

“Imagine, for example, the reception that would greet someone who announced that he or she had discovered a process fundamental to chemistry and biology of the planet, a phenomena that could grant to humans the power to intervene massively in the biosphere and atmosphere, that could, in effect, allow humans to reform the living world.

Some critics would object on the grounds that humans were congenitally incapable of using such power wisely, that they could only harm themselves and the world. Even those who would cheer such an announcement might be quieted by the qualifying fine print, which would stipulate that control would be inevitably incomplete; that even in built environment lives and properties would be lost; that the hazard attendant with the use of this process would be so great that special crews and expensive equipment be stationed every few city blocks, that buildings possess emergency alarms and exits illuminated by separate power sources, that every residence be outfitted with instruments to detect it, that special insurance schemes be in place, ...

Anyone advocating the universal adoption of such a discovery would be denounced as a lunatic, or locked as menace to society.”

(Stephen J. Pyne, World Fire)



**ASDEX
Upgrade**

**www.ipp.mpg.de ➔ 1) AUG Virtuális séta; 2) W7-X;
3) IPP nyári iskola**

Az előadás célja (a hallgatónak tudnia kell):

1. Fúziós reaktorok inherens biztonságát elmagyarázni
2. Jellemezni a normálüzemi kibocsátásokat (hulladékokat is)
3. Bemutatni pár lehetséges baleseti lefolyást
4. Megmagyarázni a külső költségek fogalmát

**A fúziót más energiaforrásokkal ezen pontokban
összehasonlítani**

(Az előadás alapja T. Hamacher IPP nyári iskola anyagai)



zélyforrás vesz
lyekkel tisztáb



Papp G. / MA





THIS IS WHY PEOPLE SHOULD LEARN STATISTICS:



- **Hallottatok Csernobilról, Fukusimáról? Természetesen.**
Hányan haltak meg ott, hány embert telepítettek ki?
 - ➔ Csernobil: $O(30-50)$ halott + $O(10^3-10^4)_{\text{stat}}$, $O(3 \times 10^5)$ kitelepítés
 - ➔ Fukusima: $\emptyset$ (!) halott + **max** $(10^3-10^4)_{\text{stat}}$, $O(3 \times 10^5)$ kitelepítés
- **Hallottatok a Bhopal katasztrófáról? Talán...**
Halottak, sérültek, kitelepítettek száma?
 - ➔ 1984, India, MIC sziv.: $O(8 \times 10^3)$ + $O(3 \times 10^4)_{\text{stat}}$ halott, $O(5 \times 10^5)$ sérült
- **Hallottatok valaha gátszakadásról...?**
Banqiao gát 1975 Kína: $O(0.9-2.3 \times 10^5)$ halott, $O(1.1 \times 10^7)$ érintett!
 - ➔ Hány duzzasztógátja is van egy átlagos vízerőműnek?
 - ➔ Most zárjunk be minden duzzasztót? Ki tüntet a vízerőművek ellen?
- Hányan halnak vagy betegszenek meg ipari balesetekben vagy kibocsájtások következtében?

1. Hogy is **működik** majd egy jövőbeni erőmű?
2. Milyen **információk** birtokában tudjuk a biztonsági és környezeti kérdéseket megválaszolni?
3. Becsléseink és vizsgálataink elég **általánosak** ahhoz, hogy egy **jövőbeni** reaktornál is igazak legyenek?
4. Elegendő ez a tudás?
5. Nem **túlzó** a kockázatkerülésünk?

- Jelenlegi és majdani energiatermelő módszerek központi elve a “**fenntartható fejlődés**”
 - **Nincs is egyszerű és általánosan elfogadott definíció?**
- Maga az ötlet is elegendő kritériumok definiálásához, melyek alapján jellemezhetjük és összehasonlíthatjuk az energiatermelő technológiákat:
 - **“Katasztrófamentes”**
 - CO₂ mentes
 - Bőséges készletekkel rendelkezik

} Ezekről már volt szó korábban

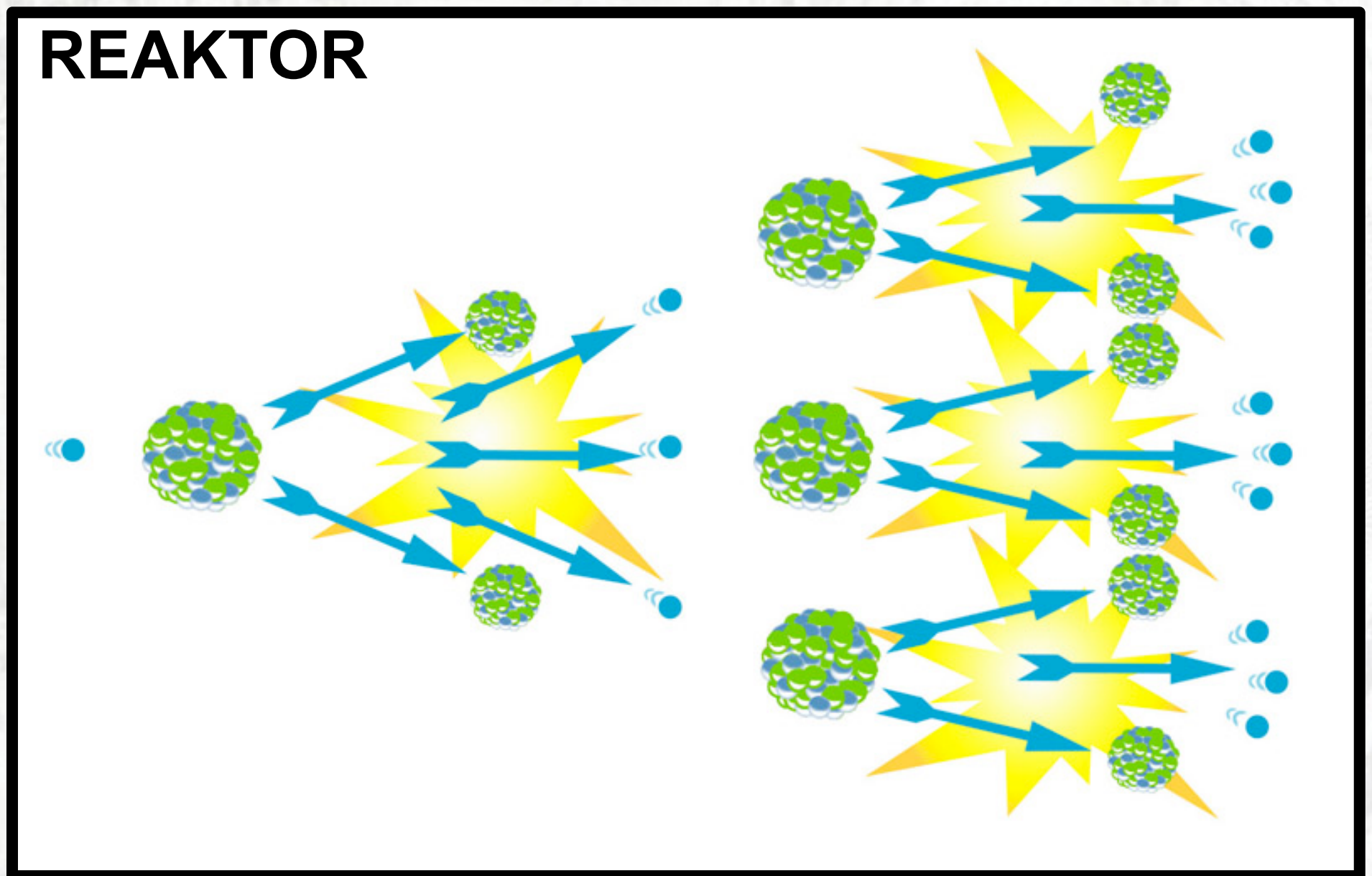
Az előadás célja (a hallgatónak tudnia kell):

- 1. Fúziós reaktorok inherens biztonságát elmagyarázni**
2. Jellemezni a normálüzemi kibocsátásokat (hulladékokat is)
3. Bemutatni pár lehetséges baleseti lefolyást
4. Megmagyarázni a külső költségek fogalmát

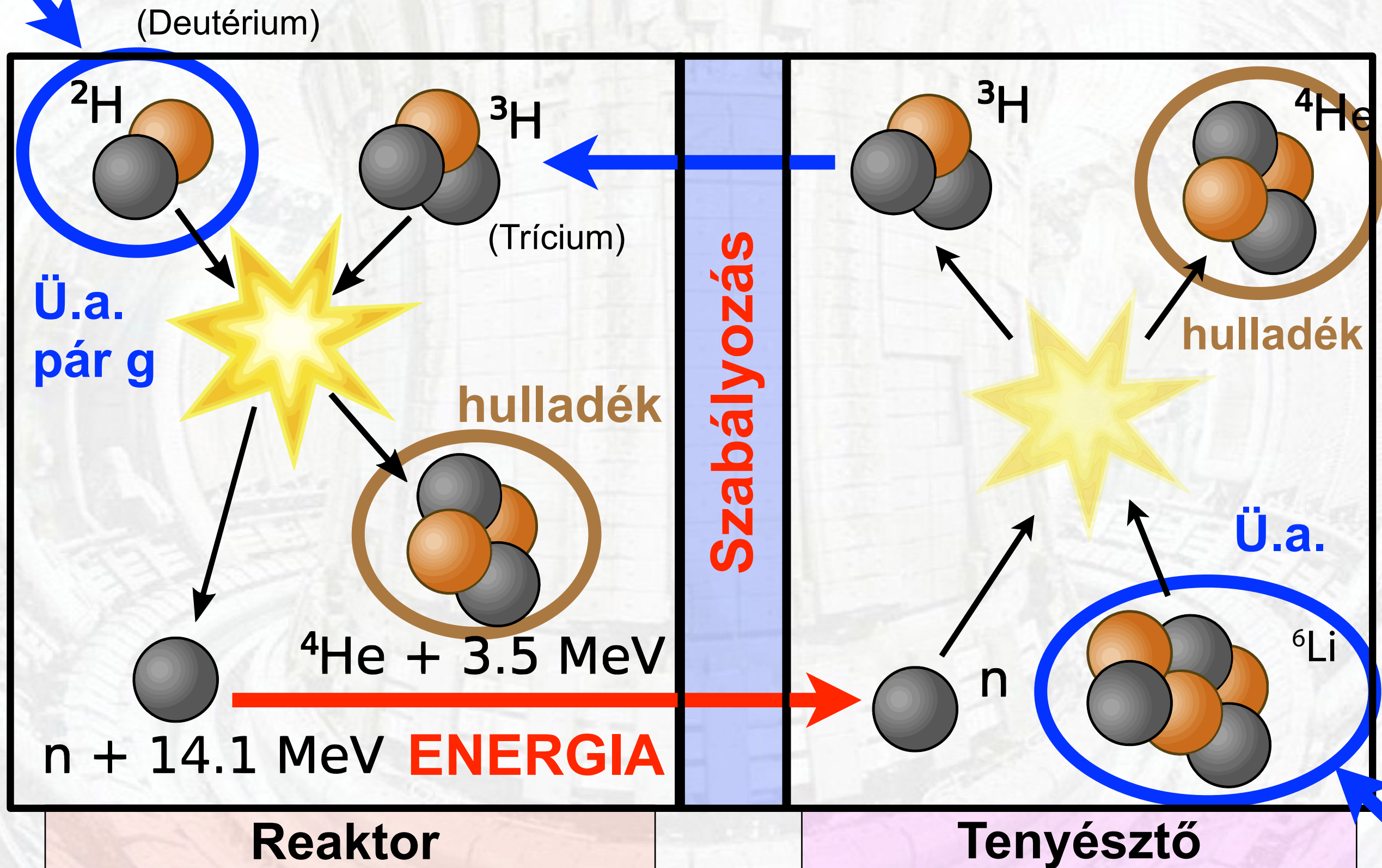
A fúziót más energiaforrásokkal ezen pontokban összehasonlítani

