

FENNTARTHATÓ FEJLŐDÉS ÉS ATOMENERGIA

11. előadás ATOMENERGIA-RENDSZEREK

2019-2020. őszi félév

Dr. Yamaji Bogdán, Prof. Dr. Csom Gyula

TARTALOM

1. Atomerőmű generációk
 2. Egzotikus atomreaktorok-jégtörők
 3. Atomenergia-rendszerek
 4. A nukleáris üzemanyagciklus elemei
- Ellenőrző kérdések

ATOMERŐMŰ GENERÁCIÓK

Atomerőmű-generációk

Az atomerőművek (műszaki, biztonsági stb.) fejlesztése az első atomerőmű üzembe helyezése (1954, Obnyinszk, Szovjetunió) után töretlen folyamat. A fejlettségi szinttől függően különböző atomerőmű generációk definiálhatók. Ezek:

- Első generációs atomerőművek

Üzembe helyezések: 1954-től kb. 1970-es évek közepéig

Üzemben: 1954-től kb. 2008-ig

Pl. bohunicei atomerőmű 1. és 2. blokkja (Szlovákia)

- Második generációs atomerőművek

Üzembe helyezések. ~1970-es évek közepétől 1990-es évek közepéig

Üzemben: ~1970-es évek közepétől 2040-es évek közepéig

Pl. paksi atomerőmű blokkjai

- Harmadik generációs atomerőművek („evolúciós” atomerőművek)

Üzembe helyezések: 1998-tól ~2040-2045-ig (várhatólag)

Üzemben: 1998-tól ~2100-ig (?)

Pl. ABWR, AP-1000, EPR

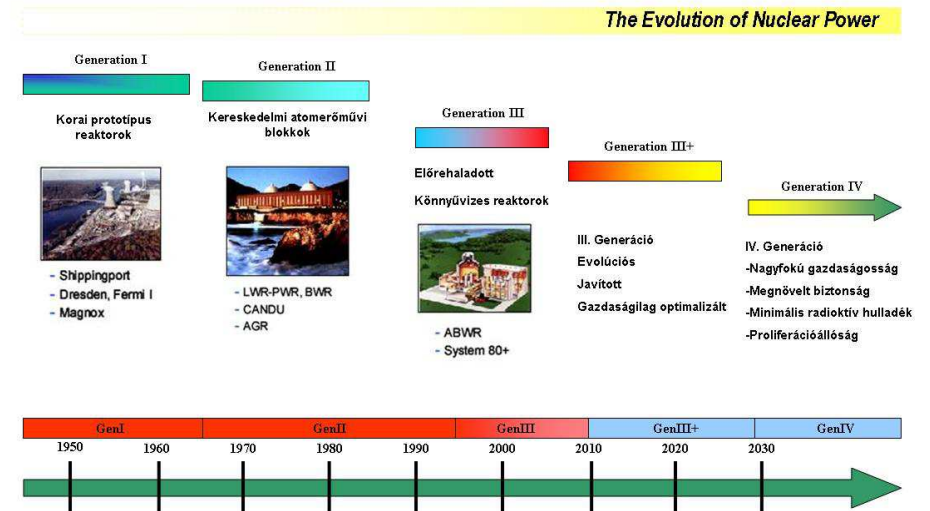
Pl. ilyen lesz a Paksi Atomerőmű következő 1-2 új blokkja

- Negyedik generációs atomerőművek („innovációs” atomerőművek)

Jelenleg kifejlesztés alatt

Üzembe helyezések: ~2030-tól (várhatólag)

ATOMERŐMŰ GENERÁCIÓK



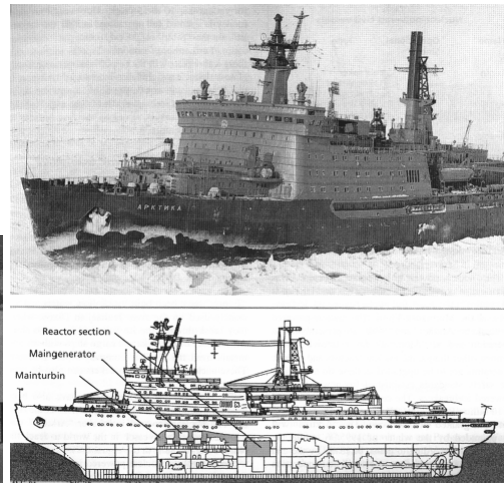
2. EGZOTIKUS REAKTOROK - JÉGTÖRŐK

Jégtörő hajók:

- Az első atomjégtörő a szovjet Lenin (1957-1989).
- Három, egyenként 90 MW termikus teljesítményű PWR hajtotta, 5% dúsítású urán-oxid üzemanyaggal.



Lenin (SZU) (1957-1989)

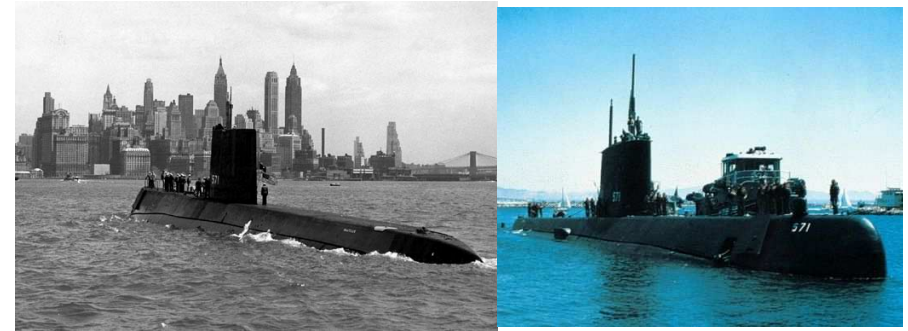


Arktika (SZU) (1975-)

2. EGZOTIKUS REAKTOROK - JÉGTÖRŐK - 2

Tengeralattjárók:

- Az első atom-tengeralattjáró a Nautilus (1954-1983, PWR).
- PWR és LMBR (!) reaktorokkal készülnek



Nautilus SSN-571, az első atom-tengeralattjáró

4. ATOMENERGIA-RENDSZEREK

Követelmény az energetika és a környezet kapcsolatának vizsgálatánál:

Valamennyi energiatermelési és –felhasználási módnál az egész rendszert, a teljes energiaátalakítási láncot, annak valamennyi komponensét vizsgálni kell.

