

Gyorsreaktorok szerepe az atomenergetika fenntarthatóságában

Szieberth Máté



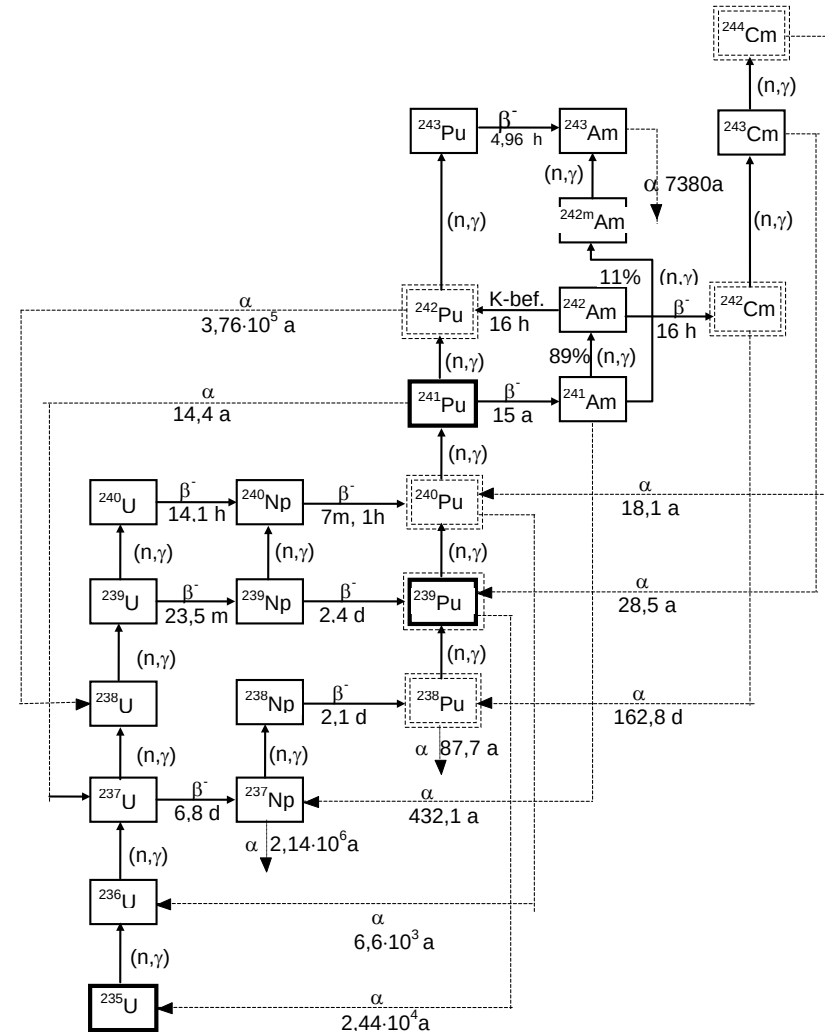
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME)
Nukleáris Technikai Intézet (NTI)

Bevezetés

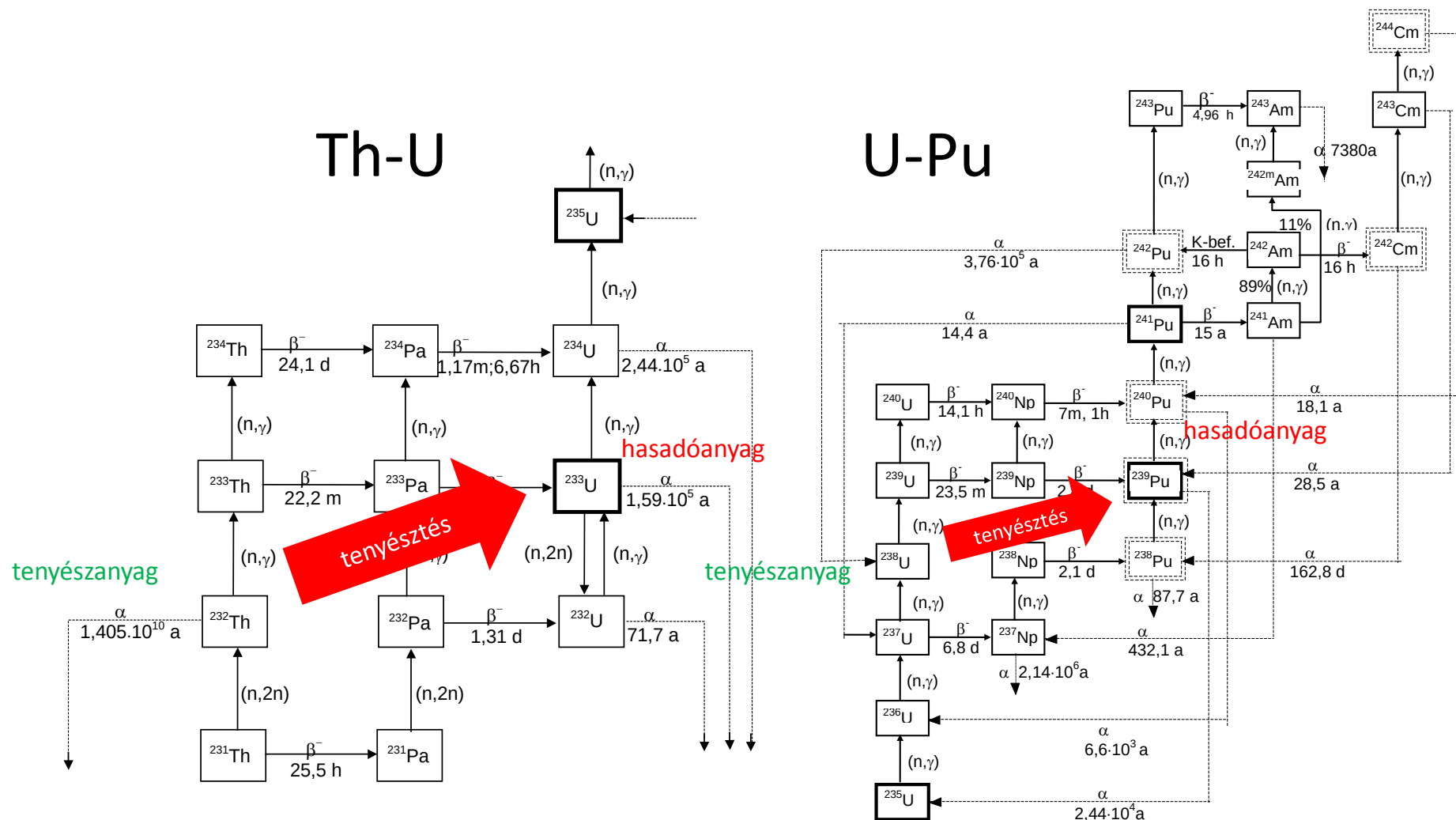
- A kiégett üzemanyag újrahasznosításra alkalmas anyagokat tartalmaz
- Fenntarthatósági szempontok:
 - természeti erőforrások hasznosítása
 - uránhasznosítási hatások
 - hátrahagyott hulladékok
 - hosszú távú kockázatok (radiotoxicitás)
- Ezekre a problémákra a gyorsneutron-spektrumú reaktorok adnak választ

Az üzemanyagban történő magátalakulások

- Hasadások
- Neutronbefogások
 - Konverzió/tenyésztés
 - ^{238}U tenyészanyagból ^{239}Pu hasadóanyag
 - ^{232}Th tenyészanyagból ^{233}U hasadóanyag
 - Másodlagos aktinidák felépülése
 - Np, Am, Cm izotópok



A Th-U és az U-Pu ciklus sémája



Hasadási neutronhozam

$$\eta = \frac{\nu\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c} = \frac{\nu}{1 + \sigma_c/\sigma_f} = \frac{\nu}{1 + \alpha}$$