- Láncreakció neutronokkal és ^{235}U -el

Üzemanyag
(évente $\sim 1\text{x}$)



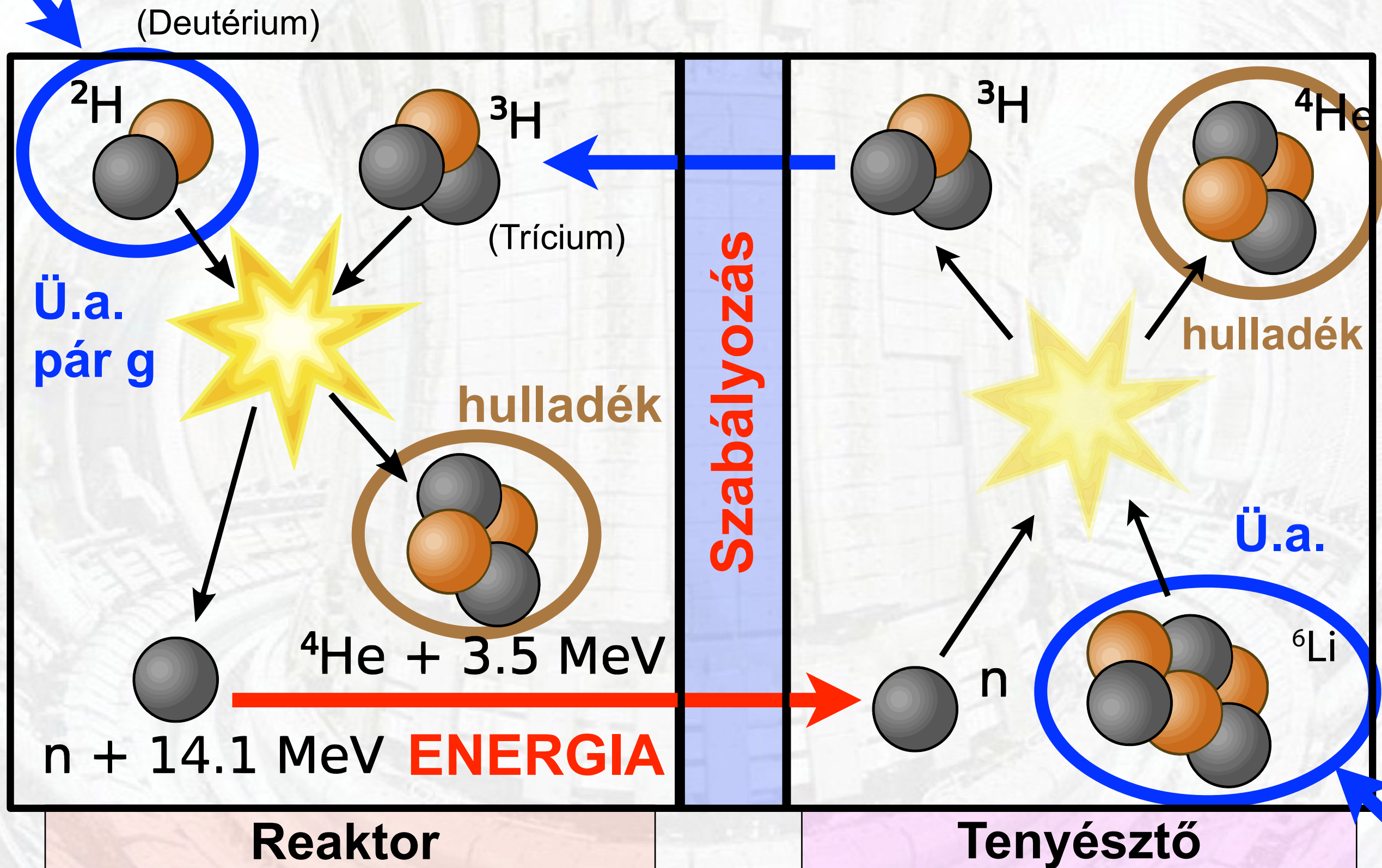
- <http://www.youtube.com/watch?v=HmbzJGf90Xc>



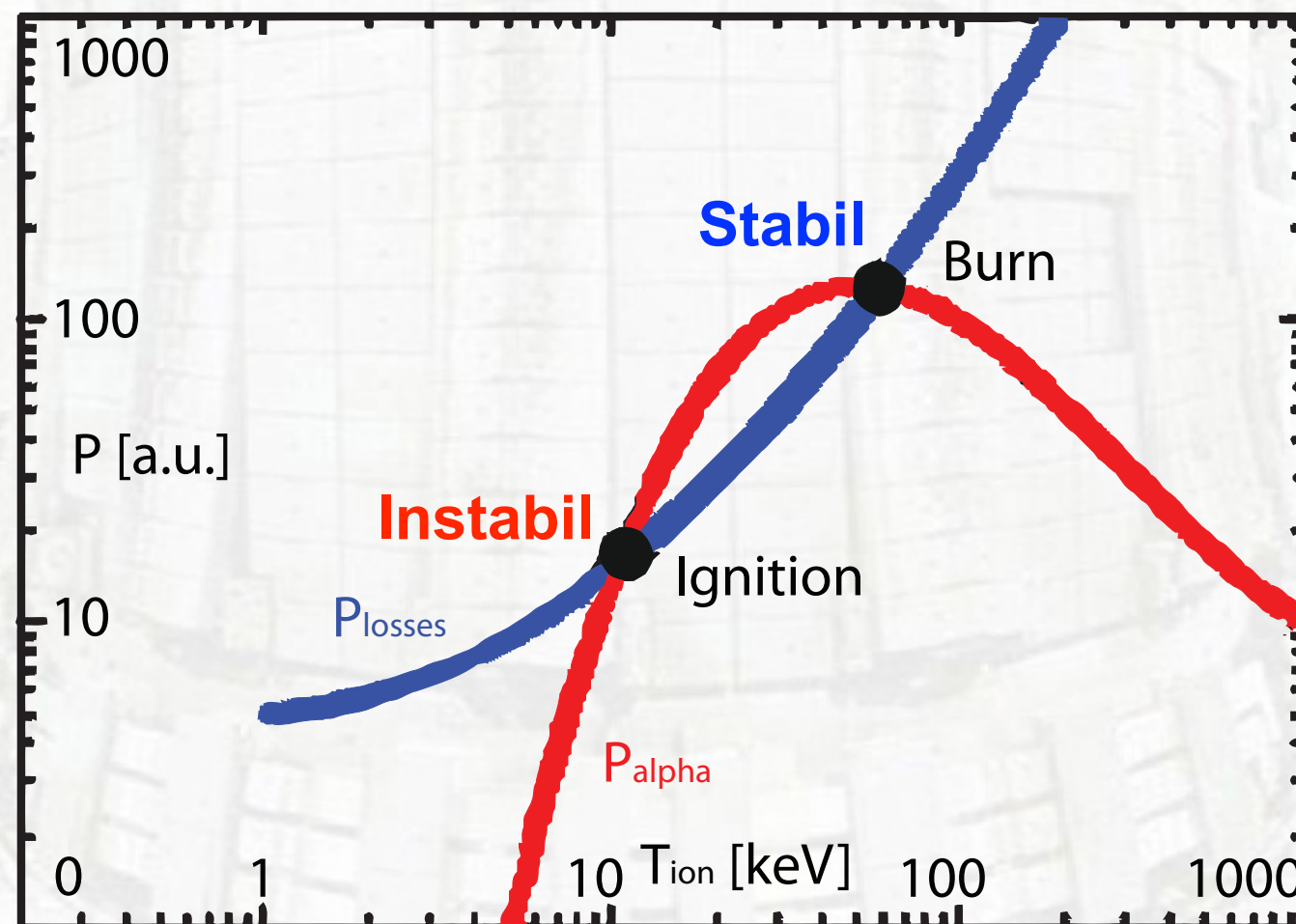
- Kiváltó ok
 - ➔ Külső: pl. földrengés, repülőgép rázuhanás, szabotázs (...)
 - ➔ Belső (lásd később)
- **Kontroll nélküli energiafelszabadulás**
- A berendezés és konténment sérülése
- **Káros anyagok kibocsájtása**
- Terjedés és eloszlás a környezetben (főleg folyékony és gáz formában)
- Környezeti hatások
- Emberi hatások

- *Emlékezzünk: az ideális energiaforrás “**katasztrófa mentes**”*
- ➔ “Minden lehetséges baleseti következményt passzív eszközökkel a konténmenten belül kell tartani. A konténment nem sérülhet meg.”
- **Stratégia:** (fontossági sorrendben)
 1. **Készletek minimalizálása** (“Nincs bent ➔ nem mehet ki”)
 2. **Passzív megoldások** (A fizika nem hagy cserben!)
 3. Robosztus, többszintű konténment (“Redundancia és diverzitás”)
 4. **Aktív módszerek a kárcsökkenésre**





- **Nincs láncreakció**, csak kis mennyiségű üzemanyag.
- Eleve nehéz fenntartani a plazmát ➔ **egyből leáll!**
- Hővesztés a hőmérséklettel monoton nő, a fúziós teljesítménynek maximuma van: **Nem tud megszabadni.**

