

# Korszerű nukleáris energiatermelés – Fúzió 5.

A fúziós energiatermelés jövője: alternatív  
elképzelések, értékelés

**Pokol Gergő**



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BME NTI

---

*Korszerű nukleáris energiatermelés*

2019. október 9.

## Skálatörvények

Az eddigi berendezések működése alapján *empírikus* skálatörvényeket állítottak fel az extrapolálásra. Pld. H-mode skálatörvény:

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

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

$I_p$ : Plazmaáram [MA]

$B_T$ : Toroidális mágneses tér [T]

$P$ : Fűtési teljesítmény [MW]

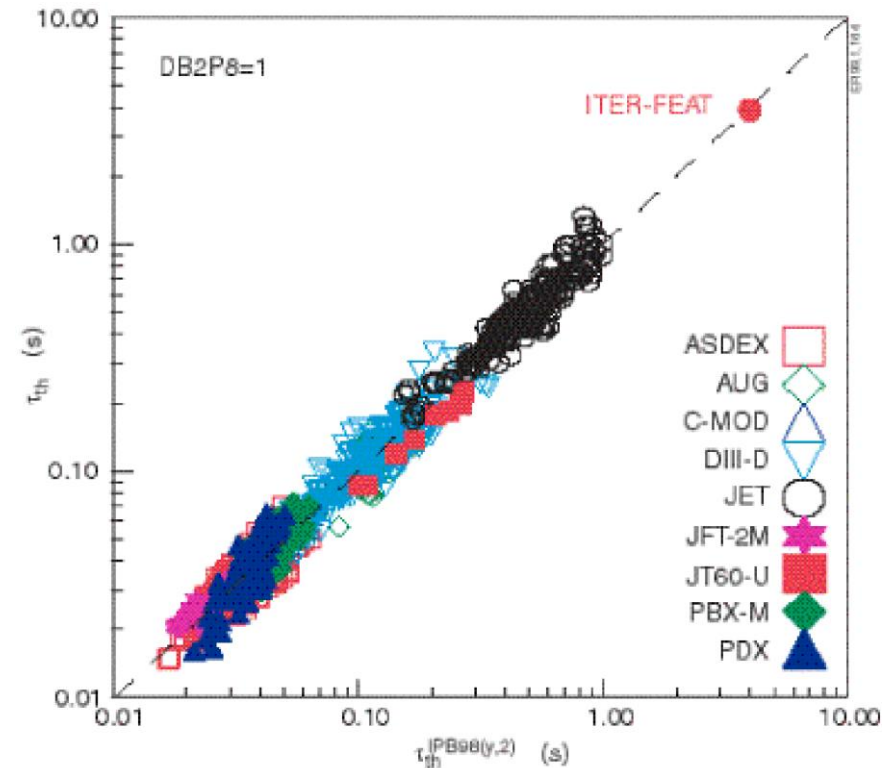
$n_e$ : Átlag elektronsűrűség [ $m^{-3}$ ]

$M$ : Atomtömeg [AMU]

$R$ : Tórusz nagysugár [m]

$\varepsilon$ : Kissugár/nagysugár

$\kappa_x$ : Plazma nyúltsága (alakfaktor)



További skálatörvények vannak:

Minimális fűtés a H-mode belépéshez

Maximális sűrűség (felette diszrupció)

Maximális nyomás (felette instabil)

## Magas Q ITER – ITER-FEAT (2001-től)

### Módosított célok:

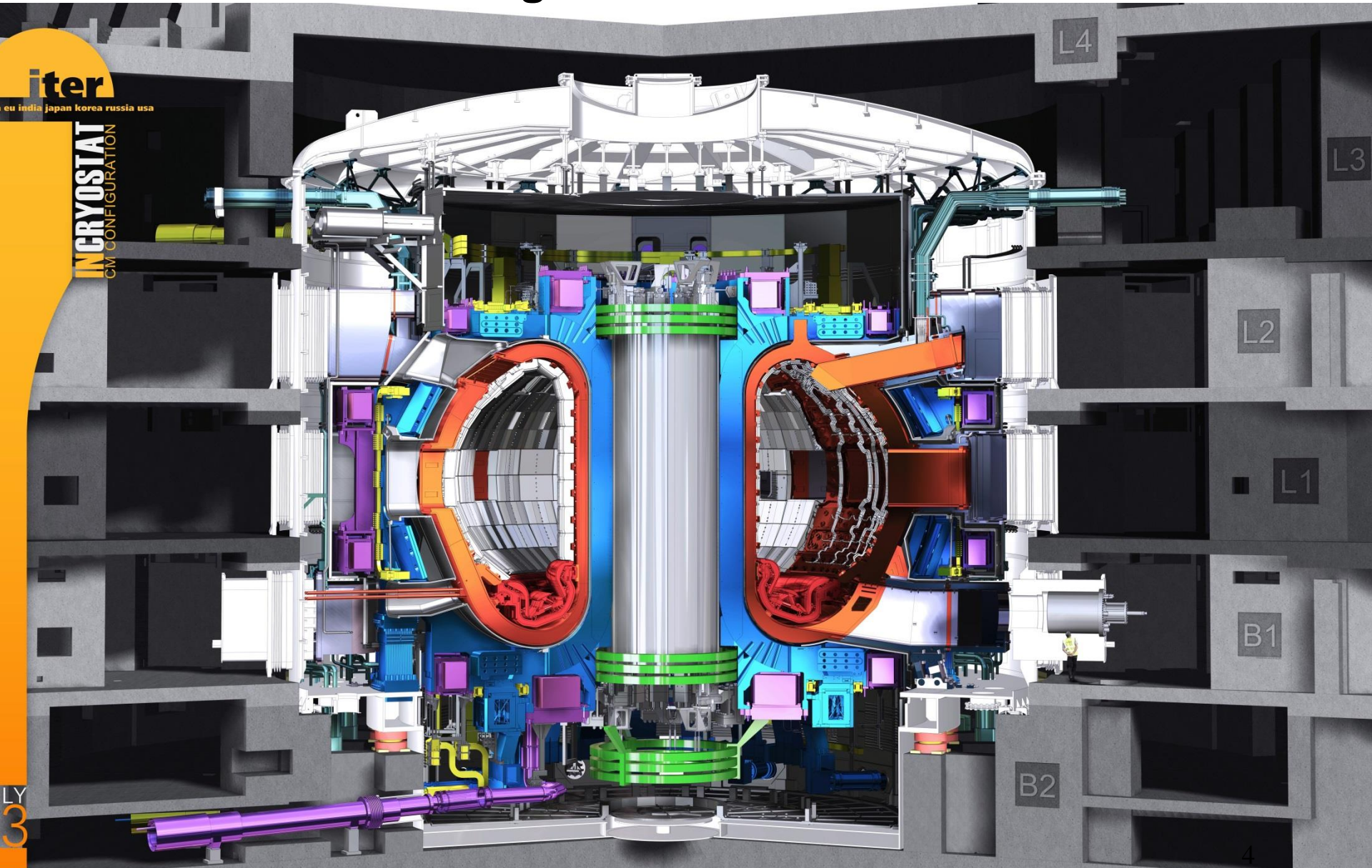
- Begyűjtő ITER-hez képest **fele költség**
- **$Q > 10$  induktívan** hajtott DT plazmában 300-500 s-ig.
- **$Q > 5$  kvázi állandósult** neminduktív áramhajtással.
- A szükséges **fúziós technológiák** meglétének demonstrálása.
- A jövőbeli **fúziós reaktor elemeinek** tesztelése.
- **Tríciumszaporító köpeny** elképzelések tesztelése.

