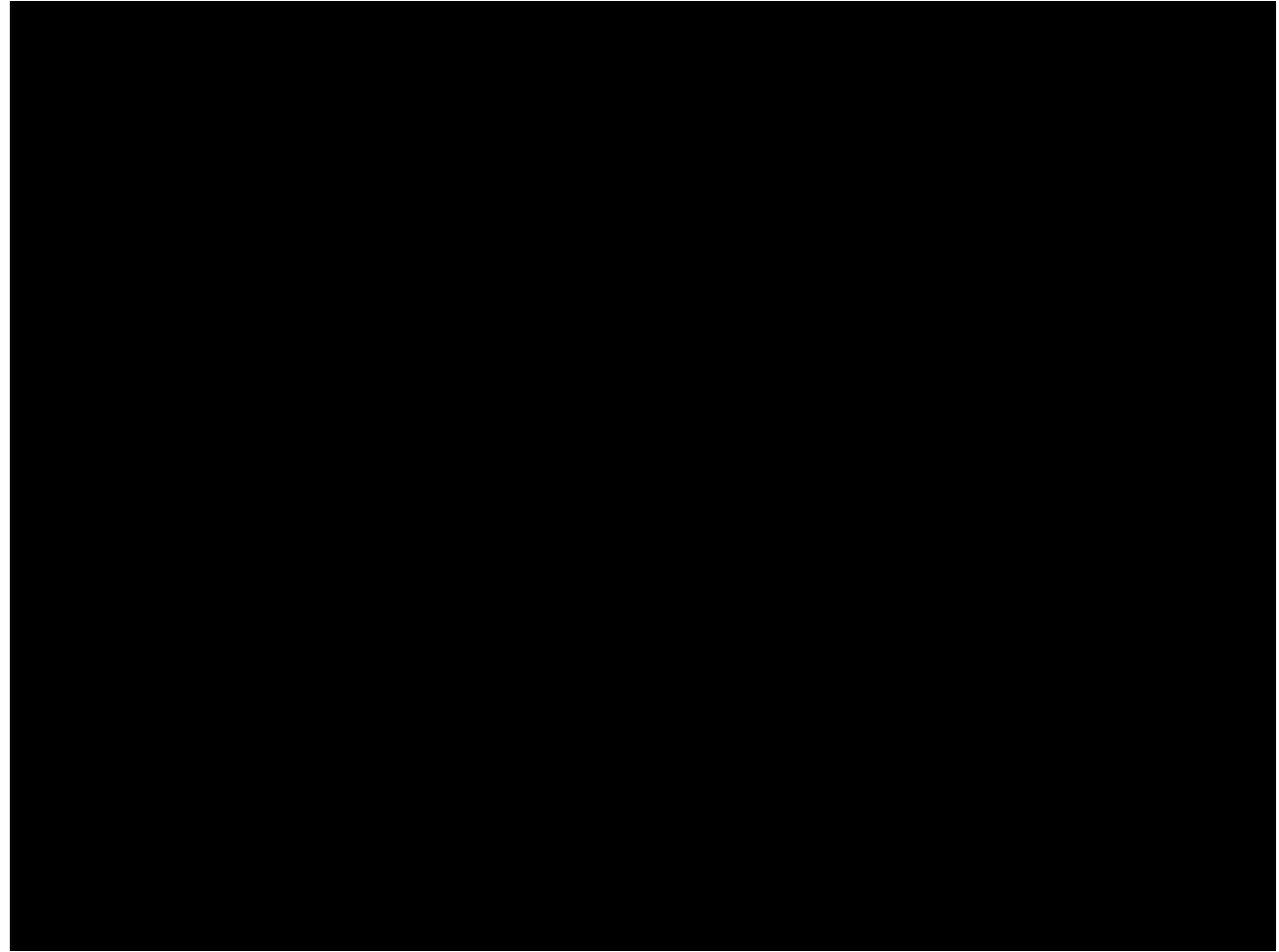
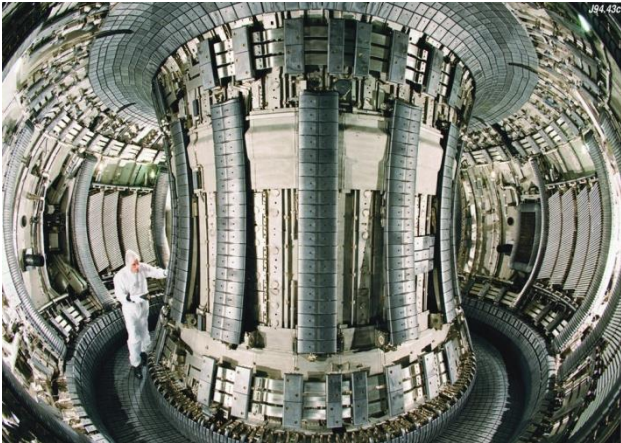


