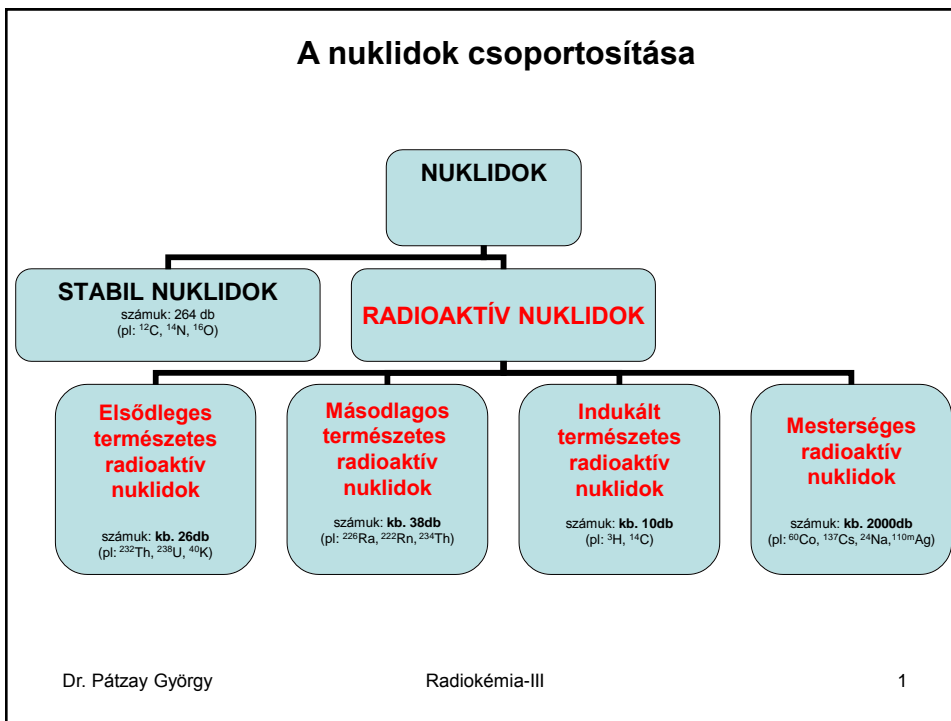
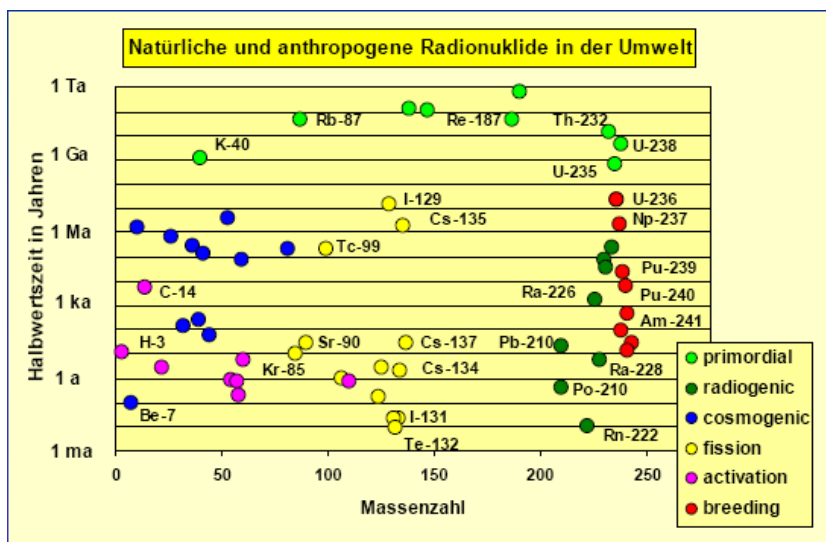


A nuklidok csoportosítása



Néhány a környezetben található radioaktív izotóp



A MAGTÁBLÁZATOK

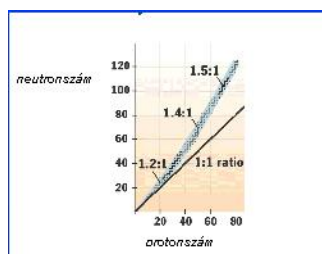
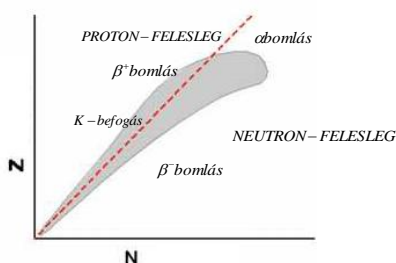
A radiokémikusok magtáblázata tartalmazza az összes ismert radioaktív izotópot is.

- Több mint 2300 ismert nuklid és több mint 400 izomer ismert.
- Csak 287 izotóp stabil vagy természetben előforduló radioaktív izotóp.
- A magtáblázat számos információt tartalmaz.

A rendszám (Z) a neutronsám (N) függvényében

A stabil magok Z=20-ig a 45^o-os egyenes mentén, utána az alatt helyezkednek el.

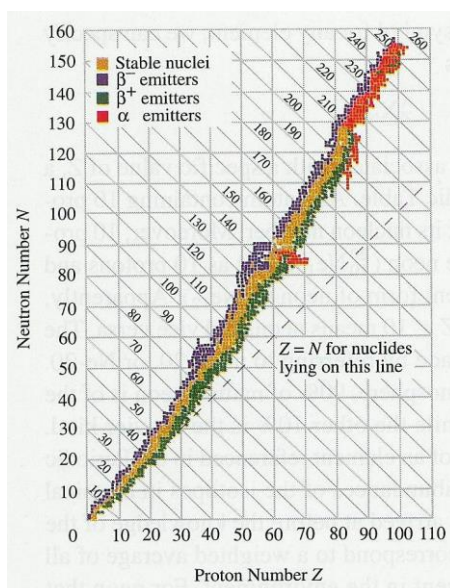
A Tc(Z=43), Pm(Z=61) és a Bi-nál (Z=83) nehezebb elemek mind radioaktívak



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

3



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

4

A MAGOK STABILITÁSA

A 264 nem-radioaktív izotóp között a PÁROS PROTON ÉS PÁROS NEUTRONSZÁMMAL RENDELKEZŐ MAGOK KÜLÖNÖSEN STABILAK!

- 157 magnál úgy a neutronszám, mint a protonszám páros.
- 50 magnál .páratlan a neutronok száma és páros a protonok száma.
- 52 magnál páros a neutronok száma és páratlan a protonok száma.
- 5 magnál úgy a neutronszám, mint a protonszám páratlan.

A stabilitásért úgy néz ki a neutronok a felelősek. A neutronok segítenek tompítani, „elkenni” a protonok közötti taszító erőket.

Bizonyos MÁGIKUS PROTON ÉS NEUTRONSZÁMMAL rendelkező magok különösen stabilak.Mágikus számok:

- protonok 2, 8, 20, 28, 50, 82
- neutronok 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

Feltételezik, hogy ez a stabilitás a „betöltött maghéjakkal” kapcsolatos hasonlóan a betöltött elektrónhéjakhoz.

Dr. Páztay György

Radiokémia-III

5

Bizonyítékok a mágikus stabilitásra:

- A mágikus proton- és neutronszámmal rendelkező elemeknek több természetes izotópja létezik. Pl. az ónnak (Sn Z=50) 10 természetes izotópja van, az indiumnak (In Z=49) csak 2.
- Sok radioaktív mag alfa-bomlással bomlik, mert a hélium mag (2 proton+2 neutron) különösen stabil.
- Számos radioaktív bomlás végtermék magja mágikus proton és neutronszámmal rendelkezik.

H																			He
Li	Be													B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg													Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
Cs	Ba	Ls	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
Fr	Ra	Ac																	

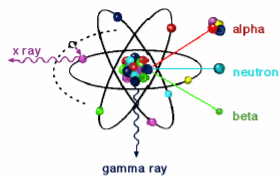
A radioaktív elemek

Dr. Páztay György

Radiokémia-III

6

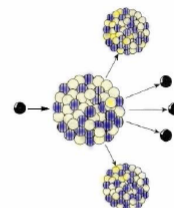
Nukleáris reakciók és kölcsönhatások



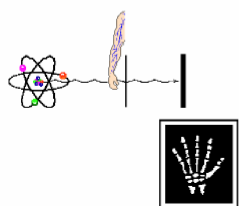
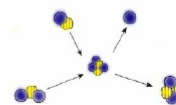
Sugárzás

Befogás

Hasadás



Fúzió



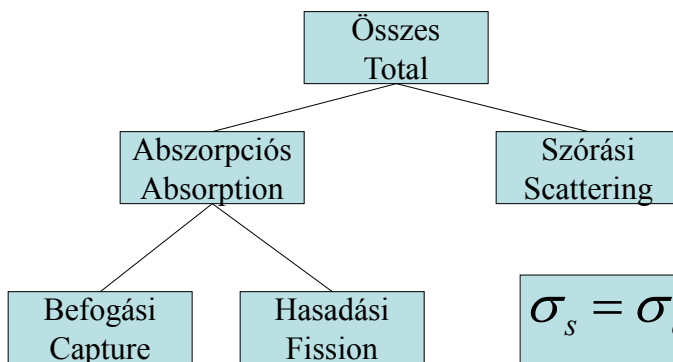
Szóródás

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

7

Hatáskeresztszmetzetek



$$\sigma_s = \sigma_e + \sigma_i$$

$$\sigma_a = \sigma_c + \sigma_f \approx \sigma_\gamma$$

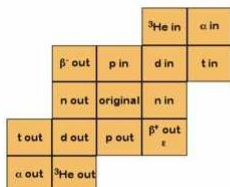
$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a$$

Dr. Pátzay György

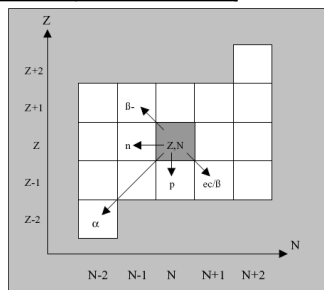
Radiokémia-III

MAGÁTALAKULÁSOK (TRANSZMUTÁCIÓK)

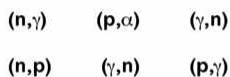
n-neutron	p - proton	t – deutérium	t - trícium
α - alfa	β - béta β^+ – pozitron	γ – gamma	E – elektron befogás



O15	O16	O17	O17
N13	N14	N15	N15
C12	C13	C14	C14
B11	B12	C13	C13



A magreakciókat általában X(részecske be, részecske ki)Y egyenlet formájában írjuk fel. Például:



Dr. Pátzay György

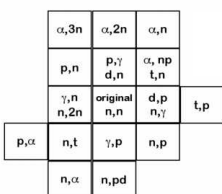
Radiokémia-III

9

Szomszédos magok egy lehetséges átalakulási sémája.

Például:

^{26}Mg	(n, γ)	^{27}Mg
^{26}Mg	(n, p)	^{27}Al
^{26}Mg	(p, α)	^{23}Na
^{26}Mg	(γ , n)	^{25}Mg
^{26}Mg	(α , n)	^{29}Si
^{26}Mg	(p, g)	^{27}Al



Transformation of Nuclides in Nuclear Reactions

$(^3\text{He}, 2n)$ $(\alpha, 3n)$	$(^3\text{He}, n)$, (d, β) , $(\alpha, 2n)$	$(^3\text{He}, \gamma)$ (α, n) , (t, β)	(α, γ)
(p, n) $(d, 2n)$	(p, γ) , (n, β) $(^3\text{t}, 2n)$, (d, n) $(^3\text{He}, d)$ (α, t)	(d, γ) $(^3\text{t}, n)$ $(^3\text{He}, p)$ (α, d)	$(^3\text{t}, \gamma)$ (α, p)
(γ, n) $(n, 2n)$ (p, d) $(^3\text{He}, \alpha)$	Original Nuclide Scattering, elastic & inelastic	(n, γ) (d, p) $(^3\text{t}, d)$ $(^3\text{He}, 2p)$ $(\alpha, ^3\text{He})$	$(^3\text{t}, p)$ $(\alpha, 2p)$
(γ, d) $(n, ^3\text{t})$ (d, α)	(γ, p) $(^3\text{t}, \alpha)$	(n, p) $(d, 2p)$ $(^3\text{He}, 3p)$	$(^3\text{t}, 2p)$ $(\alpha, 3p)$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

10

Ha a protonok és neutronok kombinálódnak, tömegveszteség lép föl, mely energiává alakul. Ez a kötési energia.

$$\Delta E = \{Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M_{mag}\} \cdot c^2 \quad \text{kötési-energia} = \Delta m_{AMU} \times 931 \text{ MeV} / \text{amu}$$

A fajlagos kötési energia: $E = mc^2$

Egy hasznosabb összefüggés: $\Delta E = \Delta mc^2$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2 \quad 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Példa: Határozza meg az ^{16}O kötési energiáját.

Az ^{16}O , a p és az n tömegei: ^{16}O 15,9949146 amu n 1,00866497 amu p 1,00782504 amu

^{16}O - 8 proton és 8 neutron

8n $8 \times 1,00866498 = 8,0693197$

8p $8 \times 1,00782504 = 8,0626032$

összesen 16,13192008

Az összes stabil izotópra kiszámítható a kötési energia.

Tömeg \Leftrightarrow Energia



Elektronvolt (eV)

Az az energiamennyiség, melyet az elektron akkor nyer, amikor 1 volt potenciálkülönbség hatására gyorsul:

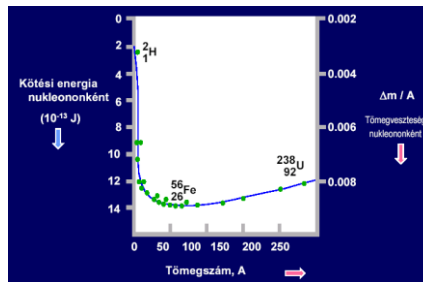
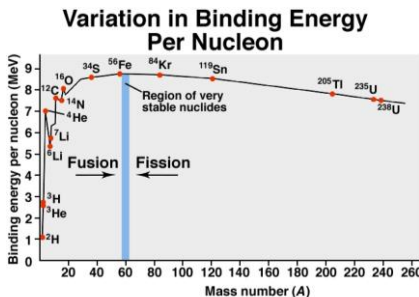
$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

A kötési energiát általában megaelektronvolt (MeV) egységben fejezzük ki:

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$$

Különösen hasznos egység a tömeghiány kifejezése atomi tömegegységben (atomic mass unit, amu):

$$1 \text{ amu} = 931.5 \times 10^6 \text{ eV} = 931.5 \text{ MeV}$$



Ahogy nő a nukleonok száma elérjük a vas környékén a kötési energia maximumát. A nagyobb tömegű magok kevésbé stabilak. Ezért egyaránt energia nyerhető a kis magok egyesüléséből fúziójából és a nagy magok hasadásából. Ezért jellemző az alfa-bomlás a nehéz magok esetén.

Így energia nyerhető kétféleképpen:

Maghasadással: atomok elhasadása--> ez történik a hasadási atomreaktorokban.

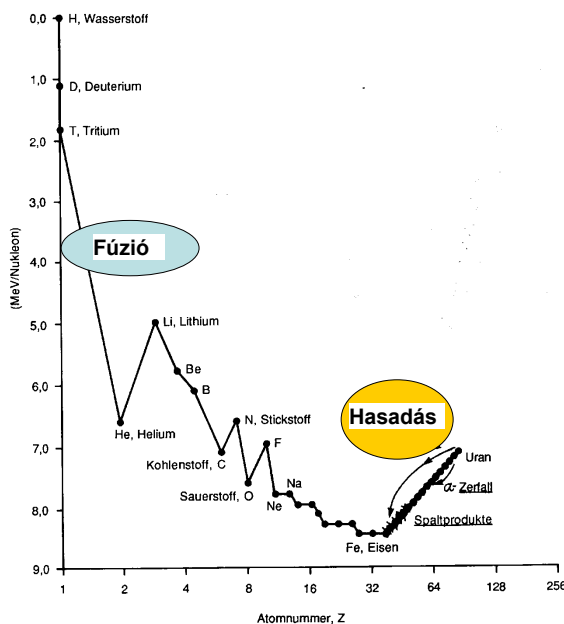
- energia nyerhető, ha nagy a mag
- minél kisebb a végtermék mag, annál stabilabb

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

13

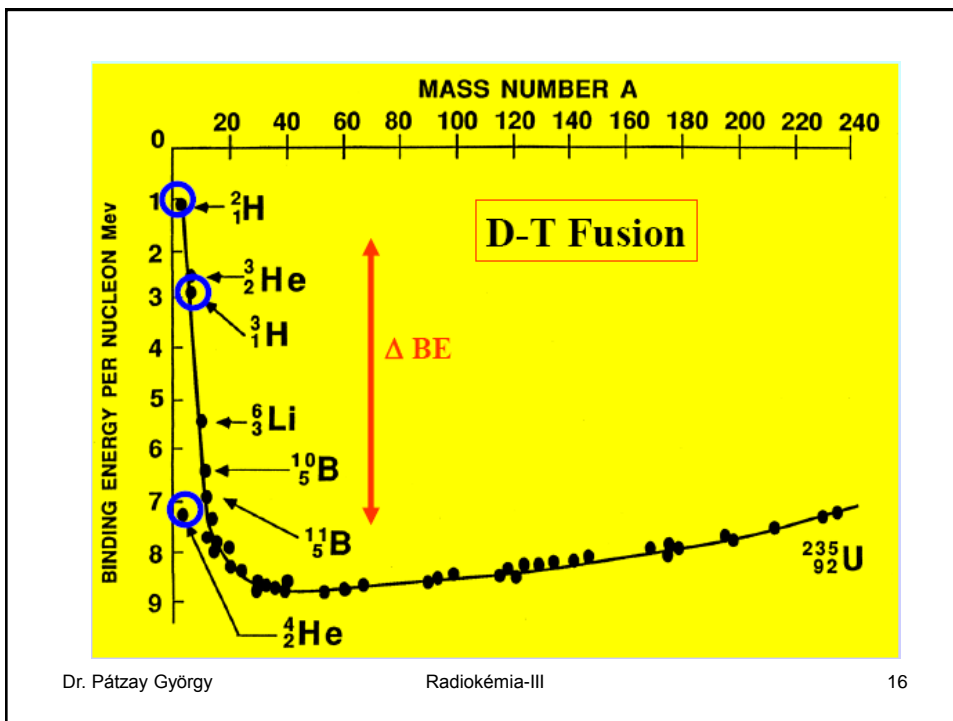
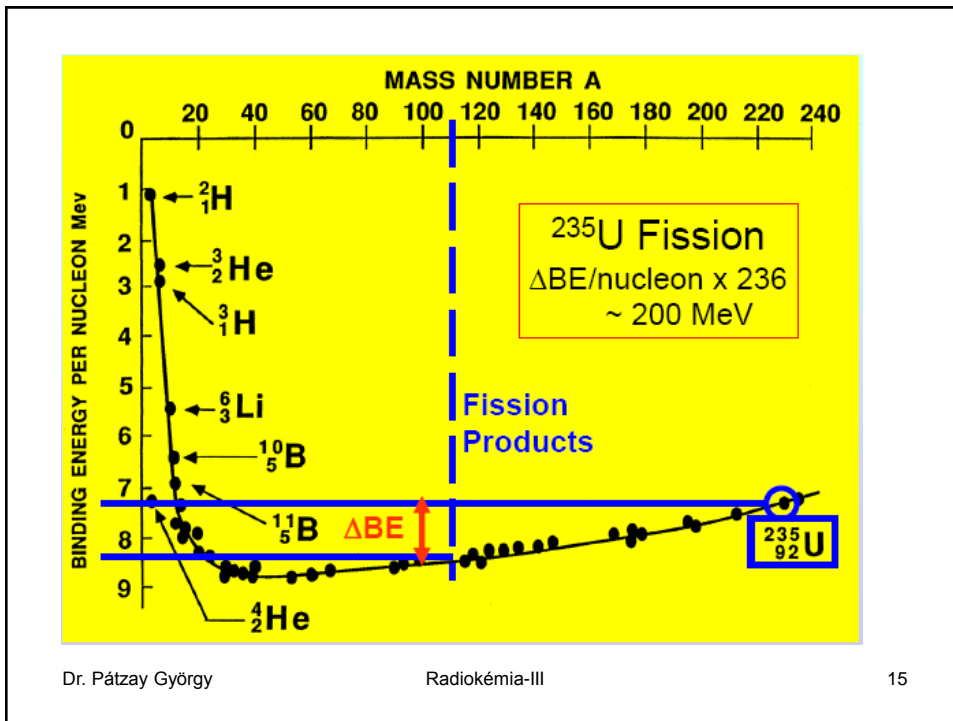
Fajlagos kötési energia



Dr. Pátzay György

14

Quelle: /Taube 1988 : Materie, Energie...; Hirzel Verlag; Abb. 6.14; p.235



A JÖVŐ ENERGIATERMELÉSE

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

17

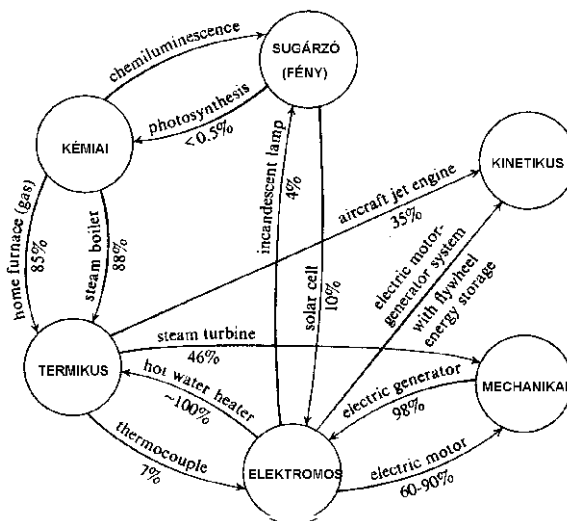
Szénkonverzió	Gáz, folyékony szénhidrogén, alkohol stb. előállítás szénből
Olajpala Csúcsüzemű gázturbina MHD	Petróleum-típusú tüzelőanyag előállítás olajpalából A forró füstgázok turbinát hajtanak a gőztermelés után Forró plazma mágneses elektromos erőterén áthaladva elektromos áramot gerjesztenek
Termoionos hatás	Termikus gradiens hatására elektromos áramot gerjesztenek
Tüzelőanyagcellák Napenergiás fűtés és hűtés	Kémiai energiát elektromos energiává alakítanak A napenergia közvetlen hasznosítása hűtésre és fűtésre napkollektorokkal
Napcellák	Szilícium félvezető cellákkal napfényből elektromos áramot állítanak elő
Napenergia termo-elektromos hasznosítása Szélenergia Óceánok termikus energiája	A napenergiát hővé, majd elektromos energiává alakítják át Szélenergiát elektromos energiává alakítják A tengervizek hőfokgradiensse alapján elektromos energiát állítanak elő
Maghasadásos reaktorok	Nehéz atommagok hasadásakor fellépő energiából elektromos energiát állítanak elő
Szaporító reaktorok	Maghasadás+a nem-hasadóképes nehéz atommagok átalakulása hasadóanyaggá
Magfúzió	Könnyű atommagok egyesülésekor felszabaduló energia átalakítása elektromos energiává
Hulladék-hő hasznosítás	Energiatermelő folyamatok hulladék-hőinek (60-70%) hasznosítása
Szilárd hulladékok Fotoszintézis	Energiatermelés hulladékok égetésével Növényekkel a napenergiát biomassza átmeneten keresztül egyéb energiává alakítanak
Hidrogén	Hidrogén termokémiai előállítás, mint energiaszállító közeg