Ez az atomenergetikára is követelmény: *az egész atomenergia-rendszert, azaz a teljes üzemanyagciklust kell vizsgálni, az uránbányától a radioaktív hulladékok végleges elhelyezéséig.* **Életciklus-elemzés**

Tipikus üzemanyagciklus-sémák (atomenergia-rendszer típusok):

- Termikus reaktorral szerelt atomerőműveket tartalmazó rendszer nyitott üzemanyagciklussal
- Termikus reaktorral szerelt atomerőműveket tartalmazó rendszer zárt üzemanyagciklussal
- Szimbiotikus atomenergia-rendszer (zárt üzemanyagciklussal)
- Hulladék-recirkulációs szimbiotikus atomenergia-rendszer (zárt üzemanyagciklussal)

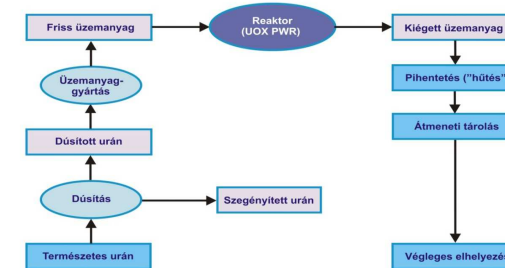
A mai atomenergia-rendszerek: Az ad 1. és ad 2. szerinti rendszerek kombinációi

A magasabb rendű üzemanyagciklusok fő céljai:

- A nukleáris üzemanyag-készletek egyre magasabb hatásfokú hasznosítása
- A nagyaktivitású radioaktív hulladékok mennyiségének csökkentése, lebomlási idejének nagyságrendekkel történő csökkentése.

4. ATOMENERGIA-RENDSZEREK - 2

Termikus reaktorral szerelt atomerőműveket tartalmazó rendszer nyitott üzemanyagciklussal



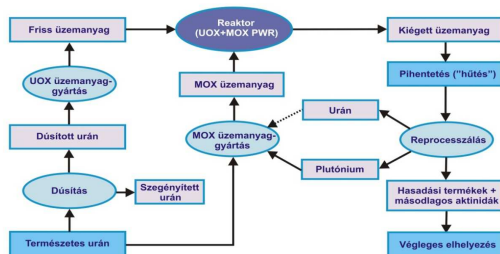
Atomerőművei: 1. és 2. generációs atomerőművek

Hulladékok (lényegesebbek):

- Bányászati, ércdúsítási hulladékok (módszertől függő jelleggel)
- Izotópdúsítási hulladékok
- Atomerőművi hulladékok: kis-, közepes- és nagyaktivitású radioaktív hulladékok, utóbbiba beleértve a *kiegtt üzemanyagot*

4. ATOMENERGIA-RENDSZEREK - 3

Termikus reaktorral szerelt atomerőműveket tartalmazó rendszer zárt üzemanyagciklussal



Atomerőművei: 1. és 2. generációs (többségében 2. generációs) atomerőművek.

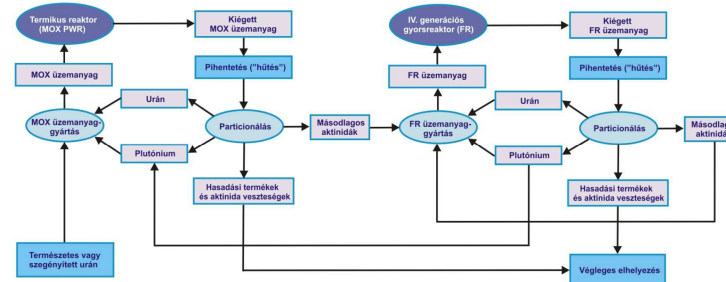
Hulladékok (lényegesebbek):

- Bányászati, ércdúsítási hulladékok (módszertől függő jelleggel)
- Izotópdúsítási hulladékok (kevesebb, mint az előző rendszerénél)
- Atomerőművi hulladékok: kis-, közepes- és nagyaktivitású radioaktív hulladékok;

A kiegészítő üzemanyag nem hulladék, hanem melléktermék!

4. ATOMENERGIA-RENDSZEREK - 4

Szimbiotikus atomenergia-rendszer (zárt üzemanyagciklussal)



Atomerőművei: 3. és 4. generációs atomerőművek

Hulladékok (lényegesebbek):

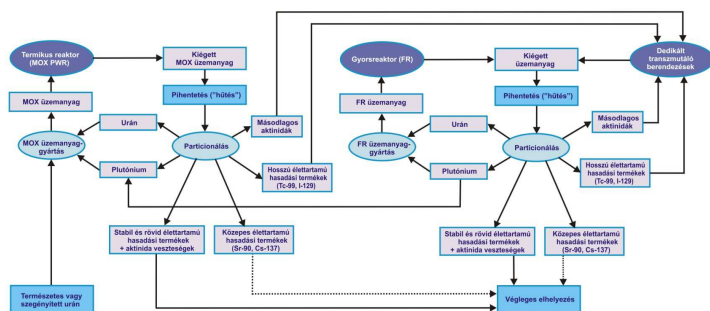
- Bányászati, ércdúsítási hulladékok (módszertől függő jelleggel): nagyon kevés vagy nulla
- Atomerőművi hulladékok: kis-, közepes- és nagyaktivitású radioaktív hulladékok;

Nincs izotópdúsítási hulladék (szegényített urán)!

A kiegészítő üzemanyag nem hulladék, hanem melléktermék!

