

## Korszerű ENERGIATERMELÉS 8.

### NUKLEÁRIS ENERGIATERMELÉS

VILÁGUNK ATOMOS FELÉPÍTÉSÜ !

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

Dr. Pátzay György 1

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  $^{56}\text{Fe}$  magnál maximális, előtte és utána csökken!

Az egyes elemek maganyagának sűrűsége kb. állandó.

**IZOTÓP** azonos protonszámú (rendszerű) de különböző neutronszámú (tömegszámú) atommagok

**IZOBÁR** különböző protonszámú és neutronszámú, de azonos tömegszámú atommagok

**IZOTÓN** különböző protonszámú, de azonos neutronszámú atommagok

Dr. Pátzay György 2

ATOMOK

A SZÉN IZOTÓPJAI

Dr. Pátzay György 3

## A RADIOAKTÍV BOMLÁS

A radioaktív bomlási folyamatot elsődrendű 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:

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

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

Dr. Pátzay György 4

## A RADIOAKTÍV BOMLÁS

A  $\lambda$  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

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

Dr. Pátzay György

5

## A RADIOAKTÍV ELEMEK

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:

$^{14}\text{C}$  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.

Dr. Pátzay György

6

Aktivitás = bomlások száma/eltelt idő  
Vagy, ha egy bomláskor egy részecske keletkezik és a detektálási hatások 100%  
Aktivitás = beütésszám/eltelt idő

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{0,693}{t_{1/2}} t}$$

Ha a detektálás hatáskora <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:

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

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  $^{226}\text{Ra}$  aktivitása). Kisebb egységei a millicurie (mCi), mikrocurie ( $\mu\text{Ci}$ )

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).

Dr. Pátzay György

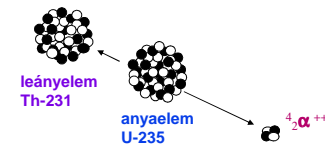
7

## A RADIOAKTÍV BOMLÁS OKAI

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

### AZ $\alpha$ SUGÁRZÁS

Alfa sugárzás



Dr. Pátzay György

8

## AZ $\beta$ SUGÁRZÁS

A  $\beta$ -bomlás háromféleképpen mehet végbe:

- Negatron ( $\beta^-$ ) kibocsátásával**
  - A magból negatív elektron távozik.
  - Tipikusan a neutrondús magok bomlása.
  - Az elektron távozása a momentum megmaradás miatt antineutrínó kibocsátásával jár.
$$X \rightarrow Y + \beta^- + \bar{\nu}$$
- Pozitron ( $\beta^+$ ) kibocsátásával**
  - A magból pozitív elektron távozik.
  - Tipikusan a protondús magok bomlása.
  - A pozitron távozása a momentum megmaradás miatt neutrínó kibocsátásával jár.
$$X \rightarrow Y + \beta^+ + \nu$$

Dr. Pátzay György 9

## AZ $\beta$ SUGÁRZÁS

Negatív béta sugárzás

**Beta Minus Decay**

**Beta Plus Decay**

Dr. Pátzay György 10

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

- 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  $< 2m_0c^2$ .
  - 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.

Dr. Pátzay György 11

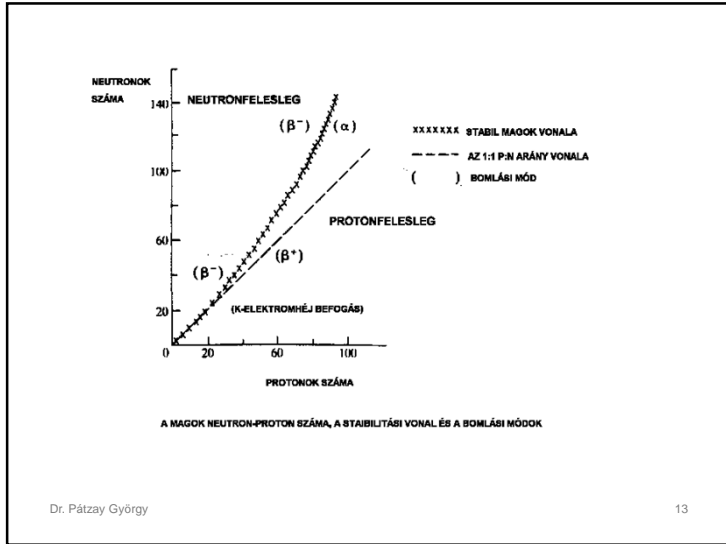
## AZ $\gamma$ SUGÁRZÁS

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

$$X \rightarrow Y^* + \alpha(\beta) \rightarrow Y + \gamma$$

Gamma sugárzás

Dr. Pátzay György 12



### 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 <sup>32</sup>P ( $t_{1/2}=14,3$  nap) tömege  $3,5 \cdot 10^{-9}$  g, azaz 3,5 nanogramm, míg ugyanilyen aktivitású 1 mCi <sup>226</sup>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 nyílak jelzik. A magasabb energiaállapotú anyaelem sugárzás leadásával jut az alacsonyabb energia állapotú leányelemhez (lásd ábra).