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

18

ENERGIAFAJTÁK ÁTALAKÍTÁSI HATÁSFOKAI



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

19

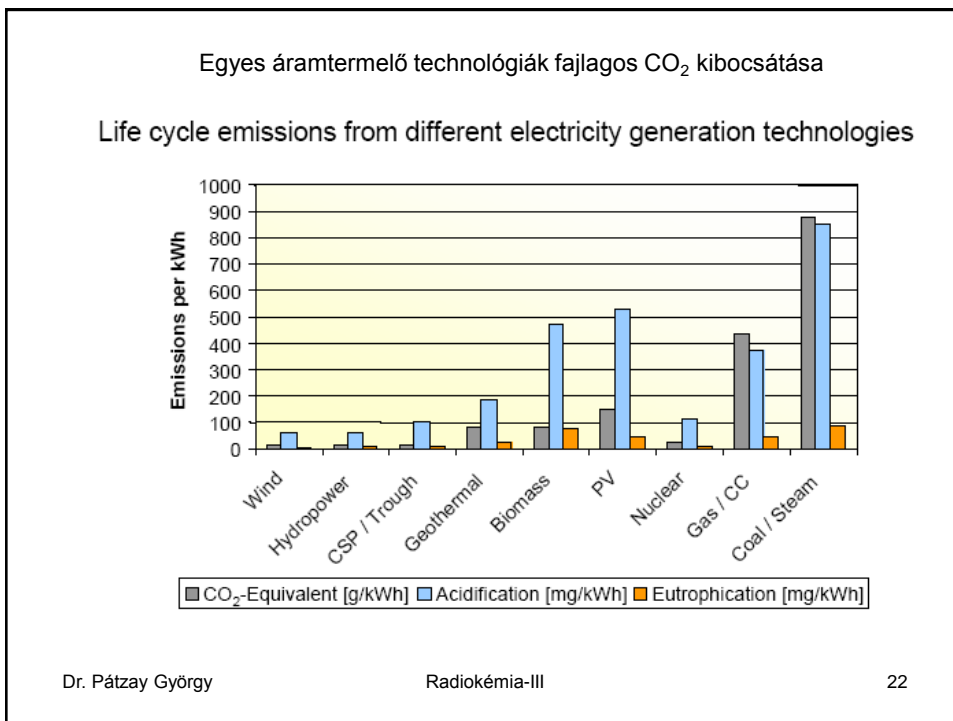
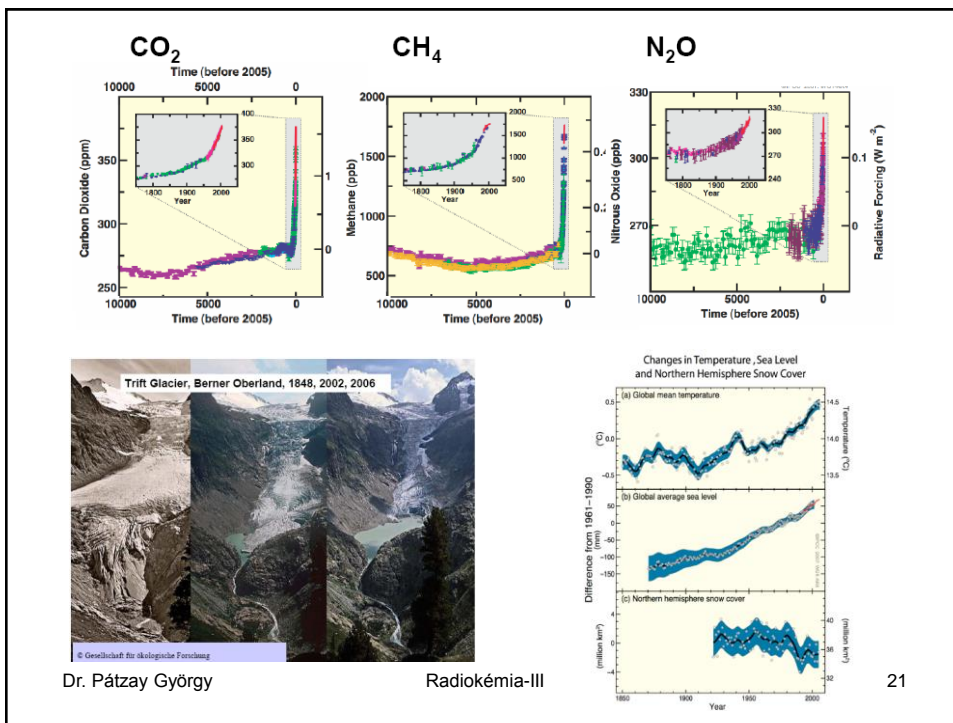
Erőműpark Magyarországon (2005)

Erőműtársaságok	Tulajdonos	Erőművek	Energiaforrás	Beépített villamos-teljesítmény (MW)
Bakonyi Erőmű Rt.	Magyar pénzügyi befektető	Ajkai Erőmű	Szén	102
		Bakonyi Bioenergia	Biomassza	30
Budapesti Erőmű Zrt.	EdF (francia)	Budapesti Erőmű Rt. négy telephely	Szénhidrogén	455,6
Dunamenti Erőmű Rt.*	Electrabel-Suez (belga) + MVM (25%)	Dunamenti Erőmű Rt.	Szénhidrogén	1367
		Dunamenti GT.	Szénhidrogén	386
EMA-Power	Dunaferri-csoport tulajdonosainak érdekelt-ségi köre (ukrán)		Szénhidrogén	69
Mátrai Erőmű Rt.*	RWE (német) + MVM (25%)		Lignit	836
GTER Kft.			Tüzelőolaj	410
Paksi Atomerőmű Rt.	MVM		Nukleáris	1866
Pannonpower Holding Rt.	Dalkia (francia)	Pannon Hőerőmű	Szén	132
		Pannon Green	Biomassza	50
Csepeli Áramtermelő Kft.	Atel (svájci)	Csepel GT	Szénhidrogén	396
AES Tisza Erőmű Rt.	AES-USA		Szénhidrogén	900
AES Borsodi Energetikai Rt.	AES-USA	Borsodi Erőmű	Szén+biomassza	137
		Tiszapalkonyai Erőmű	Szén+biomassza	200
Vértesi Erőmű Zrt.	MVM	Oroszlányi Erőmű	Szén	240
DKCE Kft.	E.ON (német)	Debreceni GT	Szénhidrogén	95
Tiszai Vízerőmű Kft.	ÁPV Zrt.	Kisköre	Víz	28
		Tiszalök	Víz	11,4
Hemédvizi Vízerőmű Kft.	ÁPV Zrt.		Víz	4,4
Engedélyköteles erőművek összesen				7647
Kiserőművek				953
Összesen				8600

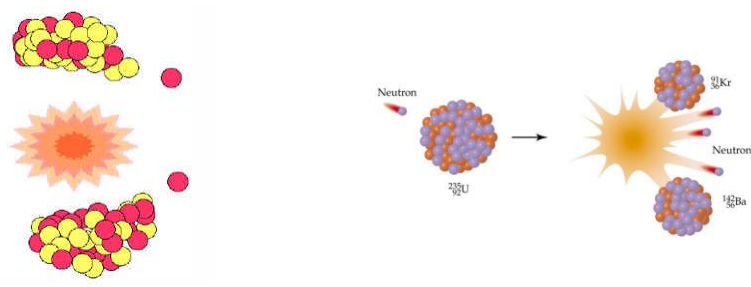
Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

20



A NUKLEÁRIS ENERGIATERMELÉS: I. MAGHASADÁS



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

23

Uranium Forms

Uranium Ore



Natural Uranium

U-234	Trace
U-235	0.71%
U-238	99.28%



Enriched Uranium

U-234	Trace
U-235	3% to >90%
U-238	<10% to 97%



Depleted Uranium

U-234	Trace
U-235	0.20%
U-238	99.8%

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

24

U²³⁸ 99%
U²³⁵ 0.711%
(U²³⁴)

Az U-235 neutronnal végzett besugárzásának lehetséges kimenetei

Az urán izotópjai

Az U-235 besugárzása neutronokkal

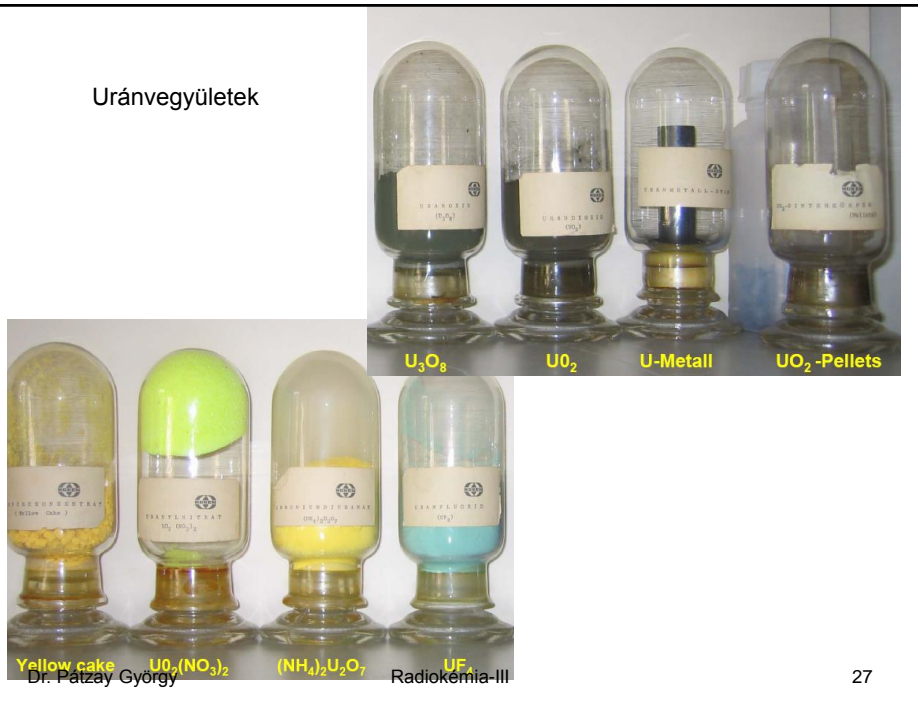
Dr. Pátzay György
Radiokémia-III
25

Urán tartalmú ásványok

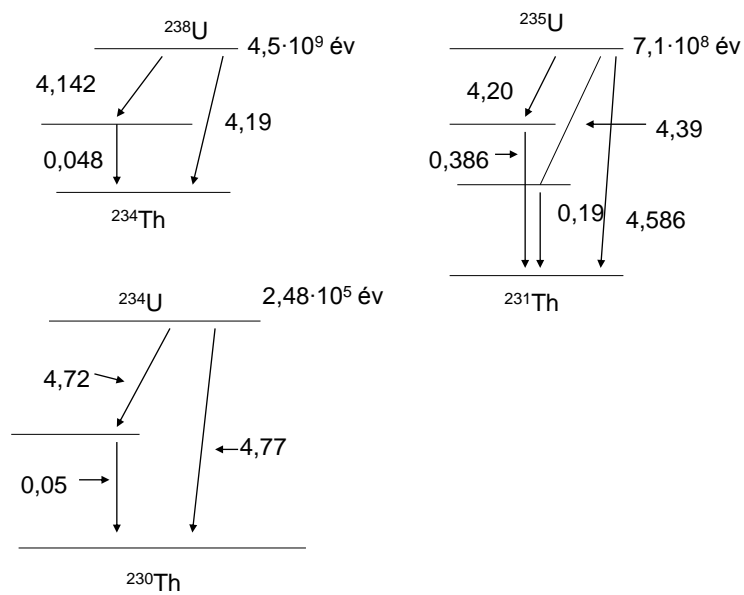
- 0.5% - 0.03%

Ásvány neve	Kémiai összetétel
Uraninit	UO ₂
Davidit	(Fe, Ce, La, Y, U, Ca, Zr, Th) (Ti, Fe, Cr, V) ₃ (O,OH)
Brannerit	(U,Ca,Fe,Th,Y)₃ Ti₅O₁₆
Carnotit	K ₂ (UO ₂) ₂ (VO ₄) ₂ · 2·3H ₂ O
Tyuyaminit	Ca (UO ₂) ₂ (VO ₄) ₂ · 5-8 H ₂ O
Autunit	Ca (UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂ · 10-12 H ₂ O
Torbernit	Cu (UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂ · 8-12 H ₂ O
Uranohane	Ca (UO ₂) ₂ SiO ₃ (OH) ₂ · 5H ₂ O

Uránvegyületek



27

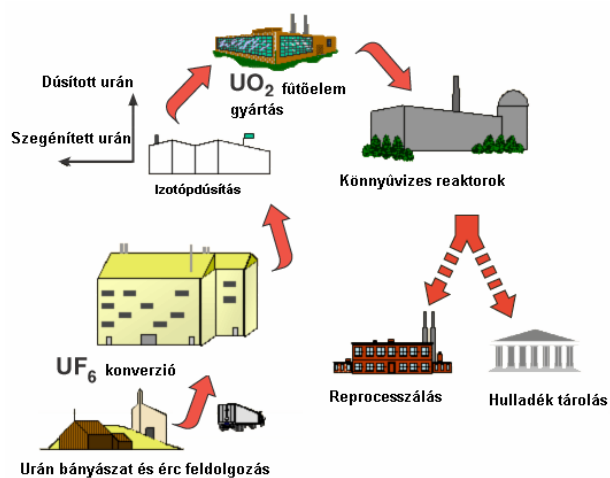
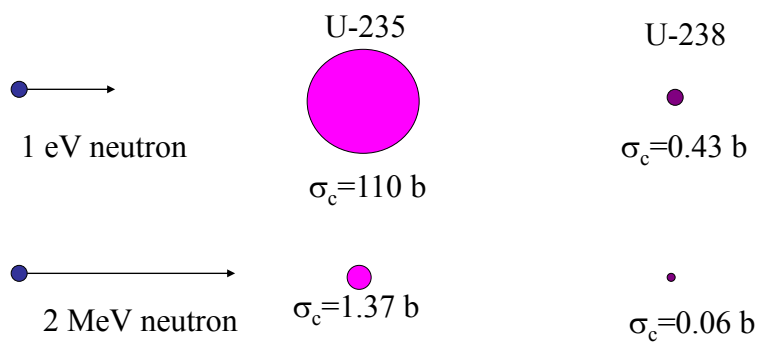


Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

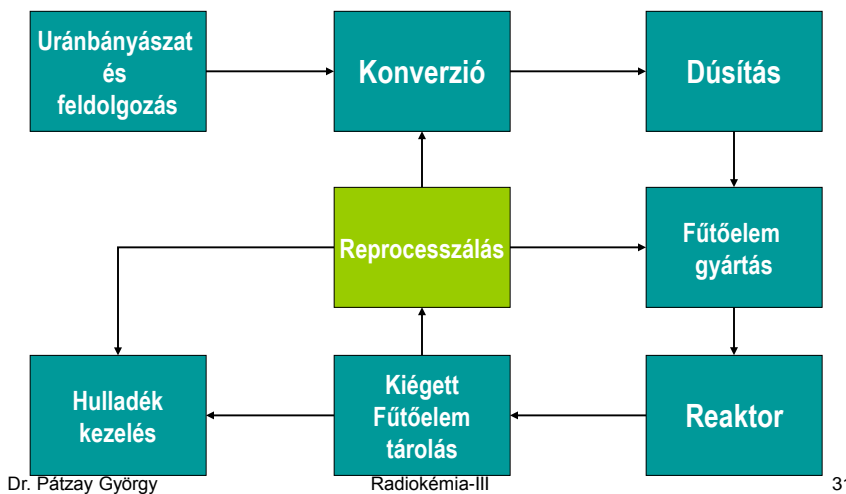
28

Tipikus hatáskeresztmetszetek

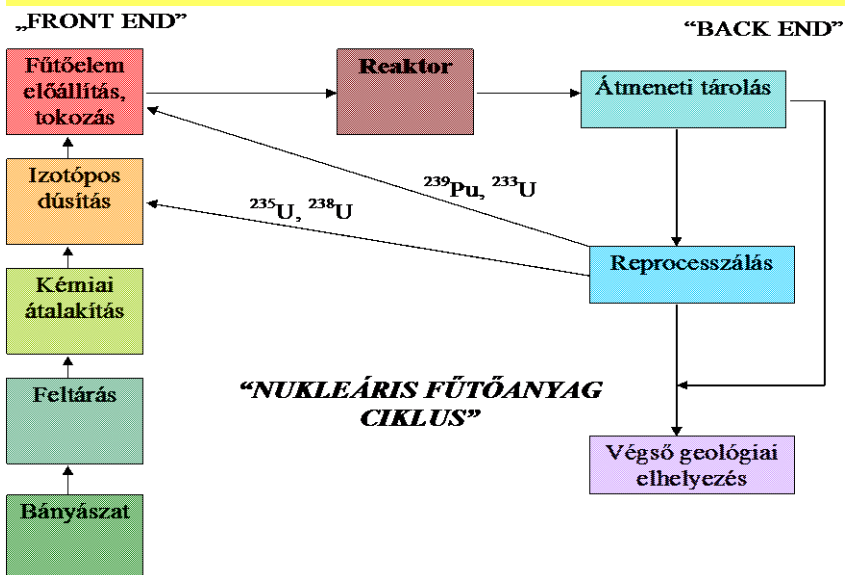


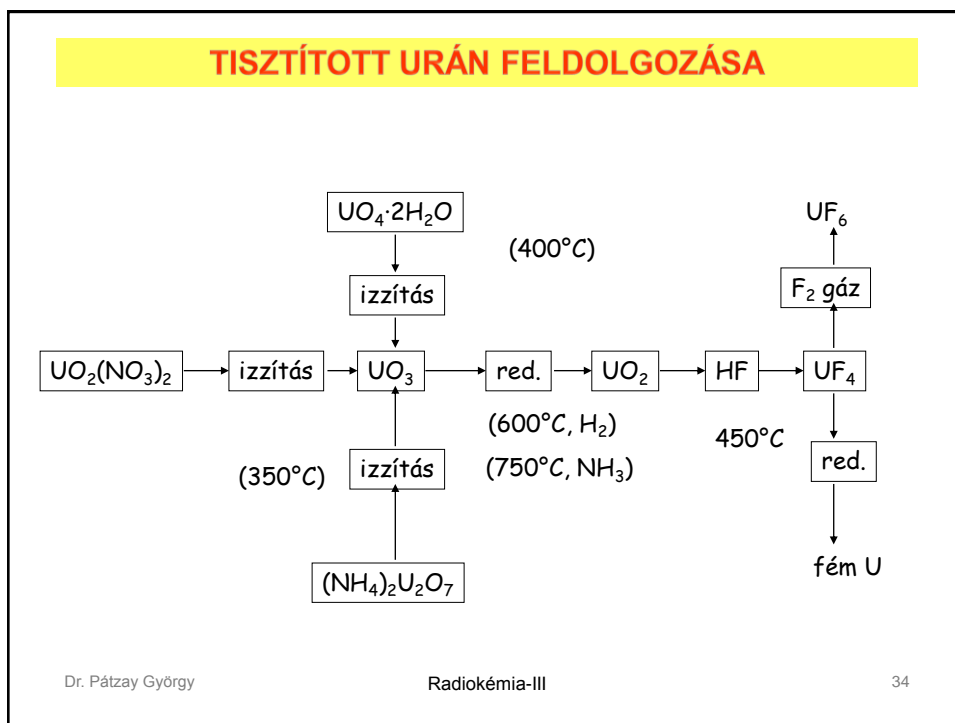
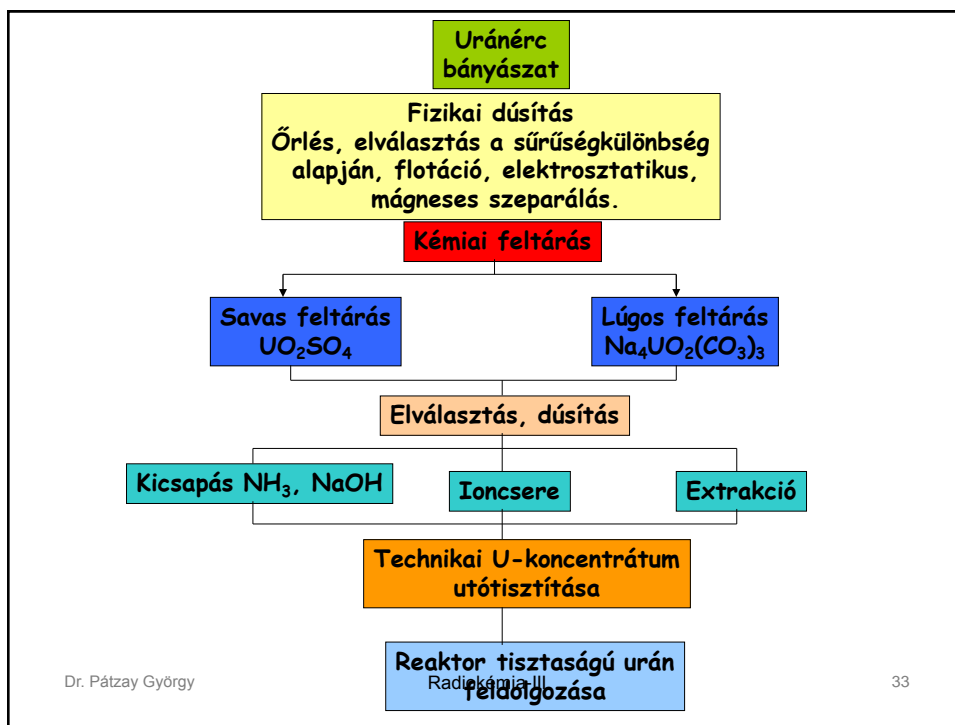
Egyszerűsített fűtőelemciklus

Nukleáris üzemanyagciklus

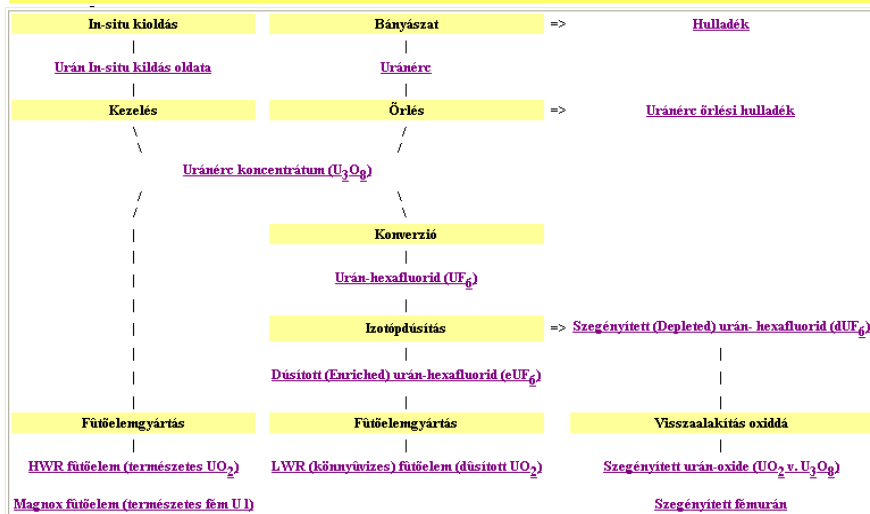


NUKLEÁRIS FŰTŐANYAGCIKLUS





A fűtőelemgyártás lehetséges technológiai lépései



A fűtőelemek általában UO_2 alapúak, de alkalmaznak fém urán és vegyes-oxid (UO_2/PuO_2) fűtőelemet is.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

35

A természetes urán izotópjai

	U-234	U-235	U-238
felezési idő	244,500 év	$703.8 \cdot 10^6$ év	$4.468 \cdot 10^9$ év
fajlagos aktivitás	231.3 MBq/g	80,011 Bq/g	12,445 Bq/g

A természetes urán Izotópösszetétele

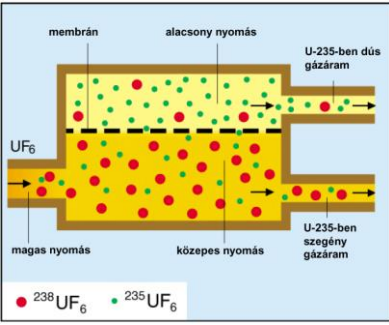
	U-234	U-235	U-238	Összesen
atom %	0.0054%	0.72%	99.275%	100%
tömeg %	0.0053%	0.711%	99.284%	100%
aktivitás %	48.9%	2.2%	48.9%	100%
1 g természetes U aktivitása	12,356 Bq	568 Bq	12,356 Bq	25,280 Bq

A tengervízben ~ 0.003 ppm, kőzetekben uránit (UO_2) és uránszurokérc (U_3O_8), vagy másodlagos ásványként (szilikátok, foszfátok, vanadátok formájában) fordul elő. Kanadában előfordul 20% U_3O_8 tartalmú érc is, általánosan 0,1-0,5%.


Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

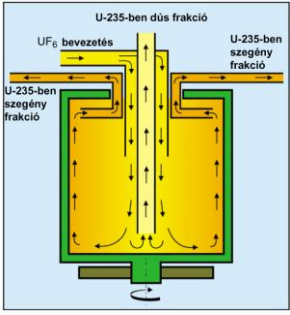
36



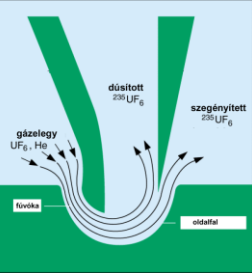
Diffúziós ²³⁵U dúsítás
Paducah Gaseous Diffusion Plant



Dr. Pátzay György



centrifugás ²³⁵U dúsítás



fűvókás ²³⁵U dúsítás
Radiokémia-III

37

urán

uránérc

Természetes urán

U-234	Trace
U-235	0.71%
U-238	99.28%

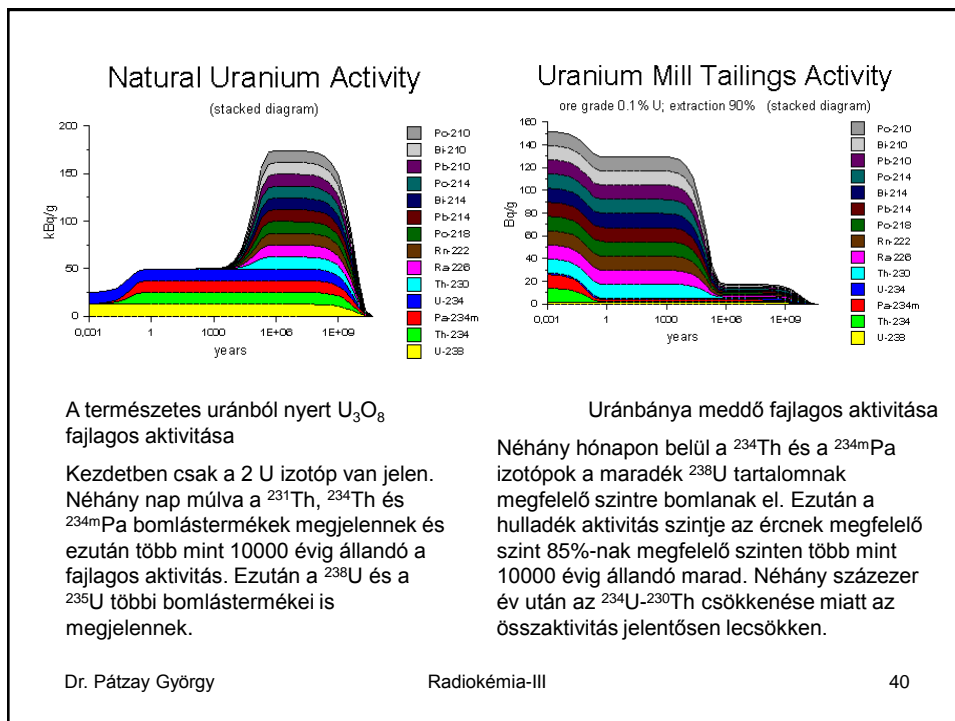
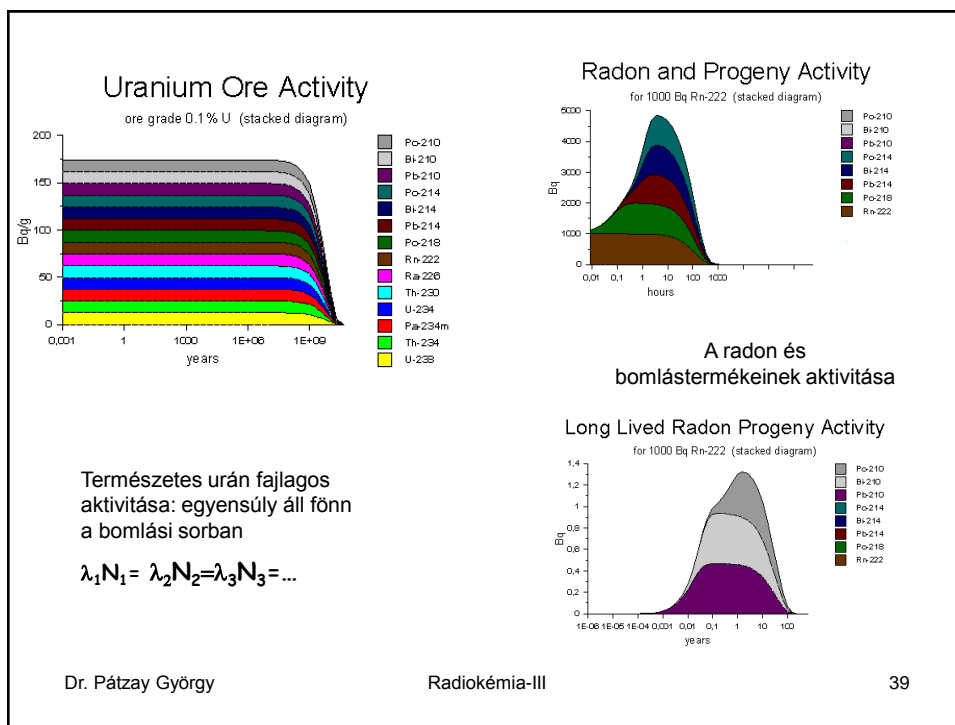
Dúsított urán
Enriched Uranium

U-234	Trace
U-235	3% to >90%
U-238	<10% to 97%

Kimerült urán
Depleted Uranium

U-234	Trace
U-235	0.20%
U-238	99.8%

Dr. Pátzay György Radiokémia-III 38



A kiegészített üzemanyag nehézfém összetétele (tömeg%)
(kezdésben 3,5%-ra dúsított 39 GWd/tHM kiegészítés után)

	U-232	U-233	U-234	U-235	U-236	U-237	U-238
a reaktorból történő kiemelés után	$6,59 \cdot 10^{-8}\%$	$1,58 \cdot 10^{-7}\%$	0,0175%	0,846%	0,472%	0,0013%	98,664%
5 év múlva	$1,88 \cdot 10^{-7}\%$	$2,59 \cdot 10^{-7}\%$	0,0184%	0,846%	0,472%	$4,83 \cdot 10^{-9}\%$	98,664%

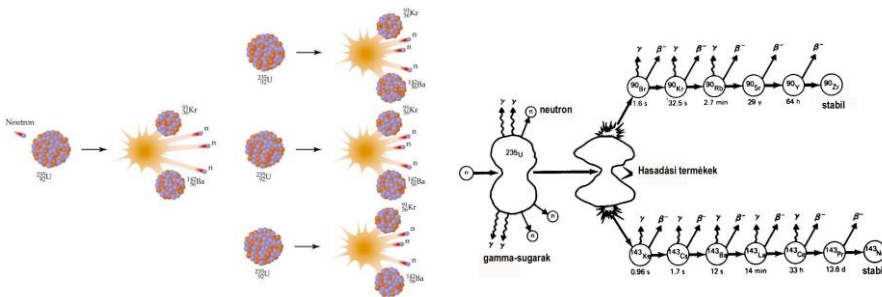
Természetes uránból 3,5%-ra dúsított dúsított uránhoz tartozó szegényített urán összetétele

	U-234	U-235	U-238	Összesen]
tömeg %	0,0008976%	0,2%	99,799%	100%
aktivitás %	14,2%	1,1%	84,7%	100%
1g szegényített U aktivitása	2,076 Bq	160 Bq	12,420 Bq	14,656 Bq

Természetes uránból 3,5%-ra dúsított dúsított urán összetétele

	U-234	U-235	U-238	Összesen]
tömeg %	0,02884%	3,5%	96,471%	100%
aktivitás %	81,8%	3,4%	14,7%	100%
1g dúsított U aktivitása	66,703 Bq	2,800 Bq	12,005 Bq	81,508 Bq

LÁNCREAKCIÓ



Kritikus reakció: amikor éppen elegendő hasadás történik ahhoz, hogy a láncreakció fennmaradjon. Ez a nukleáris energiatermelés alapja.

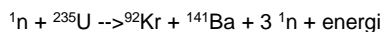
Szuperkritikus reakció: Amikor a láncreakcióban hasítóképes neutronfelesleg keletkezik és nő a hasadás sebessége. Ez történik az atombombákban.

KRITIKUS TÖMEG: a hasadóanyag legkisebb tömege, mely fenntartja a láncreakciót. Ez ^{235}U esetében 56 kg.

HASADÁSI ENERGIA

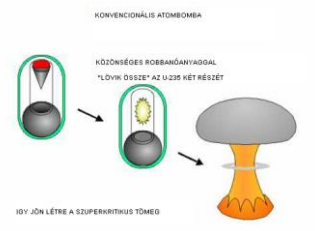
A hasadási reaktorok zömében jelenleg az ^{235}U az alkalmazott hasadóanyag.

Egy lehetséges hasadási reakció:

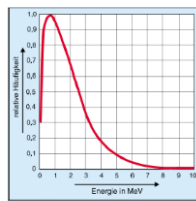
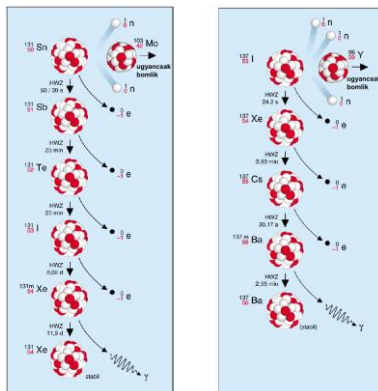


Egy urán atom elhasadásakor kb. 200 MeV energia szabadul föl. 100 g ^{235}U elhasadása

$80 \cdot 10^{12} \text{ J} = 1785$ tonna TNT energiájának megfelelő energiát képvisel.



Dr. Pátzay György

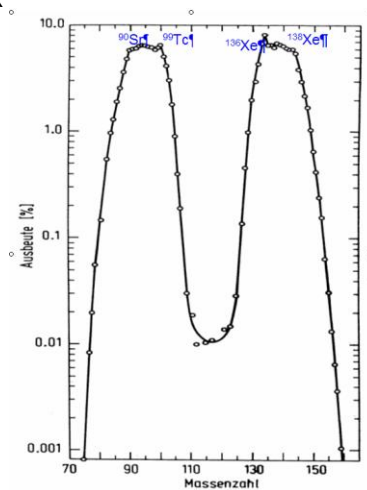
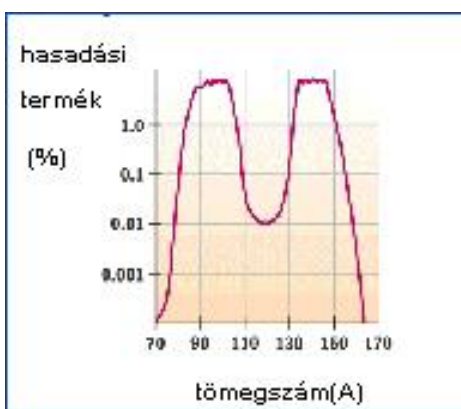


Energieverteilung der bei der Spaltung von U-235 entstehenden Neutronen

Radiokémia-III

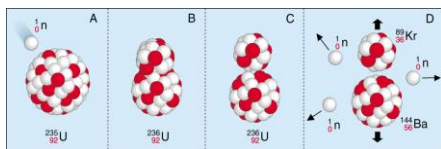
- 1 Mol U-235 (kb. 0,5 kg) 2×10^{10} kJ energiát termel, ami megfelel 800 tonna szén elégetésekor nyert energiának!

Több mint 370 hasadási termék, A=72 és A=161 között keletkezik az ^{235}U hasadása során.

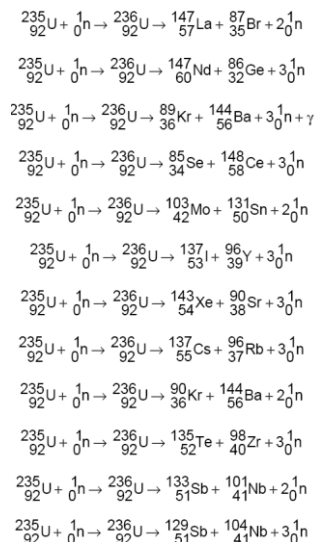


Dr. Pátzay György

Radiokémia-III



Hasadványok mozgási energiája	175 MeV
Neutronok mozgási energiája	5 MeV
Gamma-sugárzás energiája	7 MeV
Hasadványok béta-bomlásának energiája	7 MeV
Hasadványok gamma-bomlásának energiája	6 MeV
Neutrínók energiája	10 MeV
Összesen	210 MeV



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

45

Einstein összefüggés:

E energia (J)
 m tömeg (kg)
 c a fény sebessége $2,997925 \times 10^8$ m/s

$$E = m \cdot c^2$$

1kg tömeg megsemmisülése $8,99 \times 10^{16}$ J energiával egyenértékű. Ha a világ energia fogyasztása 1982-ben 6,3 milliárd t olajjal volt egyenértékű, ez megfelelt 3083 kg anyag megsemmisülési energiájának.

Nézzük ezt 1 molnyi ${}^{235}\text{U}$ hasadásának példáján:

A hasadásnál termikus neutronok hatására az urán elhasad például 1db ${}^{140}\text{Cs}$ és 1 db ${}^{92}\text{Rb}$ magra, valamint 4 db további neutronot szolgáltat.

${}^{235}\text{U}$ 235,043915 g

${}^{140}\text{Cs}$ 139,917110 g

${}^{92}\text{Rb}$ 91,9191400 g

neutronok 1,008664 g

A tömegek összege hasadás előtt:

$235,043915 + 1,008664 = 236,052579$ g

Ugyanaz hasadás után

$139,91711 + 91,91914 + 4 \times 1,008664 = 235,870906$ g

A különbség 0,181673 g (0,077%). Ez a tömeg-hiány az Einstein összefüggés alapján:

$$E = \frac{0,182 \cdot (2,998 \cdot 10^8)^2}{1000} = 1,636 \cdot 10^{14} \text{ J} = 163,6 \text{ TJ}$$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

46

Ez az energia 235,044 g tiszta ^{235}U hasadásakor keletkezik. Mivel a természetes urán kb. 0,72 % ^{235}U magot tartalmaz az elméletileg belőle nyerhető energia

$$163,06 \cdot 10^{12} \cdot 0,0072 / 235,044 = 501,09 \cdot 10^7 \text{ J/g} = 5010,9 \text{ MJ/g urán}$$

Tehát 1g természetes uránból mintegy 5011 MJ energia nyerhető.

1 tonna természetes urán ^{235}U tartalmát termikus reaktorban elhasítva kb. 20000 t szénnel egyenértékű, gyors, szaporító reaktorban a teljes uránmennyiséget elhasítva 3000000 t szénnel egyenértékű energia nyerhető. (Itt az ^{238}U is hasad, mert először ^{239}Pu maggá alakul és az elhasad termikus neutronok hatására).

$$1 \text{ kg } ^{235}\text{U} \quad 3 \cdot 10^6 \text{ kg szén} = 2,56 \cdot 10^{24} \text{ atom} \rightarrow 8,2 \cdot 10^7 \text{ MJ}$$

$$\text{fúzió D+T=He} \quad 1 \text{ kg He} \rightarrow 6,7 \cdot 10^8 \text{ MJ}$$

$$E_{\text{szén}} : E_{\text{U hasadás}} : E_{\text{H-fúzió}} = 1 : 3 \cdot 10^6 : 2 \cdot 10^7$$

$^{235}\text{U} + ^{238}\text{U} \rightarrow 50x$ több mint az összes fosszilis tüzelőanyag készlet, jelenlegi fogyasztás mellett 10000 évig elég

Kritikus tömegek: ^{235}U (94%) 25kg (r=15 cm)
 ^{239}Pu (99%) 8 kg (r=10 cm)

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

47

Ha 1 ^{235}U mag hasadásához $1,98 \cdot 10^8 \text{ eV}$ energiát rendelünk, 1 J energia termeléséhez ~33 milliárd ^{235}U magot kell elhasítani. 1 kg 0 °C-os víz 100 °C-ra melegítéséhez $4,2 \cdot 10^5 \text{ J}$ energia kell. Ehhez $4,2 \cdot 10^5 \times 3,10^{10} \text{ } ^{235}\text{U}$ maghasadás szükséges, ami ~5,5 µg.

Egy 10 millió lakosú európai ország villamos energia igényének a kielégítésére évente $6,7 \cdot 10^{10} \text{ kWh} = 2,412 \cdot 10^{17} \text{ Ws}$ energia szükséges. 34%-os erőművi hatásfokkal számolva $7,236 \cdot 10^{17} \text{ Ws} = 7,236 \cdot 10^{17} \text{ J} = 7,236 \cdot 10^{17} \cdot 6,242 \cdot 10^{18} = 4,517 \cdot 10^{36} \text{ eV}$. Ehhez szükséges:

$$n = \frac{4,517 \cdot 10^{36} \text{ eV}}{1,9 \cdot 10^8 \text{ eV}} = 2,377 \cdot 10^{28} \text{ db } ^{235}\text{U} \text{ atom}$$

$2,377 \cdot 10^{28} \text{ } ^{235}\text{U}$ atom = $3,96 \cdot 10^4 \text{ mol } ^{235}\text{U} = 9310 \text{ kg } ^{235}\text{U}$. 19 g/cm³ sűrűséggel számolva ez 0,49 m³ térfogatot jelent. Ha ezt az ^{235}U mennyiséget 3,0%-os dúsított urán fűtőelemre számoljuk, akkor a 10 millió ember 1 évi villamos energia ellátásához 310 t, 16 m³ 3,0%-os dúsítású urán fűtőelem szükséges.

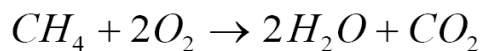
Ugyanennyi energiát ($7,236 \cdot 10^{17} \text{ J}$) 22,7 millió tonna kőszén ($3,18 \cdot 10^7 \text{ J/kg}$ fűtőérték) elégetésével kaphatunk, ami 2,5 milliószor nagyobb mint az urán tömege. Ennyi kőszén térfogata (1 kg/dm³ térfogatsúllyal számolva) 22,6 millió m³!!!

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

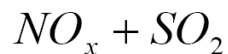
48

1000 MW fosszilis erőmű 1 évre:



1,300,000,000 kg
energiahordozó

2,300,000,000 kg

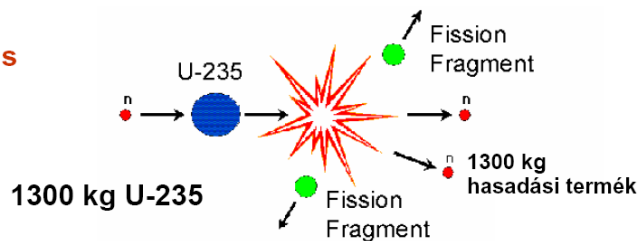


500,000 kg

500,000 kg

ezenkívül szilárd és folyékony
hulladékok (hamu, salak)

Nukleáris
energia

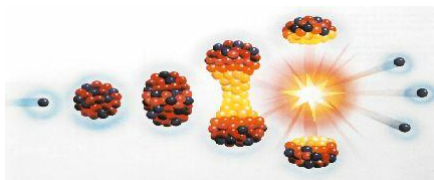


Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

49

Hasadóanyagok



Típusa

²³⁵U
²³³U
²³⁹Pu
²⁴¹Pu
²³⁸U
²³²Th
U_f (természetes)

Hasadást előidéző neutron

Termikus és gyors neutron
Termikus és gyors neutron
Termikus és gyors neutron
Termikus és gyors neutron
Gyors neutron
Gyors neutron
Termikus neutron

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

50

Isotope	Half-Life (years)	Primary Decay Mode	Spontaneous Fission Rate - SF (F/sec/kg)	Fission Cross Section - sigma (barns, fission spectrum avg)	SF Neutron Multiplicity - nu _{sf} (n/fission)	Fission Spectrum Neutron Multiplicity - nu _{f,3} (n/fission)	Critical Mass - M _c (kg)	Decay Heat - Q (W/kg)	Specific Activity (curies/kg)
Th-232	1,405 x 10 ¹⁰	Alfa 4.083 MeV	<5 x 10 ⁻⁵	0.0785	-	2.16	None	2,654 x 10 ⁻⁶	1.097 x 10 ⁻⁴
Pa-231	32,760	Alfa 5.149 MeV	<5	0.834	-	2,457	>188	1,442	47.23
U-232	68.9	Alfa 5.414 MeV	2 x 10 ⁻³	2,013	2	3,296	>5	717.6	22,360
U-233	159,200	Alfa 4.909 MeV	-	1,946	-	2,649	16	0.2804	9.636
U-234	245,500	Alfa 4.859 MeV	3.9	1,223	1.8	2,578	>41	0.1792	6.222
U-235	7,038 x 10 ⁸	Alfa 4.679 MeV	5.6 x 10 ⁻³	1,235	2.0	2,6055	48	5,994 x 10 ⁻⁵	2.161 x 10 ⁻³
U-236	2,342 x 10 ⁷	Alfa 4.572 MeV	2.30	0.594	1.8	2,526	>167	1,753 x 10 ⁻³	0.06467
U-238	4,468 x 10 ⁹	Alfa 4.270 MeV	5.51	0.308	1.97 ± 0.07	2,6010	None	8,508 x 10 ⁻⁶	3,361 x 10 ⁻⁴
Np-237	2,144 x 10 ⁶	Alfa 4.959 MeV	< 0.05	1,335	2	2,889	75-105	0.02068	0.7034
Pu-238	87.7	Alfa 5.593 MeV	1,204 x 10 ⁶	1,994	2.28 ± 0.10	3,148	9	5,678 x 10 ⁵	17,120
Pu-239	24,110	Alfa 5.245 MeV	10.1	1,800	2.9	3,1231	10.5	1,929	62.03
Pu-240	65,640	Alfa 5.256 MeV	478,000	1,357	2.189 ± 0.026	3,061	40	7.07	227
Pu-241	14.35	Beta 0.021 MeV	<0.8	1,648	-	3,142	12	129.4	1,033 x 10 ⁵
Pu-242	373,300	Alfa 4.984 MeV	805,000	1,127	2.28 ± 0.13	3,070	95, range 75-100	0.1169	3,956
Am-241	432.2	Alfa 5.638 MeV	500	1,378	2	3,457	83.5	114.7	3,431
Cf-251	898	Alfa 6.176 MeV	-	2,430	-	4,560	1.94	58.05	1,586

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

51

HASADÓANYAGOK

Izotóp	Felezési idő (év)	Bomlás módja energia (MeV)	Spontán hasadás (SH) sebessége (db/sec/kg)	Hasadási hatás-kereszt-metszet (barn)	SH neutron sokszorozás (n/hasadás)	Indukált hasadás neutron sokszorozás (n/hasadás)	Kritikus tömeg (M _c) (kg)	Bomláshő Q (W/kg)	Fajlagos aktivitás (Bq/kg)
²³² Th	1,405 × 10 ¹⁰	Alfa 4,083	<5 × 10 ⁻⁵	0,0785	-	2,16	nincs	2,654 × 10 ⁻⁶	4,1 × 10 ⁶
²³¹ Pa	32,760	Alfa 5,149	<5	0,834	-	2,457	>188	1,442	1,67 × 10 ¹²
²³² U	68,9	Alfa 5,414	2 × 10 ⁻³	2,013	2	3,296	>5	717,6	8,1 × 10 ¹⁴
²³³ U	159,200	Alfa 4,909	-	1,946	-	2,649	16	0,2804	3,6 × 10 ¹¹
²³⁴ U	245,500	Alfa 4,859	3,9	1,223	1,8	2,578	>41	0,1792	2,3 × 10 ¹¹
²³⁵ U	7,038 × 10 ⁸	Alfa 4,679	5,6 × 10 ⁻³	1,235	2,0	2,6055	48	5,994 × 10 ⁻⁵	8,0 × 10 ⁷
²³⁶ U	2,342 × 10 ⁷	Alfa 4,572	2,30	0,594	1,8	2,526	>167	1,753 × 10 ⁻³	2,4 × 10 ⁹
²³⁸ U	4,468 × 10 ⁹	Alfa 4,270	5,51	0,308	1,97 ± 0,07	2,6010	nincs	8,508 × 10 ⁻⁶	31,2 × 10 ⁷
²³⁷ Np	2,144 × 10 ⁶	Alfa 4,959	< 0,05	1,335	2	2,889	75-105	0,02068	2,6 × 10 ¹⁰
²³⁸ Pu	87,7	Alfa 5,593	1,204 × 10 ⁶	1,994	2,28 ± 0,10	3,148	9	5,678 × 10 ⁵	6,3 × 10 ¹⁴
²³⁹ Pu	24,110	Alfa 5,245	10,1	1,800	2,9	3,1231	10,5	1,929	2,3 × 10 ¹²
²⁴⁰ Pu	65,640	Alfa 5,256	478,000	1,357	2,189 ± 0,026	3,061	40	7,07	8,4 × 10 ¹²
²⁴¹ Pu	14,35	Béta 0,021	<0,8	1,648	-	3,142	12	129,4	3,8 × 10 ¹⁵
²⁴² Pu	373,300	Alfa 4,984	805,000	1,127	2,28 ± 0,13	3,070	95, (75-100)	0,1169	1,5 × 10 ¹¹
²⁴⁰ Am	432,2	Alfa 5,638	500	1,378	2	3,457	83,5	114,7	9,5 × 10 ¹⁸
²⁵⁰ Cf	898	Alfa 6,176	-	2,430	-	4,560	1,94	58,05	5,9 × 10 ¹³

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

52

Radionuklid	Legkisebb kritikus tömeg gömbalak esetén			
	a fémre (gyors, nem-moderált rendszerek)		vízzel reflektált optimálisan moderált rendszerek	
	nem-reflektált	vízzel reflektált	nem-reflektált	vízzel reflektált
U-233	16,5 kg	7,3 kg	1,2 kg	0,59 kg
U-235	49,0 kg	22,8 kg	1,5 kg	0,82 kg
Pu-239	10,0 kg	5,42 kg	0,905 kg	0,53 kg
Pu-240	158,7 kg	148,4 kg		
Pu-241		6,0 kg		0,26 kg
Am-242				0,02 kg
Cf-251				0,01 kg

Egyes hasadóanyagok kritikus tömegei

Isotope	Critical Mass (kg)	Half Life (years)	Decay Heat (watts/kg)	Neutron Generation (neutrons/g-sec)
U-233	15	160,000	0.3	0.0009
U-235	50	700,000,000	0.0001	0.0003
Pu-238	10	88	560	2600
Pu-239	10	24,000	1.9	0.02
Pu-240	40	6,600	6.8	900
Pu-241	13	14	4.2	0.05
Pu-242	89	380,000	0.1	1700
Pa-231	162	32,800	1.3	0
Np-237	59	2.1×10^6	0.021	.000139
Am-241	57	430	110	1.2
Am-243	155	7,360	6.4	.9
Cm-245	13	8,500	5.7	147
Cm-246	84	4,700	10	9×10^6
Bk-247	10	1,400	36	0
Cf-251	9	898	56	0

Urán készletek költség szerinti megoszlása:

- <\$130/kg
 - » = 1.7×10^6 tonna (U.S)
 - » = 5.4×10^6 tonnas (többi ország)
- \$130/kg < \$260/kg
 - » 1.3×10^6 tonna (U.S)
 - » = 12.2×10^6 tonna (többi ország)

Neutron energia eV	100 000	100	0,1	0,025
Sebesség m/s	$4,4 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^5$	$4,4 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$

Mag	²³² Th	²³³ U	²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁸ U	²³⁷ Np	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu
Átmeneti mag	²³³ Th	²³⁴ Th	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁷ U	²³⁹ U	²³⁸ Np	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu
Neutron energia (MeV)	1,3	Term.	0,4	Term.	0,8	1,2	0,4	Term.	>0