4. ATOMENERGIA-RENDSZEREK - 5

Hulladék-recirkulációs szimbiotikus atomenergia-rendszer (zárt üzemanyagciklussal)



Atomerőművei: 3. és 4. generációs atomerőművek (hosszú távon főleg 4. generációsok)

Hulladékok (lényegesebbek):

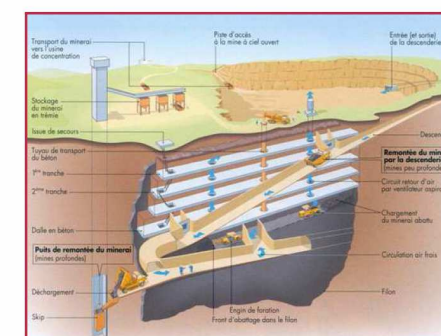
- Bányászati, ércdúsítási hulladékok (módszertől függő jelleggel): nagyon kevés vagy nulla.
- Atomerőművi hulladékok. Kis-, közepes- és nagyaktivitású radioaktív hulladékok

De: **kevesebb és gyorsabban lebomló nagyaktivitású hulladék!**

Nincs izotópdúsítási hulladék (szegényített urán)!

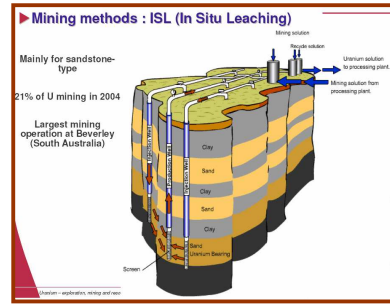
Bányászat

- Külszíni fejtés (Open pit - OP)
 - kitermelt érc
 - meddő
 - jellemzően mélyművelés követi
 - jelentős környezetváltoztatás
 - Mélyművelés
 - kitermelt érc
 - meddő
 - hagyományos bányászati eljárások
- Mining methods : OP + conventional UG**
- General scheme of OP followed by UG mining activities



Bányászat

- Helyi kioldás (In-situ leaching - ISL)
 - nincs szükség jelentős bányatevékenységre
 - fúrólukakon keresztül savat (Na_2CO_3 , H_2SO_4) injektálnak a kőzetbe
 - a savban jól oldódnak a célércek, esetünkben az urán
 - az oldatot a felszínre szivattyúzzák további feldolgozásra
- hátrány:
 - hosszú időre elszennyezheti a területet
 - biztosítani kell, hogy ivóvízbázishoz, élő környezethez ne jusson el a vegyszer



Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

Urándúsítás

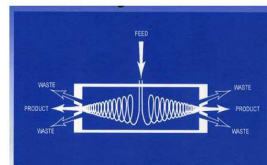
- Természetes urán:
 - 99,3% U-238 0,7% U-235
- Az urán, mint hasadóanyag
 - dúsított: megnövelt U-235 tartalom
 - energetikai reaktorok esetén: 1-5%
 - kutatóreaktoroknál: 10-20% vagy magasabb
- Különböző izotópok kémiai tulajdonságai: megegyezők
- Elválasztás fizikai jellemzők alapján:
 - eltérés a tömegben vagy magfizikai tulajdonságokban

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

Urándúsítás

- Statisztikus eljárások
 - kis dúsítási hatás (egy lépésben), csak a relatív magtömeg-eltérés játszik szerepet
 - minél könnyebb az elválasztani kívánt izotóp, annál nagyobb a szeparáció valószínűsége
 - 234/235: kis szelektivitás, 235/238: jobb szelektivitás
 - sok lépést kell egymás után kapcsolni
 - **gázdifúzió, gázcentrifuga, vortex, stb.**

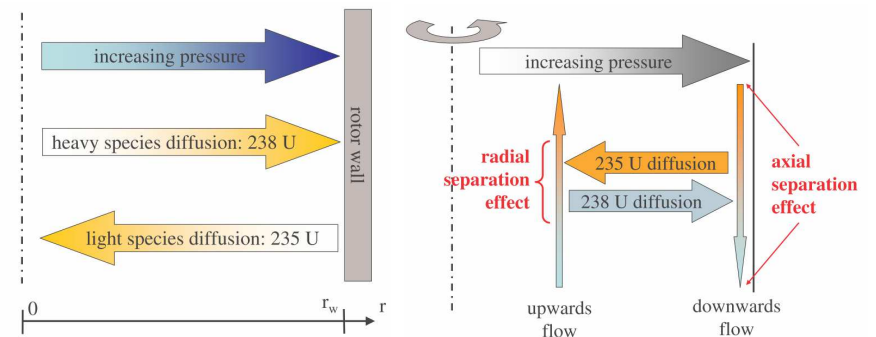
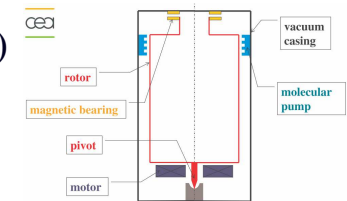


Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

Urándúsítás

- Gázcentrifuga (ultracentrifuga)

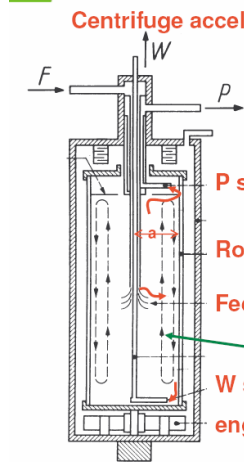


Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

Urándúsítás

Gas centrifuge



Centrifuge acceleration is $> 500\,000g$

• Equilibrium of the rotating gas :
 $n(r) = n_0 \cdot \exp(M\omega^2 r^2 / 2kT)$

