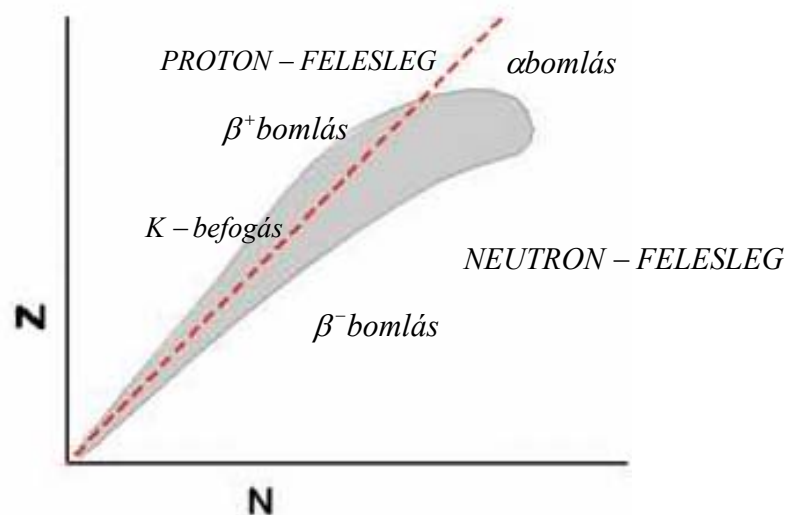


A MAGTÁBLÁZATOK

A radiokémikusok magtáblázata tartalmazza az összes ismert radioaktív izotópot is.

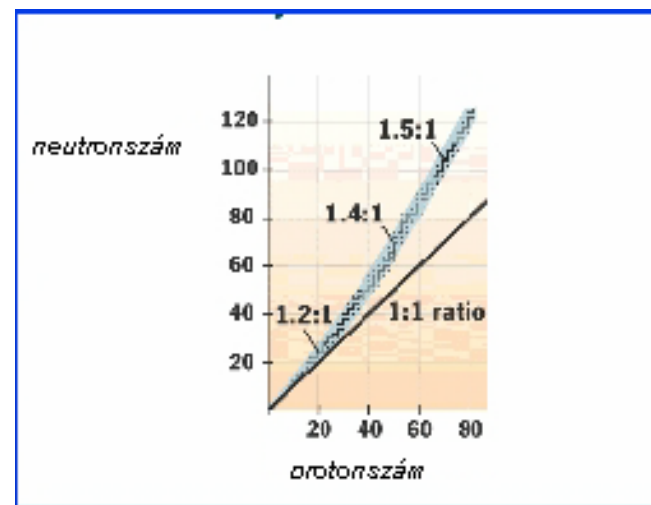
- Több mint 2300 ismert nuklid és több mint 400 izomer ismert.
- Csak 287 izotóp stabil vagy természetben előforduló radioaktív izotóp.
- A magtáblázat számos információt tartalmaz.



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



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 elektronhéjakhoz.

Bizonyítékok a mágikus stabilitásra:

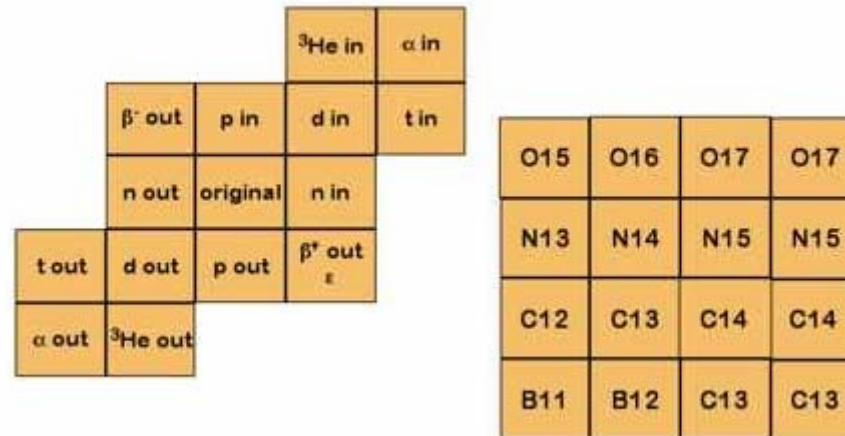
- A mágikus proton- és neutronszámmal rendelkező elemeknek több természetes izotópja létezik. Pl. az ónnak (Sn $Z=50$) 10 természetes izotópja van, az indiumnak (In $Z=49$) csak 2.
- Sok radioaktív mag alfa-bomlással bomlik, mert a hélium mag (2 proton+2 neutron) különösen stabil.
- Számos radioaktív 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					Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
							Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

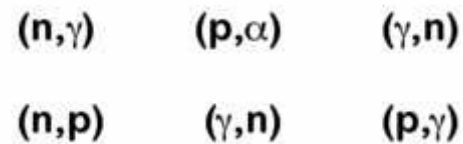
A radioaktív elemek

MAGÁTALAKULÁSOK (TRANSZMUTÁCIÓK)

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

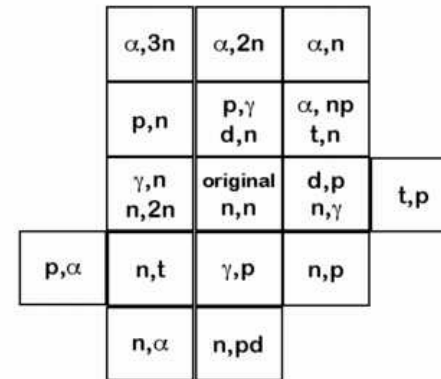
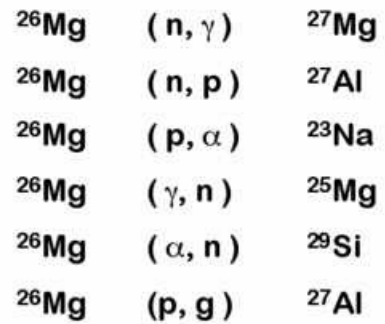


A magreakciókat általában $X(\text{részecske be, részecske ki})Y$ egyenlet formájában írjuk fel. Például:



Szomszédos magok egy lehetséges átalakulási sémája.

Például:



1 AMU=931 MeV, kötési

$$\text{kötési-energia} = \Delta m_{AMU} \times 931 \text{MeV} / amu$$

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

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

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

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

$$8p \ 8 \times 1,00782504 = 8,0620032$$

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:

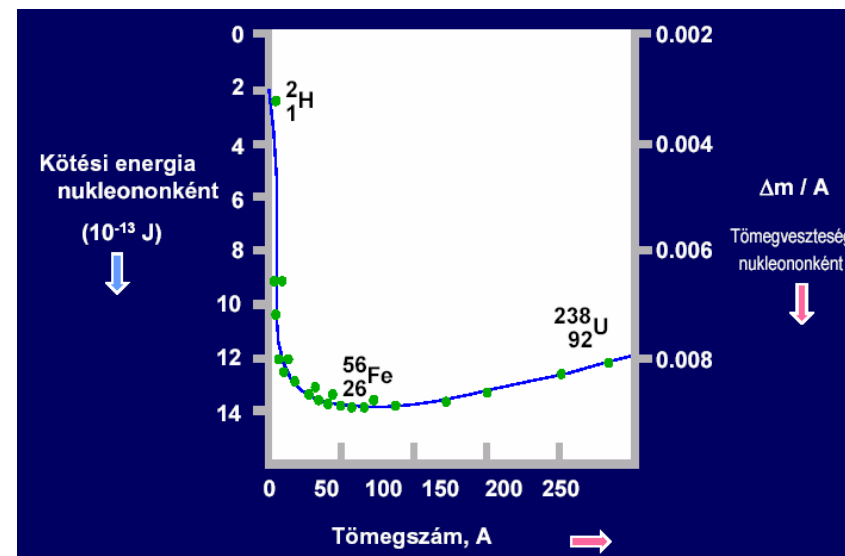
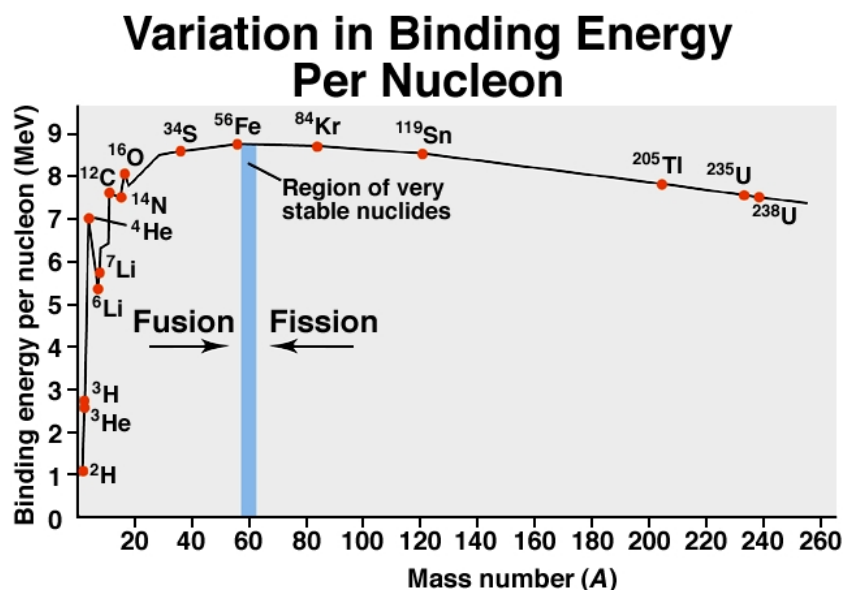
$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

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 eljünk 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:

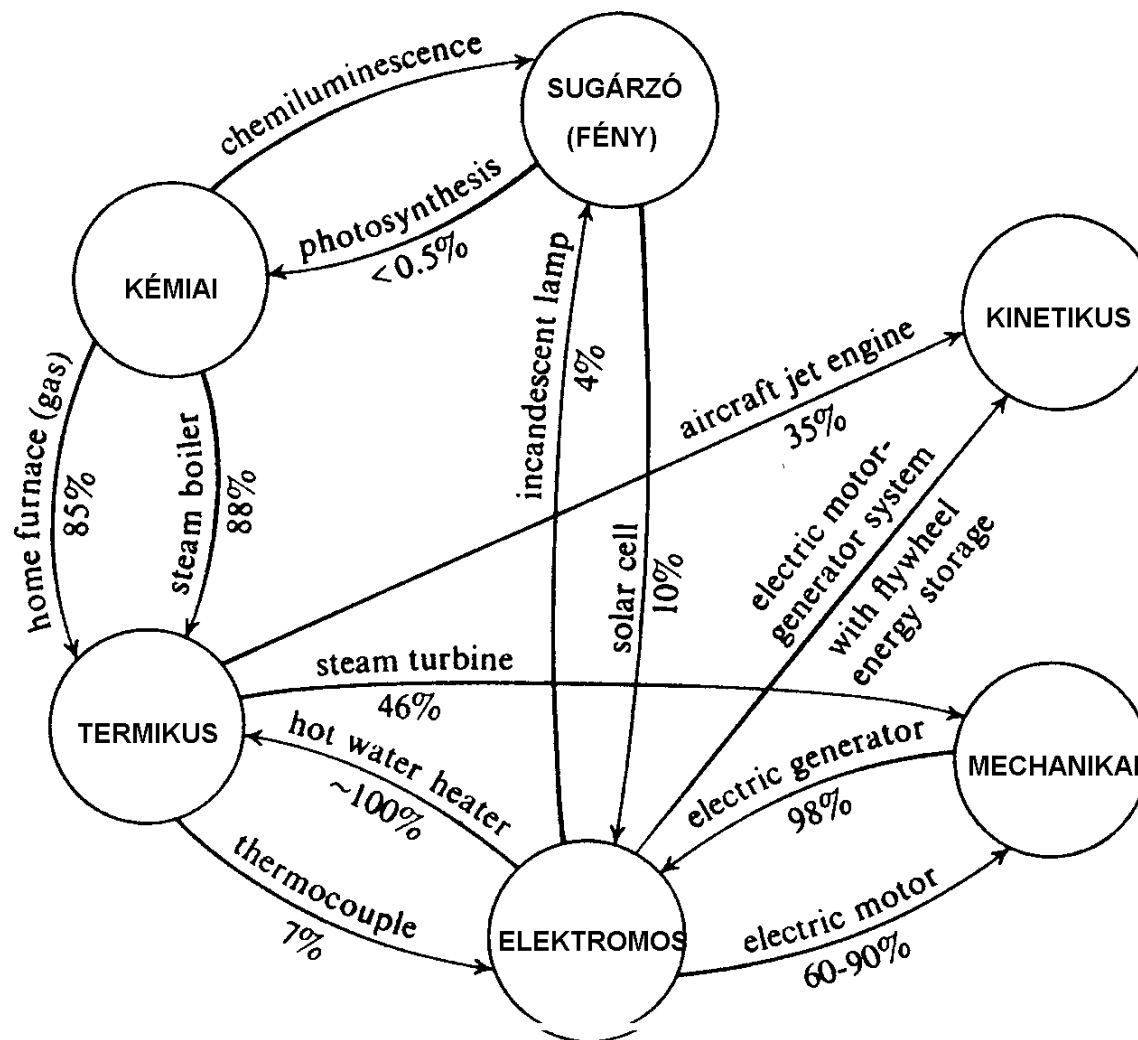
Maghasadással: atomok elhasadása--> ez történik a hasadási atomreaktorokban.

