

A NUKLEÁRIS ÜZEMANYAGCIKLUS LEZÁRÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI

Dr. Csom Gyula
professor emeritus
csom@reak.bme.hu

Tartalom

1. A nukleáris üzemanyagciklusról
 2. Termikus reaktoros atomerőműveket tartalmazó atomenergia-rendszer nyitott üzemanyagciklussal
 3. Termikus reaktoros atomerőműveket tartalmazó atomenergia-rendszer zárt üzemanyagciklussal
 4. Szimbiotikus atomenergia-rendszer
 5. Hulladékrecirkulációs szimbiotikus atomenergia-rendszer
 6. Záró gondolatok
- Irodalom

1. A NUKLEÁRIS ÜZEMANYAGCIKLUSRÓL

A nukleáris üzemanyagciklus: az a folyamat, amelyen végigmegy az üzemanyag a bányától a (fűtőelemben felhalmozódó és fel nem használt radioaktív izotópokat tartalmazó kiégett üzemanyag vagy a reprocesszálás során leválasztott radioaktív izotópokat tartalmazó) nagyaktivitású hulladék végleges elhelyezéséig.

Atomenergia-rendszer: az atomenergia-hasznosítást megvalósító létesítmények, berendezések összessége a bányától az atomerőműveken keresztül a radioaktív hulladékok végleges tárolójáig.

A nukleáris üzemanyagciklus szakaszai:

- Nyitó szakasz (front end): bányától az atomerőműig
- Atomerőmű
- Záró szakasz (back end): az atomerőműtől a radioaktív hulladékok végleges tárolójáig

Az atomenergia-hasznosítás kulcskérdései:

- Nukleáris biztonság
- A nukleáris üzemanyag-készletek hasznosítási hatásfoka (a készletek rendelkezésre állási ideje)
- A radioaktív hulladékok kezelése és végleges elhelyezése
- Proliferációállóság

1. A NUKLEÁRIS ÜZEMANYAGCIKLUSRÓL - 2

A záró szakasz jelentősége:

Alapvetően befolyásolja (nagy részt meghatározza) két kulcskérdés (hasznosítási hatásfok, radioaktív hulladékok végleges elhelyezése) megoldásának minőségét.

Nagymértékben függ tőle az atomenergia-hasznosítás lakossági elfogadottsága



A tárgyalt téma az atomenergia-hasznosítás egyik legfontosabb kérdése

Szoros kölcsönhatás van a nukleáris üzemanyagciklus és az atomenergia-rendszer felépítése között

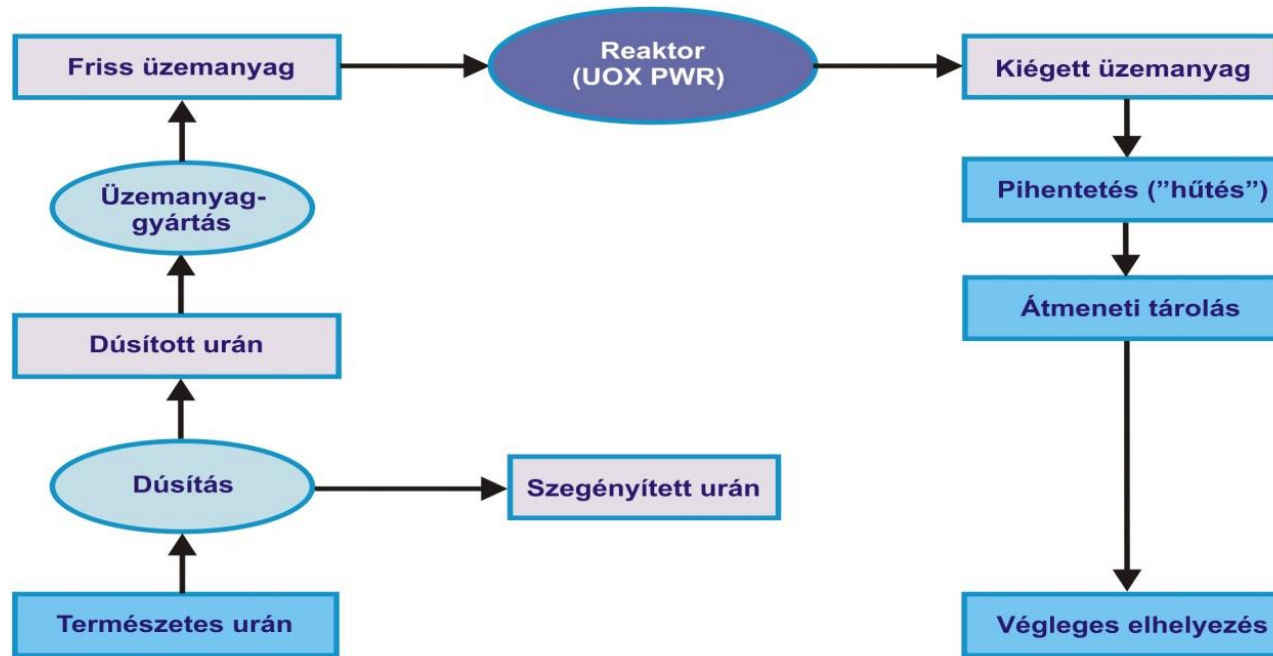
Az atomenergia-rendszerek típusai:

- a) Termikus reaktoros atomerőműveket tartalmazó rendszer nyitott üzemanyagciklussal
- b) Termikus reaktoros atomerőműveket tartalmazó rendszer zárt üzemanyagciklussal
- c) Szimbiotikus atomenergia-rendszer (zárt üzemanyagciklussal)
- d) Hulladékrecirkulációs szimbiotikus atomenergia-rendszer (zárt üzemanyagciklussal)

A közöttük lévő különbség: főleg a nukleáris üzemanyagciklus záró szakaszában van

2. TERMIKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL

A rendszer sémája [4]:



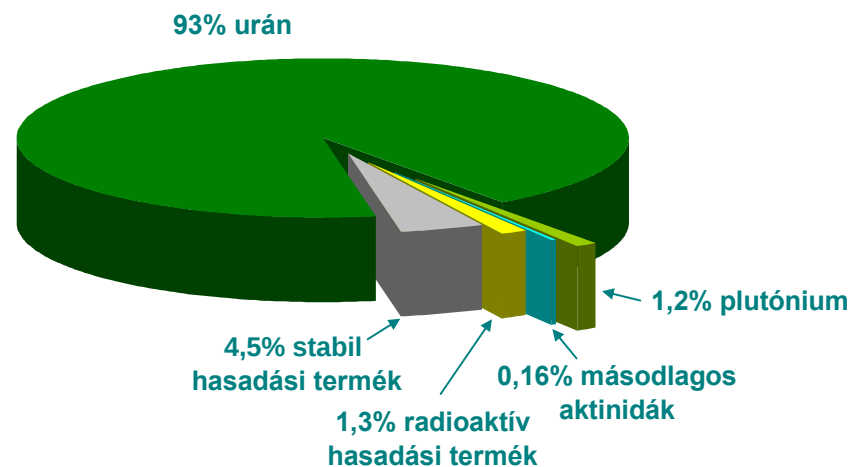
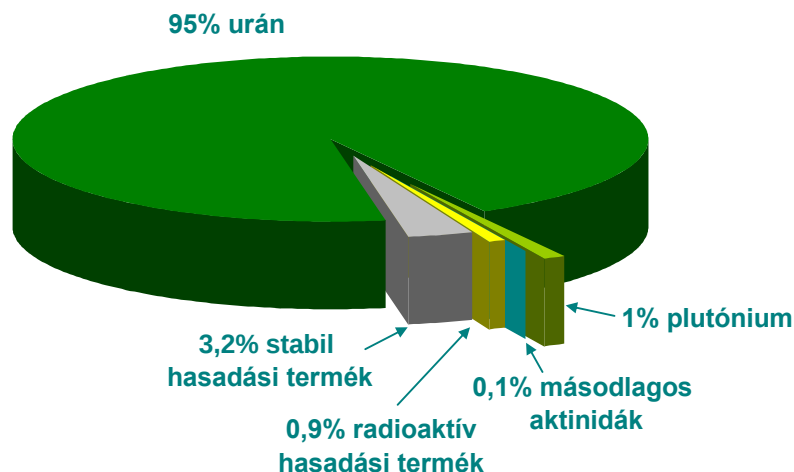
- Fő jellemzői:**
- A rendszerben 1. és 2. generációs (termikus reaktoros) atomerőművek
 - A kiégett üzemanyagot **hulladéknak** tekinti, mely 3-5 évnnyi pihentetés és mintegy 40-50 évnnyi tárolást követően kondicionált állapotban végleges geológiai tárolóba kerül
 - Legolcsóbb

2. TERMIKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 2

A kiégett üzemanyag összetétele

$Q_0 = 33 \text{ MWnap/kg}$ kiégettségi szintnél

$Q_0 = 50 \text{ MWnap/kg}$ kiégettségi szintnél



A kiégett üzemanyagban lévő urán ^{235}U -tartalma: $\sim 1\%$

A kiégett üzemanyagban lévő plutónium $^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$ -tartalma: $\sim 55\text{-}65\%$

A kiégett üzemanyag hasadóanyag-tartalma: 1,6-1,7% ($>0,71\%$)

2. TERMÍKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 3

A PWR-ekben keletkező közepes és hosszú életű aktinidaizotópok fő jellemzői [1,2,3,4]

Izotóp	Termelt mennyiség ⁽¹⁾ (kg/GW _e év)	Felezési idő (év)	Bomlási mód
²³³ U		$1,59 \cdot 10^5$	
²³⁵ U		$7,04 \cdot 10^8$	α
²³⁶ U		$2,34 \cdot 10^7$	
²³⁸ U		$4,47 \cdot 10^9$	α
²³⁷ Np	15,6	$2,14 \cdot 10^6$	α
²³⁸ Pu	7,46	87,7	α , sf
²³⁹ Pu	125,3	$24,3 \cdot 10^3$	α
²⁴⁰ Pu	60,8	$6,56 \cdot 10^3$	α , sf
²⁴¹ Pu	26,3	13,2	α, β^-
²⁴² Pu	17,6	$3,74 \cdot 10^5$	α , sf
²⁴¹ Am	9,3	433	α
²⁴² Am		0,004	β^-
^{242m} Am	0,016	141	α
²⁴³ Am	3,5	$7,36 \cdot 10^3$	α
²⁴³ Cm	0,012	30	α , sf
²⁴⁴ Cm	1,557	18,10	α , sf
²⁴⁵ Cm	0,075	$8,50 \cdot 10^3$	α , sf
²⁴⁶ Cm	0,1	$4,73 \cdot 10^3$	α , sf
⁽¹⁾ UO ₂ üzemanyag, 45-50 MW _{nap} /kg kiégetés, 5 év hűtés után. (Csak a jelentősebb mennyiségek vannak feltüntetve.)			

2. TERMIKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 4

Az aktinidaizotópok csoportjai:

Elsődleges aktinidák: Pu-izotópok

Másodlagos aktinidák: Egyéb aktinidák (Am-, Cm-, Np-izotópok)

A tipikus PWR-ekben keletkező másodlagos aktinidák közelítő mennyiségi adatai [4,5]

Reaktortípus	PWR	PWR	PWR	PWR
Üzemanyagtípus	UO ₂	UO ₂	MOX	MOX
Kiégési szint (MWnap/kg)	33	60	33	60
Pihentetési idő (év)	5	5	3	3
Másodlagos aktinidák tömege (kg/év/GWe)	22,2	26,3	77,9	78

2. TERMÍKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 5

A PWR-ekben keletkező közepes és hosszú életű hasadási termékek fő jellemzői [1,2,3,4]

Izotóp	Termelt mennyiség ⁽¹⁾ (kg/GW _e év)	Felezési idő (év)	Bomlási mód
⁷⁹ Se	0,158	$6,5 \cdot 10^4$	β^-
⁸⁵ Kr	0,75	10,76	β^-
⁹⁰ Sr	15,3	28,6	β^-
⁹³ Zr		$1,5 \cdot 10^6$	β^-
⁹⁴ Nb		$2,0 \cdot 10^4$	β^-
⁹⁹ Tc	26,6	$2,1 \cdot 10^5$	β^-
¹⁰⁷ Pd		$7,0 \cdot 10^6$	β^-
^{113m} Cd		13,6	β^-
¹²⁶ Sn	0,69	$1,0 \cdot 10^5$	β^-
¹²⁹ I	5,8	$1,7 \cdot 10^7$	β^-
¹³⁵ Cs	12,5	$2,3 \cdot 10^6$	β^-
¹³⁷ Cs	35,8	30,2	β^-
¹⁵¹ Sm		87	β^-
⁵⁹ Ni		$7,5 \cdot 10^4$	EC
⁶³ Ni		92,1	β^-
⁽¹⁾ UO ₂ üzemanyag, 45-50 MW _{nap} /kg kiégetés, 5 év hűtés után. (Csak a jelentősebb mennyiségek vannak feltüntetve.)			

2. TERMÍKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 6

Következtetések:

- A kiégett üzemanyag energetikailag hasznos anyagtartalma (U, Pu, MA):
Igen nagy (~94-96%)
- A természetes urán energetikai hasznosítási hatásfoka (az izotópdúsítás során keletkező szegényített urán miatti veszteséget is figyelembe véve): ~0,5-0,75%
- A kiégett üzemanyag közepes és hosszú életű izotóptartalma (aktinidák és hasadási termékek):
Igen nagy → kiégett üzemanyag radioaktivitása igen nagy
- A kiégett üzemanyag okozta radiológiai kockázat igen hosszú ideig sokkal nagyobb a megengedhető értéknél.