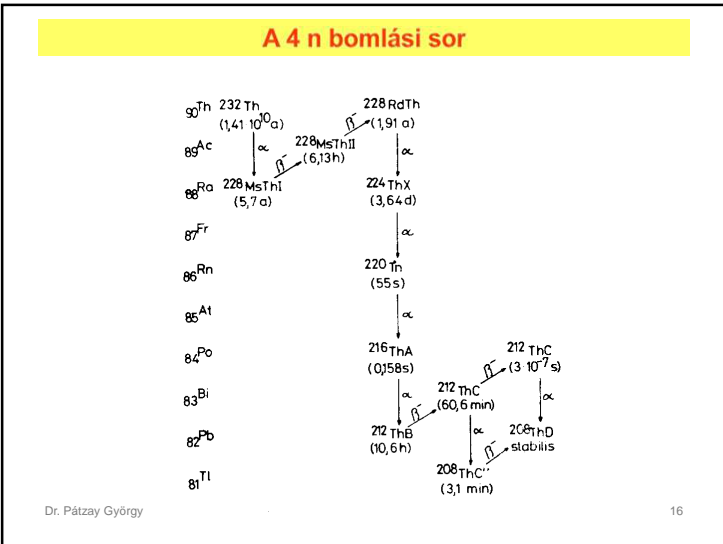
Dr. Pátzay György 14

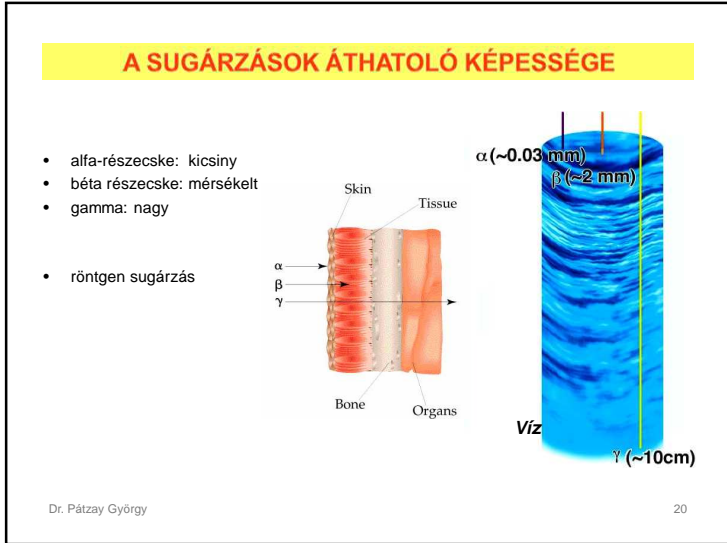
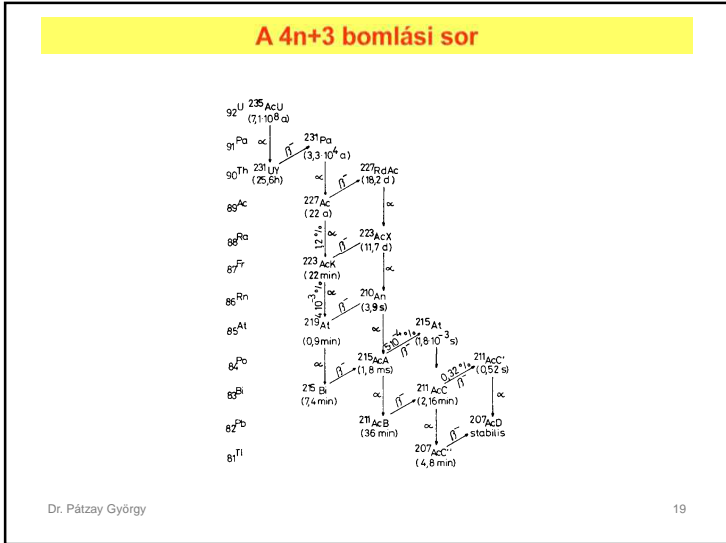
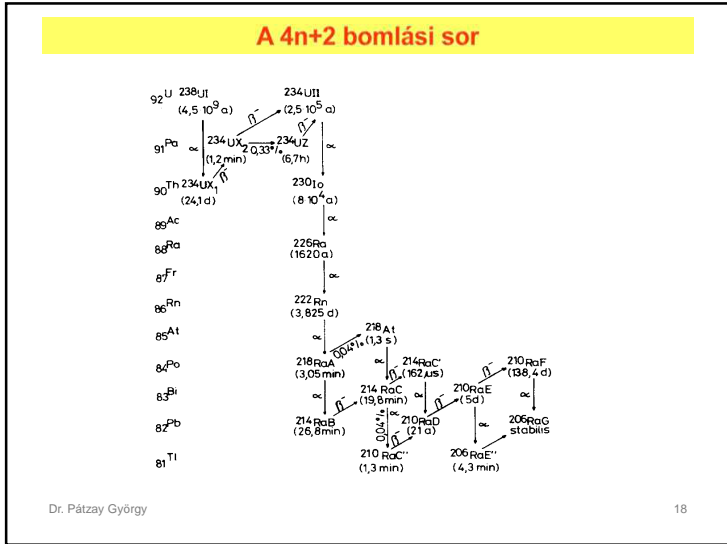
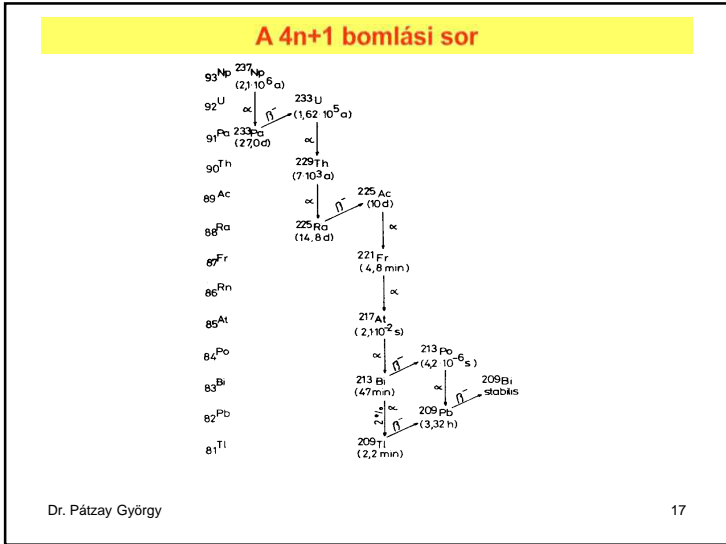
### LEGFONTOSABB IZOTÓPOK

Izotóp	Ci/g	Ci/L → ppm szorozva:	ppm → Ci/L szorozva:
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

Izotóp	Ci/g	Ci/L → ppm szorozva:	ppm → Ci/L szorozva:
Co-57	8480	1.18E-01	8.48E+00
Co-60	1133	8.83E-01	1.13E+00
Mn-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

Dr. Pátzay György 15





### A SUGÁRZÁSOK ÁTHATOLÓ KÉPESSÉGE

The diagram illustrates the penetration of four types of radiation through various materials. On the left, the radiation types are listed with their symbols:  ${}^4_2\alpha^{++}$  (Alfa),  ${}^0_{-1}\beta^-$  (Béta),  ${}^0_0\gamma$  (Gamma és X), and  ${}^1_0n$  (Neutron). On the right, four vertical bars represent the materials: Papír (Paper), Műanyag (Plastic), ólom (Lead), and beton (Concrete). Arrows indicate that alpha particles are stopped by paper, beta particles by plastic, gamma and X-rays by lead, and neutrons by concrete.