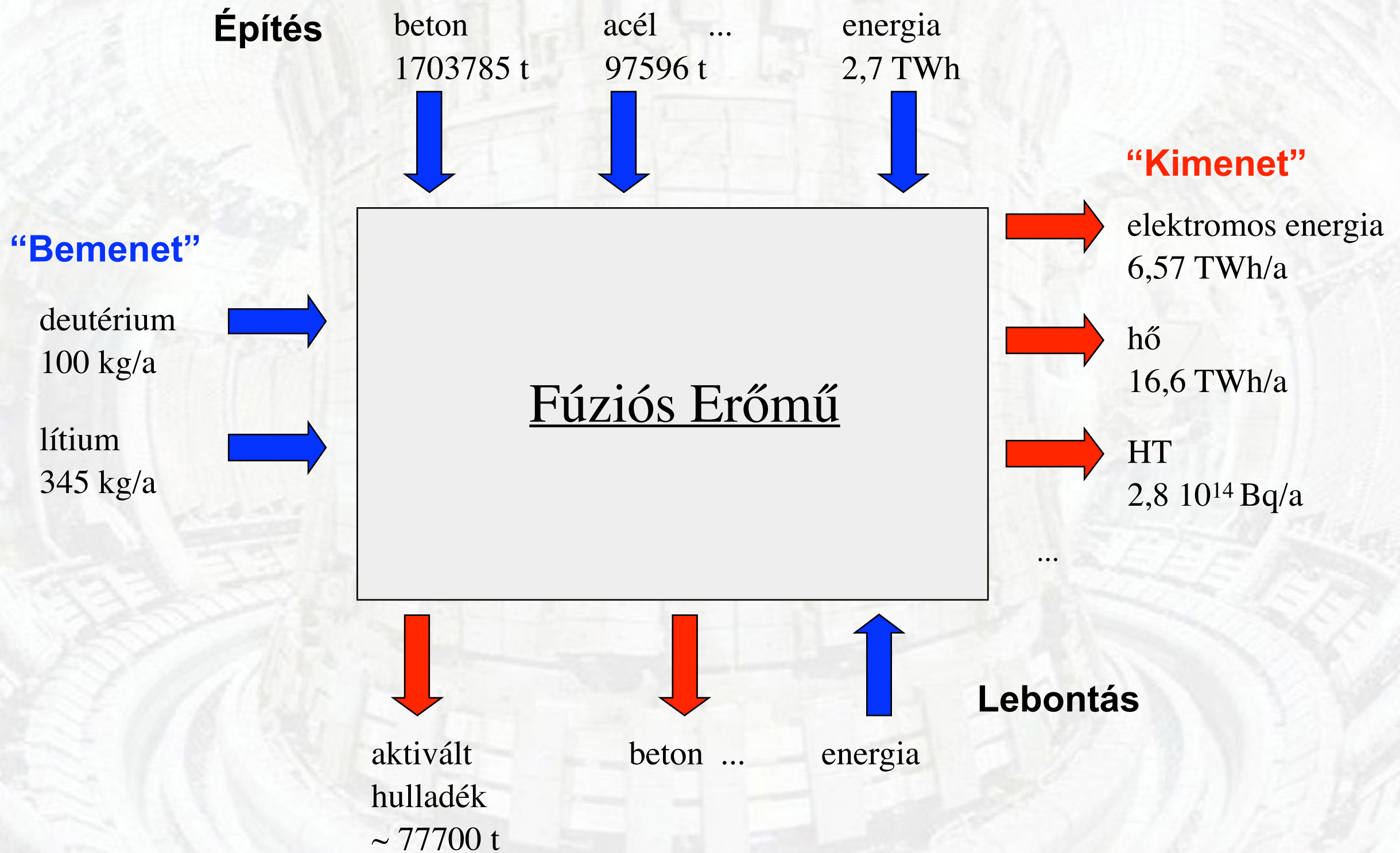


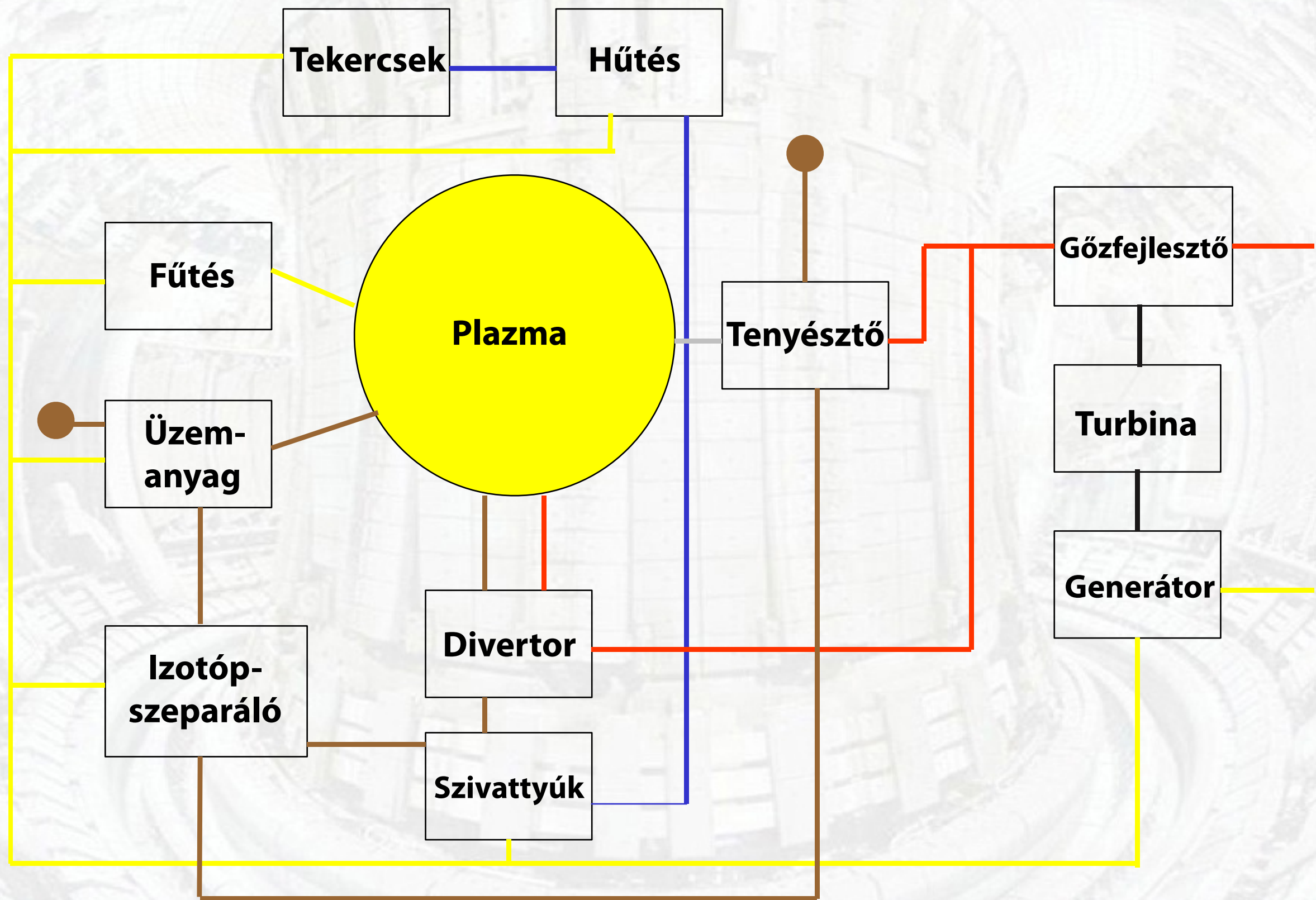
- **Önszabályozás, passzív biztonság (fizika törvényei)**

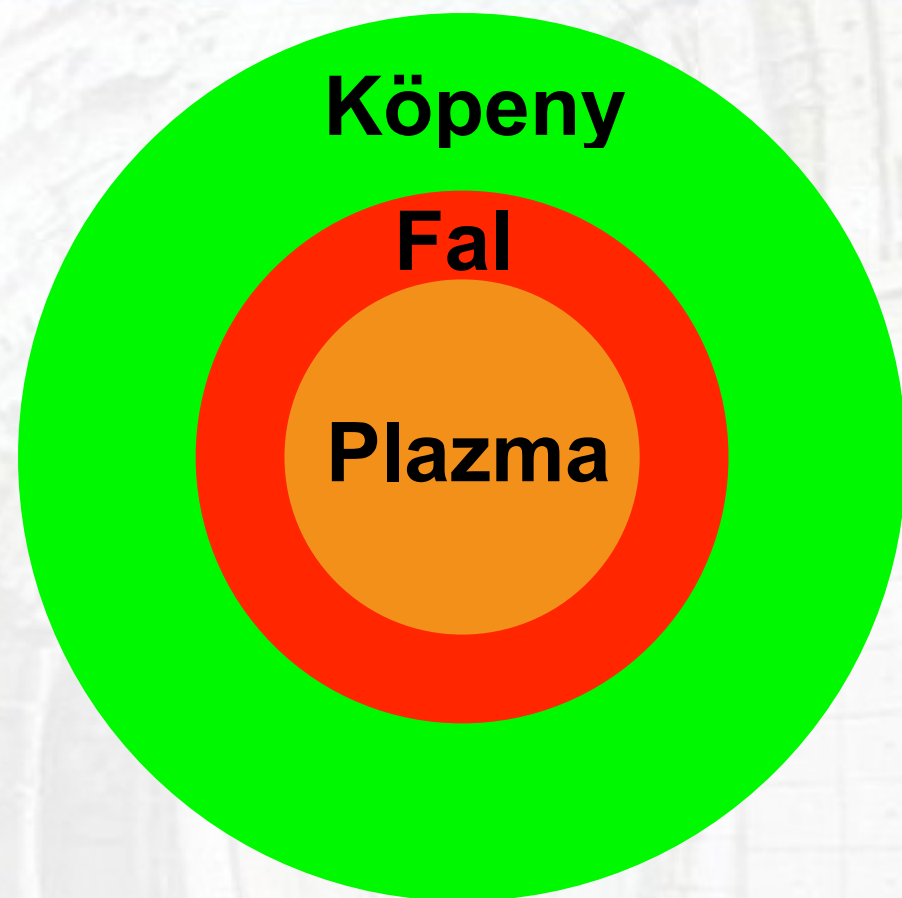
Az előadás célja (a hallgatónak tudnia kell):

1. Fúziós reaktorok inherens biztonságát elmagyarázni
- 2. Jellemezni a normálüzemi kibocsátásokat (hulladékokat is)**
3. Bemutatni pár lehetséges baleseti lefolyást
4. Megmagyarázni a külső költségek fogalmát