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

A JÖVŐ ENERGIATERMELÉSE

Szénkonverzió	Gáz, folyékony szénhidrogén, alkohol stb. előállítása szénből
Olajpala Csúcsüzemű gázturbina MHD	Petróleum-típusú tüzelőanyag előállítása 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 biomassa átmeneten keresztül egyéb energiává alakítanak
Hidrogén	Hidrogén termokémiai előállítása, mint energiaszállító közeg

ENERGIAFAJTÁK ÁTALAKÍTÁSI HATÁSFOKAI



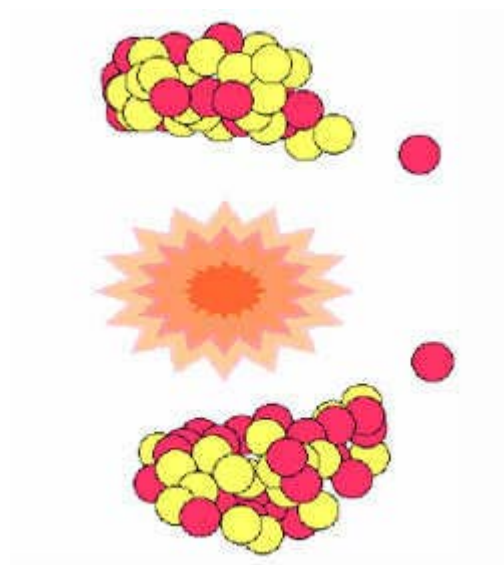
Erőmű	Sorszám	Tüzelőanyag	Villamos teljesítmény, MW
<i>Bakonyi Erőmű Rt.</i>			
• Ajkai Erőmű	1	szén	102
• Inotai Erőmű	2	szén	52
• Inotai Gázturbina		tüzelőolaj	170
<i>Budapesti Erőmű Rt.</i> hat telephely	3	szénhidrogén	262
<i>Dunamenti Erőmű Rt.</i>	4	szénhidrogén	1740
• Dunamenti Gázturbina		szénhidrogén	386
<i>EMA Power</i>	5	szénhidrogén	69
<i>Hernádvíz Vízerőmű Rt.</i>	6	víz	4,4
<i>Mátrai Erőmű Rt.</i>	9	lignit	836
<i>MVM tartalék erőművek</i>			
• Litér	7	tüzelőolaj	120
• Lőrinci	8	tüzelőolaj	170
• Sajószöged	13	tüzelőolaj	120
<i>Paksi Atomerőmű Rt.</i>	10	nukleáris	1851
<i>Pécsi Erőmű Rt.</i>	11	szén	190
<i>Powergen Rt.</i>	12	szénhidrogén	42,4
<i>Csepel II. Erőmű (Powergen)</i>	12	szénhidrogén	396
<i>Borsodi Energetikai Kft.</i>			
• Borsodi Erőmű	14	szén	137
• Tiszapalkonyai Erőmű	15	szén	200
<i>AES Tisza II. Erőmű Rt.</i>	16	szénhidrogén	860
<i>Tiszavíz Vízerőmű Kft.</i>			
• Kisköre	17	víz	28
• Tiszalök	18	víz	11,4
<i>Vértesi Erőmű Rt.</i>			
• Bánhidai Erőmű	19	szén	100
• Oroszlányi Erőmű	20	szén	235

A világ országainak fosszilis tüzelőanyag égetéséből származó légszennyező emissziói

Régió/ország	1995			2000		
	CO ₂ (mint karbon) Tt	SO ₂ Gt	NO _x Gt	CO ₂ (mint karbon) Tt	SO ₂ Gt	NO _x Gt
Világ	2041	48742	24368	2420	52804	27472
OECD országok	1084	24357	12724	1200	21248	12696
Ausztrália	47	1378	564	52	1542	632
Kanada	32	902	391	37	1067	454
Franciaország	13	388	156	20	528	242
Németország	97	2749	1198	104	2886	1292
Olaszország	48	1088	571	57	1294	695
Japán	117	226	271	124	235	282
Norvégia	0	2	1	0	2	1
Spanyolország	25	724	301	30	769	376
Svédország	2	36	19	3	52	30
Anglia	62	1687	740	63	1597	782
USA	566	13250	7580	620	8950	6750
Nem OECD tagországok	957	24385	11643	1220	31555	14776
Afrika	85	2474	1018	107	3106	1278
Latin Amerika	46	900	537	60	1169	698
Ázsia**	111	2775	1278	170	4247	1956
Kína	205	6269	2410	283	8646	3324
India	97	2965	1148	149	4555	1763
FÁK országok	271	5463	3540	305	6153	3987
Kelet Európa	89	2593	1083	94	2733	1142

** Kína és India kivételével

A NUKLEÁRIS ENERGIATERMELÉS: I. MAGHASADÁS



Neutron

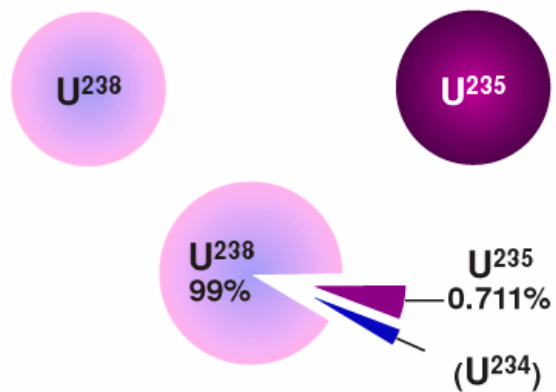
$^{235}_{92}\text{U}$



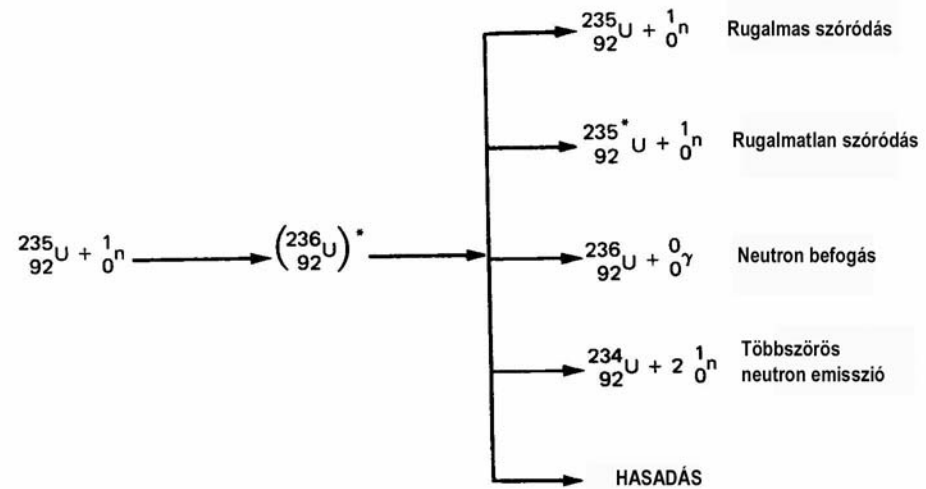
$^{91}_{36}\text{Kr}$

Neutrons

$^{142}_{56}\text{Ba}$



Az urán izotópjai



Az U-235 neutronnal végzett besugárzásának lehetséges kimenetei

Az U-235 besugárzása neutronokkal

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

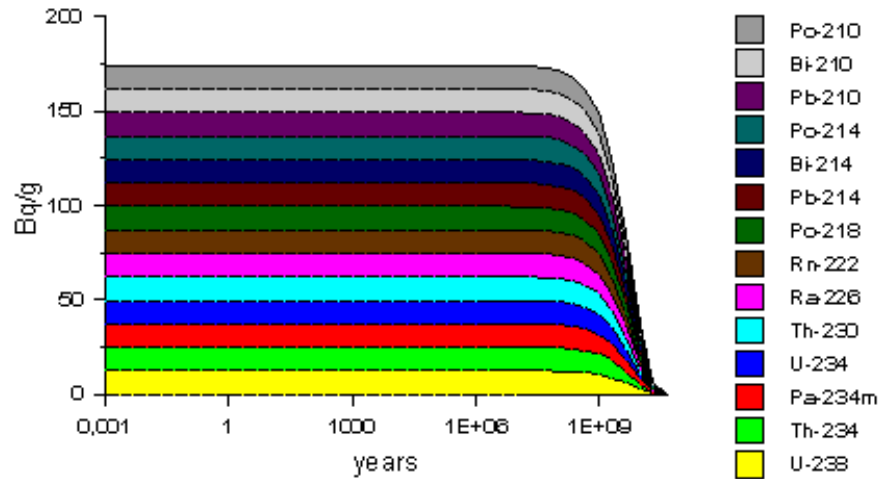
	U-234	U-235	U-238	Összesen
atom %	0.0054%	0.72%	99.275%	100%
tömeg %	0.0053%	0.711%	99.284%	100%
aktivitás %	48.9%	2.2%	48.9%	100%
1 g természetes U aktivitása	12,356 Bq	568 Bq	12,356 Bq	25,280 Bq

A tengervízben $\sim 0,003$ ppm, kőzetekben uraninit (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%.

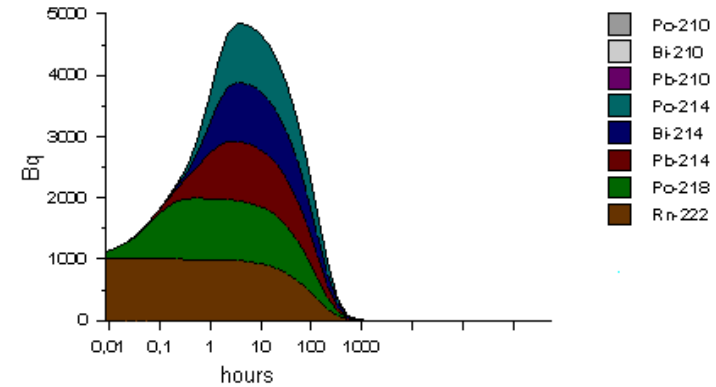
Uranium Ore Activity

ore grade 0.1% U (stacked diagram)



Radon and Progeny Activity

for 1000 Bq Rn-222 (stacked diagram)

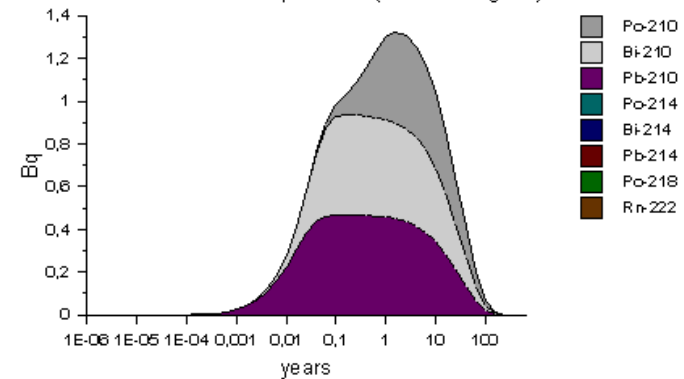


A radon és bomlástermékeinek aktivitása

Természetes urán fajlagos aktivitása: egyensúly áll fenn a bomlási sorban

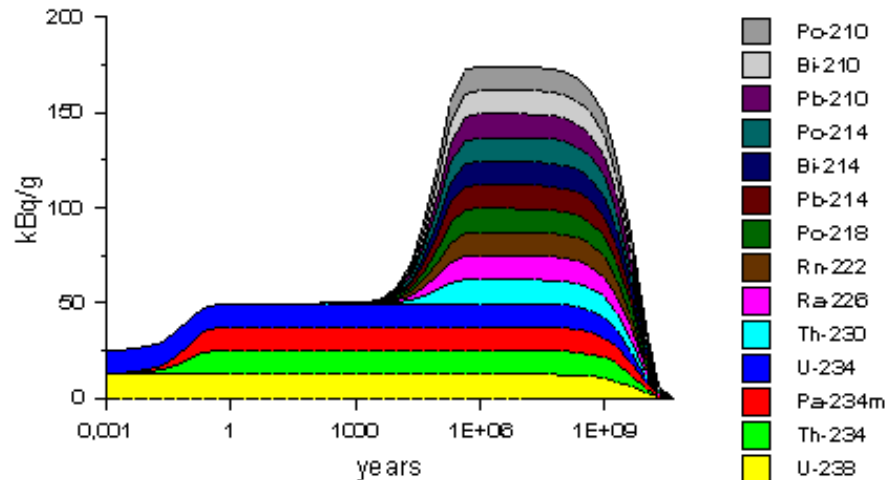
Long Lived Radon Progeny Activity

for 1000 Bq Rn-222 (stacked diagram)



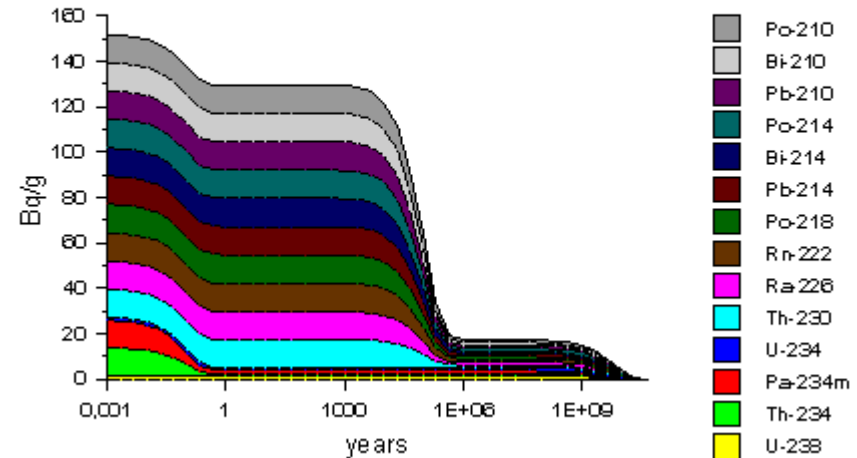
Natural Uranium Activity

(stacked diagram)



Uranium Mill Tailings Activity

ore grade 0.1% U; extraction 90% (stacked diagram)



A természetes uránból nyert U_3O_8 fajlagos aktivitása

Kezdetben csak a 2 U izotóp van jelen. Néhány nap múlva a ^{231}Th , ^{234}Th és ^{234m}Pa bomlástermékek megjelennek és ezután több mint 10000 évig állandó a fajlagos aktivitás. Ezután a ^{238}U és a ^{235}U többi bomlástermékei is megjelennek.