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

55

NEUTRONOK CSOPORTOSÍTÁSA

Lassú

Hideg $E_n < 0,025 \text{ eV}$

Termikus $E_n = 0,025 \text{ eV}$ $\bar{V} = 2,19 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ (290°K)

Epitermikus $E_n < 10 \text{ eV}$

Rezonancia $E_n = 1-100 \text{ eV}$ $\bar{V}_{\max} = 1,38 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ ($1,16 \cdot 10^6 \text{ °K}$)

Közepes energiájú $E_n = 100 \text{ eV} - 10 \text{ keV}$

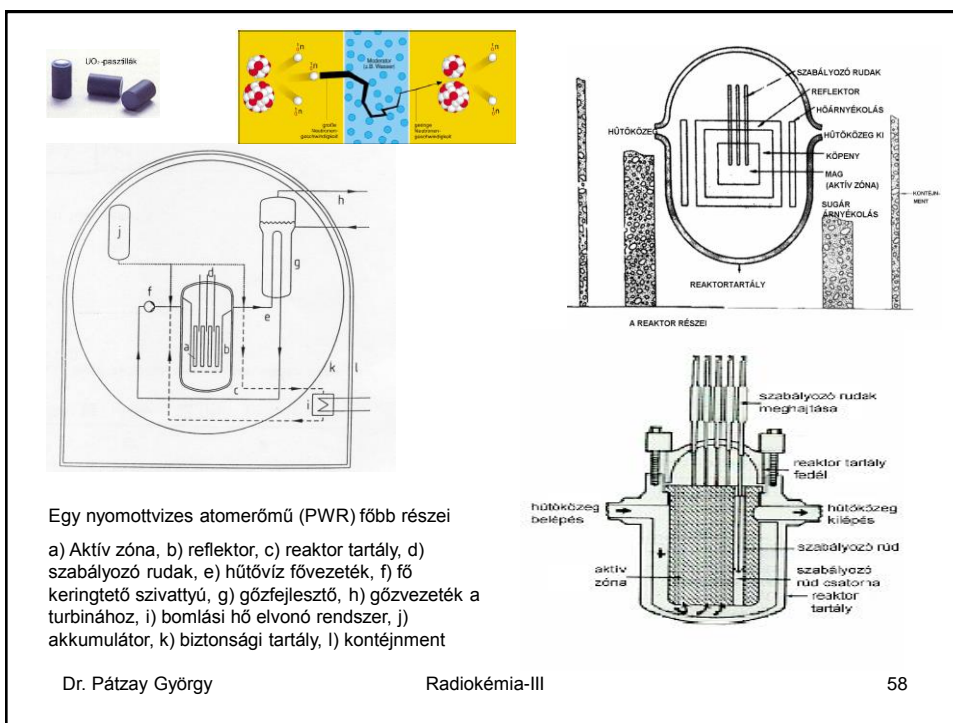
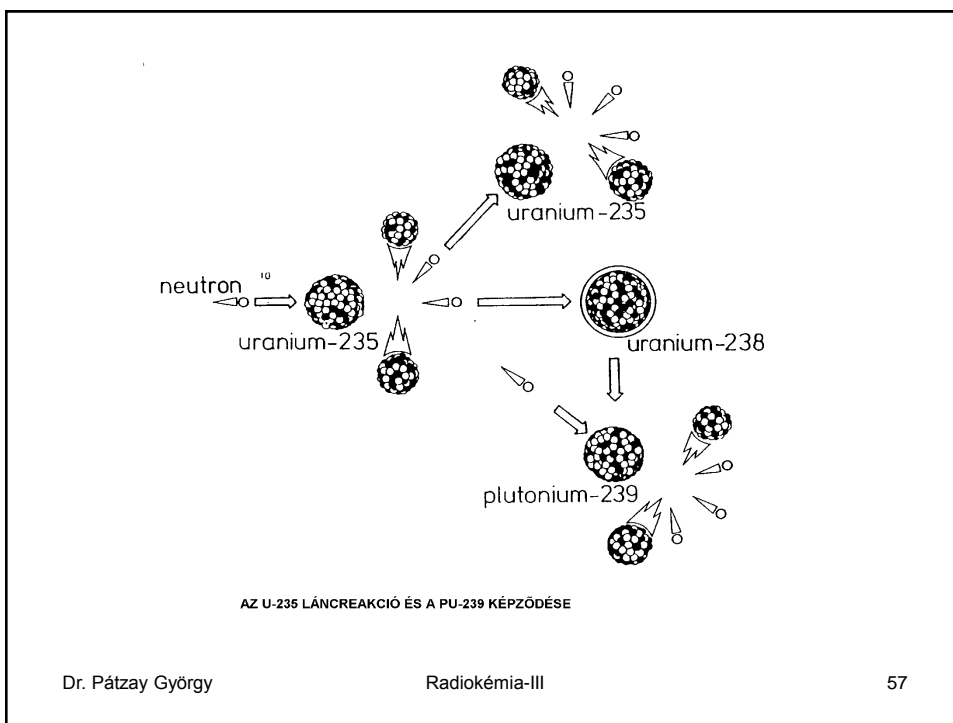
Gyorsneutron $E_n = 10 \text{ keV} - 1 \text{ MeV}$
 $\bar{V}_{\max} = 1,38 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ ($1,16 \cdot 10^{10} \text{ °K}$)

Nagy energiájú $E_n = 1-100 \text{ MeV}$
 $\bar{V}_{\max} = 1,28 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ ($1,16 \cdot 10^{12} \text{ °K}$)

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

56



Neutron moderátor anyagok jellemzői

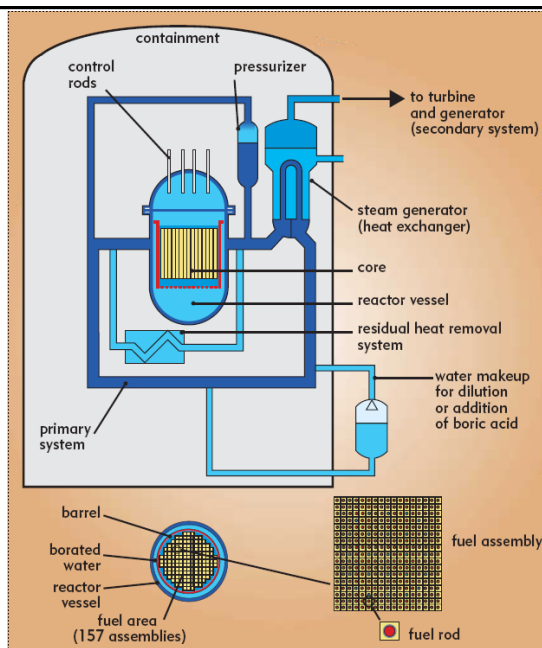
anyag	ξ	Ütközések száma	Makroszkópikus lassító erő	Moderálási arány
H ₂ O	0,927	19	1,425	62
D ₂ O	0,510	35	0,177	4830
Hélium	0,427	42	9.10 ⁻⁵	51
Berillium	0,207	86	0,154	126
Bór	0,171	105	0,092	0,00086
Szén	0,158	114	0,083	216

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

59

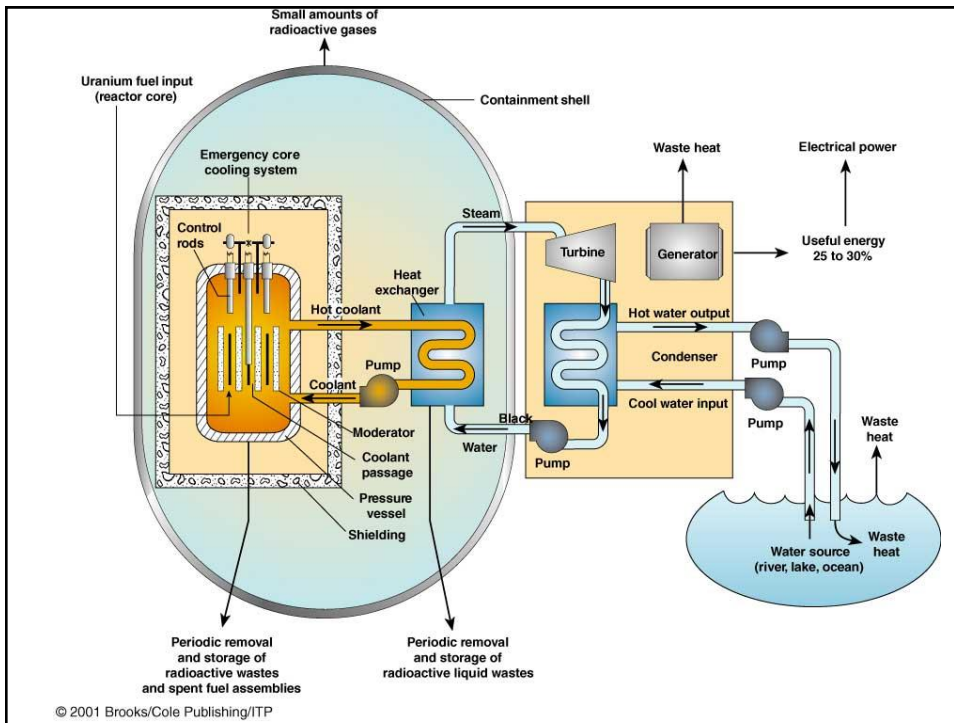
PWR reaktor részei



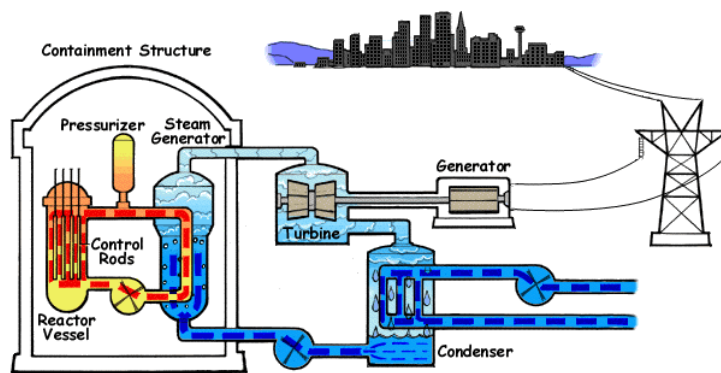
Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

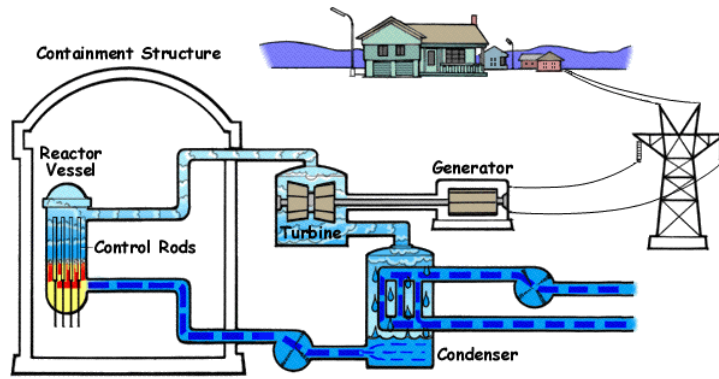
60



The Pressurized Water Reactor (PWR) Animated



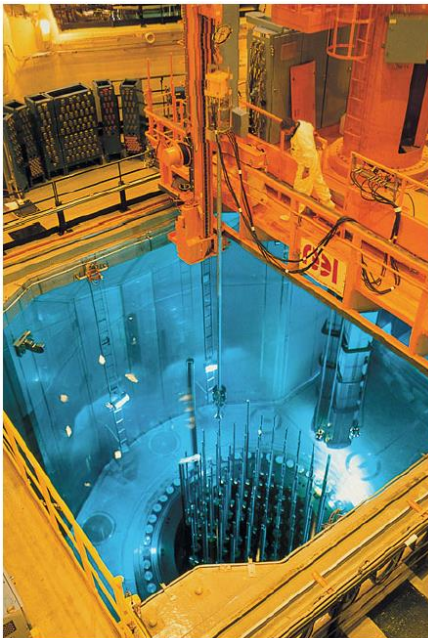
The Boiling Water Reactor (BWR) Animated



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

63

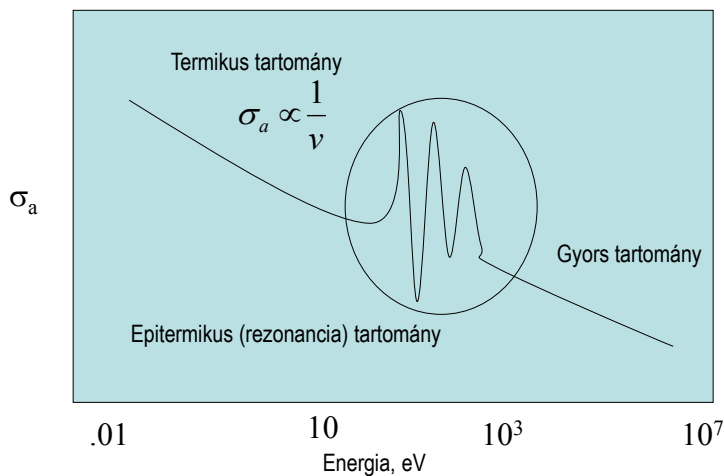


Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

64

Tipikus hatáskeresztmetszet-energia összefüggés



Dr. Pátzay György

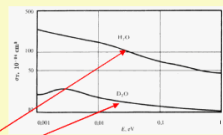
Radiokémia-III

65

Vergleich zwischen H₂O, D₂O und C-F

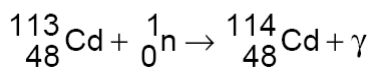
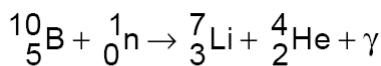
• Einfangwirkungsquerschnitt für thermische Neutronen:

- Abschätzung:
- H₂O: 100*10⁻²⁴ cm²
- D₂O: 20*10⁻²⁴ cm²
- C: 5*10⁻²⁴ cm²



26.03.2002

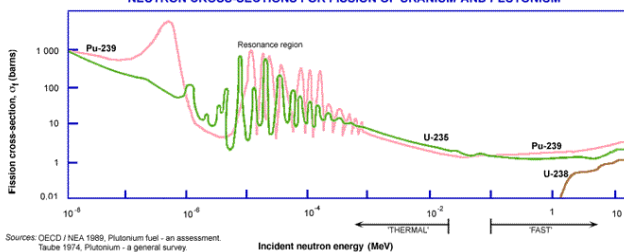
Kern- und Exist



Szabályozó rudak anyagának reakciói

Termikus neutronok befogási hatáskeresztmetszete

NEUTRON CROSS-SECTIONS FOR FISSION OF URANIUM AND PLUTONIUM

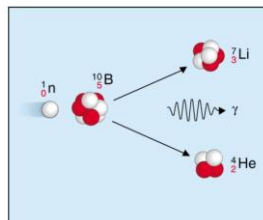


Sources: OECD/NEA 1989, Plutonium fuel - an assessment.
 Table 1074, Plutonium - a general survey
 1 barn = 10⁻²⁸m², 1 MeV = 1.6 × 10¹³J

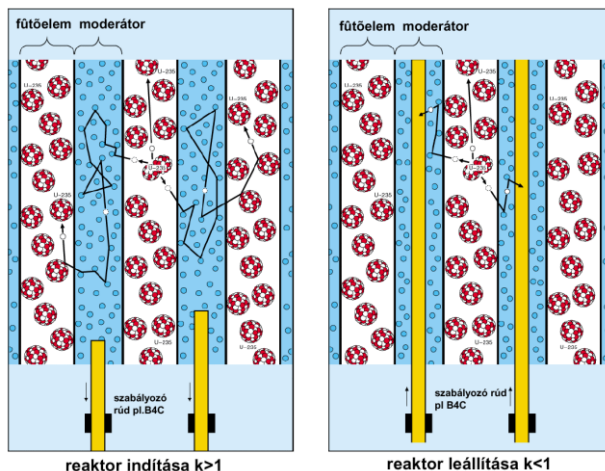
Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

66



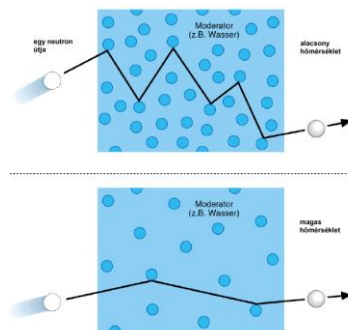
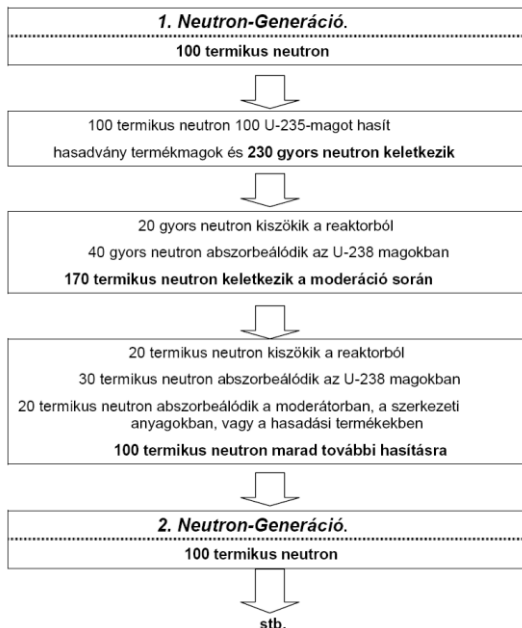
„k-faktor” $k - faktor = \frac{a \text{ neutronok száma az } i - k \text{ neutron generációban}}{a \text{ neutronok száma az } (i - 1) - ik \text{ neutron generációban}}$



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

67

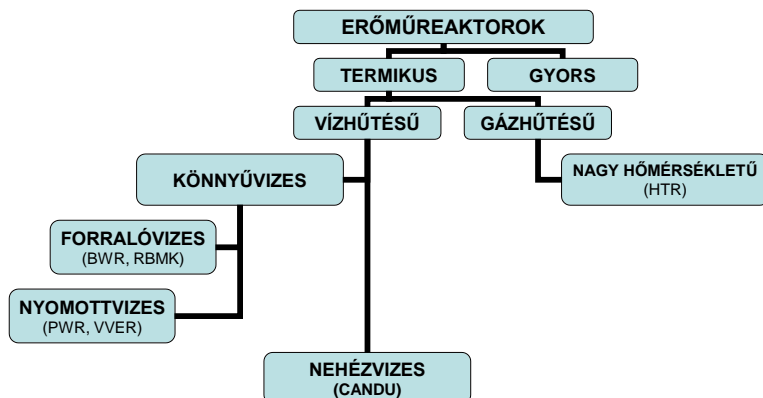


A vizes moderátor hőmérséklet függő, magasabb hőfokon kisebb a neutron lassítás, csökken a hasított magok száma

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

68

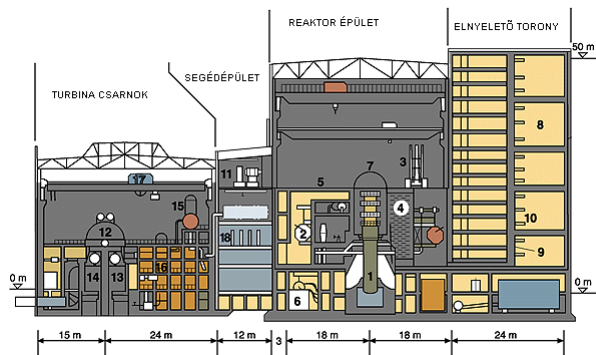


Paksi atomerőmű 4 db 440 MW_e VVER-440/213, 1 fűtőelem l=2,4 m, 99%Zr 1%Nb
1 kötegben 126 db fűtőelemrúd van, az aktív zónában 312 db köteg (42 t UO₂ 3,5% ²³⁵U)

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

69

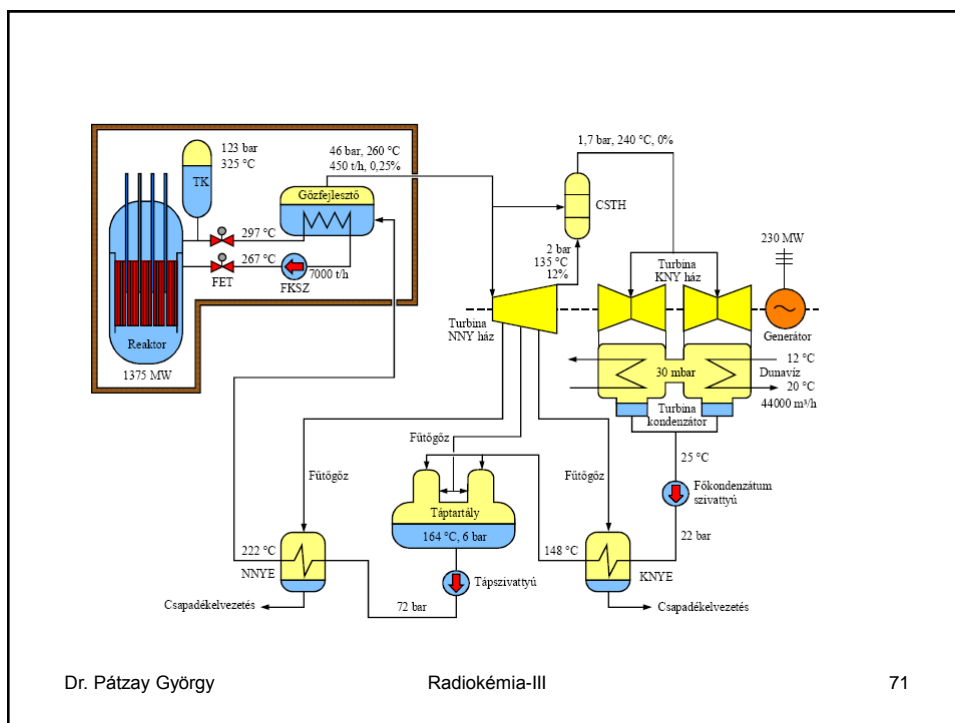


1 Reaktor tartály 2 gőzfejlesztő 3 fűtőelem töltő 4 kiegészítő fűtőelem tároló medence
5 elnyelető torony 6 tápvíz előkezelés 7 védőburkolat 8 elnyelető torony
9 permetező rendszer 10 ellenőrző csatorna 11 levegő beszívás 12 tubina
13 kondenzátor 14 turbina blokk 15 tápvíz tartály 16 előhevítő 17 turbina csarnok
18 elektromos berendezések, vezérlések

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

70



VVER- 440/213 reaktor aktív zónájának reaktorfizikai és hőtechnikai jellemzőit a következőkben foglaljuk össze:

Zóna egyenértékű átmérője	2880 mm
Zóna magassága	2500 mm
Üzemanyagkötegek száma	312
Szabályozó (+üzemanyag) kötegek száma	37
A kötegek kulcsmérete	144 mm
Üzemanyagrudak száma kötegenként	126
UO ₂ pasztillák átmérője	7,6mm
Zr burkolat külső átmérője	9,1mm
Zr burkolat vastagsága	0,65mm
Az üzemanyag rácsosztása	12,2mm
Moderátor/üzemanyag térfogatarány	1,7
Teljes urántöltet mennyisége	42 t
Urántöltet átlagos dúsítása	2,5%
Friss urán mennyisége	14 t
Friss urán dúsítása	3,6%
Kiégési szint	28600 MWnap/t
Kiégési ciklus időtartama	7000 h
Hőteljesítmény	1375 MW
Hűtőközeg nyomása	125 bar
Hűtőközegáram	43000 t/h
Hűtőközeg belépő hőmérséklete	267 ° C
Hűtőközeg átlagos kilépő hőmérséklete	295 ° C
Aktív zóna átlagos fajlagos térfogati hőteljesítménye	84,5W/cm3

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

72

Main parameters

Reactor Type VVER 440 V 213 Diameter (mm) 3560 Height (mm) 23,960 Weight (t) 215 Thermal capacity (MW) 1,375

Core Diameter (mm) 2,880 Height (mm) 2,500 Number of Fuel Assemblies 312 Number of Control Assemblies 37 Core Loading (t) 42 Fuel Enrichment (% U235) 1.6/2.4/3.6 Average Burnup (MWd/kg) 32.0

Fuel Assembly Configuration hexagonal Wrench Size (mm) 144 Height (mm) 3,217 Number of Fuel Elements 126

Fuel Element Diameter (mm) 9.1 Height (mm) 2,500

Coolant Water Parameters Coolant Temperature at Inlet (°C) 267 Coolant Temperature at Outlet (°C) 297 Coolant Pressure MPa 12.25 Coolant Flow - Rate Through Reactor (m³/s) 10.8 Water Volume in Primary Circuit (m³) 209

Steam generator Number of SG per Unit 6 Length (mm) 11,800 Diameter (mm) 3,210 Weight (t) 145 Steam Production (t/h) 452 Pressure of Generated Steam (MPa) 4.61 Steam Temperature (°C) 260 Feedwater Temperature (°C) 223 Number of Heat Exchange Tubes 5,546 Diameter of Tubes (mm) 16 Heat Exchange Surface (m²) 2,510

Primary Coolant Pump Power Input (MW) 1.4 Voltage (kV) 6 Speed (rev/min) 1,500 Pump Capacity (m³/s) 1.98 **Pressurizer** Total Volume (m³) 44 Water Volume (m³) 26 Power Input of Heaters (MW) 1.7 Height (mm) 12,000 Diameter (mm) 2,700