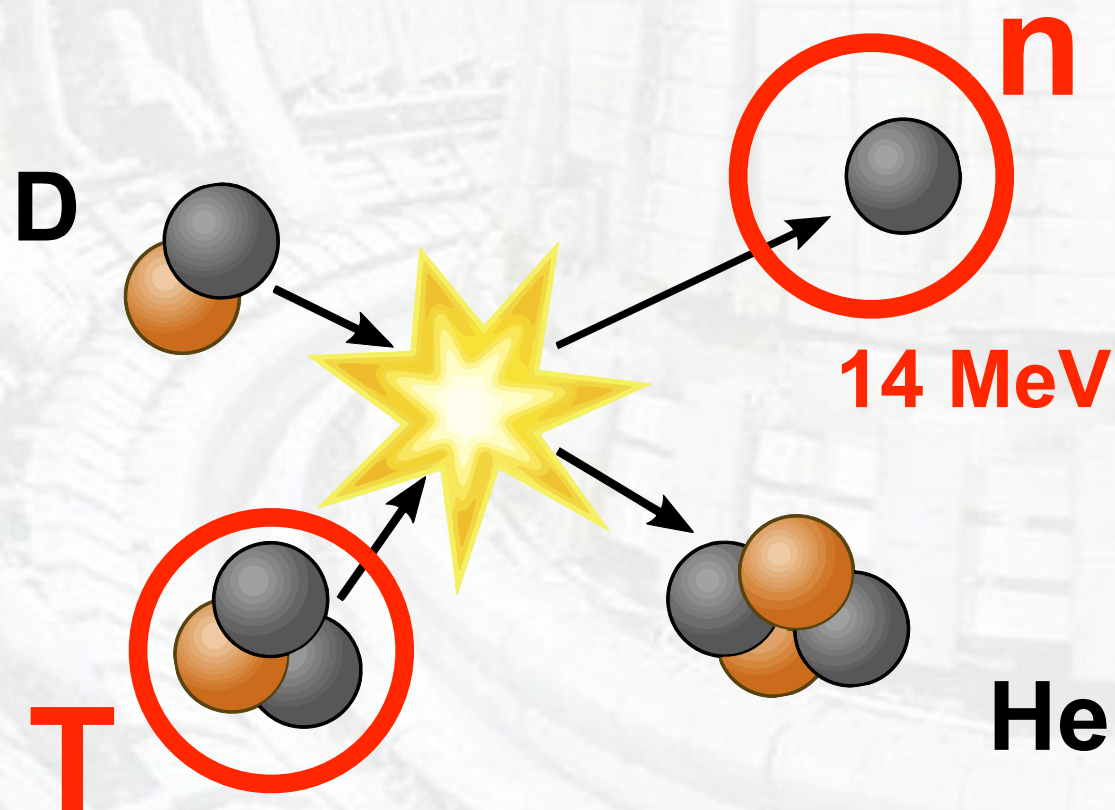
**A fúziót más energiaforrásokkal ezen pontokban
összehasonlítani**





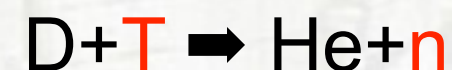


- **Köpeny**: neutron- és hőelnyelő, trícium forrás
- **Első fal**: hő- és tríciumnyelő
- **Plazma**: neutronok-, hő- és hulladékok forrása



Veszélyforrások:

Látható a reakcióegyenletből:



- ➔ T: üzemanyag - **radioaktív**
 - ➔ n: fúziós termék, az energia- és üzemanyag-termelés forrása
- Aktivációs problémák**

- Aktivitás $\Rightarrow A$, bomlás/sec, $[1/s]=[Bq]$
- Elnyelt dózis $\Rightarrow D_r$, energia/tömeg, $[J/kg]=[Gy]$
 - $\Rightarrow$ Fizikai
- Egyenérték dózis $\Rightarrow H_T = \sum D_r w_r$, $[J/kg]=[Sv]$; $w_r=1-20$
 - $\Rightarrow$ Sugárzás minősége
- **Effektív dózis** $\Rightarrow H_{eff} = \sum H_T w_T$, $[J/kg]=[Sv]$; $\sum w_T=1$
 - $\Rightarrow$ Különböző szövetek
- Dóziskonverziós tényező (DCF), H_{eff}/A , $[Sv/Bq]$

(Részletekért lásd sugárvédelmi irodalom)

- Várható T-készlet: pár kg. ~0.5 g plazmában, de köpeny, keringetés, feldolgozás, tárolás...
- Főbb formái: HT, HTO
- $T_{1/2}=12.3$ év, gyenge β -sugárzó ($E_{\text{átl}}=5.7$ keV, $E_{\text{max}}=18.5$ keV. Rövid hatótávú. 6 μm beh. mélység vs 70 μm elhalt bőrréteg $\Rightarrow$ **külső forrásként nem veszélyes**)
- Inkorporáció: **HTO veszélyesebb**, gyorsan szétterjed a testben. $T_{\text{bio}} = 11$ nap. Súlyfaktora $w_r=1-3$.
- $\text{DCF} = 1.8 \cdot 10^{-11} \text{ Sv/Bq}$ (foly.), $1.8 \cdot 10^{-15} \text{ Sv/Bq}$ (gáz)
- **Csak 1/800 -a ^{137}CS -nak és 1/5 000 000 a ^{239}Pu -nak!**
- Nagyon illékony: **nincs hosszú távú szennyezésveszély**
- Óceánokba kerül. Természetes készlet: 80 kg (globális). (500 kg volt a nukleáris fegyvertesztek idején)

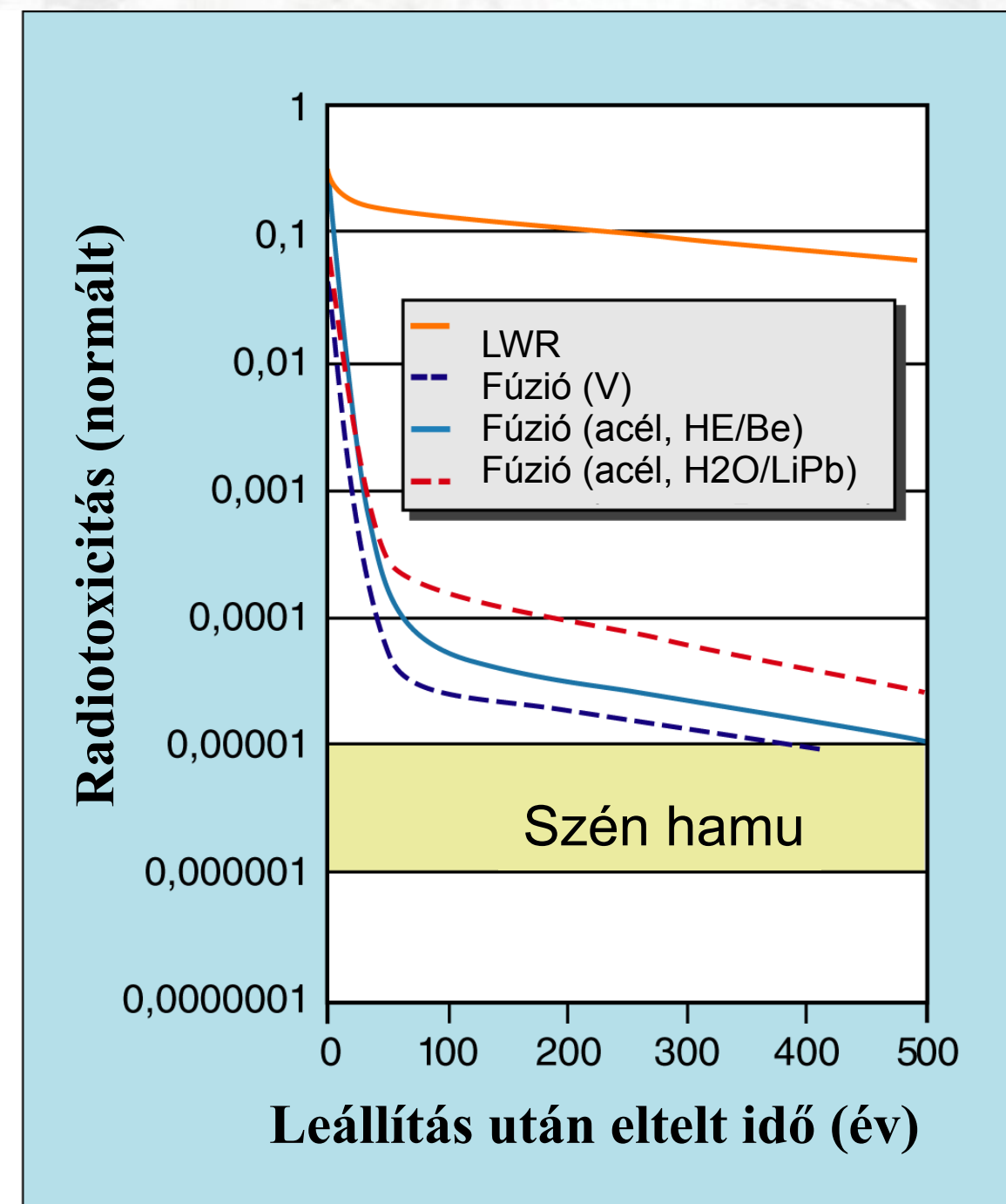
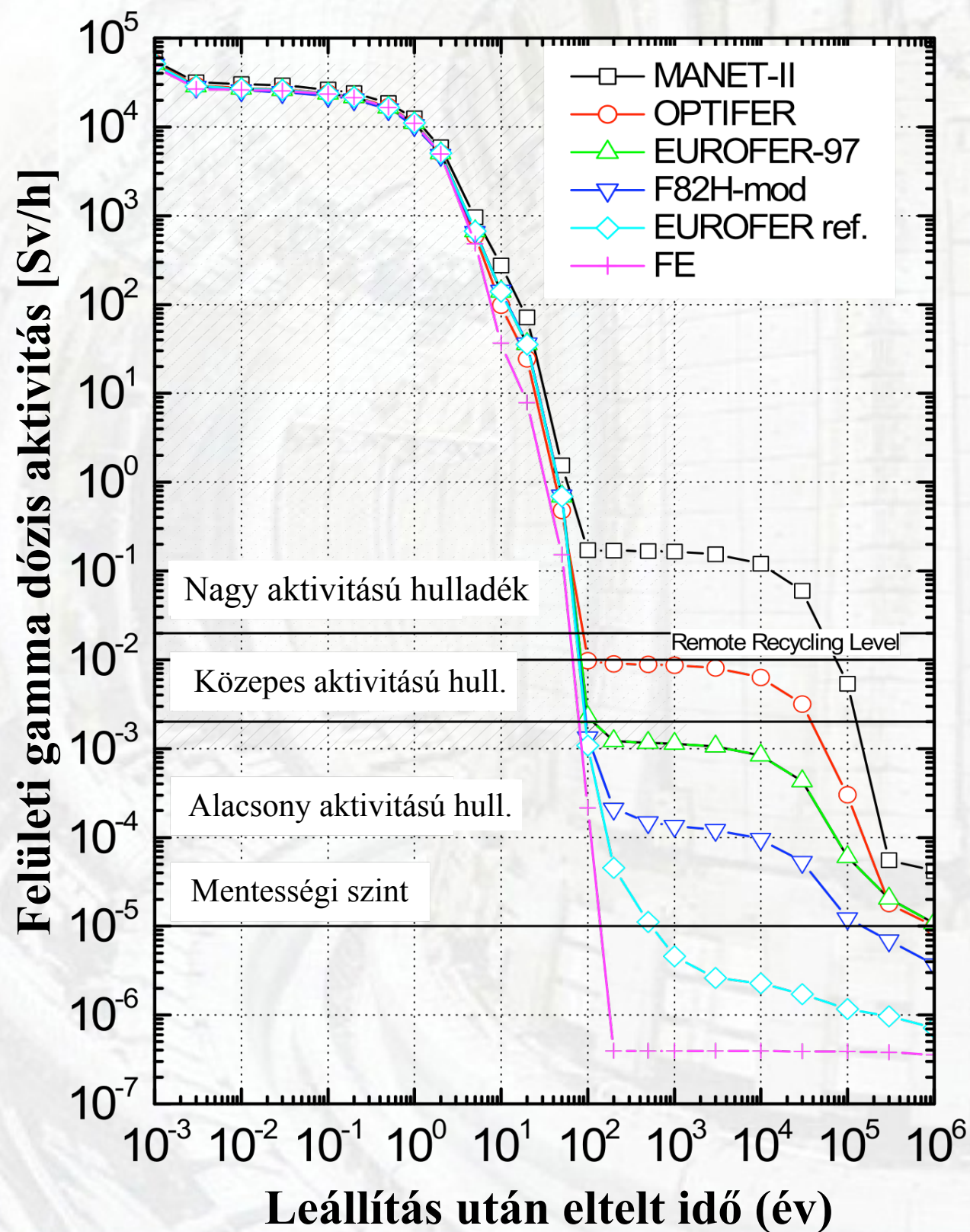
- Neutron fluxus: $2\text{--}5 \text{ MW/m}^2$. Csere 2-5 évente.
- Cél neutron fluenciátűrés: 12.5 MWa/m^2 - nem könnyű!
- Fő radioaktív forrás: **aktivációs termékek.**
- Aktiváció erősen függ a választott anyagoktól.
Hagyományos acéllal a fissziós erőművek strukturális hulladékának felénél lennénk.
- Nem mobilis, de a falról származó por mobilis.
Alacsony rendszám esetén (C, Be, B) kisebb gond.
Nagy rendszámnál (pl W a divertorban) por $\sim$ T.
- **Legkívánatosabb anyagok: V, Cr, Ti.**
(Még visszatérünk rá)