Dr. Pátzay György 21

The diagram shows a central nucleus composed of protons and neutrons, surrounded by electron shells. Four types of radiation are shown being emitted from the nucleus: alpha particles (red spheres), beta particles (green spheres), gamma rays (blue wavy lines), and X-rays (purple wavy lines).

Dr. Pátzay György 22

## Tömeg $\Leftrightarrow$ Energia

**Elektronvolt (eV)**  
 Az az energiamegnység, 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):

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

Dr. Pátzay György 23

### Variation in Binding Energy Per Nucleon

The graph plots binding energy per nucleon (MeV) on the y-axis (0 to 9) against mass number (A) on the x-axis (0 to 260). The curve peaks at approximately 8.8 MeV for iron-56. The region to the left of the peak is labeled 'Fusion' and the region to the right is labeled 'Fission'. A 'Region of very stable nuclides' is indicated between A=20 and A=100. Specific nuclides are marked, including  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{56}\text{Fe}$ ,  ${}^{87}\text{Kr}$ ,  ${}^{119}\text{Sn}$ ,  ${}^{209}\text{Bi}$ ,  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}^{241}\text{Am}$ ,  ${}^{244}\text{Pu}$ ,  ${}^{248}\text{Cf}$ , and  ${}^{252}\text{Cf}$ .

Az egy nukleonra eső átlagos kötési energia a tömegszám függvényében

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

Így energia nyerhető kétféleképpen:

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

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

Dr. Pátzay György 24

### A NUKLEÁRIS ENERGIATERMELÉS I. MAGHASADÁS

Neutron  $^{235}\text{U}$   $^{92}\text{Kr}$   $^{141}\text{Ba}$  Neutron

Dr. Pátzay György 25

### LÁNCREAKCIÓ

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

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

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

Dr. Pátzay György 26

### MAGHASADÁS – HASADÁSI ENERGIA

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

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

Fission  $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{134}\text{Xe} + ^{100}\text{Sr} + 2n + 2n$

Egy urán atom elhasadásakor kb. 200 MeV energia szabadul föl. 100 g  $^{235}\text{U}$  elhasadása  $8,21 \cdot 10^{12} \text{ J} = 1785$  tonna TNT energiájának megfelelő energiát képvisel.

Dr. Pátzay György 27

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

hasadási termék (%)  
tömegszám(A)

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

Dr. Pátzay György 28

Az  $^{235}\text{U}$  hasadása és transzuránok keletkezése (világoskék vonal a fontosabb kisebb tömegű, sötétkék vonal a fontosabb nagyobb tömegű hasadási termékeket, barna vonal a transzuránokat jelölí)

$n \sim \nu \rightarrow ^{235}\text{U} \rightarrow ^{99}\text{Rb} + ^{140}\text{Xe} + 2n$   
 $n \sim \nu \rightarrow ^{239}\text{Pu} \rightarrow ^{99}\text{Rb} + ^{140}\text{Xe} + 2n$   
 $n \sim \nu \rightarrow ^{235}\text{U} \rightarrow ^{99}\text{Rb} + ^{140}\text{Xe} + 2n$

FP - hasadási termék

Dr. Pátzay György 29

**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 megfelel 3083 kg anyag megsemmisülési energiájának.  
 Nézzük ezt az  $^{235}\text{U}$  hasadásának példáján:

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

$^{235}\text{U}$	235,043915 g
$^{140}\text{Cs}$	139,917110 g
$^{92}\text{Rb}$	91,9191400 g
neutronok	1,008664 g

A tömegek összege hasadás előtt:  $235,043915 + 1,008664 = 236,052579$  g

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

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

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

Dr. Pátzay György 30

Ez az energia 235,044 g tiszta  $^{235}\text{U}$  hasadásakor keletkezik. Mivel a természetes urán kb. 0,72 %  $^{235}\text{U}$  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  $^{238}\text{U}$  is hasad, mert először  $^{239}\text{Pu}$  maggá alakul és az elhasad termikus neutronok hatására).

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

fúzió D+T=He 1kg He  $\rightarrow 6,7 \cdot 108$  MJ

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

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

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

Dr. Pátzay György 31

**Tömeg változások kémiai és magreakciók esetén:**

**Tüzelés Szén:**

$$\text{C}(s) + \text{O}_2(g) = \text{CO}_2(g) + 393,522 \text{ J}$$

$$\frac{393,522 \text{ J}}{(1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J / eV})(6,0225 \cdot 10^{23} \text{ C atoms/mol})} = 4,08 \text{ eV / atom}$$

**Hőfejlesztés:**  
**1 g C kibocsát 0.0091 kWh**  
 1 eV =  $4,45 \cdot 10^{-26}$  kWh

**Tömeg változás:**

$$\Delta m = \frac{393,522 \text{ J / mol}}{(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{12 \text{ g}} \cdot 1,000 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \cdot 100 = 3,6 \cdot 10^{-8} \%$$

Dr. Pátzay György 32



### Hasadás

**Urán hasadása(egy adott variációban):**  

$$^{235}\text{U} + n \longrightarrow ^{236}\text{U} \longrightarrow ^{137}\text{Te}, ^{97}\text{Zr} + 2n + 200\text{MeV} / \text{atom}$$

**Energia fejlődés (energia átalakulás):**  

$$\frac{(200\text{MeV} / \text{atom})(10^6 \text{eV} / \text{MeV})(4.45 \times 10^{-26} \text{kWh} / \text{eV})}{(235 \text{g} / \text{mol})(6.0225 \times 10^{-23} \text{mol} / \text{atom})} = 22,809 \text{kWh} / \text{g} ^{235}\text{U}$$

**1 g <sup>235</sup>U 22,809 kWh hőenergiát fejleszt (szaporítás nélkül) 2.5 milliószor többet, mint 1 g szén égése**

**Tömeg változás:**  

$$\Delta m = \frac{(22,809 \text{kWh} / \text{g})(3.6 \times 10^6 \text{J} / \text{kWh})}{(3 \times 10^8 \text{m} / \text{s})^2} \cdot 1,000 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \cdot 100 = 0.09\%$$

