

ENERGIATERMELÉS 8. NUKLEÁRIS ENERGIATERMELÉS

VILÁGUNK ATOMOS FELÉPÍTÉSŰ !

ATOM pozitív atommag, $r \sim 10^{-15} \text{m}$, protonok és neutronok, negatív elektronfelhő atomsugár $\sim 10^{-10} \text{m}$, a tömeg az atom kiterjedésének 10^{-5} -öd részében összpontosul

NUKLEONOK PROTONOK SZÁMA(Z)+NEUTRONOK SZÁMA(N)=TÖMEGSZÁM(A)
 $r_{\text{atommag}} = r_{\text{hidrogénmag}} \cdot \sqrt[3]{A} = 1,3 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A}$

KÉMIAI REAKCIÓK vegyérték elektronok reakciói \rightarrow eV nagyságú energia

MAGREAKCIÓK a magok közötti reakciók \rightarrow MeV nagyságú energia

A protonok és neutronok egyesülésekor létrejött atommag tömege kisebb, mint az atommaghoz szükséges protonok és neutronok számának összege! A tömegkülönbséggel arányos energia a kötési energia.

Pl. Mg 12protonból+12 neutronból képződik, de a mag tömege valójában csak 23,985045!

Einstein tömeg-energia ekvivalencia összefüggése: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$

1 g anyag $9 \cdot 10^{13}$ J energiával ekvivalens. 1 atomi tömegegység (atomic mass unit, AMU)

1 AMU = $1,66 \cdot 10^{-24} \text{g} \rightarrow 1,55 \cdot 10^{-10} \text{J} = 931 \text{ MeV}$

Atommagok kötési energiája függ a tömegszámtól:

$$E_{\text{kötési}} = \Delta E = \Delta m \cdot c^2 = (Z \cdot m_{\text{proton}} + N \cdot m_{\text{neutron}} - m_{\text{mag}}) \cdot c^2$$

Az 1 nukleonra eső (fajlagos) kötési energia:

$$E_{\text{kötési}} / A = \Delta E / A = \Delta m \cdot c^2 / A = (Z \cdot m_{\text{proton}} + N \cdot m_{\text{neutron}} - m_{\text{mag}}) \cdot c^2 / A$$

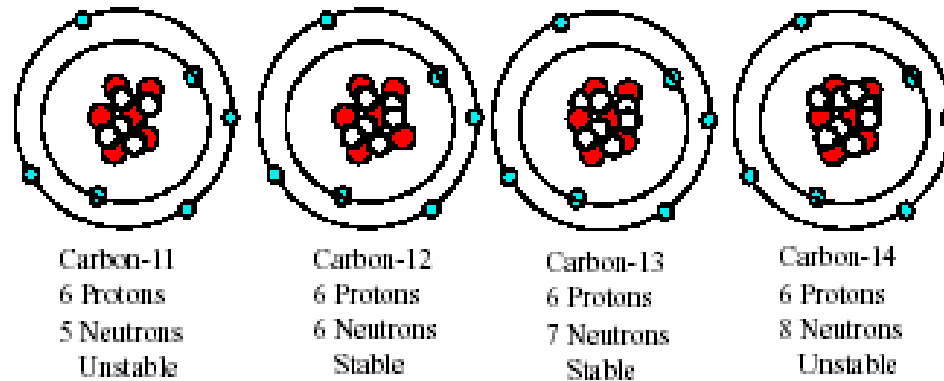
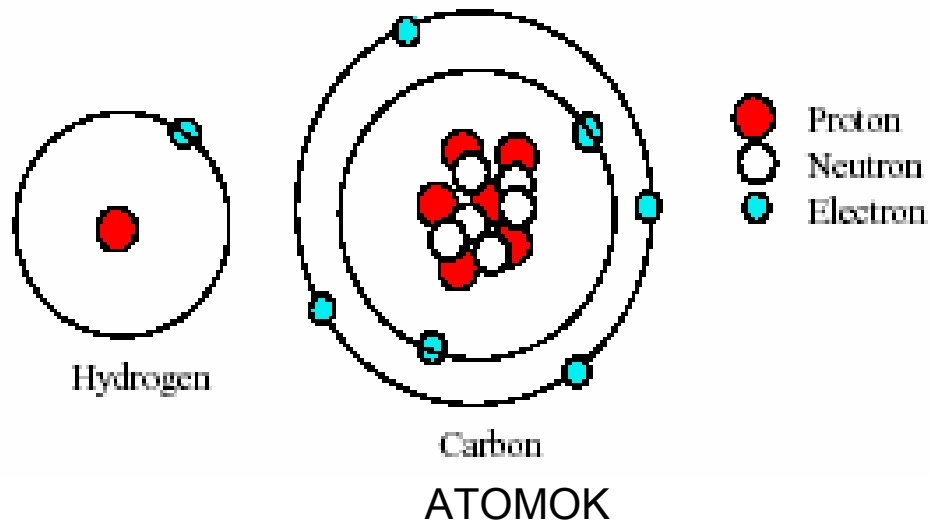
Értéke az ^{56}Fe magnál maximális, előtte és utána csökken!

Az egyes elemek maganyagának sűrűsége kb. állandó.

IZOTÓP azonos protonszámú (rendszámú) de különböző neutrons számú (tömegszámú) atommagok

IZOBÁR különböző protonszámú és neutrons számú, de azonos tömegszámú atommagok

IZOTÓN különböző protonszámú, de azonos neutrons számú atommagok



A SZÉN IZOTÓPJAI

A RADIOAKTÍV BOMLÁS

A radioaktív bomlási folyamatot elsőrendű reakciósebességű folyamatként is felfoghatjuk:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Integrálás után:

$$\ln(N_t) = -\lambda t + a$$

Ha $t=0$, $a=\ln(N_0)$, így:

$$\ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right) = -\lambda t$$

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

A RADIOAKTÍV BOMLÁS

A λ bomlási állandó értéke függ a radioaktív mag minőségétől.

- Ez a radioaktív izotópok fontos jellemzője.
- Általában ennek alternatív formáját a felezési időt ($t_{1/2}$) használjuk. Ez az időtartam, melynek során a radioaktív atommagok 50%-a elbomlik.

Ha $t=t_{1/2}$, akkor $N_t=N_0/2$ így:

$$\ln(1/2)=-\lambda t_{1/2}$$

vagy

$$t_{1/2}=\ln(2)/\lambda=0,693/\lambda$$

így

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{\ln(2)}{t_{1/2}} t} = N_0 e^{-\frac{0,693}{t_{1/2}} t}$$

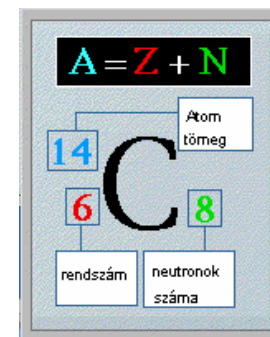
A RADIOAKTÍV ELEMÉK

A 83-nál nagyobb rendszámú összes elem radioaktív. A legtöbb elem 140-es tömegszám fölött ugyancsak radioaktív. A vegyészek stabilnak tekintenek egy nuklidot, ha $t_{1/2} \geq 10^{12}$ év. 200 fölötti tömegszám esetén a magok labilisak és spontán hasadással (SF) bomlanak.

A radioaktív magok felezési ideje 10^{-21} másodperc és 10^{12} év között bármekkora lehet. Mindegyik elemnek ismert radioaktív izotópja, akár természetes, akár mesterséges.

A radioaktív izotópok jelölésére két standard jelölésmódot alkalmazunk:

^{14}C vagy C-14. Mindkettőt szokás használni.



AZ AKTIVITÁS

A gyakorlatban nem tudjuk közvetlenül kifejezni N vagy dN/dt értékét. Ehelyett az **aktív atommagok időegységre eső megváltozását vagy bomlási sebességet, vagy aktivitást** használjuk.

Aktivitás = bomlások száma/eltelt idő

Vagy, ha egy bomláskor egy részecske keletkezik és a detektálási hatásfok 100%

Aktivitás = beütésszám/eltelt idő

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{0,692}{t_{1/2}} \cdot t}$$

Ha a detektálás hatásfoka <100% és egy bomlásnál nem egy részecske emittálódik, a beütésszám csak arányosan változik az aktivitással. Mivel az aktivitás arányos az aktív magok számával, N-el:

$$I = I_0 e^{-\lambda t} = I_0 e^{-\frac{0,693}{t_{1/2}} \cdot t}$$

Ez az összefüggés csak egy egyedül jelenlévő radionuklid bomlását írja le. Ha több, különböző nuklid szimultán bomlásáról van szó az összefüggés bonyolultabb.

Az aktivitás mértékegységei:

Régi 1 curie (1 Ci) $3,7 \cdot 10^{10}$ bomlás/másodperc, dps (1 g ^{226}Ra aktivitása). Kisebb egységei a millicurie (mCi), mikrocurie (μCi)

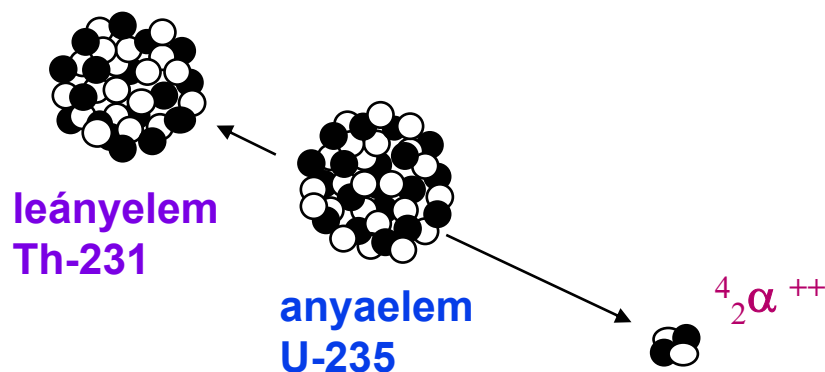
Új (SI) egysége az 1 Becquerel (1 Bq), 1 bomlás/másodperc, dps. Egyéb nagyobb egységei a kilobecquerel (kBq), megabecquerel (MBq), gigabecquerel (GBq) és a terabecquerel (TBq).

A RADIOAKTÍV BOMLÁS OKAI

- A magban túl sok nukleon (proton és neutron) van összezsúfolva, ezen belül túl sok a neutron (α -bomlás).
- A magban túl sok a proton (β^+ -bomlás vagy elektronbefogás).
- A könnyebb és közepes nagyságú magokban túl sok a neutron (β^- -bomlás)
- A magnak túl nagy az energiája, gerjesztett állapotban van (γ kvantumok kibocsátása). Gyakran egyéb (pl. β -bomlás) kísérő jelensége.

AZ α SUGÁRZÁS

Alfa sugárzás

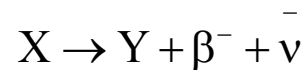


A β SUGÁRZÁS

A β -bomlás háromféleképpen mehet végbe:

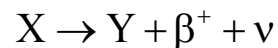
1. Negatron (β^-) kibocsátásával.

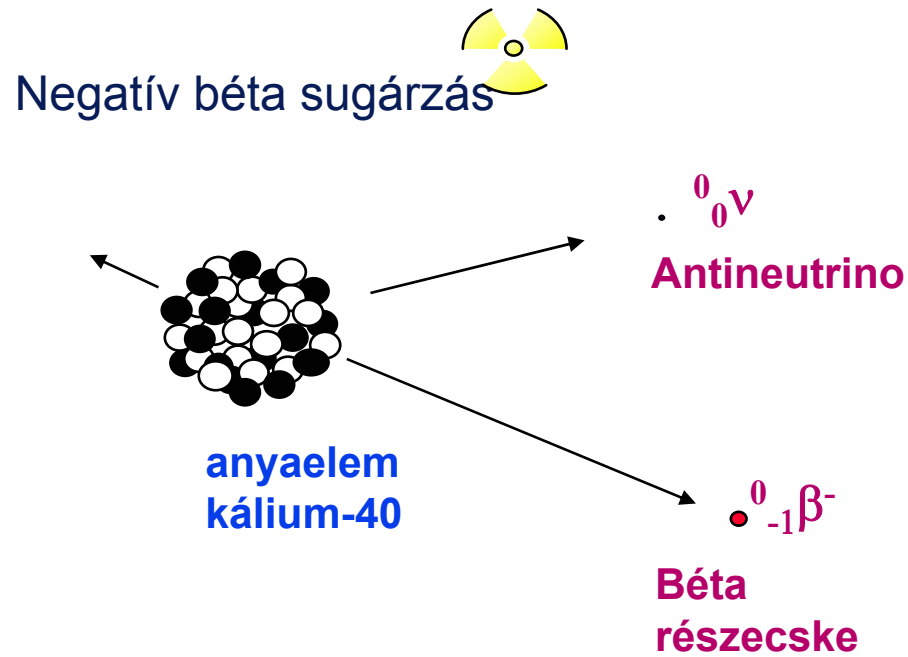
- A magból negatív elektron távozik.
- Tipikusan a neutrodús magok bomlása.
- Az elektron távozása a momentum megmaradás miatt antineutrínó kibocsátásával jár.



2. Pozitron (β^+) kibocsátásával.

- A magból pozitív elektron távozik.
- Tipikusan a protondús magok bomlása.
- A pozitron távozása a momentum megmaradás miatt neutrínó kibocsátásával jár.

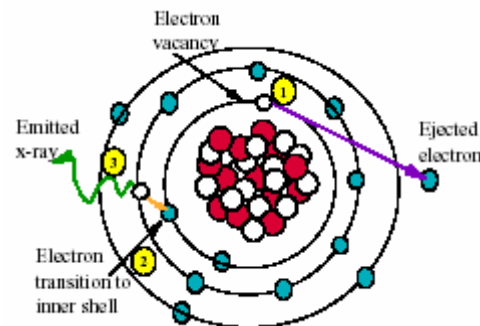




A 0,51 MeV γ -sugárzás gyakran detektálható és egy pozitron és elektron annihilációját jelzi. Ez nagyon hasznos a nukleonok azonosításánál.

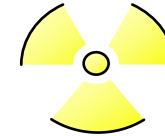
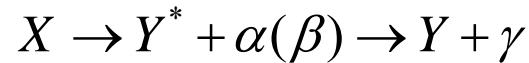
3. Elektronbefogással (EC)

- Ez a bomlás lehetővé teszi a rendszám (Z) csökkentését változatlan tömegszám (m) mellett. A pozitron-bomlás alternatívája.
- A legbelső K-héjról a mag egy elektront fog be.
- Előnyös bomlás forma ha a bomlási energia $< 2m_e c^2$.
- Magemisszió ritkán kíséri az elektronbefogást, hacsak az atommag nem maradt gerjesztett (metastabilis) állapotban.
- A K-héjon keletkezett „lyukat” egy külső pályáról elektron tölti be és a két pálya energiakülönbségének megfelelő karakterisztikus röntgen sugárzás keletkezik.

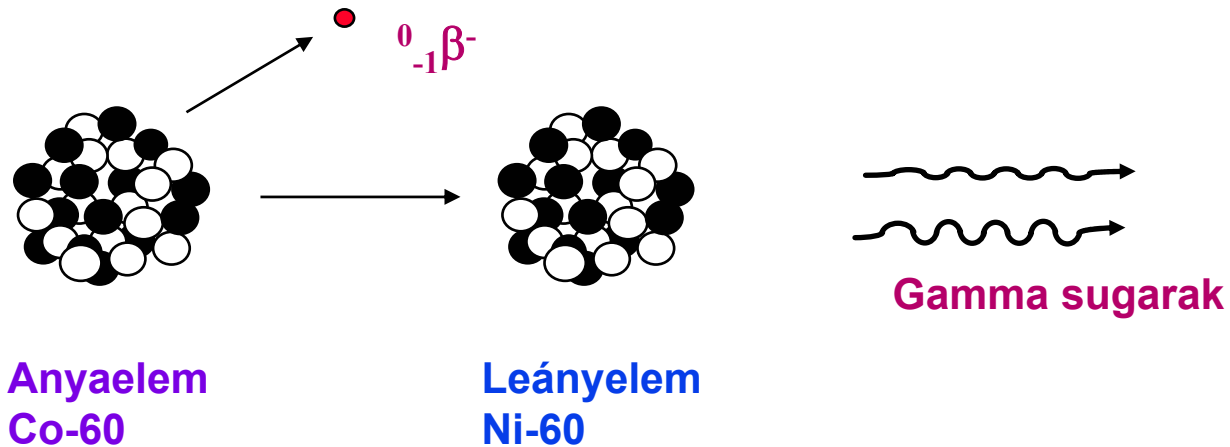


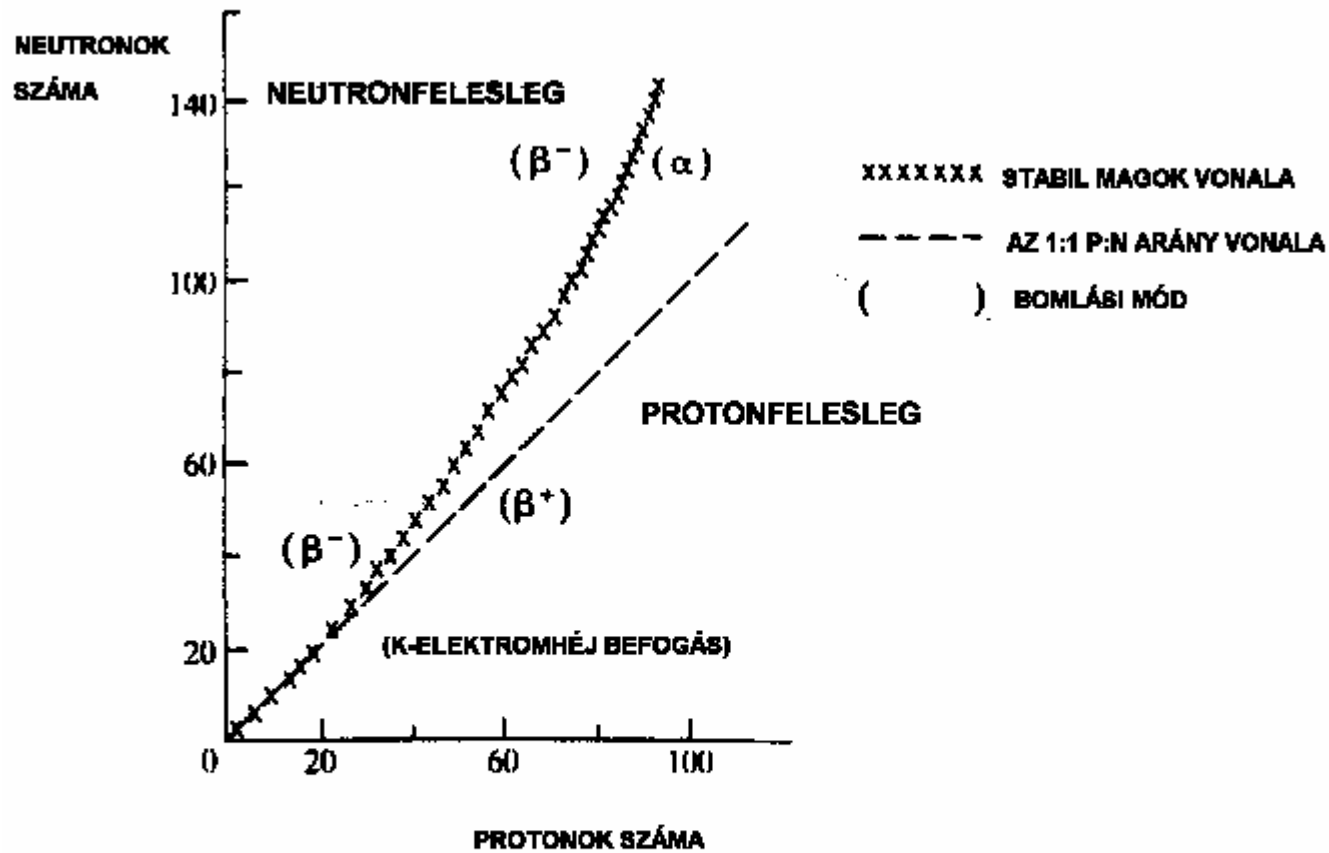
A γ SUGÁRZÁS

Az elektromágneses sugárzások röntgen feletti energiájú része. Diszkrét energiája 0,-10 MeV között lehet, ámbár 5 MeV fölött ritka. Az α - és β - bomlást kísérheti, melynek során az atommag gerjesztett állapotban maradhat.



Gamma sugárzás





A MAGOK NEUTRON-PROTON SZÁMA, A STABILITÁSI VONAL ÉS A BOMLÁSI MÓDOK

ÖSSZEFÜGGÉS A FAJLAGOS AKTIVITÁSOK ÉS A FELEZÉSI IDŐ KÖZÖTT

$$A = \lambda \cdot N^* = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \cdot N^*$$

Az aktív atommagok száma pedig

$$N^* = \frac{m}{M} \cdot f \cdot 6,023 \cdot 10^{23}$$

$$A = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \cdot \frac{m}{M} \cdot f \cdot 6,023 \cdot 10^{23}$$

A fajlagos aktivitás így

$$\frac{A}{m} = \frac{\ln(2) \cdot f \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{t_{1/2} \cdot M} = \frac{0,693 \cdot f \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{t_{1/2} \cdot M}$$

Az összefüggés alapján látható, hogy minél hosszabb az illető radioaktív izotóp felezési ideje, illetve minél nagyobb az atomsúlya, annál kisebb a fajlagos aktivitása. Példa. 1 mCi ^{32}P ($t_{1/2}=14,3$ nap) tömege $3,5 \cdot 10^{-9}$ g, azaz 3,5 nanogramm, míg ugyanilyen aktivitású 1 mCi ^{226}Ra ($t_{1/2}=1600$ év) tömege $1,011 \cdot 10^{-3}$ g, azaz 1,011 mg.

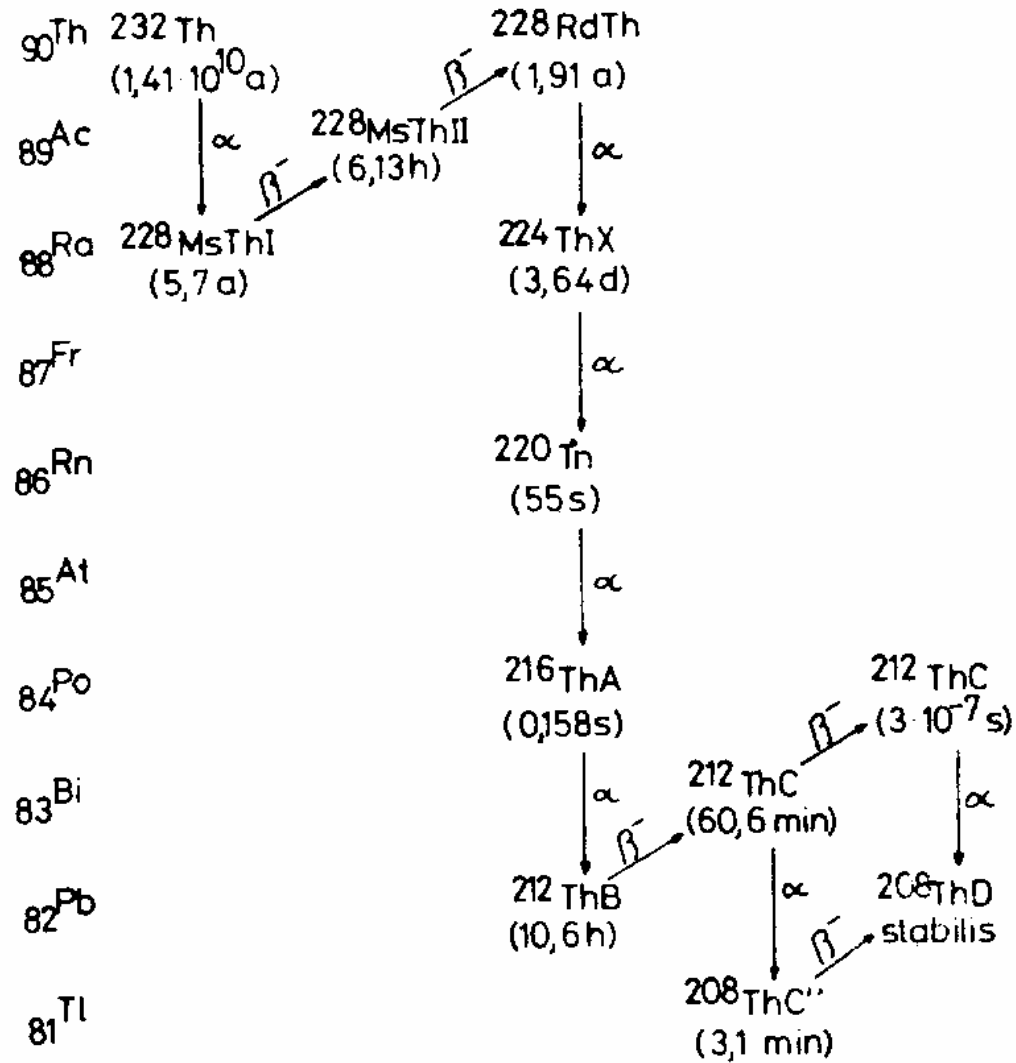
Bár a bomlások időegységre eső száma meghatározza az aktív anyag aktivitását, a radionuklidok többféle módon is bomolhatnak és többféle sugárzást bocsáthatnak ki a bomlás során. Egy speciális vonaldiagrammal, a bomlási sémával minden egyes radionuklid bomlása leírható. A vízszintes vonalakkal jelzett energianívók közötti átmeneteket nyilak jelzik. A magasabb energiaállapotú anyaelem sugárzás leadásával jut az alacsonyabb energia állapotú leányelemhez (lásd ábra).

