



A MAGYAR
TUDOMÁNY
ÜNNEPE

MTA

HUN-REN
Magyar Kutatási Hálózat



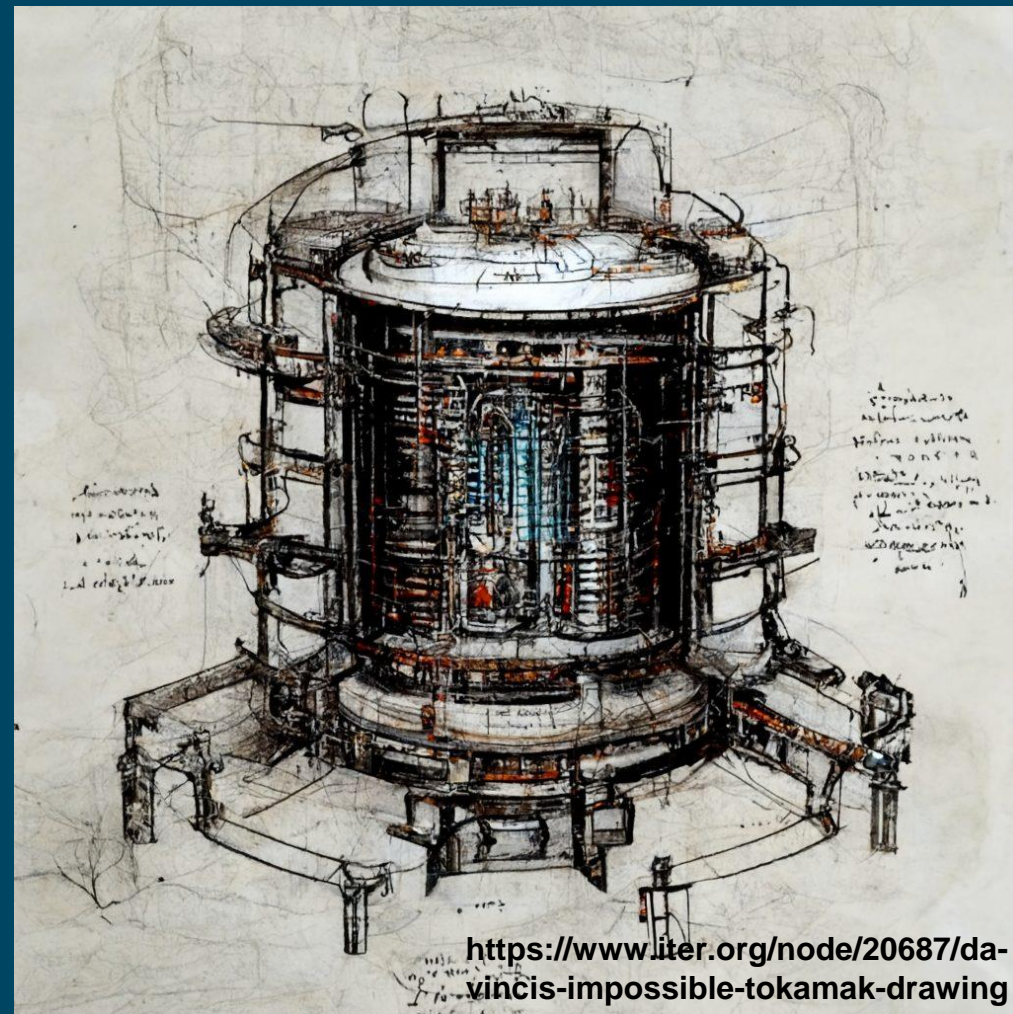
Energiatudományi
Kutatóközpont



Az „út” a fúziós erőműhöz, avagy ITER-en innen és túl

Dunai Dániel

plazmafizikus, projektvezető ITER Optikai Pelletdiagnosztika fejlesztés



LA MACCHINA FUSIONE –

Leonardo Da Vinci ihletéssel

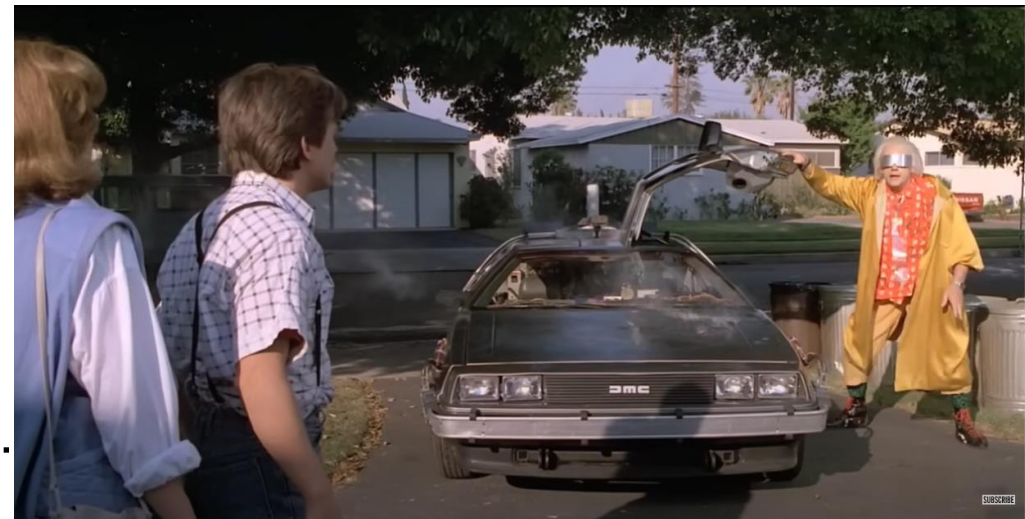
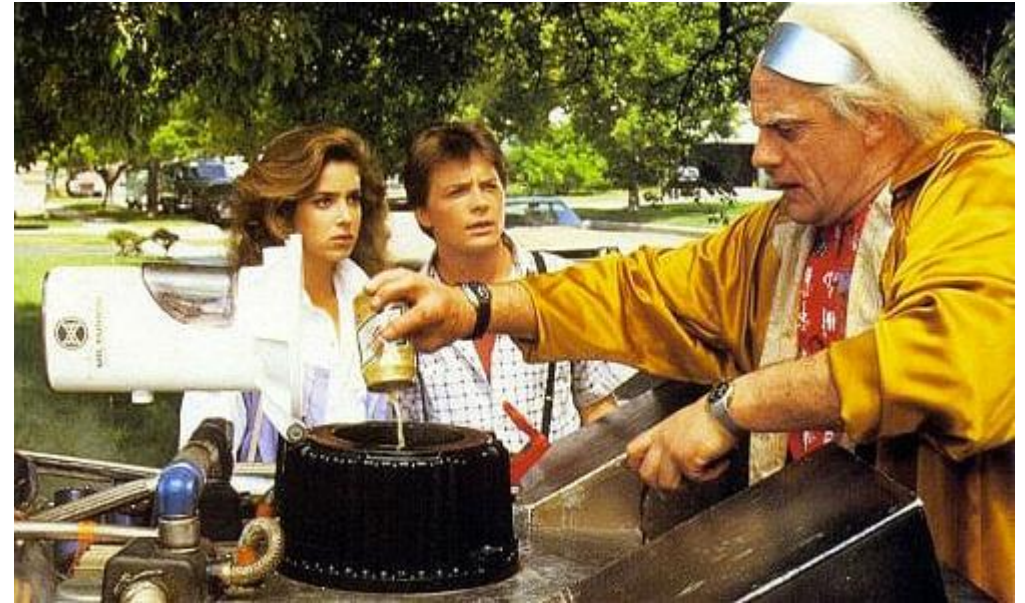
1510 után (jóval)