Detached plasma az Asdex Upgrade tokamakban.

Ilyen sugárzó divertor előidézhető gázbefújással is (pld: N, Ne, CH₄)

Egy plazmakisülés

Egy plazma élete a JET tokamakban



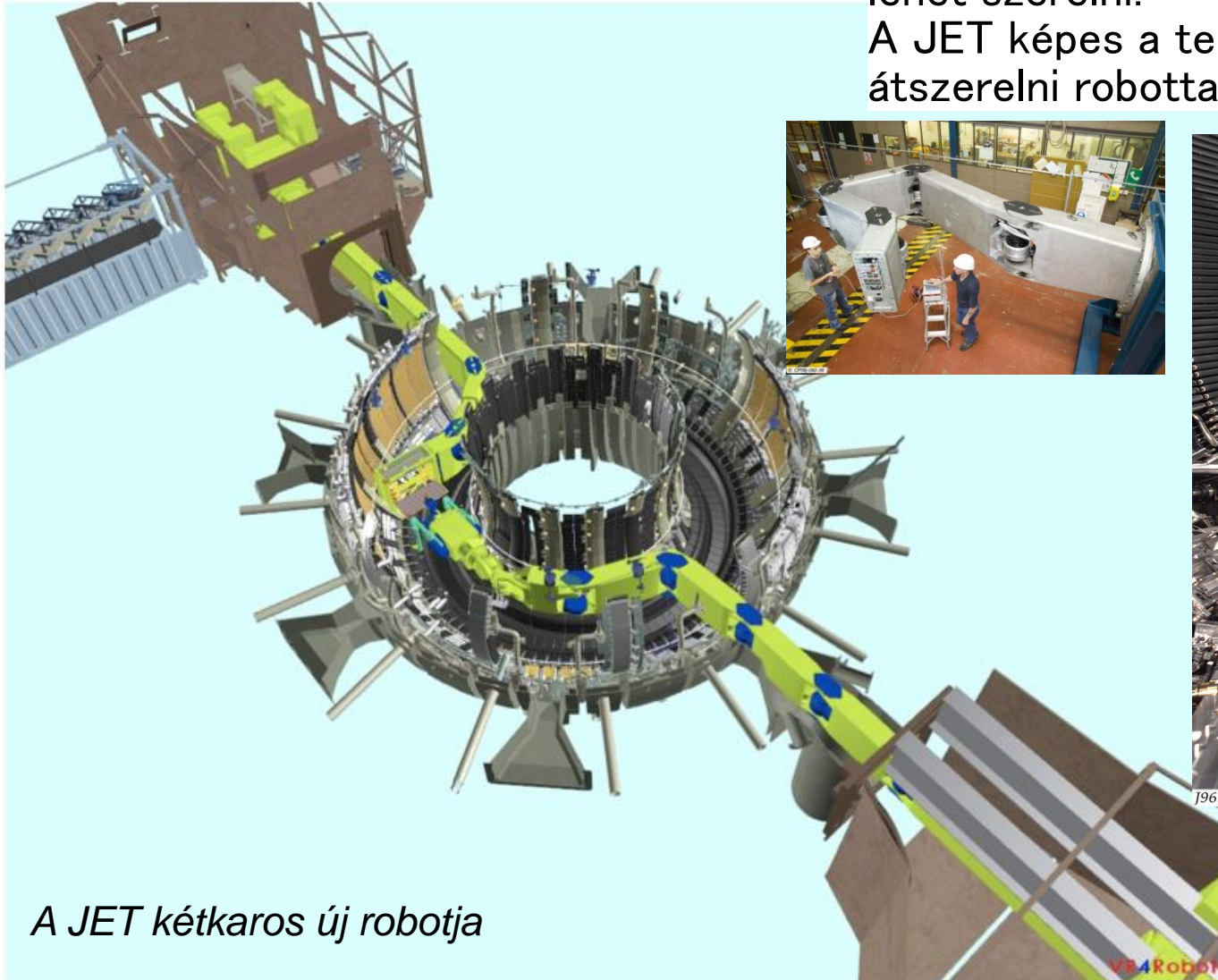