η : elnyelt neutronként felszabaduló neutronok száma (hasadási neutronhozam)

ν : hasadásonként felszabaduló neutronok száma

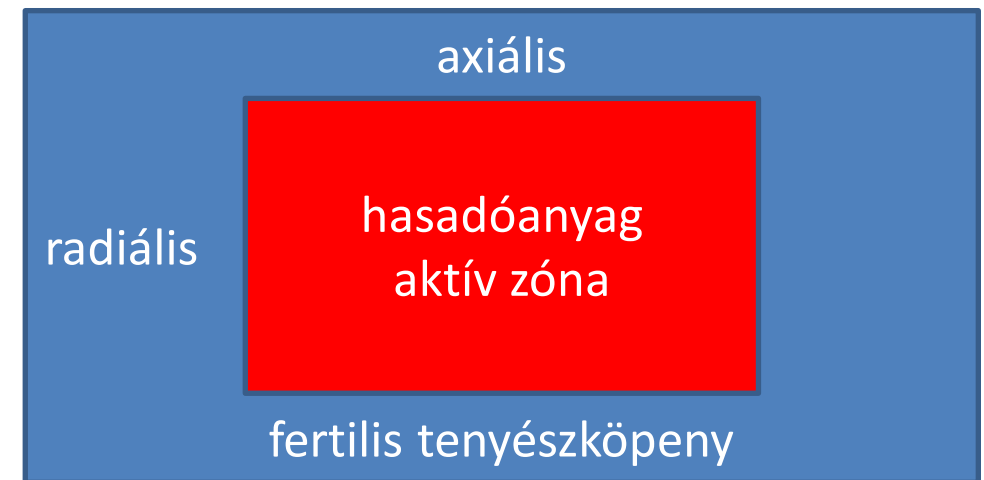
σ_c/σ_f : befogás/hasadás aránya (α)

ν értéke néhány izotópra és neutronenergiára

Hasadó izotóp	Hasadást kiváltó neutronok energiája		
	E=0,025 eV	E=1 MeV	E=2 MeV
^{233}U	2,48	2,55	2,68
^{235}U	2,43	2,50	2,65
^{239}Pu	2,87	3,03	3,18

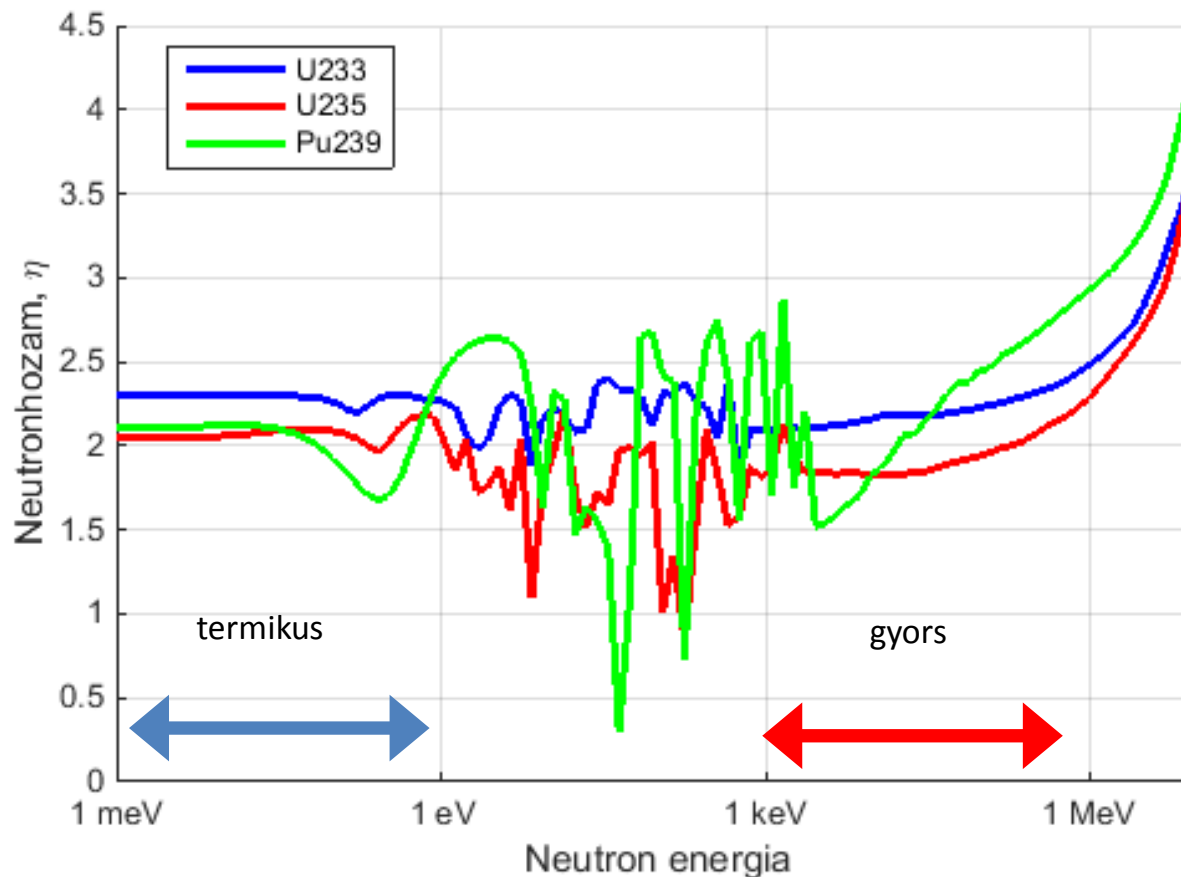
Hasadási neutronhozam

- 1 neutron hasadóanyagban történő befogása szükséges a láncreakció folytatásához.
- L neutron vész el parazita befogás vagy a reaktorból történő kiszökés miatt.
- Következésképpen: $\eta - (1 + L)$ neutron fogódik be fertilis anyagban.
- A szaporítás feltétele: $\eta - (1 + L) > 1$, azaz: $\eta > 2 + L$
- A szaporítási tényező: $BR = \eta - (1 + L)$
- Kiszökő neutronok hasznosítása: tenyészköpeny



Üzemanyag-tenyésztés

- U-Pu ciklusban gyorsneutron-spektrumban hatékony
- Th-U ciklus termikus reaktorral is
- Konverziós/tenyésztési tényező: megtermelt és elfogyasztott hasadóanyag aránya
- Gyors spektrumban a neutronhozam gyorsan emelkedik



Neutronhozam (η): egy elnyelt neutron által keltett neutronok átlagos száma
Tenyésztés feltétele: $\eta > 2$