Parameter	Attributes
Fusion power	500 MW (700 MW) <sup>a</sup>
Fusion power gain ( $Q$ )	$\geq 10$ (for 400 s inductively driven burn); $\geq 5$ (steady-state objective)
Plasma major radius ( $R$ )	6.2 m
Plasma minor radius ( $a$ )	2.0 m
Plasma vertical elongation (95% flux surface/separatrix)	1.70/1.85
Plasma triangularity (95% flux surface/separatrix)	0.33/0.48
Plasma current ( $I_p$ )	15 MA (17 MA) <sup>a</sup>
Safety factor at 95% flux surface	3 (at $I_p$ of 15 MA)
Toroidal field at 6.2 m radius	5.3 T
Installed auxiliary heating/ current-drive power	73 MW (110 MW) <sup>b</sup>
Plasma volume	830 m <sup>3</sup>
Plasma surface area	680 m <sup>2</sup>
Plasma cross section area	22 m <sup>2</sup>

<sup>a</sup> Increase possible with limitation on burn duration.

<sup>b</sup> A total plasma heating power of 110 MW may be installed in subsequent operation phases.

# Magas Q ITER → ITER



## ITER időrend 2016 óta

**2008:** Tereprendezés

**2010:** Tokamak épület kiásása

**2013:** Tokamak épület építésének kezdete

**2014:** Az első külső helyszínen gyártott alkatrész megérkezése

**2021:** Tokamak épület kész

**2025:** Első plazma

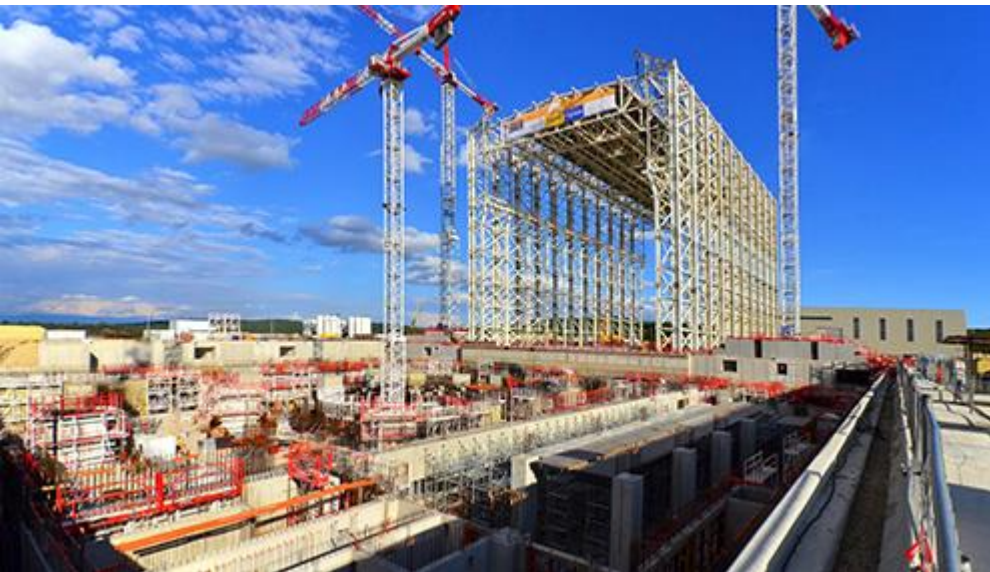
**~2035:** Deutérium - trícium üzem kezdete