Dr. Pátzay György 33

### Fúzió

**Potenciális fúziós ciklus:**  

$$D + D \longrightarrow T + p + 4.03\text{MeV} \quad ({}^6\text{Li} + n \longrightarrow \alpha + T + 4.8\text{MeV})$$

$$D + T \longrightarrow {}^4_2\text{He} + n + 17.6\text{MeV}$$

$$D + D \longrightarrow {}^3_2\text{He} + n + 3.27\text{MeV}$$

$$D + {}^3_2\text{He} \longrightarrow {}^4_2\text{He} + p + 18.3\text{MeV}$$

**96,480 kWh/g D  
(4x hasadási)  
Tömeg változás = 0.39%**

**Egyesített:**  

$$6D \longrightarrow 2{}^4_2\text{He} + 2p + 2n + 43.2\text{MeV}$$

Dr. Pátzay György 34

1kg U 3 10<sup>6</sup> kg szén~2,56.10<sup>24</sup> atom~1.10<sup>8</sup> MJ  
 fúzió D+T→He 1kg He ~6,7.10<sup>8</sup> MJ  
 $E_{\text{szén}}, E_{\text{U hasadás}}, E_{\text{H-fúzió}} = 1: 3 \cdot 10^6: 2 \cdot 10^7$

<sup>235</sup>U+<sup>238</sup>U--50x több mint az összes fosszilis tüzelőanyag készlet, jelenlegi fogyasztás mellett 10000 évig elég.  
 Kritikus tömegek: <sup>235</sup>U(94%) 25kg (r=15 cm)  
<sup>239</sup>Pu(99%) 8 kg (r=10 cm)

**HASADÓANYAGOK**

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

<i>Típusa</i>	<i>Hasadást előidéző neutron</i>
<sup>235</sup> U	Termikus és gyors neutron
<sup>233</sup> U	Termikus és gyors neutron
<sup>239</sup> Pu	Termikus és gyors neutron
<sup>241</sup> Pu	Termikus és gyors neutron
<sup>238</sup> U	Gyors neutron
<sup>232</sup> Th	Gyors neutron
U <sub>1</sub> (természetes)	Termikus neutron

Dr. Pátzay György 35

**HASADÓANYAGOK**

Izotóp	Felezési idő (év)	Bomlás módja energiája (MeV)	Spontan hasadás (SH) sebessége (db/sec/kg)	Hasadási hatékony-keresztmetszet (barn)	SH neutron sokszorozás (n <sub>hasadás</sub> )	Indukált hasadás neutron sokszorozás (n <sub>hasadás</sub> )	Kritikus tömeg (M <sub>k</sub> ) (kg)	Bomláshő Q (W/kg)	Fajlagos aktivitás (Bq/kg)
<sup>232</sup> Th	1,405 × 10 <sup>10</sup>	Alfa 4,083	<5 × 10 <sup>-5</sup>	0,0785	-	2,16	nincs	2,654 × 10 <sup>6</sup>	4,1 × 10 <sup>6</sup>
<sup>231</sup> Pa	32,760	Alfa 5,149	<5	0,834	-	2,457	>188	1,442	1,67 × 10 <sup>12</sup>
<sup>230</sup> U	68,9	Alfa 5,414	2 × 10 <sup>-3</sup>	2,013	2	3,296	>5	717,6	8,1 × 10 <sup>14</sup>
<sup>239</sup> U	159,200	Alfa 4,909	-	1,946	-	2,649	16	0,2804	3,6 × 10 <sup>11</sup>
<sup>238</sup> U	245,500	Alfa 4,859	3,9	1,223	1,8	2,578	>41	0,1792	2,3 × 10 <sup>11</sup>
<sup>236</sup> U	7,038 × 10 <sup>8</sup>	Alfa 4,679	5,6 × 10 <sup>-3</sup>	1,235	2,0	2,6055	48	5,994 × 10 <sup>5</sup>	8,0 × 10 <sup>7</sup>
<sup>235</sup> U	2,342 × 10 <sup>7</sup>	Alfa 4,572	2,30	0,594	1,8	2,526	>167	1,753 × 10 <sup>3</sup>	2,4 × 10 <sup>9</sup>
<sup>234</sup> U	4,468 × 10 <sup>8</sup>	Alfa 4,270	5,51	0,308	1,97 + 0,07	2,6010	nincs	8,508 × 10 <sup>6</sup>	31,2 × 10 <sup>7</sup>
<sup>237</sup> Np	2,144 × 10 <sup>6</sup>	Alfa 4,959	<0,05	1,335	2	2,889	75-105	0,02068	2,6 × 10 <sup>10</sup>
<sup>239</sup> Pu	87,7	Alfa 5,593	1,204 × 10 <sup>6</sup>	1,994	2,28 + 0,10	3,148	9	5,678 × 10 <sup>5</sup>	6,3 × 10 <sup>14</sup>
<sup>239</sup> Pu	24,110	Alfa 5,245	10,1	1,800	2,9	3,1231	10,5	1,929	2,3 × 10 <sup>12</sup>
<sup>240</sup> Pu	65,640	Alfa 5,256	478,000	1,357	2,189 + 0,026	3,061	40	7,07	8,4 × 10 <sup>12</sup>
<sup>241</sup> Pu	14,35	Béta 0,021	<0,8	1,648	-	3,142	12	129,4	3,8 × 10 <sup>16</sup>
<sup>242</sup> Pu	373,300	Alfa 4,984	805,000	1,127	2,28 + 0,13	3,070	95, (75-100)	0,1169	1,5 × 10 <sup>11</sup>
<sup>240</sup> Am	432,2	Alfa 5,638	500	1,378	2	3,457	83,5	114,7	9,5 × 10 <sup>10</sup>
<sup>240</sup> Cf	898	Alfa 6,176	-	2,430	-	4,560	1,94	58,05	5,9 × 10 <sup>13</sup>

Dr. Pátzay György 36

## Energiahordozók

1 kg energiahordozóból nyert villamos energia		Tüzelőanyag tonnái egy 1000MW erőműhöz évente:	
1 kg tüzfá:	1 kW-h	2 600 000 t szén:	2000 vasúti kocsí
1 kg szén:	3 kW-h		(1300 t egy kocsí)
1 kg olaj:	4 kW-h	2 000 000 t olaj:	10 szupertanker
1 kg urán:	50 000 kW-h	30 t urán:	aktív zóna
	(3 500 000 kW-h reprocesszáással)		(10 köbméter)