Legfontosabb Izotópok

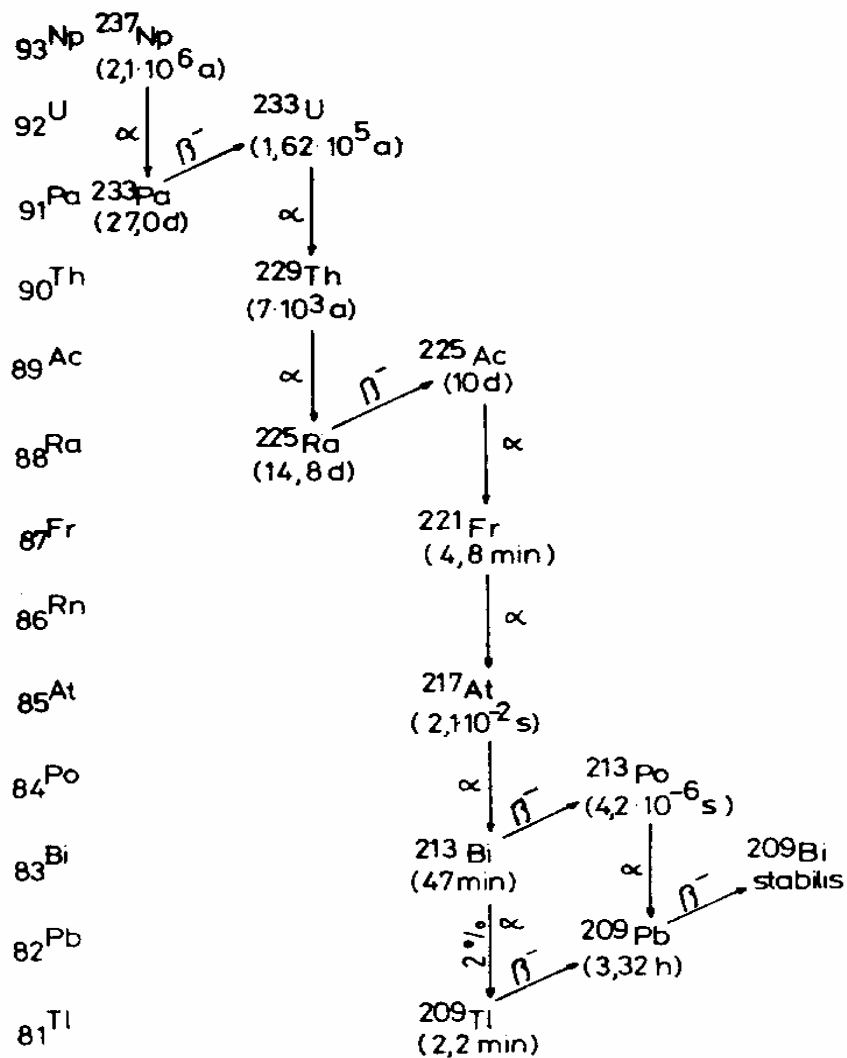
Ac-227	72.9	1.37E+01	7.29E-02
Ac-228	2.24E+06	4.46E-04	2.24E+03
Am-241	3.24E+00	3.09E+02	3.24E-03
Am-242m	9.72E+00	1.03E+02	9.72E-03
Am-242	8.09E+05	1.24E-03	8.09E+02
Am-243	1.85E-01	5.41E+03	1.85E-04
Am-244	1.27E+06	7.87E-04	1.27E+03
Ba-131	8.31E+04	1.20E-02	8.31E+01
Ba-140	7.29E+04>	1.37E-02	7.29E+01
Cd-109	2.64E+03	3.79E-01	2.64E+00
Cd-115m	2.60E+04	3.85E-02	2.60E+01
Cd-115	5.09E+05	1.96E-03	5.09E+02
Cs-137	87	1.15E+01	8.70E-02
Cs-138	4.20E+07	2.38E-05	4.20E+04

Co-57	8480	1.18E-01	8.48E+00
Co-60	1133	8.83E-01	1.13E+00
Mo-99	4.75E+05	2.11E-03	4.75E+02
Np-237	7.05E-04	1.42E+06	7.05E-07
Np-239	2.33E+05	4.29E-03	2.33E+02
Pu-238	17.4	5.75E+01	1.74E-02
Pu-239	0.0614	1.63E+04	6.14E-05
Pu-240	0.226	4.42E+03	2.26E-04
Pu-241	112	8.93E+00	1.12E-01
Pu-242	3.90E-03	2.56E+05	3.90E-06
Pu-243	2.59E+06	3.86E-04	2.59E+03
Pu-244	1.90E-05	5.26E+07	1.90E-08
Sr-89	2.78E+04	3.60E-02	2.78E+01
Sr-90	143	6.99E+0	1.4E-01
U-235	2.10E-06	4.76E+08	2.10E-09
U-238	3.33E-07	3.00E+09	3.33E-10

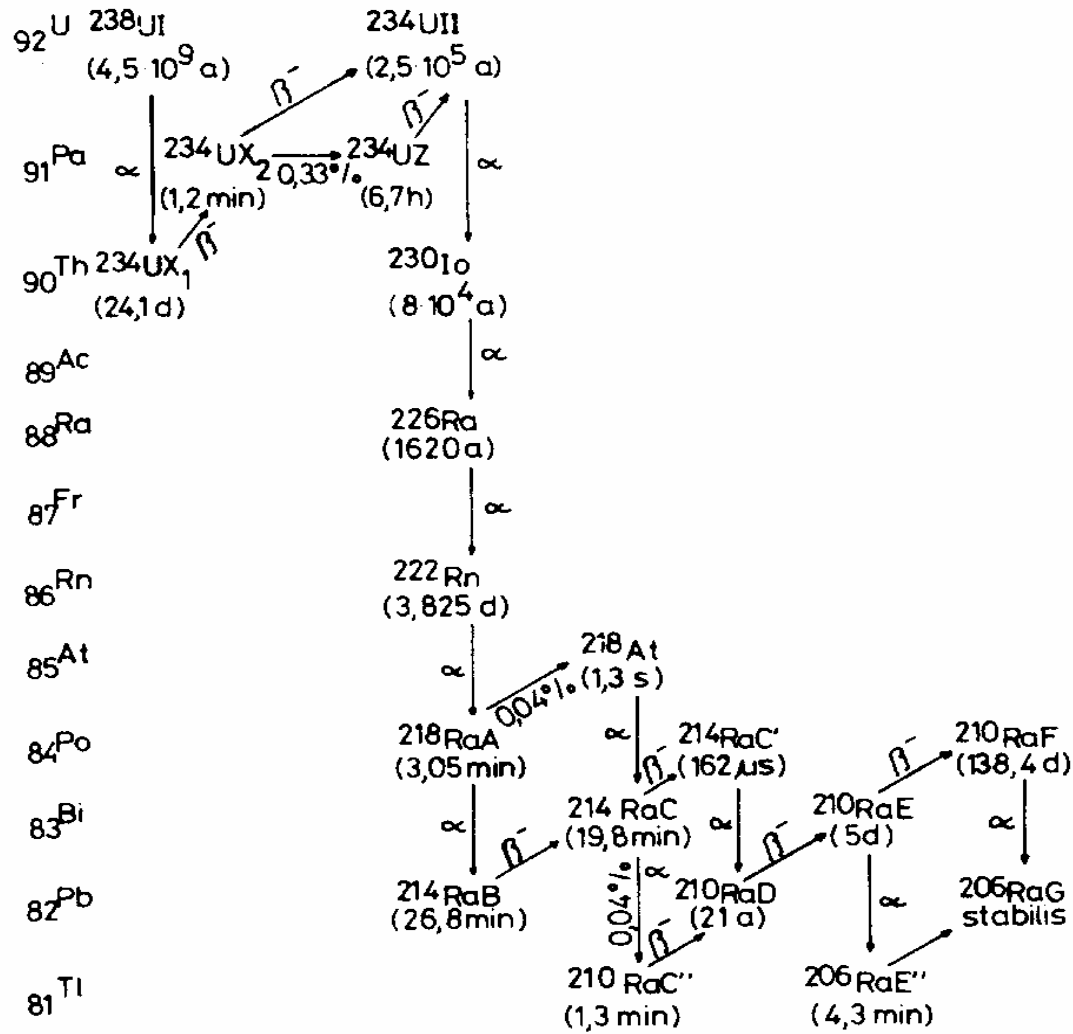
A 4 n BOMLÁSI SOR



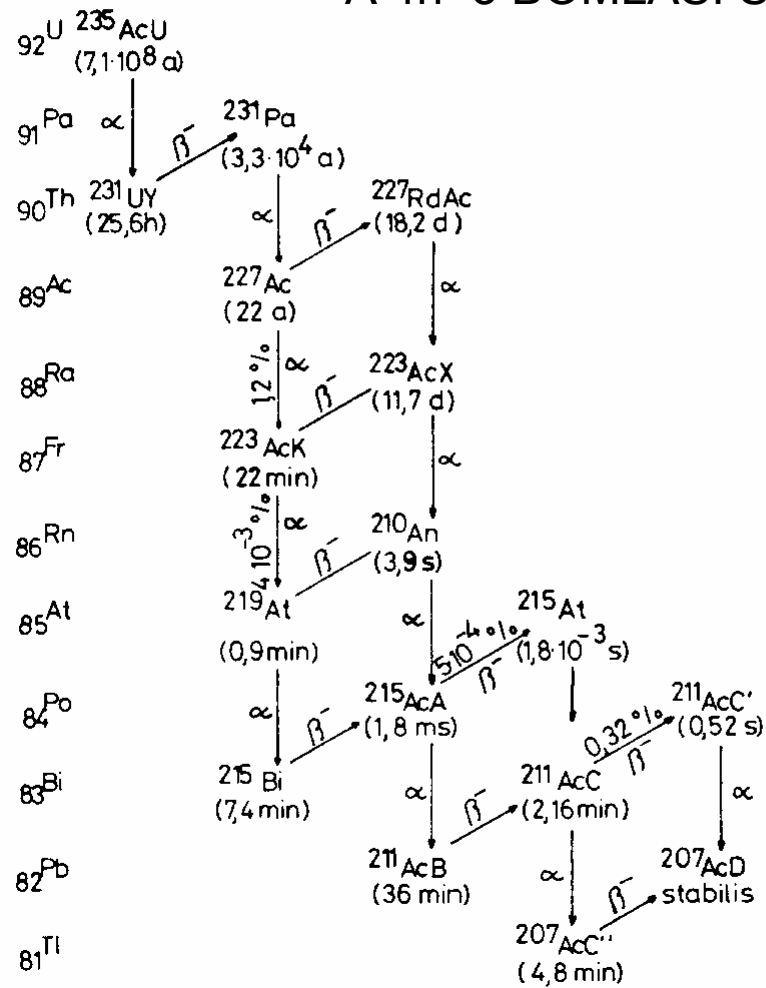
A 4n+1 BOMLÁSI SOR



A 4n+2 BOMLÁSI SOR

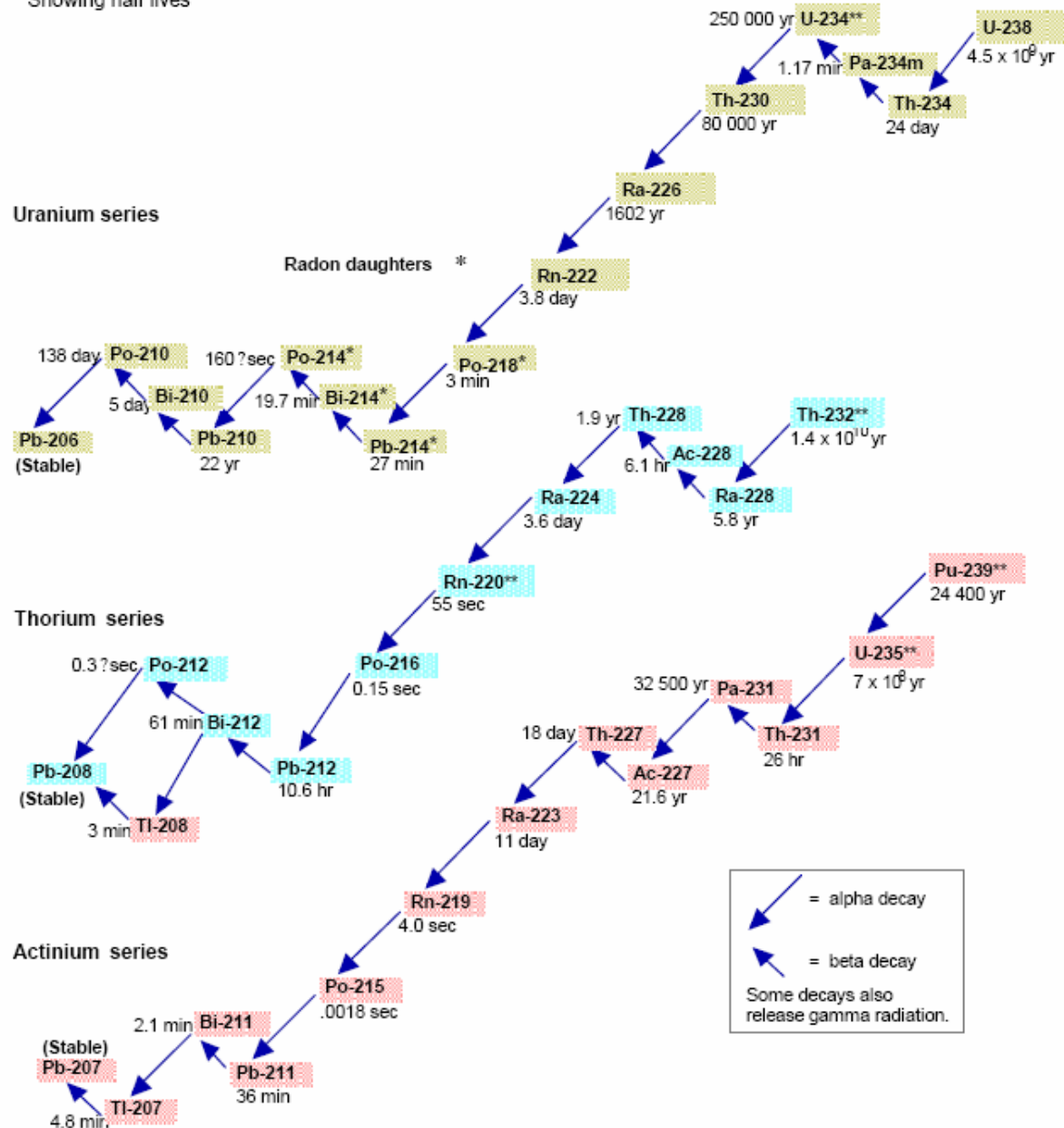


A 4n+3 BOMLÁSI SOR



Some radioactive decay series

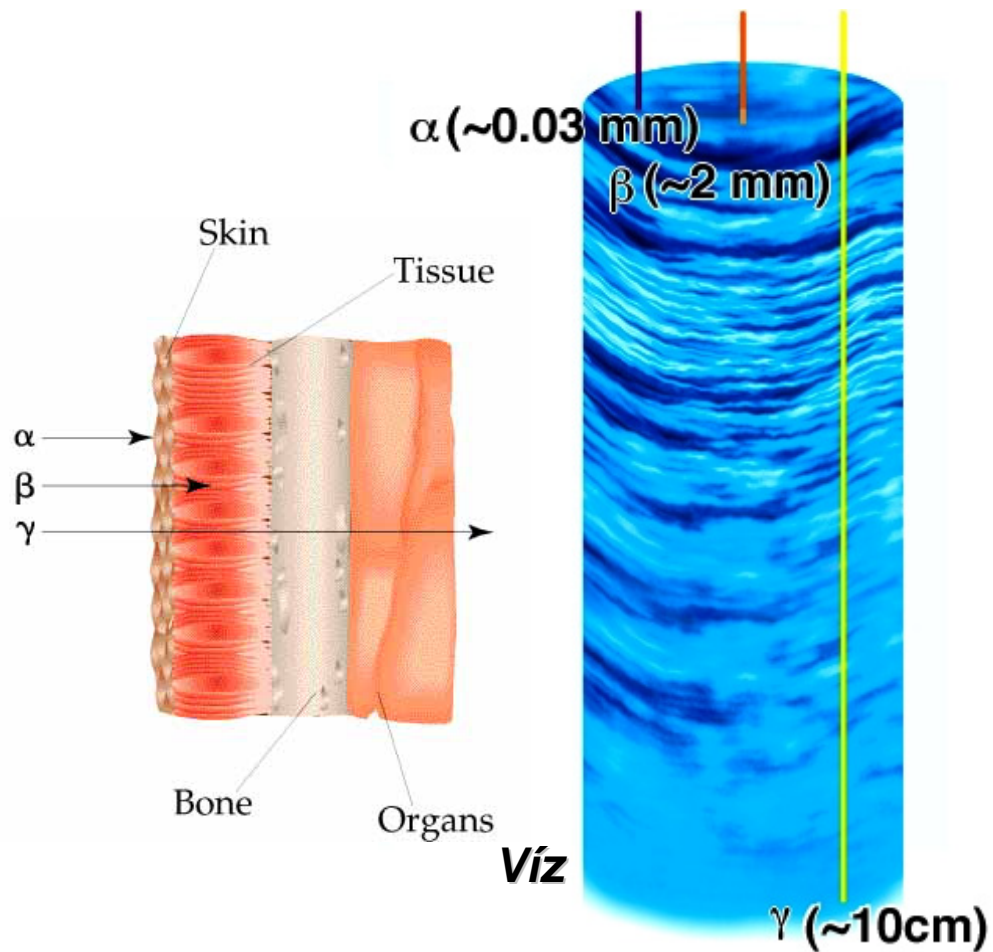
Showing half lives



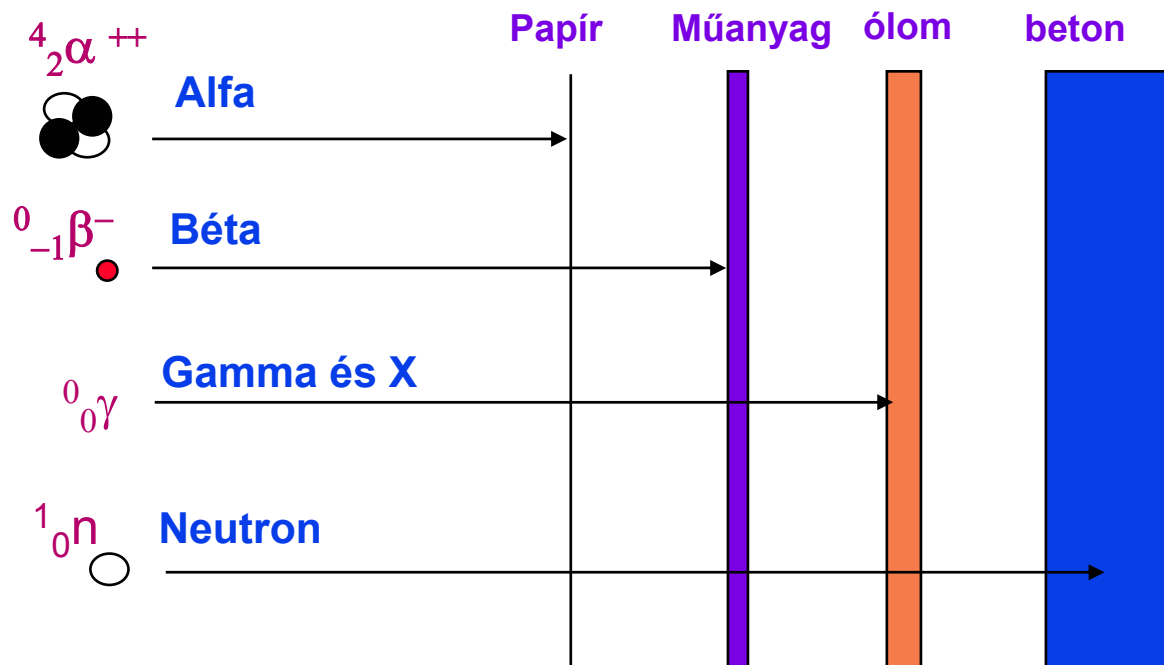
A SUGÁRZÁSOK ÁTHATOLÓ KÉPESSÉGE

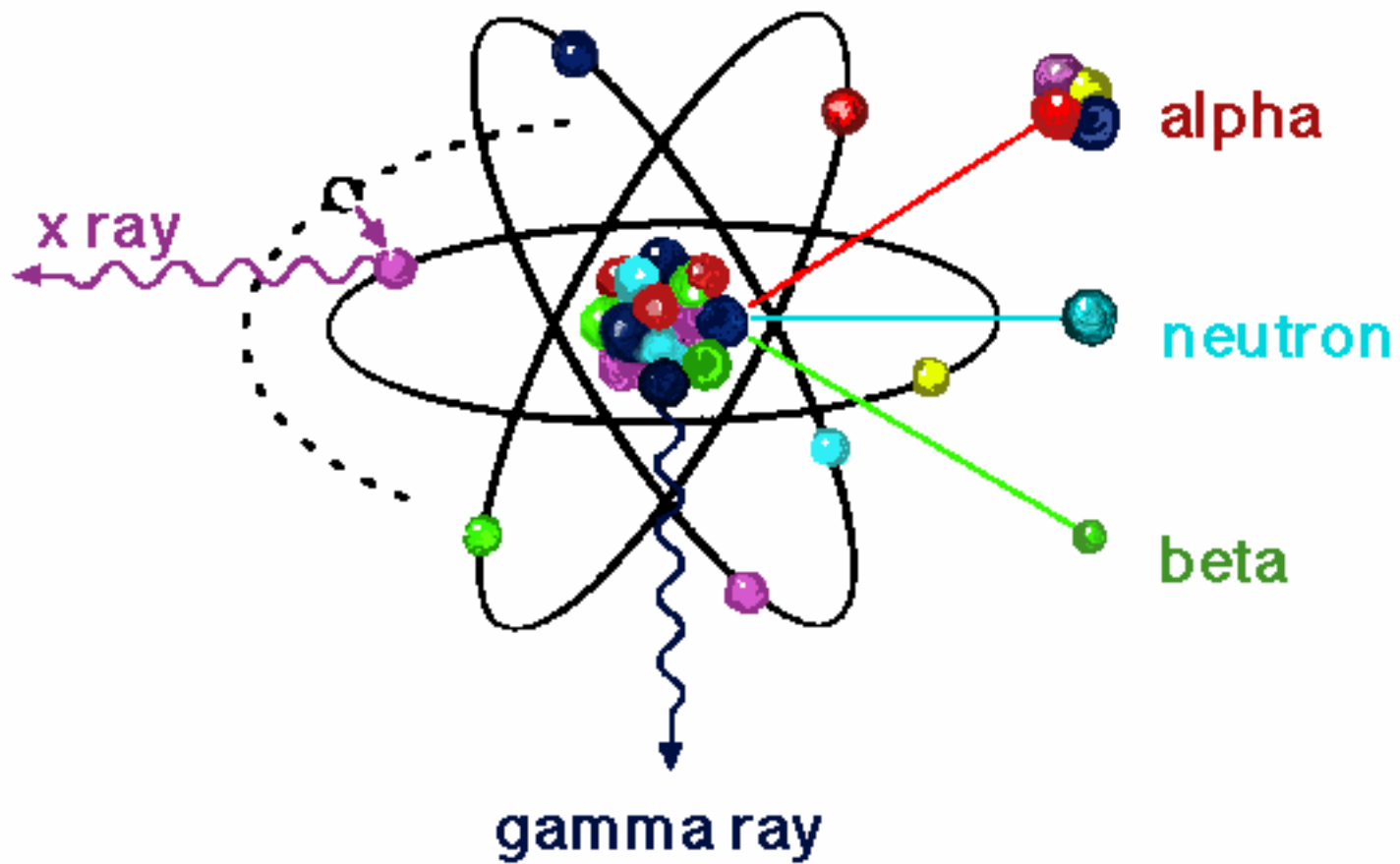
- Alfa-részecske: kicsiny
- béta részecske: mérsékelt
- gamma: nagy

- röntgen sugárzás



A RADIOAKTÍV SUGÁRZÁSOK ÁTHATOLÓKÉPESSÉGE





Tömeg \Leftrightarrow Energia



Elektronvolt (eV)

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

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

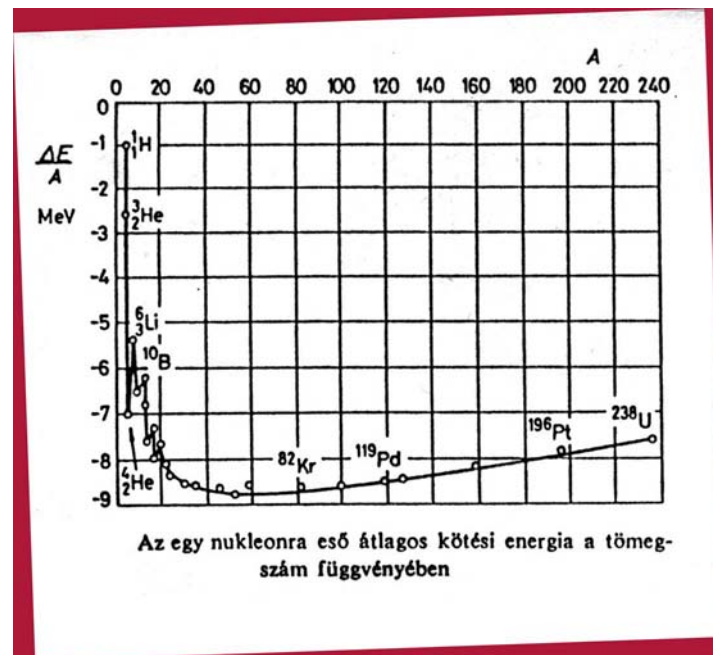
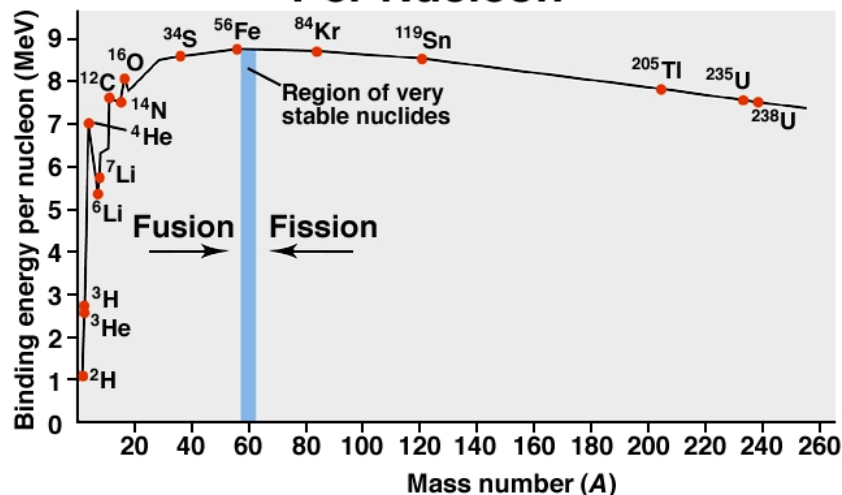
A kötési energiát általában megaelektronvolt (MeV) egységben fejezzük ki:

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

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

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

Variation in Binding Energy Per Nucleon



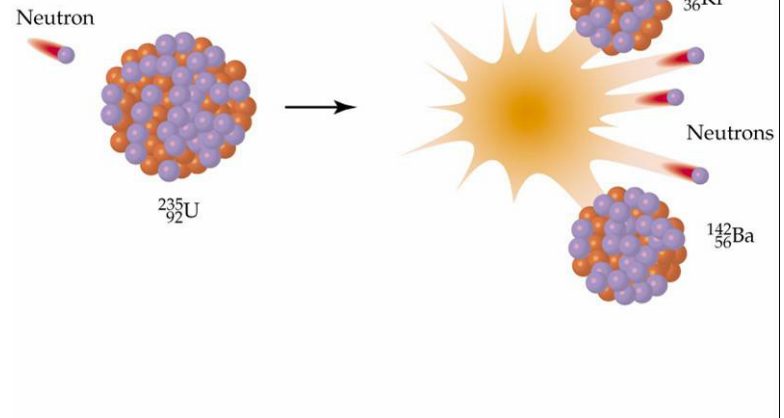
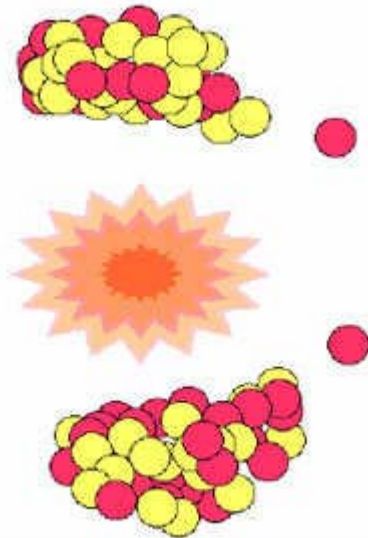
Ahogy nő a nukleonok száma eljünk a vas környékén a kötési energia maximumát. A nagyobb tömegű magok kevésbé stabilak. Ezért egyaránt energia nyerhető a kis magok egyesüléséből fúziójából és a nagy magok hasadásából. Ezért jellemző az alfa-bomlás a nehéz magok esetén.