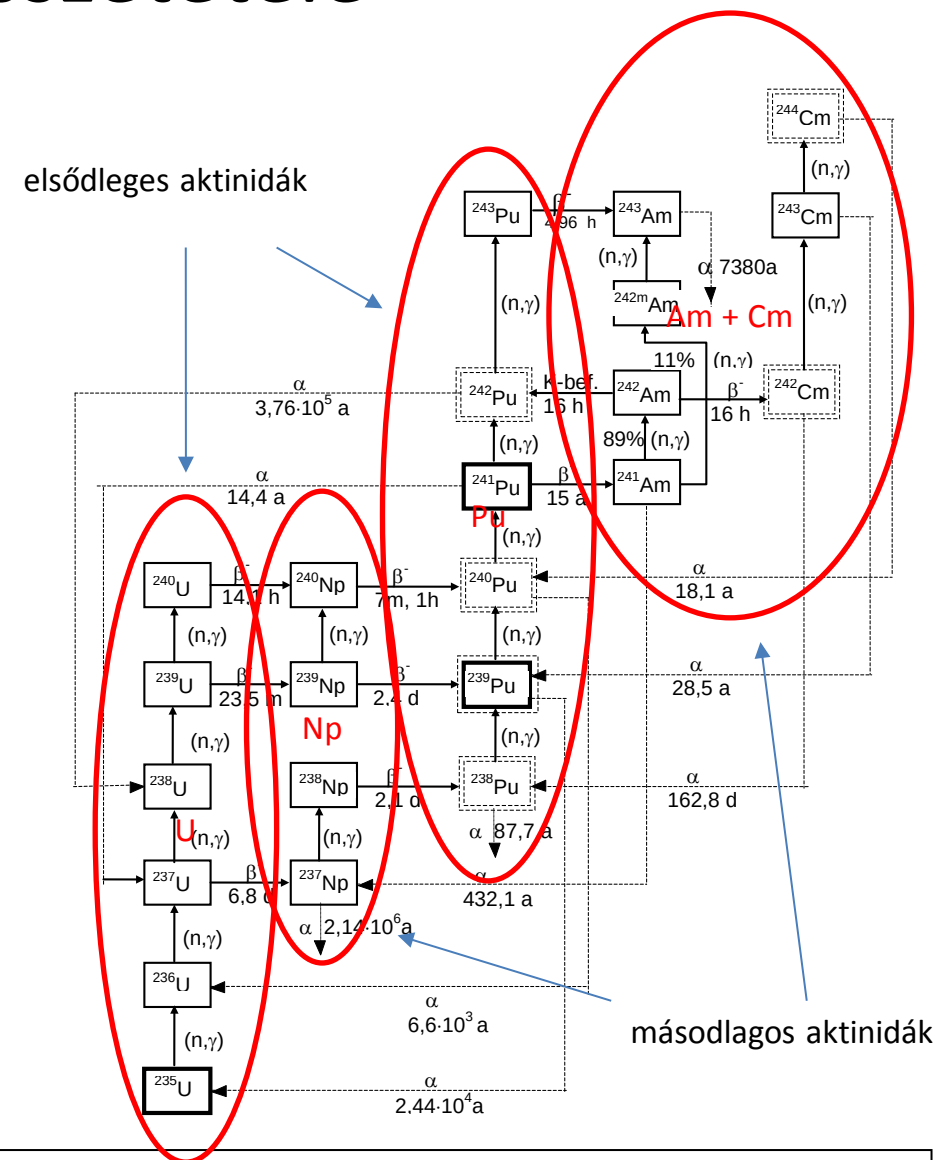
Hasadási neutronhozam különböző reaktorokban

η teljes neutronspektrumra átlagolt értéke termikus és gyors reaktorban

	^{233}U	^{235}U	^{239}Pu
LWR spektrumra átlagolva (~0,025 eV)	2,26	2,06	2,04
Tipikus oxid-üzemanyagú LMFR spektrumra átlagolva	2,31	2,10	2,45

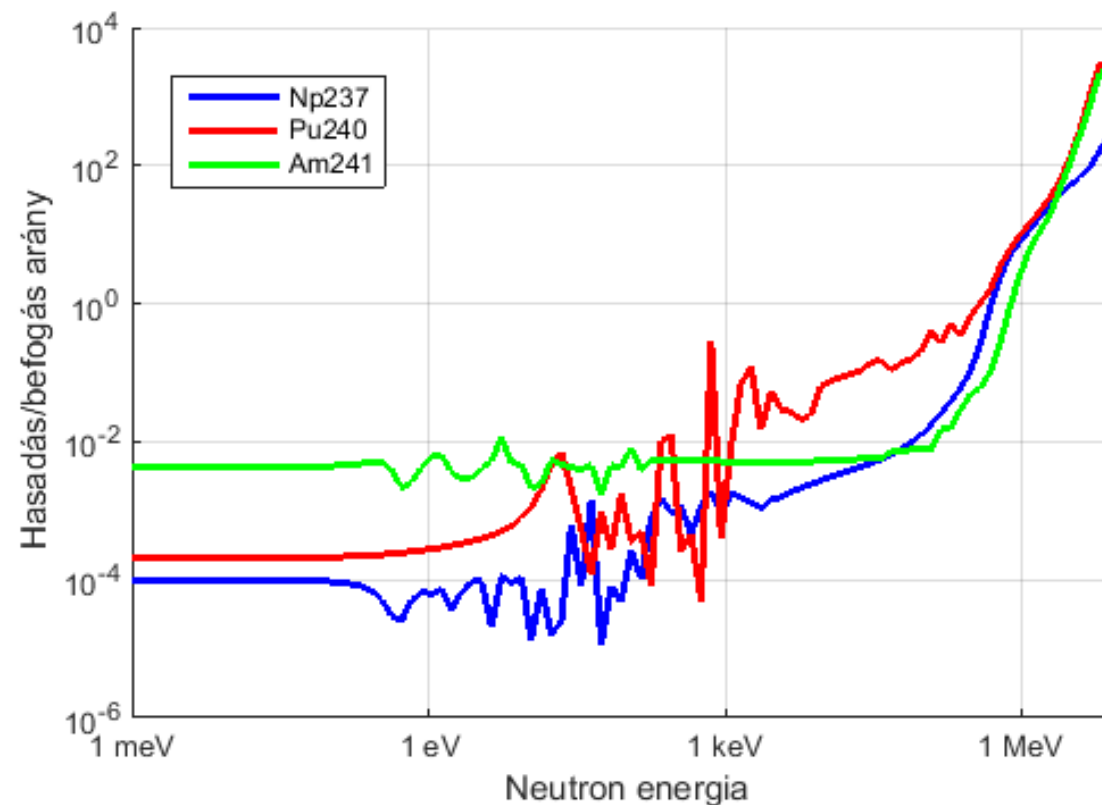
A kiégett üzemanyag összetétele

- Távolabbi aktinidák épülnek fel (n,γ) neutron befogásokkal
 - Bomlási láncot alkotnak
 - Erősen radiotoxikusak (α-bomlás)
- Hasadási termékek
 - Kevésbé toxikusak (β-bomlás)
 - Többnyire rövidebb felezési idejűek
 - Stabil izotóppá bomlanak