Dr. Páztay György 37

### Egy 1000 MW elektromos teljesítményű erőmű területigénye:

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

AZ USA VILLAMOSENERGIA ELŐÁLLÍTÁSI KÖLTSÉGEI (cent/kWh)

Dr. Páztay György 38

neutron <sup>10</sup> → uranium-235 → uranium-235 → uranium-238 → plutonium-239

AZ U-235 LÁNCREAKCIÓ ÉS A PU-239 KÉPZŐDÉSE

Dr. Páztay György 39

### A természetes urán izotópjai

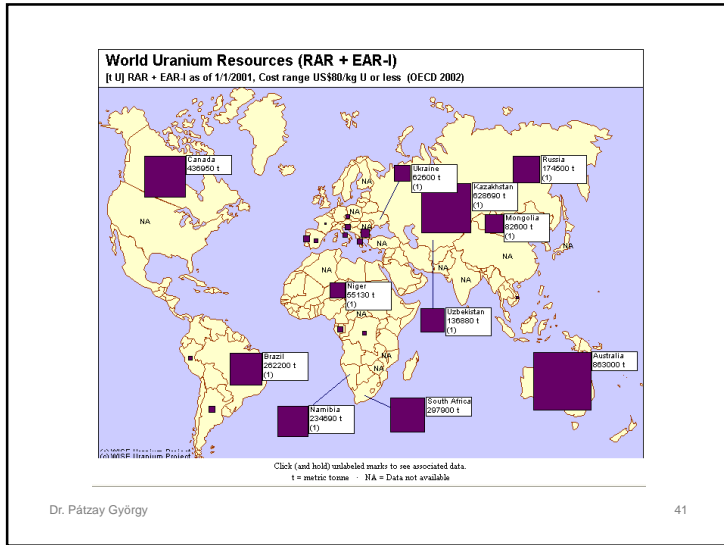
	U-234	U-235	U-238
<b>felezési idő</b>	244,500 év	703.8 · 10 <sup>6</sup> év	4.468 · 10 <sup>9</sup> év
<b>fajlagos aktivitás</b>	231.3 MBq/g	80,011 Bq/g	12,445 Bq/g

### A természetes urán Izotópösszetétele

	U-234	U-235	U-238	Összesen
<b>atom %</b>	0.0054%	0.72%	99.275%	100%
<b>tömeg %</b>	0.0053%	0.711%	99.284%	100%
<b>aktivitás %</b>	48.9%	2.2%	48.9%	100%
<b>1 g természetes U aktivitása</b>	12,356 Bq	560 Bq	12,356 Bq	25,280 Bq

A tengervízben ~0,003 ppm, kőzetekben uraninit (UO<sub>2</sub>) és uránszurokérc (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), vagy másodlagos ásványként (szilikátok, foszfátok, vanadátok formájában) fordul elő. Kanadában előfordul 20% U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> tartalmú érc is, általában 0,1-0,5%.

Dr. Páztay György 40

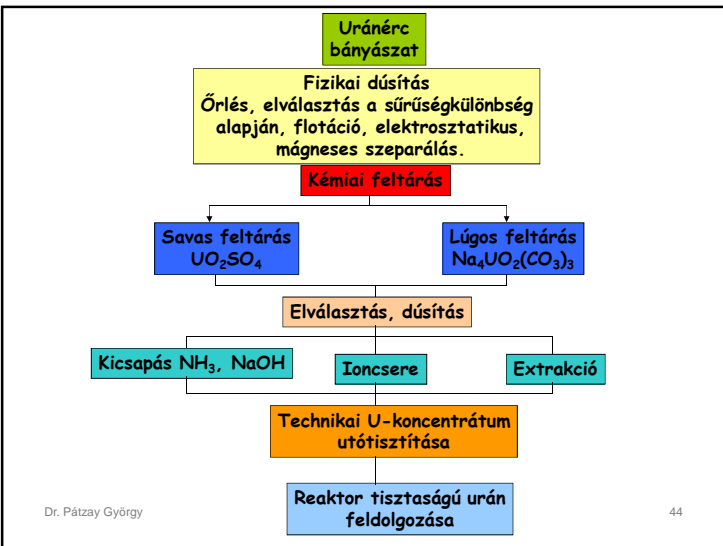
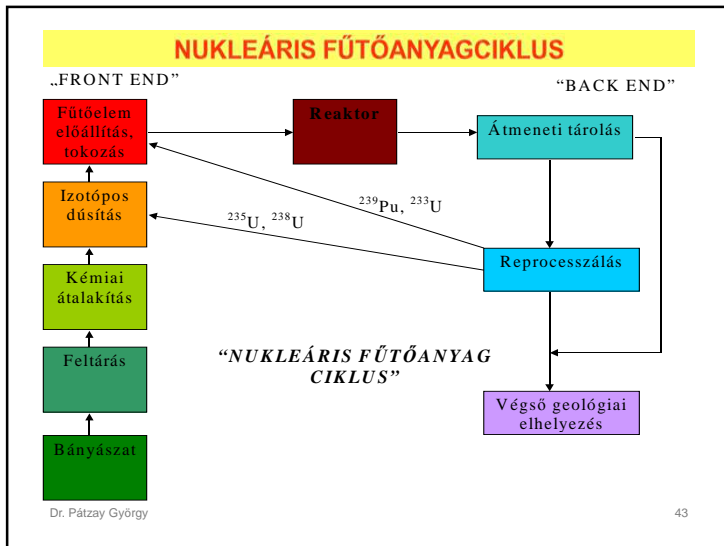