Így energia nyerhető kétféleképpen:

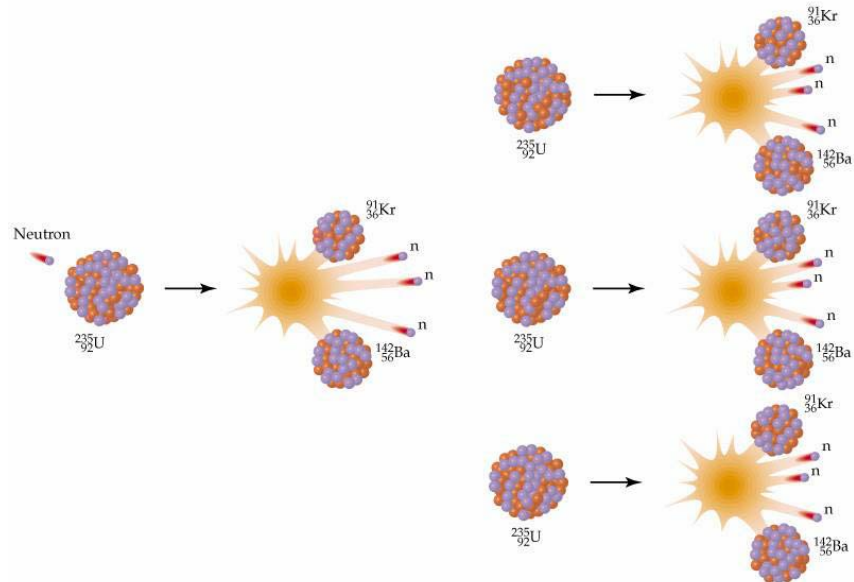
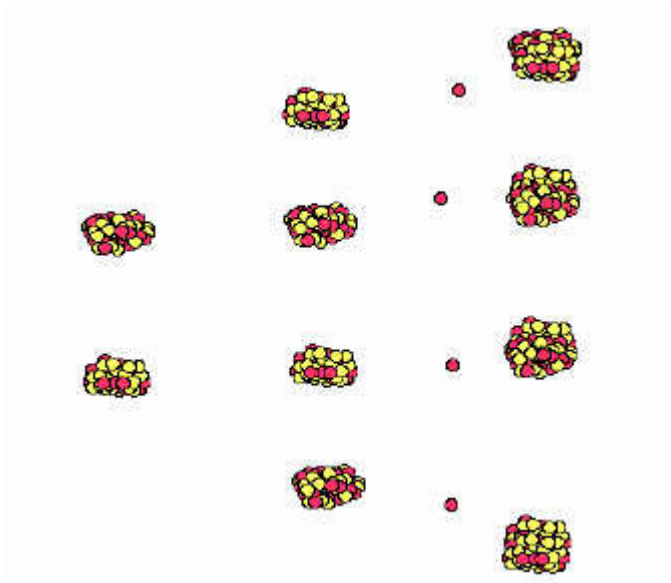
Maghasadással: atomok elhasadása--> ez történik a hasadási atomreaktorokban.

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

A NUKLEÁRIS ENERGIATERMELÉS: I. MAGHASADÁS



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

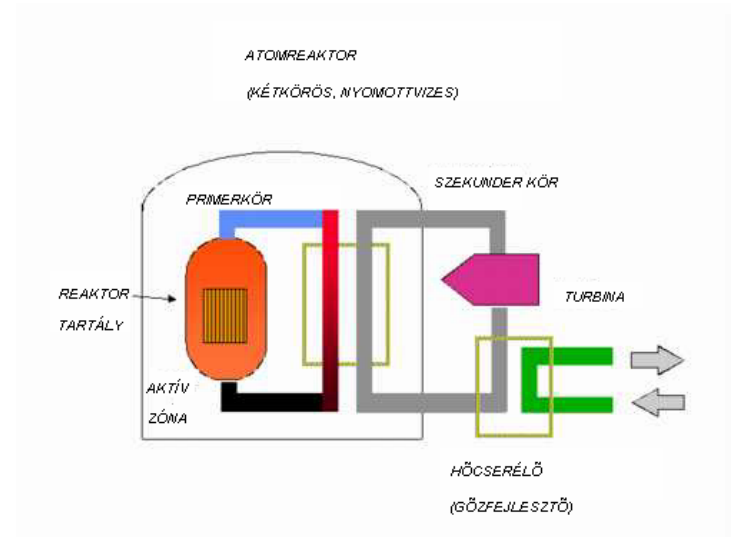
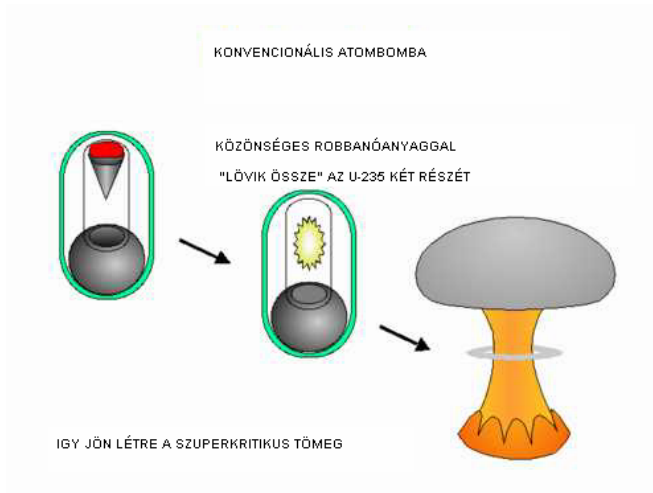
A hasadási reaktorok zömében jelenleg az ^{235}U az alkalmazott hasadóanyag.

Egy lehetséges hasadási reakció: $^1_0\text{n} + ^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{92}_{36}\text{Kr} + ^{141}_{54}\text{Ba} + 3\ ^1_0\text{n} + \text{energia}$

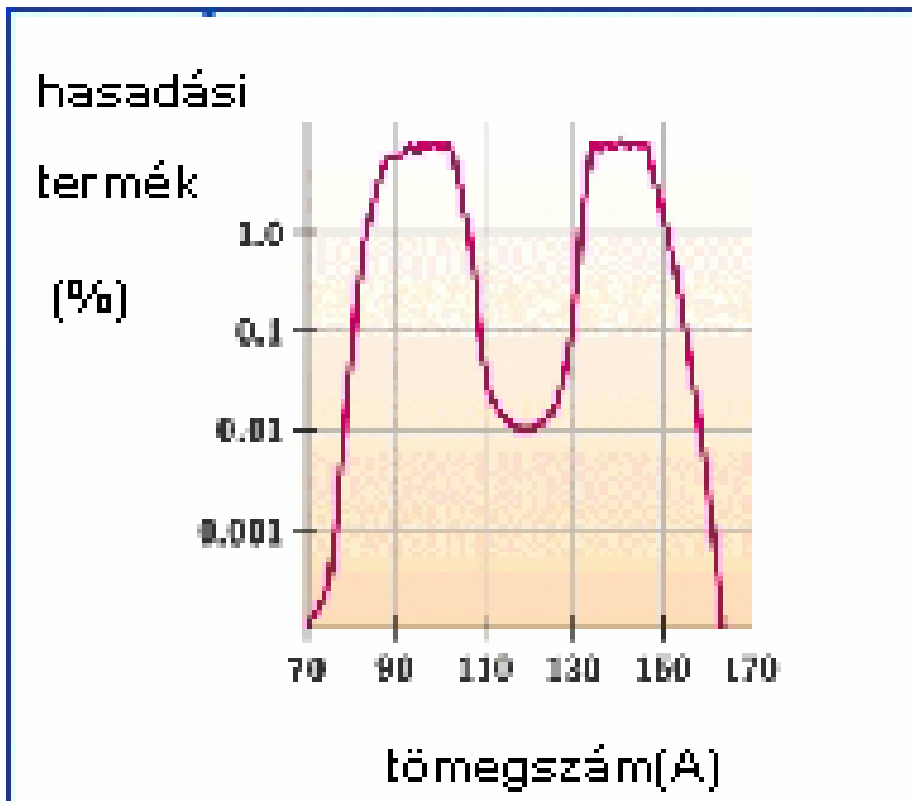
vagy



Egy urán atom elhasadásakor kb. 200 MeV energia szabadul föl. 100 g ^{235}U elhasadása $8,21 \cdot 10^{12} \text{ J} = 1785$ 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 az ^{235}U hasadásának példáján:

A hasadásnál termikus neutronok hatására az urán elhasad például 1db ^{140}Cs és 1 db ^{92}Rb magra, va-lamint 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
 Tehát 1g természetes uránból mintegy 501 MJ energia nyerhető.
 1 tonna természetes uránból termikus reaktorban elhasítva kb. 20000 t szénnel egyenértékű, gyors, szaporító reaktorban 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).

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

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)

1kg U $3 \cdot 10^6$ kg szén $\sim 2,56 \cdot 10^{24}$ atom $\sim 1 \cdot 10^8$ MJ
 fúzió $D+T \rightarrow He$ 1kg He $\sim 6,7 \cdot 10^8$ MJ

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

$^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$ --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)

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	T	0,4	T	0,8	1,2	0,4	t	>0

Energiahordozók

1 kg energiahordozóból nyert villamos energia

1 kg tüzifa: 1 kW·h

1 kg szén: 3 kW·h

1 kg olaj: 4 kW·h

1 kg urán: 50 000 kW·h

(3 500 000 kW·h reprocesszálassal)

Tüzelőanyag tonnái egy 1000MW erőműhöz évente:

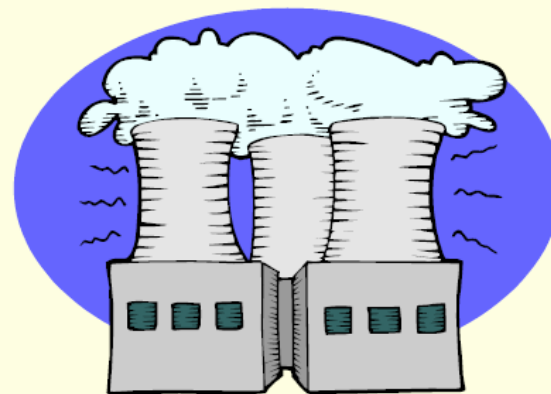
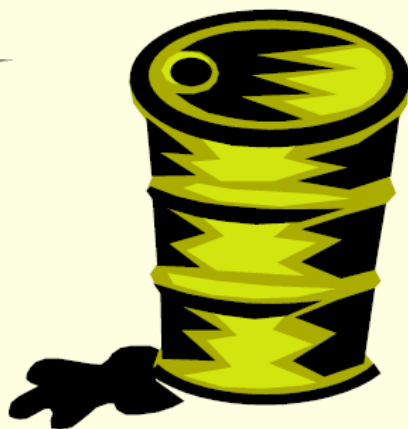
2 600 000 t szén: 2000 vasúti kocsi

(1300 t egy kocsi)

2 000 000 t olaj: 10 szupertanker

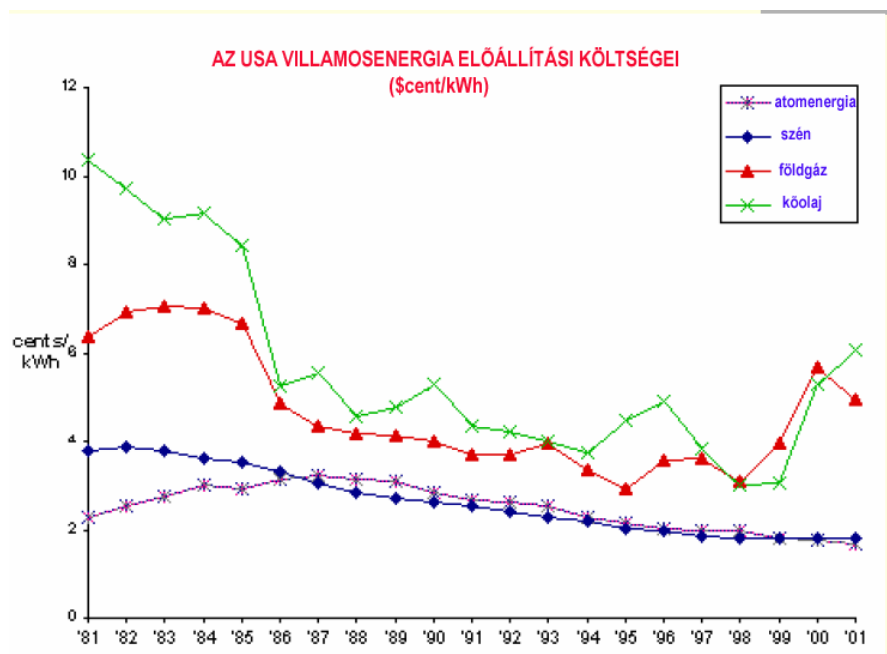
30 t urán: aktív zóna

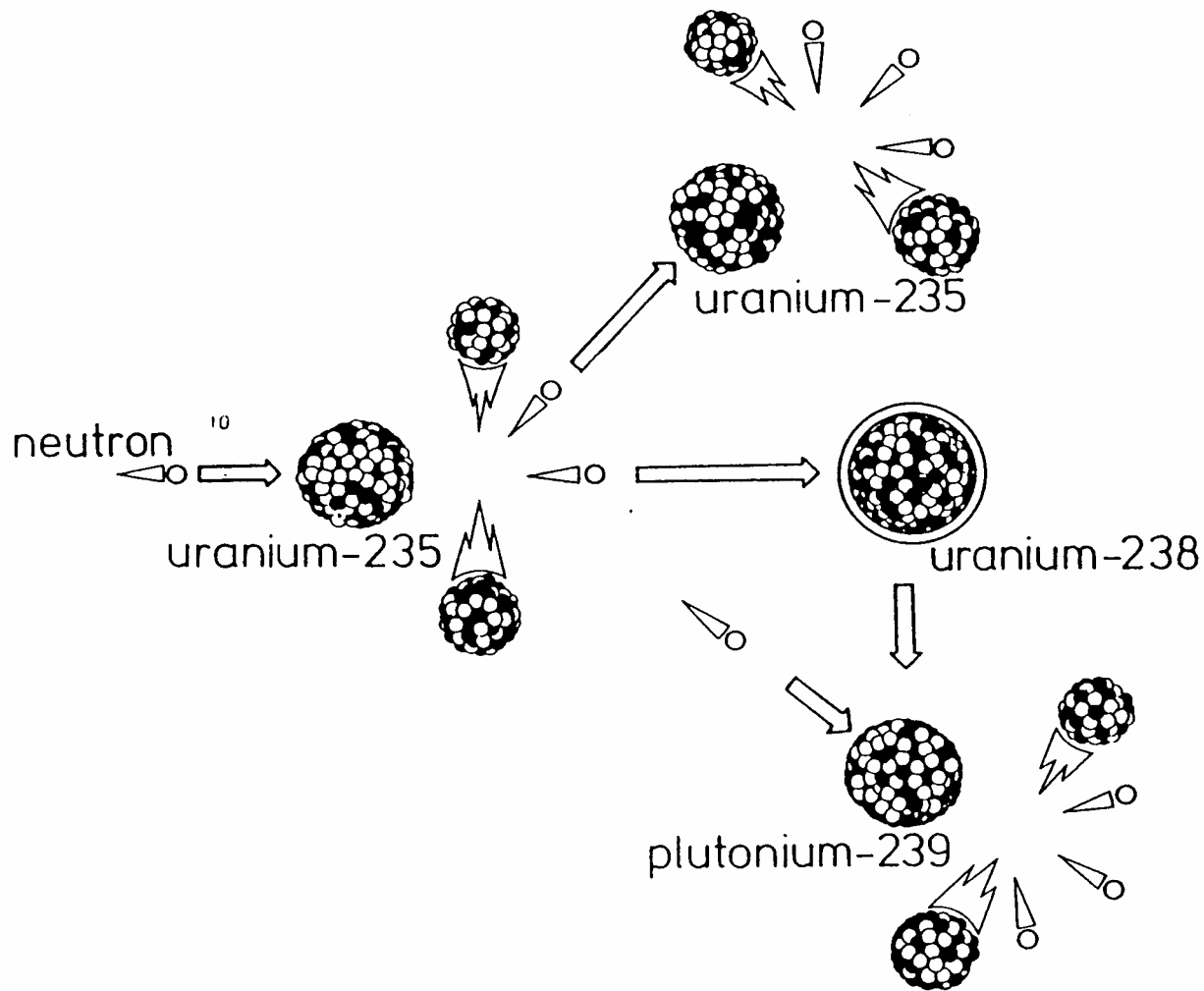
(10 köbméter)



Egy 1000 MW elektromos teljesítményű erőmű területigénye:

Fosszilis és nukleáris erőmű:	1–4 km ²
Termikus naperőmű vagy fényelektromos park:	20-50 km ²
Szélfarmok:	0-150 km ²
Biomassza hasznosítás:	4000-6000 km ²





AZ U-235 LÁNCREAKCIÓ ÉS A PU-239 KÉPZŐDÉSE

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

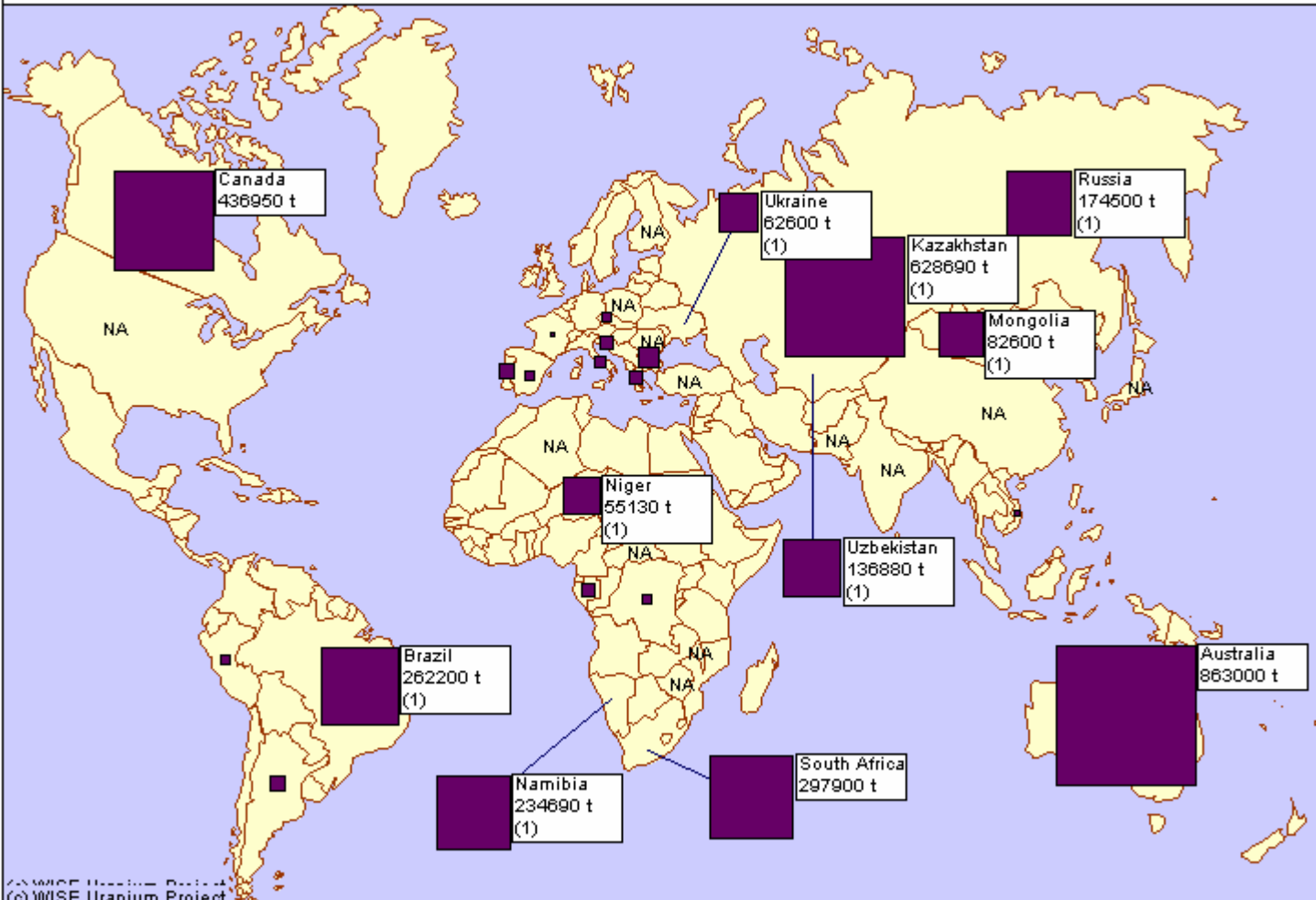
	U-234	U-235	U-238	Összesen
atom %	0.0054%	0.72%	99.275%	100%
tömeg %	0.0053%	0.711%	99.284%	100%
aktivitás %	48.9%	2.2%	48.9%	100%
1 g természetes U aktivitása	12,356 Bq	568 Bq	12,356 Bq	25,280 Bq

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, általában 0,1-0,5%.

World Uranium Resources (RAR + EAR-I)

[t U] RAR + EAR-I as of 1/1/2001, Cost range US\$80/kg U or less (OECD 2002)



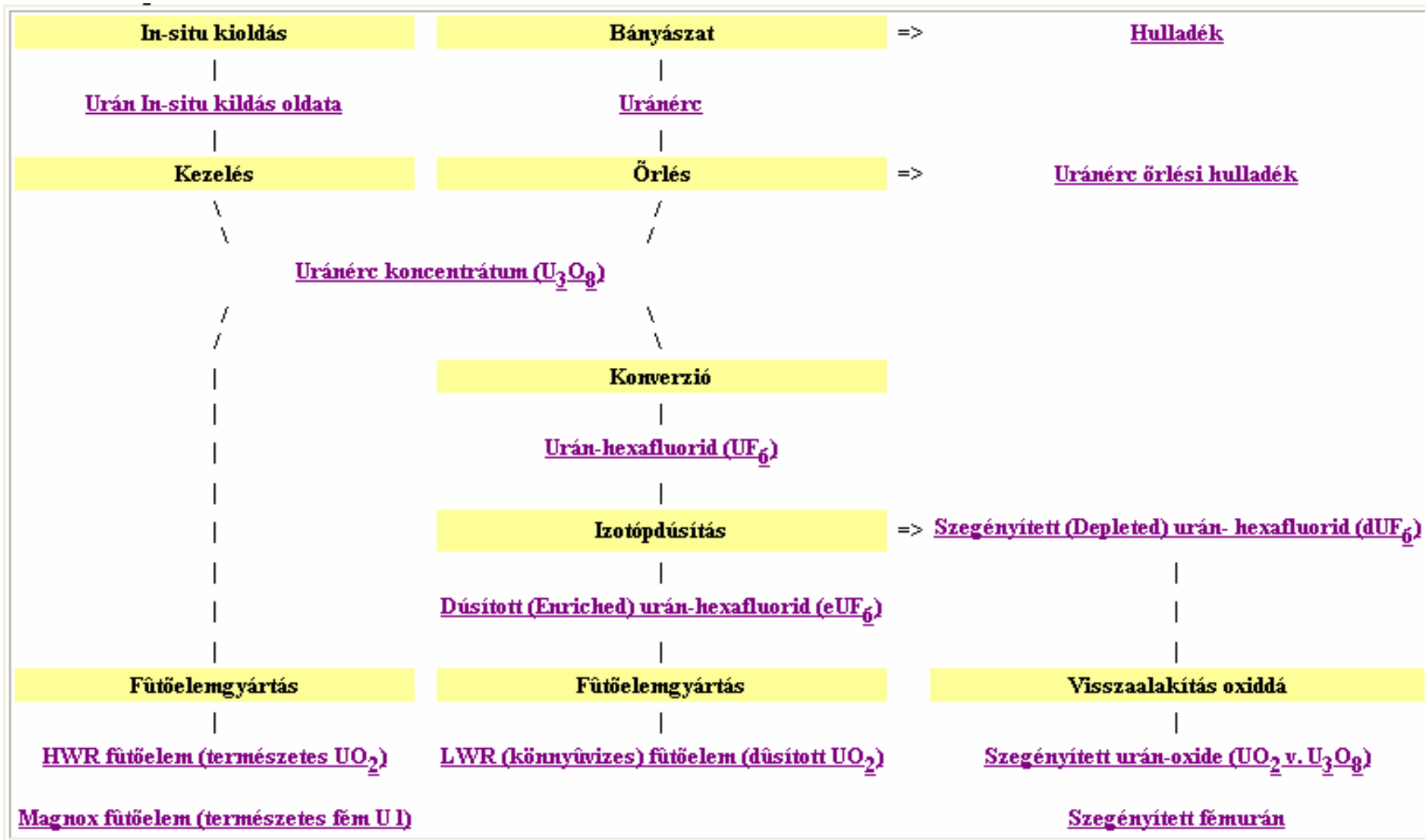
© WISE Uranium Project

Click (and hold) unlabeled marks to see associated data.

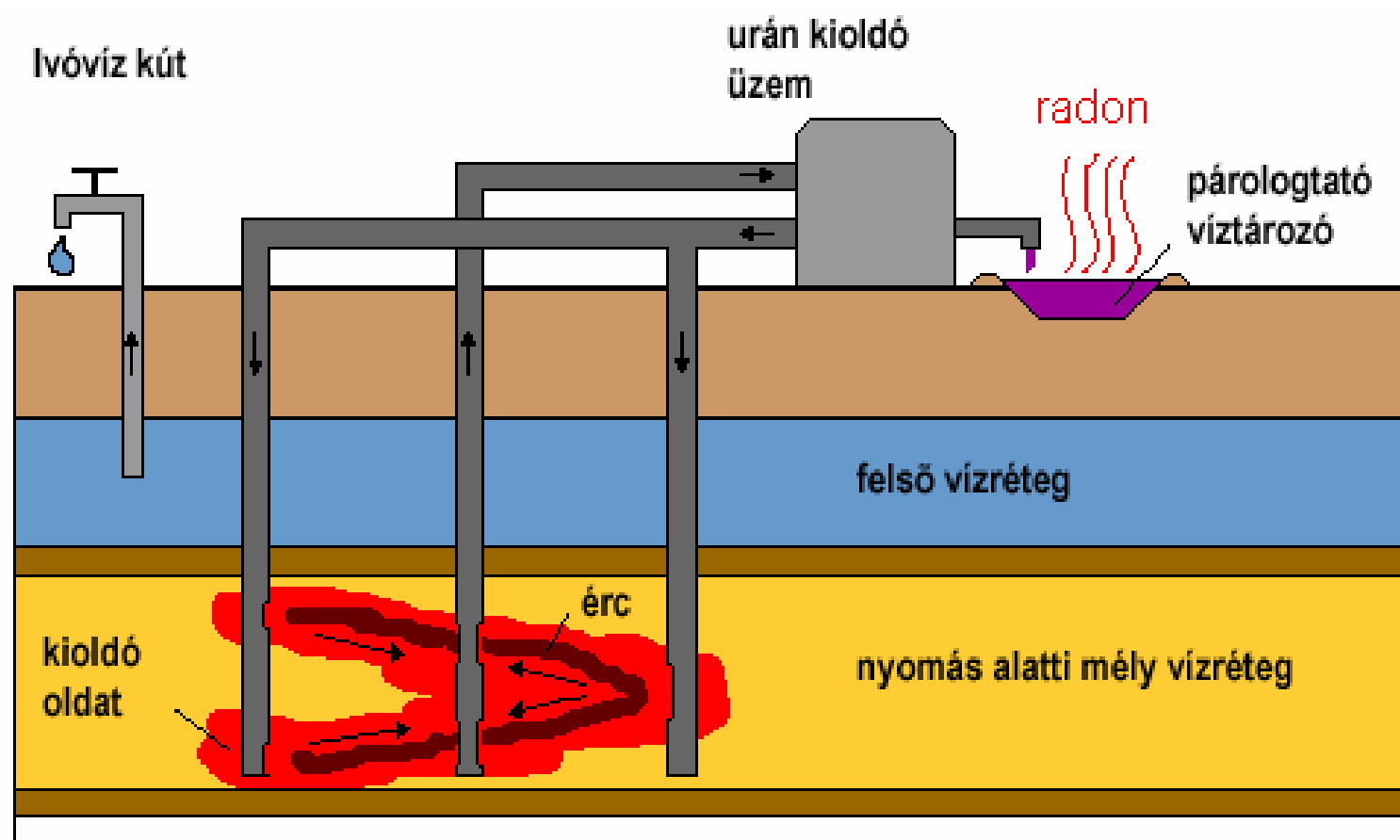
t = metric tonne · NA = Data not available

Ismert uránkészletek a világon		
	tonna U	világ %
Ausztrália	863,000	28%
Kazakisztán	472,000	15%
Kanada	437,000	14%
Dél-Afrika	298,000	10%
Namíbia	235,000	8%
Brazília	197,000	6%
Oroszország	131,000	4%
USA	104,000	3%
Üzbegisztán	103,000	3%
világ összesen	3,107,000	
<p><i>Reasonably Assured Resources plus Estimated Additional Resources - category 1, to US\$ 80/kg U, 1/1/01, from OECD NEA & IAEA, Uranium 2001: Resources, Production and Demand.</i></p> <p>Brazil, Kazakhstan, Uzbekistan and Russian figures above are 75% of in situ totals.</p>		

A fűtőelemgyártás lehetséges technológiai lépései



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



Az urán in-situ kioldása

1. Fűtőelemgyártás

Az urán 3-4 g/t koncentrációban fordul elő a külső köpenyben, szétszórva, gyakori elem. Az 1000 m vastag külső köpenyben kb 10^{12} t uránmennyiség található. Az óceánokban kb 3 mg/m³ urán található, ez 4 10^9 t uránnak felel meg. Az uránérc (U₃O₈) kitermelésre alkalmasak 0,05 % urántartalomig. Néha arany és rézércel közösen fordul elő, ami a kitermelést gazdaságossá teheti.