Turbine Speed (rev/min) 3,000 Admission Steam Temperature HPP (°C) 256 Admission Steam Pressure (MPa) 4.3 Steam Temperature LPP (°C) 216.5 Steam Pressure LPP (MPa) 0.37

Generator Rated Power (MW) 220 Output Voltage (kV) 15.75 Cooling water/hydrogen

Condenser Cooling Water flow-rate (m³/h) 35,000 Max. Temperature of Cooling Water (°C) 33 Number of Heat Exchange Tubes 29,840 Heat Exchange Surface (m²) 19,300

Feedwater Pump Number of FW Pumps per Unit 5 Feedwater Temperature (°C) 164 Power Input (MW) 1.81 Pump Capacity (t/h) 680 Input Pressure (MPa) 0.84 Output Pressure (MPa) 6.60

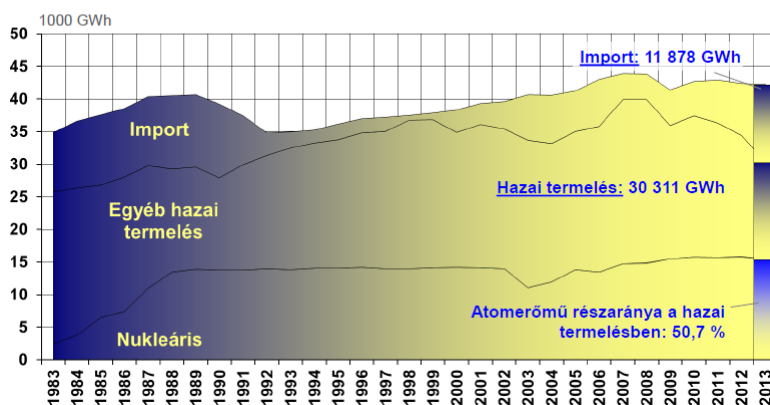
Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

73



Magyarországi villamosenergia-termelés



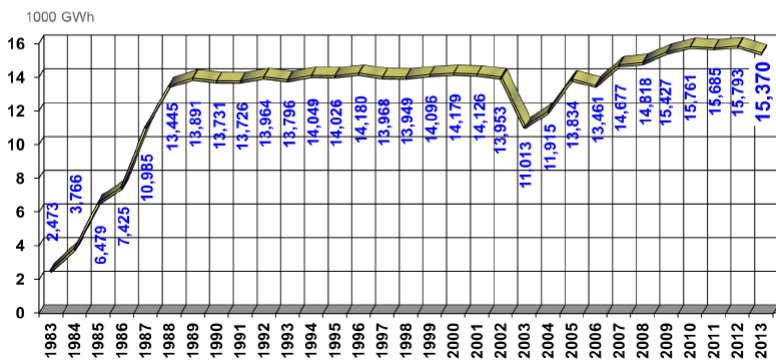
Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

74



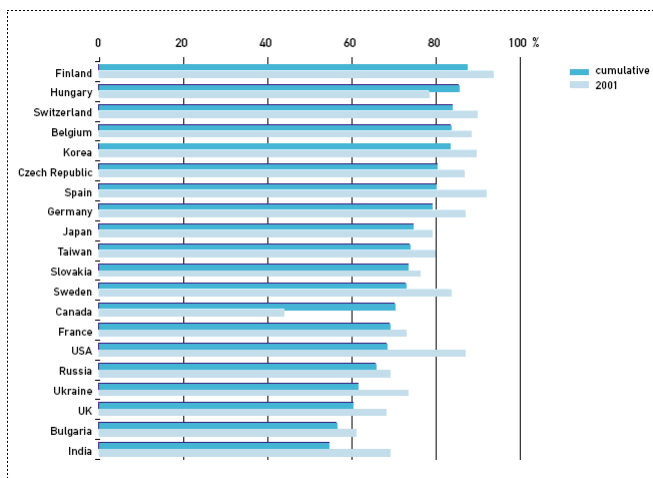
A Paksi Atomerőmű villamosenergia-termelése



Dr. Páztay György

Radiokémia-III

75



Dr. Páztay György

Radiokémia-III

76

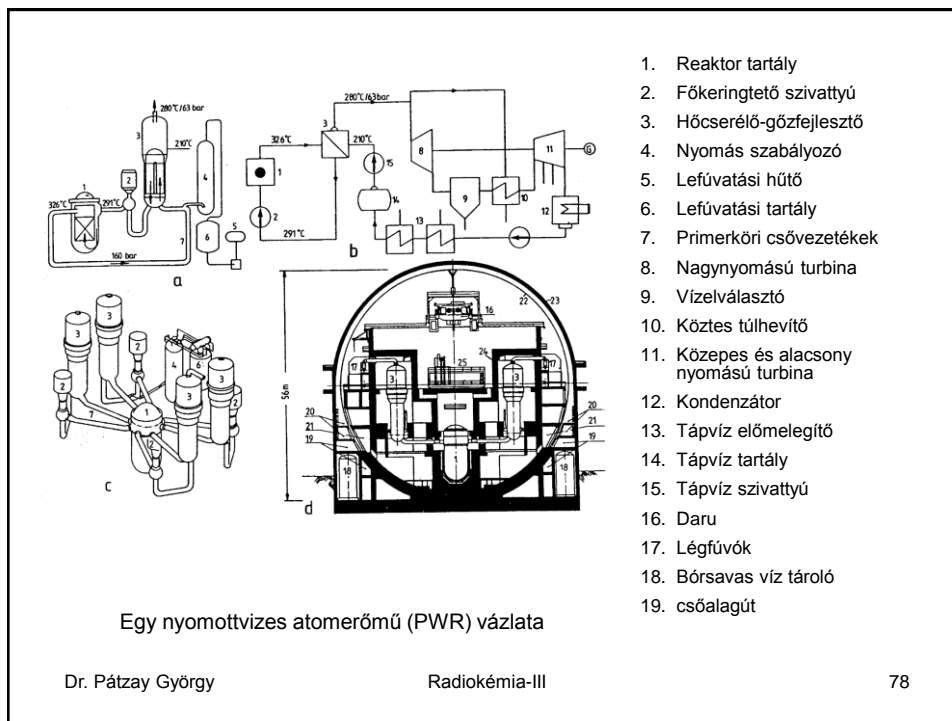
Erőműreaktorok jellemzői

Jellemző	egység	PWR	BWR	Candu	RBMK	FBR(gyuszap)	AGR(adv.gas cooled)	HTR(high temp. reakt)
Moderátor	-	H ₂ O	H ₂ O	D ₂ O	H ₂ O, C	-	C	C
Hűtőközeg	-	H ₂ O	H ₂ O	D ₂ O	H ₂ O	Na	CO ₂	He
Hasadóanyag (szaporító anyag)	UO ₂	UO ₂	UO ₂	UO ₂	UO ₂	UO ₂ (PuO ₂)	UO ₂	UO ₂ (ThO ₂)
tipikus dústítás	%	3,4	3,2	nincs	1,8	10	2	8-93
telj. sűrűség	MW/m ³	100	50-60	10-15	4	400	2	3
neutron energia	-	termikus	termikus	termikus	termikus	gyors	termikus	termikus
fűtőelem forma	-	rúd	rúd	rúd	rúd	rúd	rúd	golyó
fűtőelem burkolat	-	cirkaloy	cirkaloy	cirkaloy	cirkaloy, acél	acél	acél	C, Si
max. hűtőközeg hőm.	°C	326	285	305	285	540	650	750 (950)
hűtőközeg nyomás	bar	160	70	95	70	10	40	40-60
gőzjellemző	°C/bar	280/63	285/70	255/43	285/70	500/170	530/180	530/180
hatásfok	%	33	33	32	32	40	40	40-48
különös jellemző	-	-	-	term. U	-	szaporítás	-	passzív biztonság

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

77



VEGYÉSZET

UO₂
PuO₂
VEGYES OXIDPOR
FÜTŐELEMEK
TABLETTÁK

SZERKEZETI RÉSZEK ELKÉSZÍTÉSE

TÁRTARTÓ
FÜL
BURKOLÓ CSŐ
VEZETŐKÖRÖK
SZÁRFELE ZÁRÓKAPAC
FÜTŐELEMEK

TABLETTAGYÁRTÁS

ÖSSZEÁLLÍTÁS

BURKOLAT

KÖNNYŰVIZES REAKTOROK FÜTŐELEMEINEK GYÁRTÁSA

upper end plug plenum spacer lower end plug
holddown spring cladding fuel pellets

Dr. Pátzay György 79

Spacer Grids

Nuclear Fuel Pellet

Cladding

Fuel Rod

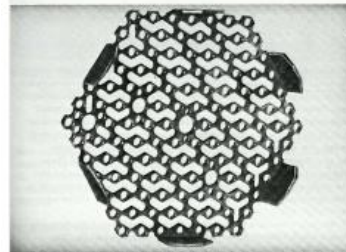
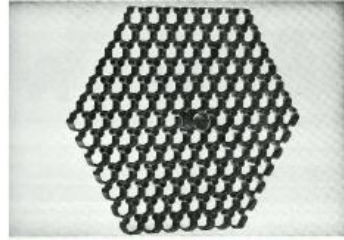
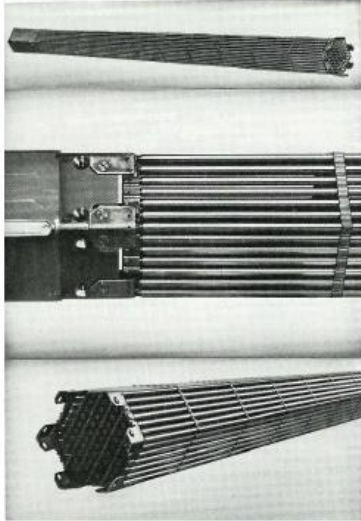
Guide Tube

Instrument Tube

Drawing Not To Scale
00022DC_ATP_Z1830-04a.ai

Dr. Pátzay György Radiokémia-III 80

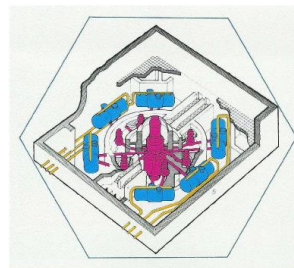
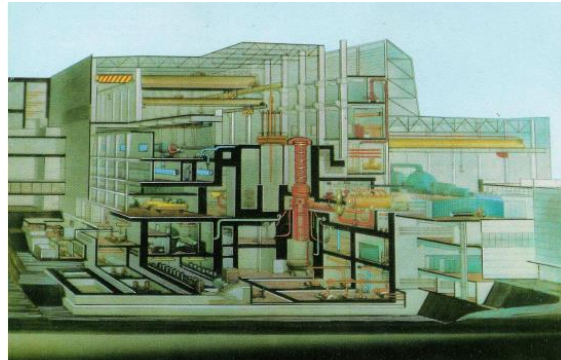
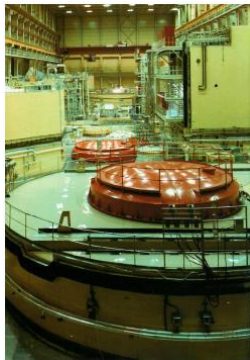
VVER-440 kazetták



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

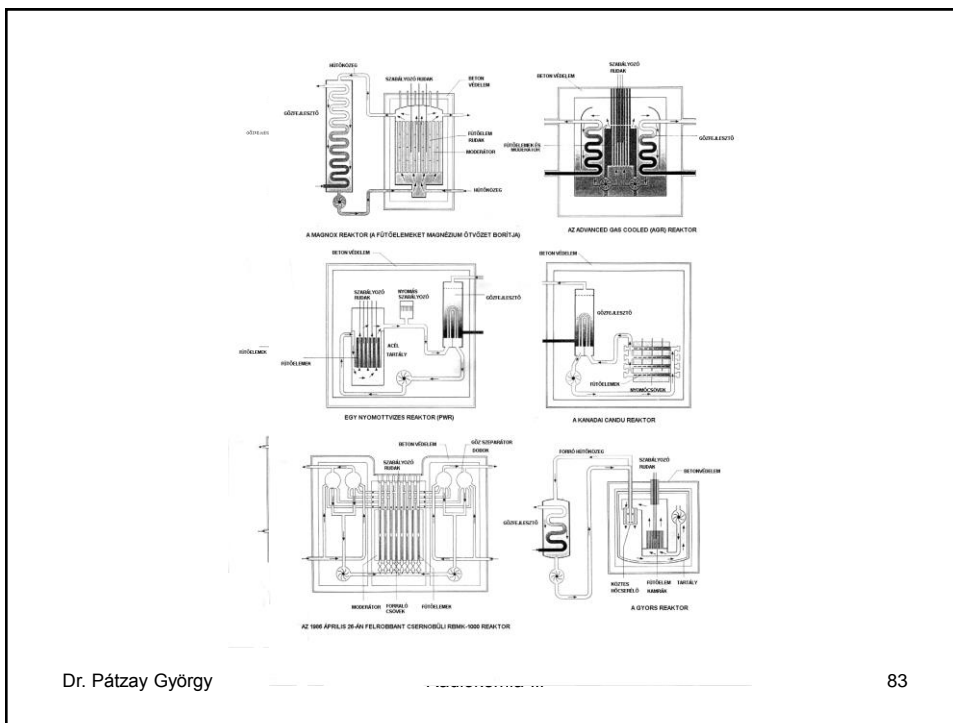
81



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

82



Erőművi reaktorok 2001

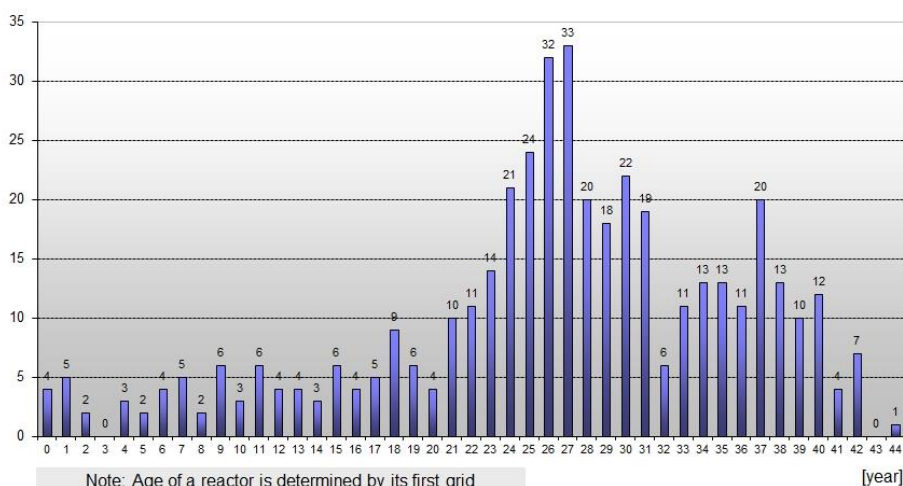
Reaktor típus	Ország	Szám	GWe	Üzemanyag	Hűtőközeg	Moderátor
Nyomottvizes reaktor (PWR)	US, Francia o., Japán, Orosz o.	252	235	dúsított UO_2	víz	víz
Forralóvizes reaktor (BWR)	US, Japán, Svédország	92	83	dúsított UO_2	víz	víz
Gázhűtésű reaktor (Magnox & AGR)	UK	34	13	természetes U (fém), dúsított UO_2	CO_2	grafit
Nyomott nehézvizes reaktor "CANDU" (PHWR)	Kanada	33	18	természetes UO_2	nehésvíz	nehésvíz
Könnyűvizes grafitos reaktor (RBMK)	Orosz o.	14	14.6	dúsított UO_2	víz	grafit
Gyors neutronos szaporító reaktor (FBR)	Japán, Francia o., Orosz o.	4	1.3	PuO_2 és UO_2	folyékony Na	nincs
más	Orosz o., Japán	5	0.2			
	Összesen	434	365			

Nuclear Power's Role in Energy Production

	Nuclear Electricity Generation 2001		Reactors Operating Dec 2002		Reactors Under Construction Dec 2002		Reactors Planned Dec 2002		Uranium Required 2002
	billion kWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	tonnes U
Argentina	6.5	8.2	2	505	0	0	1	692	133
Armenia	2.0	35	1	376	0	0	0	0	69
Belgium	44.1	58	7	5728	0	0	0	0	1109
Brazil	14.3	4.3	2	1855	0	0	0	0	299
Bulgaria	19.2	42	6	3336	0	0	0	0	621
Canada*	72.3	13	14	9968	6*	3598	0	0	1582
Greater China:									
-CNNUC	16.7	1.1*	7	5337	4	3200	0	0	677
-Taipower	35	22*	6	4864	2	2800	0	0	961
Czech Republic	14.7	20	5	2660	1	912	0	0	509
Finland	21.9	31	4	2656	0	0	0	0	589
France	401.3	77	59	63003	0	0	0	0	10198
Germany	162.3	31	19	21141	0	0	0	0	3657
Hungary	14.1	39	4	1755	0	0	0	0	417
India	17.3	3.7	14	2503	8	3728	1	440	312
Iran	0	0	0	0	1	950	0	0	0
Japan	321.9	34	54	44301	3	3696	12	15658	7578
Korea DPR (North)	0	0	0	0	1	950	1	960	0
Korea RO (South)	112.1	39	17	13620	3	2850	8	9200	2453
Lithuania	11.4	78	2	2370	0	0	0	0	359
Mexico	8.1	3.7	2	1310	0	0	0	0	233
Netherlands	3.7	4.2	1	482	0	0	0	0	115
Pakistan	2.0	2.9	2	425	0	0	0	0	56
Romania	5.1	11	1	685	0	0	1	620	90
Russia	125.4	15	30	20793	3	2626	3	2950	3460
Slovak Rep.	17.1	53	6	2472	2	840	0	0	525
Slovenia	5.0	39	1	679	0	0	0	0	130
South Africa	13.3	6.7	2	1842	0	0	0	0	361
Spain	61.1	29	9	7408	0	0	0	0	1617
Sweden	69.2	44	11	9460	0	0	0	0	1533
Switzerland	25.3	36	5	3170	0	0	0	0	598
Ukraine	71.7	46	13	11195	0	0	2	1900	1908
United Kingdom	82.3	23	31	12282	0	0	0	0	2595
USA	769.8	20	104	99488	0	0	0	0	20748
WORLD	2544	16	441	357,688	34	25,348	29	32,610	65,434
	billion kWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	tonnes U
	Nuclear Electricity Generation 2001		Reactors Operating Dec 2002		Reactors Under Construction Dec 2002		Reactors Planned Dec 2002		Uranium Required 2002

Dr. Pátzay György

85



Erőművi reaktorok kormegoszlása 2010

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

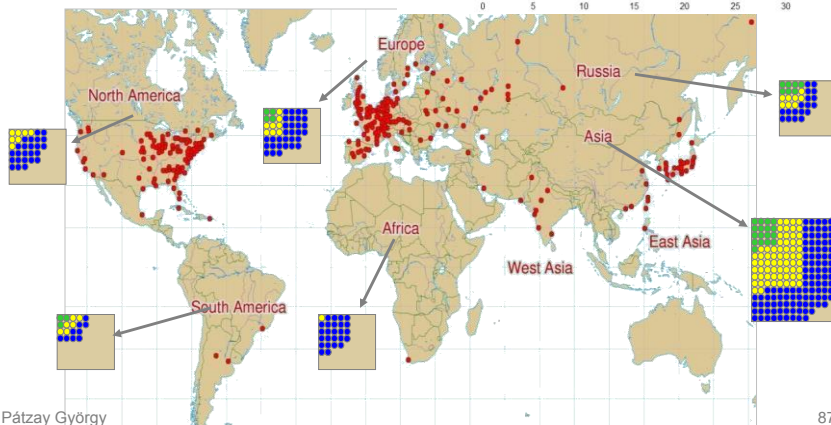
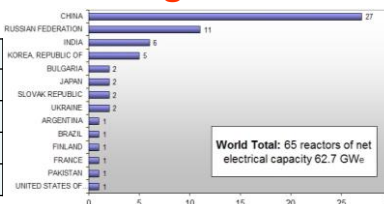
86



Atomerőművek a világban



Reaktor		db	MW
Üzemel	●	432	366 535
Építés alatt áll	●	65	62 700
Megrendelt	●	~140	~160 000
Tervezett	●	~340	~360 000



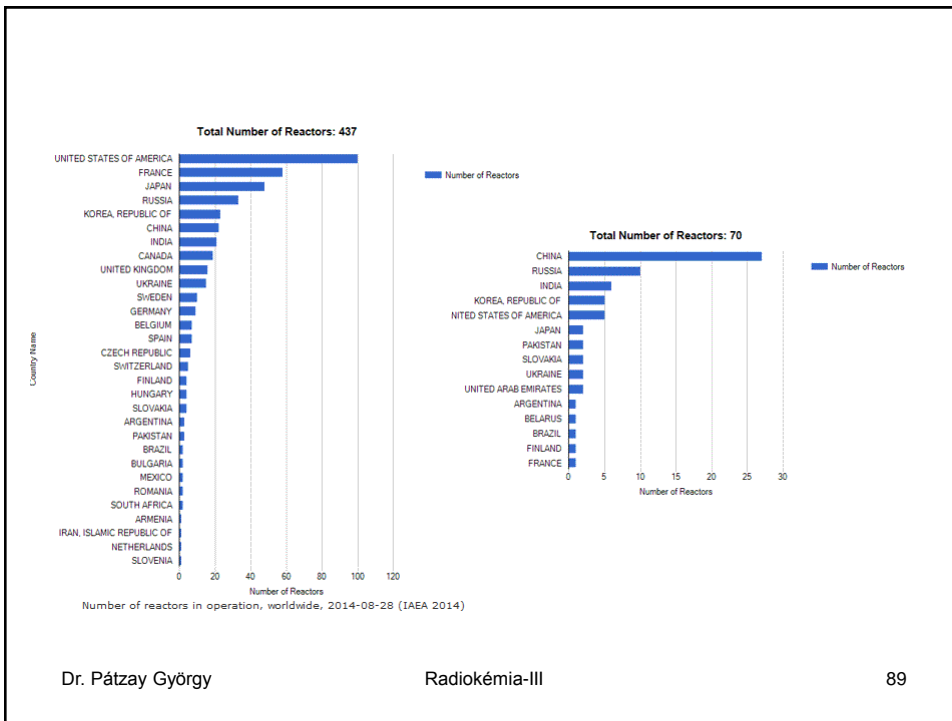
Dr. Pátzay György

87

Country	In operation		Under construction	
	Number	Electr. net output MW	Number	Electr. net output MW
Argentina	3	1,627	1	25
Armenia	1	375	-	-
Belarus	-	-	1	1,109
Belgium	7	5,927	-	-
Brazil	2	1,884	1	1,245
Bulgaria	2	1,906	-	-
Canada	19	13,500	-	-
China	22	18,056	27	26,756
Czech Republic	6	3,884	-	-
Finland	4	2,752	1	1,600
France	58	63,130	1	1,630
Germany	9	12,068	-	-
Hungary	4	1,889	-	-
India	21	5,308	6	3,907
Iran	1	915	-	-
Japan	48	42,388	2	1,325
Korea, Republic	23	20,721	5	6,370
Mexico	2	1,330	-	-
Netherlands	1	482	-	-
Pakistan	3	690	2	630
Romania	2	1,300	-	-
Russian Federation	33	23,643	10	8,382
Slovakian Republic	4	1,815	2	880
Slovenia	1	688	-	-
South Africa	2	1,860	-	-
Spain	7	7,121	-	-
Sweden	10	9,474	-	-
Switzerland	5	3,308	-	-
Taiwan, China	6	5,032	2	2,600
Ukraine	15	13,107	2	1,900
United Arab Emirates	-	-	2	2,690
United Kingdom	16	9,243	-	-
United Arab Emirates	-	-	2	2,690
USA	100	99,081	5	5,633
Total	437	374,504	70	66,682

88

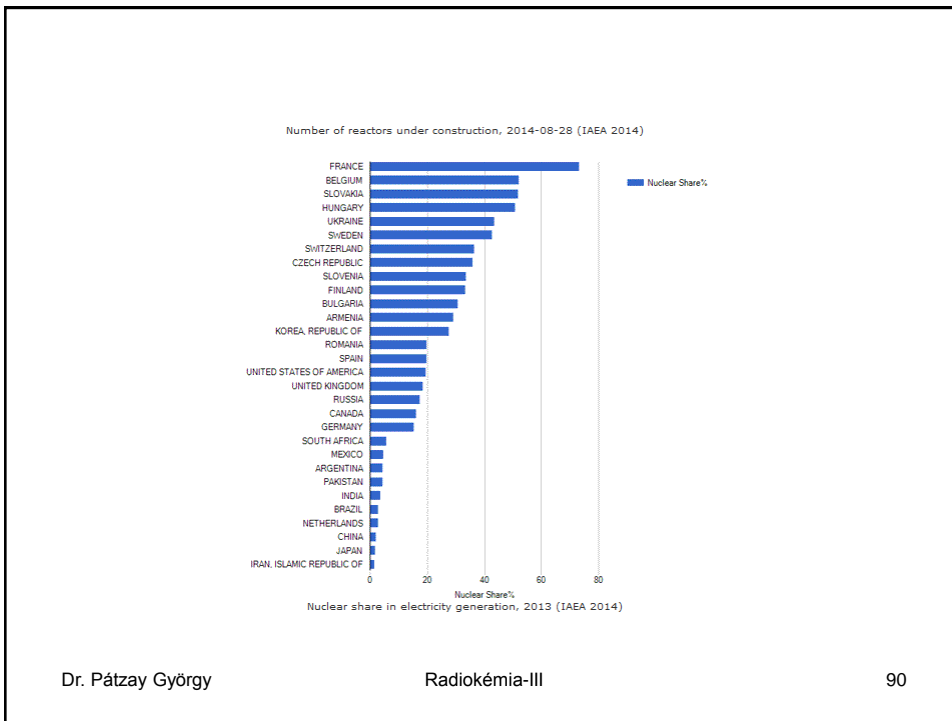
Nuclear power plants world-wide, in operation and under construction, IAEA as of 28 August 2014