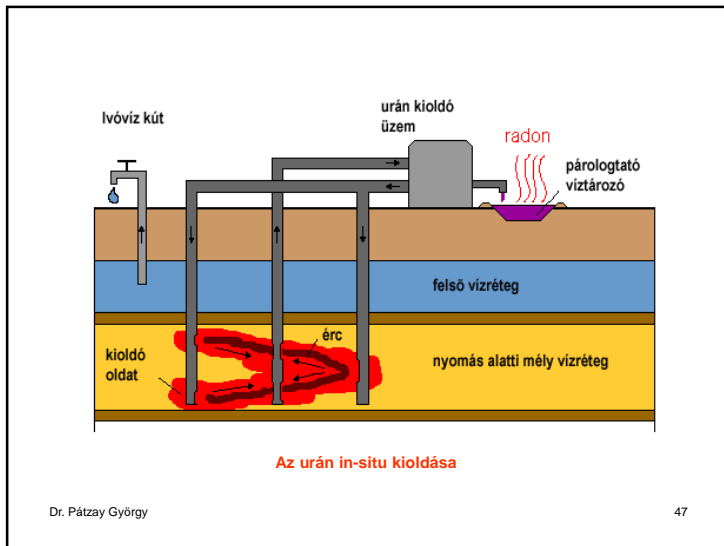
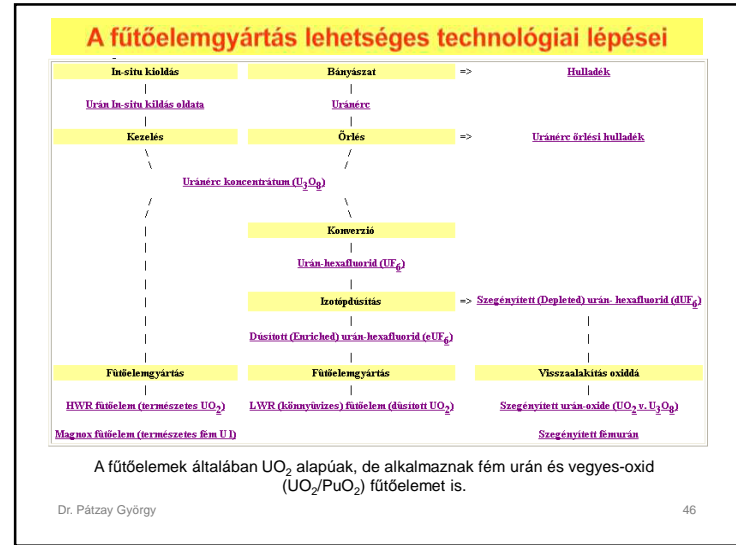
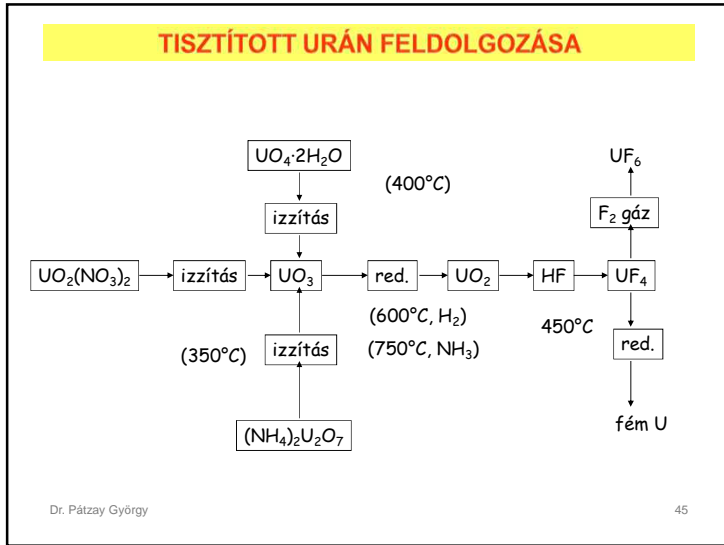
### Ismert uránkészletek a világon

	tonna U	világ %
Ausztrália	863,000	28%
Kazakisztán	472,000	15%
Kanada	437,000	14%
Dél-Afrika	298,000	10%
Namibia	235,000	8%
Brazília	197,000	6%
Oroszország	131,000	4%
USA	104,000	3%
Üzbegisztán	103,000	3%
<b>világ összesen</b>	<b>3,107,000</b>	

*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.*  
Brazil, Kazakistan, Uzbekistan and Russian figures above are 75% of in situ totals.

Dr. Pátzay György 42





#### 1. Fűtőelemgyártás

Az urán 3-4 g/t koncentrációban fordul elő a külső köpenyben, szétszórta, gyakori elem. Az 1000 m vastag külső köpenyben kb 10<sup>12</sup> t uránmennyiség található. Az óceánokban kb 3 mg/m<sup>3</sup> urán található, ez 4 · 10<sup>9</sup> t uránnak felel meg. Az uránérc (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) 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 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> uránoxidot (yellow cake) állítanak elő. Tradicionális flotációs módszerrel különítik el a kis sűrűségű szilikátokat és alumínátokat az ércről és finomszemvesz iszapot kapnak. Ezután pl. salétromsavval kioldva UO<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> uránit nitrát oldat keletkezik. Ezt általában szakaszos műveletben kevert saválló tartályokban végzik. Ezután az uránit nitrát oldatból extrakciós tárolóba távolítják el az uránt Tributill-foszfat extrahálószerként alkalmaznak paraffin oldatban. Az extrakciót folyamatos folyadék-folyadék szkrabberben végzik. Az extrakció során az urán-komplex UO<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(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 uránit-nitrát oldadékban marad vissza. További hevítés hatására az uránit-nitrát U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> uránoxidra (yellow cake) és nitrogénre bomlik.
- Az urán-triioxidot hidrogénnel alakítják urán-dioxidá:  $UO_3 + H_2 \Rightarrow UO_2 + H_2O$

Dr. Pátzay György 48

- A következő lépésben az urán-oxidot hidrogén-fluoriddal 350-600 °C-on uránium-tetrafluoriddá (green salt) alakítják:  $UO_2 + 4HF \Rightarrow UF_4 + 4H_2O$
- Végül az uránium-tetrafluoridot magnéziummal fém uránná redukálják: Utóbbi reakciót dolomittal bélelt acélszőben 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 elő.  $UF_4 + 2Mg \Rightarrow U + 2MgF_2 + 348MJ$