• Separation effect :
 $\alpha = \exp((M_5 - M_8)\omega^2(a^2 - r^2) / 2kT)$

• Example :
 $\omega a = 800 \text{ m/s}, T = 300 \text{ K}, r = 0.7a$

$$\alpha = 1.23$$

$$\Delta U = D\rho \left(\frac{\Delta M}{2RT} \right)^2 v^4 Z$$

D : diffusion factor
 ρ : gas density

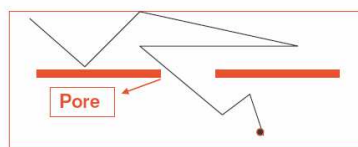
Urándúsítás

• Ultracentrifuga



Urándúsítás

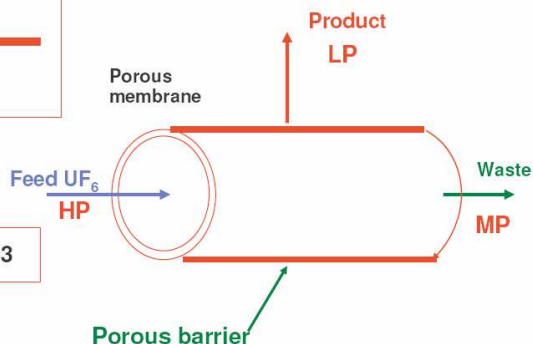
Gaseous diffusion : the principle



$$J = n \cdot v / 4$$

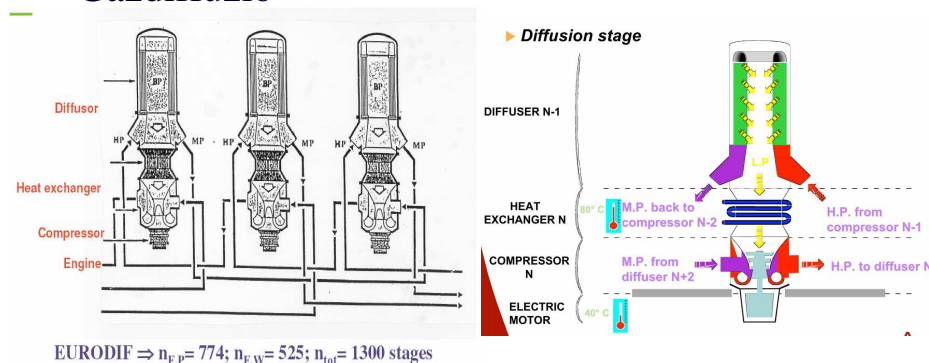
$$v = \sqrt{8kT / \pi M}$$

$$\alpha_{th} = (M_8 / M_5)^{1/2} = 1,0043$$



Urándúsítás

• Gázdiffúzió



EURODIF $\Rightarrow n_{E,P} = 774; n_{F,W} = 525; n_{tot} = 1300$ stages

Urándúsítás



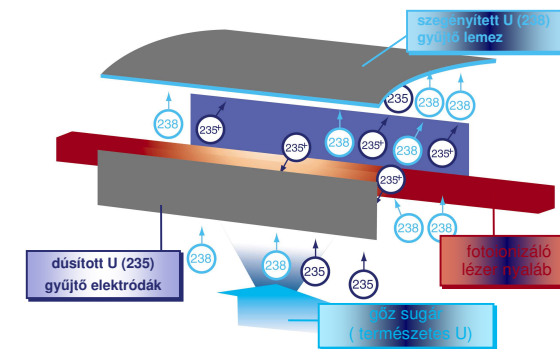
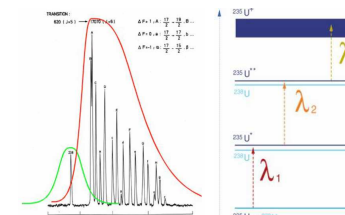
Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

Dúsítás

• AVLIS (Atomic Vapor Laser Isotope Separation)

- 235 és 238 másképp nyel el fotonokat
- megfelelő hullámhossz(ak) előállításával szelektíven ionizálható a 235
- ionizált 235-öt elektródákra kigyűjtik
- semleges 238 egy felfogólemezen lerakódik



Fenntartható fejlődés és atomenergia

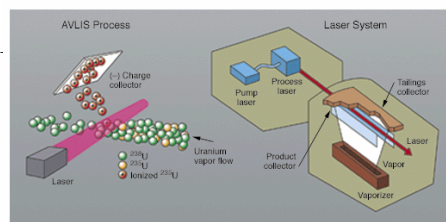
Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

Dúsítás

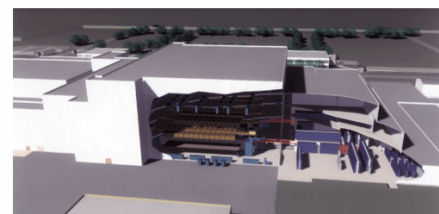
• AVLIS (Atomic Vapor Laser Isotope Separation)



The separator demonstration facility at Lawrence Livermore's laser isotope separation (LIS) plant plant tested full-scale equipment. One of three separator units shown for enriching uranium was operational for demonstrations. Also visible are beam tubes for transporting precisely tuned laser light to the separator units.



In the laser system used for the LIS uranium enrichment process (right), electrons from the ^{235}U atoms are separated (left), leaving positively charged ^{235}U ions that can be easily collected for use.



An engineering drawing of a commercial uranium enrichment plant using LIS technology. The cutaway shows banks of separators on the left, lasers on the right, and beam tubes (red) connecting the two systems.