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

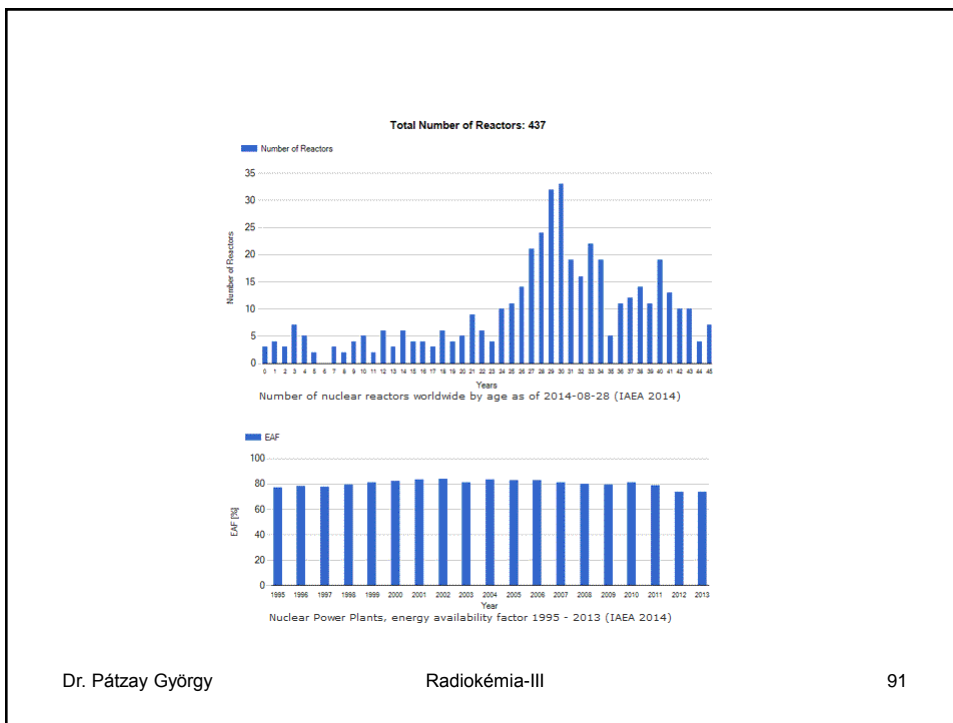
89



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

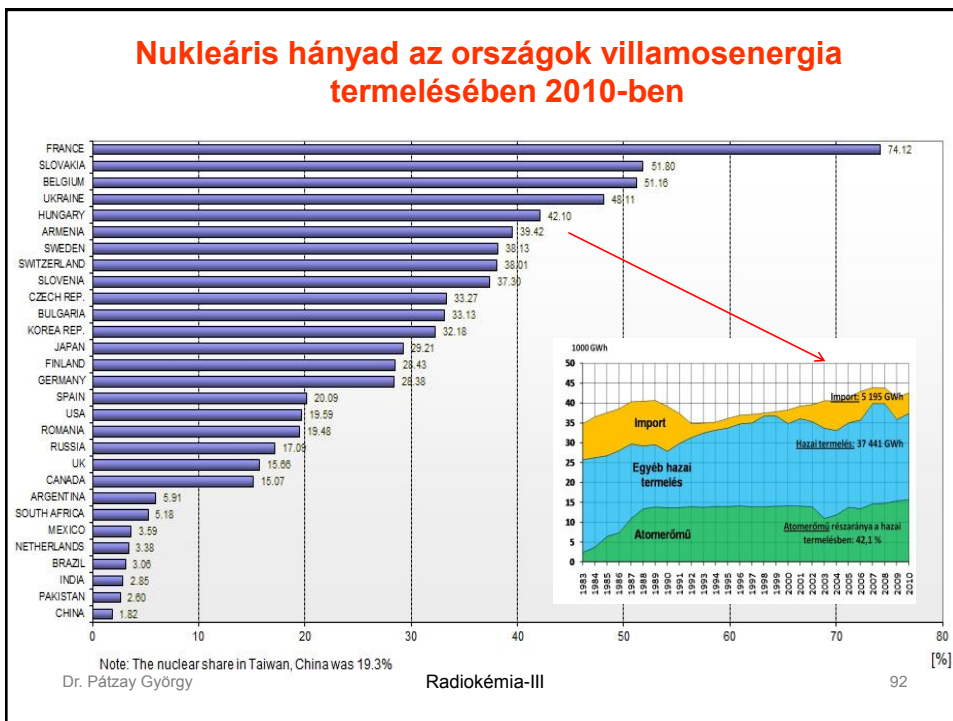
90



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

91



Dr. Pátzay György

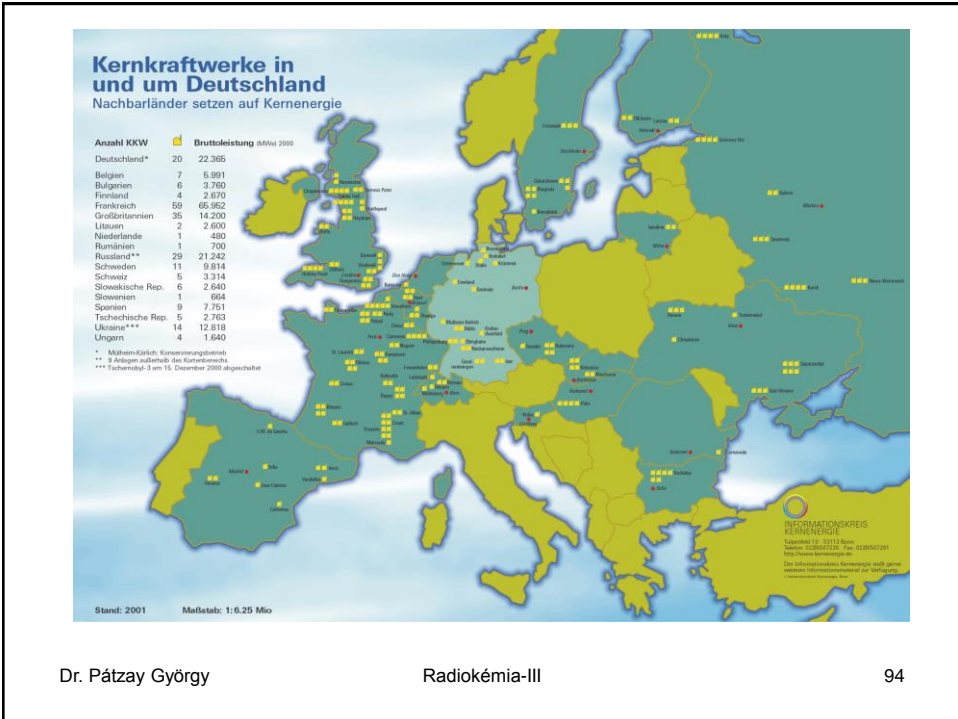
Radiokémia-III

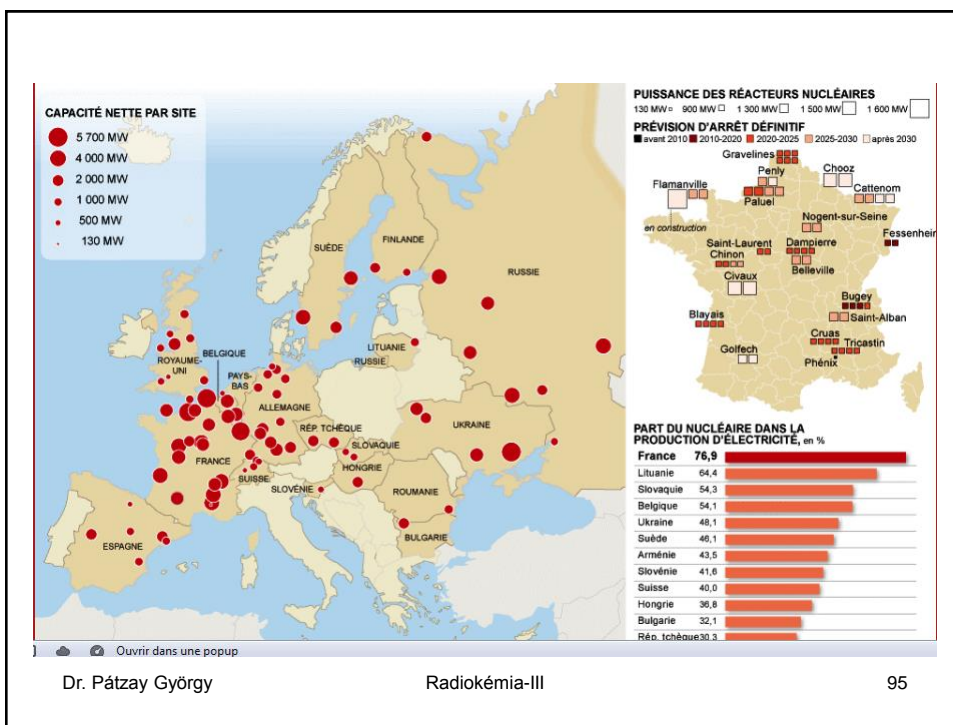
92

Country	NPP	Unit	Model	Start of operation	End of design lifetime*
Armenia	Armenian	1	270	1976	Shutdown in 1989
		2	270	1980	
Bulgaria	Kozloduy	1	230	1974	2004***
		2	230	1975	2005***
		3	230	1980	2010
		4	230	1982	2012
Czech Republic	Dukovany	1	213	1985	2015
		2	213	1986	2016
		3	213	1986	2016
		4	213	1987	2017
Finland	Lovisa	1	213	1977	2007
		2	213	1981	2011
Germany	Greifswald	1	230	1973	Shutdown of all units in 1990
		2	230	1974	
		3	230	1978	
		4	230	1979	
		5	213	1988	
Hungary	Paks	1	213	1983	2013
		2	213	1984	2014
		3	213	1986	2016
		4	213	1987	2017
Russian Federation	Novovoronezh	3	230	1971	2001
		4	230	1972	2002
	Kola	1	230	1973	2003
		2	230	1974	2004
		3	213	1981	2011
		4	213	1984	2014
Slovakia	Bohunice	1	230	1978	2003
		2	230	1981	2006
		3	213	1984	2014
		4	213	1985	2015
	Mochovce	1	213	1998	2028
Ukraine	Rovno	1	213	1980	2010
		2	213	1981	2011

* 30 years
 ** Including 5 years of cold shutdown
 *** Final shutdown at the end of 2002

VVER-440 nyomottvizes atomerőművek a világban

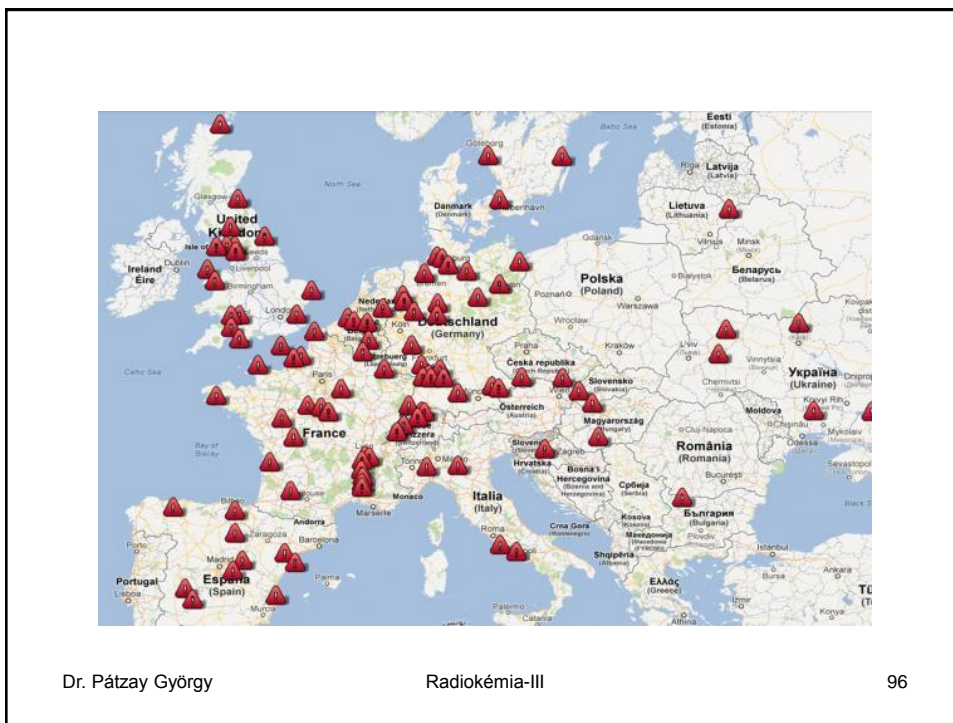




Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

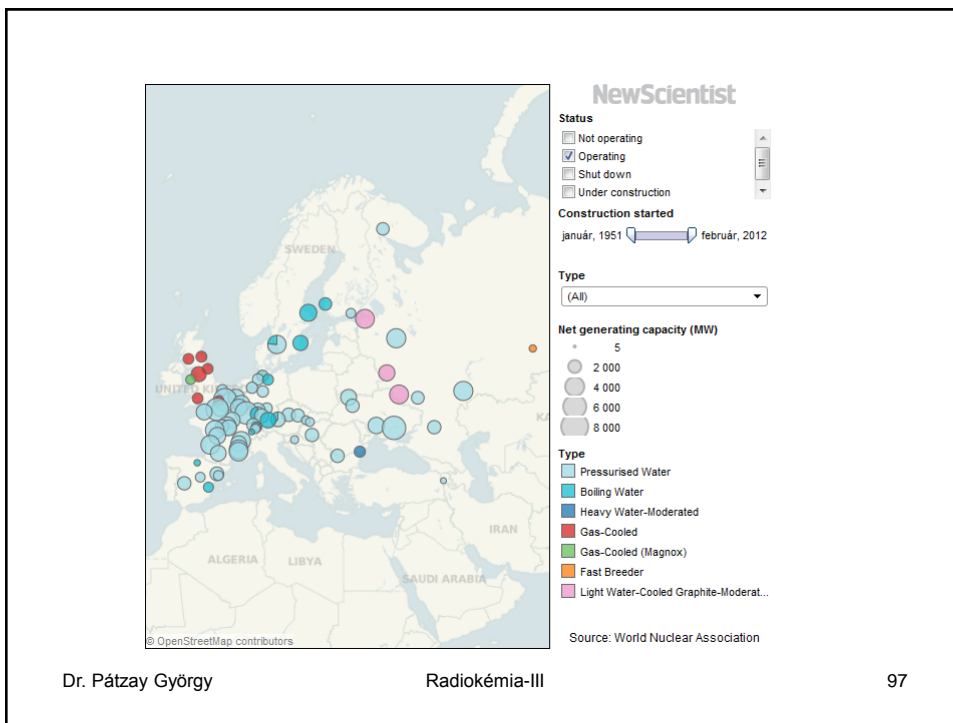
95



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

96



Natural uranium

0.7% U-235
99.3% U-238

Weapon-grade highly enriched uranium

<7% U-238
>93% U-235

Figure 16
A 'Gun Assembly' nuclear weapon

Active material
(Each two-thirds critical)

Propellant Gun tube Tamper

Figure 17
Implosion assembly principle

Conventional Explosive
Pu (Subcritical mass)

Figure 18
Use of a reflector / tamper

Critical mass
13kg Pu OR 56kg HEU

Critical mass
3-4kg Pu OR 15kg HEU

Tamper-reflector
e.g. Beryllium

Figure 19

BLAST 50% THERMAL 35%
INITIAL RADIATION 5%
RESIDUAL RADIATION 10%

Dr. Páztay György

Radiokémia-III

99

Physics Package
(this is the bomb)

D-T neutron generator

Primary or fission trigger (Plutonium Pit)

x- and gamma radiation

Shield

Secondary (Canned Subassembly)

Uranium-238 (depleted uranium) casing

A 3-fázisú hidrogén bomba

1. ^{239}Pu implóziós bomba detonál
2. Sugározza, hevíti a központi lítium-deuterid hengert ("másodlagos")
3. ^3H és ^2H keletkezik, beindul a fúzió 100 millió $^\circ\text{C}$ -on
4. A fúzióban igen nagy energiájú neutronok keletkeznek melyek az ^{238}U hasadását idézik elő, így még több energia szabadul föl.

Dr. Páztay György

Radiokémia-III

100

**Plutónium izotópok jellemző koncentrációi energetikai reaktorokban
és atomfegyverekben**

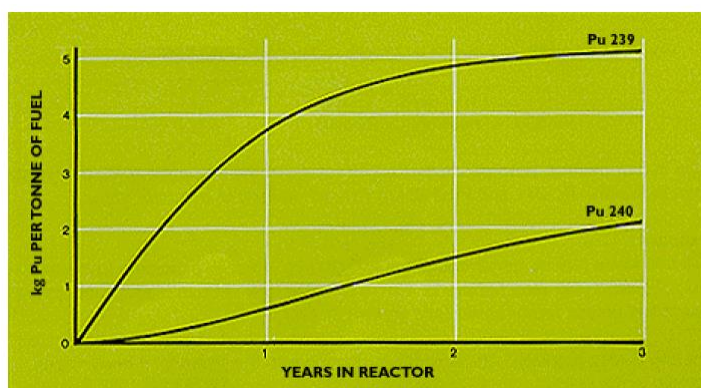
Izotóp	Felezési idő (év)	Atomfegyver Pu izotóp összetétele (átlagosan)	PWR ^a (33,000 MWnap/t (d))	Gáz-grafit reaktor ^b (5,000 MWnap/t)	CANDU ^c (7,500 MWnap/t)
Pu-238	86.4	--	1.3	--	--
Pu-239	24,000	93	56.6	68.5	66.6
Pu-240	6,600	6.5	23.2	25	26.6
Pu-241	13.2	0.5	13.9	5.3	5.3
Pu-242	380,000	--	4.7	1.2	1.5

- (a) Nyomottvizes atomerőmű-Pressurized water reactor
 (b) Gázhűtésű grafit moderátors atomerőmű-Gas-cooled, graphite-moderated reactor
 (c) Kanadai deutérium-urán atomreaktor-Canadian deuterium-uranium reactor
 (d) Megawatt-nap per tona urán fűtőelem

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

101



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

102

A jelenleg üzemelő atomerőművekben az üzemanyag főként természetes (0,71 % ^{235}U) vagy enyhén dúsított (1,5-5% ^{235}U) urán, de néhány reaktor a ciklusban keletkezett plutóniummal, vagy nagy dúsítási fokú uránnal üzemel. Tervek között szerepel tóriummal és ^{233}U -al üzemelő reaktorok építése is. Vannak olyan atomerőművek is, melyek nem igénylik a természetes urán ^{235}U tartalmának dúsítását, így az üzemanyagciklus nem tartalmaz dúsító technológiát, de a reaktor hűtéséhez és moderálásához deutériummal dúsított nehézvíz szükséges.

A jelenlegi uránérc készlet ^{235}U tartalma alapján a jelenlegi energiaigény mintegy 80 évig fedezhető. Egy 1000 MW elektromos teljesítményű atomerőmű 30 éves működéséhez, átlagosan 34%-os hatásfok mellett mintegy 26 tonna ^{235}U hasadóanyag szükséges. Ugyanakkor az urán-oxid alapú fűtőelem „kiégése” a reaktorban bonyolult folyamat. A szokványos könnyűvízes hűtésű és moderálású termikus neutronnal működő reaktorokban a fűtőelem 3-5 tömeg%-a ^{235}U és 95-97 tömeg% ^{238}U . A reaktorban történő felhasználás során a ^{235}U zöme a termikus neutronok hatására elhasad, míg az „inert” ^{238}U nem. Ugyanakkor a hasadási folyamatok mellett mindkét urán izotóp egy vagy több neutron befogására is képes és ezen bonyolult magreakciók során az uránnál nehezebb, ún. transzurán radioaktív izotópok keletkeznek. Rendkívül fontos az inert ballasztanyagként jelenlévő ^{238}U egy neutron befogásával járó folyamat, melynek végén a keletkezett ^{239}U magból két negatív béta-bomlás után új, mesterséges hasadóanyag a ^{239}Pu keletkezik, ahogy azt az ábra mutatja.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

103

The diagram illustrates the nuclear fuel cycle and the production of ^{239}Pu . On the left, a fuel cycle chart shows isotopes from U-235 to Cm-244, with some labeled as fissile or short-lived. On the right, a reaction scheme shows the conversion of ^{238}U to ^{239}Pu via ^{239}U and ^{239}Np .

Reaction Scheme:

$${}_{92}^{238}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{92}^{239}\text{U}$$

nem hasadó anyag

elektron vesztes proton keletkezés
 β^- bomlás

$${}_{92}^{239}\text{U} \rightarrow {}_{93}^{239}\text{Np}$$

... kovertálódik ...

β^- bomlás

$${}_{93}^{239}\text{Np} \rightarrow {}_{94}^{239}\text{Pu}$$

hasadóanyaggá

Fuel Cycle Chart (Advanced Accelerator Applications):

- U-235 (fissile), U-236, U-237 (fissile), U-238, U-239 (fissile)
- Np-237, Np-238, Np-239 (fissile)
- Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Pu-243 (fissile)
- Am-241, Am-242, Am-243, Am-244
- Cm-242, Cm-243, Cm-244 (Short-Lived Isotope)

A ^{239}Pu új mesterséges hasadóanyag keletkezése

Az ^{238}U magokból keletkezett ^{239}Pu magok mennyisége függ a reaktor üzemelési körülményeitől. A tenyésztési tényező vagy konverziós arány (conversion ratio CR) a magreakciókkal keletkezett és a hasadás révén fogyott hasadóanyag mennyiségek arányát fejezi ki:

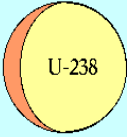
$$\text{CR} = \frac{\text{magreakciókkal keletkezett hasadóanyag}}{\text{hasadás révén fogyott hasadóanyag}}$$

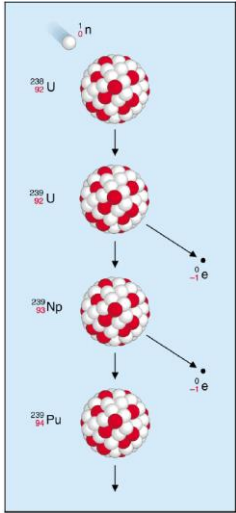
Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

104

an atom of uranium-238

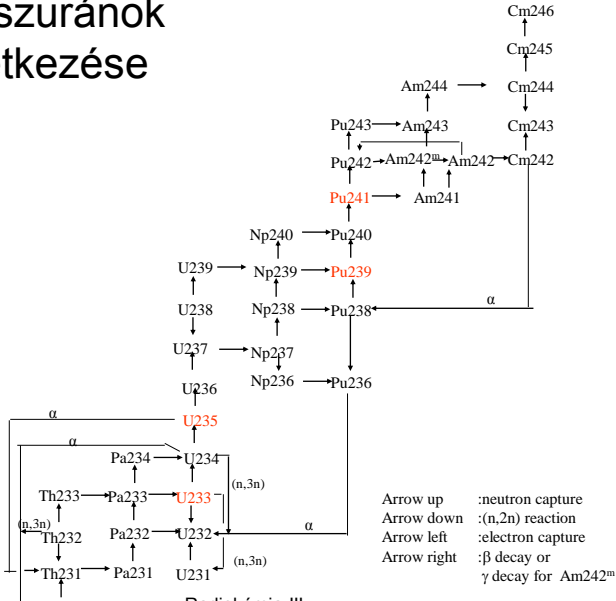




A ^{239}Pu keletkezésének animációja

Dr. Pátzay György
Radiokémia-III
105

Transzuránok keletkezése



Arrow up :neutron capture
 Arrow down : (n,2n) reaction
 Arrow left :electron capture
 Arrow right :β decay or γ decay for Am^{242m}

Dr. Pátzay György
Radiokémia-III
106

$${}_{90}^{232}\text{Th} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{90}^{233}\text{Th}$$

$${}_{90}^{233}\text{Th} \rightarrow {}_{91}^{233}\text{Pa} + {}_{-1}^0\text{e}$$

HWZ
22,3 min

$${}_{91}^{233}\text{Pa} \rightarrow {}_{92}^{233}\text{U} + {}_{-1}^0\text{e}$$

HWZ
27,0 d

$${}_{92}^{233}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{229}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$$