A radiológiai kockázatot kifejező mennyiségek:

Radiotoxicitás (Q_D)

$$Q_D(t) = \sum_i A_i(t) DCF_i,$$

ahol: $A_i(t)$: az i -edik radioizotóp aktivitása (Bq),

DCF_i : az i -edik radioizotópra vonatkozó dóziskonverziós faktor (Sv/Bq)

Relatív radiotoxicitás:

$$Q_{rel,D}(t) = \frac{Q_D(t)}{Q_{D,U}(t)} \cong \text{const.} \cdot Q_D(t) = \text{const.} \cdot \sum_i A_i(t) DCF_i$$

ahol: $Q_{D,U}(t)$. Az üzemanyag előállításához szükséges természetes urán radiotoxicitása

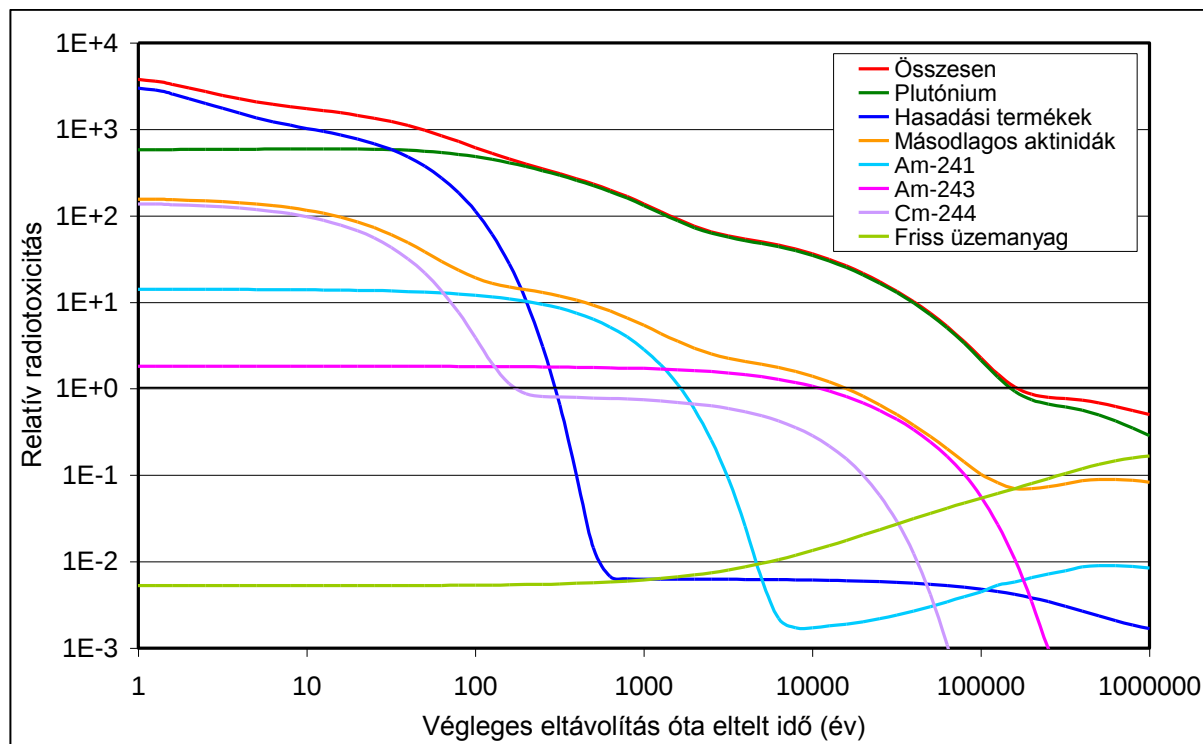
2. TERMÍKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 7

A kiégett üzemanyagban található fontosabb radioizotópok dóziskonverziós faktorai az ICRP72 (1996) ajánlásainak megfelelően [4]

Transzuránok			Hasadási termékek		
Nuklid	Dóziskonverziós tényező (nSv/Bq)		Nuklid	Dóziskonverziós tényező (nSv/Bq)	
	Lenyelés	Belégzés		Lenyelés	Belégzés
²³⁷ Np	110	23000	⁷⁹ Se	2,9	2,6
²³⁸ Pu	230	46000	⁹⁰ Sr	28	36
²³⁹ Pu	250	50000	⁹³ Zr	1,1	10
²⁴⁰ Pu	250	50000	⁹⁹ Tc	0,64	4
²⁴¹ Pu	4,8	900	¹⁰⁷ Pd	0,037	0,085
²⁴² Pu	240	48000	¹²⁶ Sn	4,7	28
²⁴¹ Am	200	42000	¹²⁹ I	110	15
^{242m} Am	190	37000	¹³⁵ Cs	2	3,1
²⁴³ Am	200	41000	¹³⁷ Cs	13	9,7
²⁴² Cm	12	5200			
²⁴³ Cm	150	31000			
²⁴⁴ Cm	120	27000			
²⁴⁵ Cm	210	42000			

2. TERMÍKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 8

A relatív radiotoxicitás időbeli változása VVER-440 reaktorból származó kiégett üzemanyag komponenseire [4]



Következtetések:

- A radiotoxicitás csak igen hosszú idő (>100 ezer év) után csökken az elfogadható szint alá
- Rövid távon (<30-40 év) a hasadási termékek (főleg Sr-90, Cs-137) radiotoxicitása dominál
- Hosszú távon az aktinidák (főleg a Pu-izotópok) radiotoxicitása dominál.

2. TERMIKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 9

A felhalmozott kiégett üzemanyag világviszonylatban

- 2000-ig: 250 ezer tonna
- 2000 óta: ~10500 tonna/év (ebből ~3000 tonna/év reprocessálva)
- Ez évig: ~320 ezer tonna

Paksi atomerőműben

- 2009-ig: ~1300 tonna kiégett üzemanyag keletkezett (~50-55 tonna/év)

Ennek egy része visszaszállítva Oroszországba

Másik része: Paksi Atomerőmű pihentető medencéiben és átmeneti tárolójában

- Ezen kívül ~5M³/év egyéb nagyaktivitású r.a. hulladék

2. TERMIKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 10

A nagyaktivitású r.a. hulladékok (incl. kiégett üzemanyagok) végleges elhelyezése

Célja: Megakadályozni, hogy a radioaktív hulladékban lévő radioizotópok kapcsolatba kerüljenek a bioszférával (ezt a kívánt szintre történő lebomlásukig kell garantálni), s ezáltal ne veszélyeztessék az emberek egészségét és a környezetet se ma, sem a jövőben.