# Európai fúziós kutatások

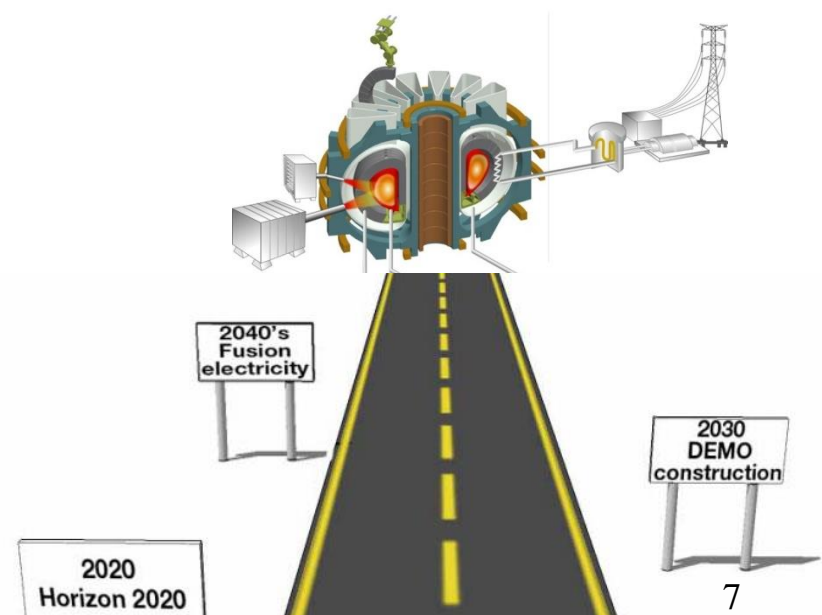
## ITER tokamak

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

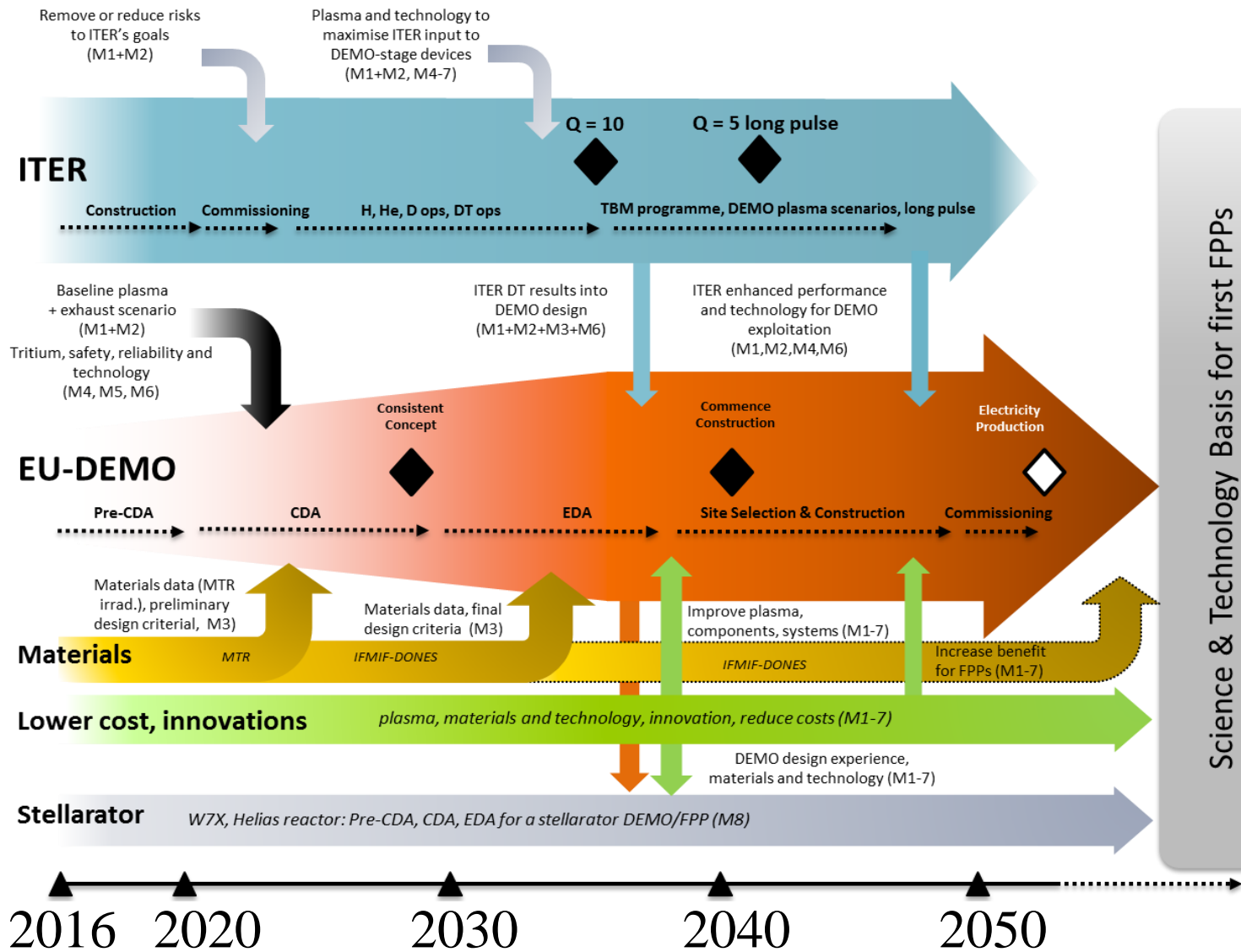


## Fusion Roadmap

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



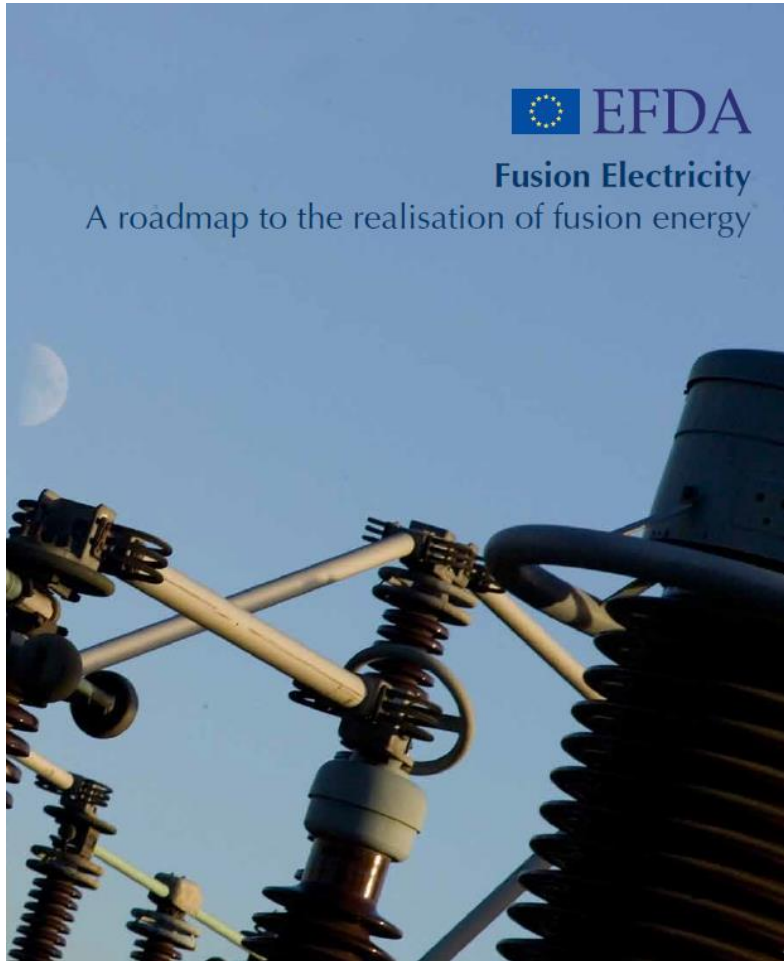
# Út a fúziós energiatermeléshez





# Fusion Roadmap (2012, 2018)

**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, WEST): 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!)



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

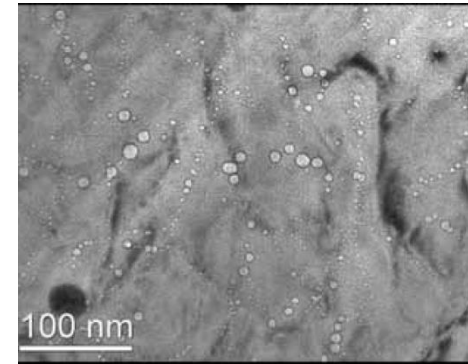
### 3. Neutronsugárzásnak ellenálló anyagok

#### Cél:

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

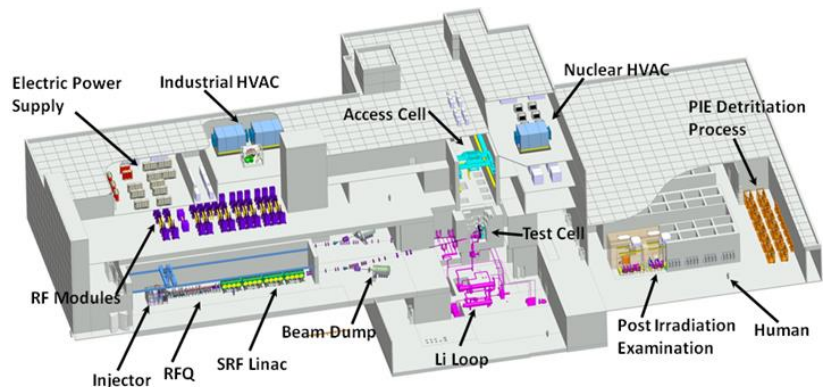
#### Eszközök:

- 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>



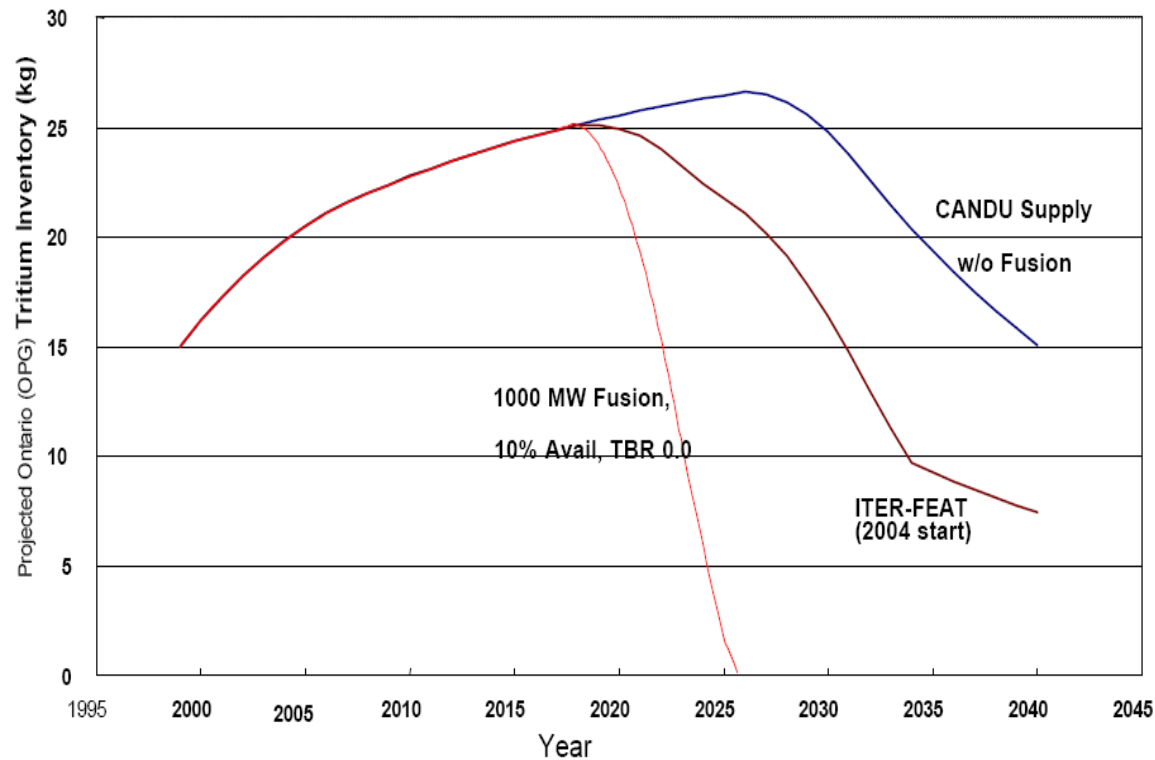
## 4. Trícium önellátás

### Cél:

- Egy fúziós erőműben a fúziós neutron 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



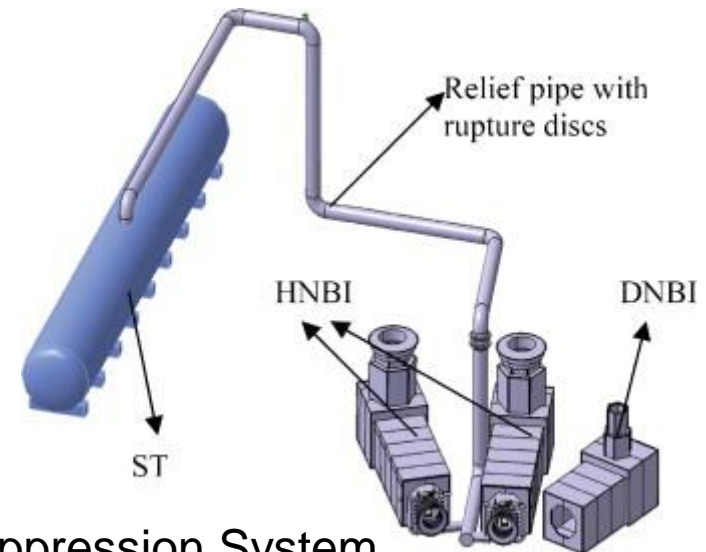
## 5. Inherens biztonság

### 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 elsődleges mérnöki gát
- Mélységi védelem
- Trícium-kezelésben kell fejlődni!



ITER Vacuum Vessel Pressure Suppression System

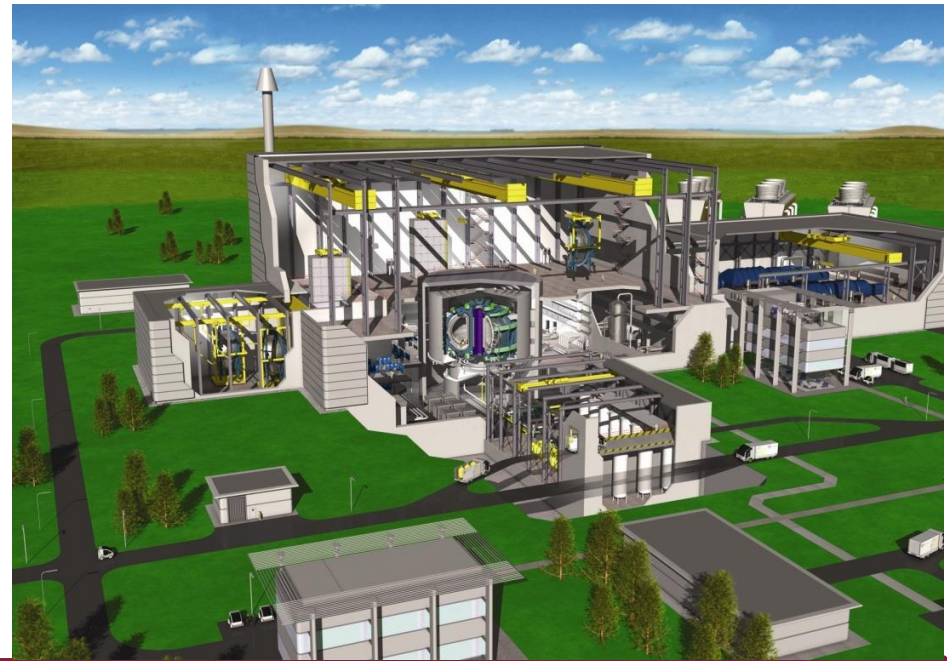
## 6. DEMO tervezése

### Cél:

- “The DEMO power plant has to be a **representative fusion power station** in terms of predictable power production, fuel cycle self-sufficiency and plant performance thereby **allowing an extrapolable assessment of the economic viability, safe operation as well as environmental sustain-ability** for future commercial FPPs.”

### Eszközök:

- ITER tapasztalatok
- Leállási idők minimalizálása nagy cserélhető elemekkel.
- Távvezérelt karbantartás, fórrókamrák
- 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
- Új szerkezeti anyagok