Uránbánya meddő fajlagos aktivitása

Néhány hónapon belül a ^{234}Th és a ^{234m}Pa izotópok a maradék ^{238}U tartalomnak megfelelő szintre bomlanak el. Ezután a hulladék aktivitás szintje az ércnek megfelelő szint 85%-nak megfelelő szinten több mint 10000 évig állandó marad. Néhány százezer év után az ^{234}U - ^{230}Th csökkenése miatt az összaktivitás jelentősen lecsökken.

**A kiégett fűtőelem nehézfém összetétele (tömeg%)
(kezdetben 3,5%-ra dúsított 39 GWd/tHM kiégés 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%

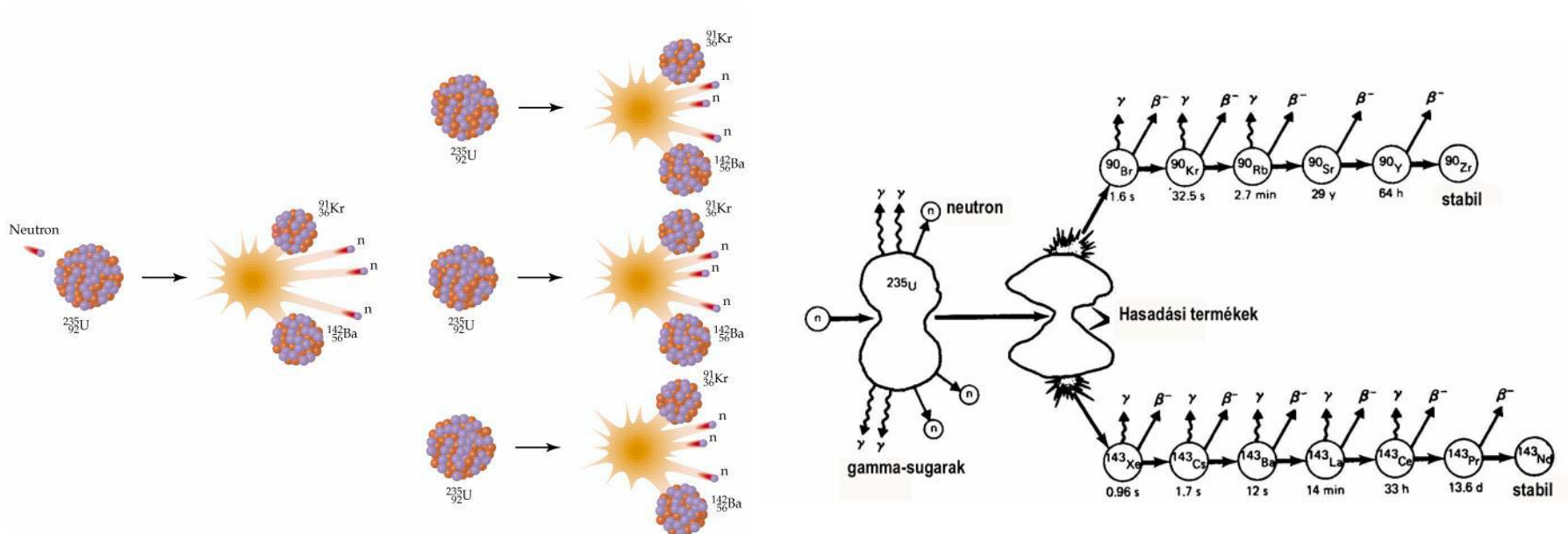
**Természetes uránból 3,5%-ra dúsított dúsított uránhoz
tartozó szegényített urán összetétele**

	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%
1 g 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 fönmaradjon. Ez a nukleáris energiatermelés alapja.

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

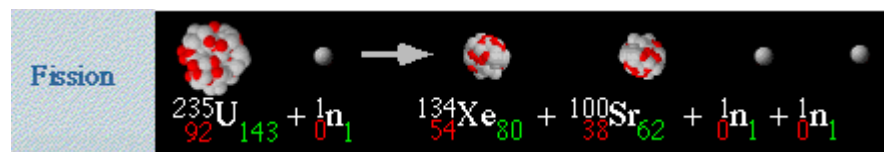
KRITIKUS TÖMEG: a hasadóanyag legkisebb tömege, mely fenntartja a láncreakciót. Ez ^{235}U esetében 56 kg.

HASADÁSI ENERGIA

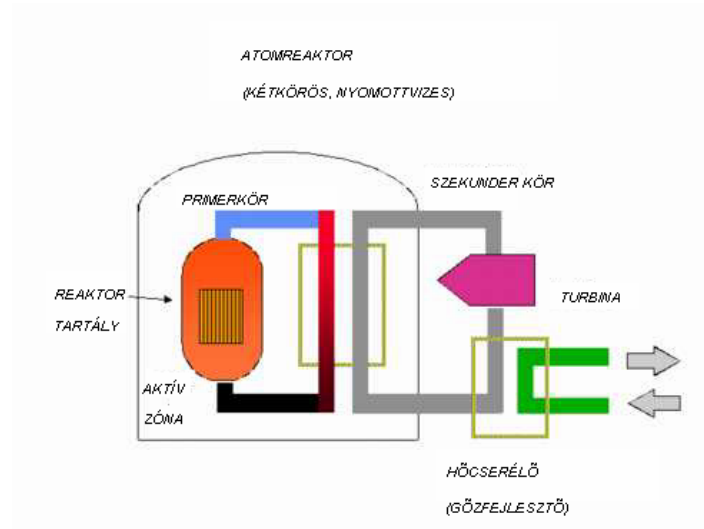
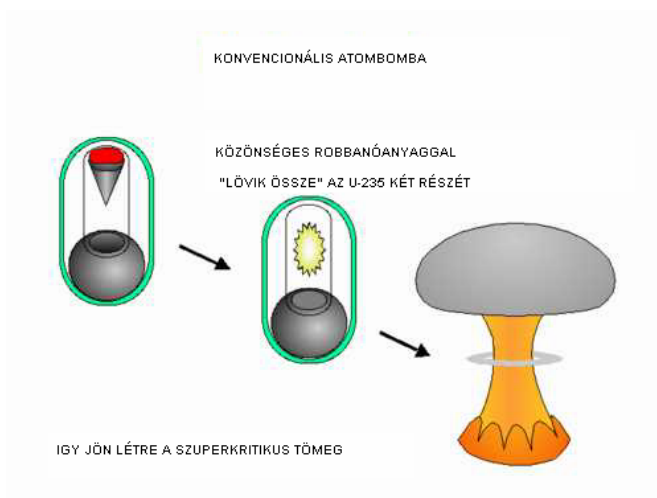
A hasadási reaktorok zömében jelenleg az ^{235}U az alkalmazott hasadóanyag.

Egy lehetséges hasadási reakció: $^1_0\text{n} + ^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{92}_{54}\text{Kr} + ^{141}_{38}\text{Ba} + 3\ ^1_0\text{n} + \text{energia}$

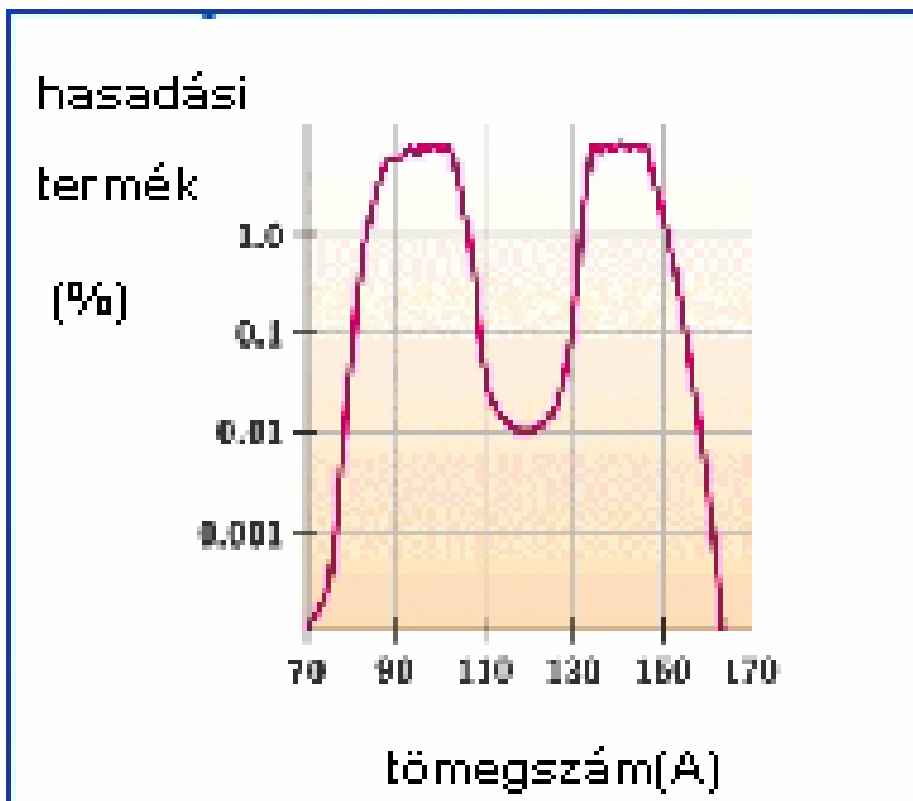
vagy



Egy urán atom elhasadásakor kb. 200 MeV energia szabadul föl. 100 g ^{235}U elhasadása $80 \cdot 10^{12}$ tonna TNT energiájának megfelelő energiát képvisel.



- 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.

Einstein összefüggés:

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

E energia (J)

m tömeg (kg)

c a fény sebessége $2,997925 \times 10^8$ m/s

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}U hasadásának példáján:

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

^{235}U 235,043915 g

^{140}Cs 139,917110 g

^{92}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:

$$E = \frac{0,182 \cdot (2,998 \cdot 10^8)^2}{235,044 \cdot 100} = 1,636 \cdot 10^{13} \text{ J} = 16,36 \text{ TJ}$$

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

$$16,36 \cdot 10^{12} \cdot 0,0072 / 235,044 = 501,148 \cdot 10^6 \text{ J/g} = 501,15 \text{ MJ/g urán}$$

Tehát 1g természetes uránból mintegy 501 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).

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

fúzió $\text{D}+\text{T}=\text{He}$

$$1\text{kg He} \rightarrow 6,7 \cdot 10^8 \text{ MJ}$$

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

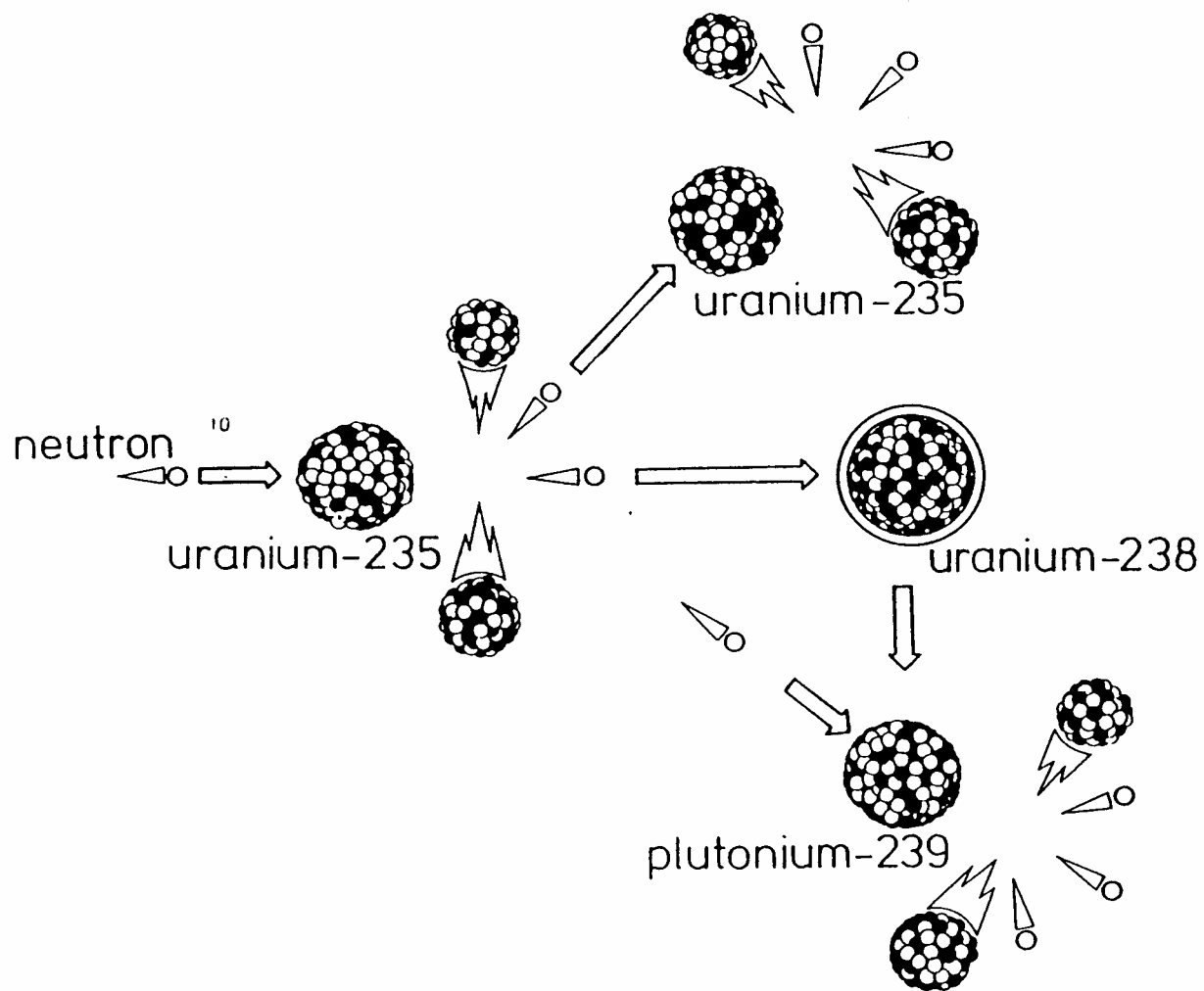
$^{235}\text{U} + ^{238}\text{U} \rightarrow 50\text{x}$ több mint az összes fosszilis tüzelőanyag készlet, jelenlegi fogyasztás mellett 10000 évig elég