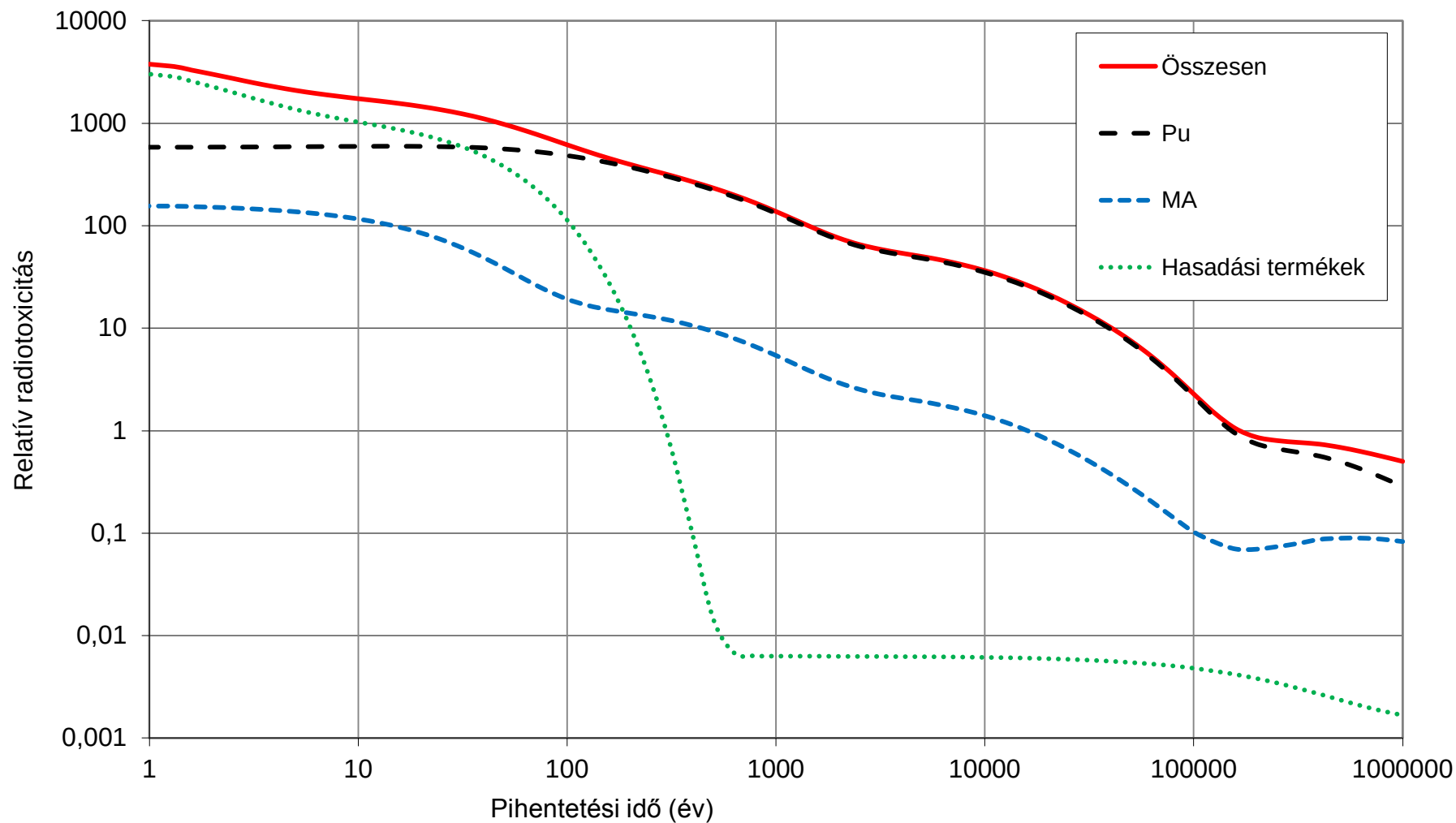


Másodlagos aktinidák átalakítása (transzmutáció)

- Neutronbefogások révén további aktinidák épülnek fel
- Gyorsneutron-spektrumban a hasadások aránya nagyobb
- Átalakítás hasadási termékekké

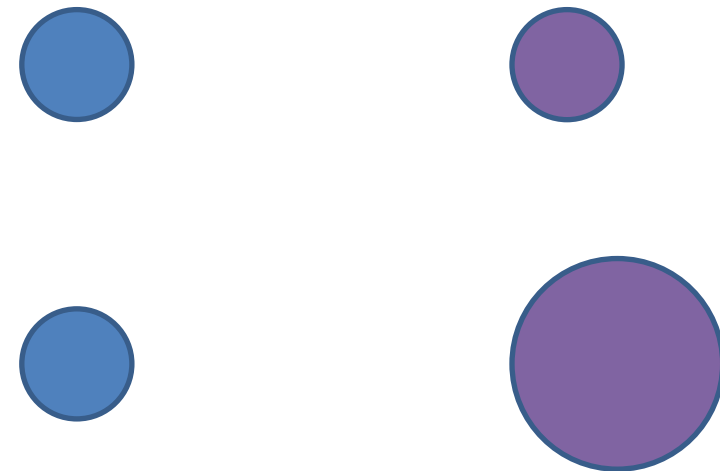


Hosszú távú kockázatok alakulása



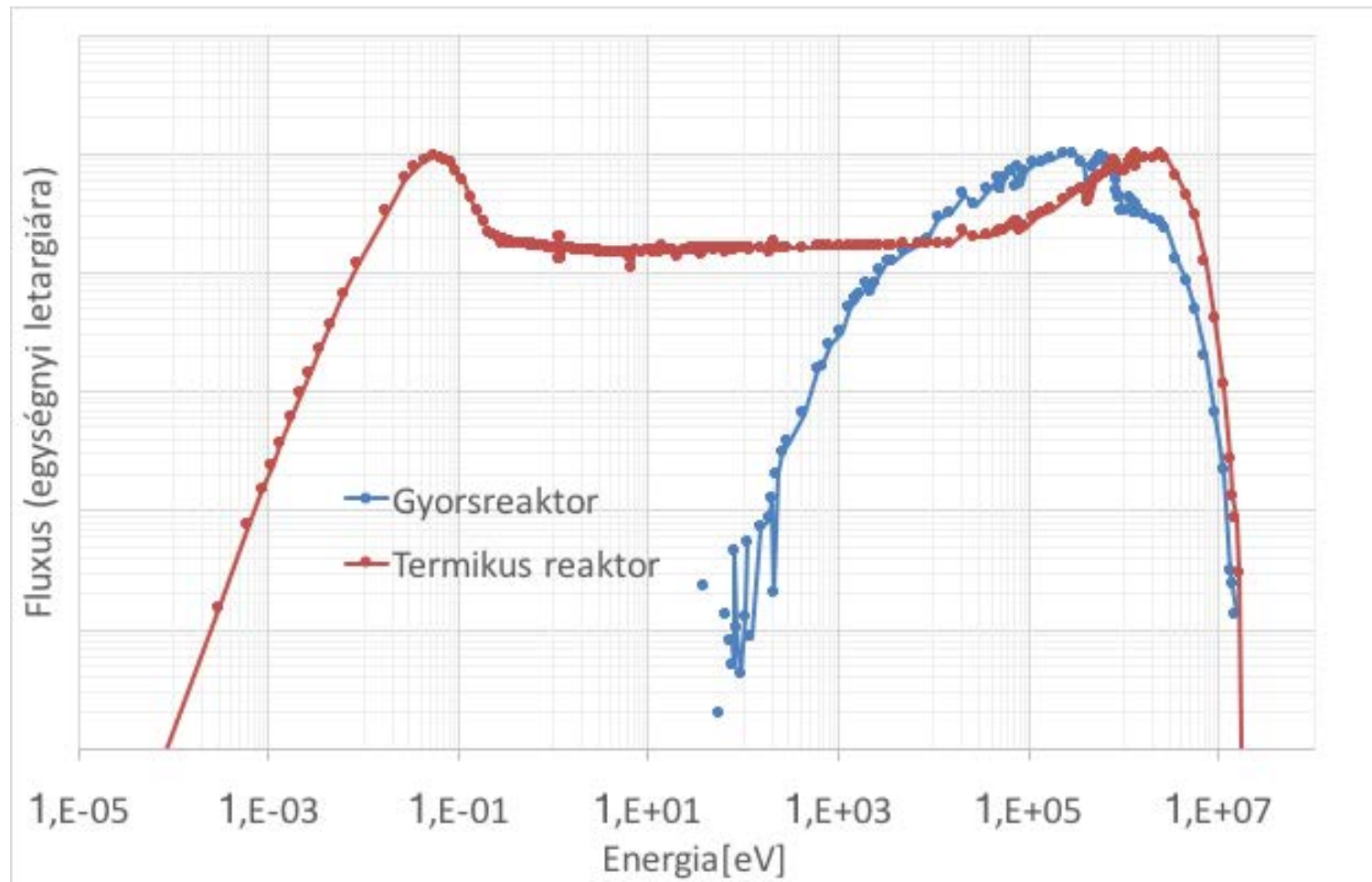
A neutronlassítás (moderálás) fizikája

- Azonos tömegű magnak (^1H) a neutron akár teljes energiáját átadhatja
- Nagyobb tömegű magról “visszapattan”
- Gyorsreaktorokban a könnyű magokat kerülni kell (pl. víz)
- Szóba jöhetnek: folyékony fémek vagy gázok
 - nátrium
 - ólom, ólom-bizmut eutektikum
 - hélium