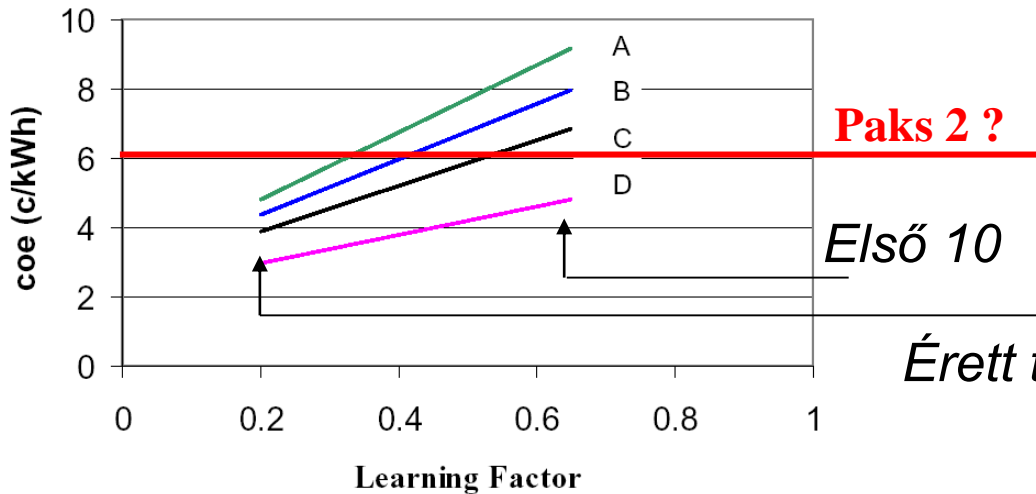
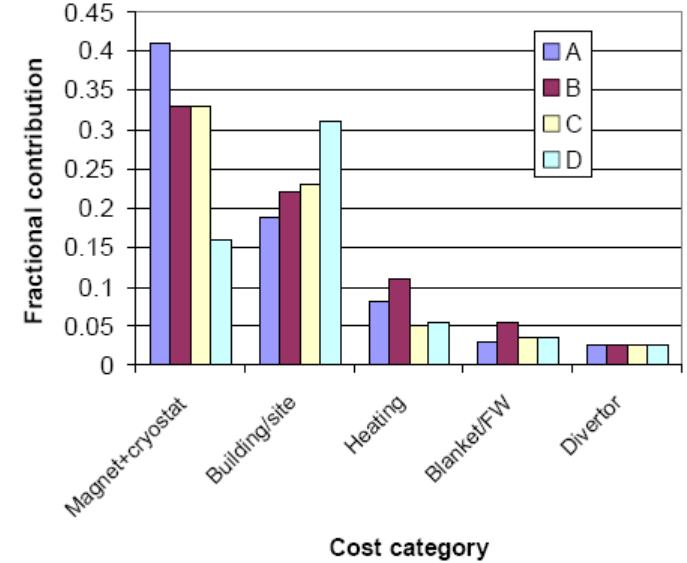
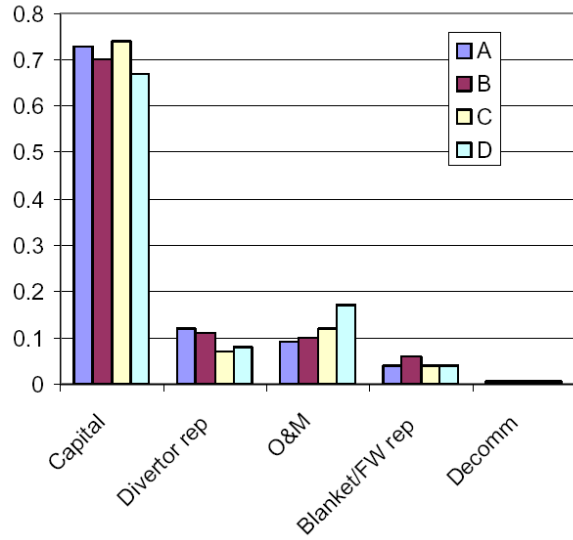