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

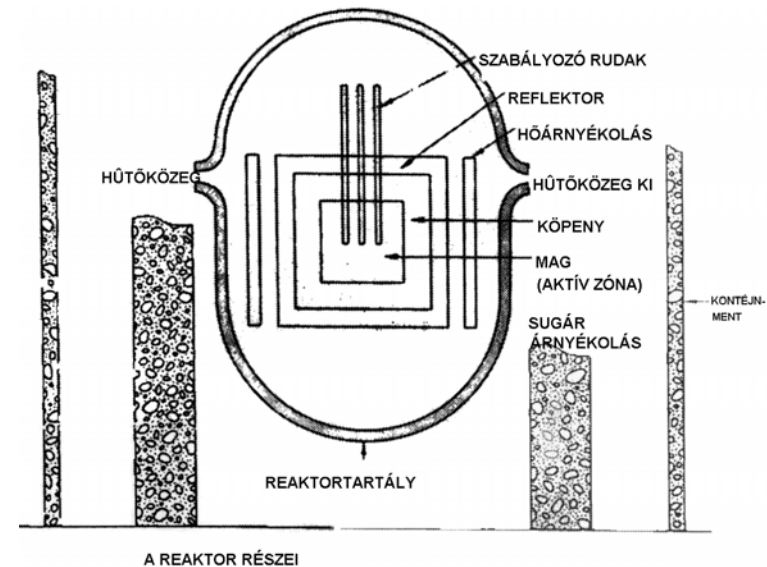
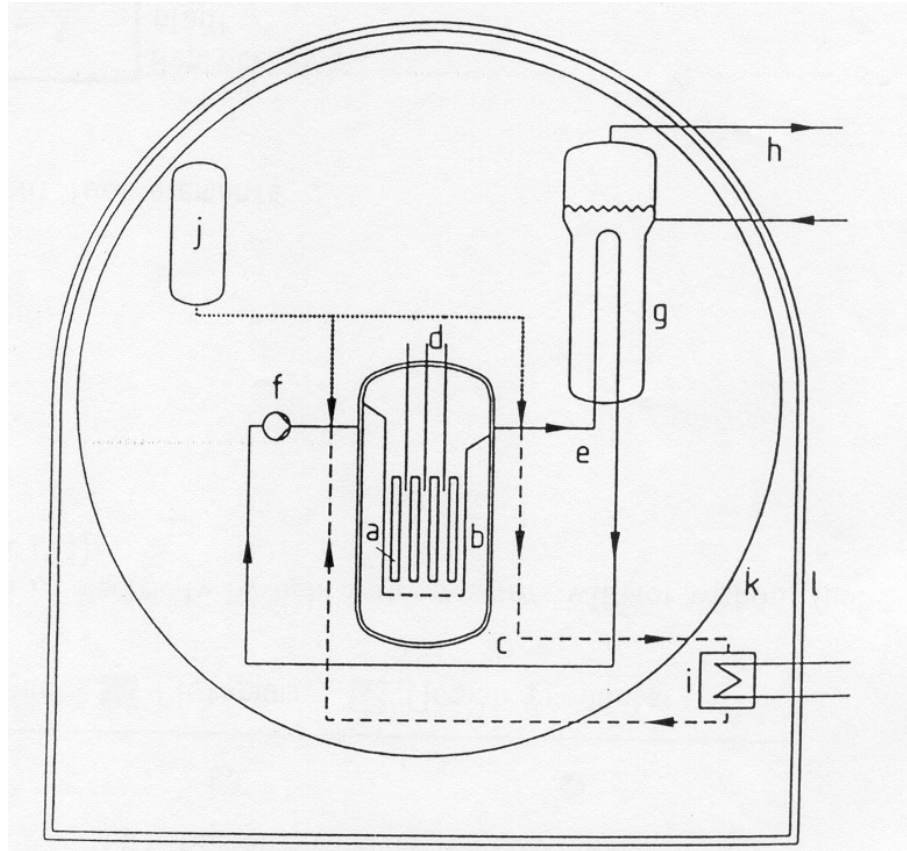
- Urán készletek költség szerinti megoszlása:
 - <\$130/kg
 - » = 1.7×10^6 tonna (U.S)
 - » = 5.4×10^6 tonnas (többi ország)
 - \$130/kg < \$260/kg
 - » 1.3×10^6 tonna (U.S)
 - » = 12.2×10^6 tonna (többi ország)

HASADÓANYAGOK

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



AZ U-235 LÁNCREAKCIÓ ÉS A PU-239 KÉPZŐDÉSE



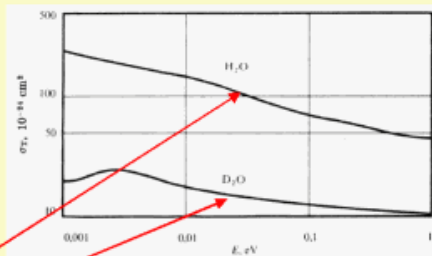
Egy nyomottvizes atomerőmű (PWR) főbb részei

- a) Aktív zóna, b) reflektor, c) reaktor tartály, d) szabályozó rudak, e) hűtővíz fővezeték, f) fő keringtető szivattyú, g) gőzfejlesztő, h) gőzvezeték a turbinához, i) bomlási hő elvonó rendszer, j) akkumulátor, k) biztonsági tartály, l) kontéjnement



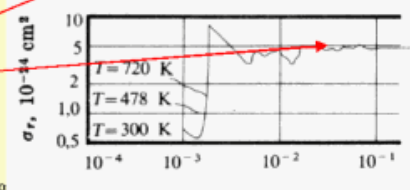
Vergleich zwischen H₂O, D₂O und C

- Einfangwirkungsquerschnitt für thermische Neutronen :



- Abschätzung:

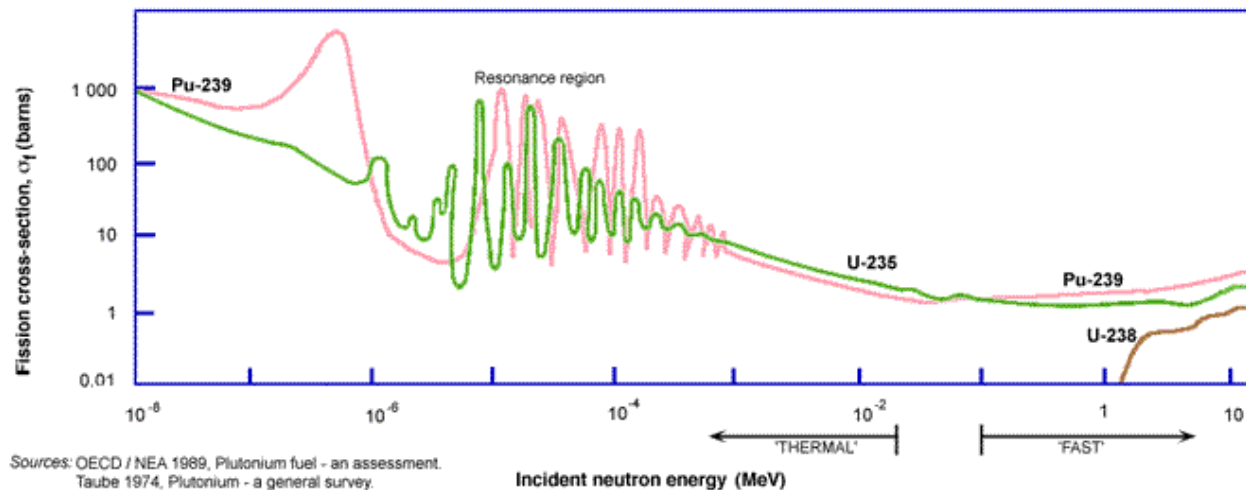
- H₂O: $100 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$
- D₂O: $20 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$
- C: $5 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$



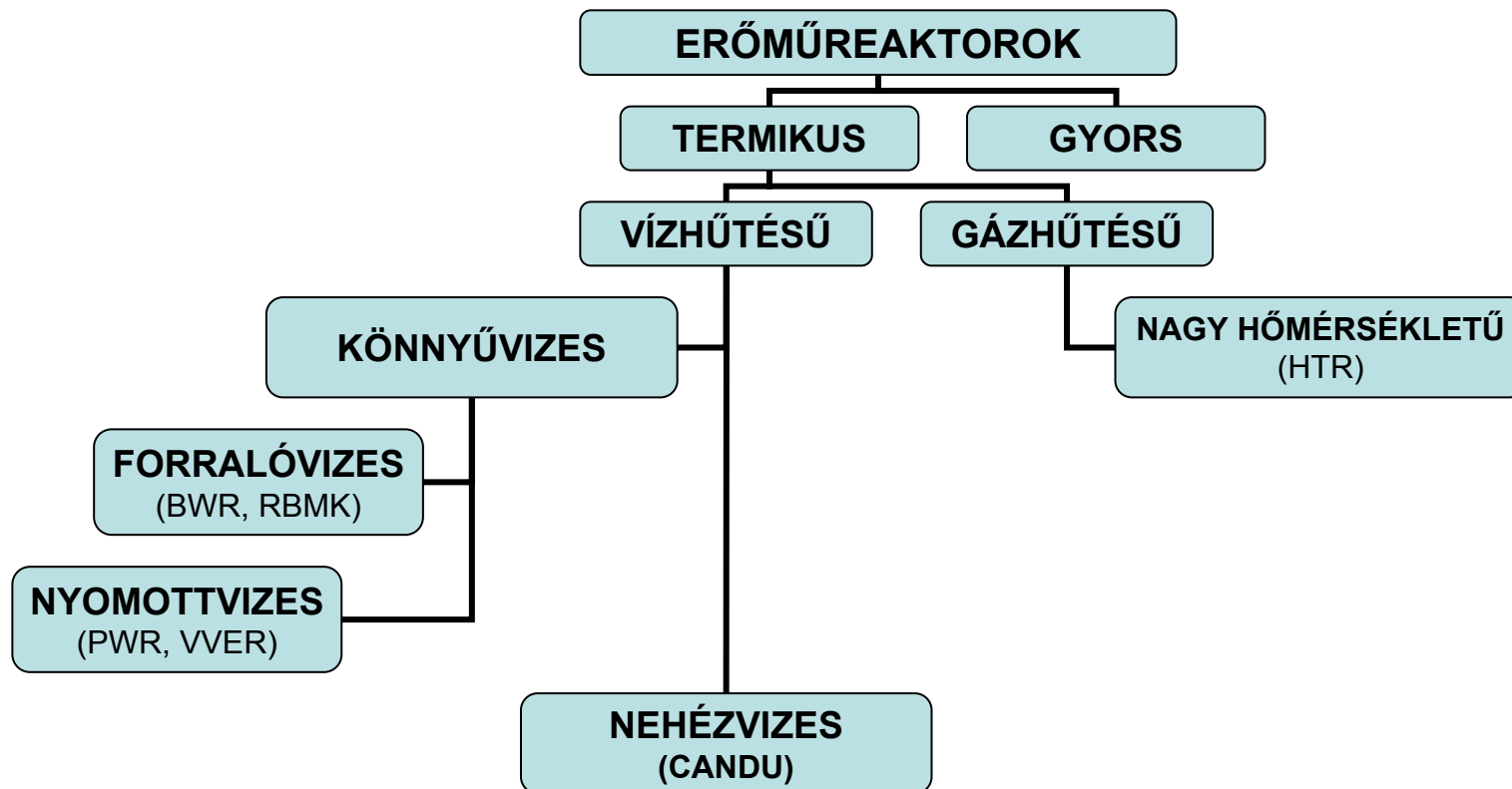
26.03.2002

Kern- und Entso

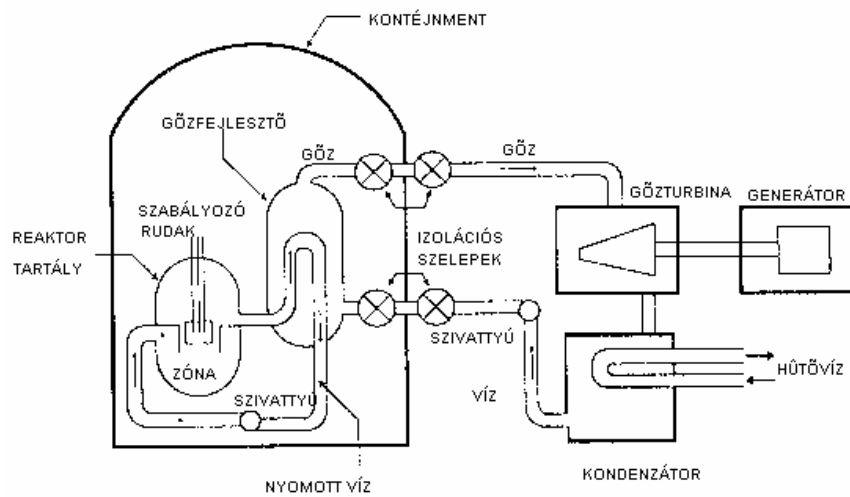
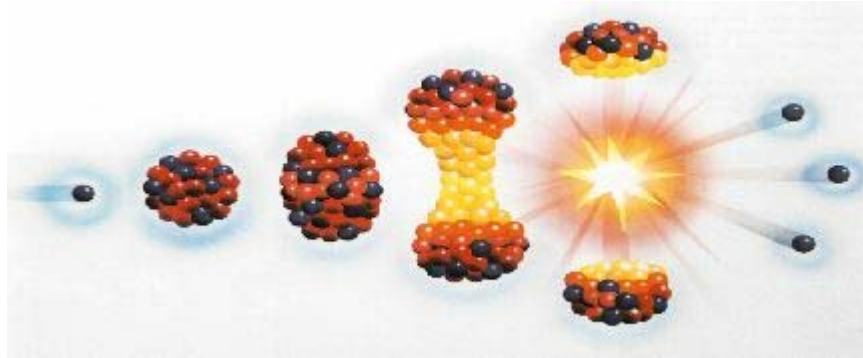
NEUTRON CROSS-SECTIONS FOR FISSION OF URANIUM AND PLUTONIUM