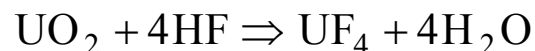
•Az uránt részben mélyművelésű bányákban részben felszínközeli műveletekben termelik ki. **Egy lehetséges fémurán előállítási feldolgozási technológia a következő:**

•A nyers érc kitermelése után mechanikai, termikus és kémiai műveletekkel (törés, őrlés, osztályozás, kilúgozás, derítés, extrakció, lecsapás, víztelenítés U₃O₈ uránoxidot (yellow cake) állítanak elő. Tradicionális flotációs módszerrel különítik el a kis sűrűségű szilikátokat és alumínátokat az ércről és finomszemcsés iszapot kapnak. Ezután pl. salétromsavval kioldva UO₂(NO₃)₂ uranil nitrát oldat keletkezik. Ezt általában szakaszos műveletben kevert saválló tartályokban végzik. Ezután az uranil nitrát oldatból extrakcióval távolítják el az uránt Tributyl-foszfát extrahálószerrel alkalmaznak paraffin oldatban. Az extrakciót folyamatos folyadék-folyadék szkrabberben végzik. Az extrakció során az urán-komplex UO₂(NO₃)₂·2(TBF) vegyületként kerül át a szerves fázisba, a visszamaradt salétromsavat koncentráció után ismét felhasználják. A komplex uránvegyületet tartalmazó oldatot bepárlóba vezetik, ahol a TBF lehasad és az uranil-nitrát oldadékban marad vissza. További hevítés hatására az uranil-nitrát U₃O₈ uránoxidra (yellow cake) és nitrogénre bomlik.

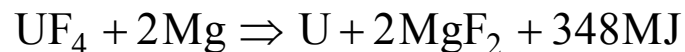
•Az urán-triioxidot hidrogénnel alakítják urán-dioxiddá: $UO_3 + H_2 \Rightarrow UO_2 + H_2O$

Dr. Pátzay György

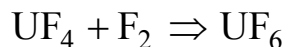
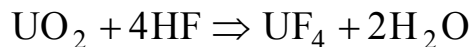
•A következő lépésben az urán-oxidot hidrogén-fluoriddal 350-600 °C-on uránium-tetrafluoriddá (green salt) alakítják:



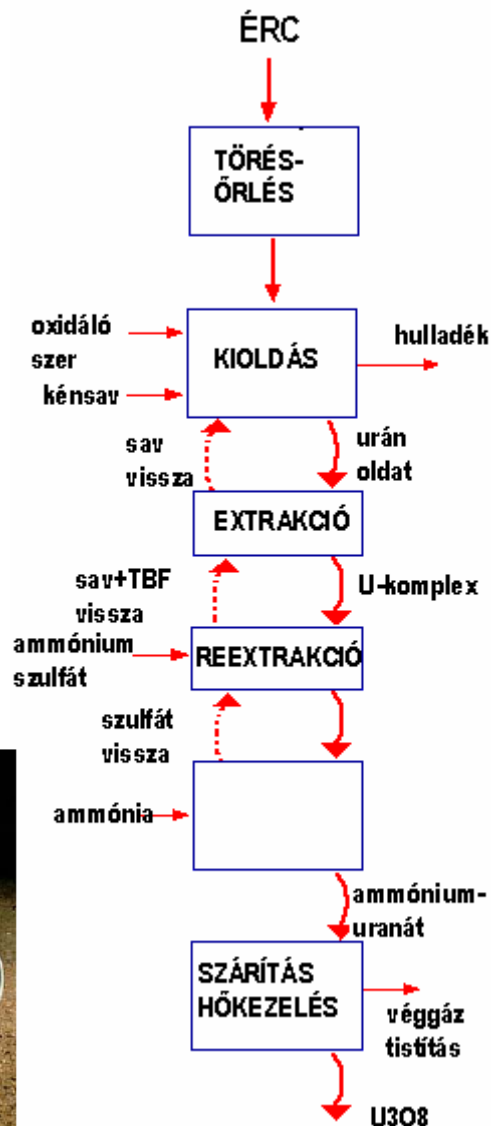
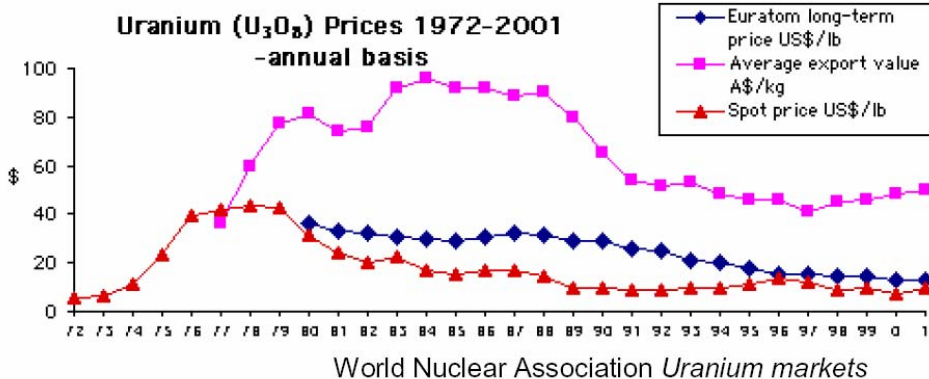
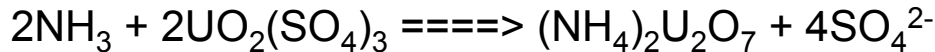
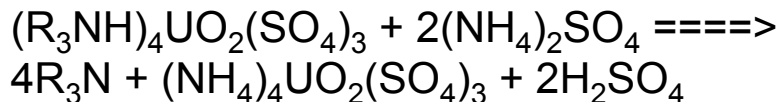
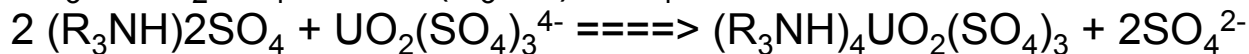
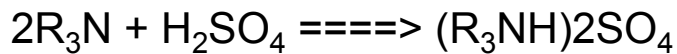
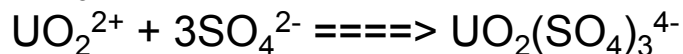
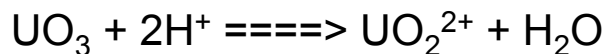
•Végül az uránium-tetrafluoridot magnéziummal fém uránná redukálják: Utóbbi reakciót dolomittal bélelt acélcsôben 1300 °C-on végzik. Az exoterm reakció miatt csak kb 650 °C-ig kell hevíteni a reakció elegyet. Egy sarzsban átlagosan 1500 kg fém uránt állítanak elô.



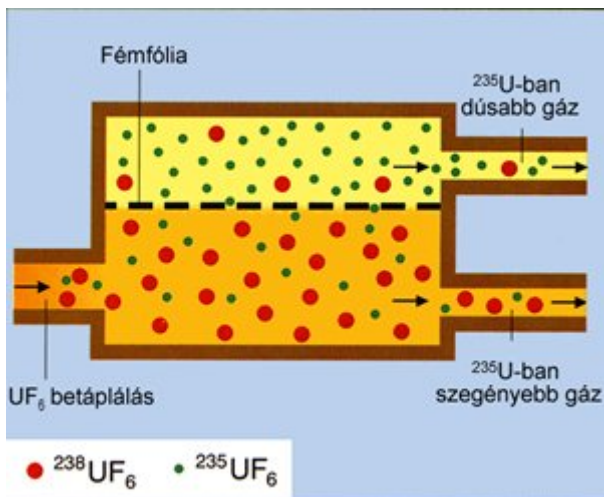
A jelenleg elterjedten használt könnyûvizes reaktorok dúsított uránnal (kb 3,5 %) dolgoznak mert a könnyûvíznek nagy a neutron elnyelése. Az így dúsított uránnal kb 34000 MWd/t kiegészi szint érhetô el. Az összes ismert urán dúsítási mûveletben gáz halmazállapotú urán-hexafluoridot alkalmaznak. A kiindulási urán oxidot U_3O_8 (yellow cake) hidrogénnel urán-dioxiddá UO_2 redukálják, majd hidrogén-fluoriddal urán-tetrafluoriddá, végül urán-hexafluoriddá UF_6 alakítják:



Alternatív technológia tercier-aminnal (petroleum hígító)végzett extrakciós kezelés



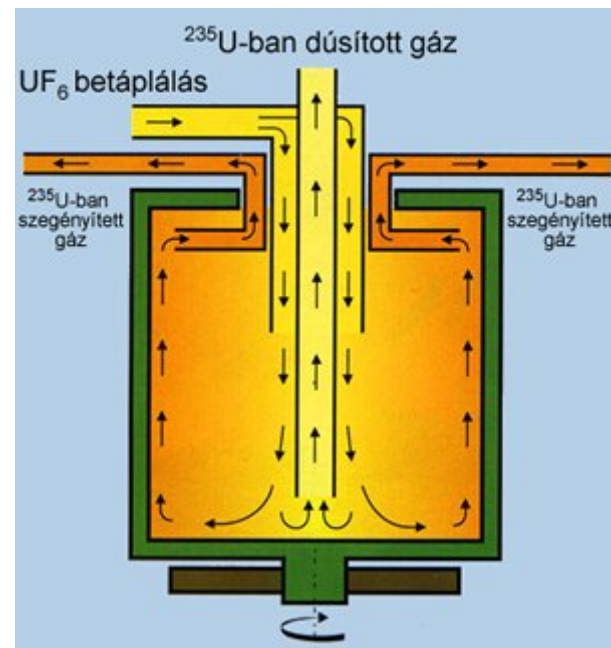
Az urán-hexafluorid színtelen, már szobahőmérsékleten illékony vegyület. Az urán-235 izotóp dúsítása történhet gázdiffúziós (több száz fokozat), gázcentrifugálásos (40-60 fokozat) és elválasztó-fúvókás módszerrel. A fűtőelemkészítés további lépésében az urán-hexafluoridot újra UO_2 urán-dioxiddá alakítják, melynek eredményeképpen poralakú urán-dioxid keletkezik. Ezt nyomás és szinterelés alkalmazásával tablettákká préselik



a)



b)



c)

Az urán izotópdúsítása

a) és b) gázdiffúzióval, c) gázcentrifugálással



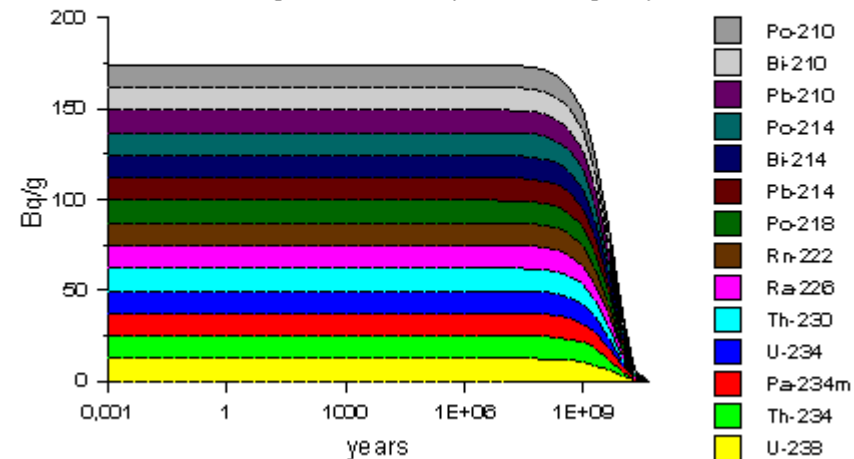
Ranger felszíni uránbánya (Ausztrália)

0,1%-os uránérc fajlagos aktivitása
Évmilliók óta egyensúly áll fenn.

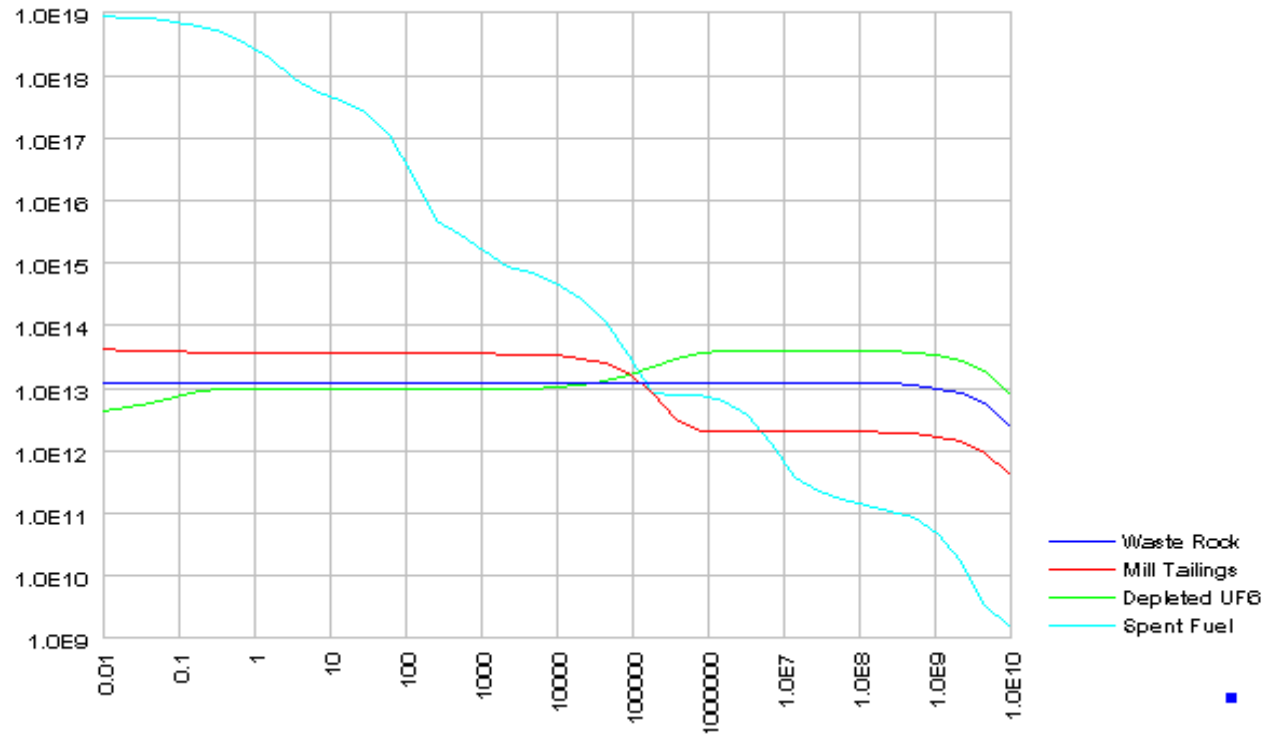
Dr. Pátzay György

Uranium Ore Activity

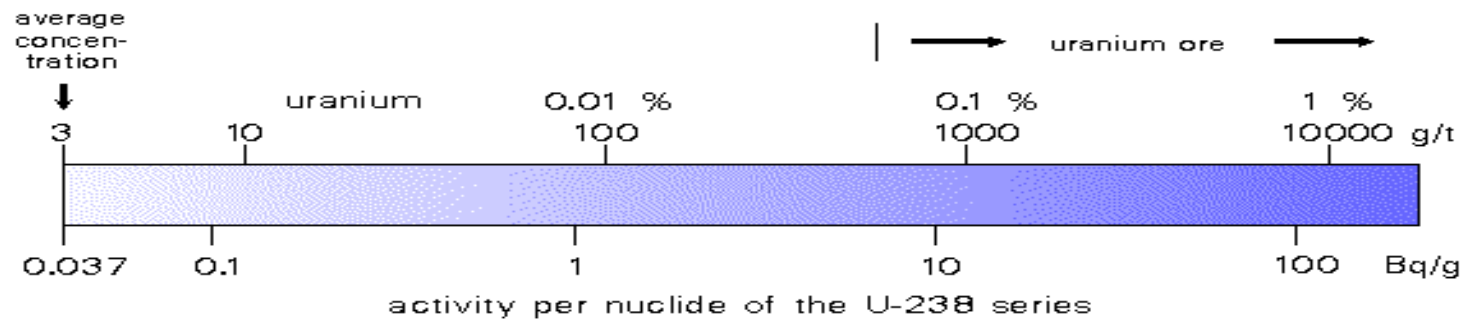
ore grade 0.1% U (stacked diagram)



Activities [Bq] vs. time [a]

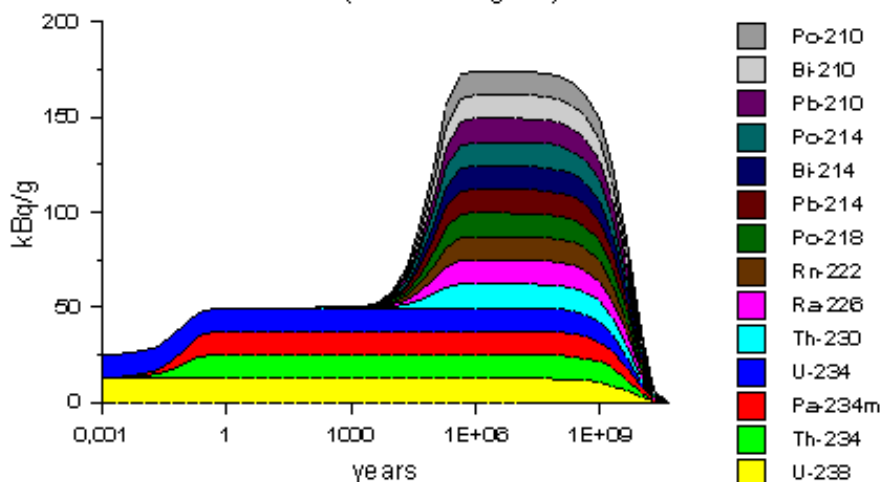


Uranium Concentrations in Rock



Natural Uranium Activity

(stacked diagram)



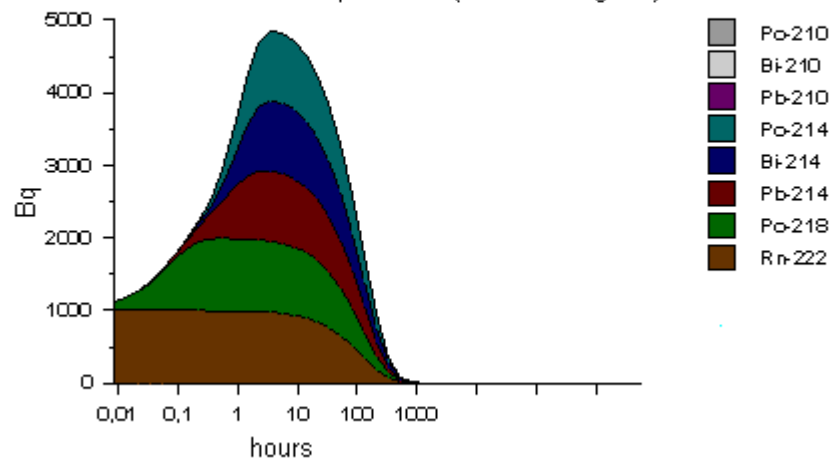
A természetes uránból nyert U_3O_8 fajlagos aktivitása

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.

Dr. Pátzay György

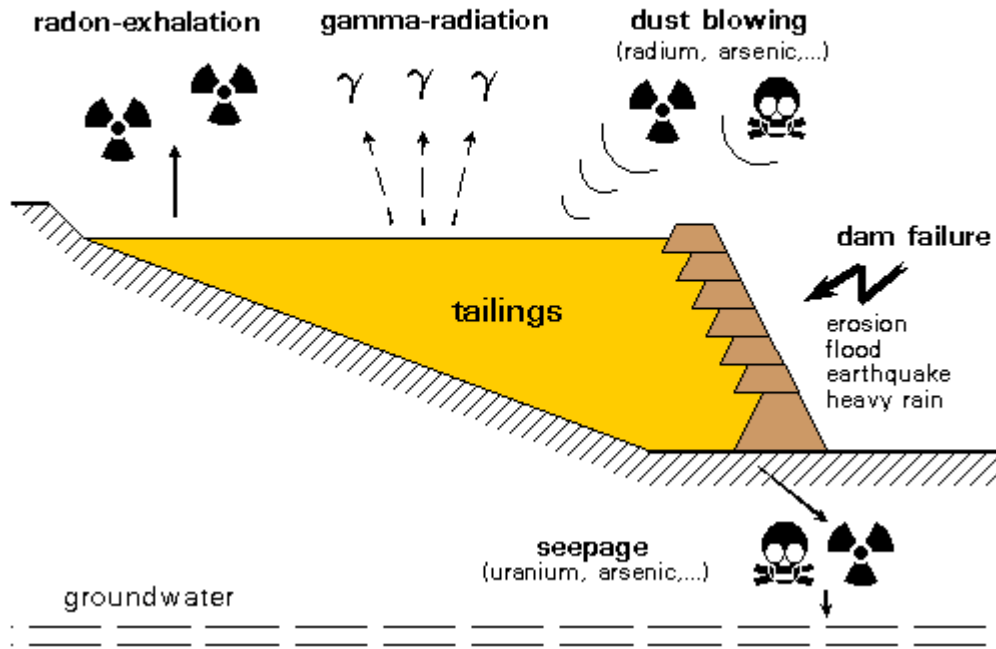
Radon and Progeny Activity

for 1000 Bq Rn-222 (stacked diagram)



A radon és bomlástermékeinek aktivitása

Uranium Mill Tailings Hazards

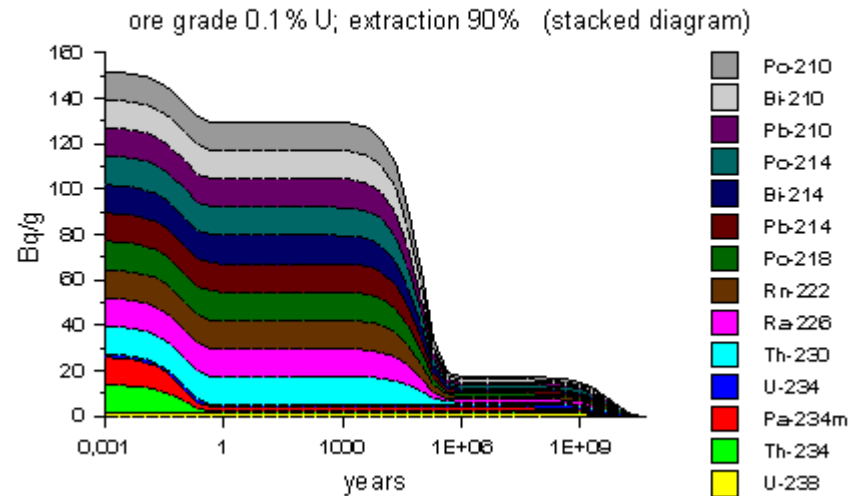


Uránbánya meddő kockázatai

Uránbánya meddő fajlagos aktivitása

Néhány hónapon belül a ^{234}Th és a $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 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.

Uranium Mill Tailings Activity



**A kiégett fűtőelem nehézfém összetétele (tömeg%)
(kezdetben 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%

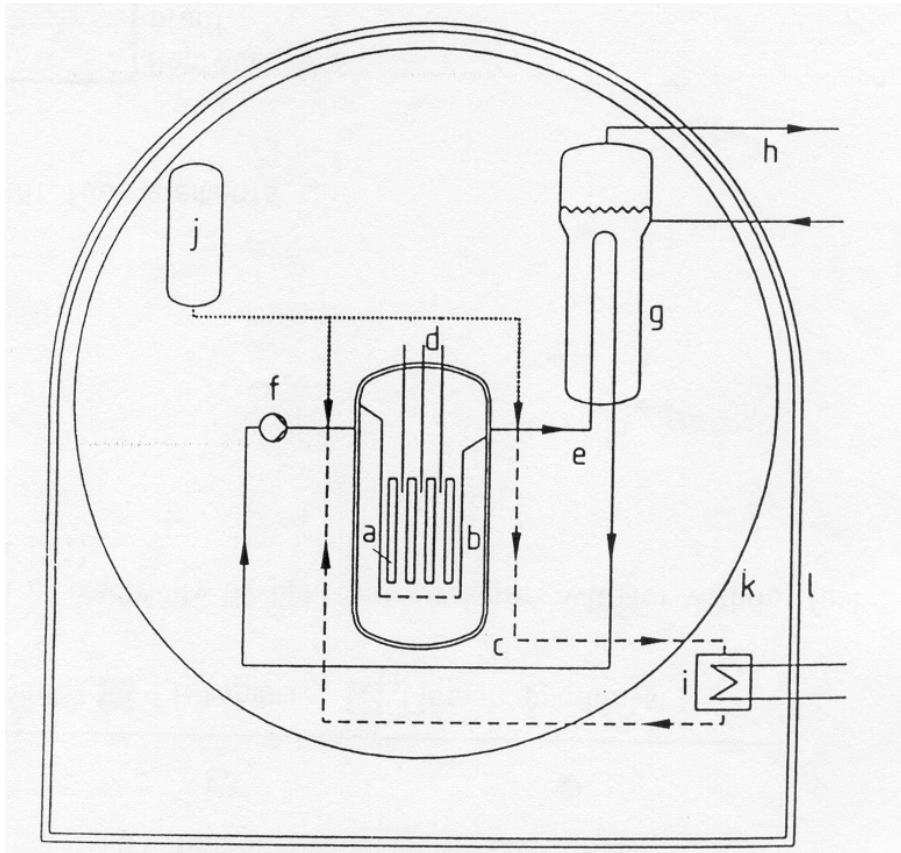
Természetes uránból 3,5%-ra dúsított dúsított uránhoz tartozó szegényített urán összetétele

	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

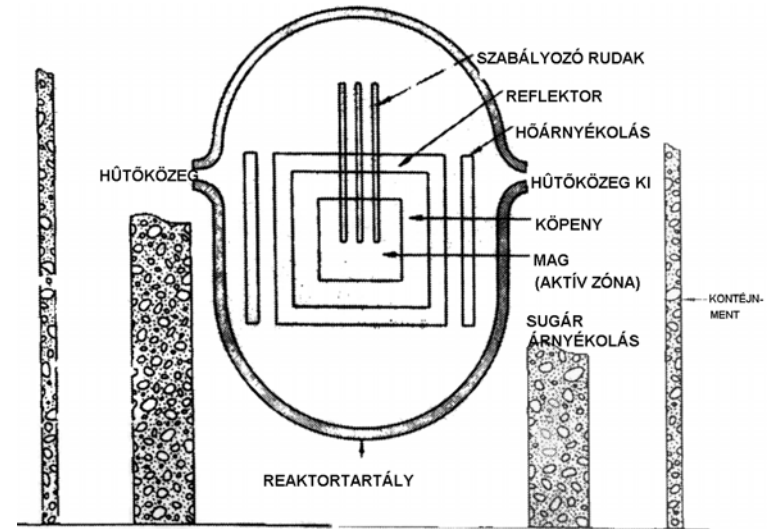
Természetes uránból 3,5%-ra dúsított dúsított urán összetétele

	U-234	U-235	U-238	Összesen
tömeg %	0.02884%	3.5%	96.471%	100%
aktivitás %	81.8%	3.4%	14.7%	100%
1 g dúsított U aktivitása	66,703 Bq	2,800 Bq	12,005 Bq	81,508 Bq