- **Legfontosabb: illékony T.** Tapasztalat: CANDU (D₂O).
→ Kibocsátás 2g / év alatt (620 GBq / év)
- Modellszámítás: 620 GBq / év HTO kibocsátásra,
100 m effektív kéménymagasság, légköri terjedés.
Konzervatív becslés **23 μ Sv / év** (MEI*).
Ez a **természetes háttérsugárzás 1%-a**.
Lakossági dóziskorlát (külső forrásokból): **1 mSv / year**.



***Most Exposed Individual:** “a kerítésnél lakó ember”.

- **Fő forrás: divertor, első fal és köpeny** csere & leszerelés.
14 MeV neutronok intenzív fluxusa éri.
Aktiváció csak a plazmához közel domináns.
- Minden hulladékot figyelembe kell vennünk.
Nincsenek alfa-bomlók; rövid felezési idők.
100 év hűtési idő után ~1000 X jobb mint a fission hulladék.
- 25 000 m³ teljes hulladék, PWR-el összemérhető.
DE: Fission hulladék nem tömöríthető egy fokon túl (hő).
- Távirányított kezelés 25 mSv/h alatt. **Ehhez 50-100 év kell.**
Új anyagokkal (pl V) 10-30 év - olcsóbb, jobb.
- **0.1 ppm szennyezőszint alatt kell maradni**, különben elvesz ez az előny!



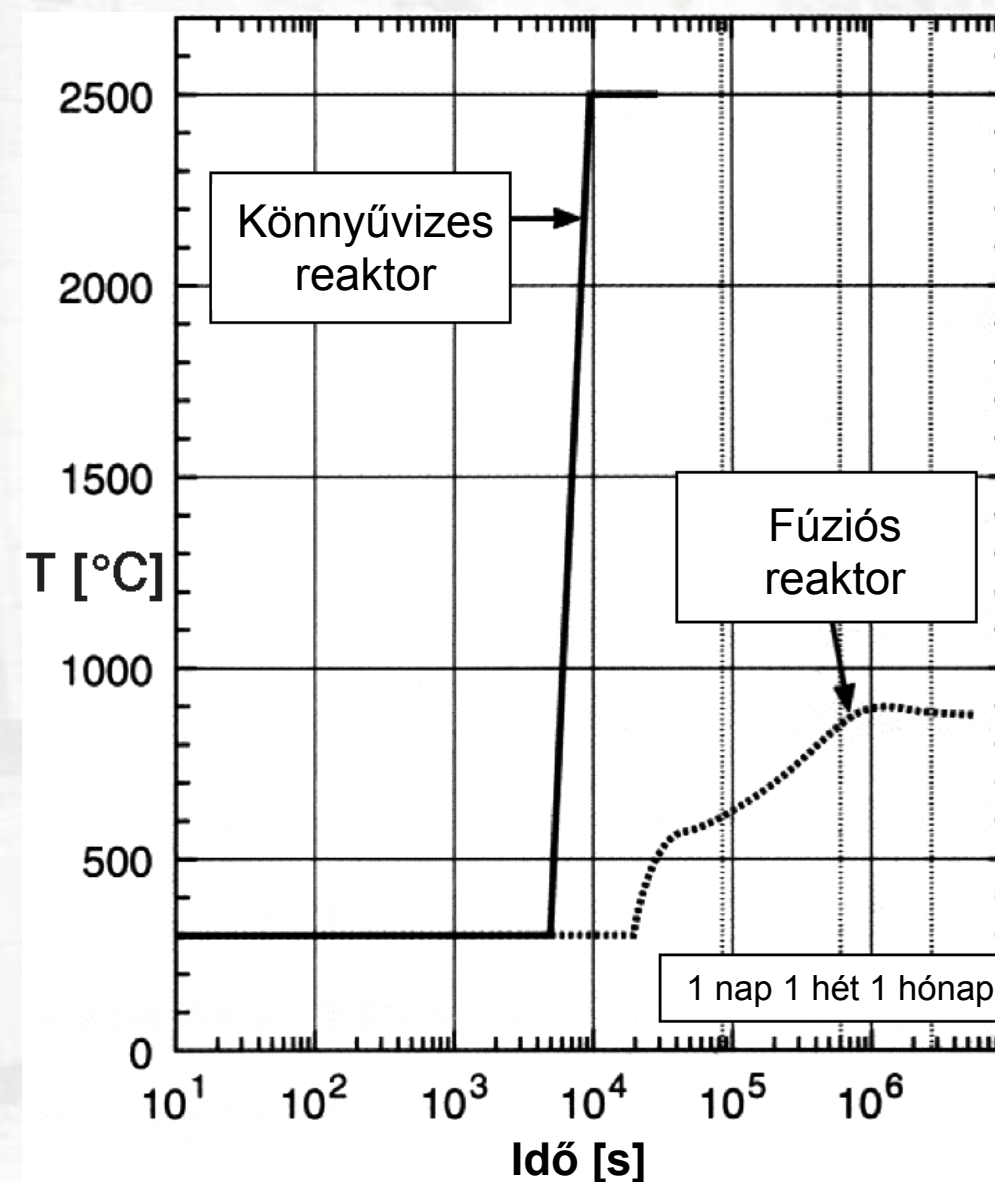
Az előadás célja (a hallgatónak tudnia kell):

1. Fúziós reaktorok inherens biztonságát elmagyarázni
2. Jellemezni a normálüzemi kibocsátásokat (hulladékokat is)
- 3. Bemutatni pár lehetséges baleseti lefolyást**
4. Megmagyarázni a külső költségek fogalmát