# Az elektromos áram költsége

*Analízis az ITER költségbecslése alapján*

*Költség nagy része beruházás (65-70%)*



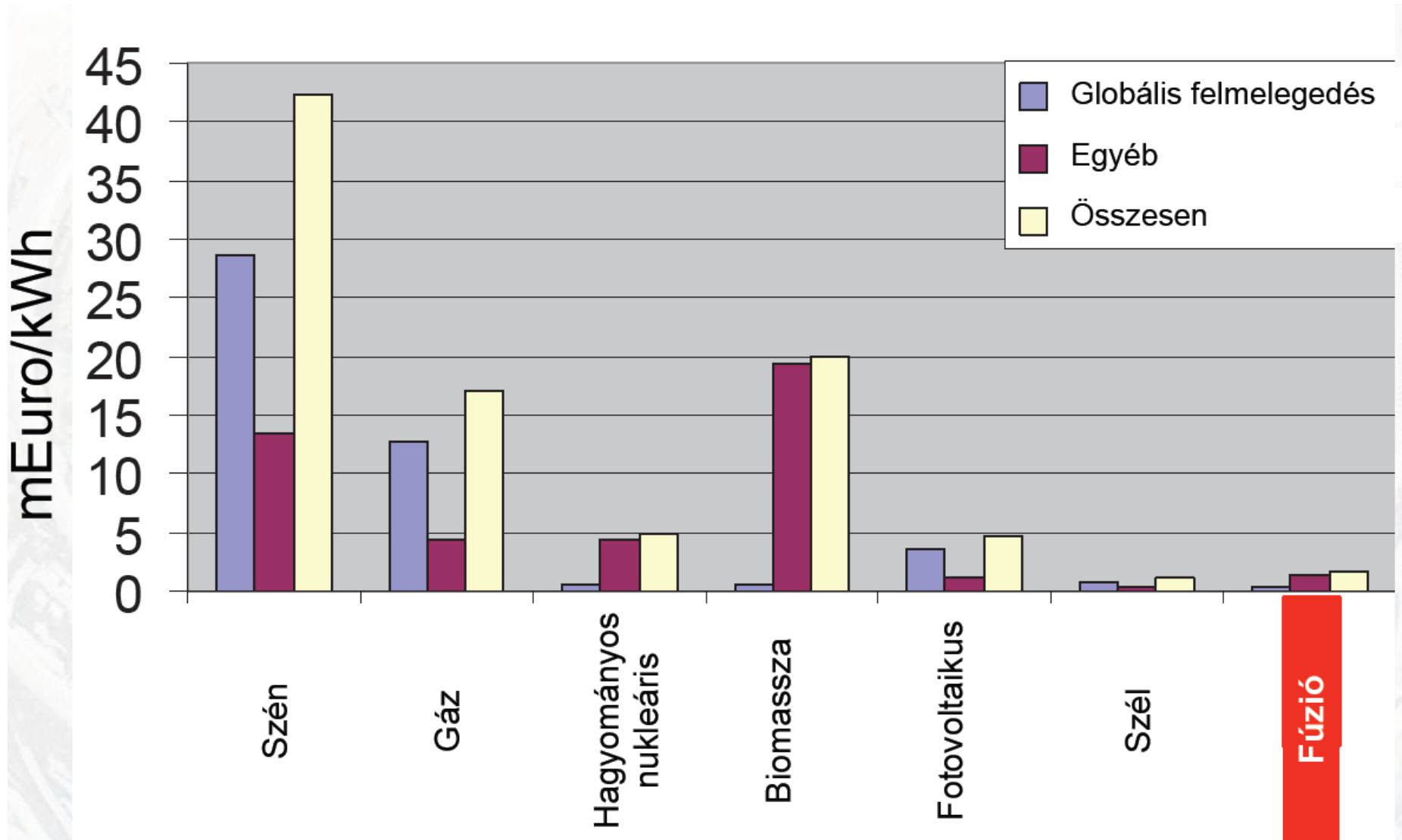
**Paks 2 ?**

*Első 10*

*Érett technológia*

*A beruházási költségek nagy része néhány nagy alkatrészre koncentrálódik*

# Külső költségek



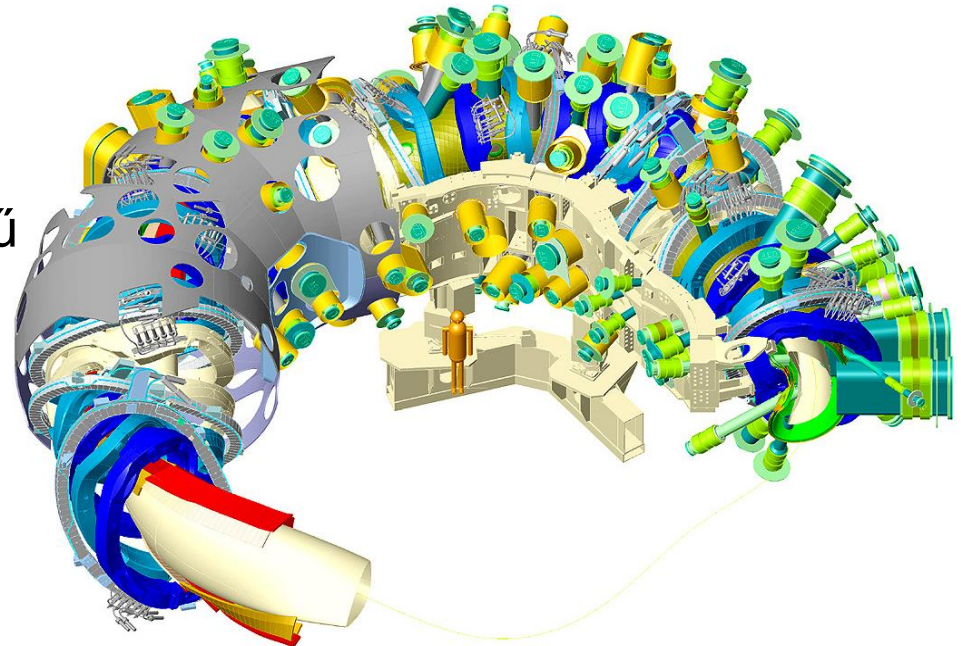
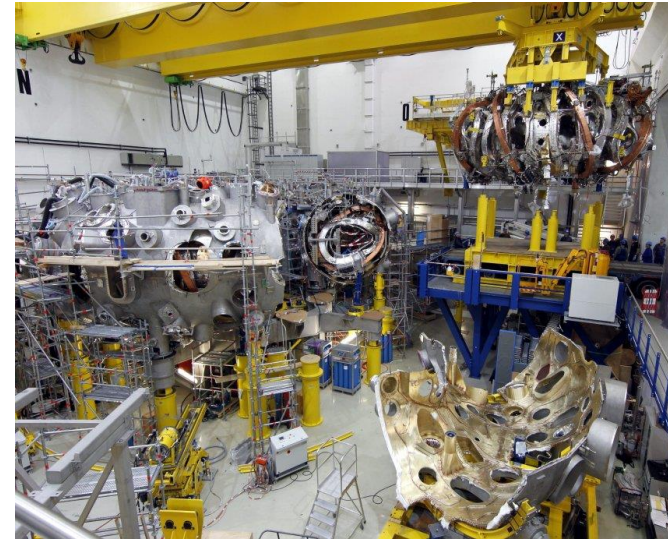
## 8. Sztellarátorok

### Cél:

- HELIAS sztellarátor technológia fejlesztése.

### Eszközök:

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



1. Telefon elővesz
2. WiFi jelszó: wigner2008, vagy mobilnet
3. Böngészőbe: Kahoot.it
4. Kód: kivetítőn
5. Név: Neptun kód !!!



6. Értékelés:

- Az összes kérdésre hibátlan megoldás → **+1 pont**
- Többiek között az elért ponttal arányos eséllyel **2 x +1 pont sorsolás**