A reaktor



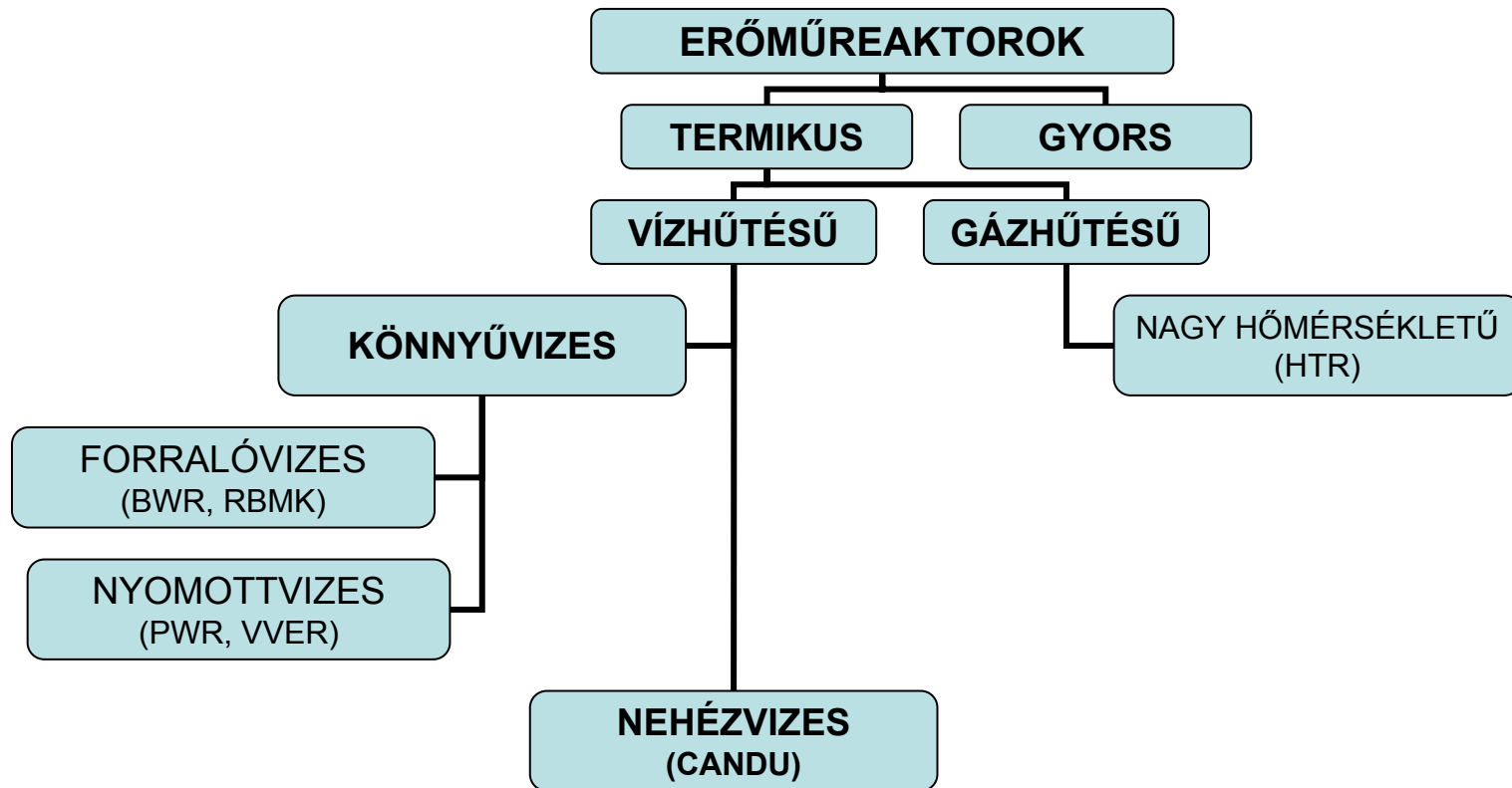
Egy nyomottvizes atomerőmű (PWR) főbb részei
 a) Aktív zóna, b) reflektor, c) reaktor tartály, d)
 szabályozó rudak, e) hűtővíz fővezeték, f) fő
 keringtető szivattyú, g) gőzfejlesztő, h) gőzvezeték a
 turbinához, i) bomlási hő elvonó rendszer, j)
 akkumulátor, k) biztonsági tartály, l) kontéjnment



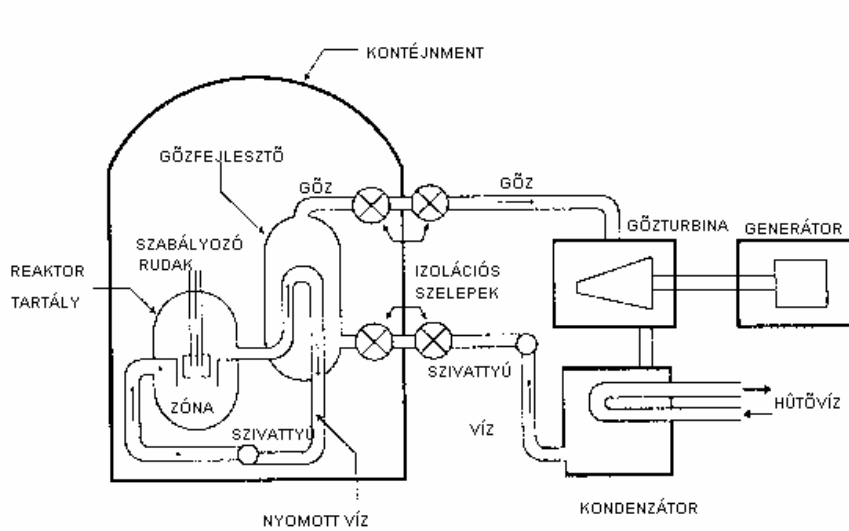
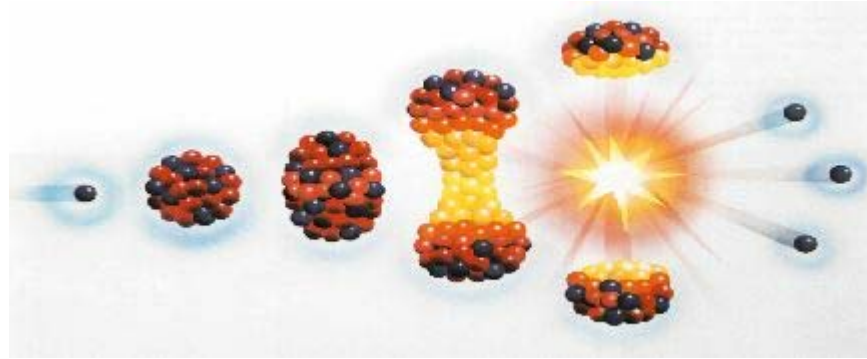
A REAKTOR RÉSZEI



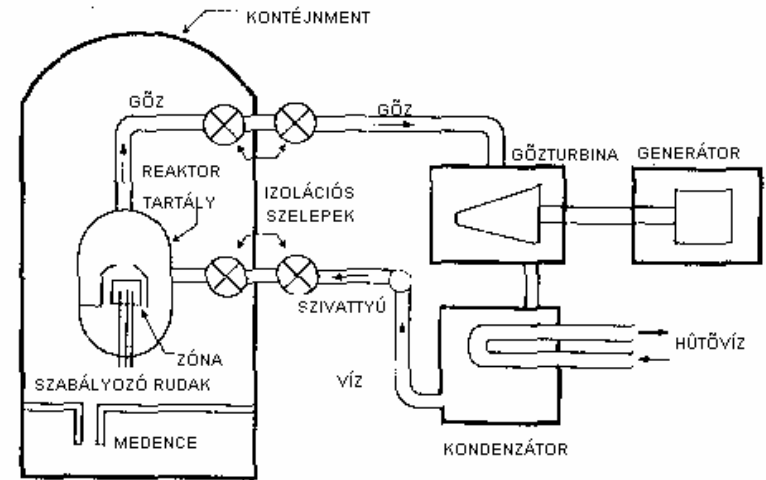
TMI PWR
(USA)



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)

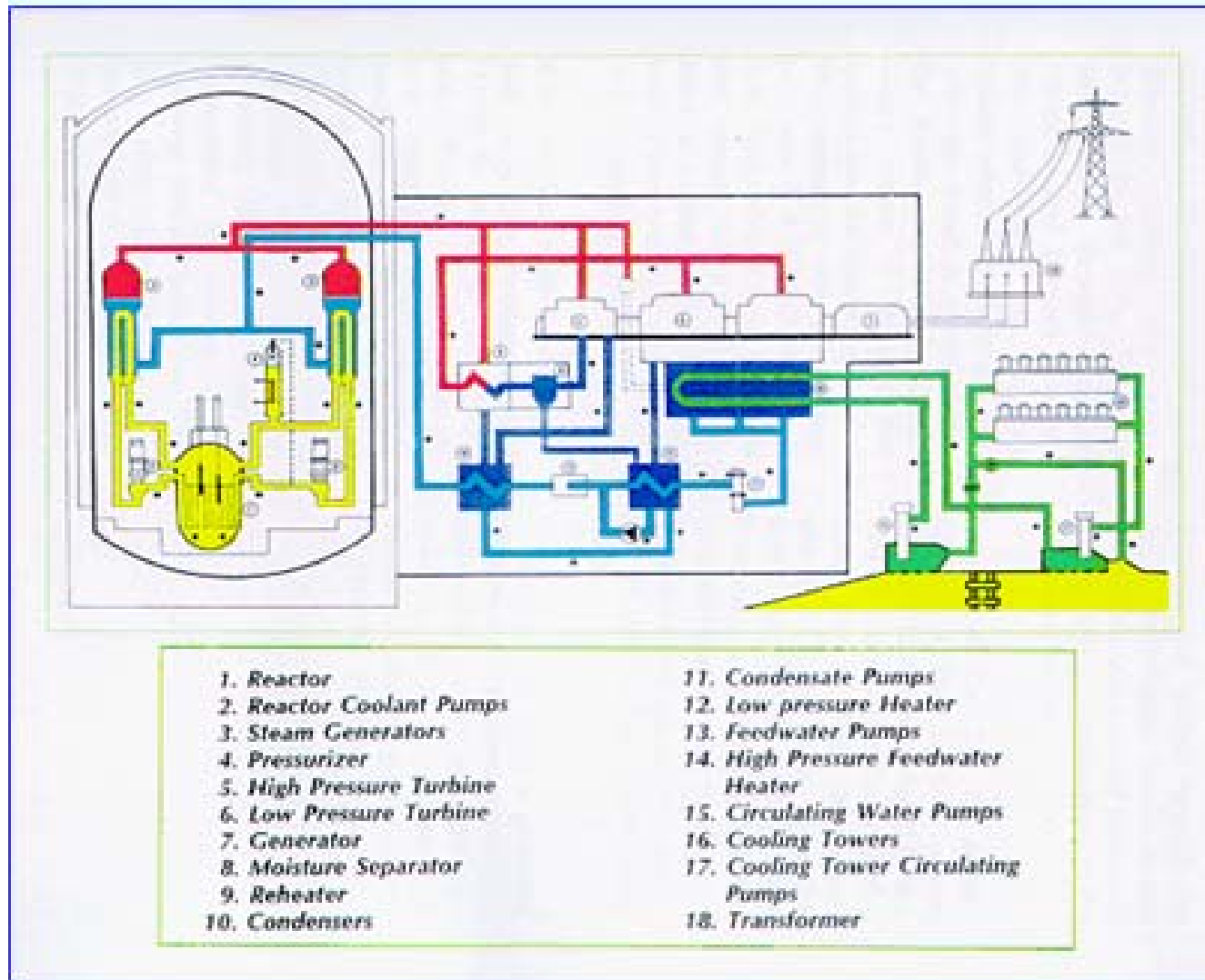


Nyomottvizes (PWR) atomerőmű

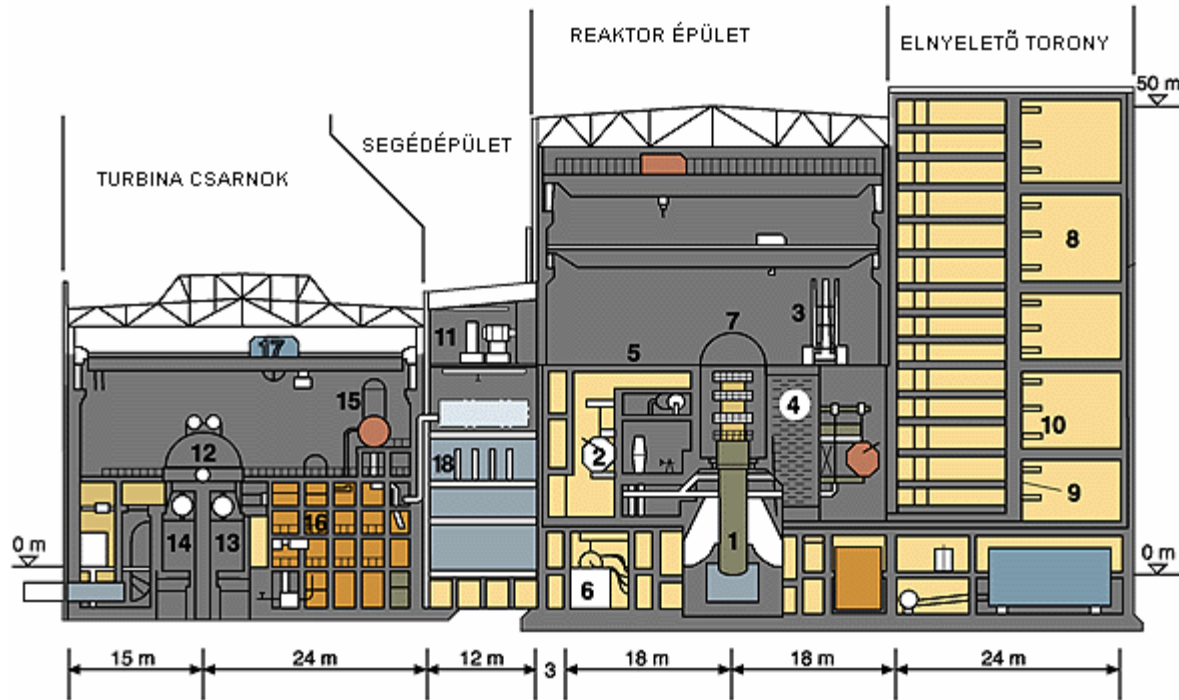


Forralóvizes (BWR) atomerőmű

Westinghouse 656 MW_e PWR (Szlovénia)



A VVER-440/213 nyomottvizes reaktor



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 turbina











13 kondenzátor 14 turbina blokk 15 tápvíz tartály 16 előhevítő 17 turbina csarnok daru 18 elektromos berendezések, vezérlések















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%
Kiégetési szint	28600 MWnap/t
Kiégetési 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/cm ³

A világ 25 „legjobb” atomerőművi blokkja

A világ 25 legjobb atomerőművi blokkjának összesítése a teljes üzemidőre vetített teljesítmény-kihasználási tényező alapján (2001. december 31.)*
(150 MW teljesítmény feletti reaktort figyelembe véve)

1.	Emsland	PWR	92,9 %	1988	Németország	
2.	Neckar-2	PWR	90,9 %	1988	Németország	
3.	Grohnde	PWR	90,3 %	1984	Németország	
4.	TVO-1	BWR	88,9 %	1978	Finnország	
5.	Wolsong-2	CANDU	88,8 %	1997	Dél-Korea	
6.	TVO-2	BWR	88,3 %	1980	Finnország	
7.	Wolsong-3	CANDU	87,9 %	1998	Dél-Korea	
8.	Loviisa-2	PWR	87,6 %	1980	Finnország	
9.	Ulchin-4	PWR	87,3 %	1999	Dél-Korea	
10.	Tihange-3	PWR	87,1 %	1985	Belgium	

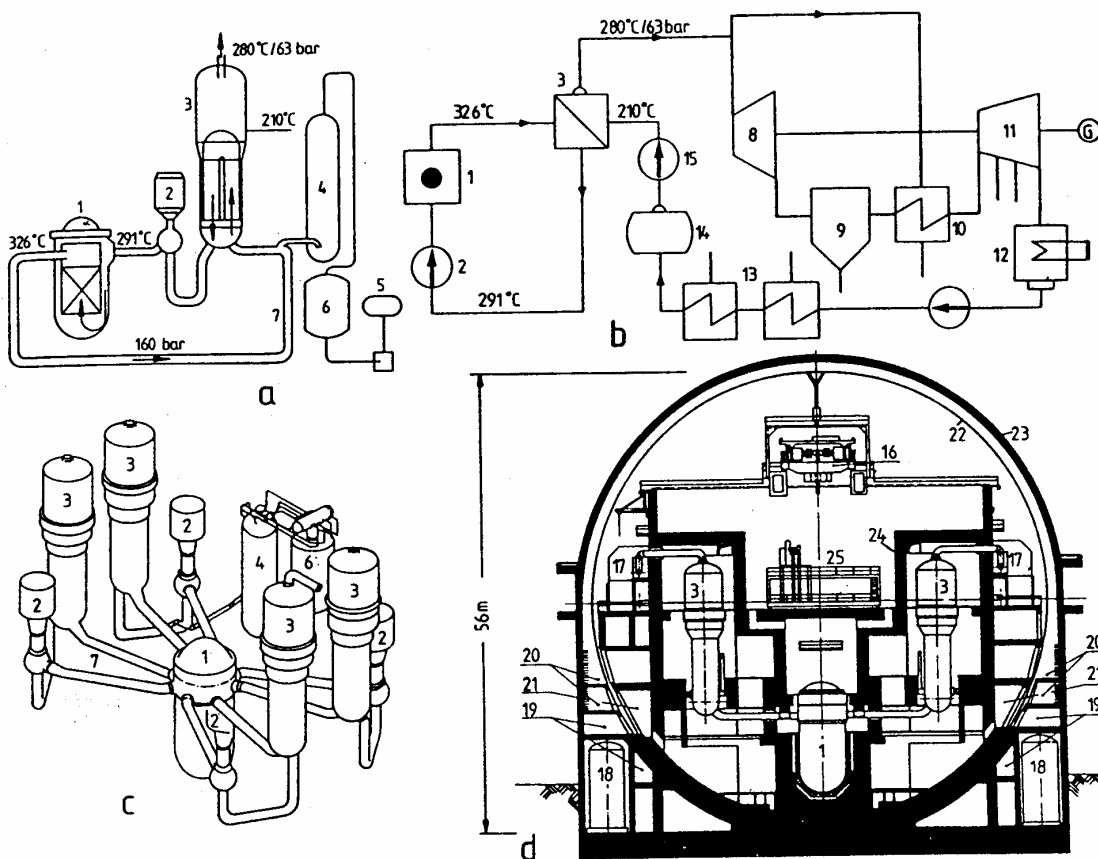
11.	Wolsong-4	CANDU	87,1 %	1999	Dél-Korea	
12.	Philippsburg-2	PWR	87,0 %	1984	Németország	
13.	Yonggwang-4	PWR	86,9 %	1995	Dél-Korea	
14.	Vogtle-2	PWR	86,9%	1989	USA	
15.	Paks-4	PWR	86,9 %	1987	Magyarország	
16.	Gösgen	PWR	86,6 %	1979	Svájc	
17.	Isar-2	PWR	86,5 %	1988	Németország	
18.	Doel-3	PWR	86,2 %	1982	Belgium	
19.	Beznau-2	PWR	86,1 %	1971	Svájc	
20.	Asco-2	PWR	86,1 %	1985	Spanyolország	
21.	Cofrentes	BWR	85,9 %	1984	Spanyolország	
22.	Brokdorf	PWR	85,1 %	1986	Németország	
23.	Paks-3	PWR	85,5 %	1986	Magyarország	
24.	Osi-2	PWR	85,5%	1984	Belgium	

*Forrás: Nuclear Engineering International, 2002.május

A teljesítmény kihasználási tényező az adott évben az adott blokk (vagy erőmű) által ténylegesen megtermelt és az elméletileg maximálisan megtermelhető villamos energia arányát mutatja. Ez a szám akkor lehet egy évben 100%, ha az adott blokk az év minden napján maximális teljesítményen üzemel. Mivel időnként (általában 11-18 havonta) a blokkokat üzemanyagcserére és karbantartásra le kell állítani, a teljes üzemidőre vetített TKT sosem lehet 100%.

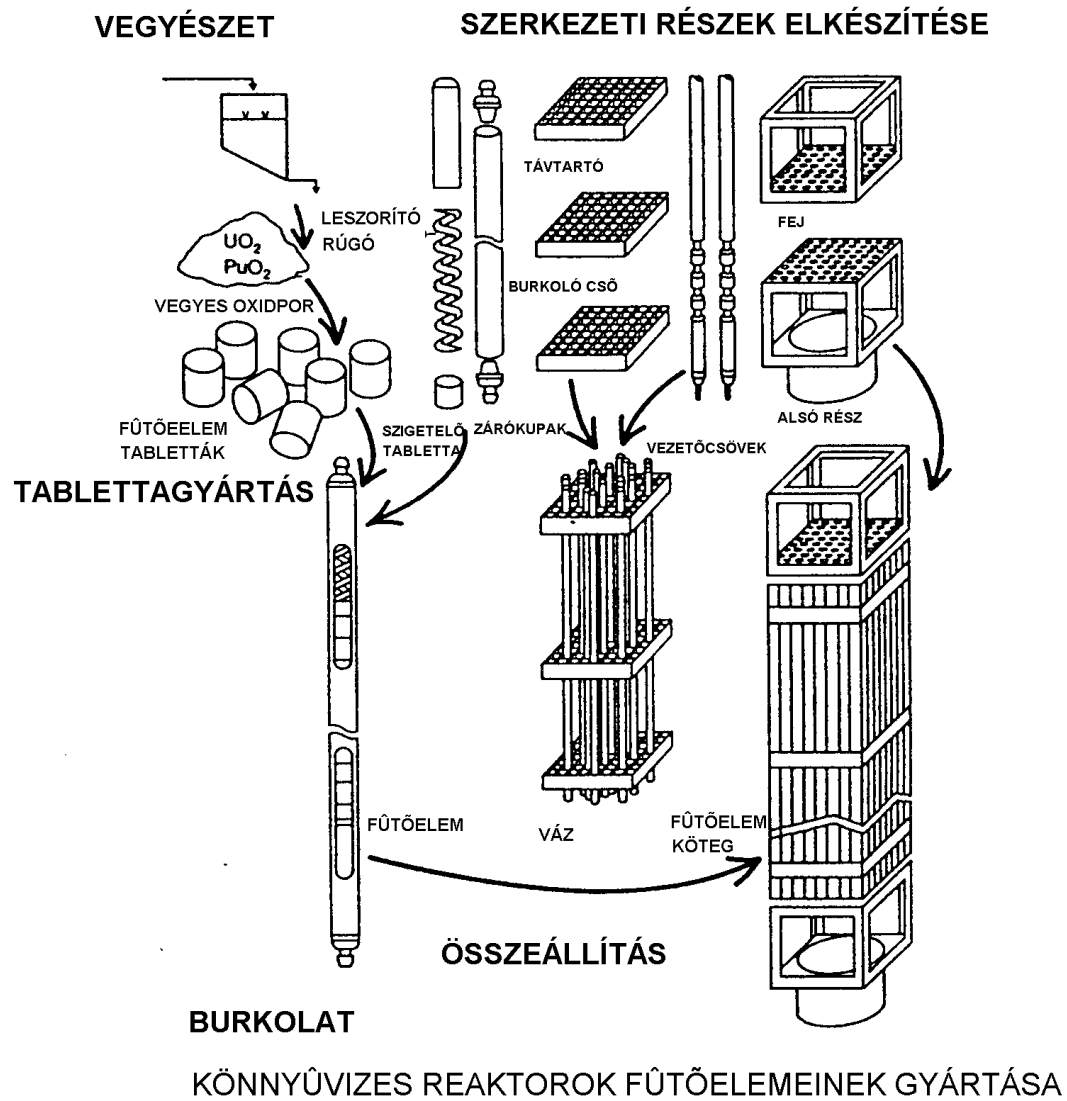
Erômûreaktorok jellemzô

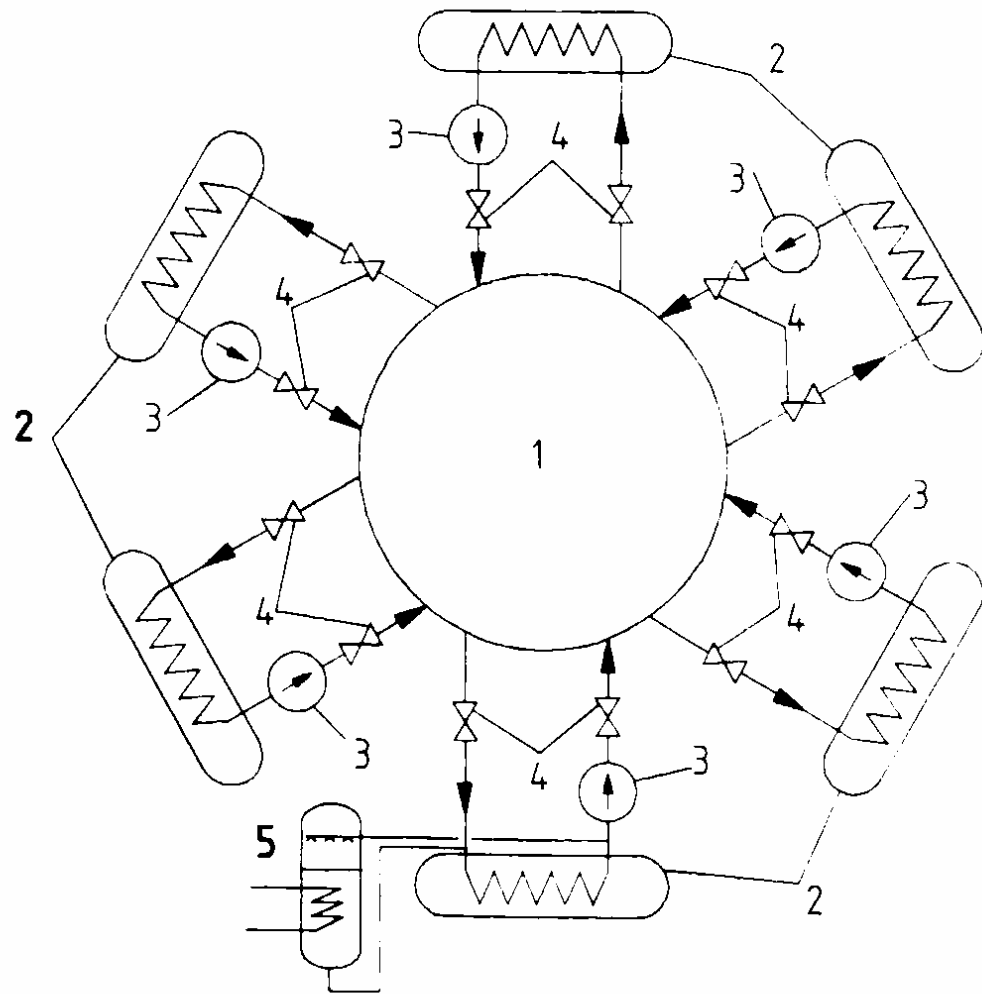
Jellemzô	egység	PWR	BWR	Candu	RBMK	FBR(gyszap)	AGR(adv.gas cooled)	HTR(high temp. reakt)
Moderátor	-	H ₂ O	H ₂ O	D ₂ O	H ₂ O, C	-	C	C
Hûtôközeg	-	H ₂ O	H ₂ O	D ₂ O	H ₂ O	Na	CO ₂	He
Hasadóanyag (szaporító anyag)	UO ₂	UO ₂	UO ₂	UO ₂	UO ₂	UO ₂ (PuO ₂)	UO ₂	UO ₂ (ThO ₂)
tipikus dústítás	%	3,4	3,2	nincs	1,8	10	2	8-93
telj. sûsûség	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. Főkeringető 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

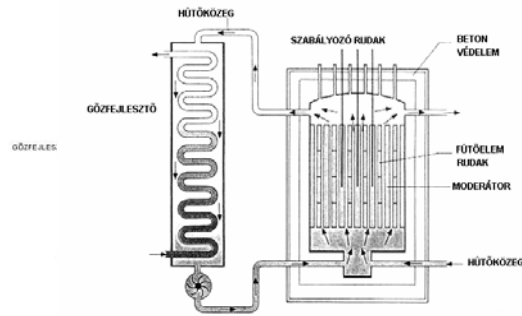
Egy nyomottvizes atomerőmű (PWR) vázlata