Megoldás (jelenlegi felfogásunk szerint): A kondicionált r.a. hulladék geológiai formációkba történő elhelyezése

Geológiai elhelyezés: Mély geológiai formációkban a földtani és a műszaki gátak együttes alkalmazásával.

Világhelyzet: még nincs ilyen végleges tároló, folynak a kutatások Föld alatti kutatólaboratóriumokban

Magyarországon: ~2030-2040-től lesz aktuális

2. TERMIKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 11

Geológiai formációkkal szembeni követelmények :

Mechanikai stabilitás, alacsony szeizmicitás

Mélységi vizek kémiájának megfelelősége

Legfeljebb kismértékű talajvízáramlás

Befogadó anyag jó szorpciós tulajdonságai

Rugalmasság

Hőmérséklet-tűrés

Kellően megkutatott, jól megértett telephely

Potenciálisan szóba jöhető geológiai befogadók:

Só, gránit, agyag, bazalt, vulkáni kőzet

2. TERMIKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 12

Létesítés előtti teendők

- Kiszemelt területre valamennyi szükséges adat megismerése (fúrások, mélységi laboratórium, ...)
- Matematikai terjedésmodellek alkalmazása különböző eseményláncokra
- Természeti analógiák tanulmányozása
- Lakossági és jogi hozzájárulás megszerzése



Hosszú időt igényel (~20-30 év)

2. TERMÍKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 13

Természeti analógiák

Természeti reaktor (pl. Gabonban)

Legalább 17 természetes reaktor működött

Pl. Oklo-nál és Bangombé közelében

Kritikusságot elérték: 1968 ± 50 millió évvel ezelőtt

Kritikusság fennmaradt: ~100 ezer – 1 millió évig

Homokkő agyagtestek: 20-60% uránt tartalmaztak

Dúsítás ~3%

10-20 m hosszú és széles, 1 m-nél

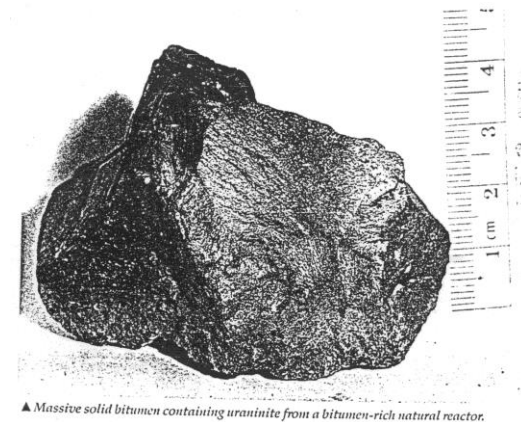
kisebb vastagságú, víz

járta át (moderátor), az agyag

bőségesen tartalmaz bitument is

(ez inkorporálta az uránt)

szerves karbontartalom: >66 súly%



2. TERMÍKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 14

Eredmény: Urán ^{235}U tartalma $<0,7\%$

az urán és a hasadási termékek alig távolodtak el a természetes reaktortól

Komoly geológiai események ellenére nem volt nagyobb migráció

Kanada

Saskatchewan északkeleti részén található uránlelőhely (450 m-rel a talajszint alatt)

Uránoxid-koncentráció: 14%, egyes helyeken 70% (erős sugárzás → csak távvezérléssel bányászható)

A telep sok ezer millió évig vízzel telítődött

Ennek ellenére: a felszínen semmi jel nem mutat arra, hogy alatta

urán van, a talajvíz vagy a vízfolyások összetétele alapján nem lehet erre következtetni

az urán nem távozott el jelentős mértékben

⇒ Ilyen mélyen igen lassú a vándorlás

2. TERMIKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 15

Nagy aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezése nemzetközi szinten

Elv: Minden országnak saját magának kell gondoskodnia a területén keletkezett radioaktív hulladékok elhelyezéséről

Ennek értelmezése: Időben változott

NAÜ: 1980-ban nemzetközi megoldás felvetése

2003. november: Dr. Mohamed ElBaradei
(NAÜ főigazgató) feléleszti e gondolatot

Oroszország: 2001-ben törvény a radioaktív hulladék-
import megengedéséről

Stb.

2. TERMIKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ RENDSZER NYITOTT ÜZEMANYAGCIKLUSSAL - 16

Legfontosabb következtetések a kulcskérdések szempontjából:

- Ennél az atomenergia-rendszernél a természetes uránra vonatkoztatott hasznosítási hatásfok nagyon kicsi ($\sim 0,5-0,75\%$)
- Emiatt a jelenleg ismert uránkészletek gyorsan kimerülnének (az atomerőművi kapacitások jelenlegi szintje mellett kb. 70 év alatt)
- **Az erre vonatkozó kulcskérdést ez az atomenergia-rendszer nem képes megoldani**
- A nagyaktivitású radioaktív hulladékok zömét adó kiégett üzemanyag radioaktivitás és radiotoxicitása hatalmas, amelynek lebomlása a kívánt szintre csak nagyon hosszú idő (200-500 ezer év) alatt valósul meg.
- Olyan végleges elhelyezési módot kell találni, amely biztosítani képes, hogy e nagyaktivitású hulladék >100 ezer évig ne érintkezessen a bioszférával.
- Ez a szakemberek véleménye szerint lehetséges, de a lakosság egy része – részben az atomenergia-ellenes csoportok hatására – kételkedik ebben.
- **Az erre vonatkozó kulcskérdés megoldása vitatott.**