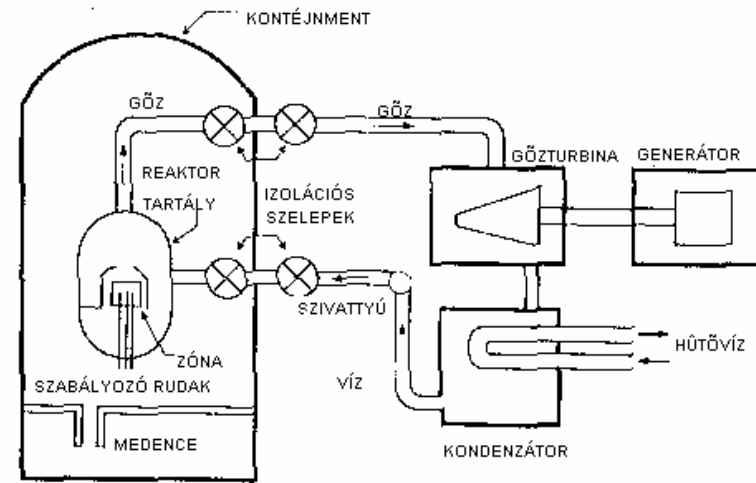
Sources: OECD / NEA 1989, Plutonium fuel - an assessment.
 Taube 1974, Plutonium - a general survey.
 1 barn = 10^{-28} m^2 , 1 MeV = $1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$



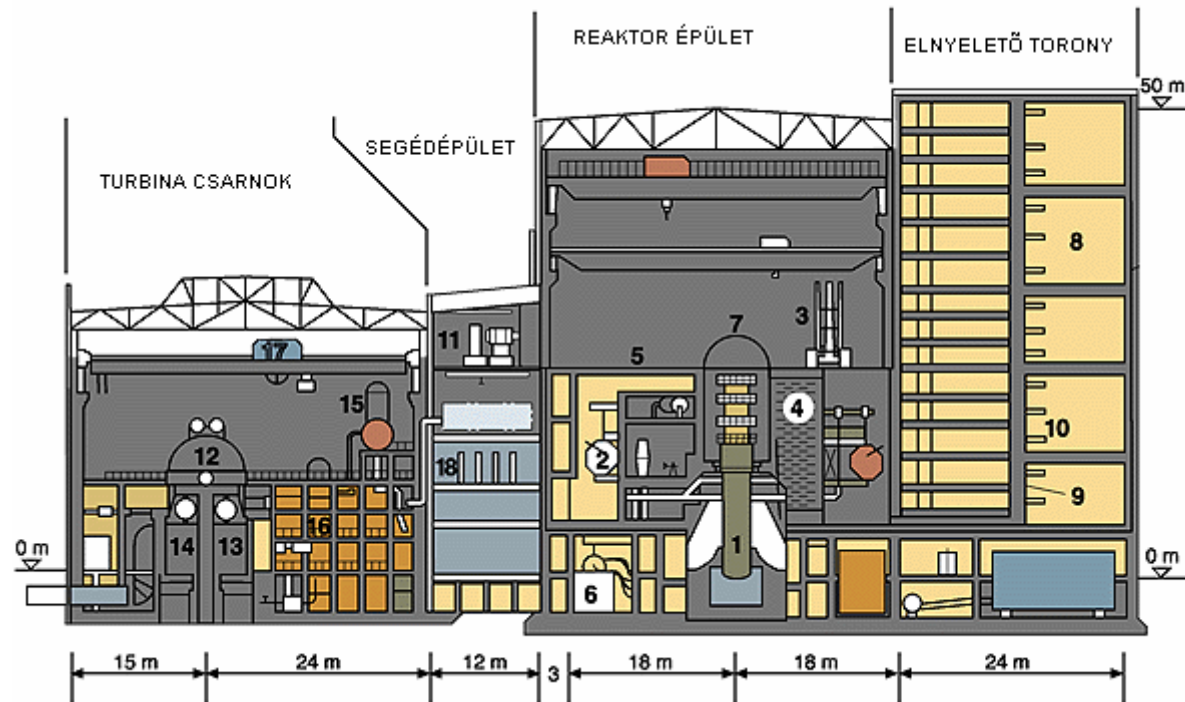
Paksi atomerőmű 4 db 440 MW_e VVER-440/213, 1 fűtőelem l=2,4 m, 99%Zr 1%Nb
 1 kötegben 126 db fűtőelemrúd van, az aktív zónában 312 db köteg (42 t UO₂ 3,5% ²³⁵U)



Nyomottvizes (PWR) atomerőmű



Forralóvizes (BWR) atomerőmű



- 1 Reaktor tartály 2 gőzfejlesztő 3 fűtőelem töltő 4 kiégett 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
 daru 18 elektromos berendezések, vezérlések

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

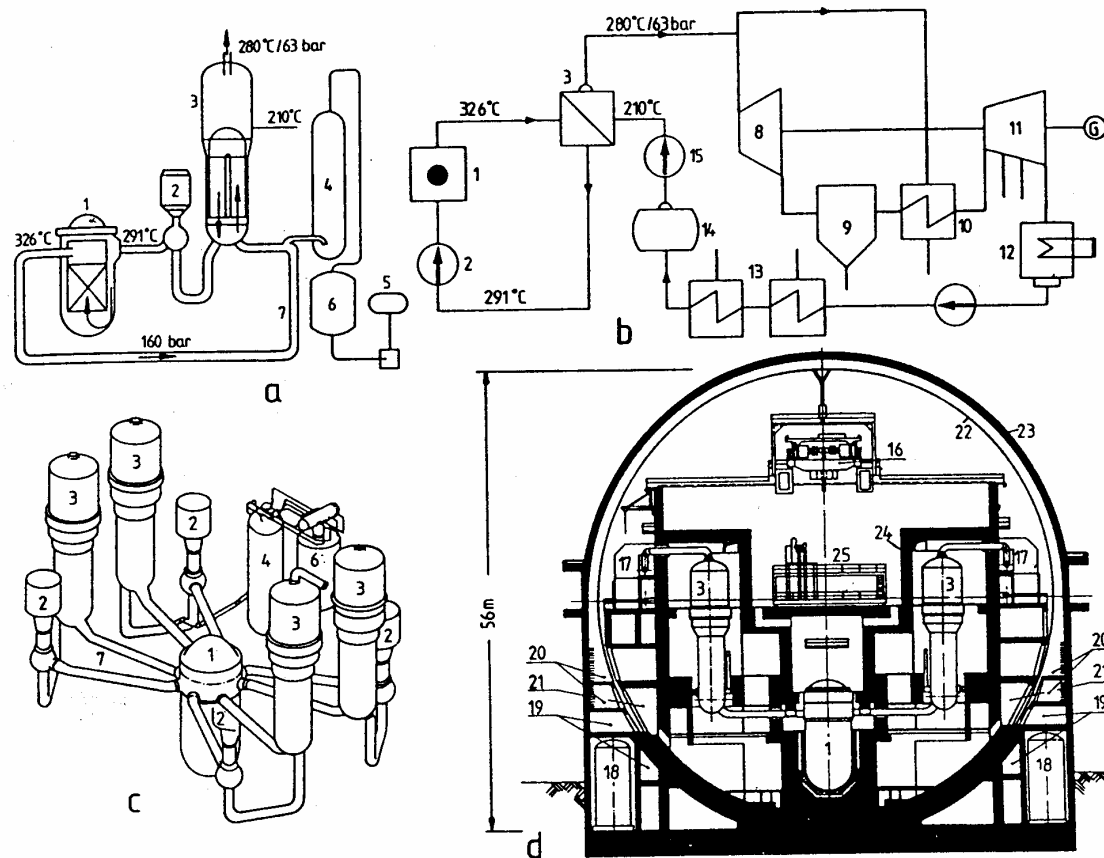
Generator Rated Power (MW) 220 Output Voltage (kV) 15.75 Cooling water/hydrogen

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

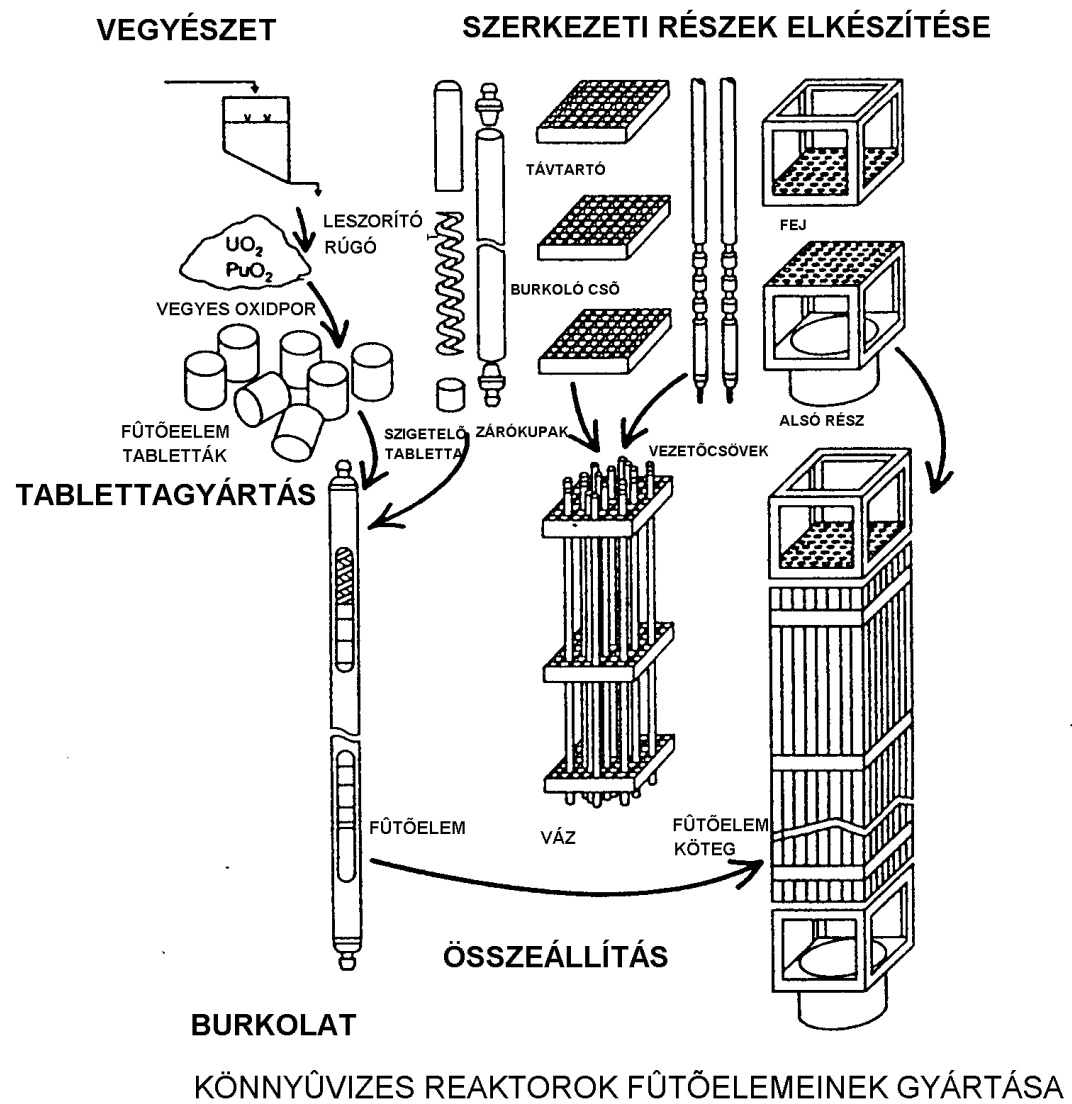
Erômûreaktorok jellemzô

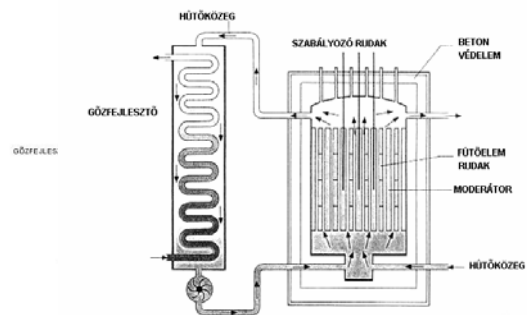
Jellemzô	egység	PWR	BWR	Candu	RBMK	FBR(gyszap)	AGR(adv. gas cooled)	HTR(high temp. reakt)
Moderátor	-	H ₂ O	H ₂ O	D ₂ O	H ₂ O, C	-	C	C
Hûtôközeg	-	H ₂ O	H ₂ O	D ₂ O	H ₂ O	Na	CO ₂	He
Hasadóa-nyag (szaporító anyag)	UO ₂	UO ₂	UO ₂	UO ₂	UO ₂	UO ₂ (PuO ₂)	UO ₂	UO ₂ (ThO ₂)
tipikus dúsítás	%	3,4	3,2	nincs	1,8	10	2	8-93
telj. sôsûség	MW/m ³	100	50-60	10-15	4	400	2	3
neutron energia	-	termikus	termikus	termikus	termikus	gyors	termikus	termikus
fûtôelem forma	-	rúd	rúd	rúd	rúd	rúd	rúd	golyó
fûtôelem burkolat	-	cirkaloy	cirkaloy	cirkaloy	cirkaloy, acél	acél	acél	C, Si
max. hûtôközeg hõm.	°C	326	285	305	285	540	650	750 (950)
hûtôközeg nyomás	bar	160	70	95	70	10	40	40-60
gôzjellemzô	°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 jellemzô	-	-	-	term. U	-	szaporítás	-	passzív biztonság