Neutronspektrum

- Termikus reaktorban a moderátorral termikus egyensúlyban lévő “neutrongáz” Maxwell-Boltzman-eloszlást mutat
- Gyorsreaktorkban a keV alatti tartomány elhanyagolható
- Gyorsreaktorban a spektrum keményedése a neutronhozam növekedéséhez vezet
 - Pozitív üregtényező!
(elsősorban nátrium hűtőközegnél)



Folyékonyfém-hűtőközegek jellemzői

Nátrium:

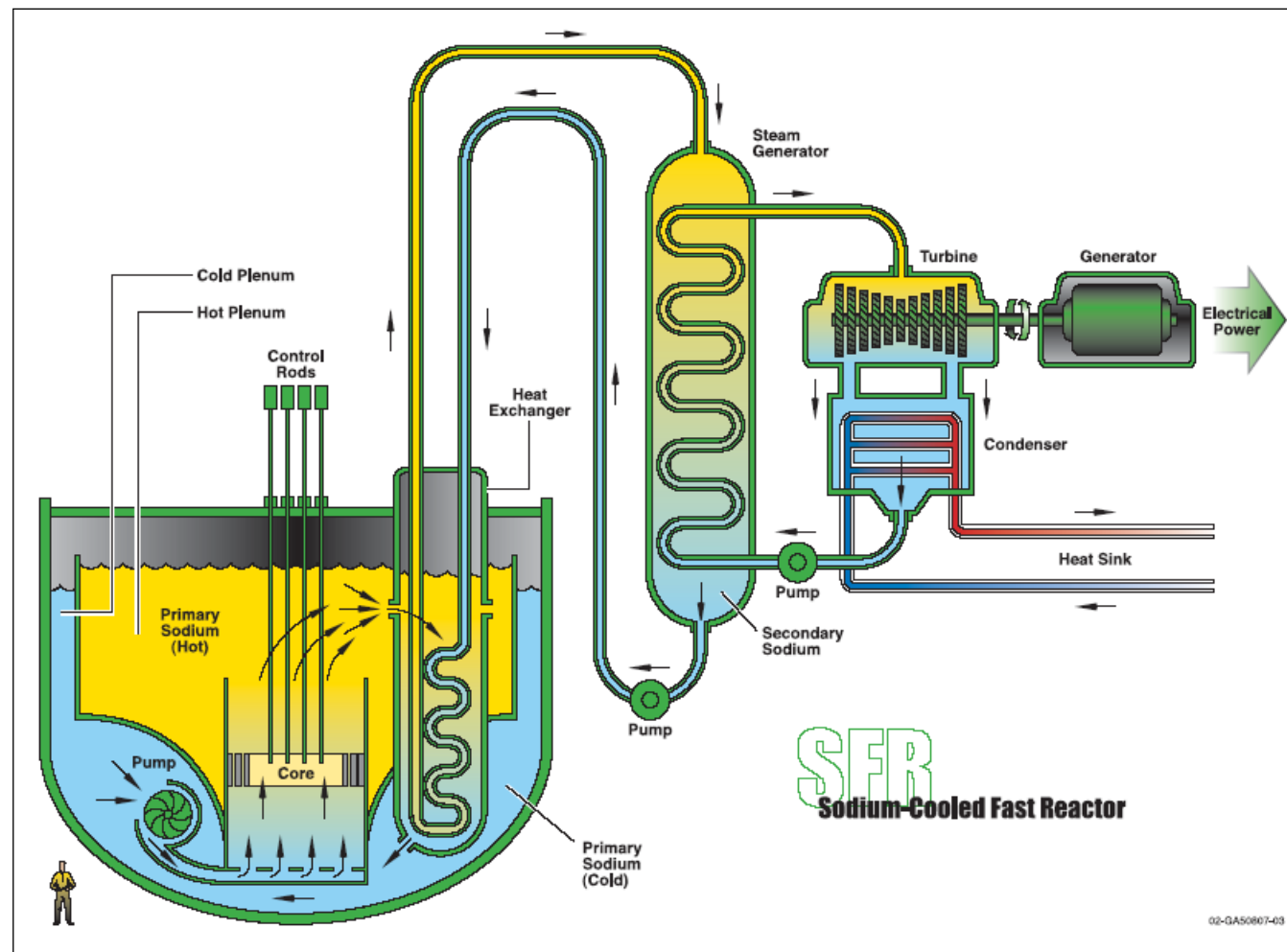
- olvadáspont $97,8^{\circ}\text{C}$, forráspont 892°C
- Nagy hőkapacitás, kiváló hővezetés
- Nátrium-víz, illetve nátrium-levegő reakció
- Kémiai kompatibilitás rozsdamentes acéllal
- Aktiválódás neutronbesugárzásra

Ólom:

- olvadáspont: 327°C , forráspont : 1740°C
 - a nátriuméhoz hasonló fajhő, de négyszer kisebb hővezetési tényező
 - kémiai semlegesség a vízzel szemben
 - korrózió, erózió
 - alacsony neutronbefogási hatáskeresztmetszet
 - csak gyengén aktiválódik
-
- Légköri nyomáson alkalmazható
 - Nem átlátszó