Trícium, távműködtetés

A tokamakok nagy része csak D plazmával foglalkozik.

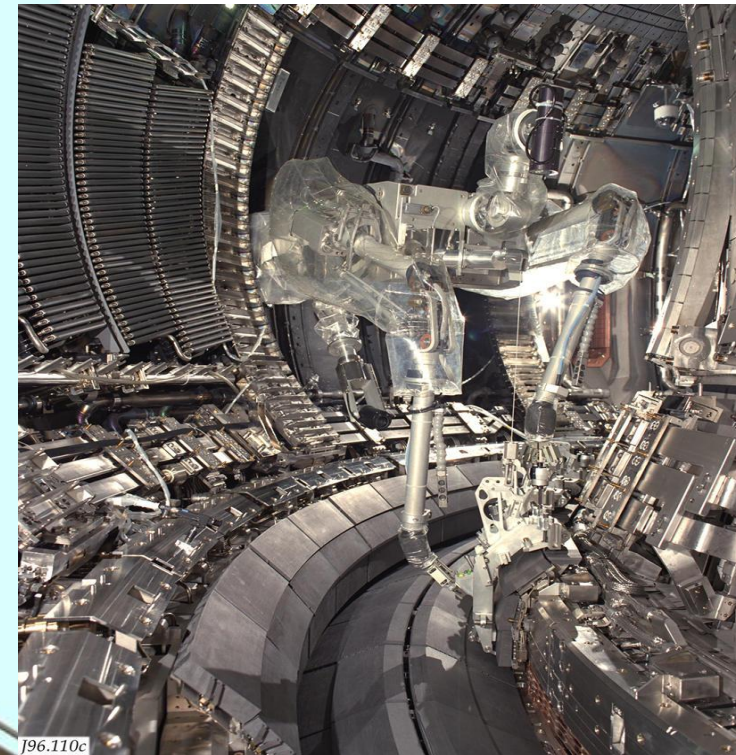
T kompatibilis berendezés: **JET**

T szennyezett környezetben csak robotokkal lehet szerelni:

A JET képes a teljes belső szerkezetét átszerelni robottal



A JET kétkaros új robotja



Divertor szerelés a JET-en

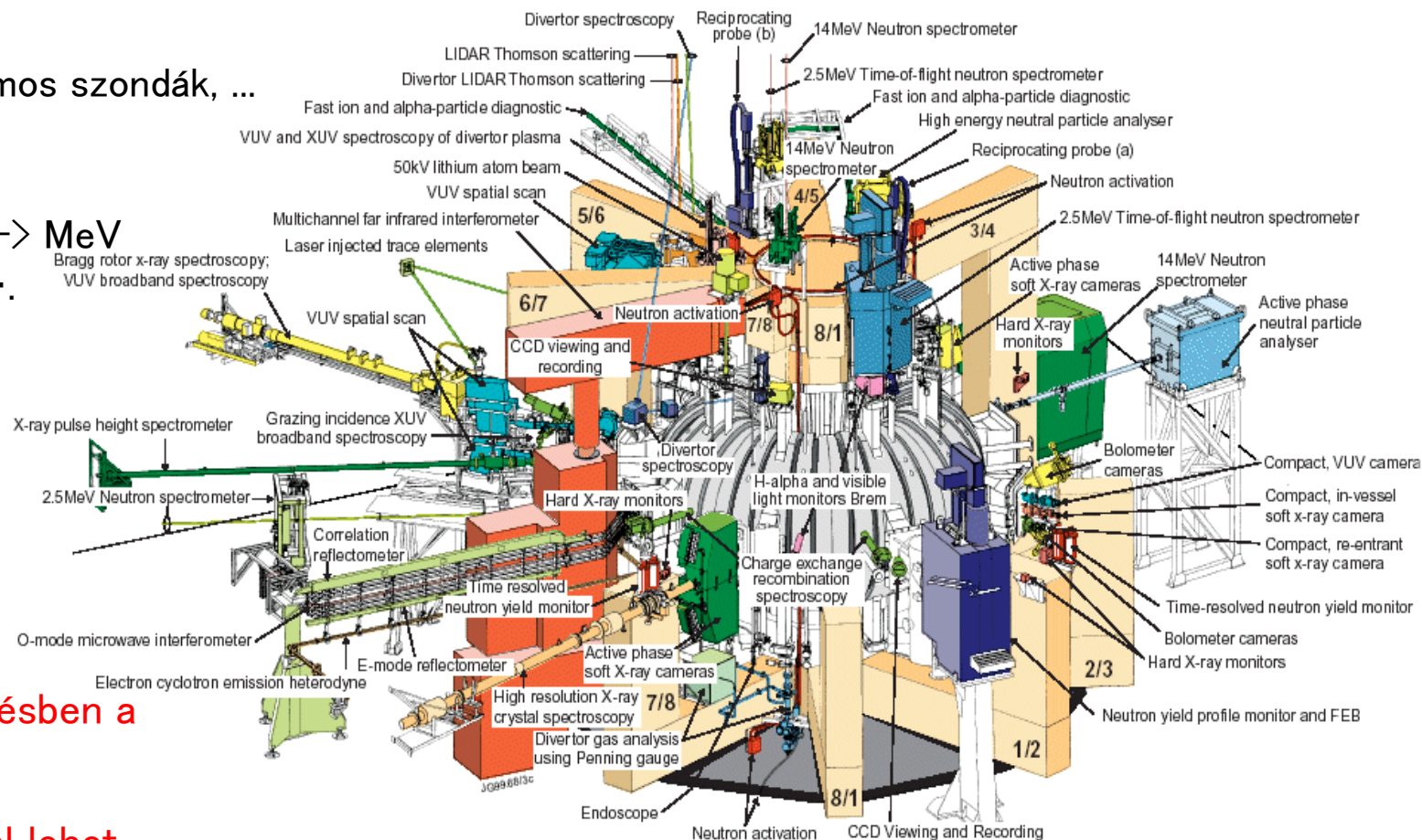
Diagnosztika

A fúziós kutatások első 20 évében a plazma belsejéről csak igen kevés információ volt. A szokásos fizikai mérőműszerek nem alkalmasak egy 10^6K hőmérsékletű plazmában mérni.

Speciális mérési eljárások kellene: plazmadiagnosztika

Ehhez szinte az egész fizika eszköztárát használjuk:

- Elektromágneses hullámok, sugárzás: $0\text{Hz} - \text{MeV}$
- Mágneses hurkok, elektromos szondák, ...
- Spektroszkópia, lézerek
- Atomnyaláb szondák:
termikus \rightarrow MeV
- Részecske analizátorok ...



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