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

Üzemanyaggyártás



Fenntartható fejlődés és atomenergia

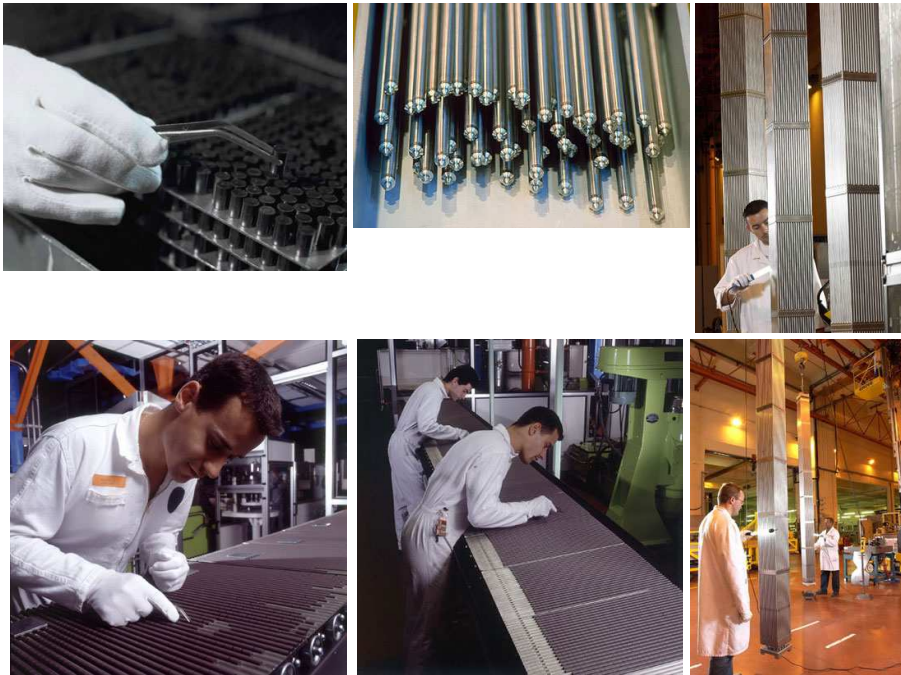
Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

Kiégett üzemanyag átmeneti tárolása

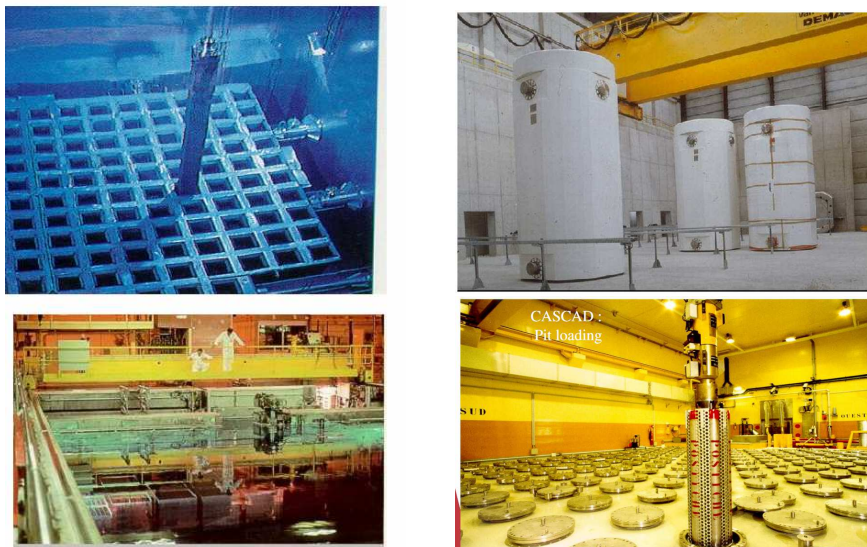
Pihentető tárolást (3-5 év) követően
50-100 év időtávlat

- Atomerőművi telephelyen vagy
 - Dedikált tárolóban, atomerőművön kívül

 - Nedves tárolás: tároló medence
 - Száraz tárolás: konténerek, caskok, aknák
- Átmeneti tárolást követő szállítás: feldolgozásra,
végleges tárolóba
- kettős célú caskok: szállítás és tárolás

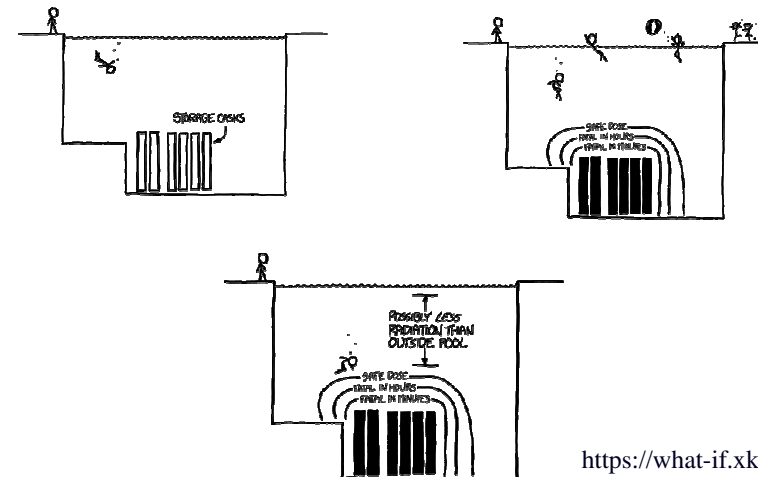


Kiégett üzemanyag átmeneti tárolása



Pihentetőmedencés tárolás

What if I took a swim in a typical spent nuclear fuel pool? Would I need to dive to actually experience a fatal amount of radiation? How long could I stay safely at the surface?

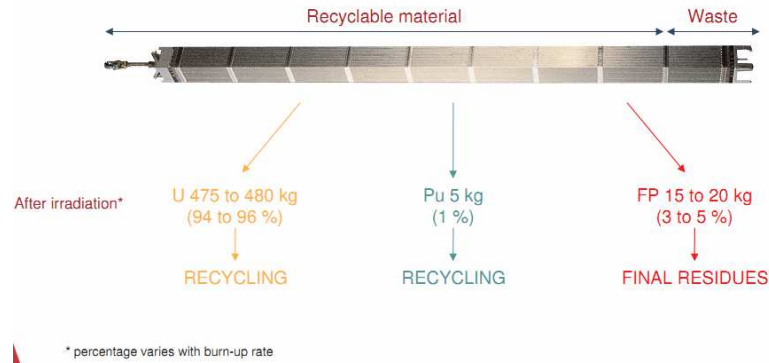


<https://what-if.xkcd.com/29/>

Újrahasznosítás: reprocessálás

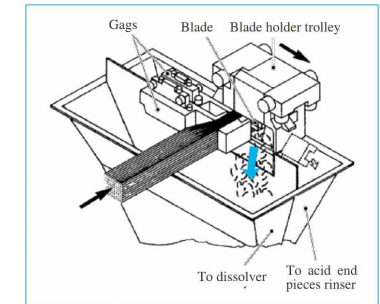
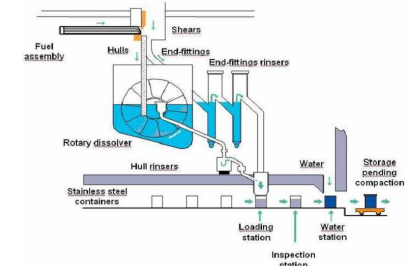
- A kiegészített üzemanyag összetétele