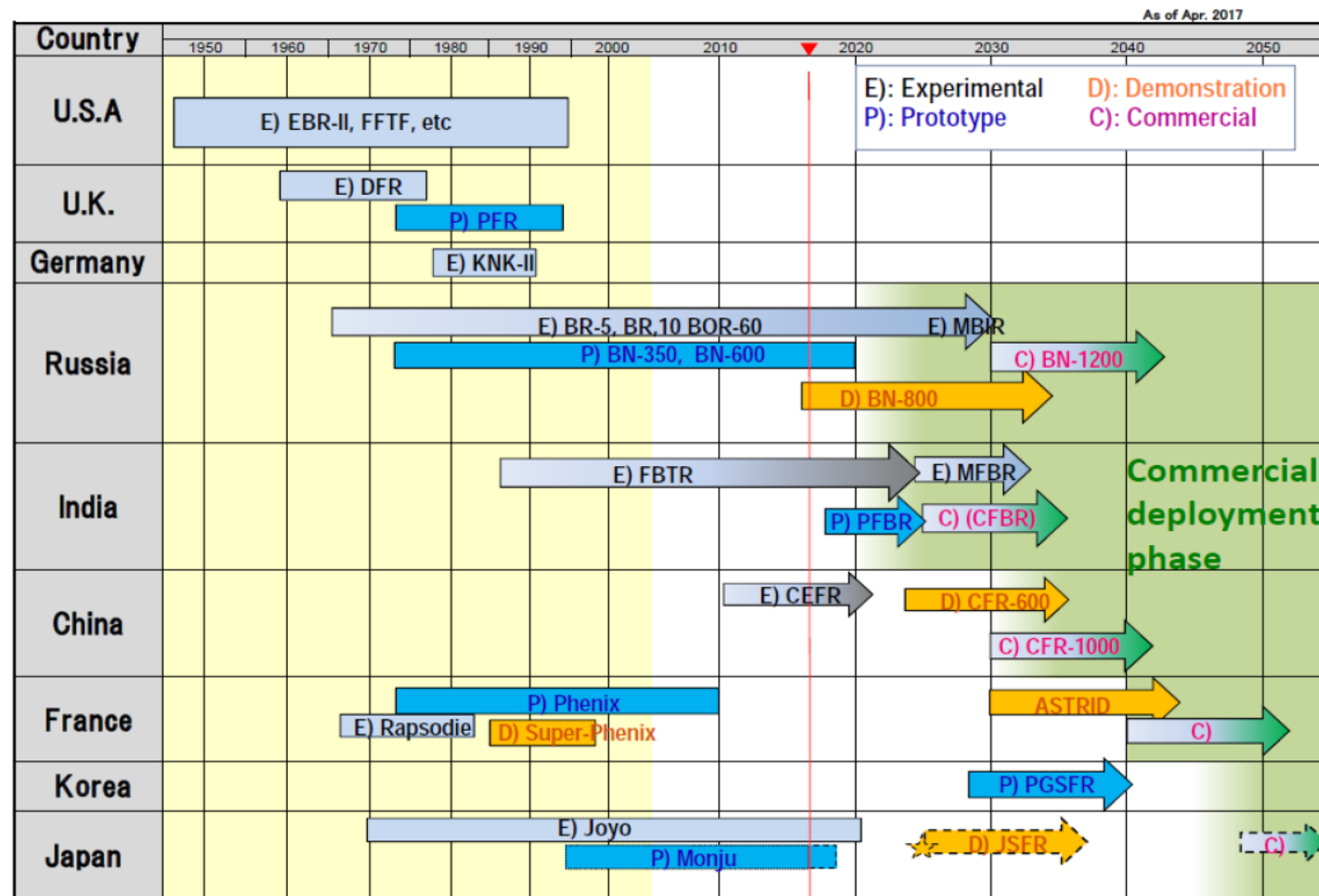
Nátriumhűtésű gyorsreaktorok

- Medence vagy hurok típusú elrendezés
- Közbenső Na-Na hőcserélő az aktív Na-víz reakció elkerülésére
- Kihívások
 - Pozitív üregegyüttható
 - Na-víz reakció



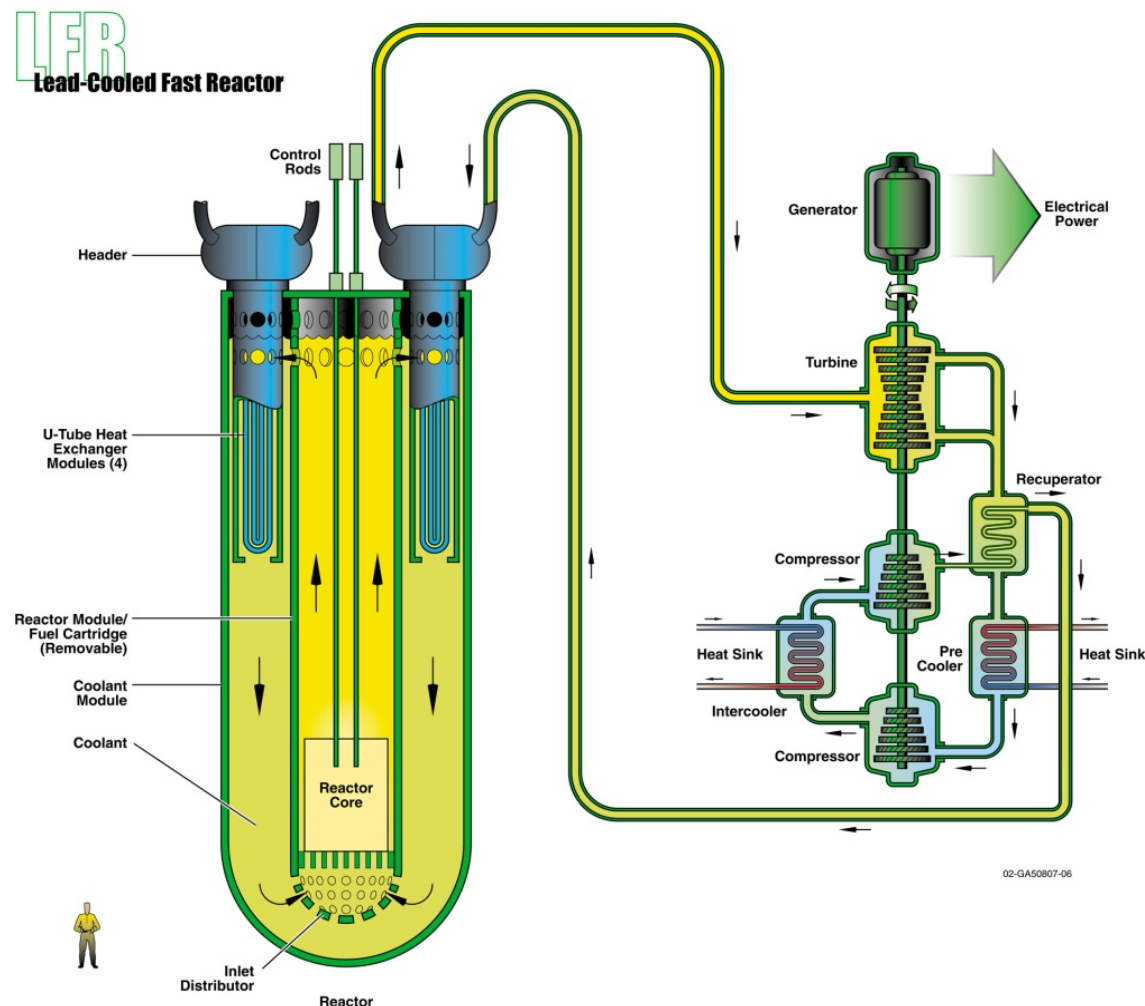
Nátriumhűtésű gyorsreaktorok (SFR)

- Első tenyésztő reaktorok (EBR-I, EBR-II, ...)
- Összesen kb. 400 reaktorév üzemeltetési tapasztalat
- Legkiforrottabb technológia a 4. generációs reaktortípusok közül
- BN-600, BN-800 jelenleg is üzemel és hálózatra termel (Beloyarsk-3)
- Nemzetközi benchmark a kínai CEFR indításával kapcsolatban