# Progresses and Activities on the Chinese Fusion Engineering Test Reactor

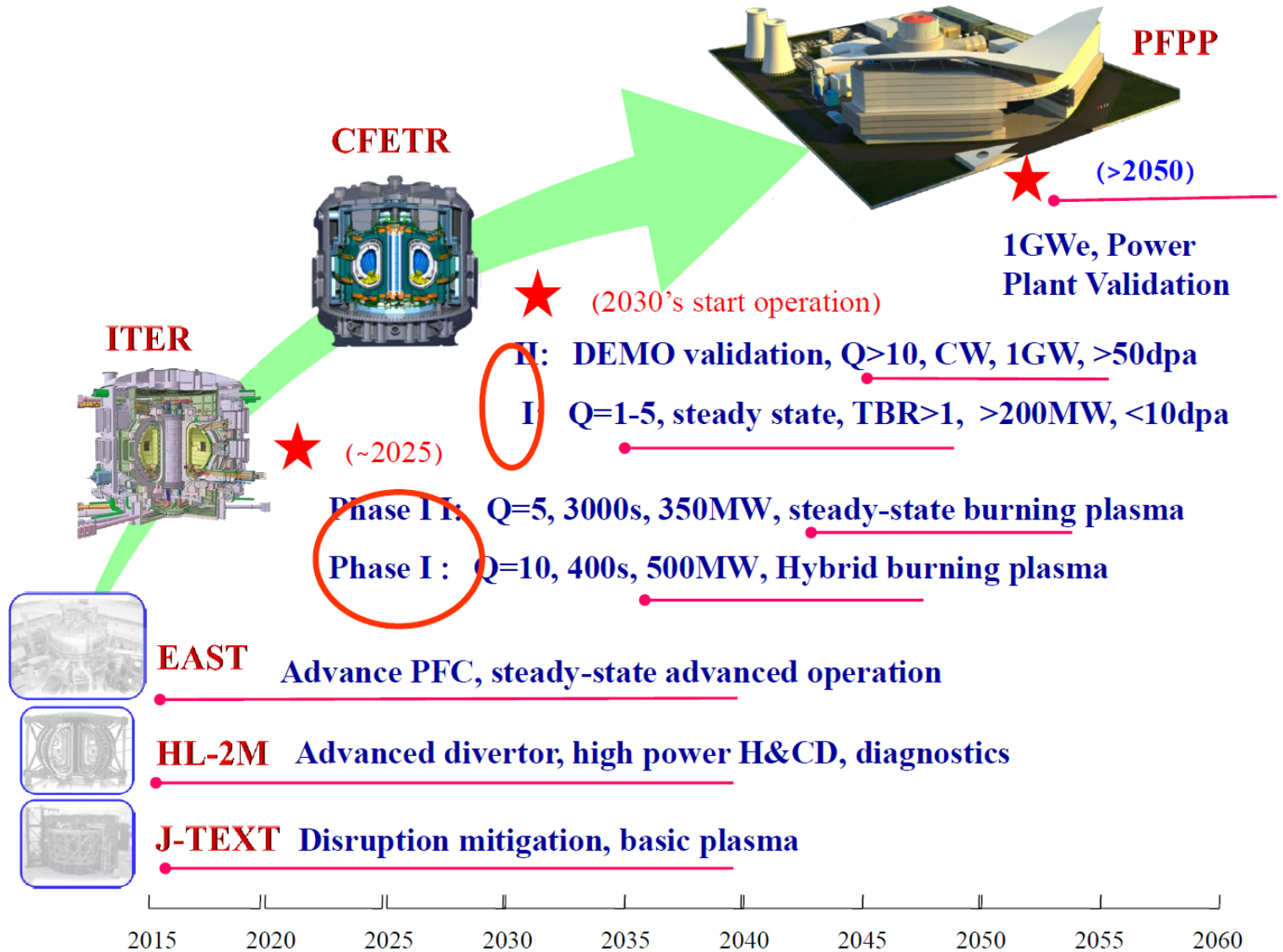


**Y.X.Wan, J.Li, Y.Liu, X.L.Wang  
and CFETR team**

**SOFT 2016, September 5-9, Prague, Czech Republic**

*Korszerű nukleáris energiatermelés, 2019. október 9.*

# Roadmap of Chinese MFE Development



# CFETR Mission & Objectives

**Mission: Bridge gaps between ITER and DEMO, realization of fusion energy application in China**

- ⇒ A good complementarities with ITER
- Demonstration of full cycle of fusion energy with  $P_f = 200\text{MW}$
- Demonstration of full cycle of T self-sustained with  $TBR \geq 1.0$
- Long pulse or steady-state operation with duty cycle time  $\geq 0.3 \sim 0.5$
- Rely on the existing ITER physical ( $k \sim 1.8$ ,  $q > 3$ ,  $H \sim 1$ ) and technical (SC magnets, diagnostic, H&CD) bases
- Exploring options for DEMO blanket&divertor with an easy changeable core by RH
- Exploring the technical solution for licensing DEMO
- With power plant potential by step by step approach.

# CFETR Conceptual Design (2013.11-2015.8)

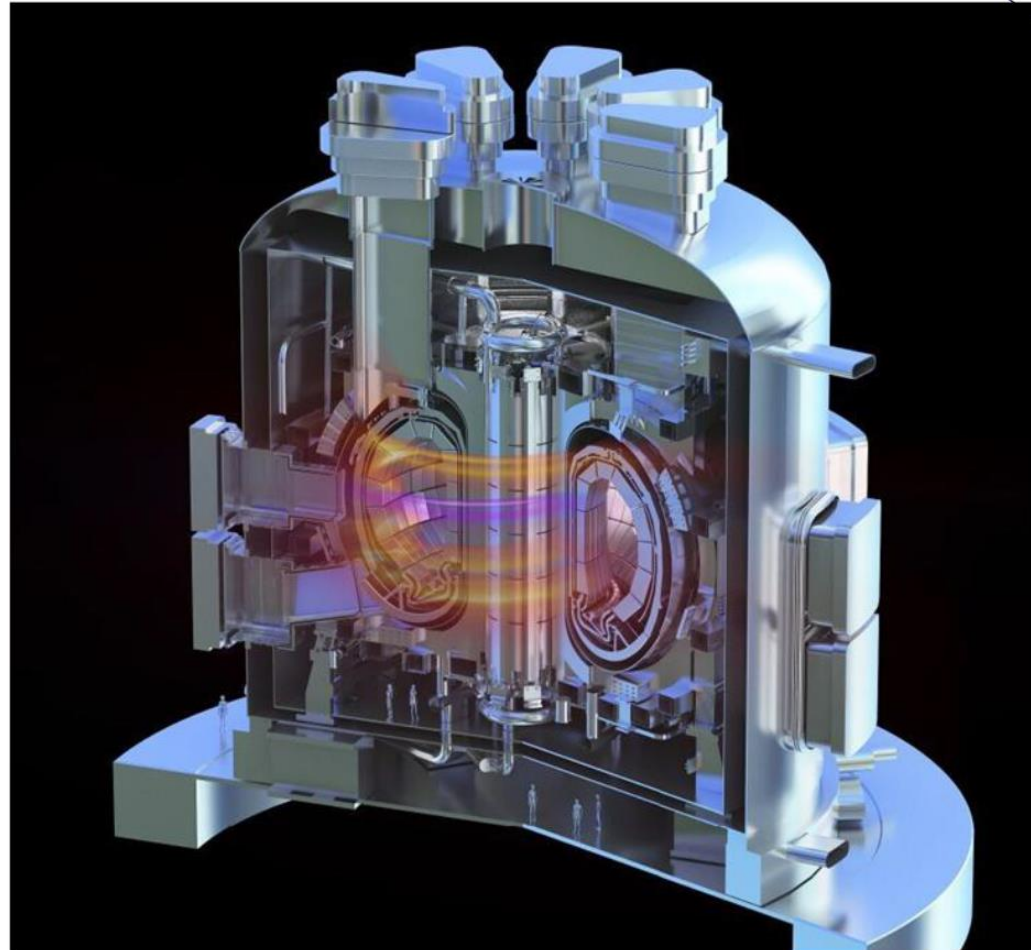
- ◆  $I_p = 7-10 \text{ MA}$
- ◆  $B_{to} = 4.5-5.0 \text{ T}$
- ◆  $R_0 = 5.7 \text{ m}$  ;
- ◆  $a = 1.6 \text{ m}$ ;
- ◆  $k = 1.8 \sim 2.0$
- ◆  $q_{95} \geq 3$  ;
- ◆  $\beta_N \sim 2-3$

$P_{\text{fusion}}: 200 \text{ MW}$

**Possible upgrade to**

**$R \sim 6.0 \text{ m}$ ,  $a \sim 2 \text{ m}$ ,**

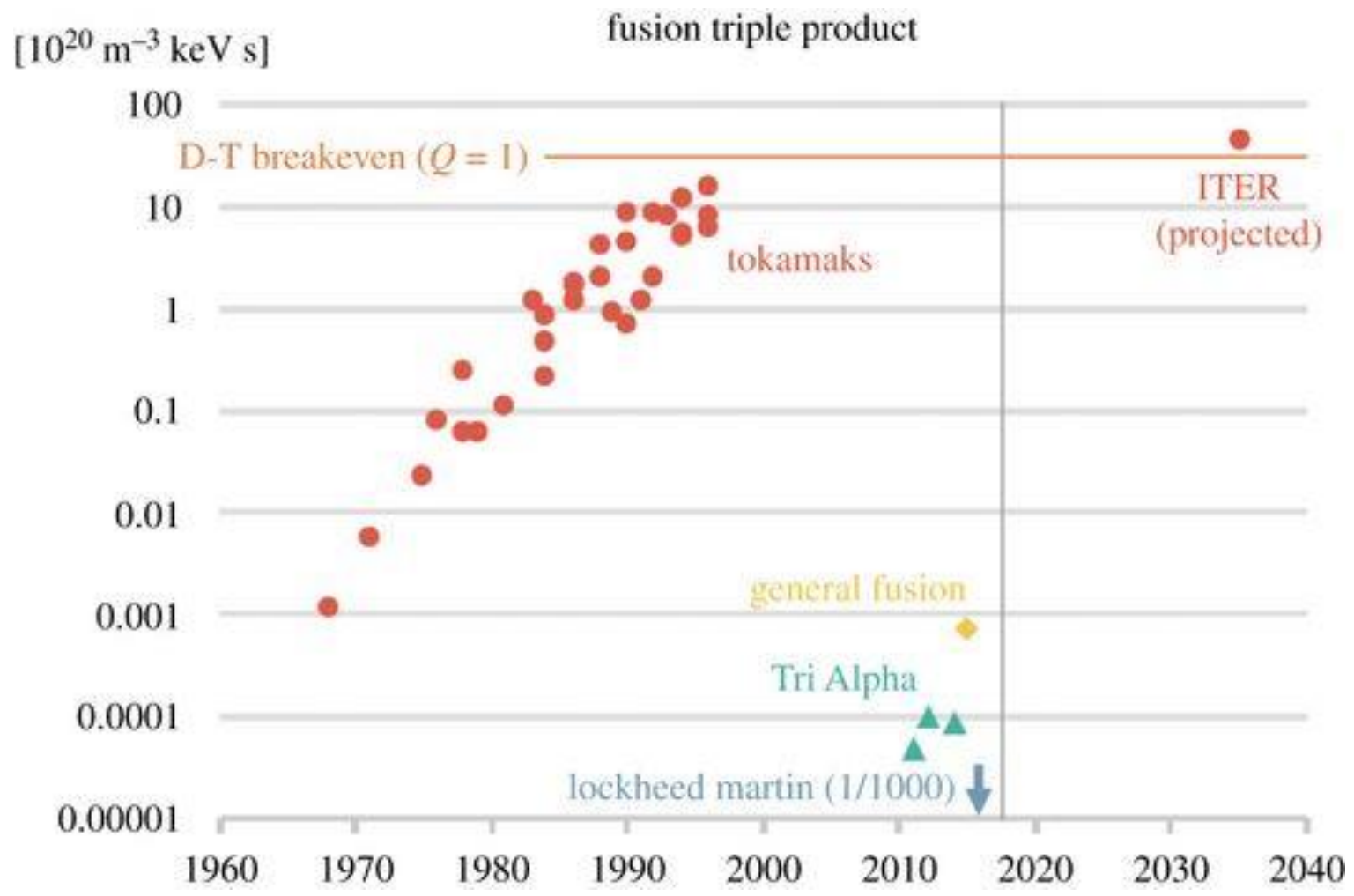
**$B_t = 7 \text{ T}$ ,  $I_p \sim 15 \text{ MA}$**