• 1 LWR fuel assembly: 500 kg uranium before irradiation in the reactor



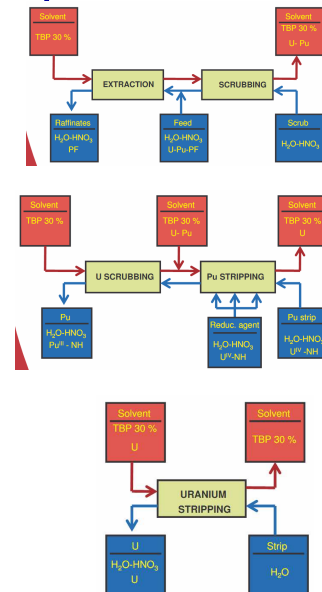
Újrahasznosítás: reprocessálás

- kiegített üzemanyag mechanikai feldarabolása
- üzemanyag elválasztása a burkolattól, szerkezeti elemektől
- burkolat, szerkezeti elemek tisztítása
- savas oldás
- kompaktálás, tokozás



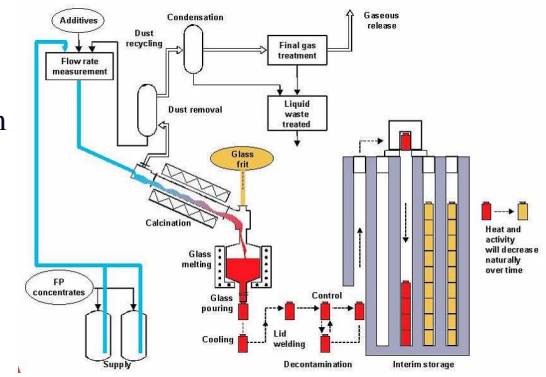
Újrahasznosítás: reprocessálás

- 1: U, Pu elválasztása a hasadási termékektől
- 2: U és Pu elválasztása
- 3: U visszanyerése víz fázisban



Újrahasznosítás: reprocessálás

- Szilárd (nagyaktivitású) hulladék előállítása és kezelése
 - kalcinálás: a víztartalom eltávolítása izzítással
 - vitrifikálás
 - zárt hordókba töltés
 - hordók pihentetése és tárolása



Hulladékkezelés

Standard packaging for long-term management

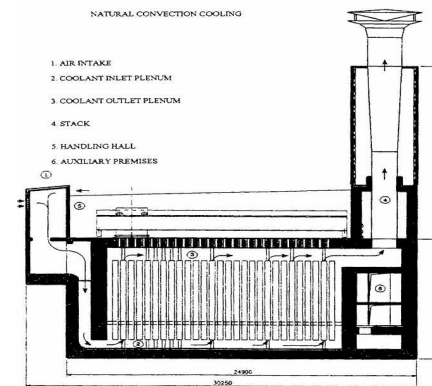
Compacted waste (CSD-C container)

Vitrified waste (CSD-V container)



Hulladékkezelés

- Átmeneti tárolás és hűtés
 - hasonló a kiegészített átmeneti tárolásához



LMW végleges tárolók

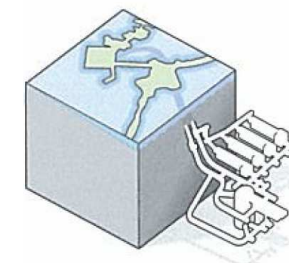
4.14. táblázat. A kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésének jelenlegi és tervezett gyakorlata az EU országaiban

Ország	Tárolótípus	Telephely	Kapacitás, m ³	Üzemeltetési időszak
Belgium	felszín vagy felszín alatti	kiválasztás alatt		nincs döntés
Finnország	felszín alatti	Olkiluoto	8500	1992-
	felszín alatti	Loviisa	5600	1997-
Franciaország	felszíni	Centre de la Manche	500000	1969-1994
	felszíni	Centre de L'Aube	1000000	1992-
Németország	felszín alatti	Asse sóbánya		1967-1978
	felszín alatti	Morsleben (ERAM)	40000	1971-1998
	felszín alatti	Konrad	650000	terv: 2002
Olaszország	hosszú idejű tárolás			
Hollandia	hosszú idejű (100 év) felszíni átmeneti tárolás			
Spanyolország	felszíni	El-Cabri	35000	1992-2013
Svédország	felszín alatti	Forsmark (SFR)	60000	1988-2020
	felszín alatti	SFL 3-5	25000	2008-
Nagy-Britannia	felszíni	Drigg	1400000	1959-2050
	felszíni	Dounreay	30000	1958-2010

LMW végleges tárolók



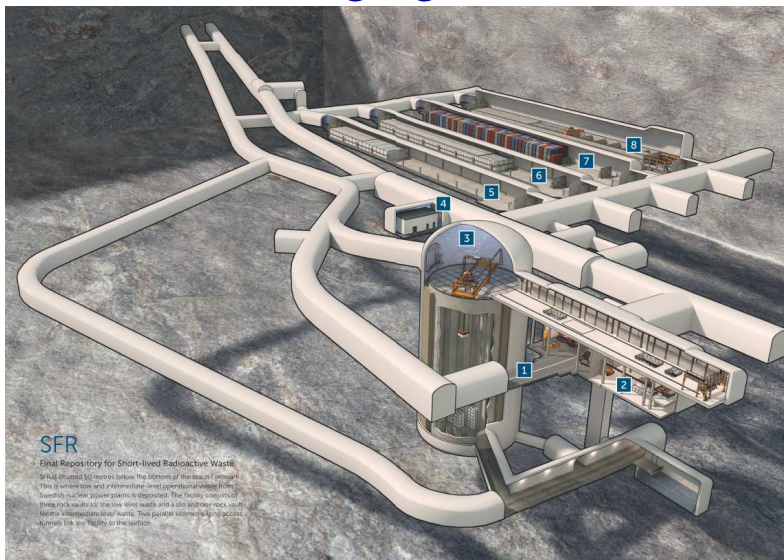
Radioactive operational waste is disposed of in SFR, which is situated near the Forsmark Nuclear Power Plant.