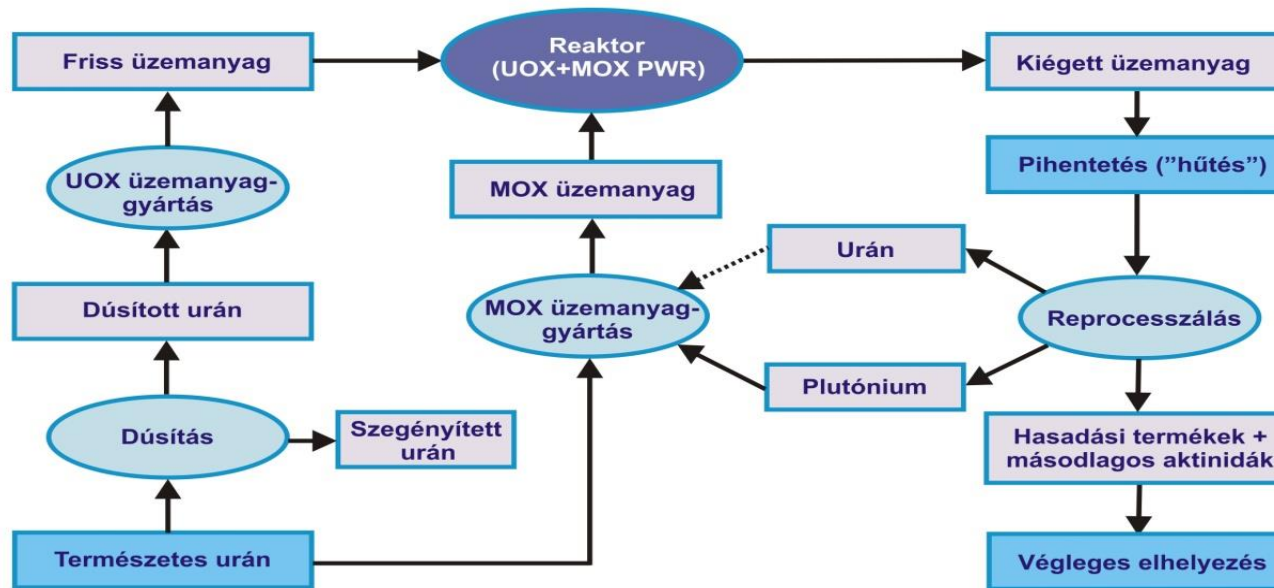
A KULCSKÉRDÉSEK NEM VAGY CSAK RÉSZBEN OLDHATÓK MEG ENNEK AZ ATOMENERGIA-RENDSZERNEK A KERETÉBEN



A NUKLEÁRIS ÜZEMANYAGCIKLUS ZÁRÓ SZAKASZÁT INDOKOLT TOVÁBBFEJLESZTENI (több szempontból)

3. TERMIKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ ATOMENERGIA-RENDSZER ZÁRT ÜZEMANYAG- CIKLUSSAL

A rendszer sémája [4]:



Fő jellemzői: A rendszerben 1., 2. és 3. generációs (termikus reaktoros) atomerőművek vannak (döntő mértékben)

A kiégett üzemanyagot **mellékterméknek** tekinti, melyet érdemes reprocesszálni és a hasznos komponenseket visszakeringetni.

A nagyaktivitású hulladék nem tartalmaz kiégett üzemanyagot, hanem főleg az annak újrafeldolgozása során keletkezett komponenseket.

3. TERMIKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ ATOMENERGIA-RENDSZER ZÁRT ÜZEMANYAG- CIKLUSSAL - 2

A változások következményei:

- Az üzemanyagciklus záró szakasza alapvetően megváltozik, belép a rendszerbe a reprocesszáló mű.

Ennek szerepe: A kiégett üzemanyagból leválasztani az energetikailag hasznos komponenseket (U- és Pu-izotópokat) a főleg másodlagos aktinidákat és hasadási termékeket tartalmazó nagyaktivitású hulladéktól.

- A visszakeringetett urán egy részét a visszakeringetett plutóniummal dúsítják fel a kívánt mértékig → MOX üzemanyag
- A visszakeringetett urán másik része izotópdúsításra kerül, majd urán-üzemanyag készül belőle.
- Előzőek következtében kevesebb természetes uránt igényel a rendszer és az izotópdúsítási igény is csökken.
- A reprocesszáló műben leválasztott másodlagos aktinidák (pl. Np, Am, Cm), a többszöri visszakeringetés miatt leromlott minőségű Pu és hasadási termékek adják a közepes és hosszú életű radioizotópokat tartalmazó nagyaktivitású r.a. hulladékok zömét, amelynek aktivitása, radiotoxicitása és lebomlási ideje (a Pu-izotópok egy részének hiánya miatt) kisebb, ill. rövidebb, mint a nyitott rendszer esetében.

Gazdasági hatások: Vannak költségnövelő és költségcsökkentő hatások.

Eredő hatás: **költségnövekedés**

3. TERMIKUS REAKTOROS ATOMERŐMŰVEKET TARTALMAZÓ ATOMENERGIA-RENDSZER ZÁRT ÜZEMANYAG- CIKLUSSAL - 3

Következmények a kulcskérdések szempontjából:

- A természetes uránra vonatkoztatott hasznosítási hatásfok javul (az alkalmazott reaktortípustól függően a relatív növekedés kb. 30-50%). A hasznosítási hatásfok. Kb. 0,65-1%
- A jelenleg ismert uránkészletek lassabban merülnek ki (az atomerőművi kapacitások jelenlegi szintje mellett kb. 80-110 év alatt)
- **Az üzemanyagciklus zárása javítja az erre vonatkozó kulcskérdés megoldását, de a javulás mértéke nem eredményez áttörést**
- A nagyaktivitású hulladékok aktivitása, radiotoxicitása csökken, kívánt szintre történő lebomlási ideje rövidül (a Pu-izotópok mennyiségének csökkenése miatt kb. 100 ezer évre), e hatások azonban mérsékeltek.
- **Az üzemanyagciklus zárása javítja az erre vonatkozó kulcskérdés megoldását, de a javulás mértéke itt sem eredményez áttörést.**



**A NUKLEÁRIS ÜZEMANYAGCIKLUS ZÁRÓ SZAKASZÁNAK TOVÁBB-
FEJLESZTÉSE TOVÁBBRA IS AKTUÁLIS FELADAT**

4. SZIMBIOTIKUS ATOMENERGIA-RENDSZER

Az eddigi atomenergia-rendszerek továbbfejlesztésének indokai:

- A nukleáris üzemanyag hasznosítási hatásfokának radikális javítása és ezáltal az ismert uránkészletek rendelkezésre állásának idejét jelentősen megnövelni → Az U-238 izotópot is hasznosítani kell energiatermelésre → Konverziós tényezőt rendszer szinten növelni.
- Előzőek érdekében a **gyors tenyésztéskori** rendszerbe állítása. Tenyésztési tényezőjük:

Elméleti szint: $\sim 1,3-1,4$

Gyakorlatilag is elért: $\sim 1,22$

De: ezek az atomerőművek drágábbak, mint a hagyományosak,
több hasadóanyagot képesek termelni, mint amennyit elfogyasztanak

Ezért: A rendszerbe csak annyi gyorsreaktoros atomerőművet célszerű építeni,
amennyire a plutóniumtermelés szempontjából feltétlenül szükséges és
gazdaságilag indokolt, a többi maradhat termikus reaktoros
aterőmű