Még nem tartunk itt

És a jelenlegi tudásunk szerint nem is lesz hasonló eszköz nagyon-nagyon sokáig....

De akkor hol tartunk és mikorra várható a kereskedelmi fúziós energiatermelés?

Nézzük meg milyen utat jártunk be és merre tartunk..





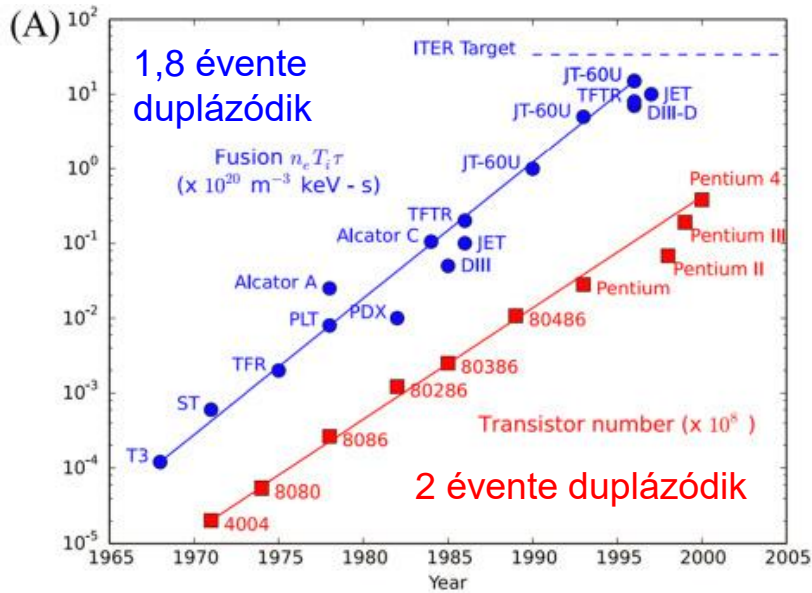
A MAGYAR
TUDOMÁNY
ÜNNEPE

MTA

HIUN
REN



A fúziós kutatások és eredményei



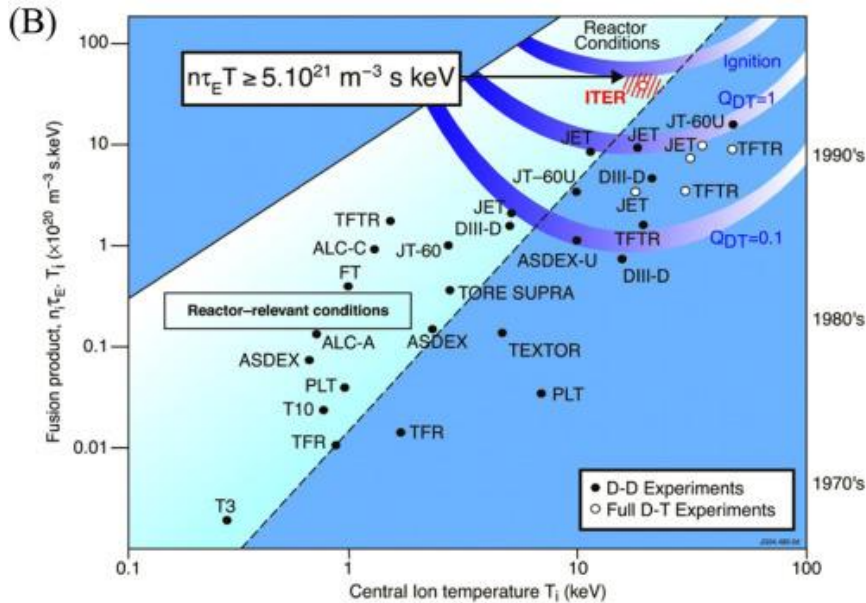
Hogyan mérjük a haladást?

A közös mérték:

fúziós hármás szorzat =

= sűrűség x hőmérséklet x energiaösszetartási idő

Moore-törvény jelzi korunk gyors fejlődését



A JET után alig építettünk új nagy berendezést

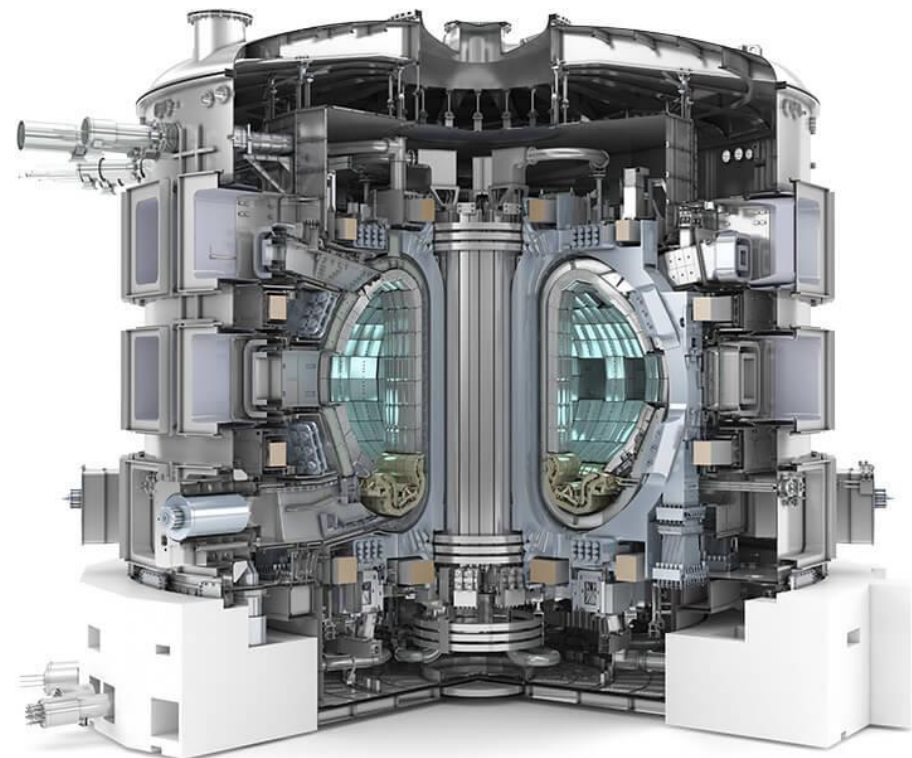
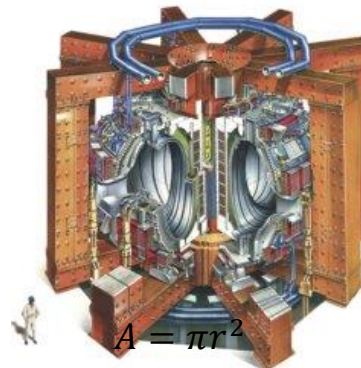
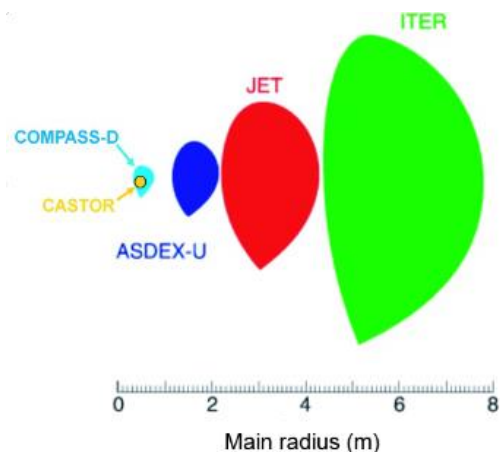
“Csak” a reaktor tartományig kell feljutni

A most épülő ITER már a reaktor tartományban

van, de nem erőműnek épül.

Lépésről lépésre

Közel 40 mágneses összetartású berendezés világszerte.



ASDEX Upgrade (IPP)

JET (EU)

ITER

Nagy sugár

1.65 m

3 m

6.2 m

Térfogat

14 m³

80 m³

840 m³

Fúziós

teljesítmény (hő) 1,5 MW

~ 16 MW

~ 500 MW

(D-T egyenérték)

(D-T)

(D-T)

Szélcsatorna megközelítés – bizonyított más területeken is



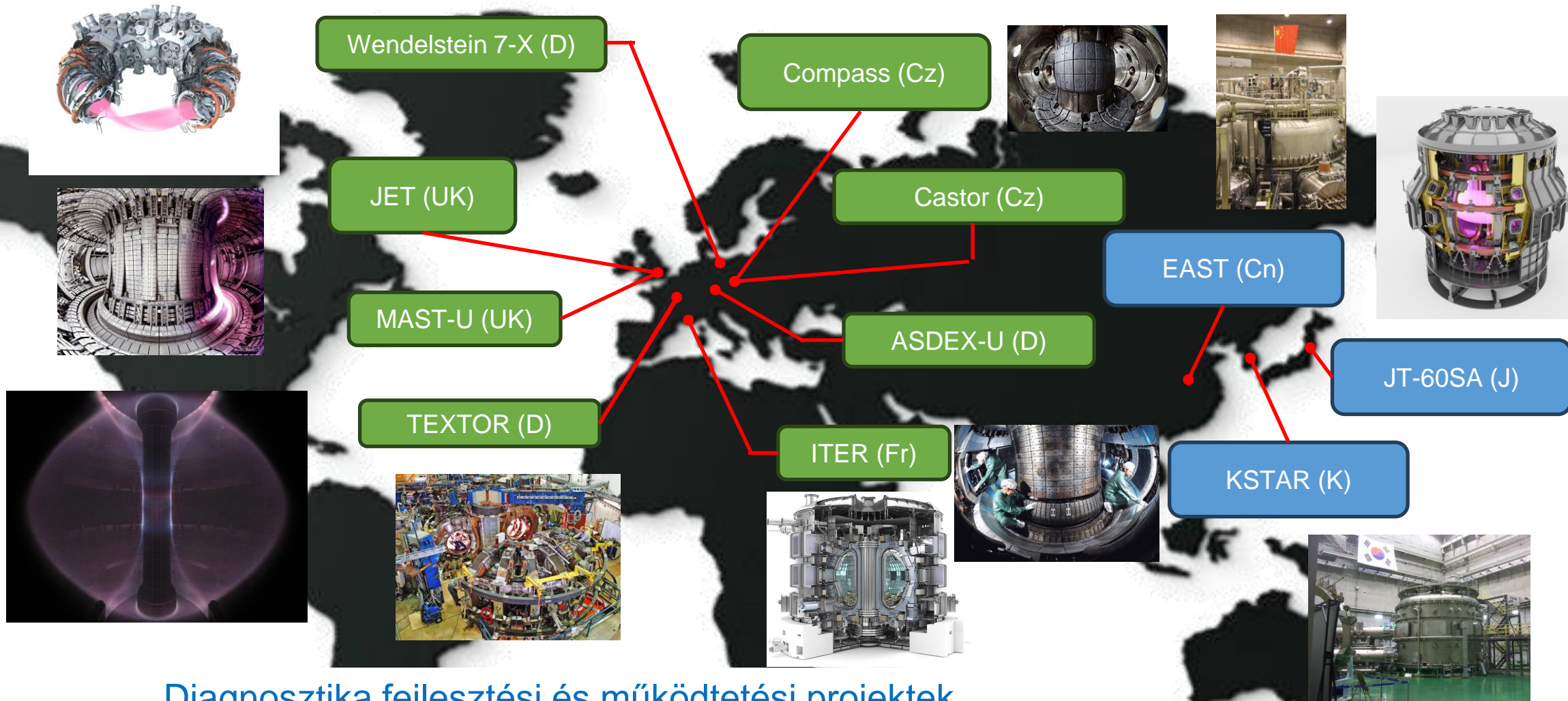
<http://tsagi.com/pressroom/photogallery/>