A jelenleg elterjedten használt könnyűvízes reaktorok dúsított uránnal (kb 3,5 %) dolgoznak mert a könnyűvíznek nagy a neutron elnyelése. Az így dúsított uránnal kb 34000 MWd/t kiegészi szint érhető el. Az összes ismert urán dúsítási műveletben 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:

$$UO_2 + 4HF \Rightarrow UF_4 + 2H_2O$$

$$UF_4 + F_2 \Rightarrow UF_6$$

Dr. Pátzay György 49

**Alternatív technológia tercier-amminnal (petroleum hígító)végzett extrakciós kezelés**

$$UO_3 + 2H^+ \rightleftharpoons UO_2^{2+} + H_2O$$

$$UO_2^{2+} + 3SO_4^{2-} \rightleftharpoons UO_2(SO_4)_3^{4-}$$

$$2R_3N + H_2SO_4 \rightleftharpoons (R_3NH)2SO_4$$

$$2(R_3NH)2SO_4 + UO_2(SO_4)_3^{4-} \rightleftharpoons (R_3NH)_4UO_2(SO_4)_3 + 2SO_4^{2-}$$

$$(R_3NH)_4UO_2(SO_4)_3 + 2(NH_4)_2SO_4 \rightleftharpoons 4R_3N + (NH_4)_4UO_2(SO_4)_3 + 2H_2SO_4$$

$$2NH_3 + 2UO_2(SO_4)_3 \rightleftharpoons (NH_4)_2U_2O_7 + 4SO_4^{2-}$$

Dr. Pátzay György 50

Az urán-hexafluorid szintelen, már szobahőmérsékleten illékony vegyület. Az urán-235 izotóp dúsítása történhet gázdifúziós (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.

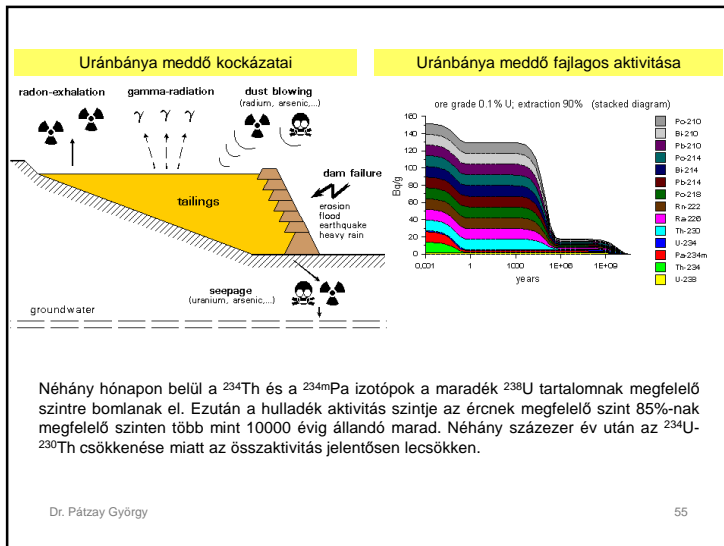
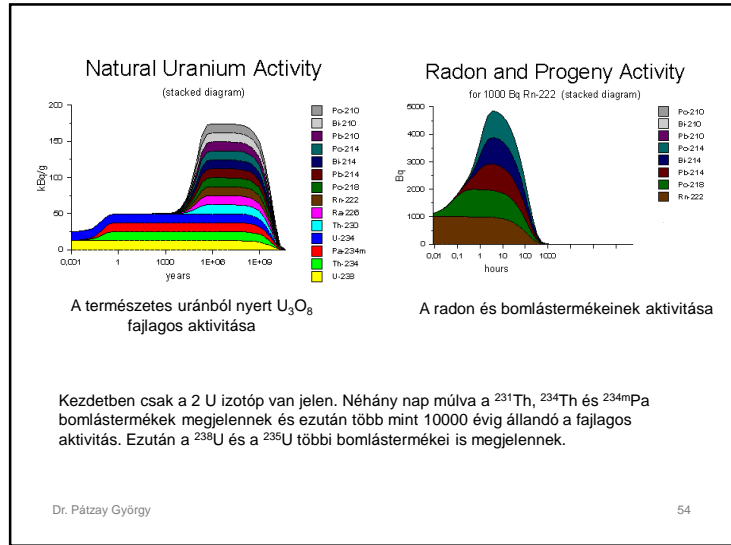
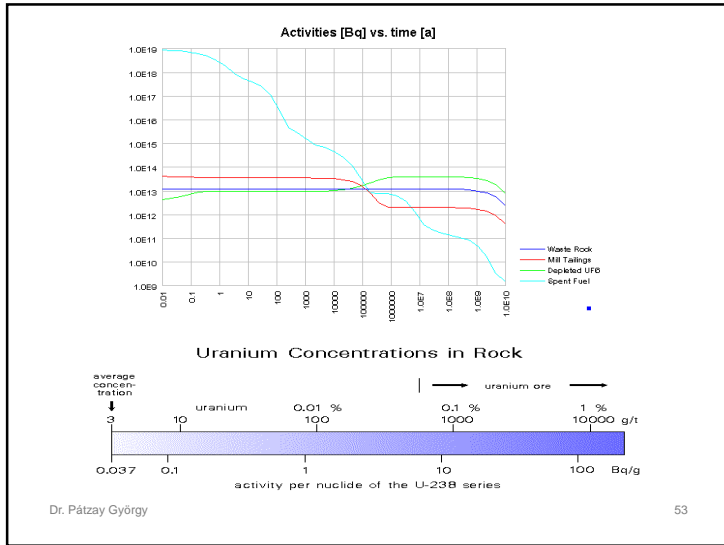
a) és b) gázdifúzióval, c) gázcentrifugálással

Dr. Pátzay György 51

Ranger felszíni uránbánya (Ausztrália)

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

Dr. Pátzay György 52



**A kiégett fűtőelem nehézfém összetétele (tömeg%)**  
(kezdetben 3.5%-ra dúsított 39 GWd/tHM kiéges után)

	U-232	U-233	U-234	U-235	U-236	U-237	U-238
a reaktorból történő kiemelés után	6.59 · 10 <sup>-8</sup> %	1.58 · 10 <sup>-7</sup> %	0.0175%	0.846%	0.472%	0.0013%	98.664%
5 év múlva	1.88 · 10 <sup>-7</sup> %	2.59 · 10 <sup>-7</sup> %	0.0184%	0.846%	0.472%	4.83 · 10 <sup>-9</sup> %	98.664%