HWZ
 $1,592 \cdot 10^5 \text{ a}$

Az ${}^{233}\text{U}$ keletkezése

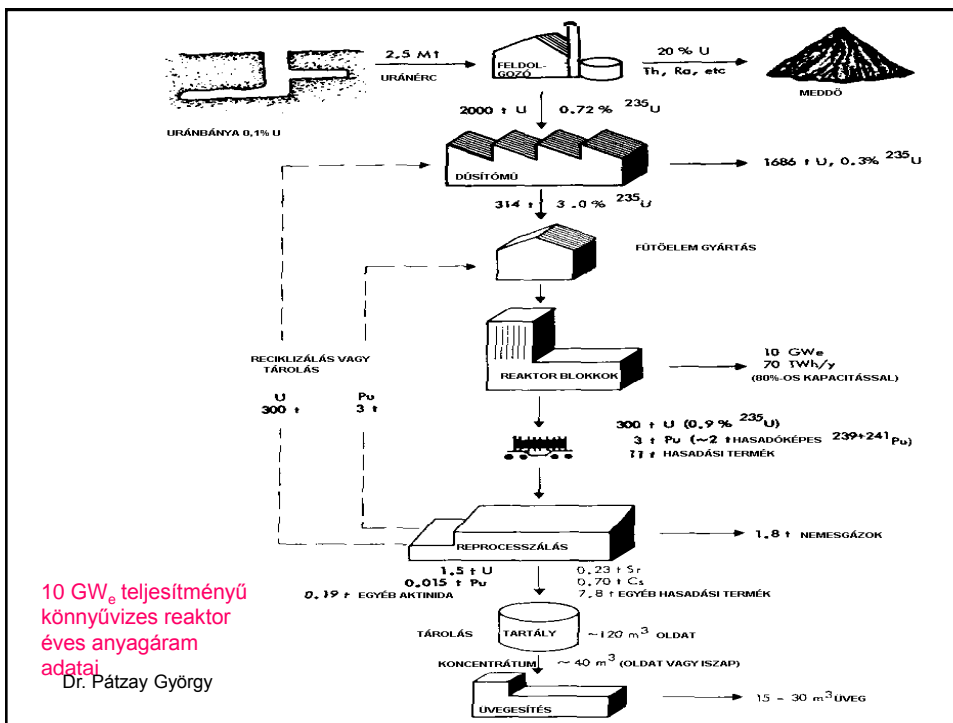
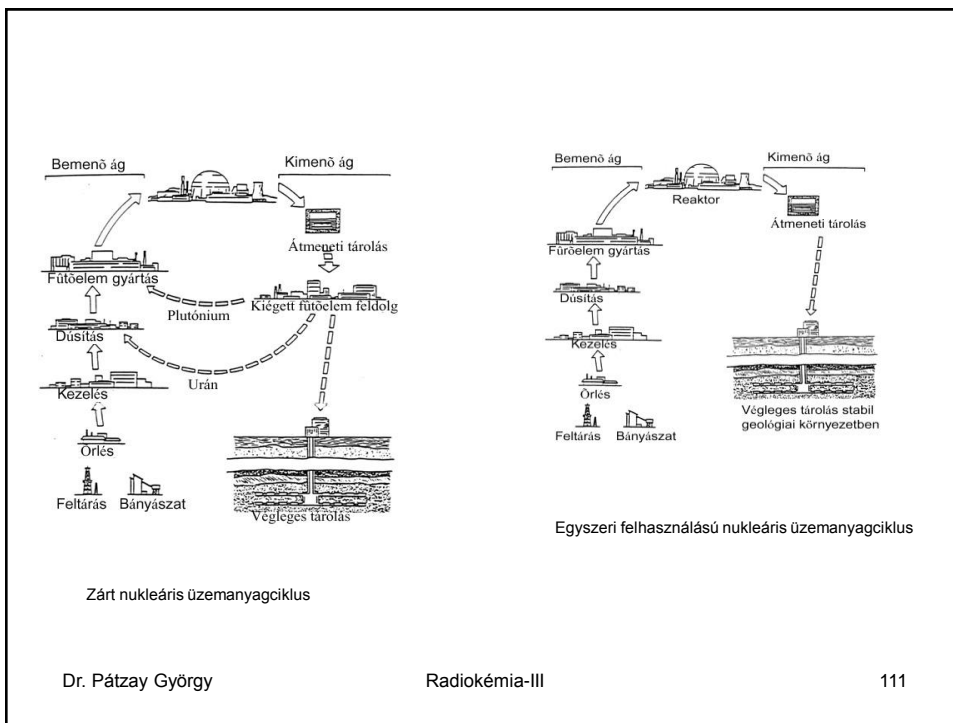
Dr. Pátzay György
Radiokémia-III
107

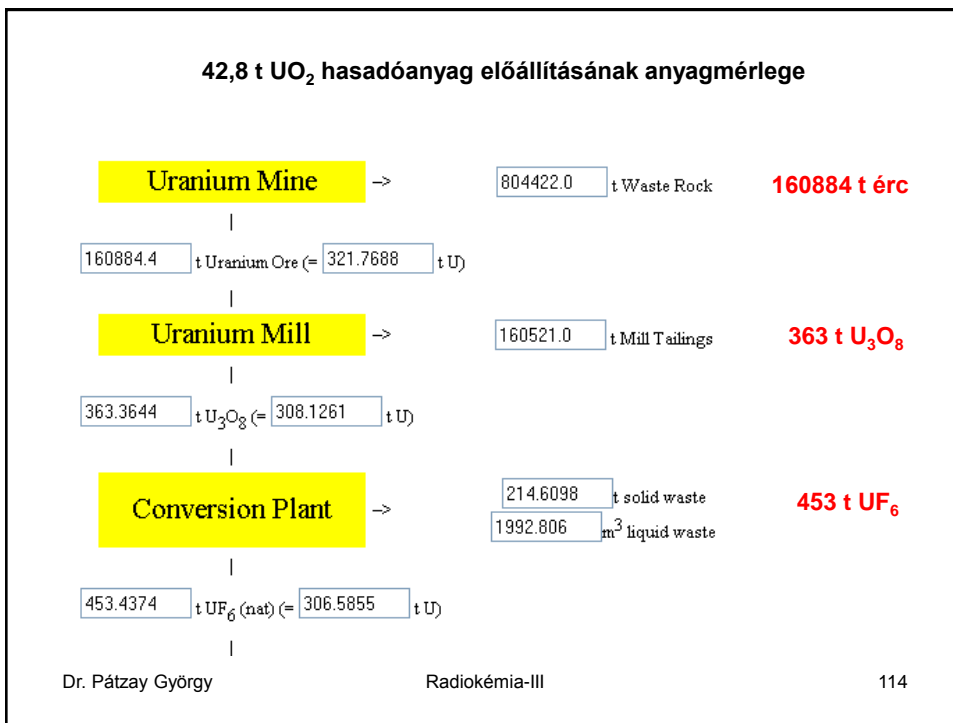
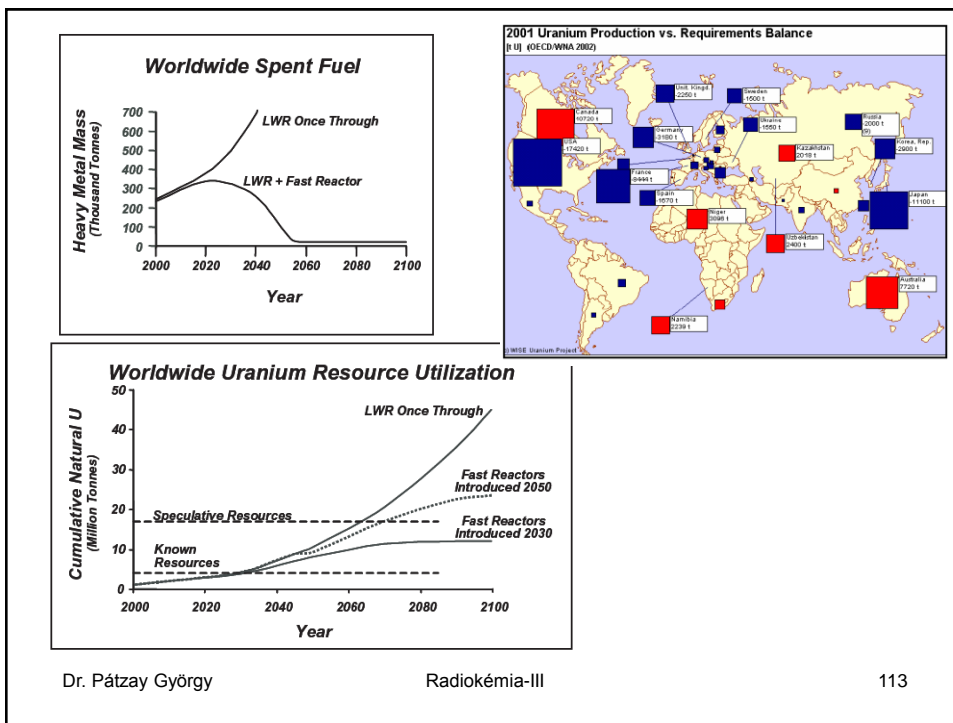
A szokványos reaktorok ún. konverter reaktorok, ahol $CR < 1$, tipikusan $CR = 0,6$. Ez azt jelenti, hogy 10 db ${}^{235}\text{U}$ mag fogyasztásához, 6 ${}^{239}\text{Pu}$ atom keletkezése rendelhető az ${}^{238}\text{U}$ magokból. Az olyan reaktorokat, melyeknél $CR > 1$, *szaporító reaktoroknak (breeder reactors)* nevezzük. A jelenlegi termikus neutronokkal működő könnyűvízes reaktoroknál $CR < 1$. Ha az ekkor keletkező plutóniumot is felhasználjuk alig öt évvel növekszik a hasadóanyag készletünk. Ugyanakkor, ha a ${}^{238}\text{U}$ fokozottabban alakítjuk át új mesterséges plutónium hasadóanyaggá ($CR = 1$, $CR > 1$), a felhasználható készletek mennyisége nagyságrendekkel növekszik és hosszú-távú energiaellátást biztosít, a hasadóanyag készlet nem csökken, vagy növekszik. Ezért a jövő energia ellátása szempontjából a szaporító reaktorok rendkívüli jelentőségűek, mert lehetővé teszik a ${}^{238}\text{U}$ felhasználását is és így mintegy 100-szor annyi energia állítható elő. További előnye a szaporító reaktorok alkalmazásának, hogy a keletkezett mesterséges hasadóanyag, a plutónium, könnyebben és olcsóbban választható el az urántól, mint a jelenlegi izotópdúsítási folyamat, ahol az urán két, kémiaiilag teljesen azonosan viselkedő izotópját kell egymástól elválasztani.

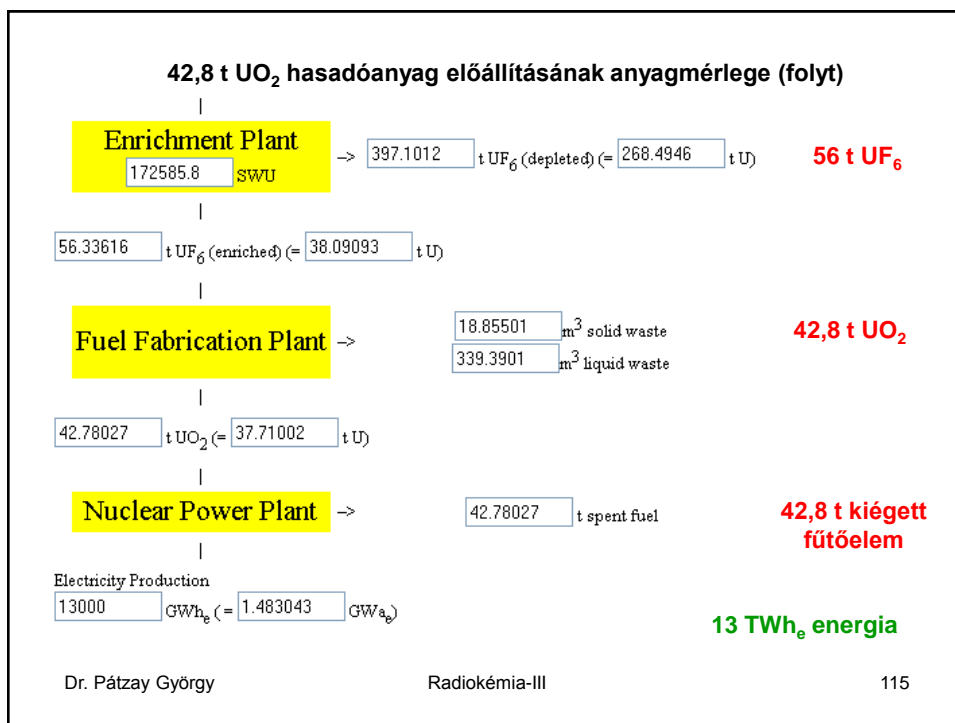
Üzemanyagciklus-szükségletek

A könnyűvízes atomerőművek üzemanyagciklusában az üzemanyag szükséglet függ a ciklustól, ahogy azt 1 GW.év elektromos energiára vetítve a következő ábra is mutatja. Ezt az energiamentiséget körülbelül egy standard 1300 MW-os erőművi reaktor termeli meg egy év üzemidő alatt 80%-os teljesítménytényező mellett.

Dr. Pátzay György
Radiokémia-III
108







A fűtőelemgyártás környezeti kérdései

42,8 t UO₂ fűtőelem gyártásának energiaigénye és CO₂ kibocsátása

	Energy Consumption			CO ₂ Emission		
	Fossil Fuel		Electricity	from fossil fuel	from electricity	Total
	[TJ]	= [GWh _{th}]	[GWh _e]	[t]	[t]	[t]
Mining	65.47995	18.18888	0.431170	4845.517	403.5753	5249.092
Milling	77.70717	21.58532	2.992450	5750.331	2800.933	8551.264
Conversion	436.8843	121.3568	4.494543	32329.44	4206.893	36536.33
Enrichment	118.5664	32.93512	396.9473	8773.916	371542.7	380316.6
Fuel Fabrication	102.1564	28.37679	11.34694	7559.576	10620.74	18180.32
Total	800.7943	222.4429	416.2124	59258.78	389574.8	448833.6

Dr. Pátzay György Radiokémia-III 116

A fűtőelemgyártási folyamat alap-paramétereit, energiafogyasztási és CO₂ emissziós értékei

DEFAULT		Process Parameters		HELP	
Ore Deposit	Waste/Ore Ratio:	5	· Ore Grade:	0.2	% U
Mill	Extraction Losses:	4.239905	%		
Conversion	Losses:	0.5	%		
	Solid waste:	0.7	t per t U · Liquid waste:	6.5	m ³ per t U
Enrichment	Product Assay:	3.6	% U-235 · Tails Assay:	0.3	% U-235
Fuel Fabrication	Losses:	1	%		
	Solid waste:	0.5	m ³ per t U · Liquid waste:	9	m ³ per t U
Power Plant	Fuel Burnup:	42	GWd/t U · Efficiency:	34.2	%

DEFAULT		Emission Parameters		HELP	
		Fossil Fuel		Electricity	
CO ₂	74	t per TJ	936	t per GWh _e	

Dr. Pátzay György

DEFAULT		Energy Consumption Parameters		HELP	
		Fossil Fuel		Electricity	
Mining		407	MJ per t ore	2.68	kWh _e per t ore
		0	MJ per t waste rock	0	kWh _e per t waste rock
Milling		483	MJ per t ore	18.6	kWh _e per t ore
Conversion		1425	MJ per kg U	14.66	kWh _e per kg U
Enrichment		687	MJ per SWU	2300	kWh _e per SWU
Fuel Fabrication		2709	MJ per kg U	300.9	kWh _e per kg U

Kiegészítő fűtőelemek feldolgozása (reprocessálás)

Üzemelő atomreaktorban két fő folyamat megy végbe:

1. Neutronok hatására az U-235 magok hasadnak és energiakibocsátás, neutronkibocsátás mellett hasadvány magokat képeznek, melyek e folyamat hulladékai.
2. A neutronok ütköznek az U-238 magokkal is. Az U-238 nem hasad, hanem két rövid átmenet után egy teljesen új hasadóképes magot a Pu-239 magot hozza létre.

Így a kiegészítő fűtőelemben 3 fő komponens található:

- még el nem hasadt U-235 és még el nem reagált U-238 magok
- frissen keletkezett Pu-239 új hasadóanyag (és más transzuránok)
- hasadási termékanyagok (az U-235 és Pu-239 hasadásából)

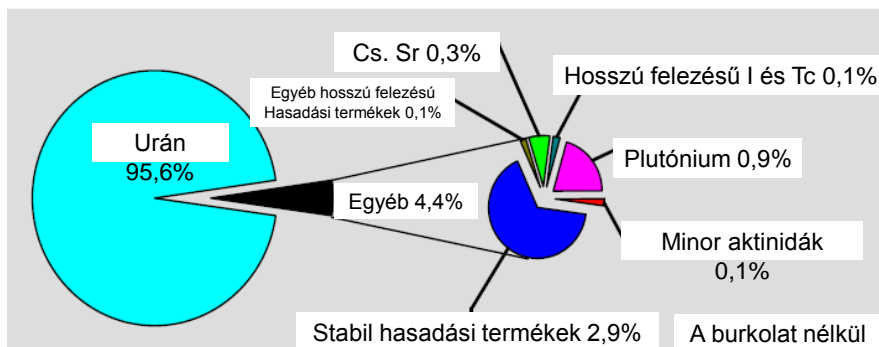
A reprocessálás tulajdonképpen ezen három komponens különválasztását jelenti. A legismertebb nedves reprocessáló eljárás a PUREX eljárás (Plutónium urán extrakció)

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

118

Kiégett fűtőelem összetétele

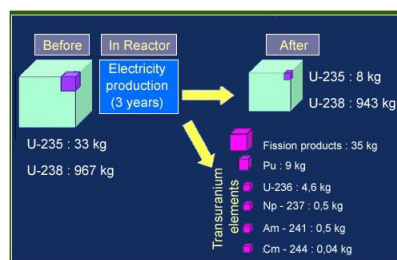


Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

119

Radioelement	1 Tonne U	23 Tonnes/year
Total uranium	955,4 kg	22300 kg
U-238	940,6	21960
U-235	10,3	238
U-236	4,4	102
U-234	0,2	4
Total plutonium	9,74 kg	223 kg
Pu-238	0,18	4,1
Pu-239	5,67	132
Pu-240	2,21	52
Pu-241	1,19	28
PU-242	0,49	11
Total minor actinides	0,776 kg	17,5 kg
Neptunium-237	0,43	10,1
Americium-241	0,22	5
Americium-242	0,0007	0,02
Americium-243	0,10	2,4
Curium-242	0,00013	0,003
Curium-243	0,00032	0,007
Curium-244	0,024	0,56
Total Fission products	34,1 kg	760 kg
Short & intermediate-lived FPs	31,1	691
Long-lived FPs, of which	3,0 including	69 including
Technetium-99	0,81	19
Iodine-129	0,17	4
Caesium-135	1,31	30
Zirconium-93	0,71	16

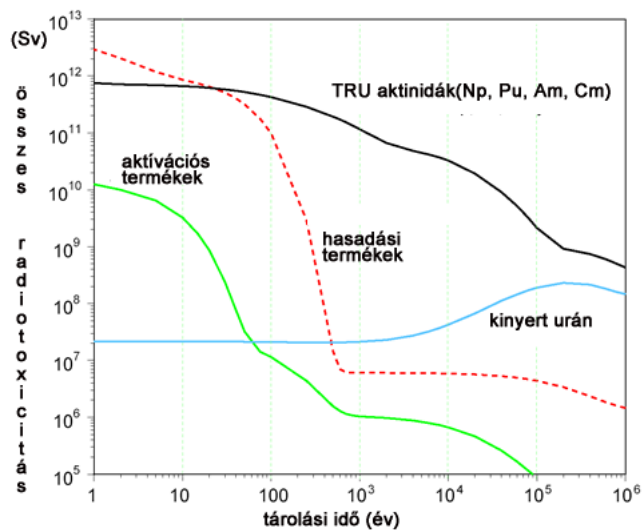


Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

120

Kiegészített fűtőelem radiotoxicitása (Sv) a tárolási idő függvényében

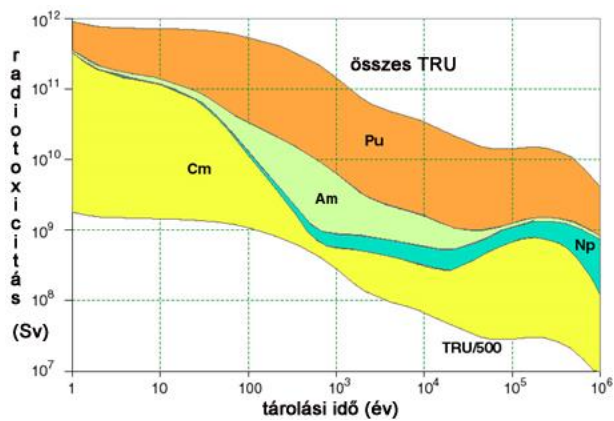


Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

121

Kiegészített fűtőelem TRU radiotoxicitása (Sv) a tárolási idő függvényében

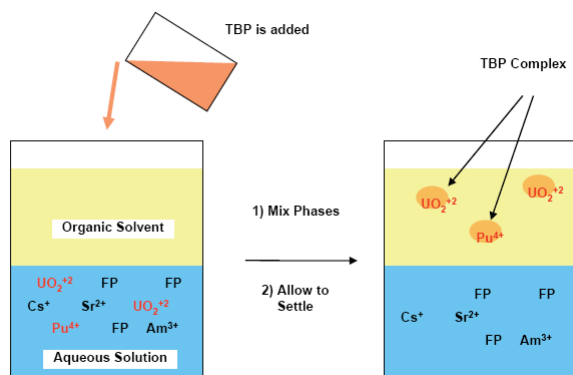


Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

122

PUREX Process- Basic principles

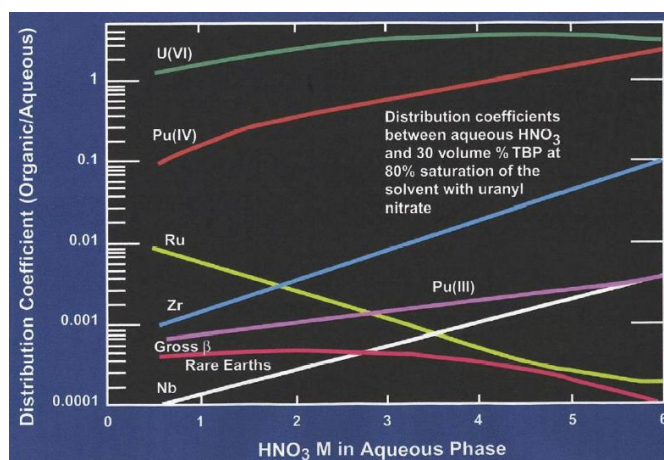


Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

123

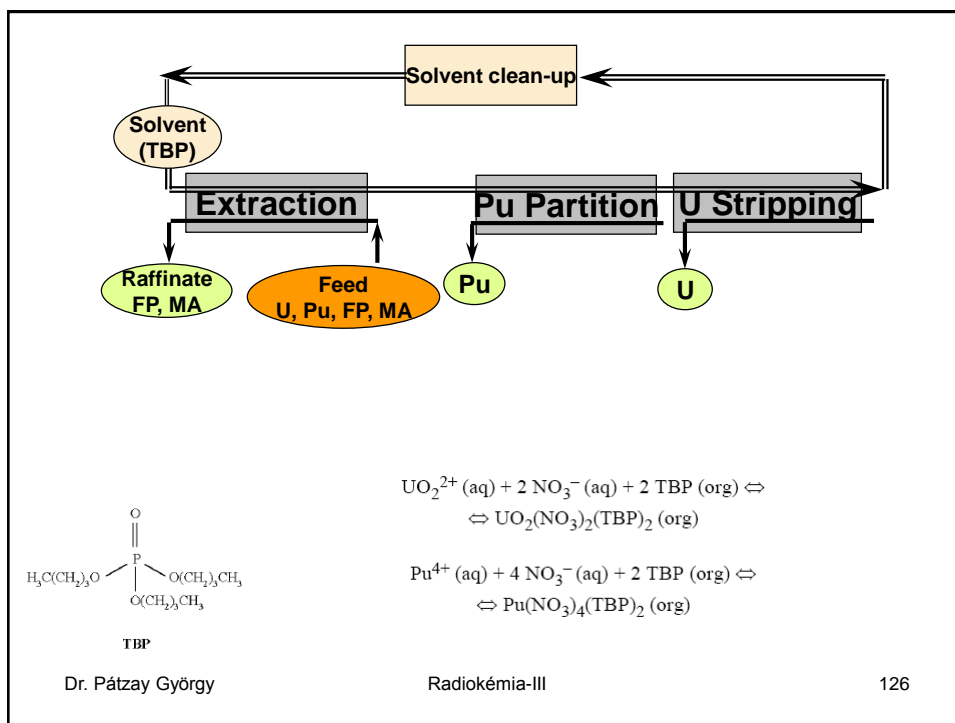
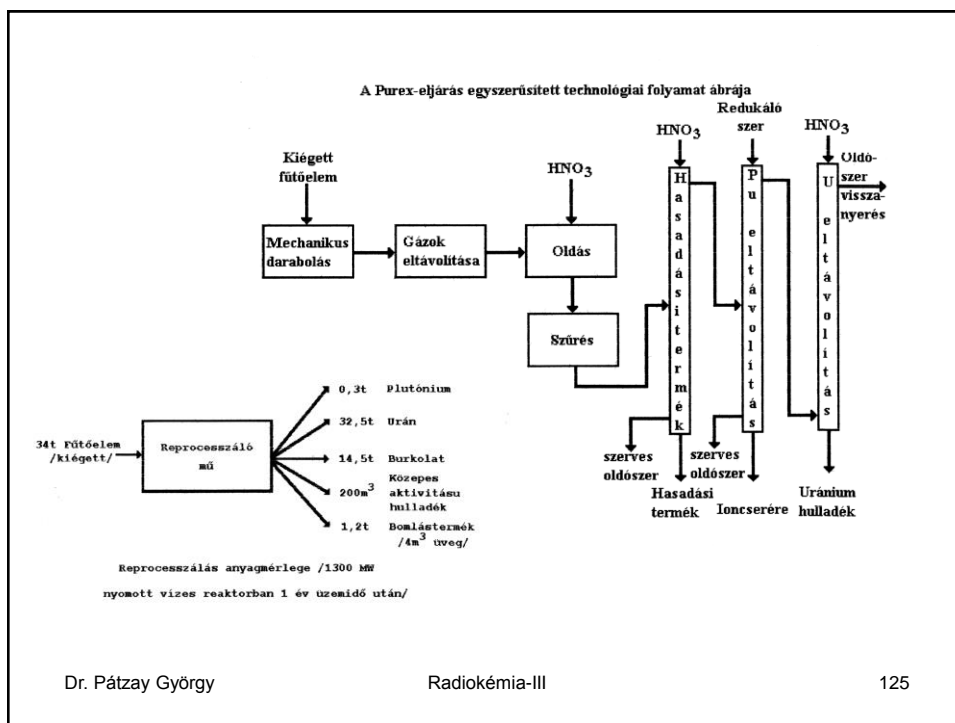
Effect of Nitric Acid Concentration on Extraction by TBP