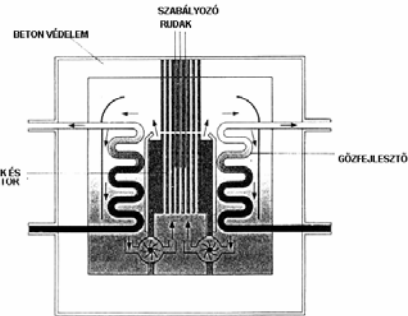


A VVER-440 blokk hűtőköreinek vázlata

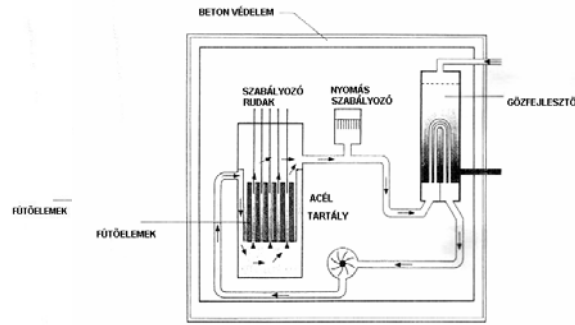
- 1: reaktor; 2: gőzfejlesztő; 3: főkeringető szivattyú;
 4: főlezáró tolózár; 5: nyomástartó edény (térfogatkompenzátor)



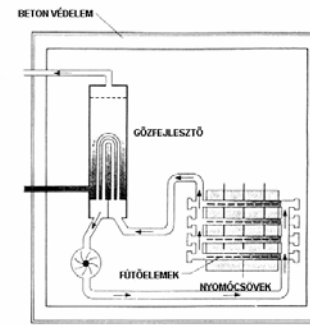
A MAGNOX REAKTOR (A FÜTŐELEMÉKET MAGNÉZIUM ÖTVÖZET BORÍTJA)



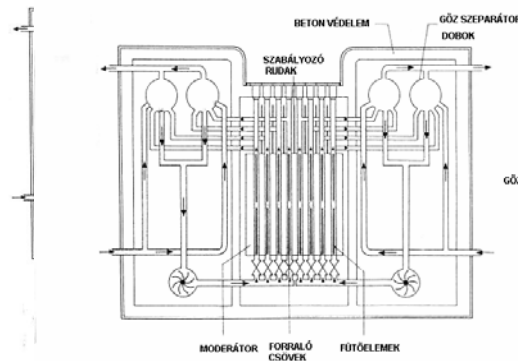
AZ ADVANCED GAS COOLED (AGR) REAKTOR



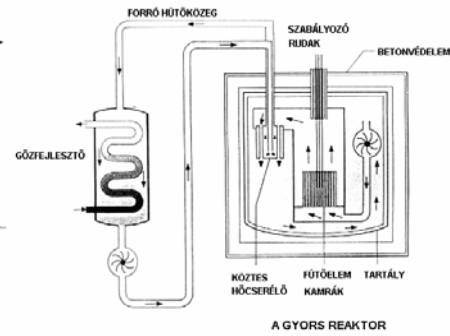
EGY NYOMOTTVIZES REAKTOR (PWR)



A KANADAI CANDU REAKTOR

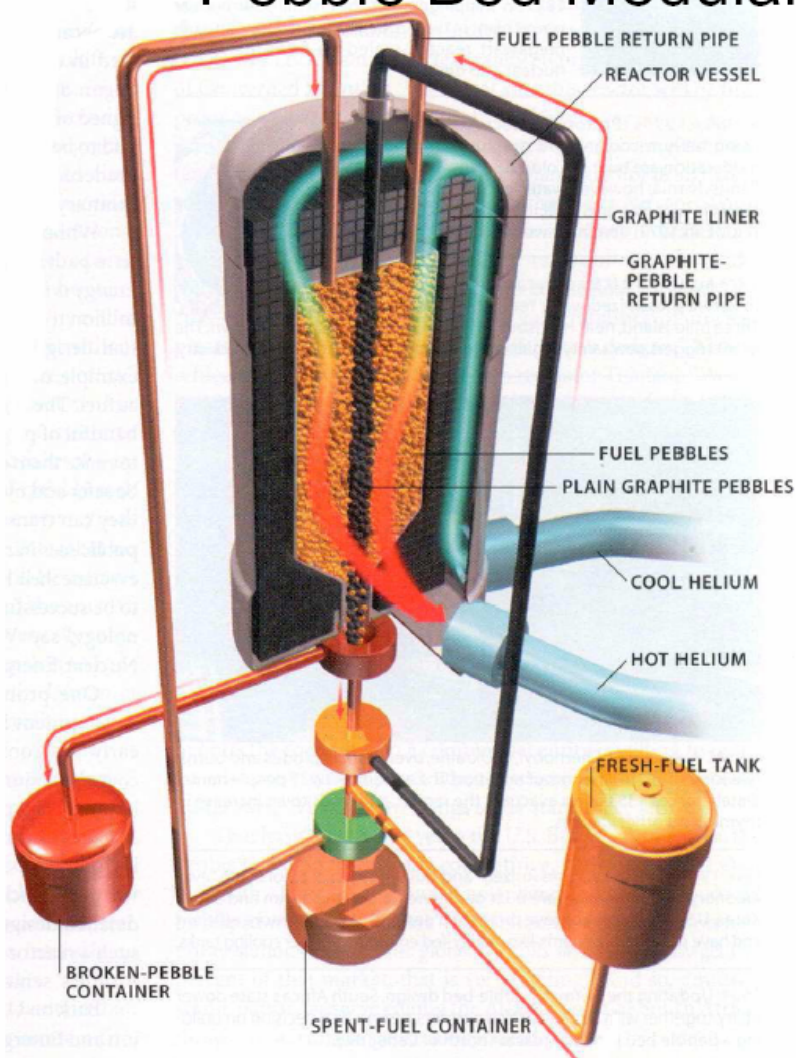


AZ 1986 ÁPRILIS 26-ÁN FELROBBANT CSERNOBŪLI RBMK-1000 REAKTOR



A GYORS REAKTOR

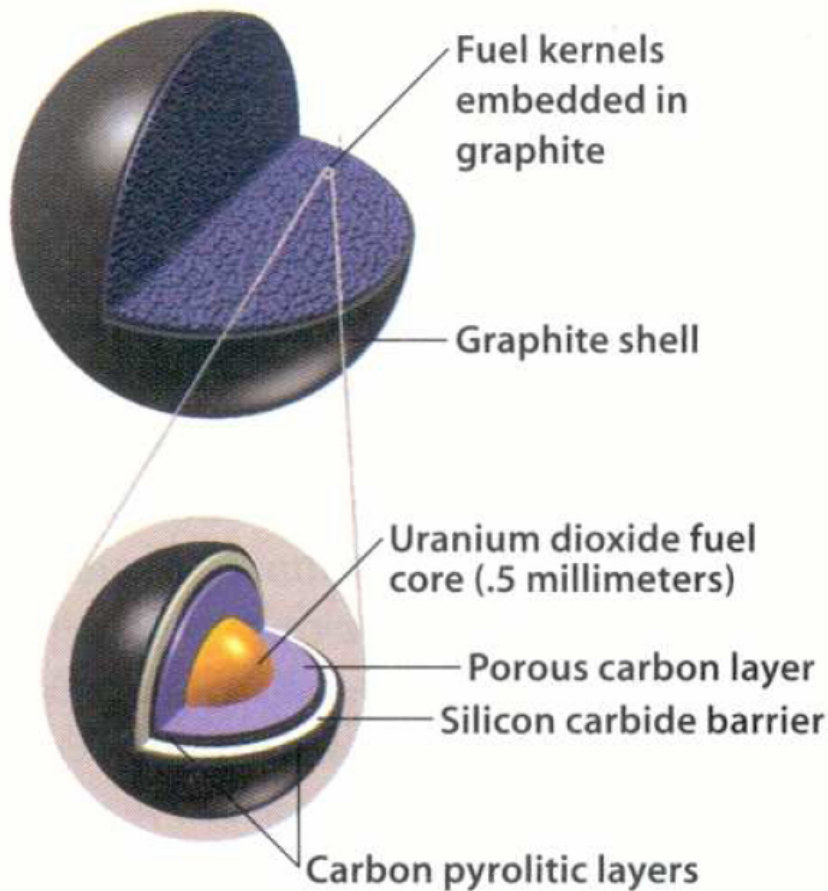
- Pebble Bed Modular Reactor



Helium drives turbine directly – no steam!

Graphic:
Technology Review

High Temperature Gas-Cooled Reactors I, continued

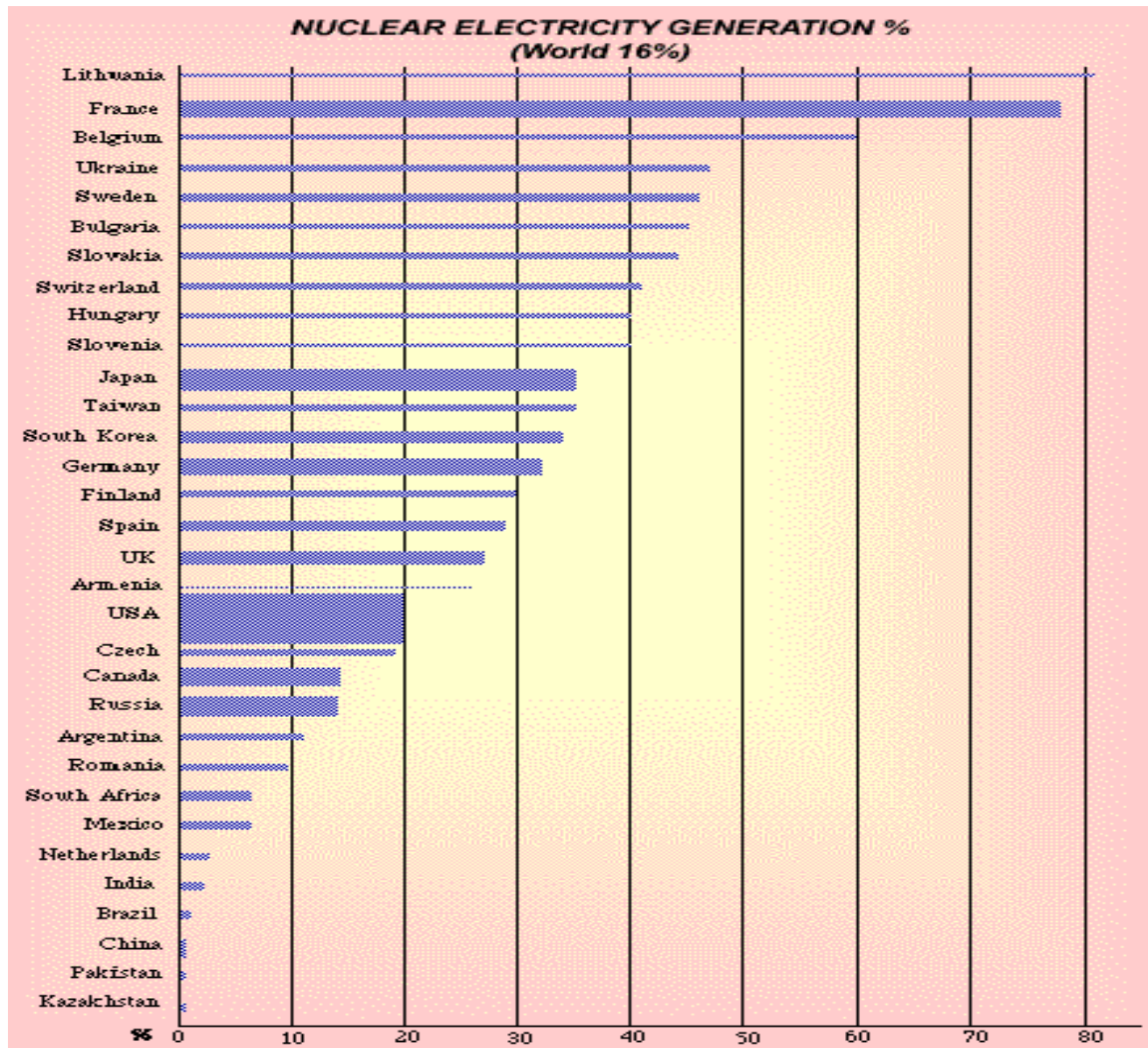


Pebble Bed 'Triso' Fuel *Size of a billiard ball*

- **Porous Carbon** absorbs gaseous fission products
- **Carbon** moderates neutrons
- **Silicon Carbide Layer** contains the radioactive wastes
- **Once through fuel cycle**

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			




Erőművek teljes életciklusára vonatkoztatott költségek (US cent/kWh)

(nukleáris és szabályozási probléma mentes esetre)

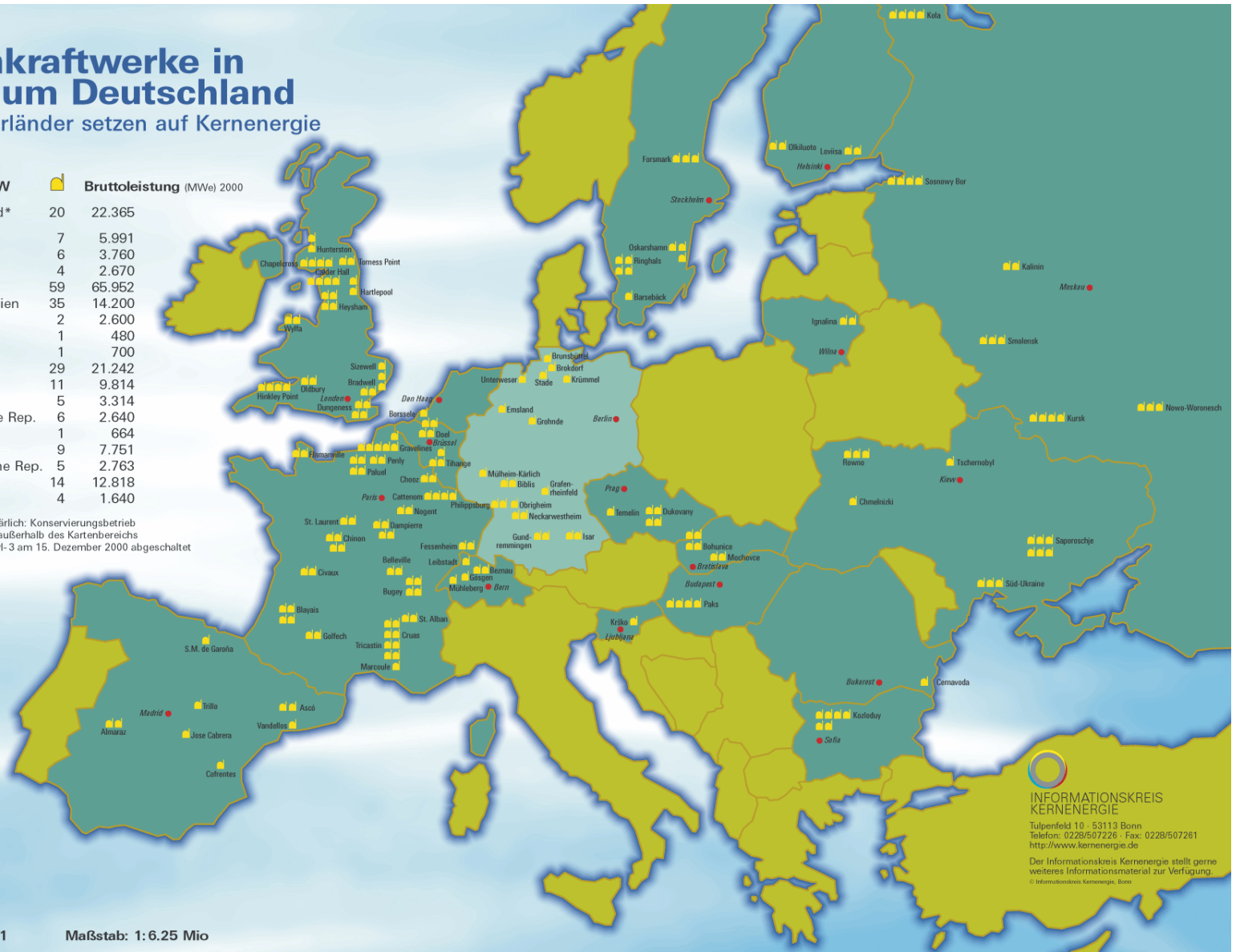
	Atom	Szén	Gáz
Francia o.	3.22	4.64	4.74
Orosz o.	2.69	4.63	3.54
Japán	5.75	5.58	7.91
Korea	3.07	3.44	4.25
Spanyol o.	4.10	4.22	4.79
USA	3.33	2.48	2.33-2.71
Kanada	2.47-2.96	2.48	2.33-2.71
Kína	2.54-3.08	3.18	-

Kernkraftwerke in und um Deutschland

Nachbarländer setzen auf Kernenergie

Anzahl KKW		Bruttoleistung (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

* Mülheim-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

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

Izotóp	Felezési idő (év)	Atomfegyver Pu izotóp összetétele (átlagosan)	PWR_a (33,000 MWd/t (d))	Gáz-grafit reaktor_b (5,000 MWd/t)	CANDU_c (7,500 MWd/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) Pressurized water reactor

(b) Gas-cooled, graphite-moderated reactor

(c) Canadian deuterium-uranium reactor

(d) Megawatt-days per ton of uranium fuel

Kiégett fűtőelemek feldolgozása (reprocesszálás)

Üzemelő atomreaktorban két fő folyamat megy végbe:

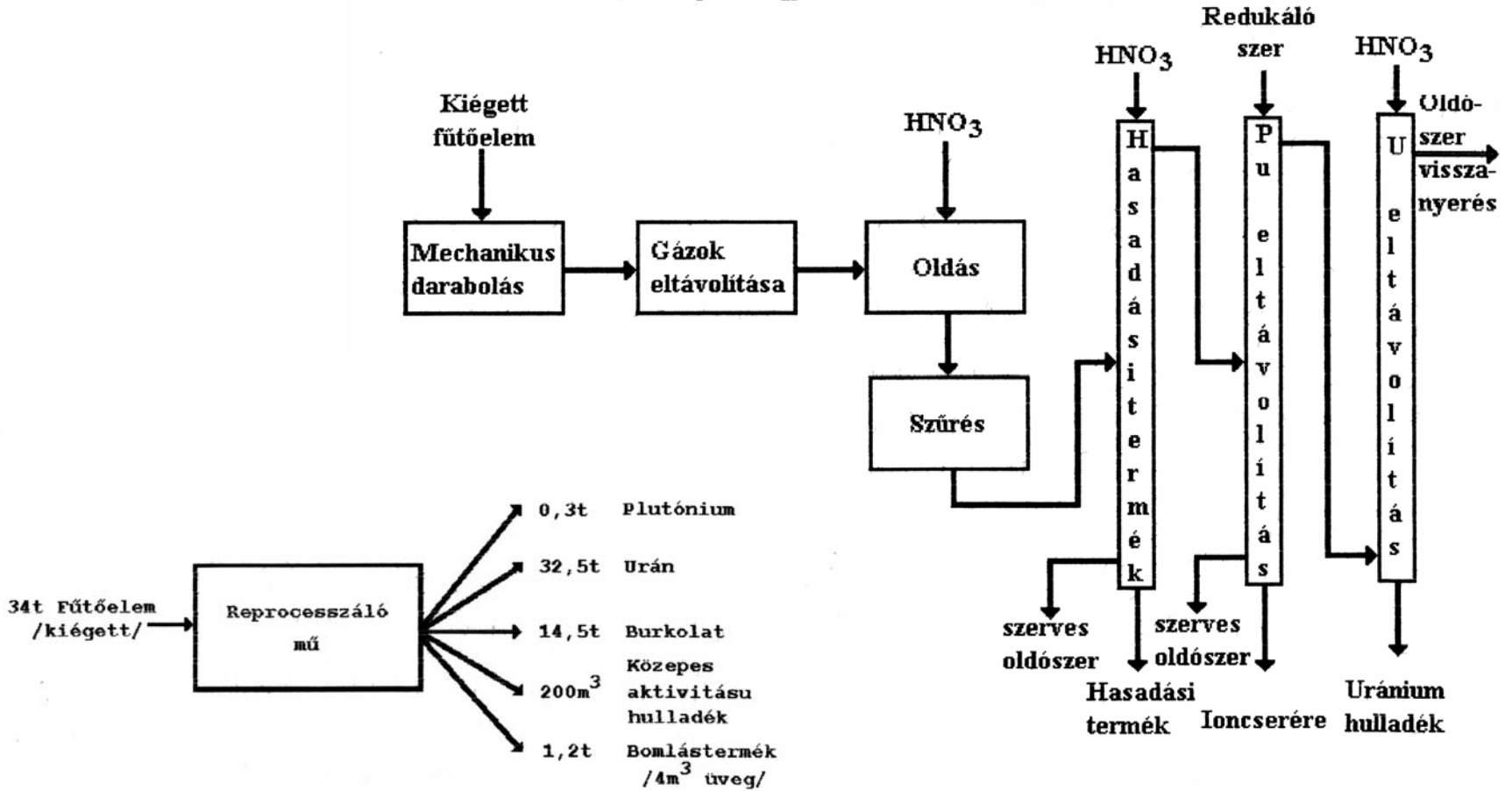
1. Neutronok hatására az U-235 magok hasadnak és energiakibocsátás, neutronkibocsátás mellett hasadvány magokat képeznek, melyek e folyamat hulladékai.
2. A neutronok ütköznek az U-238 magokkal is. Az U-238 nem hasad, hanem két rövid átmenet után egy teljesen új hasadóképes magot a Pu-239 magot hozza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

Így a kiégett 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 termékmagok (az U-235 és Pu-239 hasadásából)

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

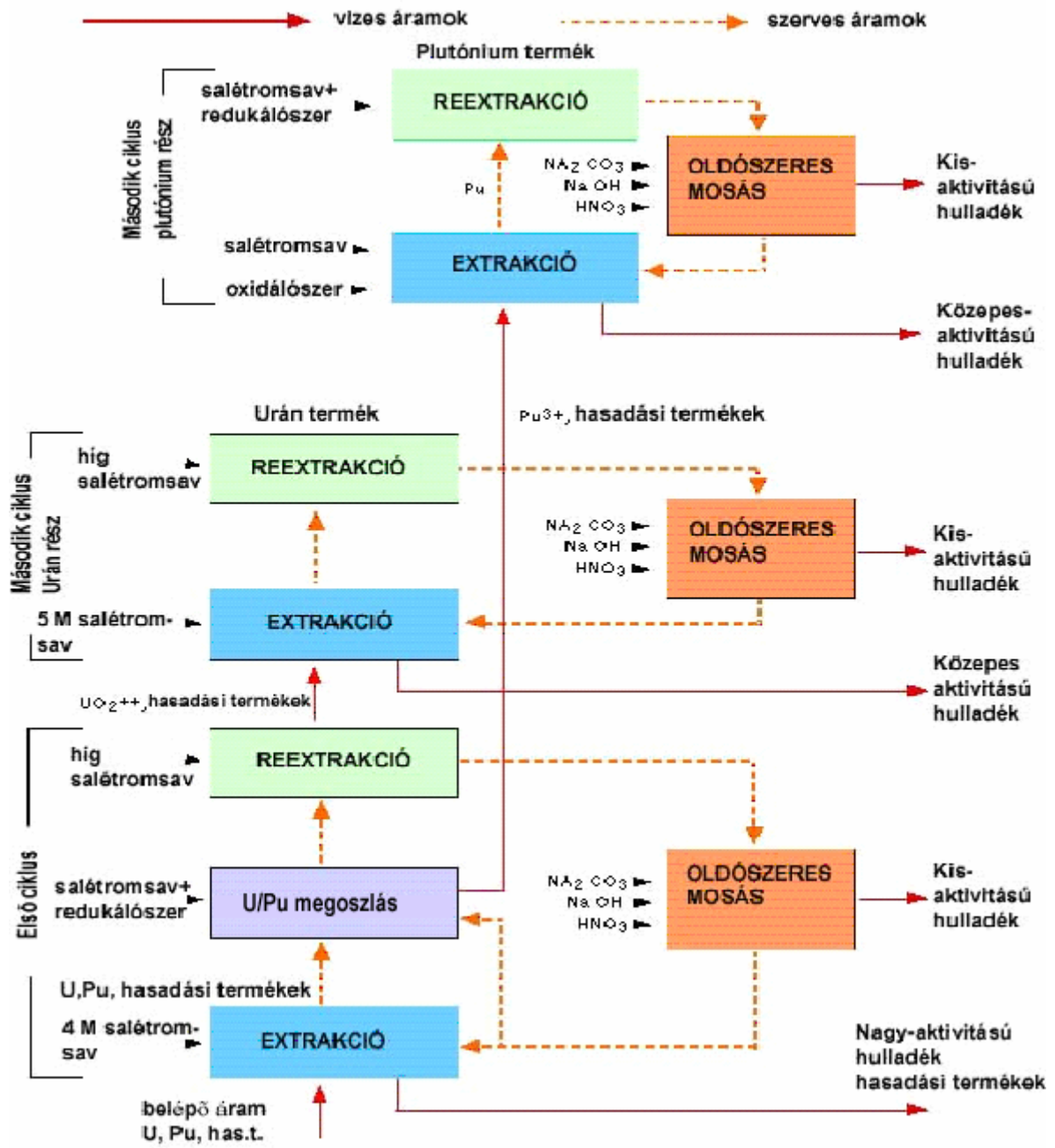
A Purex-eljárás egyszerűsített technológiai folyamat ábrája



Reprocesszálás anyagmérlege /1300 MW

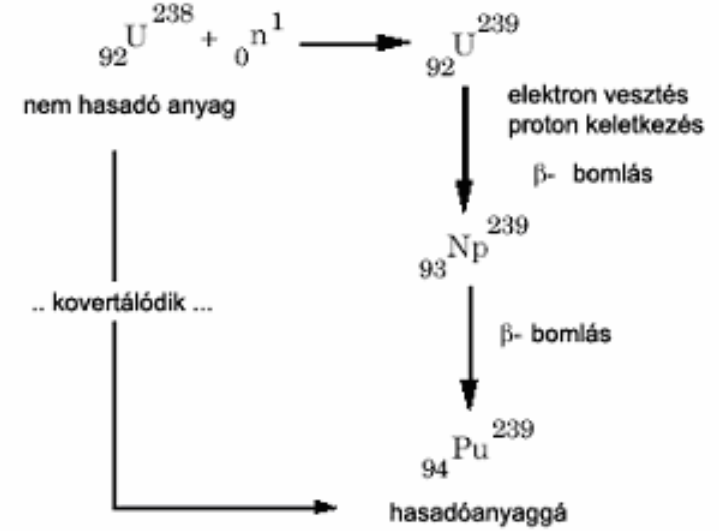
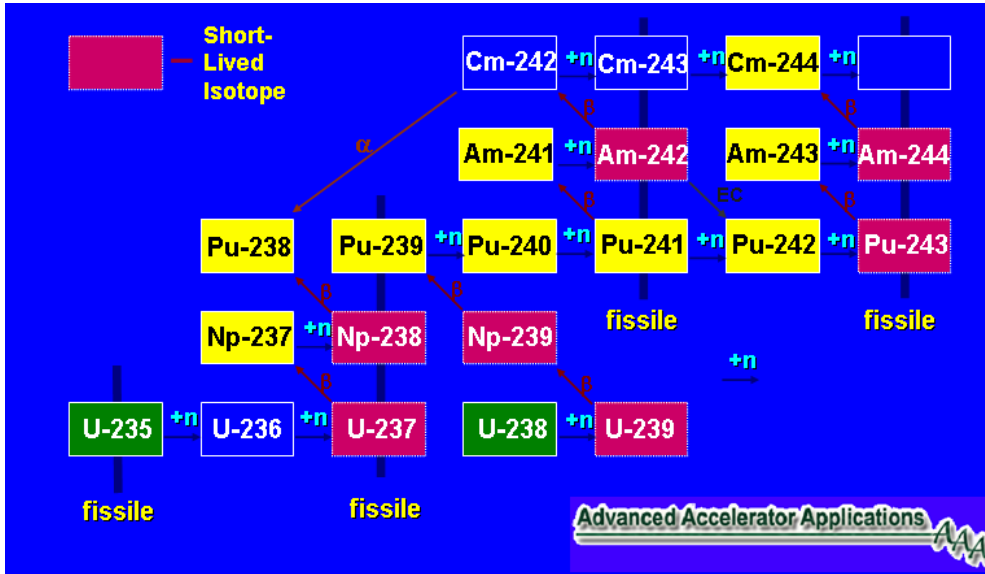
nyomott vizes reaktorban 1 év üzemidő után/

KIÉGETT FŰTŐELEMEK REPROCESSZÁLÁSA: A PUREX SÉMA



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 „kiegése” 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.