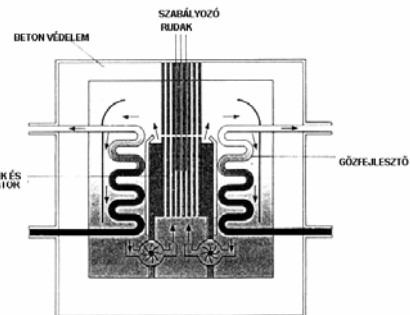
1. Reaktor tartály
2. Főkeringtető szivattyú
3. Hőcserélő-gőzfejlesztő
4. Nyomás szabályozó
5. Lefúvatási hűtő
6. Lefúvatási tartály
7. Primerkörü csővezetékek
8. Nagynyomású turbina
9. Vízelválasztó
10. Köztes túlhevítő
11. Közepes és alacsony nyomású turbina
12. Kondenzátor
13. Tápvíz előmelegítő
14. Tápvíz tartály
15. Tápvíz szivattyú
16. Daru
17. Légfúvók
18. Bórsavas víz tároló
19. csőalagút

Egy nyomottvizes atomerőmű (PWR) vázlata

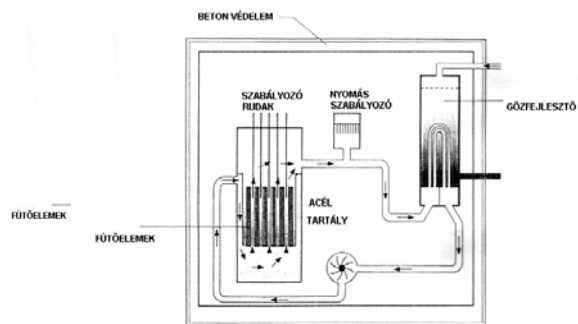




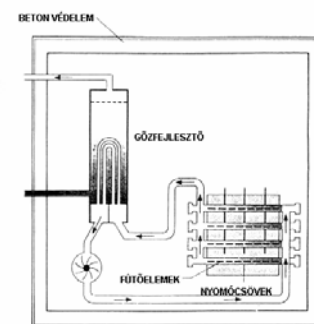
A MAGNOX REAKTOR (A FÜTŐELEMÉKET MAGNÉZIUM ÖTVÖZET BORÍTJA)



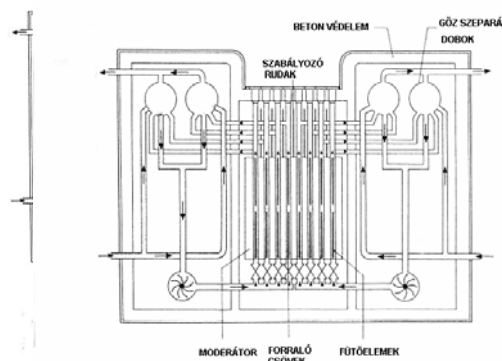
AZ ADVANCED GAS COOLED (AGR) REAKTOR



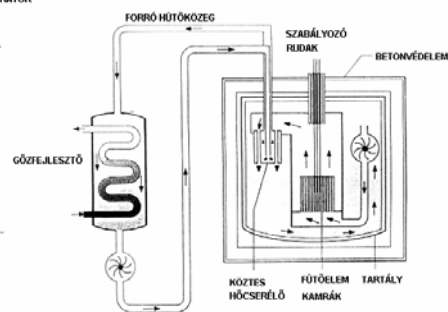
EGY NYOMOTTVIZES REAKTOR (PWR)



A KANADAI CANDU REAKTOR



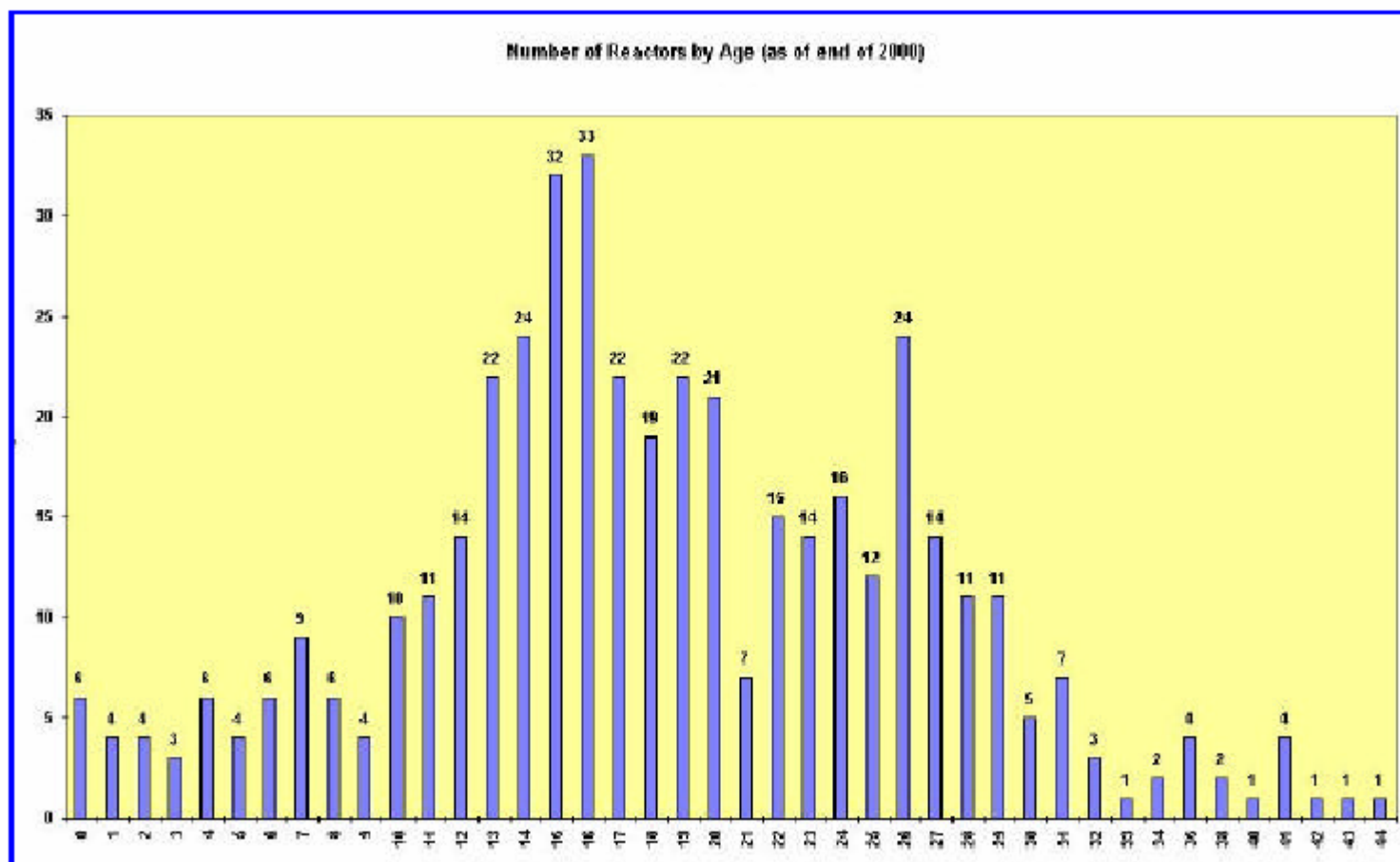
AZ 1986 ÁPRILIS 26-ÁN FELROBBANT CSERNOBÜLI RBMK-1000 REAKTOR



A GYORS REAKTOR

Erőművi reaktorok 2001

Reaktor típus	Ország	Szám	GW e	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			



Erőművi reaktorok kormegoszlása 2001

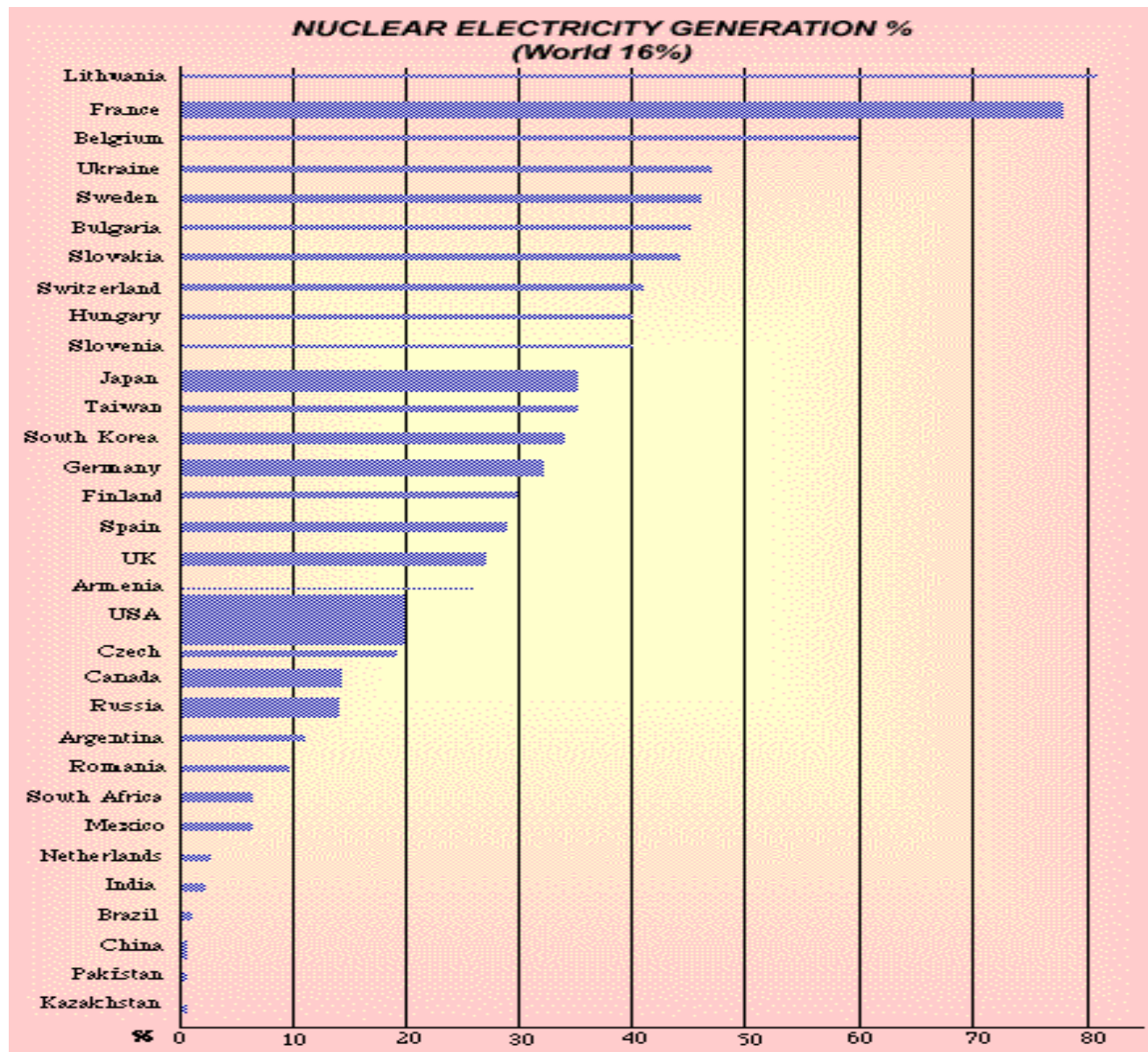
Country	NPP	Unit	Model	Start of operation	End of design lifetime*
Armenia	Armenian	1	270	1976	Shutdown in 1989 2015**
		2	270	1980	
Bulgaria	Kozloduy	1	230	1974	2004***
		2	230	1975	2005***
		3	230	1980	2010
		4	230	1982	2012
Czech Republic	Dukovany	1	213	1985	2015
		2	213	1986	2016
		3	213	1986	2016
		4	213	1987	2017
Finland	Loviisa	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
		2	213	2000	2030
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