An-225 Mrija és űrsikló
csoportmodell a szélcsatornában



Szélcsatorna módszer: A kisebb modellre ható erők gondos mérése révén képesek
lehetünk előre jelezni a teljes méretű repülőgépre ható erőket.

Kísérletek, amelyekben személyesen részt vettem



Diagnosztika fejlesztési és működtetési projektek

- Pár hét és majd egy év között
- Élő együttműködések

Miért építünk fúziós kísérleti berendezéseket?

Fizika megértése

Például

- A plazmában zajló fizikai folyamatok megértése
- A forró plazma és hideg fal kölcsönhatásainak megértése
- A diagnosztikai rendszerekhez szükséges sokrétű fizika
-

Technológia (ki)fejlesztése

Például

- A mágneses tekercsek anyaga, gyártása
- Hőterhelés vizsgálat a plazmahatároló elemeken
- Kontrollrendszerek
-

A két dolog nem független, folyamatos kapcsolat

Mit jelent az, hogy “értjük a berendezés fizikáját”?

Nagyon bonyolult, nem-lineáris rendszer

Különböző időskálák is csatolódnak

- mikro-örvények 10^{-6} sec
- energiaösszetartási idő 0,1 sec
- berendezés fal hőmérséklet 100 sec

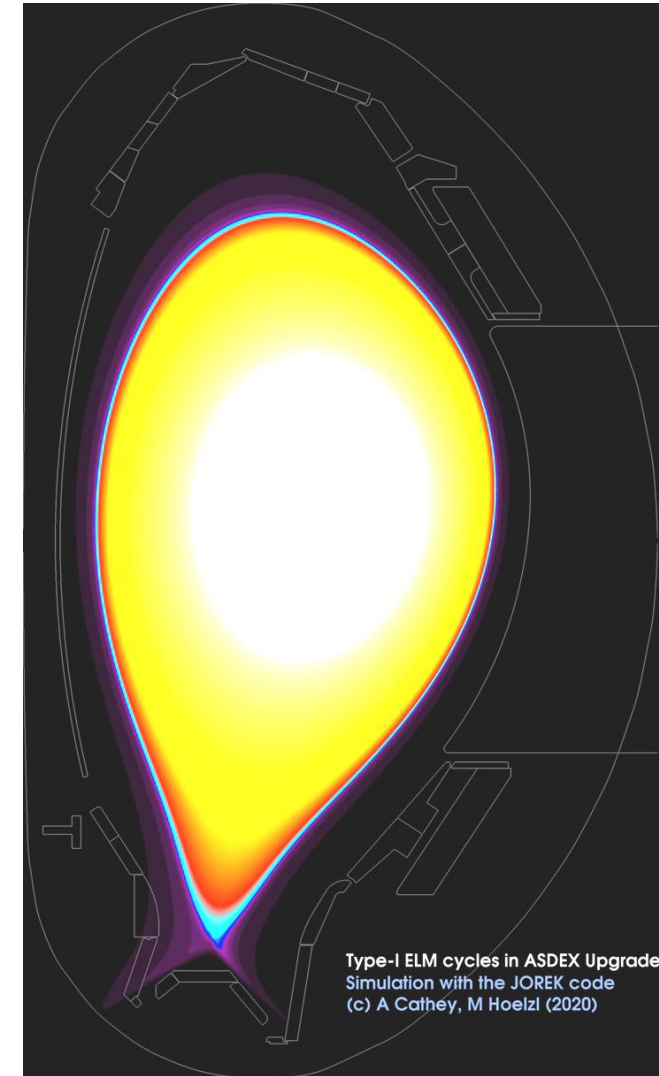
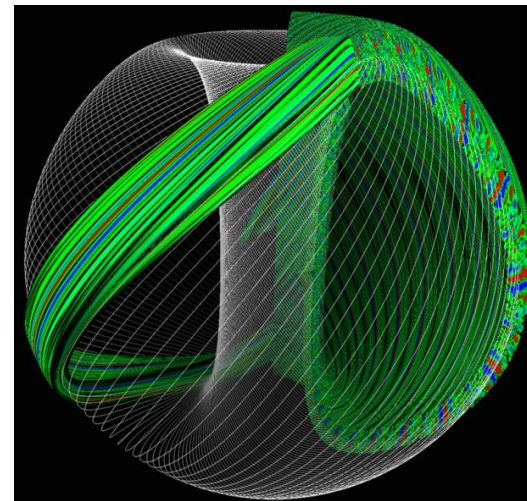
Nem lehet “kézzel” kiszámolni.

Számítógépes szimulációk fejlesztése

Világ legnagyobb aktuális

szuperszámítógépein mindig fut fúziós modellezés.

Ha egy valós kísérlet mérési eredményeit a modellezés pontosan és megbízhatóan reprodukálni tudja.



<https://www.youtube.com/@plasmaphysik>

Empirikus skálázás

Az alapfolyamatokat egyre jobban tudjuk modellezni. Nincs olyan kódrendszerünk, ami a teljes rendszert leírná. Sőt, még fontos részrendszerek szimulációja sem teljes.