# ISFNT talks

# Alternatív út a fúzióhoz



Daniel Clery: [Outside Insights: Alternative Fusion](#)

# Összefoglalás

## Cél:

- **Kimeríthetetlen, jól szabályozható, biztonságos, tiszta villamosenergia-forrás – fúziós erőmű.**

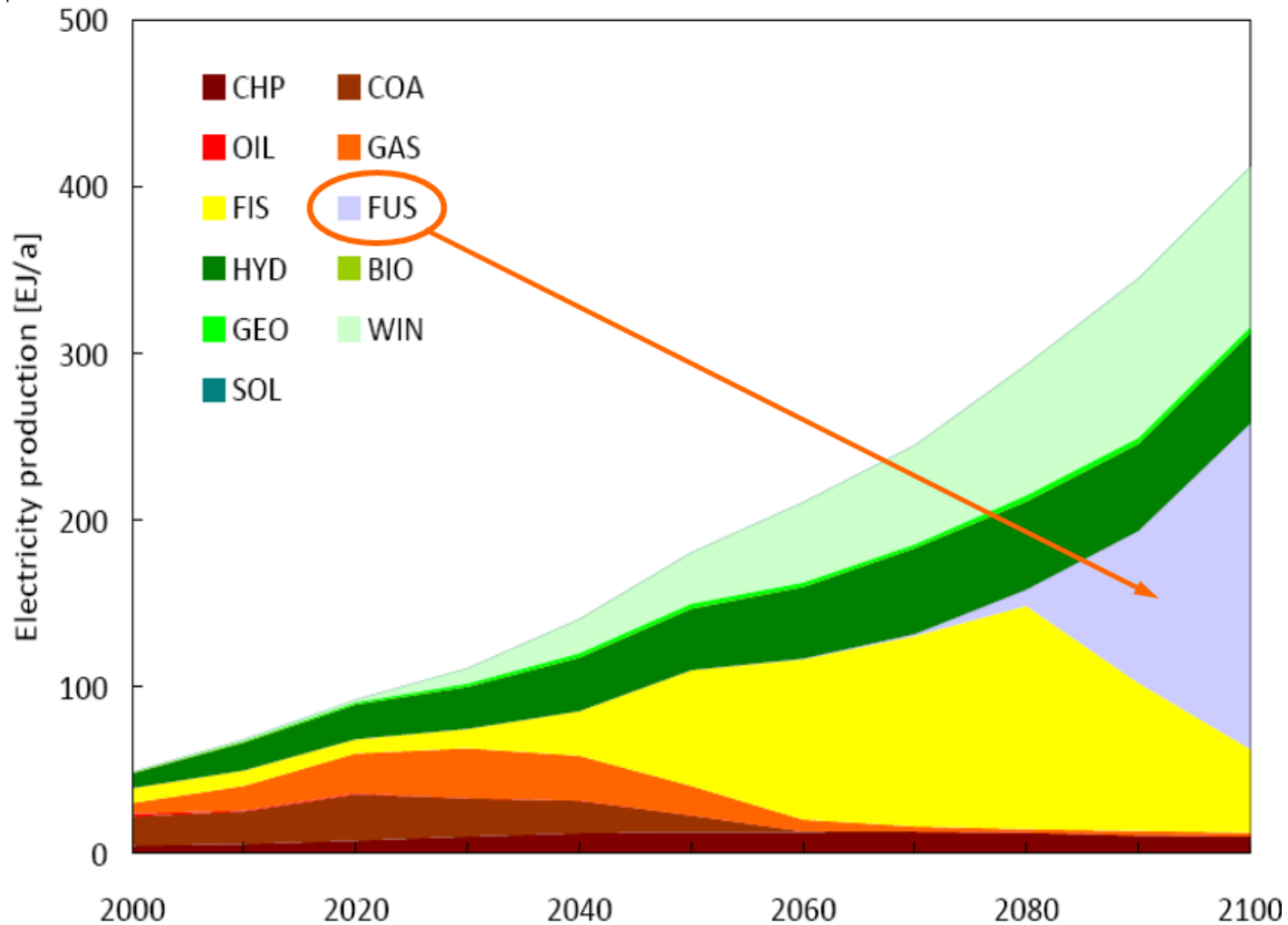
## Aktuális helyzet:

- **A fúziós energiatermelést demonstrálták (JET, 1997).**
- **Az energiasokszorozás demonstrálására épül az ITER (~2035).**
- **A sztellarátor technológia is reális alternatíva (W7-X, 2016).**

## A jövő:

- **Elektromos hálózatra termelő erőmű lesz a DEMO (~2050').** Erre több alternatív elképzelés van, minden ITER partnernek külön.
- **A gazdaságosság** nagyrészt a **magashőmérsékletű szupravezető- és az anyagtechnológia** fejlődésén múlik.
- **A privát tőke** egyelőre inkább a **gyors sikert ígérő, mérsékelten megalapozott technológiákat támogatja** (Compact Fusion, neutronmentes fúzió, elektro-sztatikus fuzorok, ...) → **A nagyberendezések egyelőre közpénzből épülnek.**

# Egy optimista verzió



Example of global energy scenario modelling using a model called EFDA/TIMES (with a CO<sub>2</sub> constraint of 650ppm in air) "Not a prediction!"

© Todd, BME lecture 2016