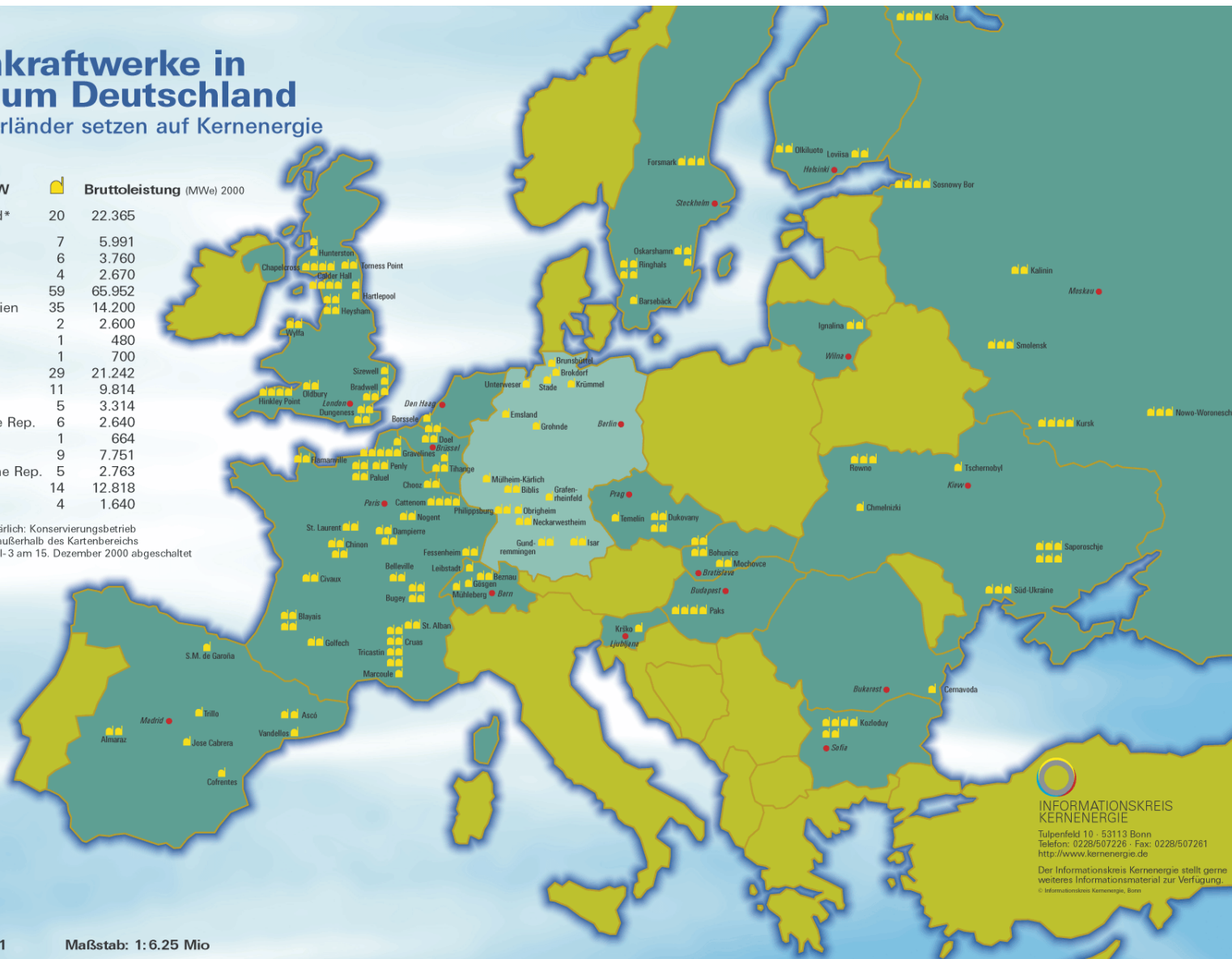


Kernkraftwerke in und um Deutschland

Nachbarländer setzen auf Kernenergie

Anzahl KKW	Bruttolleistung (MWe) 2000
Deutschland*	20 22.365
Belgien	7 5.991
Bulgarien	6 3.760
Finnland	4 2.670
Frankreich	59 65.952
Großbritannien	35 14.200
Litauen	2 2.600
Niederlande	1 480
Rumänien	1 700
Russland**	29 21.242
Schweden	11 9.814
Schweiz	5 3.314
Slowakische Rep.	6 2.640
Slowenien	1 664
Spanien	9 7.751
Tschechische Rep.	5 2.763
Ukraine***	14 12.818
Ungarn	4 1.640

* Mühlheim-Kärlich: Konservierungsbetrieb
 ** 9 Anlagen außerhalb des Kartenbereichs
 *** Tschernobyl-3 am 15. Dezember 2000 abgeschaltet



Stand: 2001 Maßstab: 1:6.25 Mio

INFORMATIONSKREIS
KERNENERGIE

Tulpenfeld 10 · 53113 Bonn
 Telefon: 0228/507226 · Fax: 0228/507261
<http://www.kernenergie.de>

Der Informationskreis Kernenergie stellt gerne
 weiteres Informationsmaterial zur Verfügung.
 © Informationskreis Kernenergie, Bonn

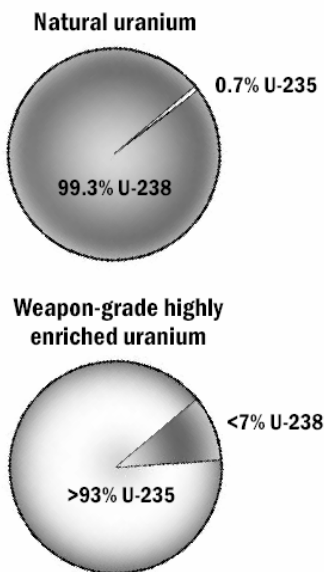


Figure 17

Implosion assembly principle

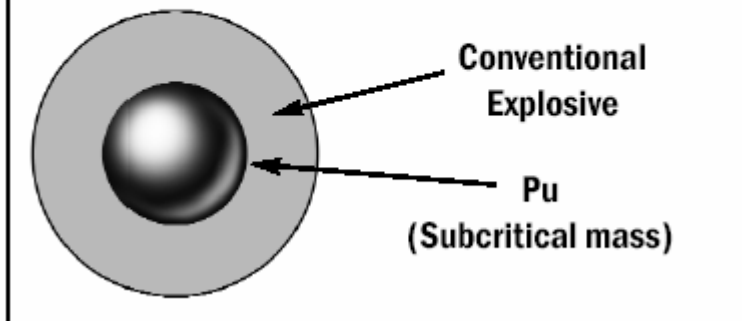


Figure 16
A 'Gun Assembly' nuclear weapon

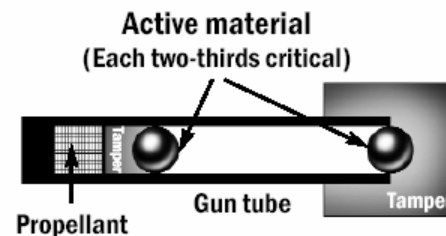
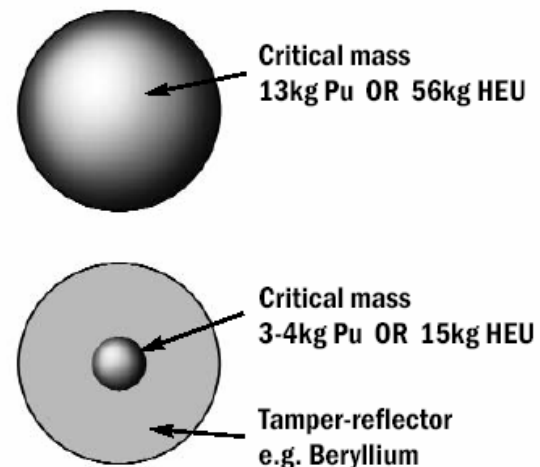


Figure 18

Use of a reflector / tamper



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

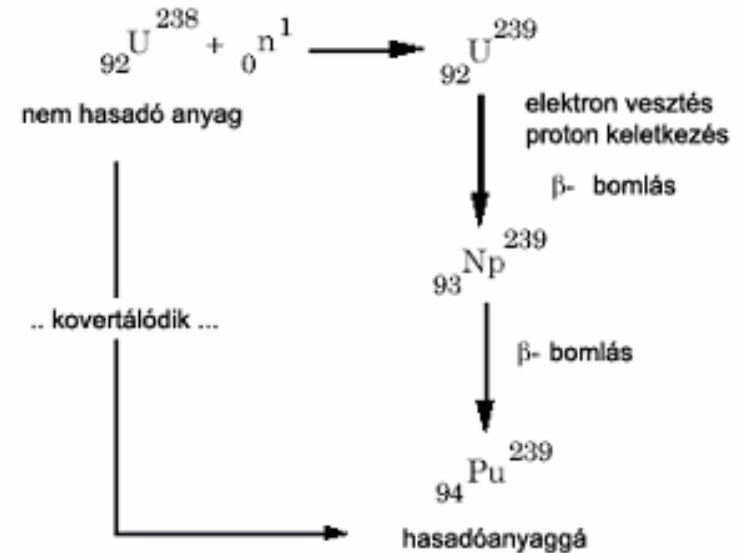
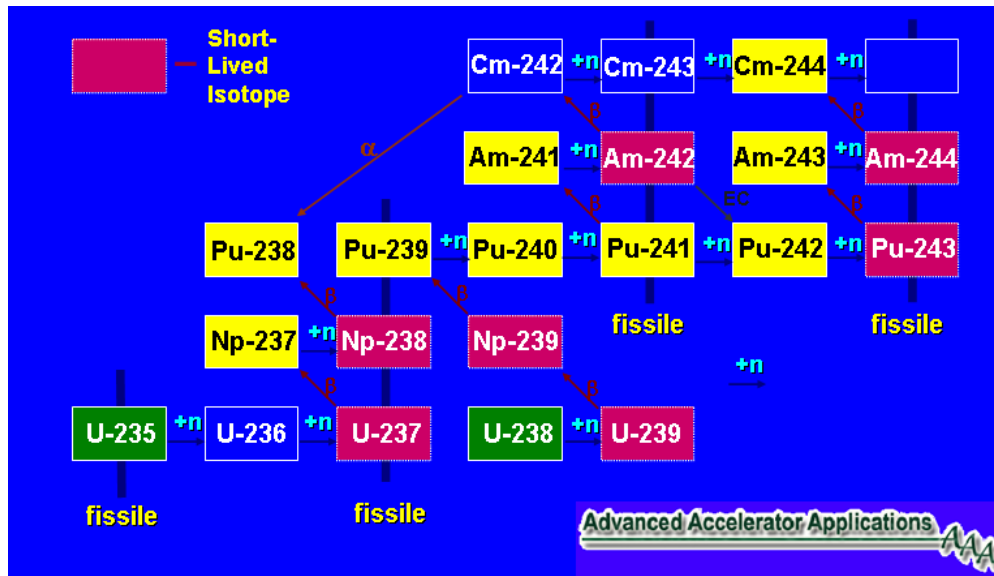
(b) Gázhűtésű grafit moderátors atomerőmű-Gas-cooled, graphite-moderated reactor

(c) Kanadai deutérium-urán atomreaktor-Canadian deuterium-uranium reactor

(d) Megawatt-nap per tona urán fűtőelem

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.

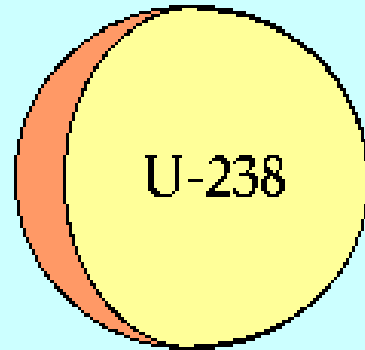


A ${}^{239}\text{Pu}$ új mesterséges hasadóanyag keletkezése

Az ${}^{238}\text{U}$ magokból keletkezett ${}^{239}\text{Pu}$ 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:

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

an atom of
uranium-238

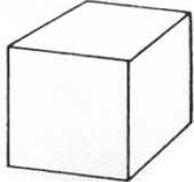
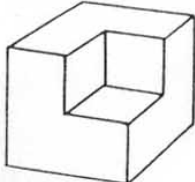
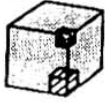
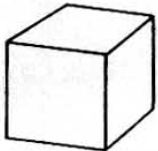
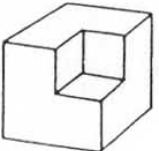











A ^{239}Pu keletkezésének animációja

A szokványos reaktorok ún. konverter reaktorok, ahol $CR < 1$, tipikusan $CR = 0,6$. Ez azt jelenti, hogy 10 db ^{235}U mag fogyasztásához, 6 ^{239}Pu atom keletkezése rendelhető az ^{238}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}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}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.