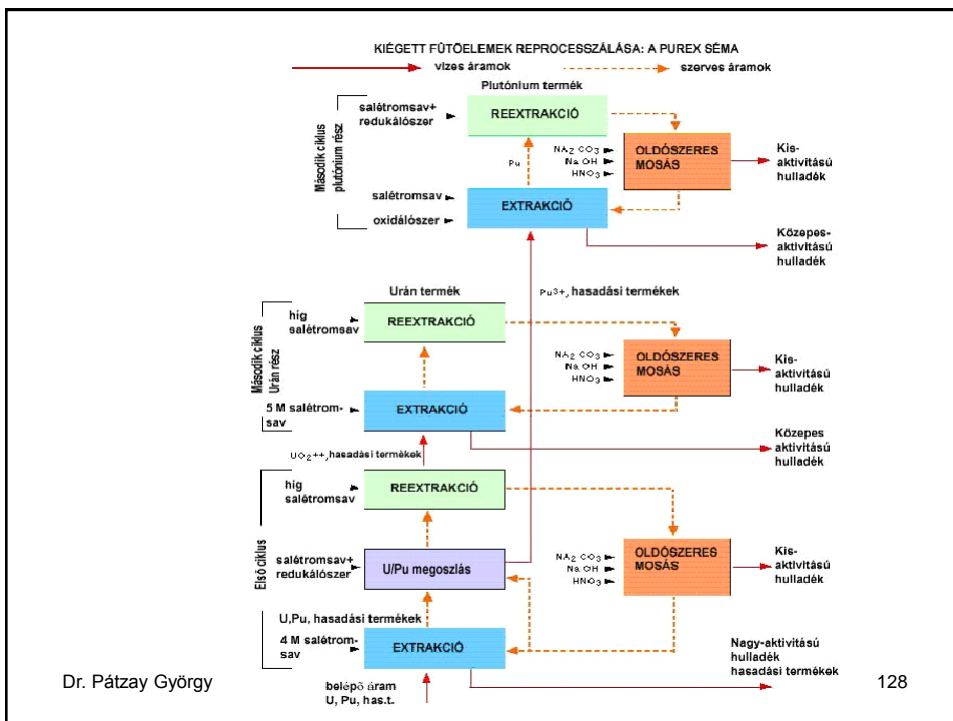
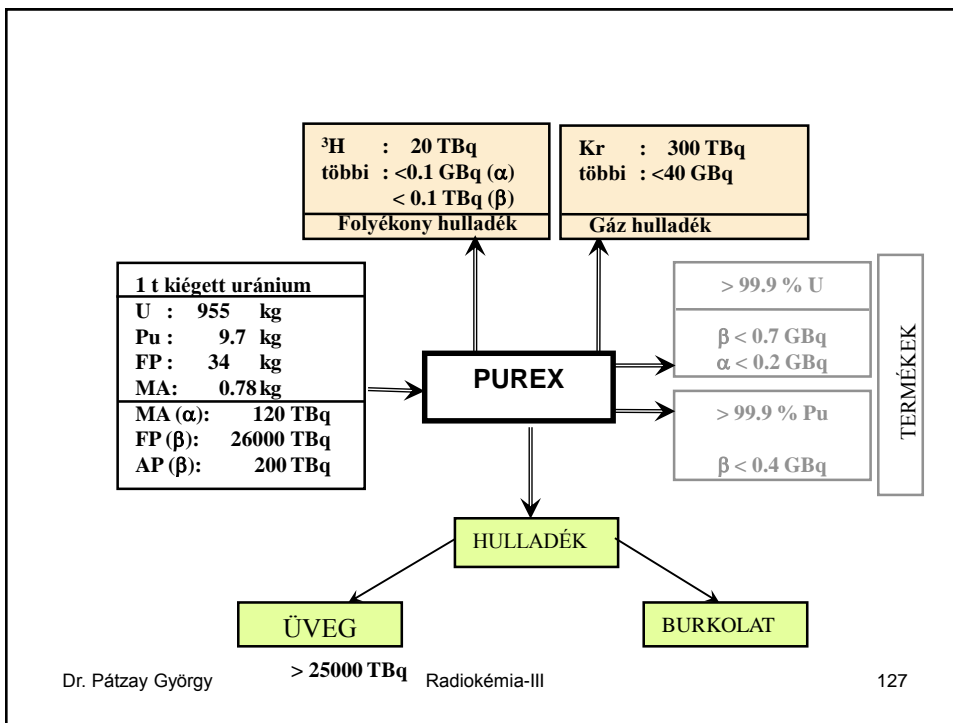


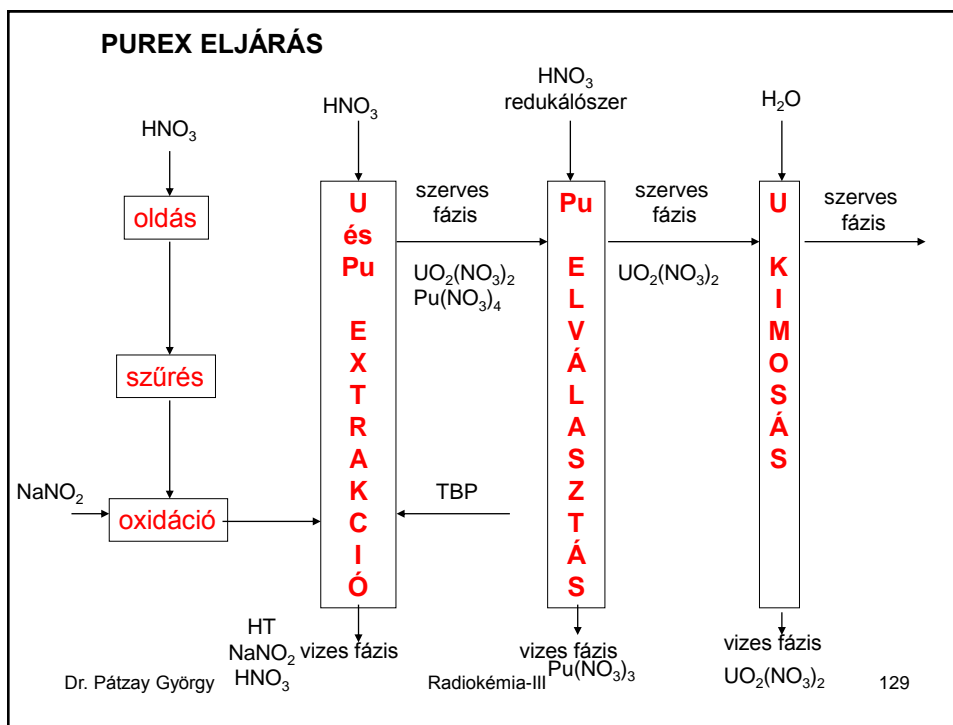
Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

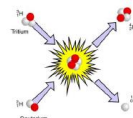
124







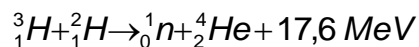
ÚJ NUKLEÁRIS TECHNOLÓGIÁK



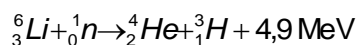
Alapvetően két technológia a fúzió és a gyorsítóval működő energiaerősítő jöhet szóba. Mindkét technológia esetén $\eta \sim 1$, azaz a „tüzelőanyag” teljes „elégetésre” kerül és lényegében végtelen nagyságú készlet áll rendelkezésre.

1. Fúzió

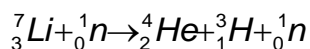
- A legegyszerűbb esetben komprimált trícium (^3H) „égéséről” beszélünk:



A radioaktív tríciumot lítiumból fejlesztik a keletkezett neutron segítségével:



További trícium szükséges a veszteségek pótlására a következő reakcióban keletkezik:



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

130

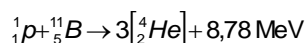
Itt a neutron nem veszik el és **egyensúly érhető el**, amikor a keletkező és fuzionáló trícium mennyisége megegyezik. Ennek a reakciónak **nagy hátránya** az, hogy a keletkező energia zömét **a gyors (14 MeV) neutronok** hordozzák, melyek a környező atommagokkal ütközve **felaktíválják a reaktor szerkezeti anyagát!**

•A következő fúziós reakció kevesebb felaktívált anyagot generál:



Itt mintegy 6%-ban neutronok is keletkeznek a ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + 3,27 \text{ MeV}$ reakcióban. Itt az a probléma, hogy a ${}^3_2\text{He}$ nem áll rendelkezésre csak a Holdon! Ezért valószínűtlen, hogy onnan ezer-tonna számra a Földre szállítsák!

•Ezért olyan **exoterm fúziós reakcióra van szükség, mely nem termel neutronot és így inherens módon inaktív reakció termékek keletkeznek. Egy ilyen reakció:**



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

131

Sajnos ez a fúziós reakció nem „gyújtható be” mágnesesen komprimált berendezésben (Tokamak) és inerciával komprimált fúzióban sem. Ez a reakció sem gamma- sem neutron-sugárzást nem generál, mindkét reakció komponens negy mennyiségben áll rendelkezésre! Ezen reakció energetikai hasznosítására azonban forradalmian új műszaki megoldás szükséges!

Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

132

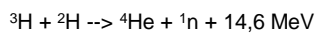
A NUKLEÁRIS ENERGIATERMELÉS: II. MAGFÚZIÓ JELENLEG

Energia nyerhető a könnyű atommagok egyesítésével, fúzióval is. Fúzió -az atomok egyesülnek:

- energia nyerhető, ha a mag kicsi
- a nagyobb magok stabilabbak
- ez adja a nap energiáját.

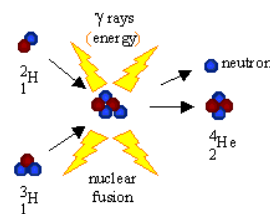
Jelenleg a hidrogén izotópjait próbálják fúzióáztatni.

- $d + d \rightarrow t + p + 4,04 \text{ MeV}$
- $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n + 3,27 \text{ MeV}$
- $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17,58 \text{ MeV}$
- ${}^3\text{He} + d \rightarrow {}^4\text{He} + p + 18,34 \text{ MeV}$
- Zum Vergleich: $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 4,1 \text{ eV}$



Dr. Pátzay György

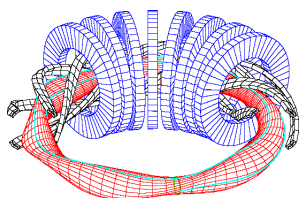
Radiokémia-III



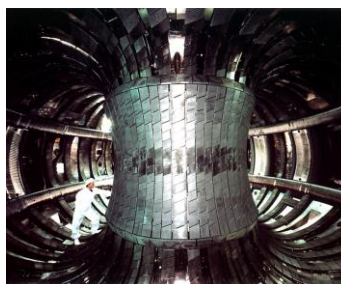
133

A fúziós folyamatra jellemző:

- óriási energia szabadul föl
- a fúzió termékei nem radioaktívak és nem szennyezők
- a fúzió elindításához nagy aktiválási energia szükséges, az ütközés eléréséhez $4 \cdot 10^7 \text{ K}$ hőmérséklet elérés szükséges!



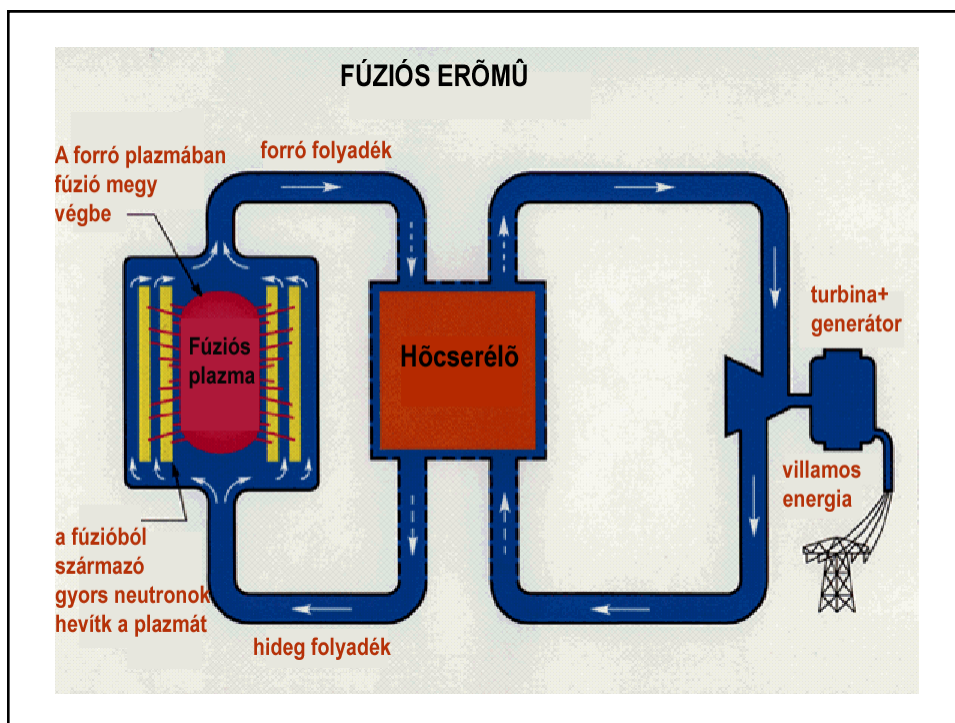
A stellarator
Dr. Pátzay György



A tokamak

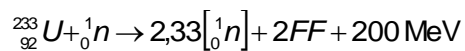
Radiokémia-III

134

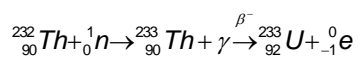


2. Fisszió

A gyorsítóval meghajtott energiaerősítő (EA) a következő hasadási reakciót hasznosítja:

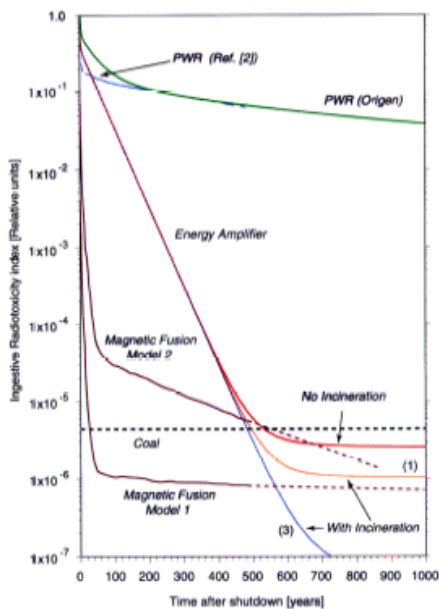


és a hasítást egy nagy energiájú gyorsítóban előállított neutronok hozzák létre. Akárcsak a fúzió esetében, a természetben nem létező ${}^{233}\text{U}$ magokat természetes tóriumból szaporítással állítjuk elő egy másodlagos neutronnal:

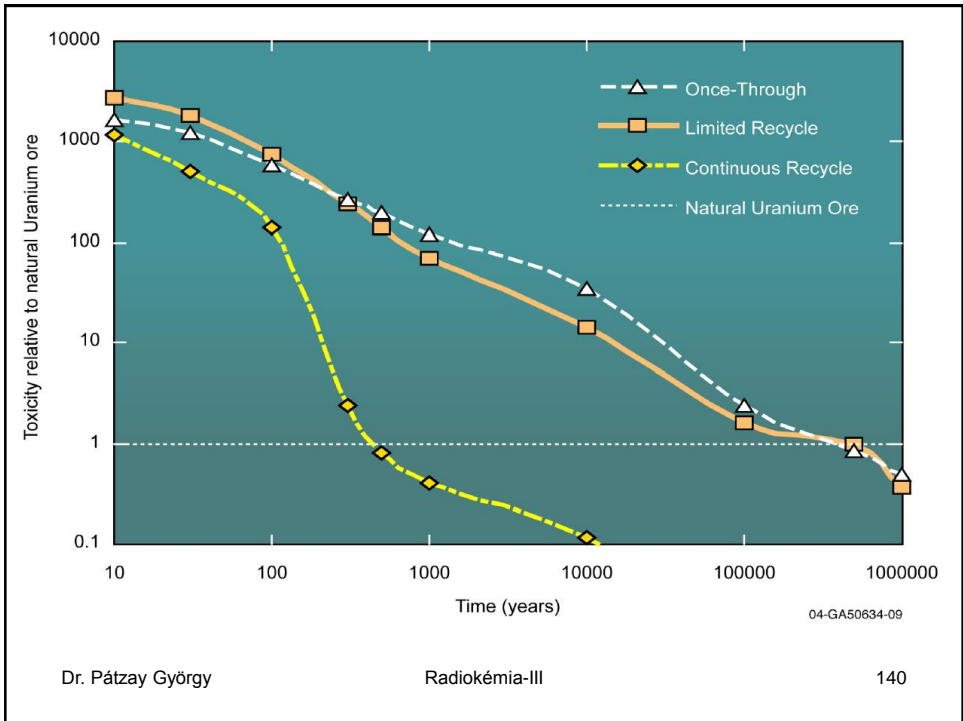
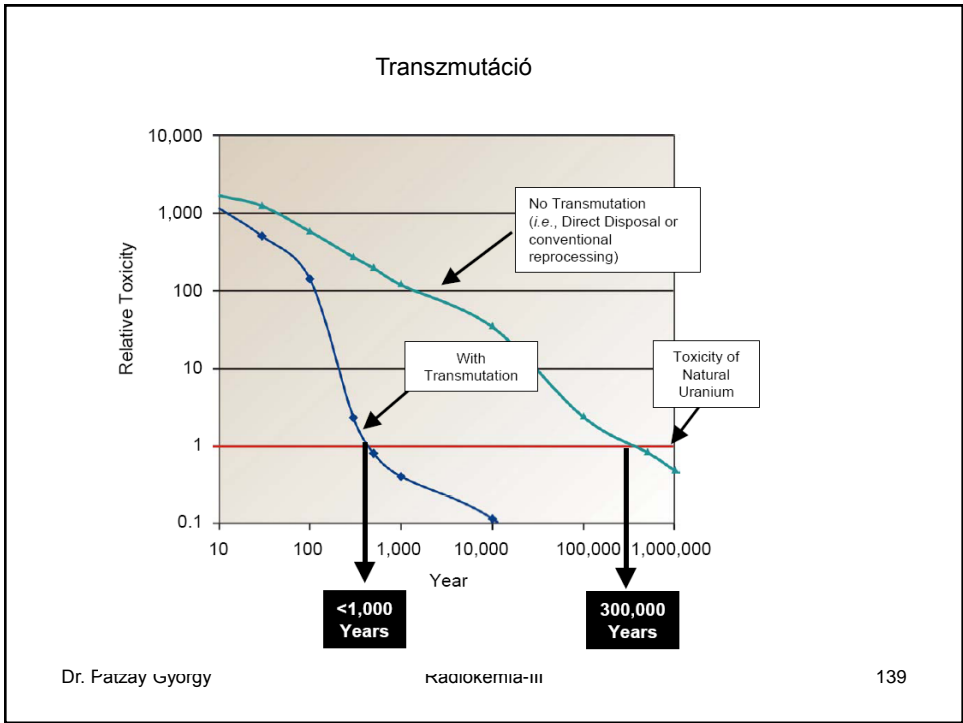


Ebben a reakcióban a neutronokat külső forrásból kell pótolni a gyorsítóval, mert a hasadáskor keletkezett 2,33 neutronból 2 neutron kell a szaporító ciklushoz és a mindenkori veszteségek miatt a 0,33 neutron nem elégséges a kritikusság fenntartásához! Egyensúly áll be, ha az elhasadt és keletkezett ^{233}U mennyisége ugyanannyi! **Az energiaerősítő képes teljesen elhasítani a neutronbefogásos megreakciókkal létrejövő transzuránokat is, melyek a ^{233}U neutron adszorpciójával jöttek létre (a hasadások ~5%-a). Tehát az energiaerősítő zárt aktinida ciklussal rendelkezik, teljes mértékben elhasítja a ^{232}Th üzemanyagot és így $\eta \sim 1$! A keletkezett hulladékban csak hasadvány izotópok vannak, melyek nagy aktivitásúak ugyan, de jóval rövidebb élettartamúak mint a transzuránok!**

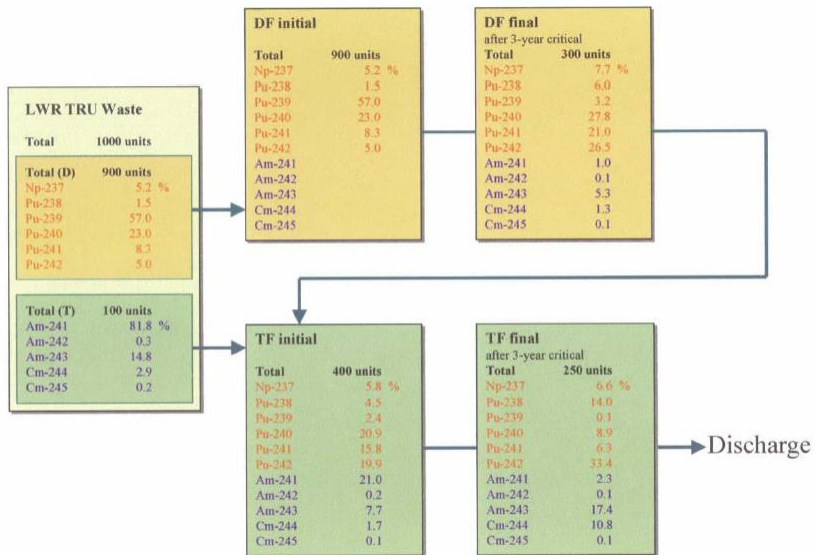
Úgy a fúziós, mint az energiaerősítő nukleáris energiatermelő berendezések szubkritikus rendszerek és így a zónaolvadás lehetetlen! Mindkét berendezésben a termelt elektromos energia 5-30%-át recirkulálják a plazma felfűtésére, vagy a gyorsító üzemelésére.



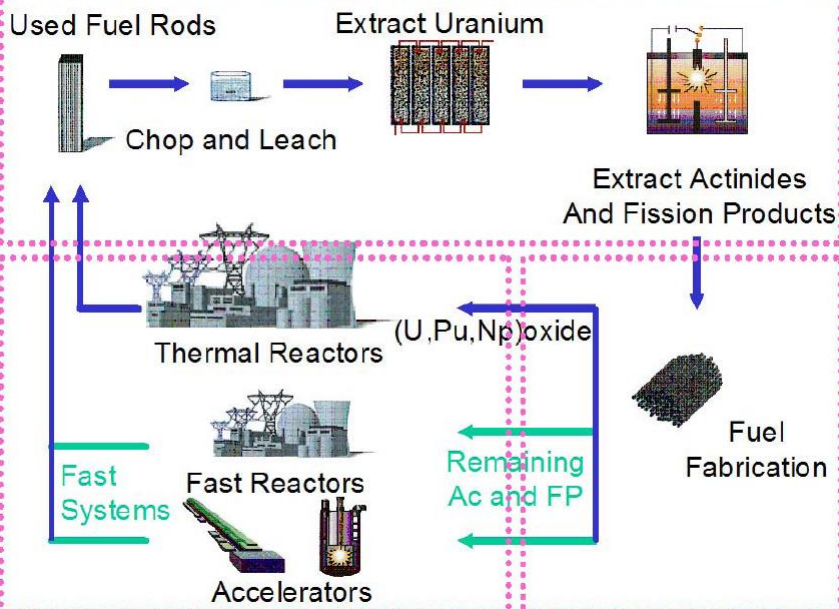
Az ábrán a könnyűvízes hasadási reaktorokban (LWR), a fúzió és az energiaerősítő rendszerekben keletkező radioaktív hulladékok radiotoxicitását mutatjuk be az idő függvényében. Az energiaerősítő rendszerekben a keletkezett radioaktív hulladékok mennyisége kevesebb és gyorsabban bomlik, a fúziós rendszerekben pedig nagyságrendekkel kisebb.



Calculations Show > 97% Fissile Pu, and ~75% Total TRU, Destruction



slide # 22 of 26



Dr. Pátzay György

Radiokémia-III

142