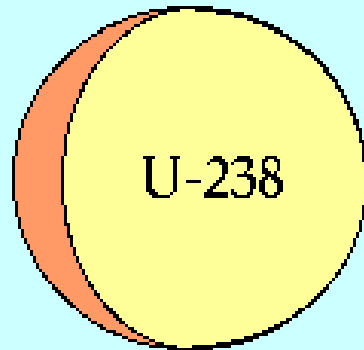
A transzuránok keletkezése

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

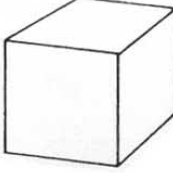
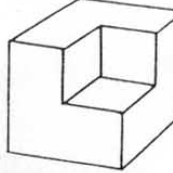
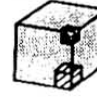
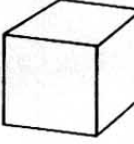
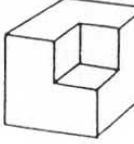











A ^{239}Pu keletkezésének animációja

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, kémiaileg 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 energiamennyiséget körülbelül egy standard 1300 MW-os erőművi reaktor termeli meg egy év üzemidő alatt 80%-os teljesítménytényező mellett.

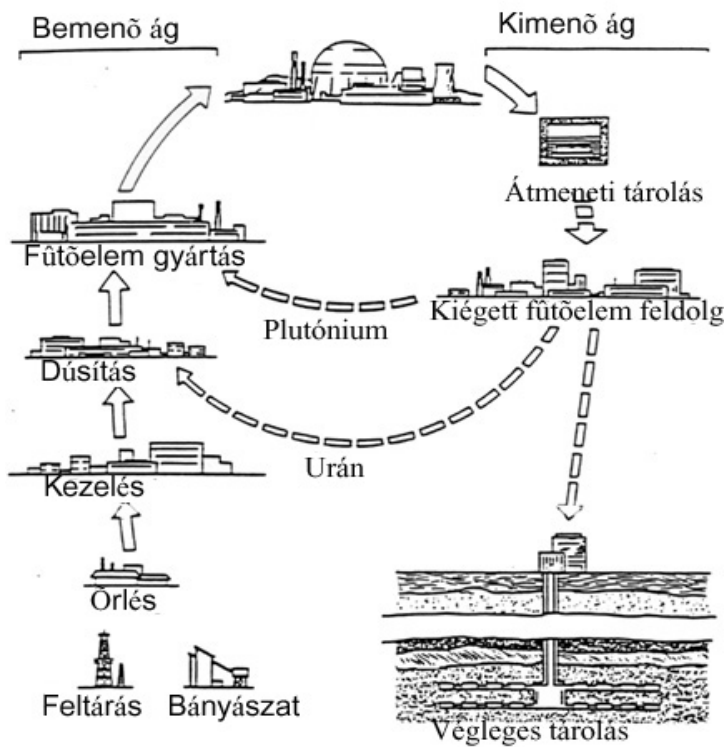
Reaktor típus és stratégia	Természetes urán szükséglet	Hulladék-vesztéség	Újra felhasználva				
Könnyűvízes atomerőmű reprocesszálás nélkül	205 tonna természetes urán 	168 tonna szegényített urán 	35 tonna urán 1,2 tonna hasadási termék 0,3 tonna plutónium 	nincs			
Könnyűvízes atomerőmű reprocesszással	120 tonna természetes urán 	107 tonna szegényített urán 	1,2 tonna hasadási termék 	12 tonna urán fűtőelem (0,1 tonna plutónium) 			
Gyors szaporító reaktor	1,5 tonna természetes vagy szegényített urán 		1,0 tonna hasadási termék 	0,3 tonna plutónium 			
 Természetes vagy szegényített urán		 Urán fűtőelem (U-235 3% a kiégés kezdetén)		 Plutónium		 Hasadási termékek	

1 GW.év elektromos energia termeléséhez tartozó hasadóanyag felhasználások

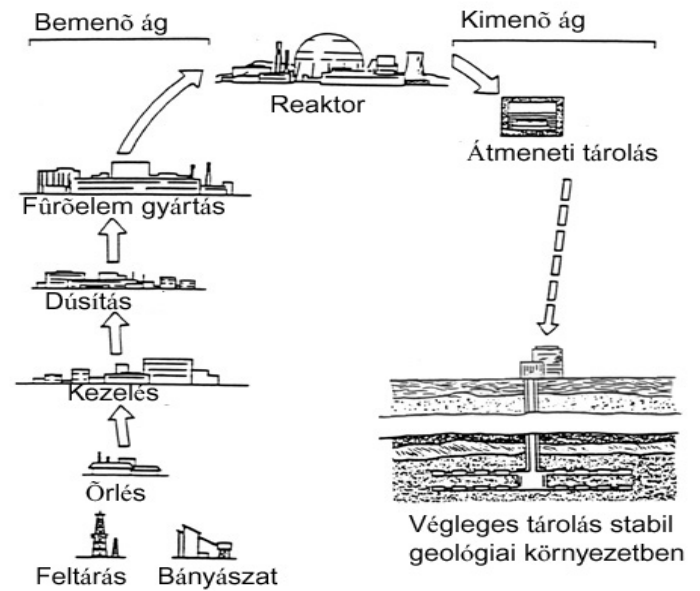
Az ábra felső sorában az egyszeri üzemanyag felhasználású üzemanyagciklus urán fogyasztása látható 1GW.év elektromos energia termelés mellett. Ebben az esetben az adott elektromos energia megtermeléséhez kb. 205 tonna természetes urán kell, melyből dúsítással 37 tonna ^{235}U -ra nézve 3%-os fűtőelem 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 kiégett 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 kiégett fűtőelem teljes mennyiségbe hulladékba kerül.

Az ábra középső sorában a könnyűvizes 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.**

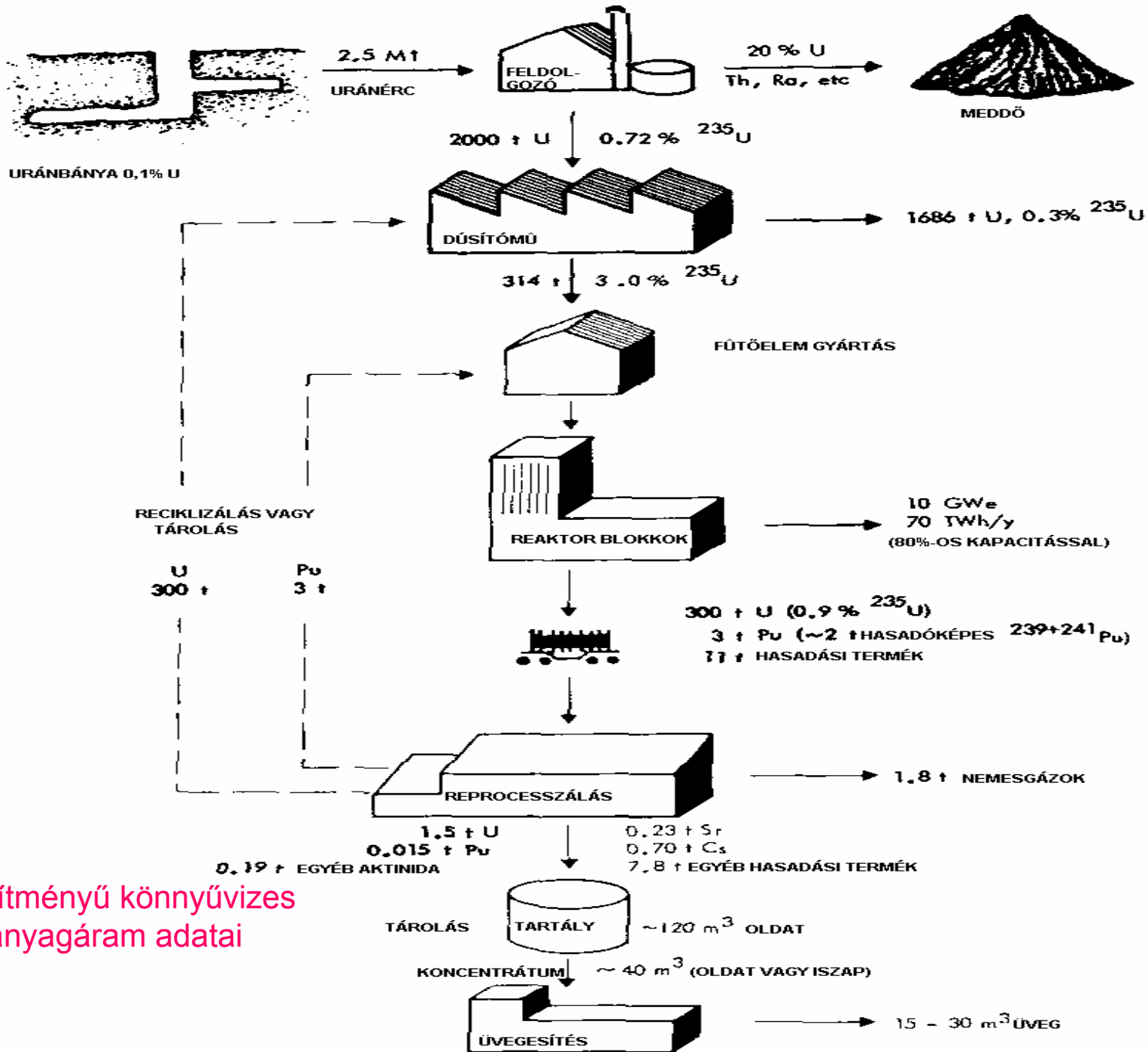
Az ábra legalsó sorában a gyors szaporító reaktorok üzemanyag ciklusának szükséglete látható. Reciklizációs egyensúlyban 1 GW.év elektromos energia előállításához itt 1,5 tonna természetes, vagy szegényített urán szükséges, **ami az egyszeri üzemanyag felhasználású üzemmód üzemanyag szükségletének kevesebb 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 könnyűvizes 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



10 GWe teljesítményű könnyűvízes reaktor éves anyagáram adatai

RADIOAKTÍV HULLADÉKOK

Aktivitás-koncentráció szerint osztályozva:

- kis aktivitású hulladékok (low level waste - LLW): $< 5 \cdot 10^5$ kBq/kg
- közepes aktivitású hulladékok (intermediate level waste - ILW): $5 \cdot 10^5$ - $5 \cdot 10^8$ kBq/kg
- nagy aktivitású hulladékok (high level waste - HLW): $> 5 \cdot 10^8$ kBq/kg

Halmazállapot szerint osztályozva:

- szilárd hulladékok
- cseppfolyós hulladékok (tűzveszélyes, nem tűzveszélyes)
- légnemű hulladékok

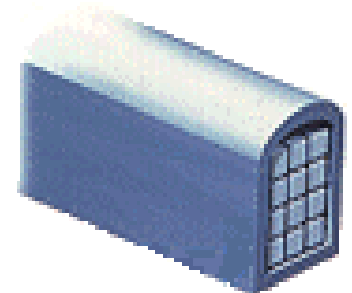
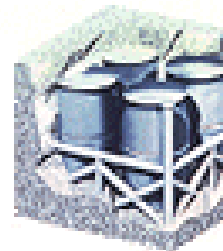
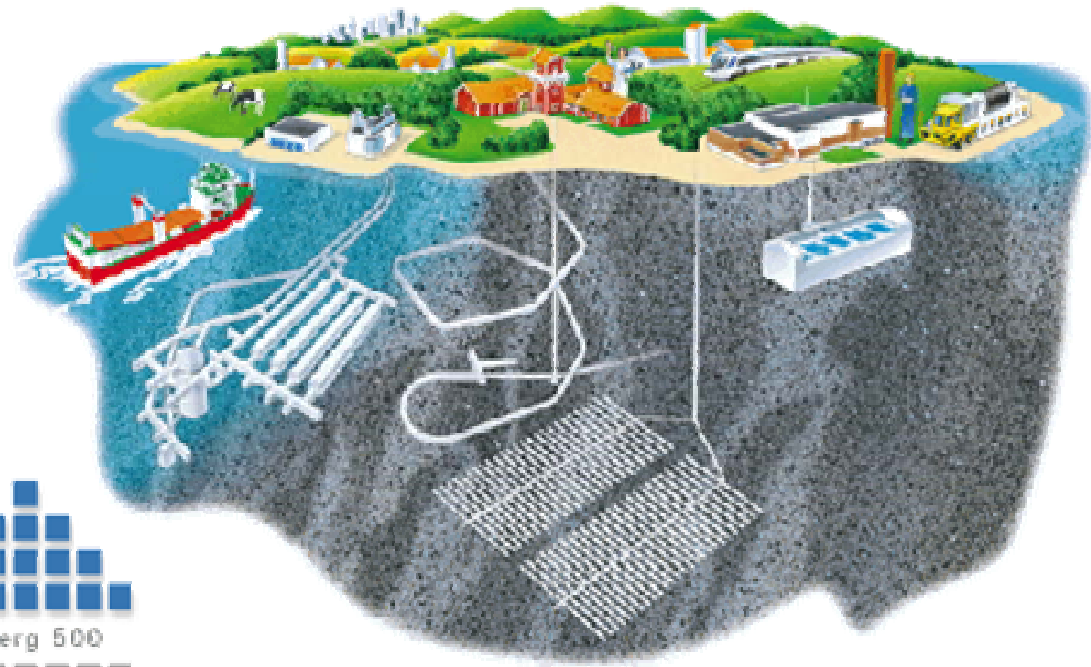
Felezési idő szerint osztályozva:

- rövid élettartamú hulladékok: max. 30 nap a felezési idő
- közepes élettartamú hulladékok: max. 30 év a felezési idő
- hosszú élettartamú hulladékok: 30 év feletti a felezési idő

Felületi dózisteljesítmény szerint osztályozva:

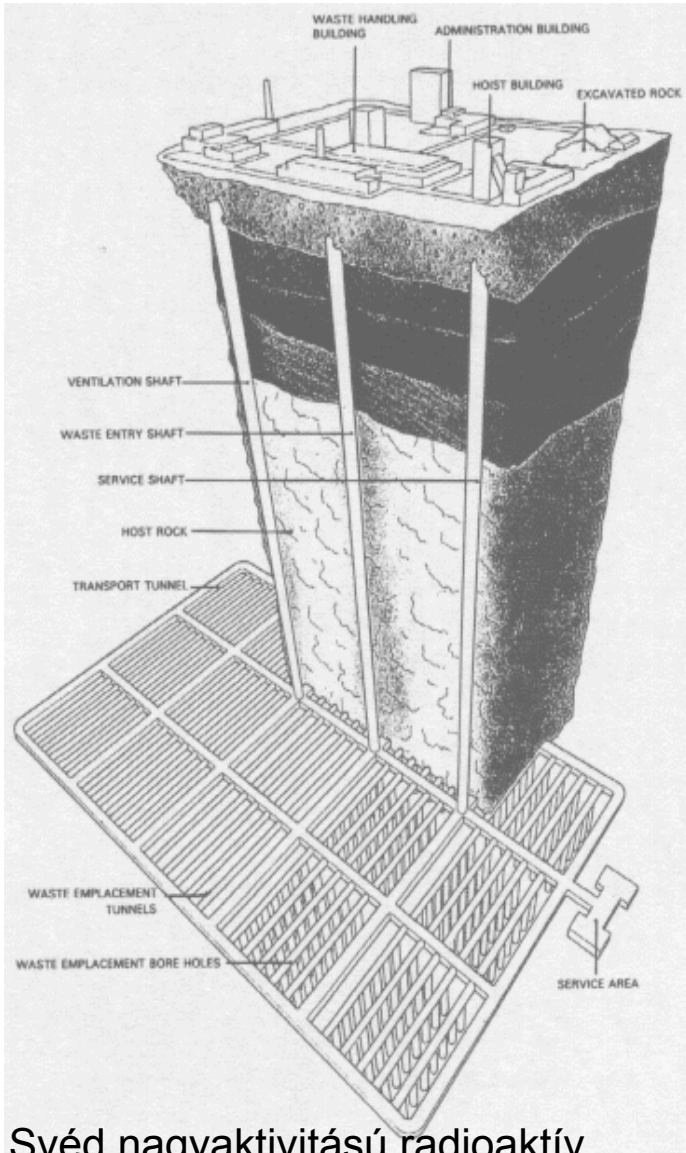
- kis felületi dózisteljesítményű hulladékok: $< 3 \cdot 10^{-2}$ Gy/óra
- közepes dózisteljesítményű hulladékok: $3 \cdot 10^{-2}$ - 10^{-2} Gy/óra
- nagy dózisteljesítményű hulladékok: $> 10^{-2}$ Gy/óra

Angol nagyaktivitású radioaktív hulladéktároló sémája

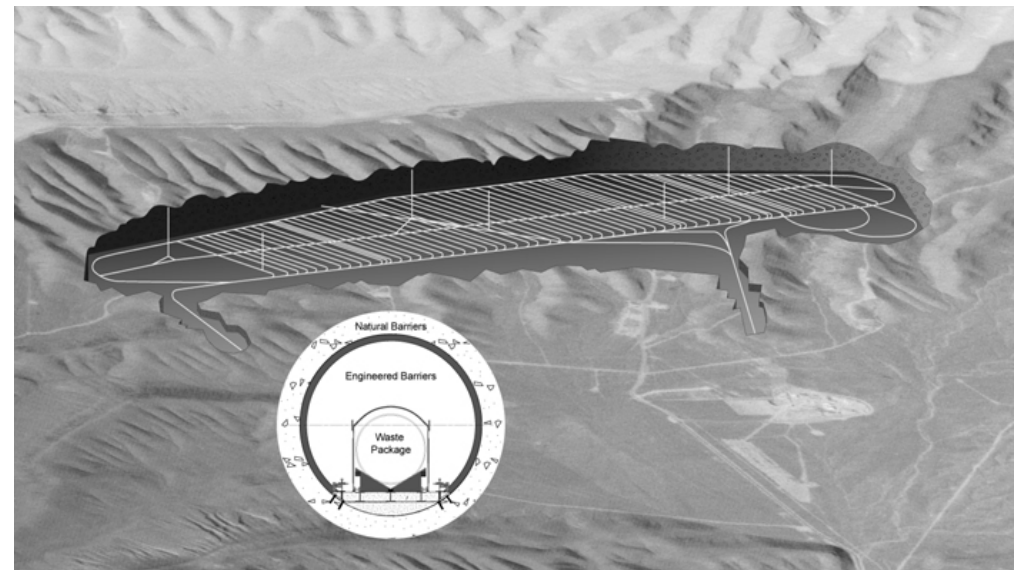




A Yucca hegységben megépített (USA) nagyaktivitású radioaktív hulladéktároló sémája



Svéd nagyaktivitású radioaktív hulladéktároló sémája

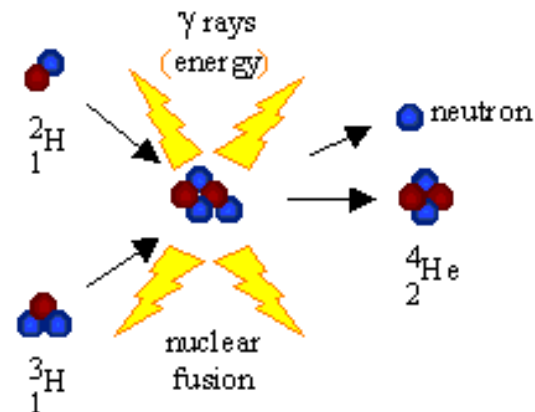
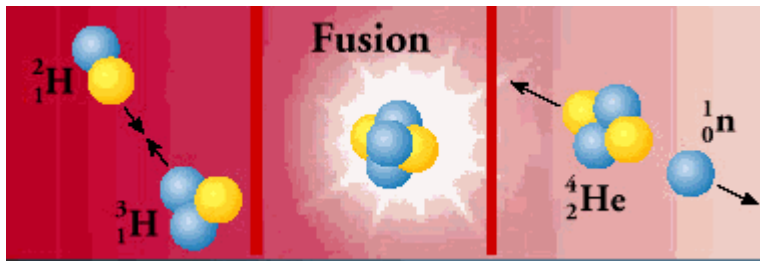
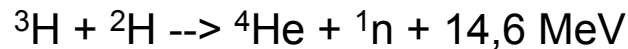


A NUKLEÁRIS ENERGIATERMELÉS: II. MAGFÚZIÓ

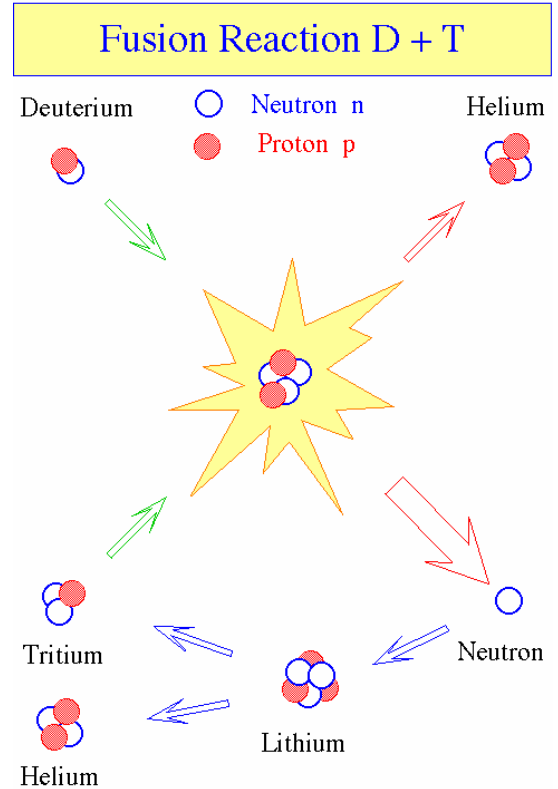
Energia nyerhető a könnyű atommagok egyesítésével, fúzióval is. Fúzió -az atomok egyesülnek:

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

Jelenleg a hidrogén izotópjait próbálják fúzióvá változtatni.

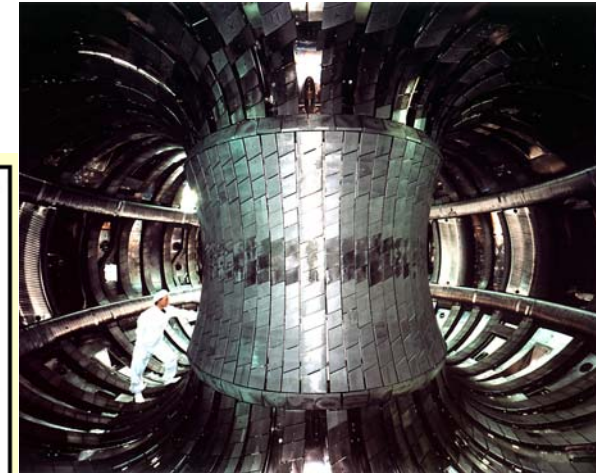
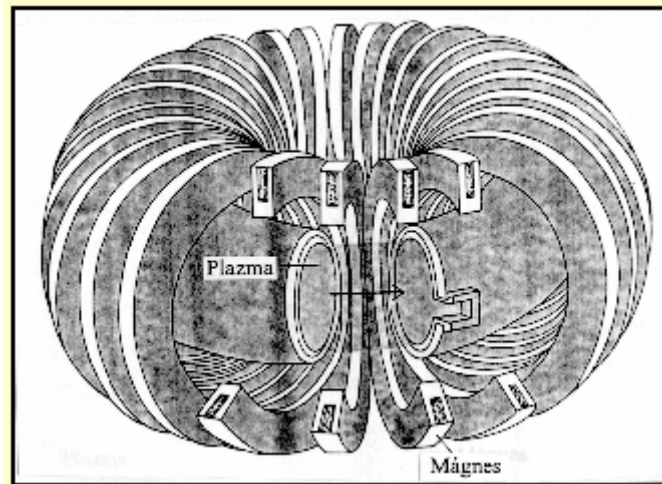
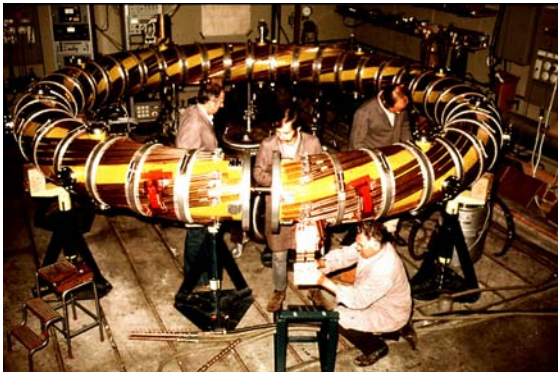
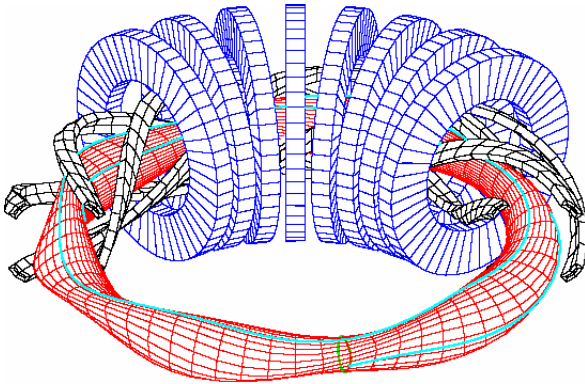


ft_D+TtLi_1.mdp, J. V. Hofmann, 28-Oct-96



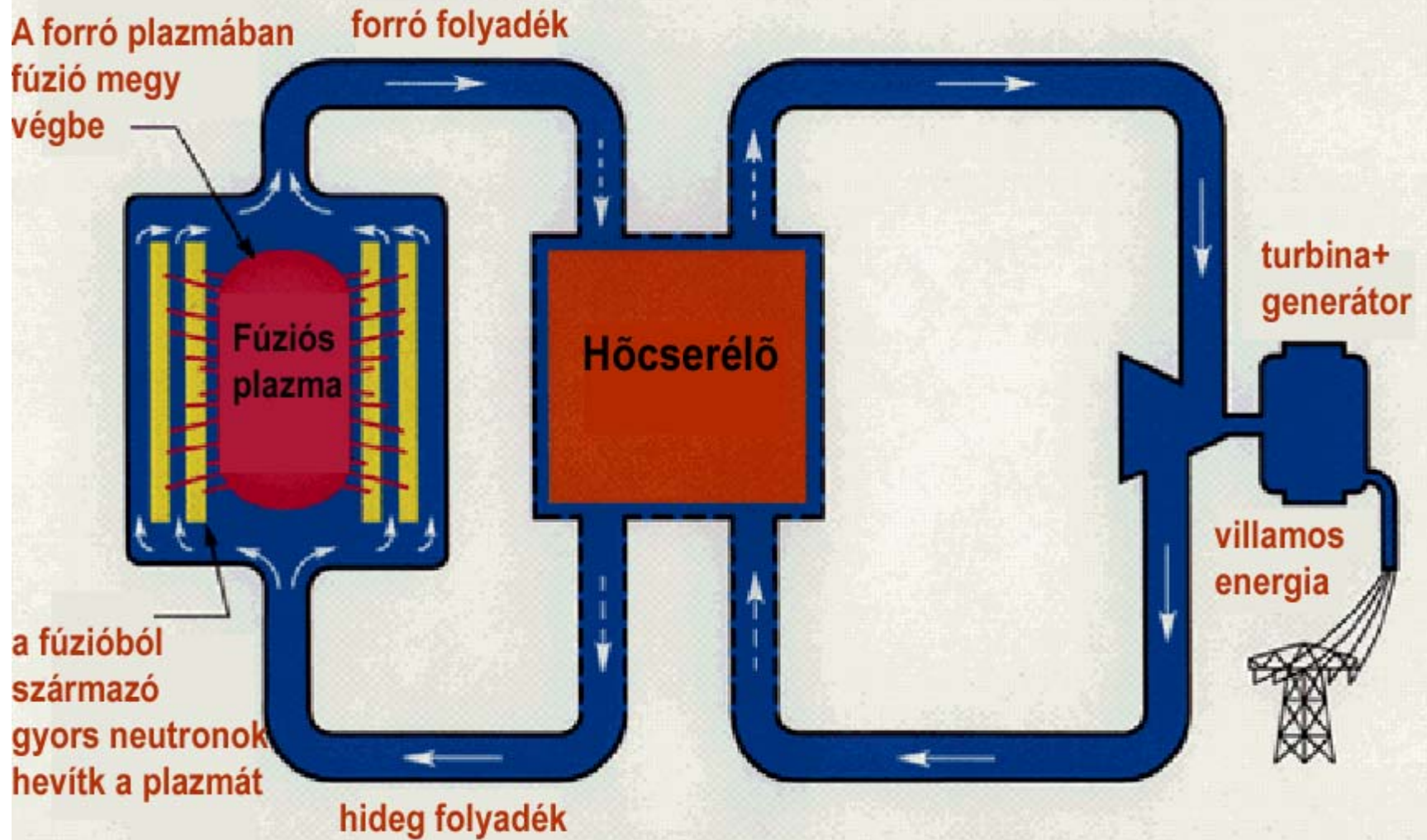
A fúziós folyamatra jellemző:

- 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 elérése szükséges!