Egyensúlyi vegyes atomerőmű-rendszer = Szimbiotikus atomenergia-rendszer

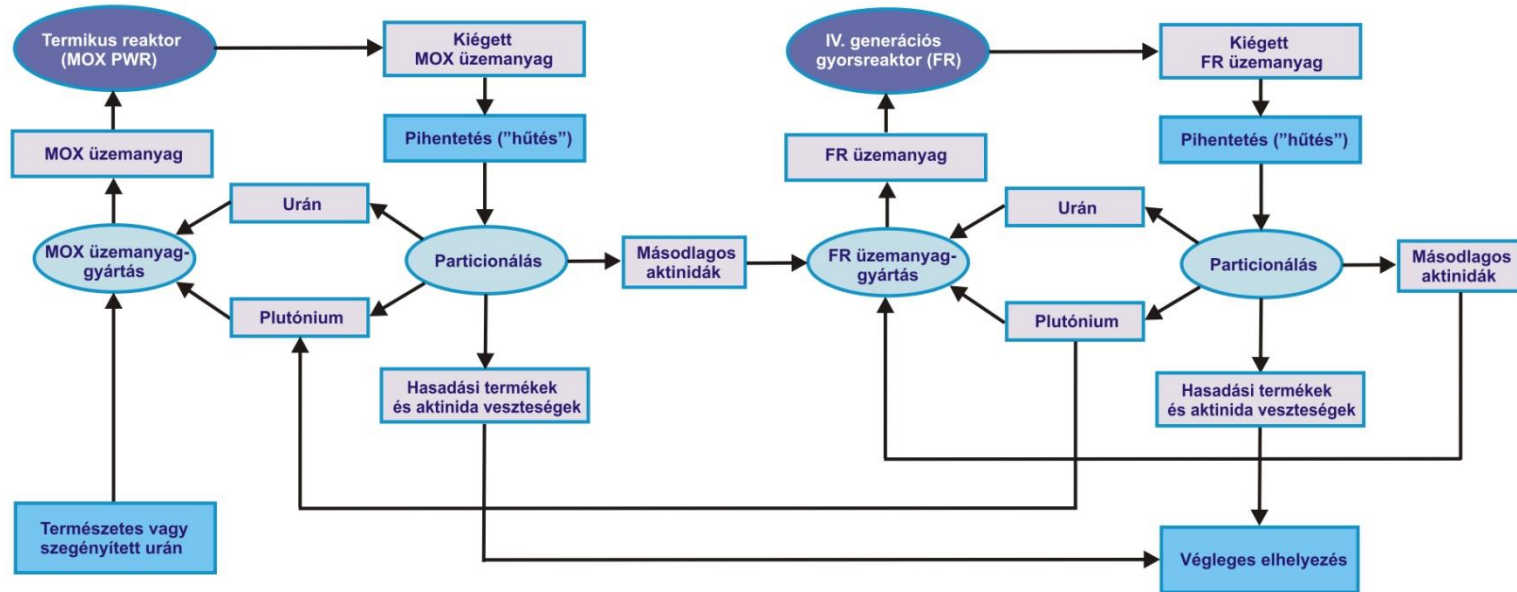
4. SZIMBIOTIKUS ATOMENERGIA-RENDSZER - 2

Gyorsreaktorok:

- Képesek a teljes U-238 mennyiség hasznosítására → A hasznosítási hatásfok kb. 2 nagyságrenddel növelhető
- Képes hasznosítani: a szegényített uránt (dúsítási maradékot) is (felhalmozott mennyisége 1999-ben ~1,2 millió tonna, jelenleg ~1,7-1,8 millió tonna)
a kiégett üzemanyagot (felhalmozott mennyiség jelenleg ~320 ezer tonna)
- Gyorsneutronok hatására a termikus neutronokra nem hasadó képes Pu-izotópok (Pu-240, Pu-242) is hasadó képesek → A plutónium többször visszakeringethető, mint a termikus reaktorokba → Csökkenthető a nagyaktivitású r.a. hulladékba kerülő plutónium mennyisége → Rövidebb idő alatt lebomlik a kívánt szintre → R.a. hulladékkal kapcsolatos kulcskérdés megoldását is segíti.
- Ipari szinten is megvalósult már régen (Oroszország, Franciaország, USA, Japán)
- 4. generációs atomerőművek között szerepelnek

4. SZIMBIOTIKUS ATOMENERGIA-RENDSZER - 3

A rendszer sémája [4]:



Fő jellemzői: Csak zárt üzemanyag-ciklussal valósítható meg

A rendszerben: 3. és 4. generációs atomerőművek, termikus és gyorsreaktoros atomerőművek

Másodlagos aktinidák is visszavezethetők a gyorsreaktorokba

4. SZIMBIOTIKUS ATOMENERGIA-RENDSZER - 4

A rendszer további jellemzői:

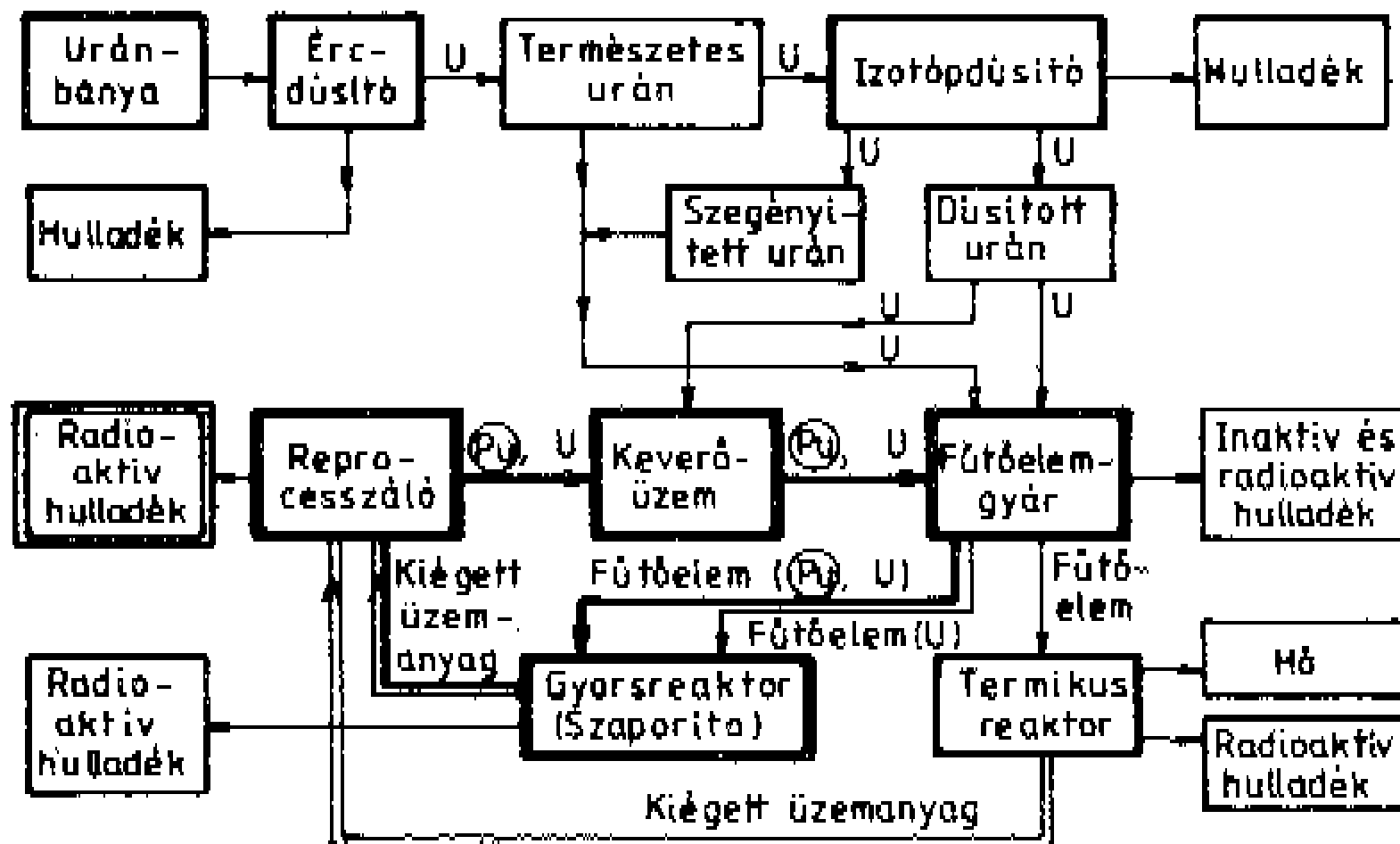
- Az üzemanyagciklus záró és nyitó szakasza alapvetően megváltozik
- A reprocessáló műben a másodlagos aktinidákat is különválasztják (particionálás)
→ Többletköltségek
- Az uránbányászat egészen addig (>1000 év) szükségtelen, amíg a felhalmozott szegényített urán (dúsítási maradék) és kiegészített üzemanyag el nem fogy → Költségcsökkenés
- A dúsított uránt nem izotópdúsítással, hanem plutóniummal történő feldúsítással lehet előállítani → nincs szükség izotópdúsító műre → Költségcsökkenés
- A fűtőelemek csak MOX üzemanyagot tartalmaznak → Drágább fűtőelemgyártás
- Kevesebb és megváltozott összetételű eltemetendő plutónium és másodlagos aktinidák keletkeznek → Kevesebb és gyorsabban lebomló nagyaktivitású r.a. hulladék keletkezik → végleges elhelyezés tervezhetőbbé és olcsóbbá válik
- **Gazdaságilag:** A többletköltségek (drágább gyorsreaktoros atomerőművek, particionálás, MOX üzemanyaggyártás) és a költségcsökkenések (nincs uránbányász, nincs izotópdúsító mű, a nagyaktivitású hulladékok olcsóbb végleges elhelyezése)

Eredő hatás: jelentős költségnövekedés

- A rendszer csak egy iparilag fejlett nagy országban (USA, Oroszország, később Kína, esetleg India), vagy egy nagy és egységes politikai régióban (pl. EU), vagy nemzetközi szinten valósítható meg, figyelembe véve, hogy mely országok viseltetnek nagyobb nukleáris biztonsági felelősséget (proliferációállóság)

4. SZIMBIOTIKUS ATOMENERGIA-RENDSZER - 5

A szimbiotikus atomenergia-rendszer nemzetközi szintű megvalósítása [6,7]:



4. SZIMBIOTIKUS ATOMENERGIA-RENDSZER - 6

Következmények a kulcskérdések szempontjából:

- A nukleáris üzemanyag hasznosítási hatásfoka kb. 1,5-2 nagyságrendnyivel növelhető
- A jelenleg ismert uránkészletek, a felhalmozott szegényített urán (dúsítási maradék) és kiégett üzemanyag együttesen csak igen hosszú idő alatt merül ki (**az atomerőművi kapacitások jelenlegi szintje mellett több ezer év, erőteljesen növekvő rendszer esetében is mintegy 1000 év**).
- **Ez az atomenergia-rendszer valódi áttörést eredményez eme kulcskérdés megoldása szempontjából**
- A nagyaktivitású hulladék aktivitása, radiotoxicitása csökken, kívánt szintre történő lebomlási ideje tovább rövidül (kb. néhányszor 10 ezer év) →
- **Javul az erre vonatkozó kulcskérdés megoldása, de e javulás még mindig nem teljes áttörés**



**A KULCSKÉRDÉSEK LAKOSSÁG SZÁMÁRA IS MEGNYUGTATÓ
TELJES KÖRŰ MEGOLDÁSA ÉRDEKÉBEN INDOKOLT A RENDSZER
ZÁRÓ SZAKASZÁNAK TOVÁBBI KORSZERŰSÍTÉSE**

5. HULLADÉKRECIRKULÁCIÓS SZIMBIOTIKUS ATOMENERGIA-RENDSZER

Törekvés: A szimbiotikus atomenergia-rendszer erényeinek megőrzése mellett a nagyaktivitású r.a. hulladékok aktivitásának, radiotoxicitásának további csökkentése, lebomlási idejének radikális (1000 év alá) rövidítése.

A megoldás fizikai alapja: A hosszú életű radioizotópok (aktinidák és hasadási termékek) átalakítása neutron-magreakciók révén rövidebb életű, illetve stabil izotópokká:

TRANZMUTÁCIÓ

Módja: Erre optimalizált - dedikált - atomreaktorokban



Az atomenergia-rendszernek tartalmaznia kell ilyen atomreaktorokkal szerelt ún. **transzmutációs atomerőműveket**, amelyek emellett még energiát is termelnek.

A fejlesztés alatt álló **4. GENERÁCIÓS ATOMERŐMŰVEK** egy része ilyen.

5. HULLADÉKRECIRKULÁCIÓS SZIMBIOTIKUS ATOMENERGIA-RENDSZER - 2

Hasadási termékek transzmutációja:

Ez a kisebb probléma

Hatékonyan termikus neutronokkal lehet (n,γ) reakció segítségével

Pl.: $^{99}\text{Tc}(n,\gamma)^{100}\text{Tc}$ ^{99}Tc felezési ideje $2,1 \cdot 10^5$ év

^{100}Tc felezési ideje 15,8 s

$^{129}\text{I}(n,\gamma)^{130}\text{I}$ ^{129}I felezési ideje $1,7 \cdot 10^7$ év

^{130}I felezési ideje 12,36 óra

Nagyfluxusú **termikus reaktorokban**

Aktinidák transzmutációja:

Nagy neutronenergiáknál minden aktinida hasadóképes

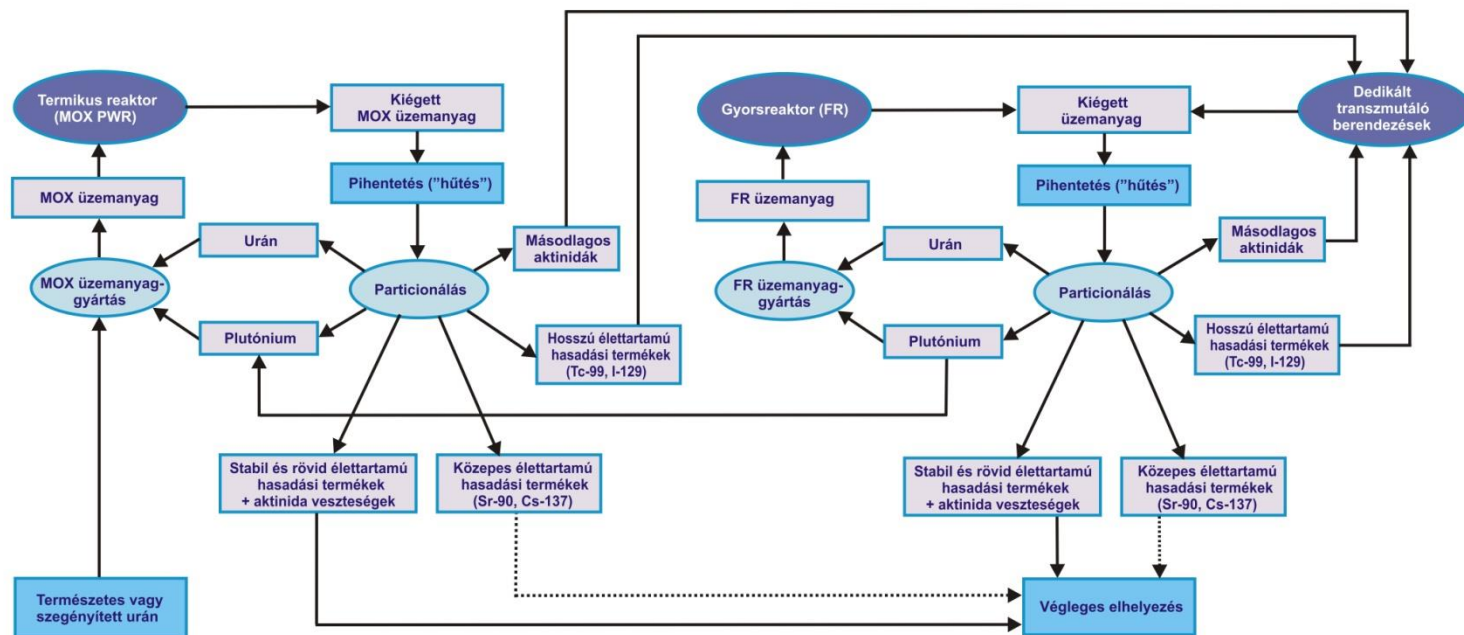
Neutronenergia növekedésével nő a σ_f/σ_c arány



Hatékony transzmutáció gyors neutronokkal - **gyorsreaktorokban** -
lehetséges, minél keményebb a neutronspektrum, annál hatékonyabb az
átalakulás

5. HULLADÉKRECIRKULÁCIÓS SZIMBIOTIKUS ATOMENERGIA-RENDSZER - 3

A rendszer sémája [4]:



Fő jellemzői: A rendszerben 3. és 4. generációs atomerőművek és transzmutációs atomerőművek vannak

Az összes hosszú életű hasadási terméket és aktinidát leválasztják (particionálják) a kiégett üzemanyagból és visszavezetik a rendszerbe

5. HULLADÉKRECIRKULÁCIÓS SZIMBIOTIKUS ATOMENERGIA-RENDSZER - 4

Következtetések a kulcskérdések szempontjából:

- A nukleáris üzemanyag hasznosítása szempontjából rendelkezik a szimbiotikus atomenergia-rendszer valamennyi előnyével
- A hosszú életű radioizotópokat tartalmazó nagyaktivitású hulladékok végleges elhelyezésével összefüggő kulcskérdés megoldásában valódi áttörést jelent



**MINDKÉT KULCSKÉRDÉS LAKOSSÁG SZÁMÁRA IS
MEGNYUGTATÓ TELJES KÖRŰ MEGOLDÁSÁT ÍGÉRI A
HULLADÉKRECIRKULÁCIÓS SZIMBIOTIKUS ATOMENERGIA-
RENDSZER NEMZETKÖZI SZINTŰ MEGVALÓSÍTÁSA**

- Feltétele:**
- A 4. generációs atomerőművek kifejlesztése és rendszerbe állítása.
 - Erre csak az atomenergia-hasznosítás mértékének és részarányának további dinamikus növekedése mellett van reális remény → E nélkül nő a lassan lebomló nagyaktivitású r.a. hulladékok mennyisége
 - Nemzetközileg megfelelően kialakított atomenergia-rendszer

6. ZÁRÓ GONDOLATOK

A 4. generációs atomerőművek és az üzemanyagciklus hozzákapcsolódó kifejlesztése, a hulladékrecirkulációs szimbiotikus atomenergia-rendszerek kiépítése **PARADIGMAVÁLTÁST jelent az atomenergetikán belül.**

Megvalósulása hosszú időt igényel:

A 4. generációs atomerőművek rendszerbe állítása: ~2030-2040-től

A rendszer kiépüléséhez ~50 év kell.



LEGJOBB ESETBEN A 21. SZ.VÉGE FÉLÉ ÉRHETŐ EL.

Kiépül-e?

Ma ezt nem lehet megmondani!

Tény: Akkor kell mélygeológiai tárolókba legtöbb és leglassabban lebomló nagyaktivitású radioaktív hulladékot elhelyezni, ha ez a fejlesztés valamilyen ok miatt nem valósul meg.

IRODALOM

1. OECD/NEA, Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Status and Assessment Report, 1999
2. Csom Gyula: Atomerőművek üzemtana, I. kötet (A reaktorfizika és- technika alapjai); Egyetemi tankönyv, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1997
3. Tomassi J. et al.: Long lived waste transmutation in reactors
Nuclear Technology, Vol. 111. (1995), p. 133
4. Dr. Fehér Sándor: Az atomerőművi kiégett üzemanyag hosszú felezési idejű komponenseinek transzmutációja
Magyar Villamos Művek Közleményei, XLVI. Évfolyam, 2009.,
Különlenyomat
5. OECD/NEA, Physics and Safety of Transmutation Systems,
A Status Report; NEA No 6090, ISBN 92-64-01082-3, 2006
6. Csom Gyula: Regional Nuclear Power System: Justification and Perspectives,
BME-TR-RES/79, BME Tanreaktora, Budapest, 1979
7. Csom Gyula: Atomenergia-rendszerek nukleáris üzemanyagciklusának továbbfejlesztési lehetőségei
Akadémiai Kiadó, Budapest, 1988