Az eddig kísérleti eredmények alapján egy skálázást hoztak létre.

$$\tau_{E,th}^{IPB\ 98(y,2)} = 0.05621 I_p^{0.93} B_T^{0.15} P^{-0.69} n_e^{0.41} M^{0.19} R^{1.97} \varepsilon^{0.58} \kappa_x^{0.78}$$

$\tau_{E,th}$: Energiaösszetartási idő [s] $\tau_{E,th} = W/P_{ext}$

I_p : Plazmaáram [MA]

B_T : Toroidális mágneses tér [T]

P : Külső fűtés teljesítmény [MW]

n_e : Átlagos elektronsűrűség [m^{-3}]

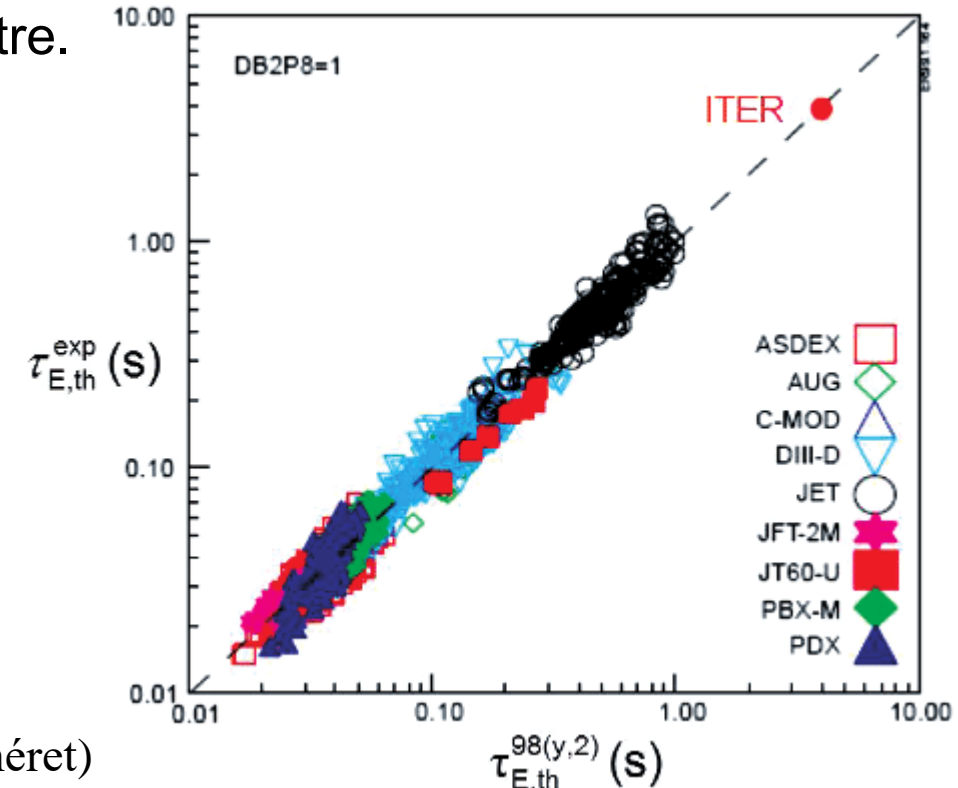
M : Hidrogén izotóp tömeg [AMU]

R : Tórusz nagy sugár [m]

ε : Forma arány: kis és nagy sugár aránya

κ_x : Plazma alak elnyúltság (függőleges méret/vízszintes méret)

Ez az alapja egy reaktor méretű berendezés tervezésének.
International Thermonuclear Experimental Reactor: ITER



Wagner:

DOI:[10.1051/epjconf/20135401007](https://doi.org/10.1051/epjconf/20135401007)



A MAGYAR
TUDOMÁNY
ÜNNEPE

MTA

HIUN
REN



A következő lépés az úton - ITER

Az ITER a világ legnagyobb fizikai kísérlete

500 MW fúziós
hőteljesítmény
(50 MW fűtés)

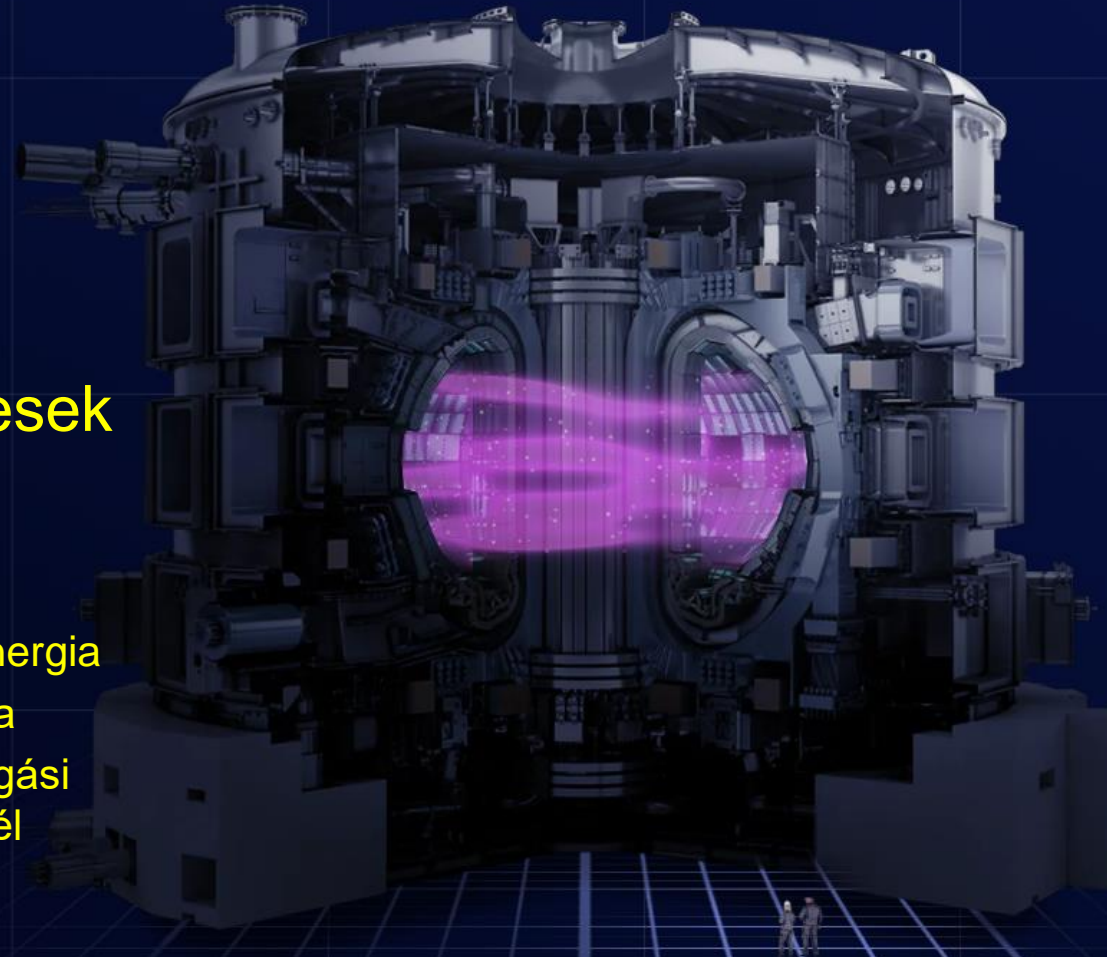
150 millió °C plazma

Szupravezető mágnesek
(-270°C)