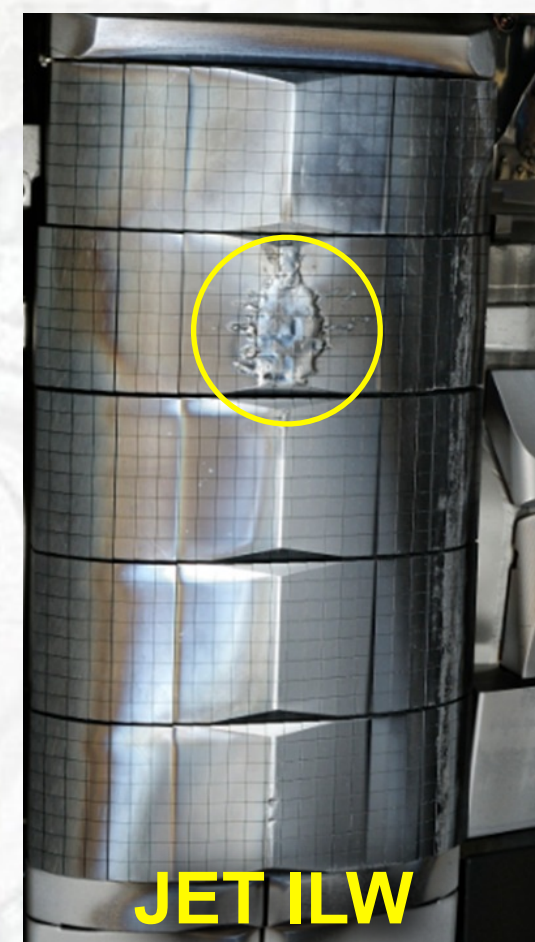
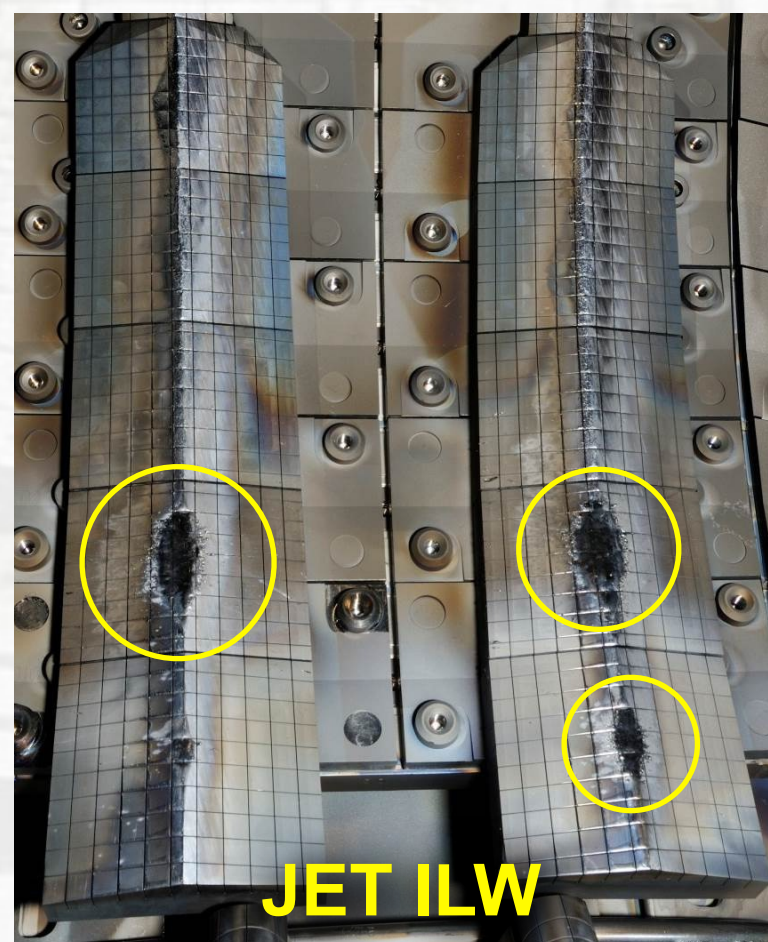
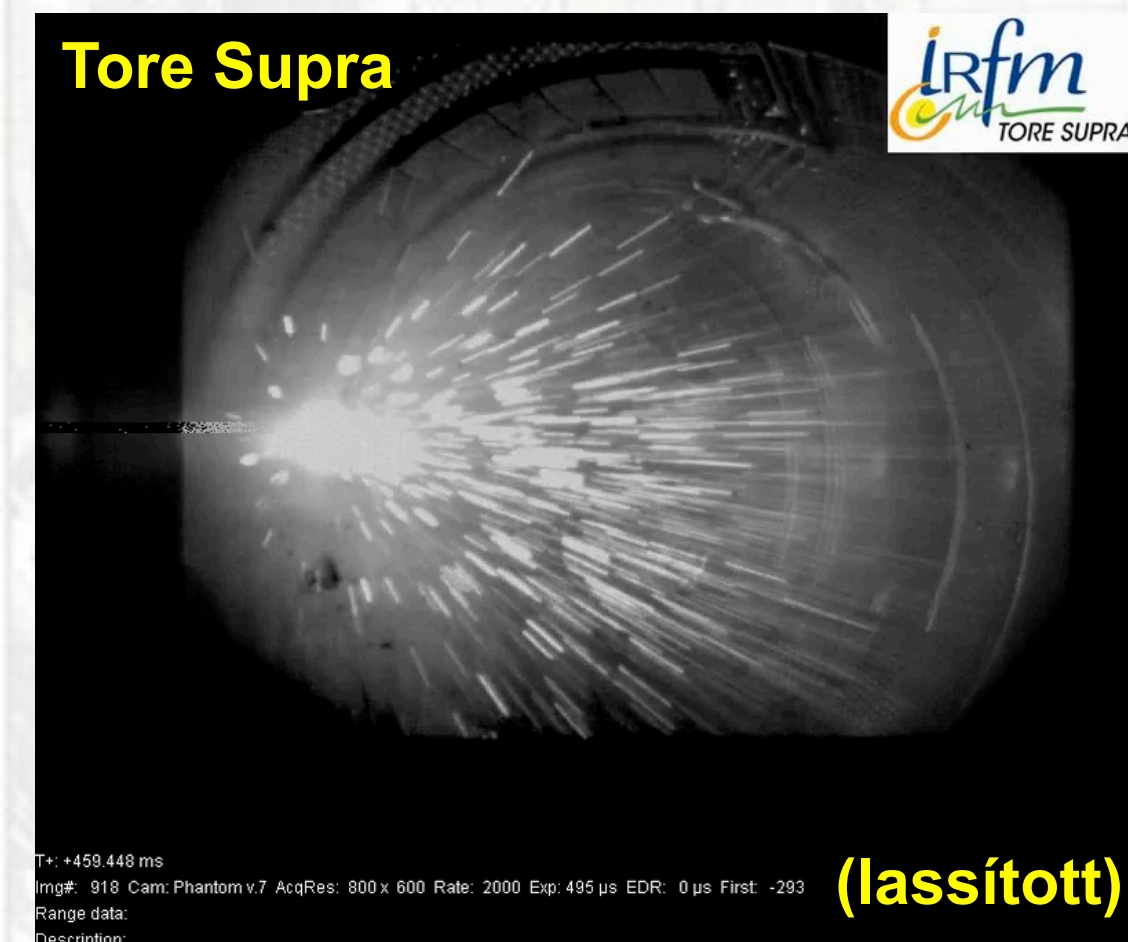
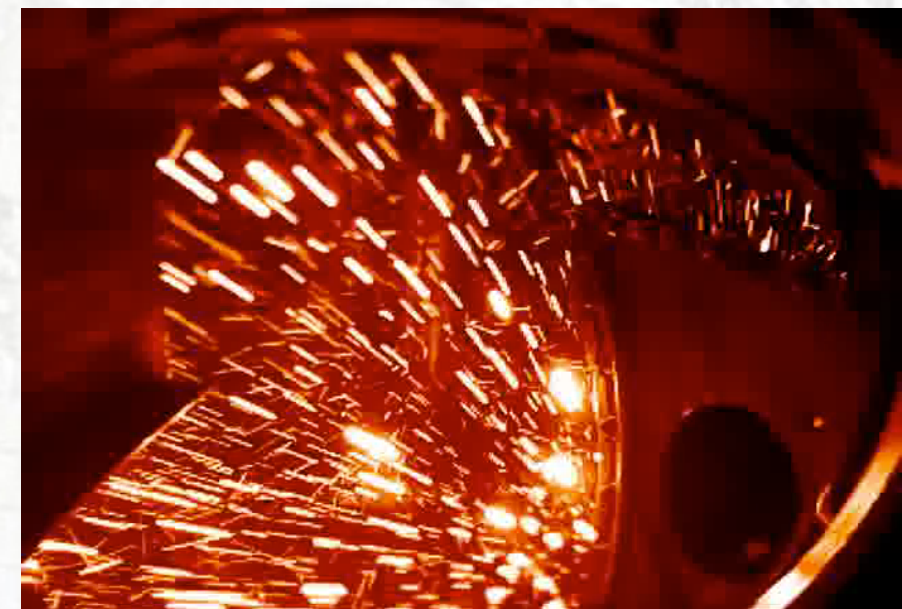
**A fúziót más energiaforrásokkal ezen pontokban
összehasonlítani**

- Alacsony kezdeti energiák, **nincs nukleáris baleset.**
- Fő gond a bomláshő: hűtést igényel.
Leolvadás ($\sim 1400^\circ\text{C}$) tisztán passzív hűtéssel elkerülhető.
A hőszugárzás sosem hagy cserben! 🎵

Forrás	Energia (GJ)	Időskála
Plazma	2	$<1''$
DT (plazma)	250	1'
Tekercsek	100	1'
Hűtőközeg	300	10'
Bomláshő	80	1 h
	550	1 d
	2000	1 w



- Vákuumvesztés, levegő a plazma kamrában
 - ➔ kémiai reakciók (tűz), trícium transzport
- LOCA: hűtőközegvesztéses balesetek
 - ➔ hirtelen tágulás/nyomásvesztés, hidrogénfejlődés (robbanásveszély)
- Leszakadás a hálózatról
 - ➔ Hűtőközeg-keringetés leáll, mágneses quench
- Ívkisülések a tekercsrendszerben
 - ➔ Lokális olvadások, tríciumkibocsájtás az épületbe
- Tekercs deformáció és elmozdulás
 - ➔ Szerkezeti roncsolódás, vákuumvesztés, “lövedék” keletkezés
- Folyékony hélium térfogatváltozása
 - ➔ Hirtelen tágulás/nyomásvesztés
- Robbanás a hidrogénizotóp-szeparálóban
 - ➔ épület károsodás, trícium kibocsájtás
- Tűz a tríciumtárolókban
 - ➔ Tríciumkibocsájtás



- **ITER-re részletes elemzések léteznek.**
Pl.: Vákuumvesztés tűzhez vezethet. *A hűtőrendszer hőtehetetlensége miatt ez a tűz nem tud fennmaradni.*
Van némi T kibocsájtás, de konténmenten belül.
- **Fő cél: minden baleseti hatást passzív eszközökkel a konténmentben tartani. A konténment nem sérülhet.**
- **Stragtgégia: robosztus többszintű konténment, radioaktív- és energiakészletek csökkentése, passzív módszerek, jó minőségű anyagok alkalmazása.**
- ➔ Aktív módszerek a károk csökkentésére, megelőzésre.
- **Diverzitás és redundancia fontos.**

- Korai dózis: egy héten belül. 100 mSv felett: kitelepítés.
- Részletes modellszámítások állnak rendelkezésre.

Forrás	Dózis	Típus
HTO	0,5 mSv/g-T	korai
	2,5 mSv/g-T	krónikus
HT	0,04 mSV/g-T	korai
Fal	0,04 mSV/g	krónikus
“ITER”	2 mSv/g	korai

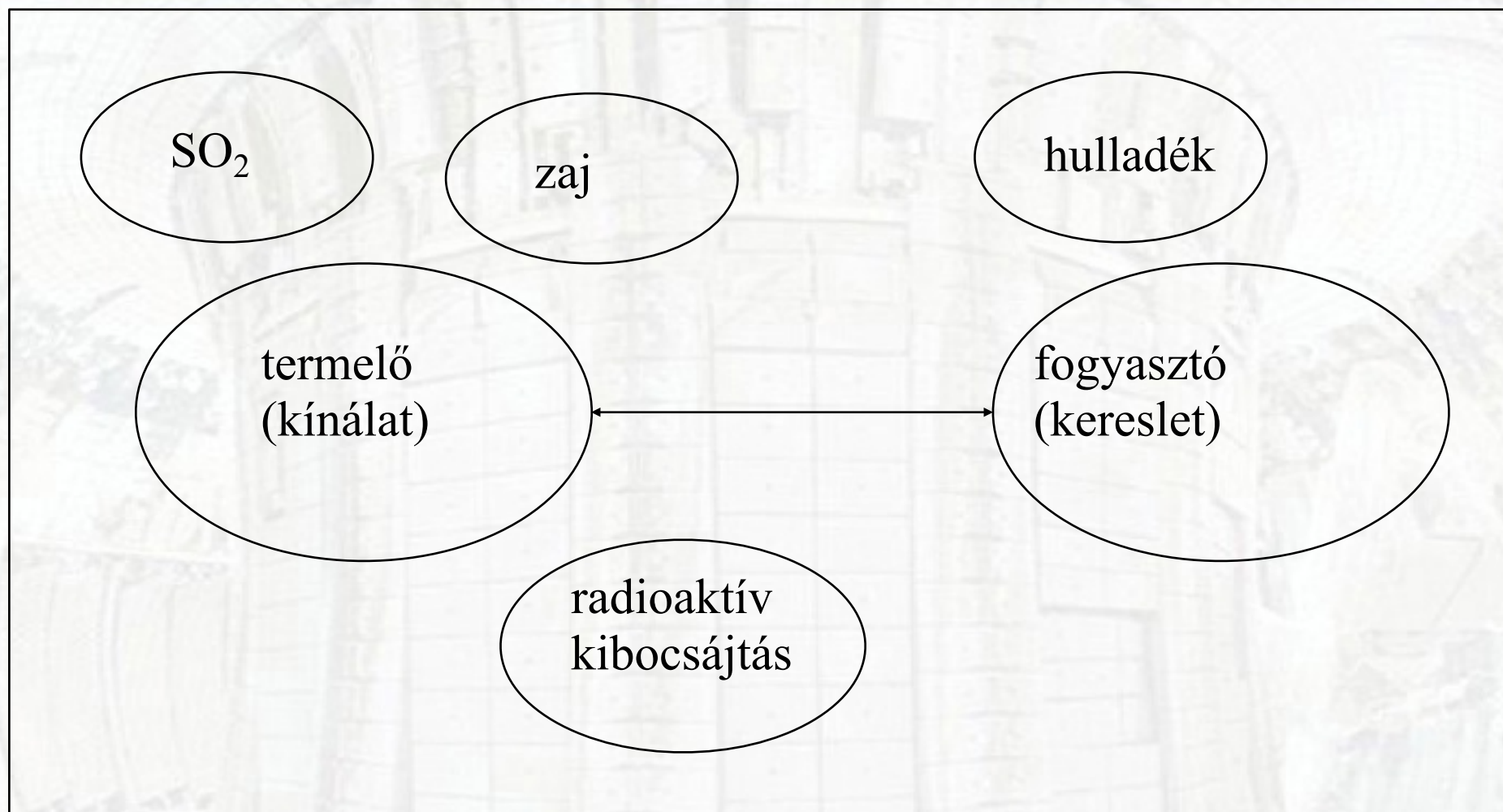
- Tervezési üzemzavar: T kibocsájtás 20 g alatt. OK, ha a konténment sértetlen. **Kitelepítés elkerüléséhez < 200 g**
➔ **max 150 g T bármilyen részegységben.**
- Még mindig 500x jobb mint a ^{131}I vagy ^{137}Cs !