- Példa: SFR, Forsmark, Svédország
 - 50 m-rel a tengerfenék alatt



LMW végleges tárolók



http://skb.se/upload/publications/pdf/SFR_folder_engelsk.pdf
 Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

HLW kutatólaborok

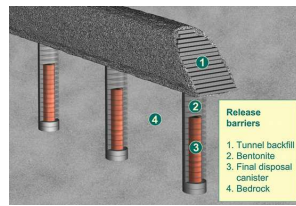
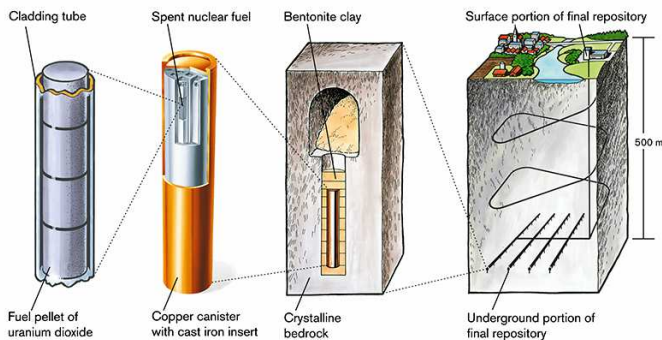
4.15. táblázat. A nagy aktivitású radioaktív hulladékok mélygeológiai elhelyezésével kapcsolatos föld alatti laboratóriumok a világon

Ország	Laboratórium	Befogadó kőzet	Építés, kutatás	Mélység, m
Kanada	Manitoba	gránit	1986-	240, 420
Japán	Tono Kamaiishi Mizunami	üledékes kőzet kristályos kristályos	1995-	
Svédország	Aspö Stripa	kristályos kristályos	1990- 1979-1992	460 400
Svájc	Grimsel Mt. Terri	kristályos agyag	1983- 1989-	450 300
Németország	Asse	só	1970-	
Franciaország	Tournemiere	üledékes	1999-	250
Németország	Gorleben	só	1974-	900
Belgium	HADES	agyag	1984-	225
Finnország	Olkiluoto kutatóvágat	gránit	1993-	70-100
USA	WIPP Yucca	só tufa	1996-	650 300

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

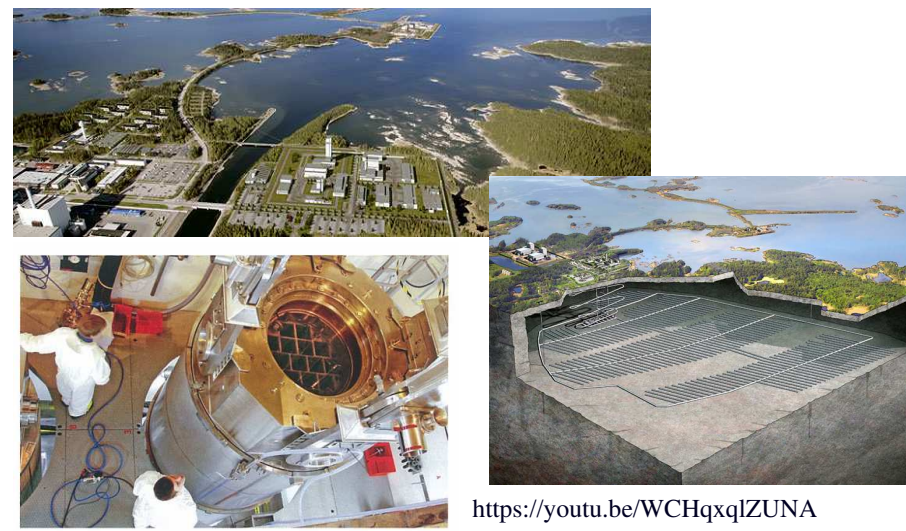
Kiégett üzemanyag végleges elhelyezése



Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

Kiégett ŰA végleges elhelyezése



<https://youtu.be/WChqxqIZUNA>

Fenntartható fejlődés és atomenergia

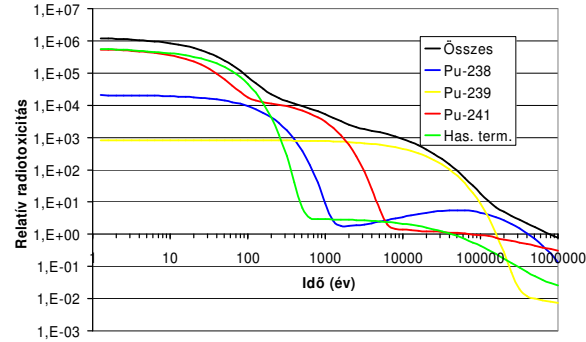
Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

Transzmutáció

Problémák:

- Igen nagy radiotoxicitás
- Igen hosszú bomlási idő (10^5 - 10^7 év is lehet)

A kiégett üzemanyag radiotoxicitásának időbeli alakulása nyitott üzemanyagciklus esetében



Transzmutáció

- **Radiotoxicitás** $\Theta_D(t) = \sum_i A_i(t) DCF_i$ DCF: Dóziskonverziós faktor