½ g üzemanyag – 350 MJ hőenergia

T34 tank – 1000 méter magasra

9 db 100 tonnás mozdony mozgási
energiája 100 km/h sebességnél



- 1.000.000 alkatrész
- 10.000.000 egyedi
részegység

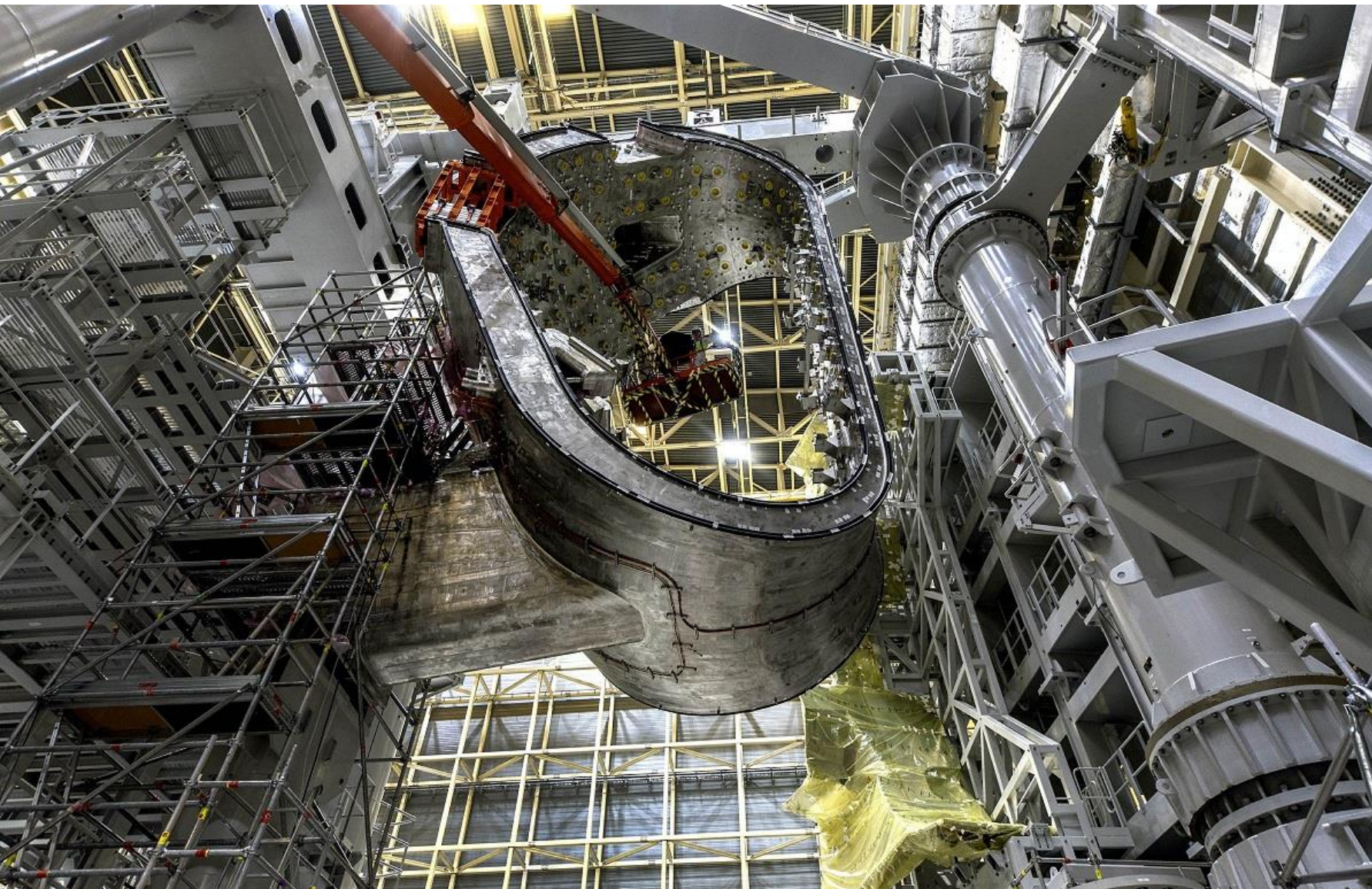
$V_{\text{plazma}} = 840 \text{ m}^3$

$M_{\text{mágnes}} = 360 \text{ t}$
(világ legnagyobb
mágnese)

$M_{\text{ITER}} = 23000 \text{ t}$
(3x annyi acél, mint az
Eiffel toronyban)