- Li: T tenyésztő. Folyékony Li - tenyésztés és hőcsere. MHD: nagy nyomásvesztés mágneses terekben: gond.
 - Li: Agresszív kémiai reakciók jónéhány anyaggal. 7 TJ potenciál egy Li rendszerben. H termelés vízzel érintkezve.
 - $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ eutektikum - folyékony fém. Ólom mérgező, nehéz, durván aktiválódik, elnyeli a tríciumot.
- Megoldás: Li kerámiák (Li_2O , Li_4SiO_4 , Li_2ZrO_3) + n sokszorozók (Be - mérgező, T nyelő).
- Be nélkül? Li_2O nagy Li sűrűség ($> \text{Li}$), kis aktiválódás.
- A tenyésztőanyag nagyban befolyásolja a fúziós erőmű biztonsági és környezeti tulajdonságait!

Az előadás célja (a hallgatónak tudnia kell):

1. Fúziós reaktorok inherens biztonságát elmagyarázni
2. Jellemezni a normálüzemi kibocsátásokat (hulladékokat is)
3. Bemutatni pár lehetséges baleseti lefolyást
- 4. Megmagyarázni a külső költségek fogalmát**

**A fúziót más energiaforrásokkal ezen pontokban
összehasonlítani**



- A külső költségek egy egyedi skála a nagyban különböző technológiák összehasonlítására.
- A külső költségek becslése a környezeti terhelés általános becslésének alapjaként szolgál(hat).
- A külső költségekről érdekes pl. "The Story of Stuff"
<https://www.youtube.com/watch?v=9GorqroiqqM?t=8m26s>

- Az alapvető problémák
 - ➔ nem piaci áruk árazása mint pl emberi élet, biodiverzitás, ...
 - ➔ jövőbeni károk árazása (megengedőek vagyunk)
- Technikai problémák
 - ➔ A vizsgálat térbeli és időbeli korlátai
 - ➔ Egzakt forrástagok és terjedési törvények
 - ➔ Dózis-hatás kapcsolata
- Az emberélet árazásának három megközelítése: mennyit fizet érte, mennyit fogad el érte, direkt megkérdezés

Módszer	UK [Mio EUR (1990)]	USA [Mio EUR (1990)]
Fizetne érte	0,7-3,4	1,0-1,1
Elfogadna érte	2,8-3,5	2,5-5,5
Megkérdezés	4,1-6,3	1,4-2,5
Átlag	2,5-4,4	2,0-3,0

- Egy adott erőmű adott helyen gyakorolt hatásának kiértékelése. A kibocsájtást a forrástól a hatás helyéig követjük.

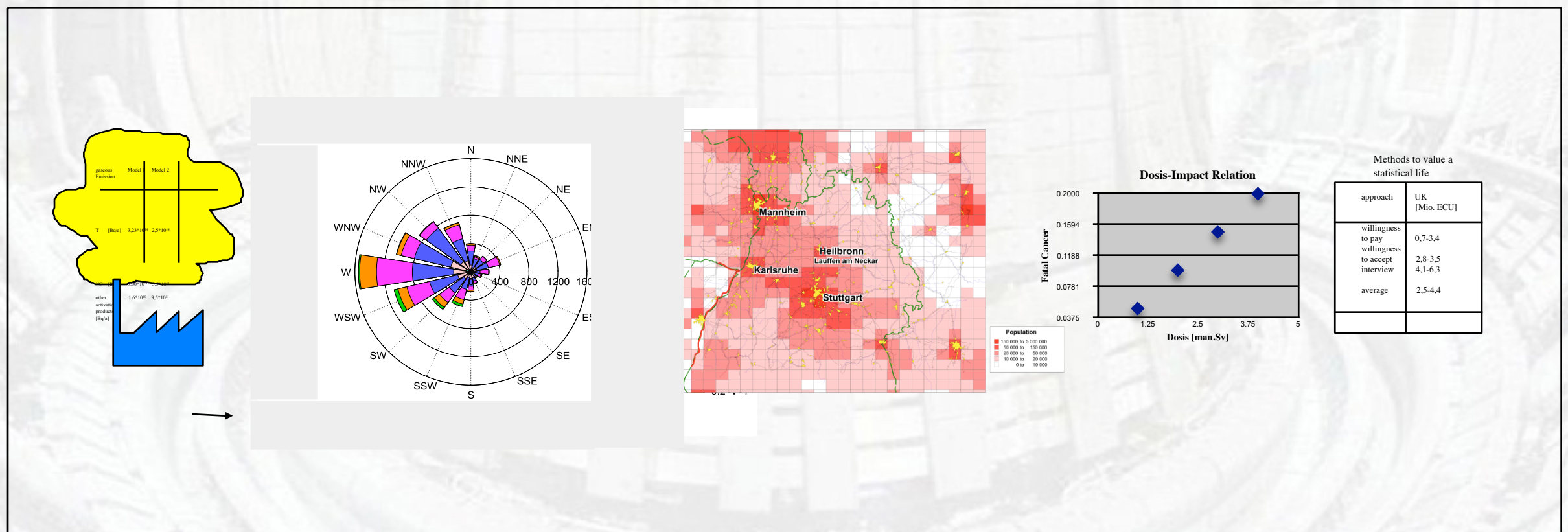
Kibocsájtás

Terjedés

Dózis(ok)

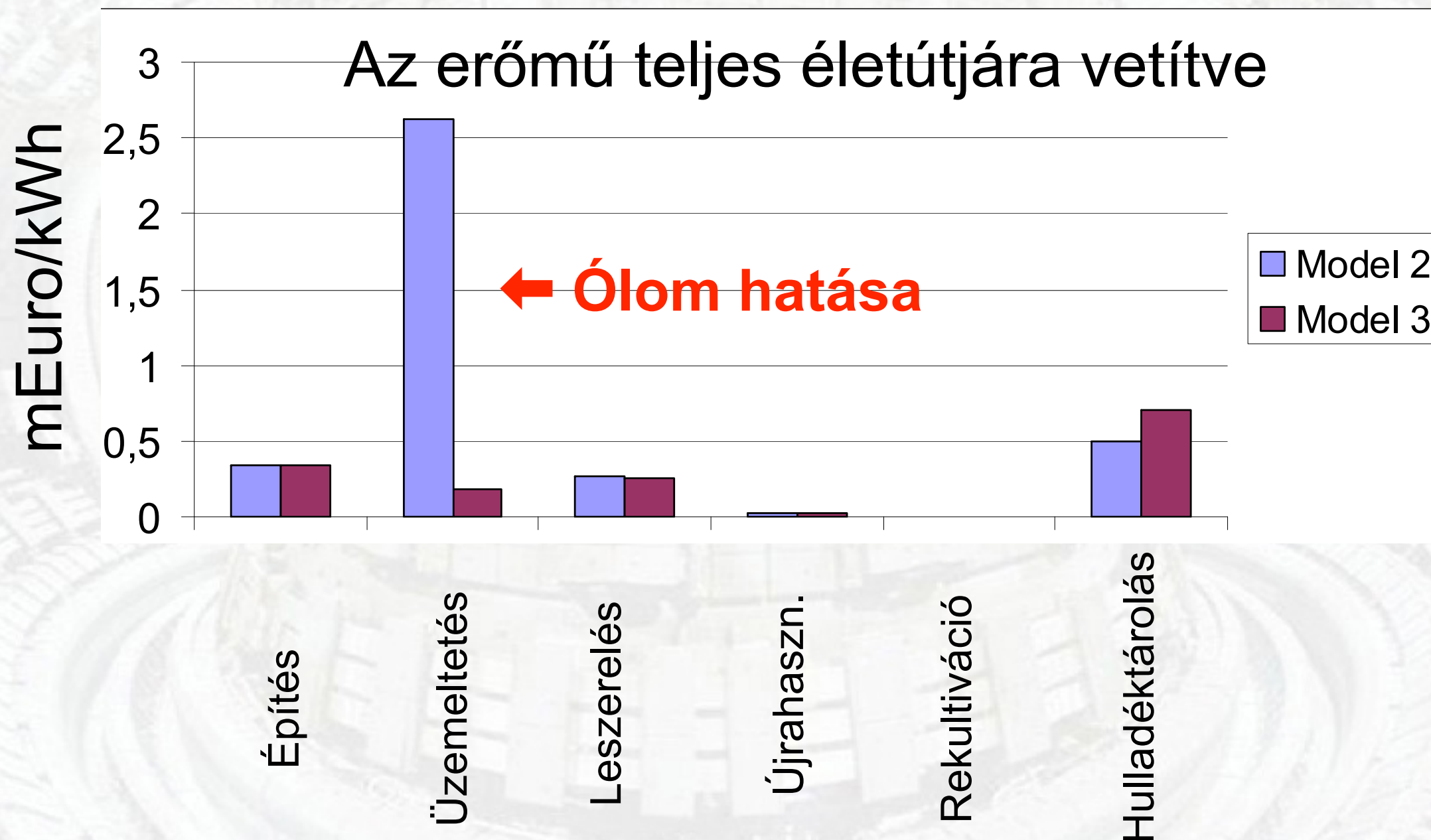
Hatás

“pénzre váltás”



	Model 1	Model 2	Model 3
Thermal Power [MW]	3520	3810	3520
Fusion Power [MW]	3000	3000	3000
Electrical Power [MW]	1000	1000	1000
Heating Power and Current Drive [MW]	75	75	75
Coolant T (p) [°C (bar)]	Helium	Water	Helium
in	260 (90)	265 (130)	260 (90)
out	560 (90)	310 (130)	560 (90)
Availability [%]	75	75	75
Breeder	Li ₂ O	Li ₁₇ Pb ₈₃	Li ₄ SiO ₄ + Beryllium
Structural Material	V5Ti	Low Activation Martensitic Steels	Low Activation Martensitic Steels
Major Radius [m]	9,4	10,3	9,4
Minor Radius [m]	2,09	3,43	2,09
Neutron Wall Load [MW/m ²]	2,1	1,2	2,1
Magnetic Field at Coil [T]	12,8	11,9	12,8

- Normál üzem: 10^{-7} - 10^{-4} mEur/kWh lokális és 0.1 - 1 mEur/kWh globális költség.