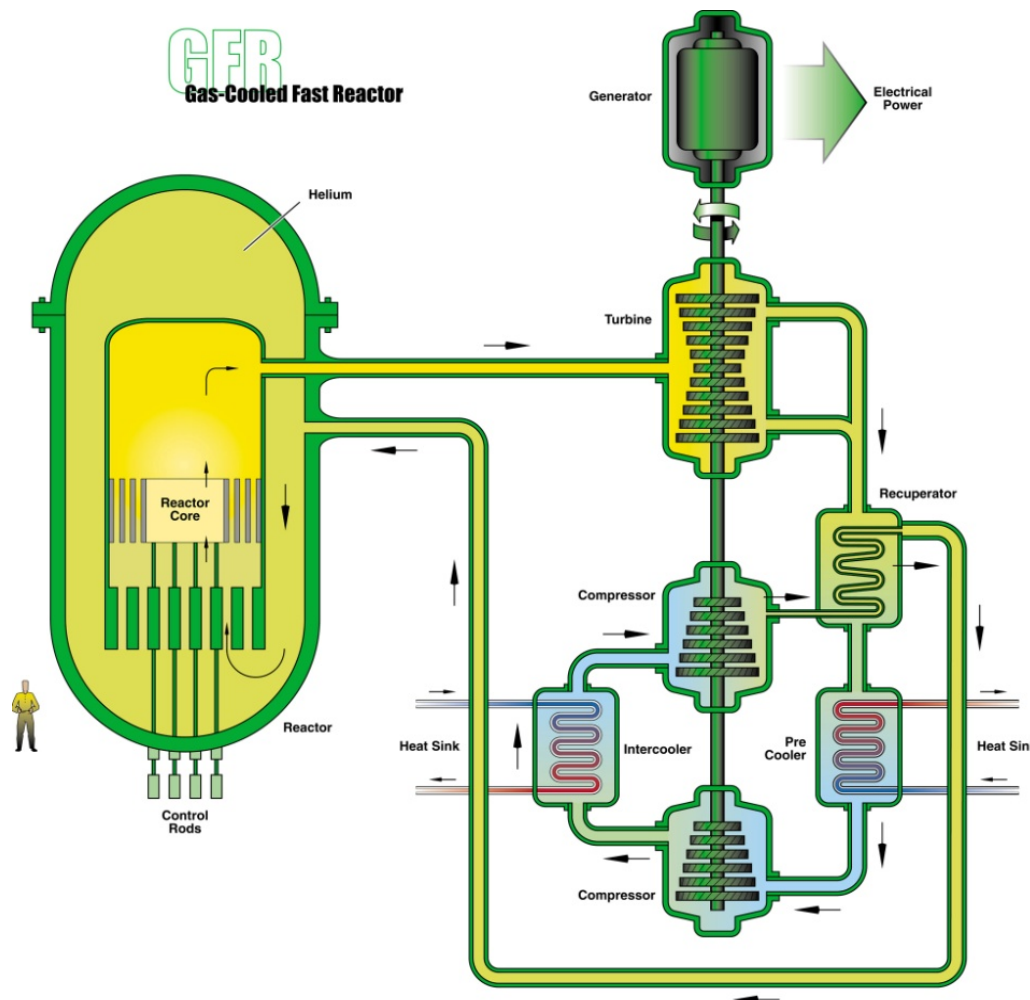
Az ólomhűtés által kínált előnyök

- Biztonság
 - Nagy hőkapacitás, természetes cirkuláció (akár 20-25%-ban)
 - Magas forráspont
 - Nincs heves reakció vízzel vagy levegővel
 - Üzemanyagsérülés esetén az ólom visszatartja a hasadási termékeket
- Egyszerűség
 - Közvetlen ólom-víz hőcserélő
 - Teljesen természetes cirkuláció lehetősége
 - Kis, moduláris reaktorok (SMR)



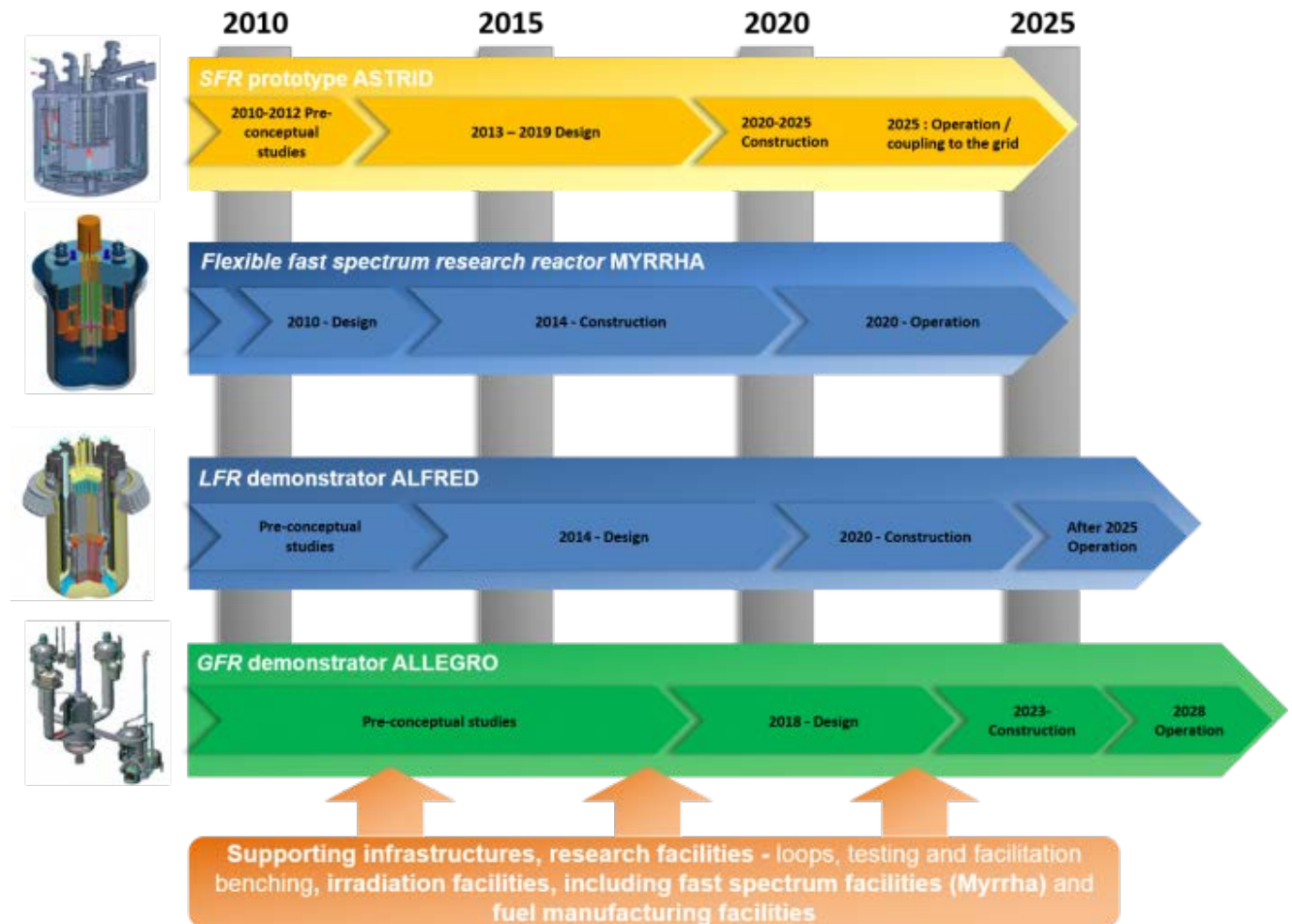
Gázhűtésű gyorsreaktor

- He-hűtés előnyei:
 - kémiailag semleges
 - átlátszó
 - elhanyagolható neutronabszorpció
 - Magas hatásfok kombinált ciklusban (gázturbina + gőzfejlesztő)
 - Alternatív termelési célok lehetősége (ipari folyamathő, H-termelés)
- Kihívások:
 - Csekély hőtehetetlenség miatt magas hőmérsékletek
 - Hőálló üzemanyag és burkolat szükséges
 - keramikus burkolat (SiC)