Európában épül fel

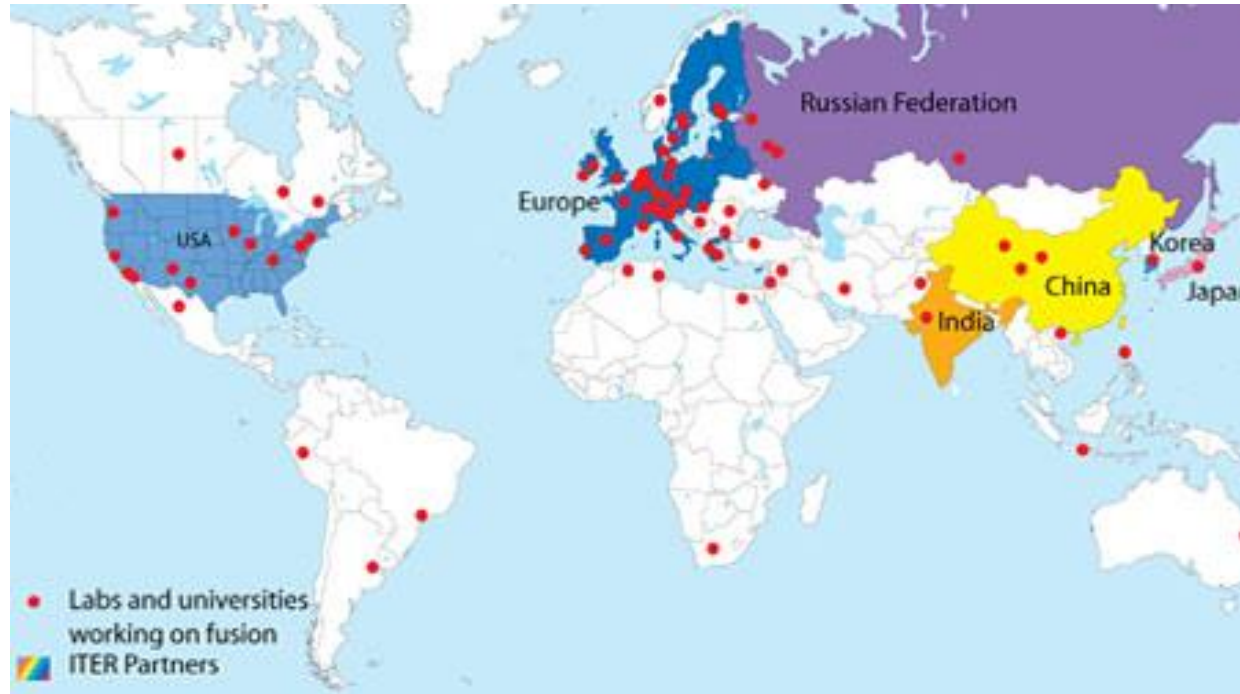
Most épül



A világ valószínűleg legbonyolultabb berendezését építik, A talán legnehézkesebb struktúrában

- Partnerek eszközöket szállítanak be
- Párhuzamos fejlesztések
- Minden tudás közös, de az ipari háttér megteremtése is fontos

ITER Partnerek és Fúziós Laborok



<https://f4e.europa.eu>

- az emberiség fele részese
- 7 partner – (politikailag nem mindig a legnagyobb barátságban)
- Oroszország is kezdettől részese a projektnek – A háború és a szankciók biztosan hatással lesznek a projektre
- USA és Kína viszonya is éleződik
- ***A hidegháború alatt a fúzió volt a tudomány egyik hídja volt a két fél között***

Mennyibe kerül és kinek?

Az ITER becsült építési költsége ~22 Mrd € 20 évre.
(első becslés 6 Mrd € volt 2000-es évek elején)

A költségek 40 %-át állja az EU -
1 Euró/fő/év minden EU polgárnak

A teljes európai fúziós program a nemzeti költsékekkel
évente az ITER-en felül <500M €

Összes fúziós költség ~2 Euró/fő/év - ~ 850 M €



Autógyárak K+F költsége 2023-ban

- Volkswagen csoport – 15,8 Mrd \$
- Toyota – 9 Mrd \$
- 20-nál több cég költ 1 Mrd \$ felett

Hadiipar sokkal költségesebb

- B2 spirit bombázó - 2,1 Mrd \$ darabja



A MAGYAR
TUDOMÁNY
ÜNNEPE

MTA

HIUN
REN



Az ITER-en túl, DEMO, STEP, BEST ...

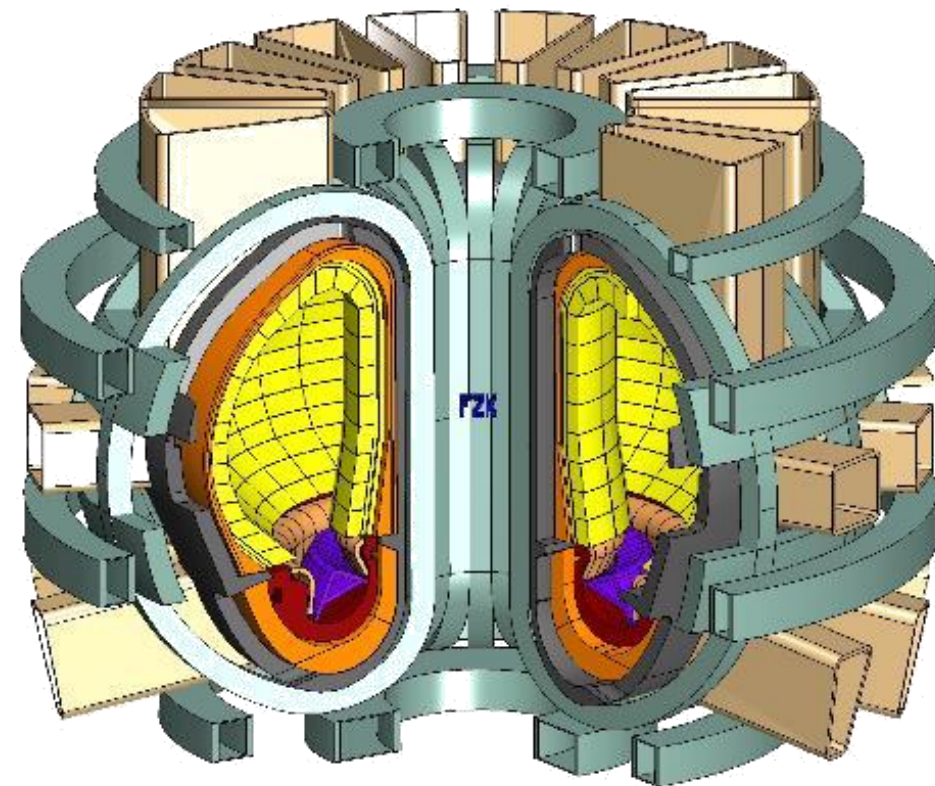
EU fúziós program

DEMO: „Valamennyi” fúziós energia a hálózatra

EU DEMO projekt:

- Pre-koncepció elkészült 2020-ra
Számos azonosított probléma:
diszrupció, neutronroncsolás, divertor ...
- Koncepciók tervek: 2025 (késni fog)
- Végső tervek: 2040
- Működés: 2050-60

Egy új berendezés építése várható ***Volumetric Neutron Source*** még a DEMO előtt.