Reaktor típus és stratégia	Természetes urán szükséglet	Hulladék-veszteség	Újra felhasználva	
Könnyűvízes atomerőmű reprocesszálás nélkül	205 tonna természetes urán 	168 tonna szegényített urán 	35 tonna urán 1,2 tonna hasadási termék 0,3 tonna plutónium 	nincs
	120 tonna természetes urán 	107 tonna szegényített urán 	1,2 tonna hasadási termék 	12 tonna urán fűtőelem (0,1 tonna plutónium) 
Könnyűvízes atomerőmű reprocesszással	1,5 tonna természetes vagy szegényített urán 		1,0 tonna hasadási termék 	0,3 tonna plutónium 
Gyors szaporító reaktor				

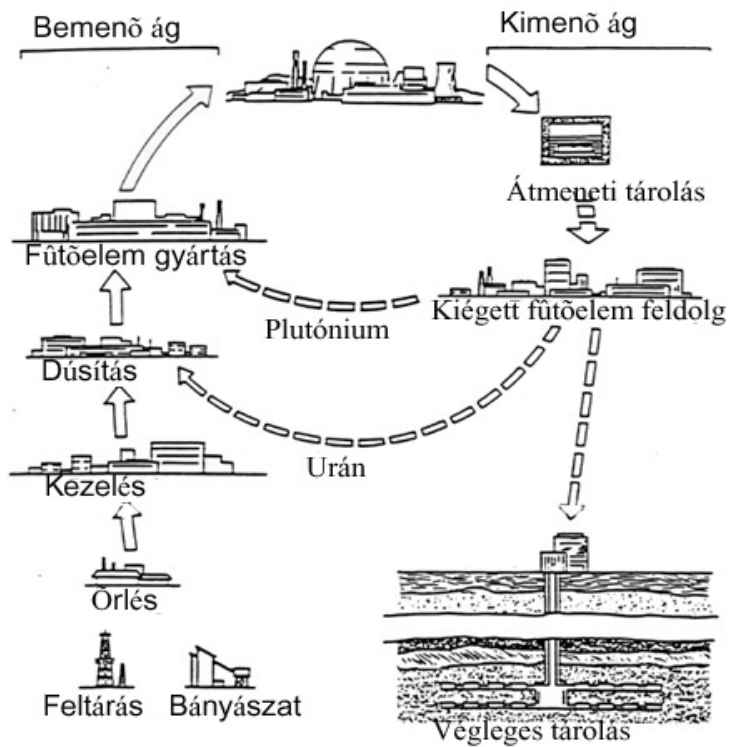
 Természetes vagy szegényített urán
  Urán fűtőelem (U-235 3% a kiegészítés kezdetén)
  Plutónium
  Hasadási termékek

1 GW.év elektromos energia termeléséhez tartozó hasadóanyag felhasználások

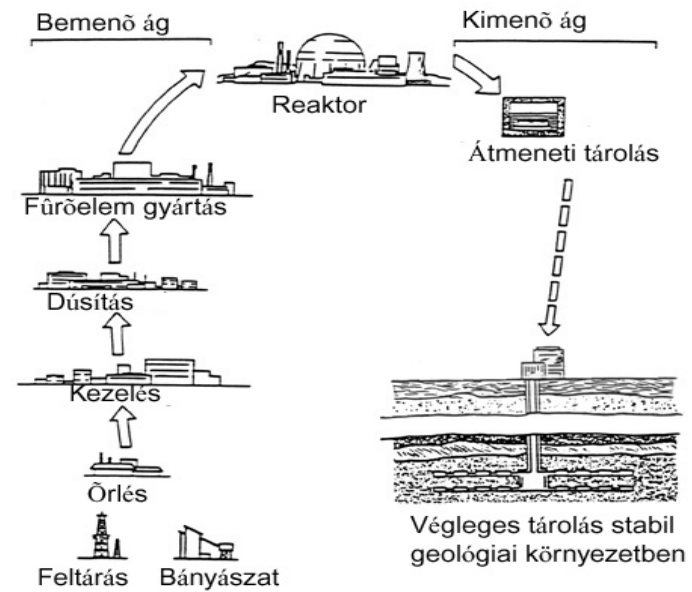
Az ábra felső sorában az egyszeri üzemanyag felhasználású üzemanyagciklus urán fogyasztása látható 1GW.év elektromos energia termelés mellett. Ebben az esetben az adott elektromos energia megtermeléséhez kb. 205 tonna természetes urán kell, melyből dúsítással 37 tonna ^{235}U -ra nézve 3%-os fűtőelem pasztilla nyerhető. A visszamaradt 168 tonna szegényített urán ($^{235}\text{U} < 0.3\%$) hulladékba kerül és termikus reaktorban nem kerül fölhasználásra. A 37 tonna urán fűtőelemben 1,2 tonna elhasad az 1 év alatt és 1 GW elektromos energiát termel. A kiegészített fűtőelem mintegy 35 tonna urán marad, melynek 0,9%-a ^{235}U , tartalmaz még 0,3 tonna hasadóképes plutóniumot és 1,2 tonna radioaktív hasadási terméket. A reaktorból kikerült kiegészített fűtőelem teljes mennyiségbe hulladékba kerül.

Az ábra középső sorában a könnyűvízes reaktor hasadóanyag recirkulációs üzemanyag szükséglete látható ugyanolyan körülmények mellett. Ebben az esetben az 1 GW.év elektromos energia megtermeléséhez 120 tonna természetes urán szükséges, ami az előző eset urán szükségletének 58,2%-a. A legnagyobb veszteség itt is a mintegy 107 tonna szegényített urán, de ehhez már csak 1,2 tonna hasadvány termék adódik hozzá és a visszamaradt ^{235}U -ot és a keletkezett plutóniumot a reaktorba visszaforgatják energiatermelés céljából. Ha szükséges, a keletkezett plutónium felhasználható a gyors szaporító reaktorok kiindulási üzemanyagaként. **Az itt keletkezett hulladék az előző eset hulladékmennyiségének 52,8%-a.**

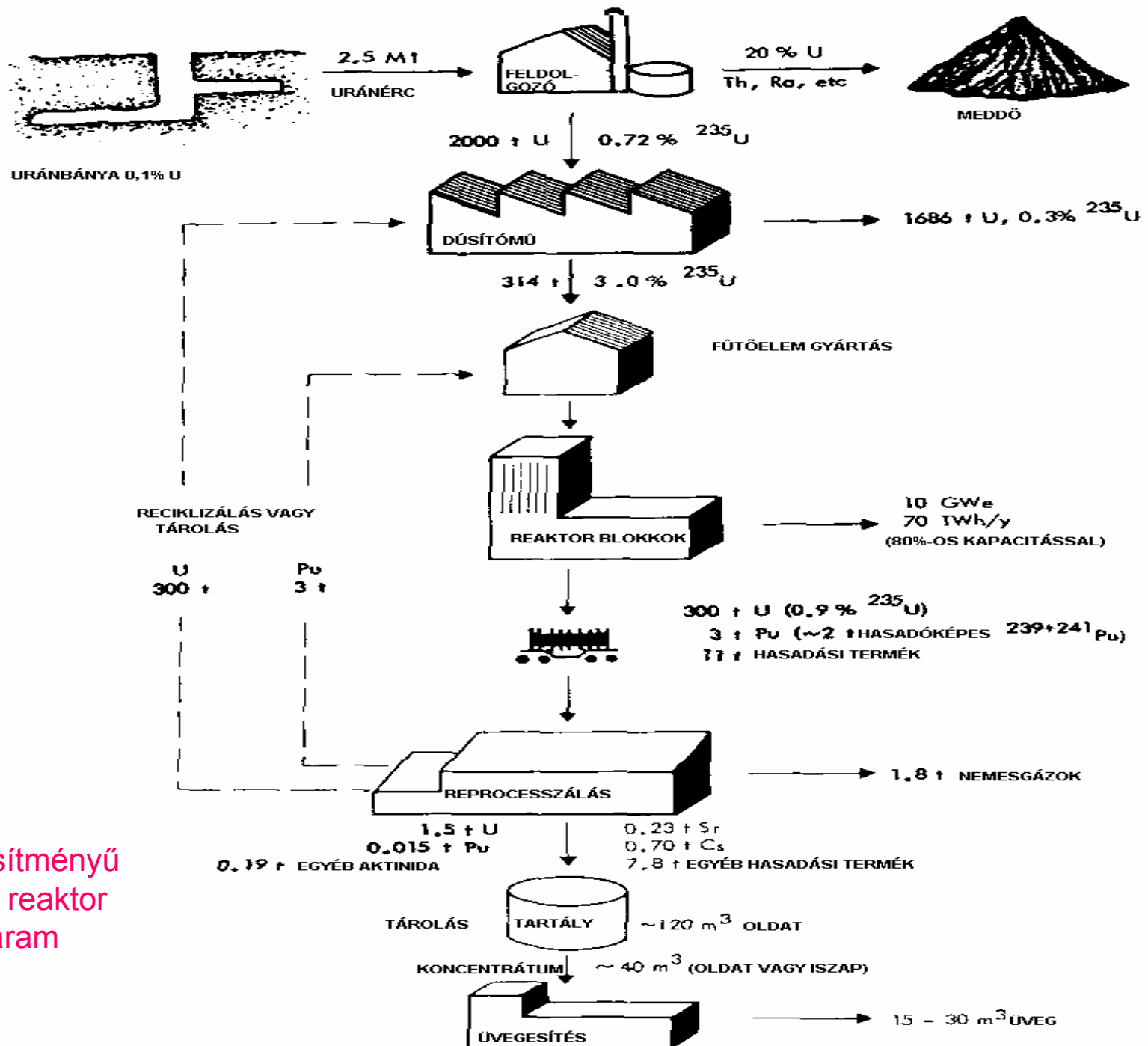
Az ábra legalsó sorában a gyors szaporító reaktorok üzemanyag ciklusának szükséglete látható. Reciklációs egyensúlyban 1 GW.év elektromos energia előállításához itt 1,5 tonna természetes, vagy szegényített urán szükséges, **ami az egyszeri üzemanyag felhasználású üzemmód üzemanyag szükségletének kevesebb mint 1%-a.** Kevesebb, mintegy 1 tonna a hasadvány termékek mennyisége is. A feleslegben termelt mintegy 0,3 tonna plutónium felhasználható egy újabb gyors szaporító reaktor indításához. A gyors szaporító reaktoros üzemanyag ciklusa kiküszöböli a költséges és szegényített urán veszteséggel járó dúsítást. Sajnos, jelenleg az a reaktortípus még nincs biztonságosan üzemeltethető állapotban, így jelenleg az egyszeri és a hasadóanyag recirkulációs könnyűvízes reaktorokkal üzemelő üzemanyagciklusok jöhetnek szóba. Környezetvédelmi szempontból a legkisebb fajlagos üzemanyag szükségletű és fajlagos radioaktív hulladék termelő üzemanyag ciklus módokat kell megválasztani.



Zárt nukleáris üzemanyagciklus



Egyszeri felhasználású nukleáris üzemanyagciklus



1 GWh teljesítményű
könnyűvízes reaktor
éves anyagáram
adatai

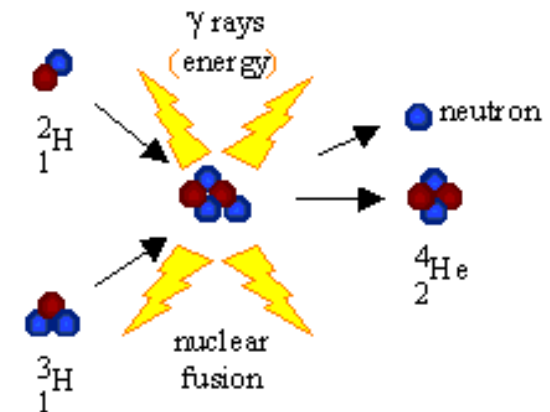
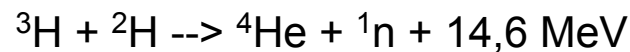
A NUKLEÁRIS ENERGIATERMELÉS: II. MAGFÚZIÓ

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.

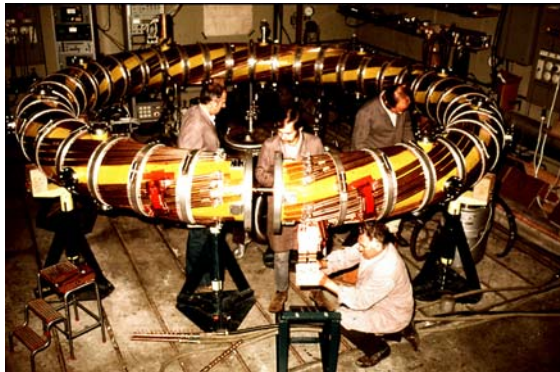
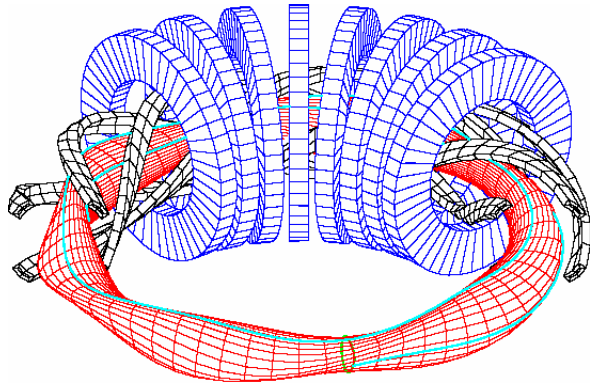
Jelenleg a hidrogén izotópjait próbálják fúzióáztatni.

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

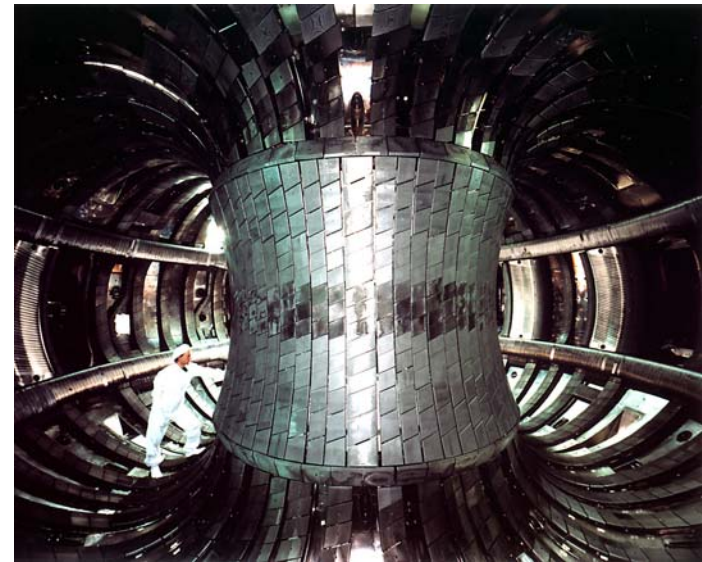


A fúziós folyamatra jellemző:

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



A stellarator



A tokamak

FÚZIÓS ERŐMŰ