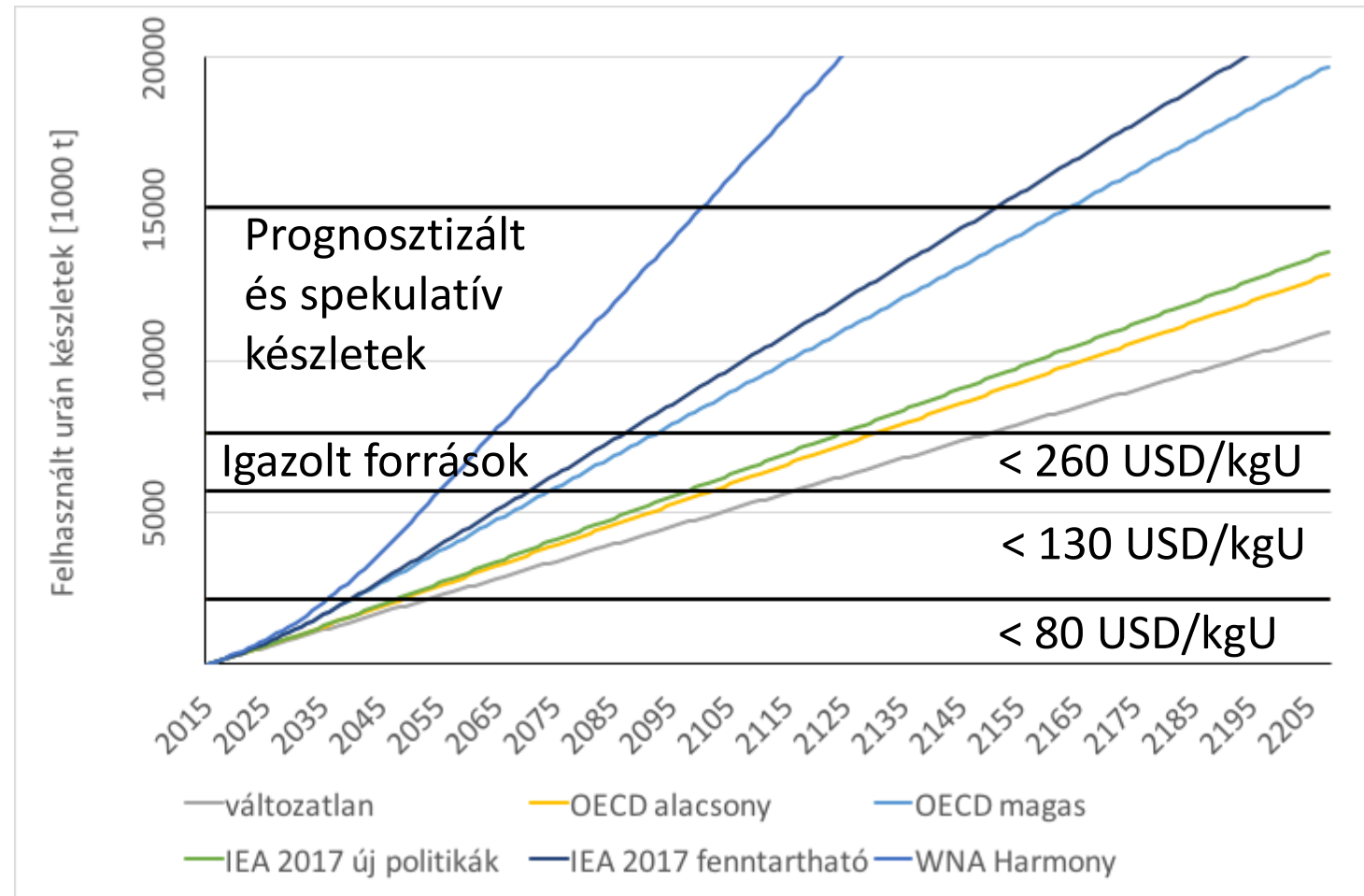
Európai gyorsreaktor fejlesztések

- ASTRID: nátriumhűtésű demonstrációs reaktor
 - alacsony üregegyüttható
 - N_2 -hűtésű terciér kör a víz-reakció elkerülésére
 - tervezett üzembehelyezés: 2030
- Alternatív technológiák:
 - Ólomhűtés
 - Gázhűtés
- ALFRED ólomhűtésű demonstrációs reaktor
 - koncepcionális tervek
 - FALCON konzorcium, Románia?
 - MYRRHA ólom-bizmut hűtésű gyorsítóval hajtott szubkritikus rendszer (Mol, Belgium)
- ALLEGRO gázhűtésű kísérleti reaktor
 - előzetes koncepció
 - V4-CEA együttműködés



Nyitott üzemanyagciklus

- A kiégett üzemanyag nem kerül feldolgozásra
- Közvetlen elhelyezés
- Az uránhasznosítási hatások kb. 0,45%
 - változatlan felhasználás esetén kb. 120 évre elegendőek az igazolt uránforrások
- Szegényített urán halmozódik fel
- Plutónium határozza meg az elhelyezett hulladékkal kapcsolatos hosszú távú kockázatokat



Zárt üzemanyagciklus – termikus reaktorok

- A kiégett üzemanyag újrafeldolgozásra kerül (reprocesszálás)
- Plutónium visszatáplálás (MOX üzemanyag)
 - konverziós tényező alacsony ($C=0,5-0,9$)
 - Pu összetétel romlik
 - többszörös visszaforgatás lehetősége korlátozott
- Uránhasznosítási hatásfok max. 1 %
- A hosszú távú kockázatok változatlanok, ha a Pu is elhelyezésre kerül (kiégett MOX)
- Az hulladék mennyisége jelentősen csökken (U eltávolítása)

Zárt üzemanyagciklus - gyorsreaktorok

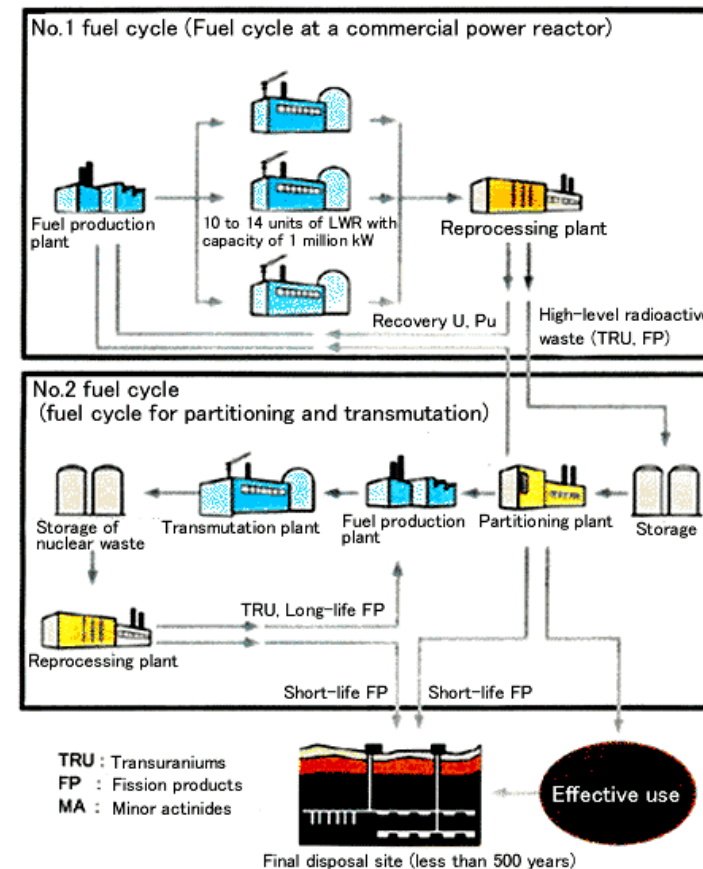
- Üzemanyag-tenyésztés
 - tenyésztési tényező: 1-1,2 (tenyészköpeny)
- Pu összetétel állandósul
 - visszatáplálásnak nincs korlátja
- Uránhasznosítási hatások: 10-20%
 - évezredes távlatban elegendő források
- Felhalmozódott szegényített U és kiégett üa. hasznosítható
- Az elhelyezett hulladékból hiányzik a Pu
 - másodlagos aktinidák határozzák meg a hosszútávú kockázatokat

Szimbiotikus atomerőmű-rendszerek

- Termikus és gyorsreaktorok együttműködése
 - természetes urán betáplálás a tenyészköpenybe
 - termikus reaktorba MOX üa. „tenyésztett” Pu-ból
 - kiégett üa-ból Pu a gyorsreaktorokba
- Lassan növekvő rendszerben optimális lehet
 - termikus reaktorok kisebb indítótöltet igénye
 - max. 50 % termikus reaktor
- Nemzetközi együttműködés
 - egyes országok megmaradhatnak a termikus reaktoroknál

Kétszeresen zárt üzemanyagciklus

- Másodlagos aktinidák visszatáplálása
- Továbbfejlesztett szétválasztási eljárásokat igényel (partitioning)
- Gyorsneutron-spektrumban lehetséges
- Hasadási termékek maradnak a hulladékban
- Kétrétegű üa-ciklus
 - első réteg: U-Pu ciklus
 - második réteg: MA visszatáplálás



forrás: JAEA

Összegzés

- Az üzemanyagciklus zárása a gyorsreaktorok megjelenése esetén éri el a fenntarthatósági célokat
- Gyorsreaktorokban a Pu és a másodlagos aktinidák visszatáplálása is megvalósítható
- Az üzemanyagciklus zárása megvalósítható termikus és gyorsreaktorok (transzmutációs berendezések) együttműködésében
- A gyorsreaktorok képesek feldolgozni a nyitott üzemanyagciklusban felhalmozódó szegényített uránt és kiégett üzemanyagot
- A kiégett üzemanyag a jövő nukleáris üzemanyagciklusában erőforrás, nyersanyag