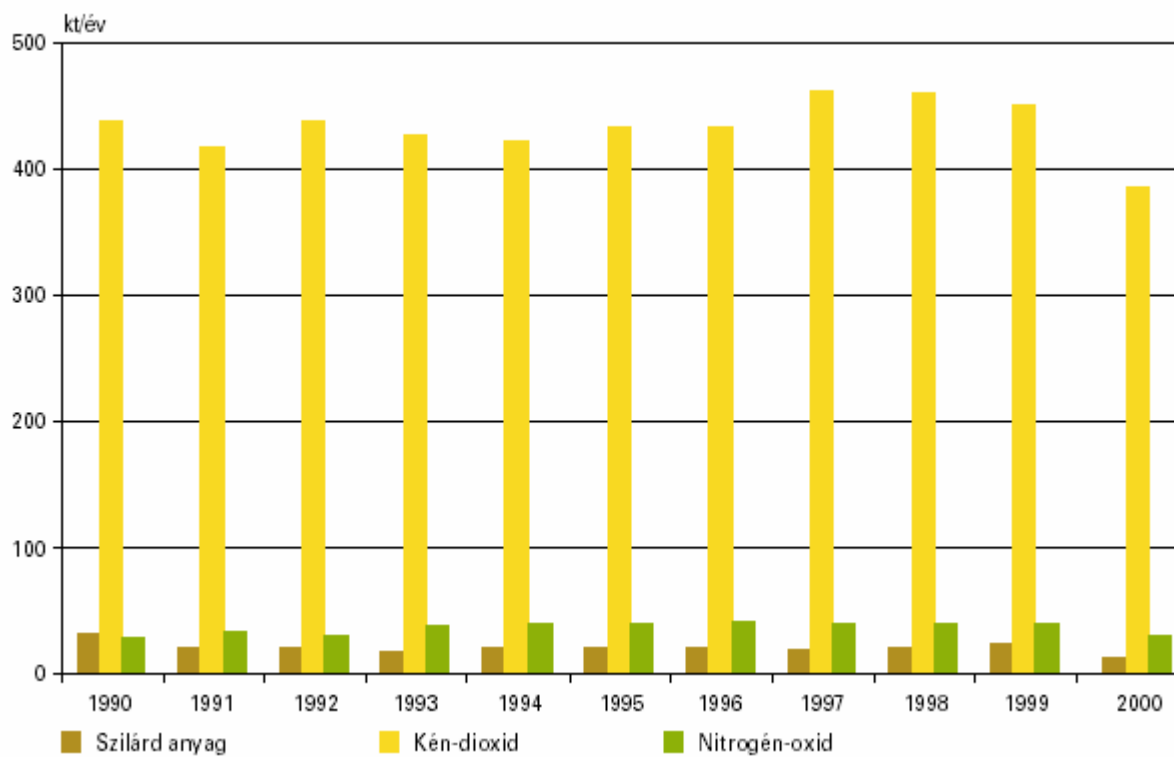


A tokamak

FÚZIÓS ERŐMŰ



MVM erőművi kibocsátások



Atomerőművi kibocsátások, 2000

Radioaktív kibocsátások a hatósági korlát százalékában

Év	Üzemelő blokkok száma, db	Légnemű, %				Folyékony, %		
		Nemesgáz összes	Aeroszol ($T_{1/2} > 24$ h)	Jód*	^{90}Sr	Összes béta	^{90}Sr	^3H
1994	4	1,4	0,11	<0,1	0,8	7,4	0,51	61
1995	4	1,4	<0,10	<0,1	1,9	8,1	2,8	67
1996	4	0,6	0,10	<0,1	3,3	5,5	3,2	65
1997	4	0,4	0,18	<0,1	5,6	4,5	7,0	52
1998	4	0,5	<0,10	<0,1	2,2	6,0	6,1	66
1999	4	0,4	<0,10	<0,1	2,0	7,4	4,8	67
2000	4	0,6	<0,10	<0,1	0,5	7,7	1,6	61
Hatósági korlát		$1,9 \times 10^{13}$	$1,1 \times 10^9$	$1,1 \times 10^9$	$5,6 \times 10^4$	3,7	37	7,5
		(Bq/nap) 1000 MW _e -ra				(GBq/év)	(MBq/év)	(TBq/év)
						Blokkonként		

*: a ^{131}I egyenértéket jelent

A paksi atomerőművel azonos elektromos teljesítményű erőművek levegőszennyezése

Erőmű fajtája	Termelt szén-dioxid tonna/év	Elfogyasztott oxigén tonna/év
Atomerőmű	0	0
Földgáztelésű	4760000	3470000
Olajtüzelésű	9520000	6950000
Modern széntüzelésű	10220000	7460000

Ha Paksot szenes erőmű helyettesítené, az kb. a következő szennyezőanyag-mennyiségeket bocsátaná ki a légkörbe évente:

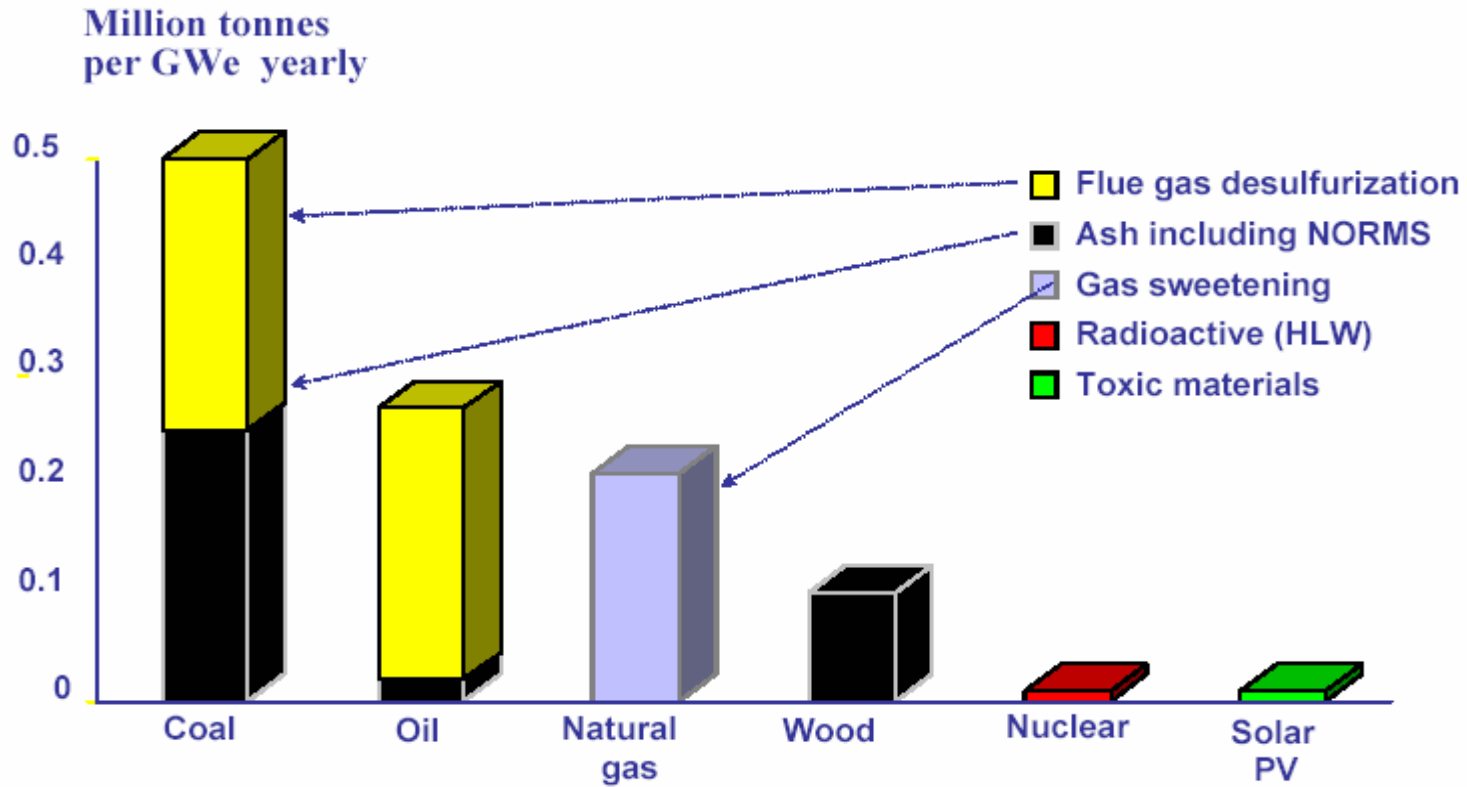
650 ezer tonna kén-dioxid,

60 ezer tonna nitrogén-oxid,

100 ezer tonna por és hamu,

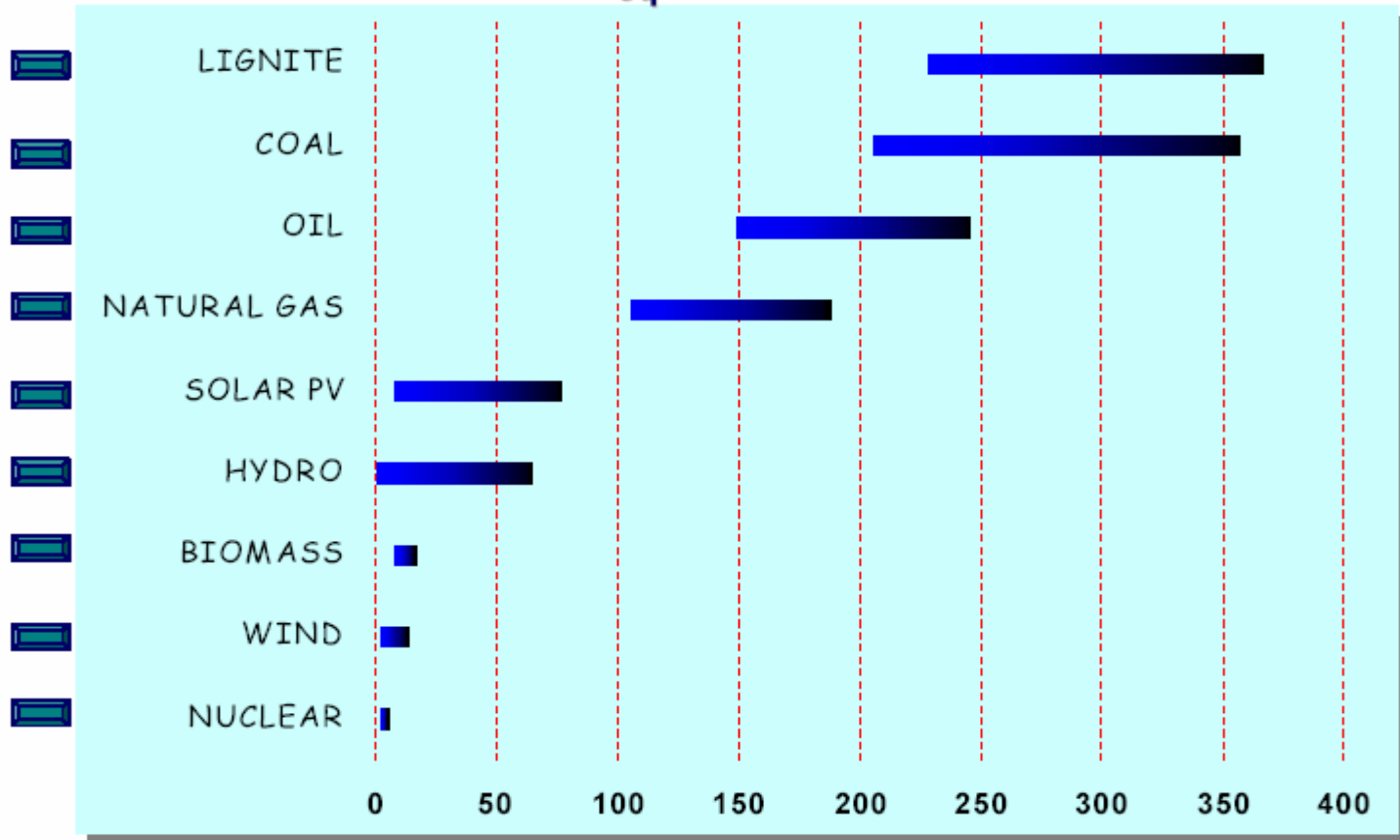
40 ezer tonna szén-monoxid.

Wastes in Fuel Preparation and Plant Operation



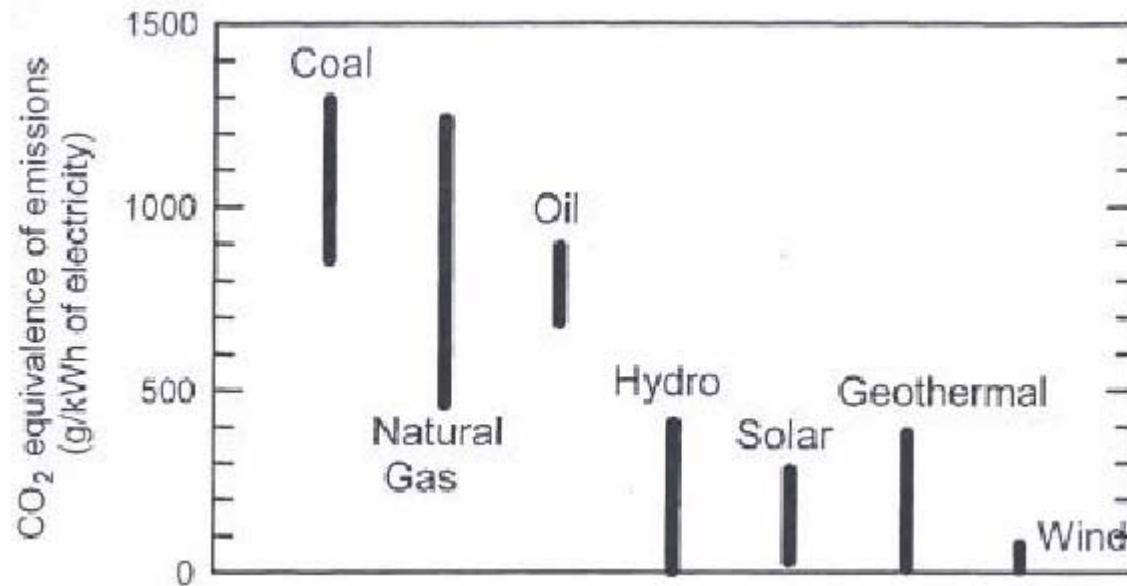


Full Chain Greenhouse Gas Emissions (gC_{eq} per kWh)

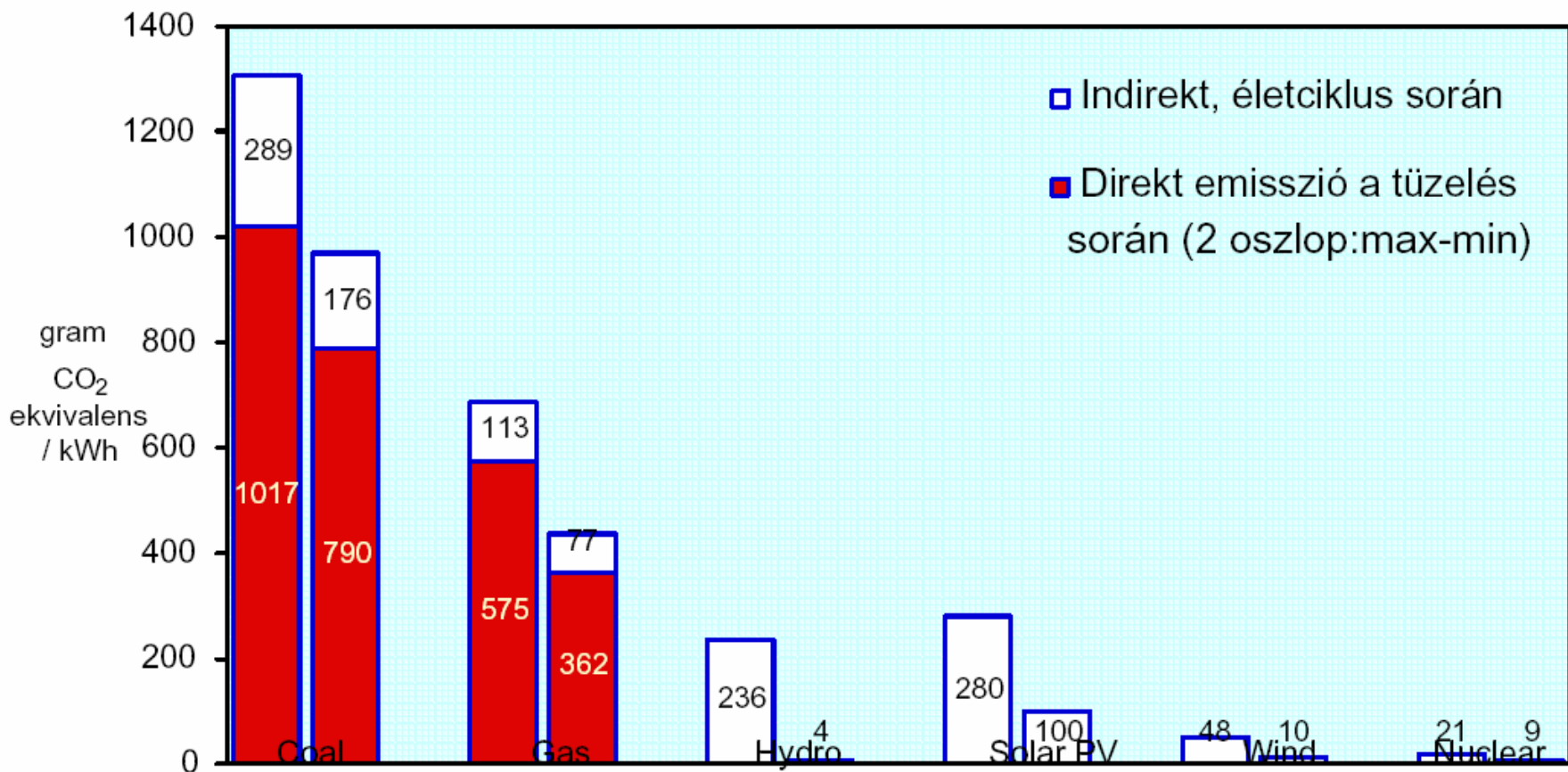


International Atomic Energy Agency





Üvegház hatású gázok kibocsátása villamosenergia termelés során



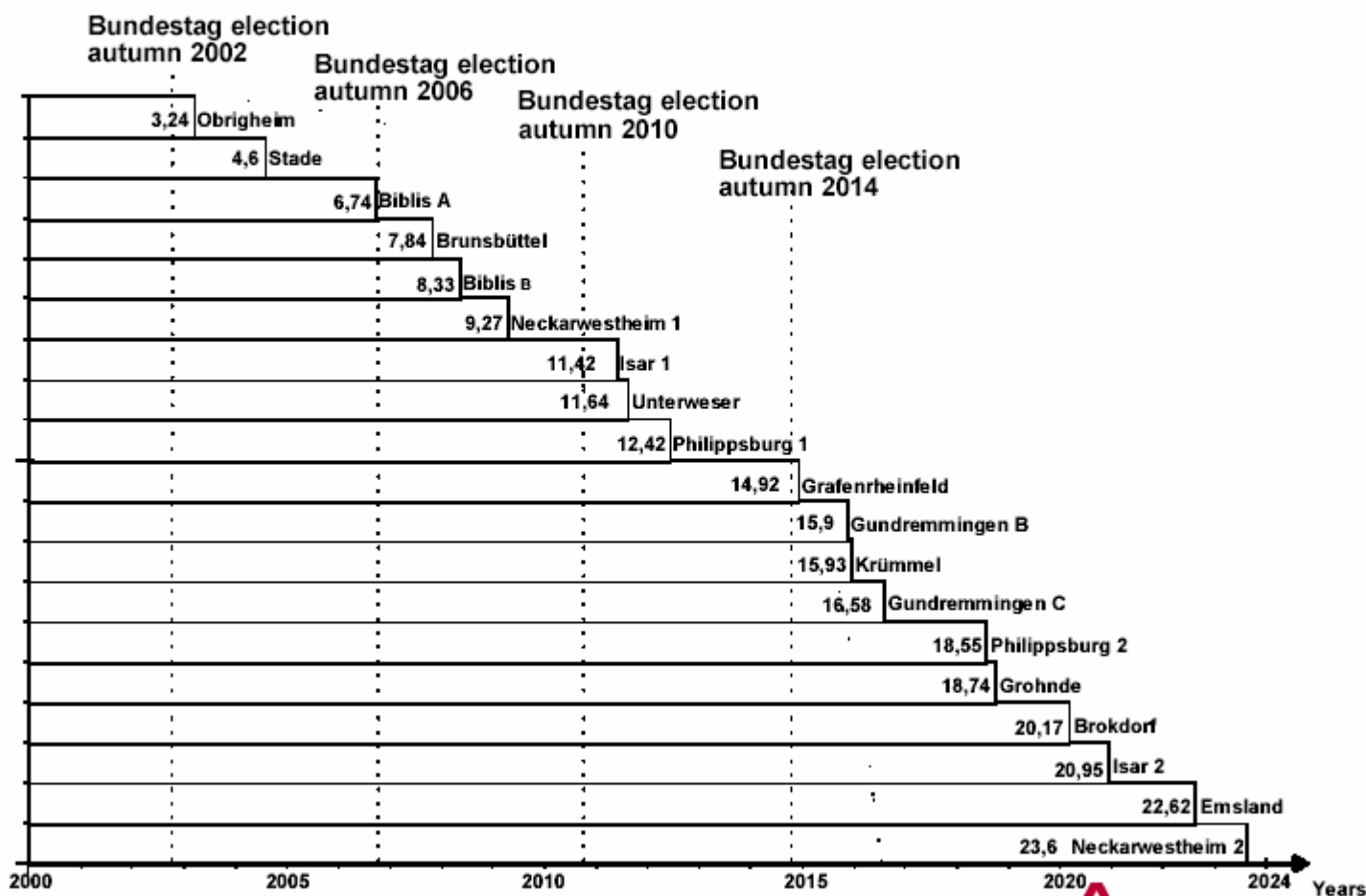
Source: IAEA 2000s

GHG “reductions” Kyoto Protocol

European Union , Bulgaria, Czech Republic, Estonia, Latvia, Liechtenstein, Lithuania, Monaco, Romania, Slovakia, Slovenia, and Switzerland	-8%
United States	-7%
Japan, Canada, Hungary and Poland	-6%
Croatia,	-5%
Russian Federation, Ukraine and New Zealand	0%
Norway	+1%
Australia	+8%
Iceland	+10%

Agreed upon emission reductions relative to the 1990 emission levels .

Agreement between the Federal Government of Germany and the utility companies

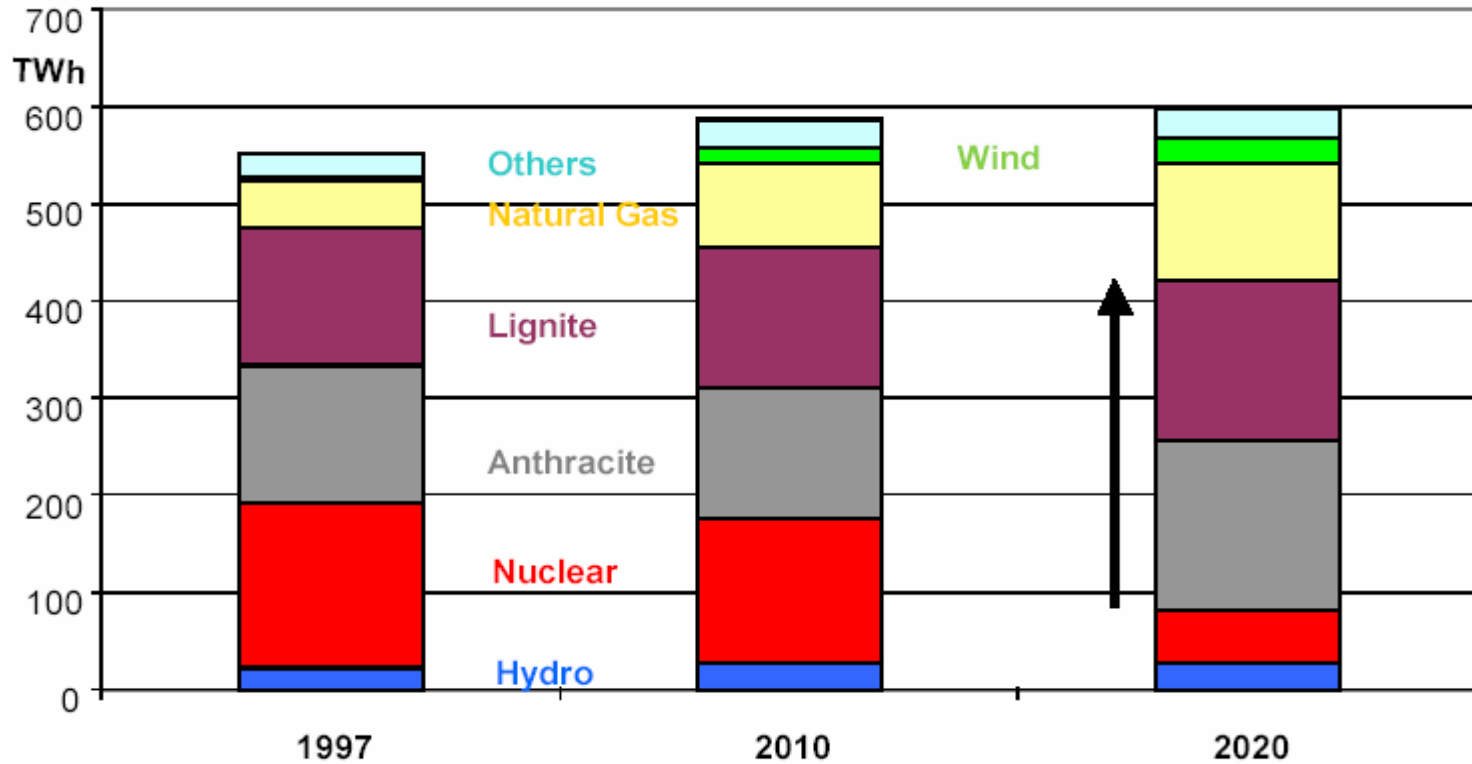


Situation in Germany, Wolfgang Breyer

14

A
FRAMATOME ANP

Development of Gross Power Generation in Germany



Source: Bremer Energie Institut, Prognos/EWI 1999

Situation in Germany, Wolfgang Breyer

16

FRAMATOME ANP

„In your opinion, what will be the future role of nuclear energy in other countries?“

It will ...	Total public %	Break-down by attitude towards nuclear energy		
		Proponents %	Ambivalent %	Opponents %
.... grow strongly	14	30	10	7
.... grow somewhat	27	34	29	23
.... remain the same	31	26	35	34
.... decrease somewhat	10	3	7	19
.... decrease strongly	1	-	1	2
no opinion	17	7	18	15
	100	100	100	100

Even nuclear opponents don't believe that other countries will phase out nuclear energy

Source: Allensbach Public Opinion Poll in Germany, 2001