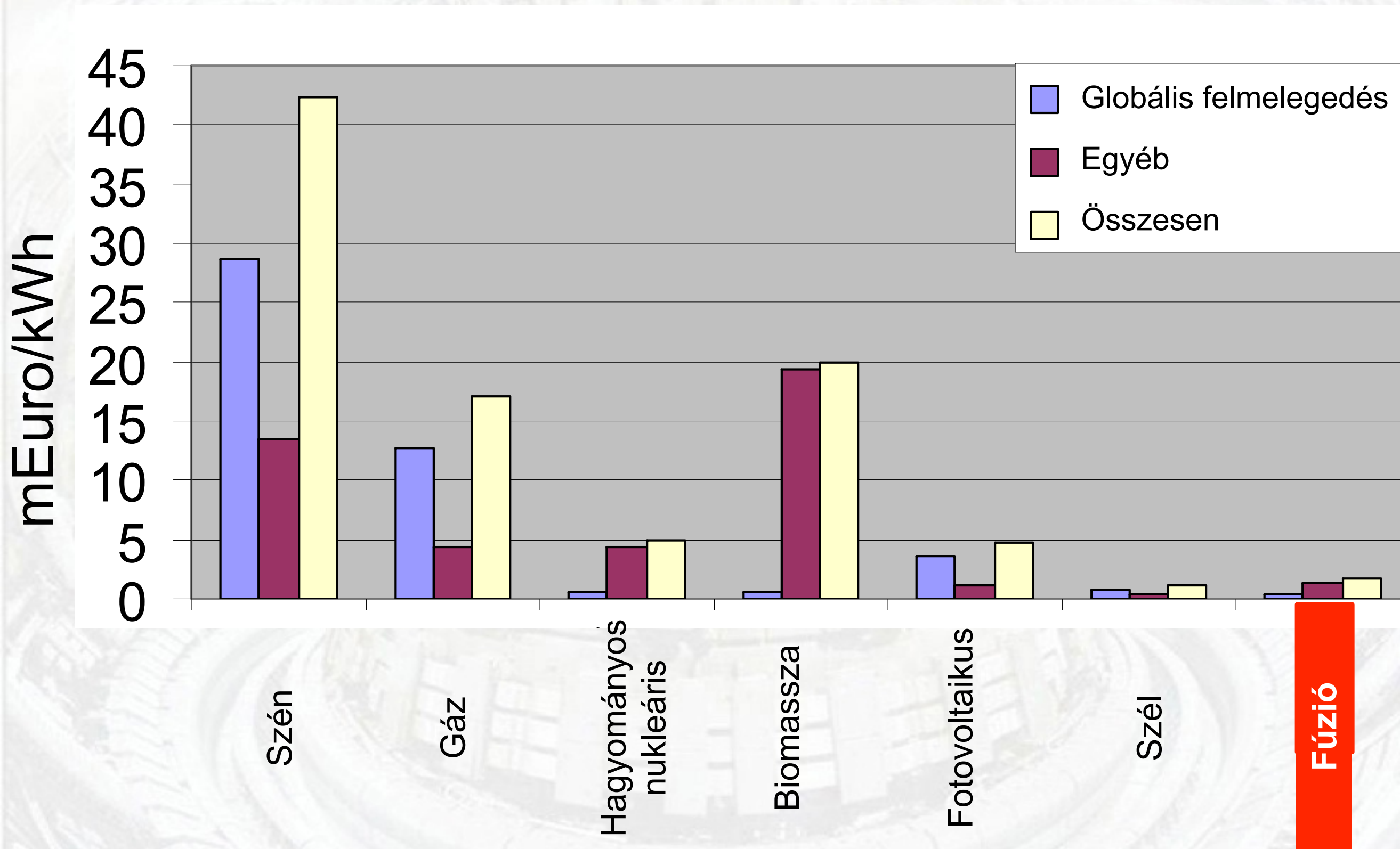


[T. Hamacher *et al.*, "Economic and Environmental Performance of Future Fusion Plants in Comparison" 2004]

- $\text{Üzemzavar költsége} = \text{Üzemzavar hatása} * \text{Valószínűség} * \text{Kockázatkerülési faktor}$

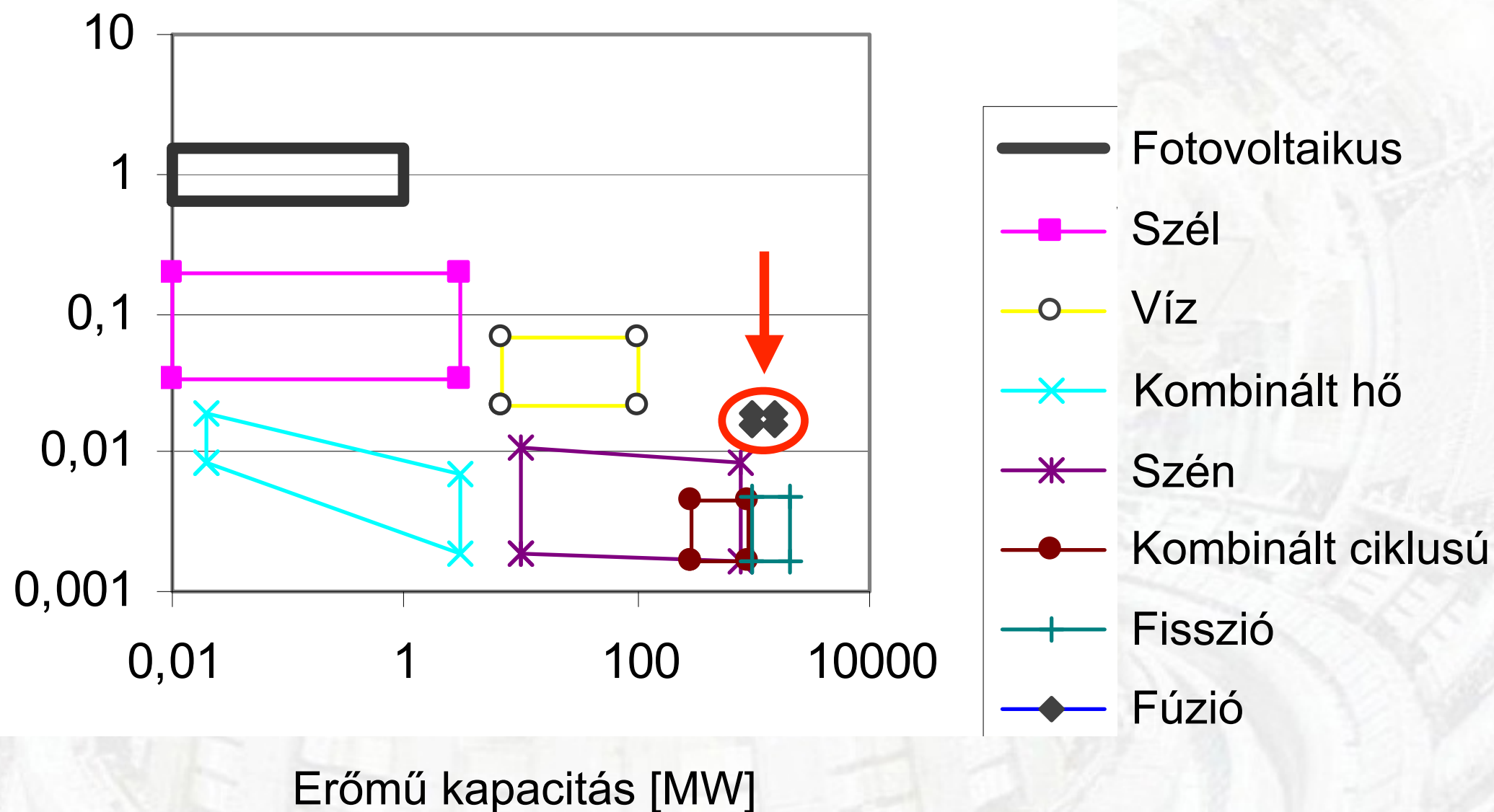
	Fusion	Fission
Cost Category	[MEuro]	[MEuro]
Health Effects	74,5	10844,4
Evacuation and relocation	0,0	98,1
Indirect costs	3,3	488,6
Food ban	0,3	6150,0
Sum	78,1	17581,7

	Fusion	Fission
	[mEuro/kWh]	[mEuro/kWh]
Normalised cost	1,2E-6	4,4E-3
Normalised cost with risk aversion	3,0E-5	8,7E-2



[T. Hamacher *et al.*, "Economic and Environmental Performance of Future Fusion Plants in Comparison" 2004]

Specific Energy Expenditure (SEE)



- **A biztonsági tervezés alapjai: készletminimalizálás, passzív biztonság, redundancia & diverzitás.**
- Fúzióban nincs láncreakció, nincs megszaladás.
- Baleseti kibocsájtást az alacsony készletek és passzív módszerek korlátozzák.
- A fúziós fejlesztésekkel párhuzamosan intenzív kutatások folynak a fúzió várható emberi- és környezeti hatásairól.
- **Mai tudásunk alapján a fúzió beillik a fenntartható fejlődés alapú jövőbe.**
- *Mottó: A day without fusion is like a day without sunshine!*



A naprendszer legnagyobb nukleáris reaktora mint rengeteg anti-nukleáris mozgalom logója: **Epic fail**

Módszer	Limitált "készletek"	Passzív biztonság	Redundáns?
Víz			
Olaj/gáz			
Nukleáris			
Fúzió			

Módszer	Limitált "készletek"	Passzív biztonság	Redundáns?
Víz	X	X	X
Olaj/gáz	X	X	✓
Nukleáris	X	✓	✓
Fúzió	✓	✓	✓