Fő EU DEMO paraméterek:

- $R_0, a \sim 9 \text{ m}, 2,9 \text{ m}$
- $B_0 \sim 5 \text{ T}$
- $P_{\text{therm}} \sim 2 \text{ GW}$
- $P_{\text{el,net}} \sim 300 \dots 500 \text{ MW}$
- $t_{\text{pulse}} > 2 \text{ óra}$

Kínai fúziós program

Agresszív ütem terv – vezető szerepre tör

Burning Plasma Experimental
Superconducting Tokamak (BEST) tokamak
építése

- ITER-szerű berendezés trícium termeléssel

CFETR tervezése

- első kereskedelmi demonstrációs erőmű az
2030-as években

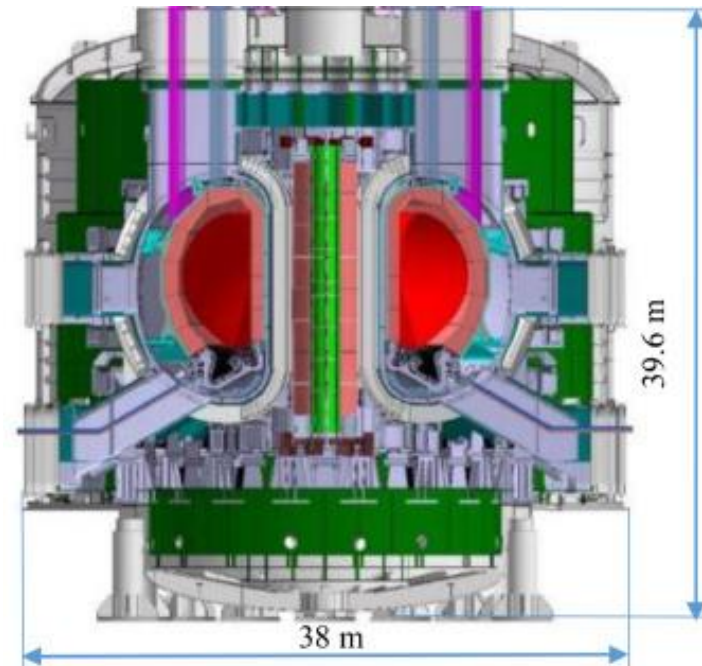
Fúziós ipari háttér megteremtése

Becslések szerint ~1,5 Mrd \$ költség

Óriási emberi erőforrás

Mágnes fejlesztés

Robotika



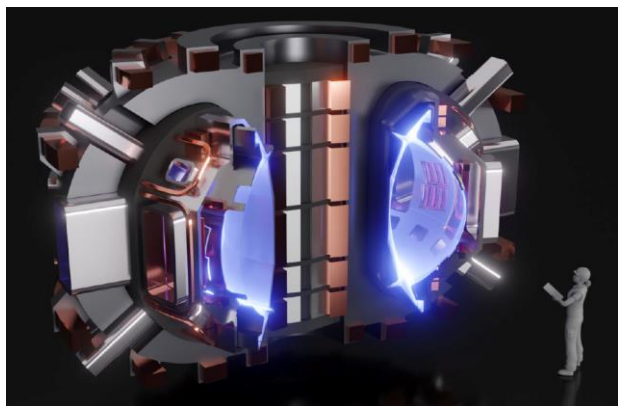
USA fúziós program

DOE támogatja a fúziós kutatásokat

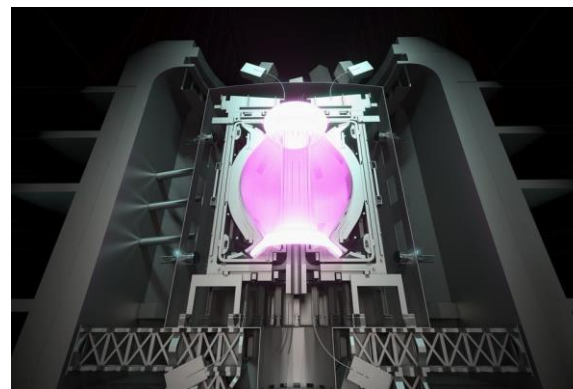
- 500 M USD kutatás
- 250 M USD ITER

Magántőke bevonás nagyobb, mint az állami költségek

Commonwealth Fusion Systems (CFS) a Massachusetts Institute of Technology (MIT) spin-off vállalkozása



SPARC tokamak



STEP tokamak

UK fúziós program

UKAEA - STEP

- Az UK kormány által finanszírozott kompakt reaktor
- 200 M GBP koncepció fejlesztésre
- Cél: elektromos energiatermelés demonstrálása 2040-re.



Magáncégek megjelenése

1. TOTAL FUNDING*

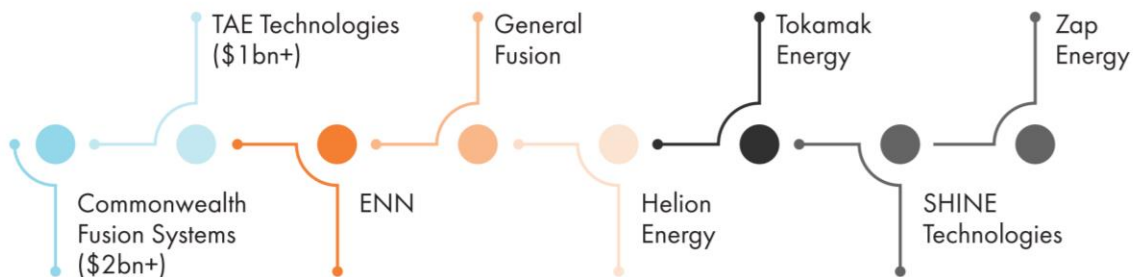


LOCATION

primary HQ



4. COMPANIES WITH \$200M INVESTMENT OR MORE



2024-annual-global-fusion-industry-report.pdf



A MAGYAR
TUDOMÁNY
ÜNNEPE

MTA

HUN-REN
Magyar Kutatási Hálózat



Energiatudományi
Kutatóközpont

Köszönöm
a figyelmet!



Fúziós
Plazmafizika
Laboratórium

MTA