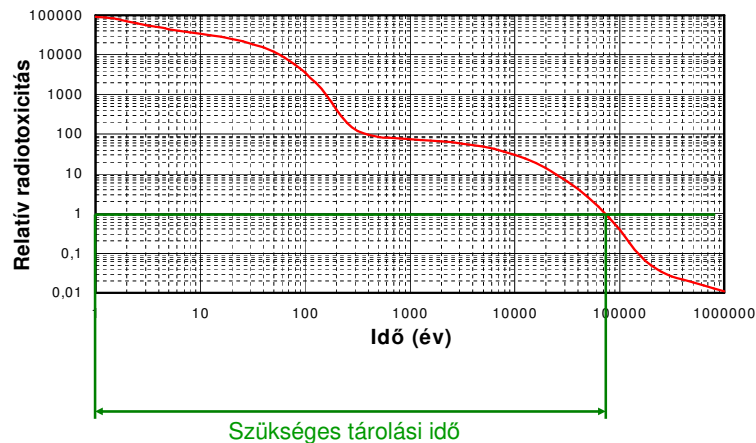
- **Relatív radiotoxicitás** $\Theta_{rel,D}(t) = \frac{\Theta_D(t)}{\Theta_{D,U}(t)}$

- **Maradék kockázat**

$$K_m(t) = \int_t^T [\Theta_D(t) - \Theta_{D,U}] dt$$

Transzmutáció

“Tiszta” atomenergia



Transzmutáció

E probléma az atomenergia-hasznosítás egyik kulcsproblémájává vált, ami az atomenergetika jövőjét egyedül is eldöntheti.

Lakossági ellenézés fő oka: a lebomláshoz szükséges időtartam (~1 millió év) nem emberi léptéke, ami minden jövőre vonatkozó előrejelzést vitathatóvá tesz.

E problémát oldja meg elvileg új megközelítéssel a **TRANSZMUTÁCIÓ**

Transzmutáció

Transzmutáció: ezeknek az izotópoknak a (neutronokkal történő) átalakítása rövid felezési idejű, vagy stabil izotópokká.

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)

$^{129}\text{I}(n,\gamma)^{130}\text{I}$ ^{130}I felezési ideje 12,36 óra

Transzmutáció

Aktinidák transzmutációja

Nagy neutronenergiáknál minden aktinida hasadóképes

Neutronenergia növekedésével nő a σ_f/σ_c arány



Hatékony transzmutáció gyors neutronokkal lehetséges, minél keményebb a neutronspektrum, annál hatékonyabb az átalakulás (gyorsreaktor)

Megoldható:

Atomreaktorban (termikus és gyorsreaktorban)

Gyorsítóval hajtott szubkritikus rendszerben

4. generációs atomenergia-rendszerek

Transzmutáció

Eredmény:

- az elhelyezendő nagyaktivitású hulladékok aktivitásának, radiotoxicitásának csökkenése
- lebomlási idő csökkenése 3-4 nagyságrenddel
- tárolás könnyebbé, tervezhetőbbé válik
- a probléma a lakosság számára is meggyőzően megoldottá válik.



Az atomerőművi kapacitások növelése a 4. generációs atomerőművek rendszerbe állítása eredményeként a nagyaktivitású radioaktív hulladékok mennyiségének csökkenésére vezet

Nemzeti, nemzetközi programok:

4. generációs atomerőművek kifejlesztésére

Magyarországi kutatási tevékenység: BME NTI, MTA Energiatudományi Kutatóközpont (régiben KFKI AEKI)

Főbb ellenőrző kérdések

1. Milyen egzotikus atomreaktorokat ismer?
2. Ismertesse az atomerőmű generációkat röviden!
3. Mikor épültek az 1. generációs atomerőművek?
4. Mikor épültek a 2. generációs atomerőművek?
5. Mikor épültek a 3. generációs atomerőművek?
6. Kb. mikortól épülnek a 4. generációs atomerőművek?
7. A paksi atomerőmű hányadik generációs atomerőmű?
8. Mit jelent az atomenergia-rendszer életciklus-elemzése?
9. Milyen tipikus üzemenyagciklusokat, ill. atomenergia-rendszereket ismer?
10. Melyek a magasabb rendű üzemenyagciklusok fő céljai?
11. Ismertesse a termikus reaktortal szerelt atomerőműveket tartalmazó rendszer felépítését nyitott üzemenyagciklus esetében.
12. Melyek a nyílt üzemenyagciklus lényegesebb radioaktív hulladécai?
13. Ismertesse a termikus atomenergia-rendszer felépítését zárt üzemenyagciklus esetében.
14. Melyek a zárt üzemenyagciklus lényegesebb radioaktív hulladécai?
15. Ismertesse a szimbiotikus atomenergia-rendszer felépítését.
16. Hányadik generációs atomerőművekből épül fel a szimbiotikus atomenergia-rendszer?
17. Melyek a szimbiotikus atomenergia-rendszer lényegesebb radioaktív hulladécai?
18. Ismertesse a hulladékrecirkulációs szimbiotikus atomenergia-rendszer felépítését.
19. Hányadik generációs atomerőművekből épül fel a hulladékrecirkulációs szimbiotikus atomenergia-rendszer?
20. Melyek a hulladékrecirkulációs szimbiotikus atomenergia-rendszer lényegesebb radioaktív hulladécai?

Főbb ellenőrző kérdések

21. Ismertesse röviden a mélyművelést és a külszíni fejtést!
22. Ismertesse röviden a helyi kioldásos uránbányászati eljárást!
23. Miért van szükség az urán dúsítására?
24. Milyen két fő csoportba oszthatók az izotópdúsítási eljárások?
25. Mi a gázcentrifugás urándúsítás elve?
26. Mi a gázdifúziós urándúsítás lényege?
27. Mi az AVLIS izotóp-szeparációs eljárás elve?
28. Miért kell tárolni a kiégett üzemanyagot?
29. Hogyan szokták tárolni a kiégett üzemanyagot?
30. Mi a reprocessálás?
31. Hogyan tárolják az atomerőművi radioaktív hulladékokat?
32. Mik a transzmutáció fő indokai?
33. Mi a transzmutáció lényege?
34. Milyen nukleáris létesítményben lehet célszerűen transzmutálni a hosszú felezési idejű hasadási és aktivációs termékeket?
35. Mik az aktinidák transzmutálásának legcélszerűbb eszközei?
36. Mi a transzmutáció eredménye a radioaktív hulladékok radiotoxicitása és lebomlási ideje szempontjából?