Természetes uránból 3,5%-ra dúsított dúsított uránhoz tartozó szegényített urán összetétele				Természetes uránból 3,5%-ra dúsított dúsított urán összetétele				
	U-234	U-235	U-238	Összesen	U-234	U-235	U-238	Összesen
tömeg %	0.0008976%	0.2%	99.799%	100%	0.02884%	3.5%	96.471%	100%
aktivitás %	14.2%	1.1%	84.7%	100%	81.8%	3.4%	14.7%	100%
1g szegényített U aktivitása	2,076 Bq	160 Bq	12,420 Bq	14,656 Bq	66,703 Bq	2,800 Bq	12,005 Bq	81,508 Bq

Dr. Pátzay György 56

### A reaktor

Egy nyomottvízes 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

TMI PWR (USA)

Dr. Pátzay György 57

Paksi atomerőmű 4 db 440 MW<sub>e</sub> 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 UO<sub>2</sub> 3,5% <sup>235</sup>U)

Dr. Pátzay György 58

**Nyomottvízes (PWR) atomerőmű**

**Forralóvízes (BWR) atomerőmű**

Dr. Pátzay György 59

### Westinghouse 656 MW<sub>e</sub> PWR (Szlovénia)

1. Reactor
2. Reactor Coolant Pumps
3. Steam Generators
4. Pressurizer
5. High Pressure Turbine
6. Low Pressure Turbine
7. Generator
8. Moisture Separator
9. Separator
10. Condensers
11. Condensate Pumps
12. Low pressure Heater
13. Feedwater Pumps
14. High Pressure Feedwater Heater
15. Circulating Water Pumps
16. Cooling Towers
17. Cooling Tower Circulating Pumps
18. Transformer

Dr. Pátzay György 60



### A nyomottvízes reaktor animációja The Pressurized Water Reactor (PWR) Animated

### A forralóvízes reaktor animációja The Boiling Water Reactor (BWR) Animated

Dr. Pátzay György 61

### A VVER-440/213 nyomottvízes reaktor

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

Dr. Pátzay György 62

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 <sub>2</sub> pasztillák átmérője	7,6mm
Zr burkolat külső átmérője	9,1mm
Zr burkolat vastagsága	0,65mm
Az üzemanyag rácsoztása	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/cm3

Dr. Pátzay György 63

### A világ 25 „legjobb” atomerőműi blokkjának

A világ 25 legjobb atomerőműi blokkjának összesítése a teljes üzemidőre vetített teljesítmény-kihasználati tényező alapján (2001. december 31.)  
(150 MW teljesítmény feletti reaktor figyelembe véve)

Rank	Name	Type	Efficiency	Year	Country
1	Emiland	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	88,6 %	1997	Dél-Korea
6	TVO-2	BWR	88,3 %	1980	Finnország
7	Wolsong-3	CANDU	87,9 %	1998	Dél-Korea
8	Lowisa-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 %	2007	Magyarország
16	Gögen	PWR	86,6 %	1979	Svájc
17	Isar-2	PWR	86,5 %	1988	Németország
18	Doeke-3	PWR	86,2 %	1982	Belgium
19	Brezna-2	PWR	86,1 %	1971	Svájc
20	Asco-2	PWR	86,1 %	1985	Spanyolország
21	Cohasset	BWR	85,9 %	1984	Spanyolország
22	Browdford	PWR	85,1 %	1986	Németország
23	Paks-3	PWR	85,5 %	1988	Magyarország

\*Forrás: Nuclear Engineering International, 2002.május

A teljesítmény-kihasználati 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 TKE-t sosem lehet 100%.

Dr. Pátzay György 64

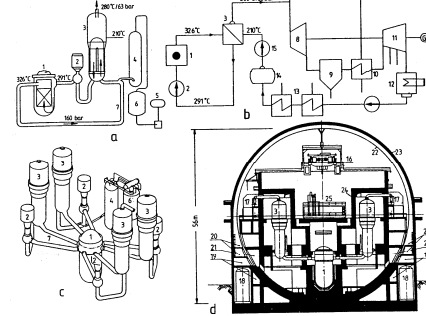


**Erőműreaktorok jellemzői**

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

Dr. Pátzay György

65

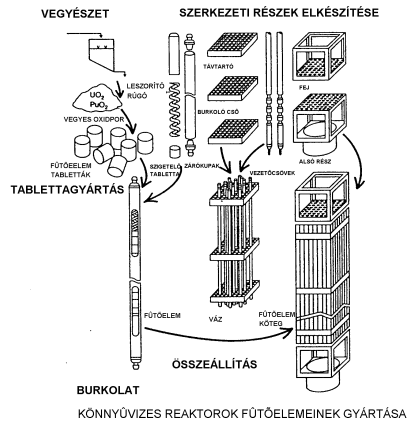


**Egy nyomottvízes atomerőmű (PWR) vázlata**

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

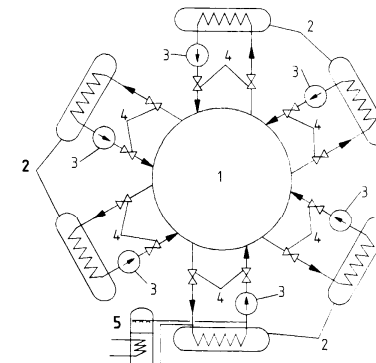
Dr. Pátzay György

66



Dr. Pátzay György

67



A VVER-440 blokk hűtőkörének vázlata  
 1: reaktor; 2: gőzfejlesztő; 3: főkeringtető szivattyú;  
 4: főelzáró tololár; 5: nyomástartó edény (térfigatkompenzitor)

Dr. Pátzay György

68

**Erőművi reaktorok 2001**

Reaktor típus	Ország	Szám	GWe	Üzemanyag	Hűtőközeg	Moderátor
Nyomottvízes reaktor (PWR)	US, Francia o., Japán, Orosz o.	252	235	dúsított UO <sub>2</sub>	víz	víz
Forralóvízes reaktor (BWR)	US, Japán, Svédország	92	83	dúsított UO <sub>2</sub>	víz	víz
Gázhűtésű reaktor (Magnox & AGR)	UK	34	13	természetes U (fém), dúsított UO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	grafit
Nyomott nehézvízes reaktor "CANDU" (PHWR)	Kanada	33	18	természetes UO <sub>2</sub>	nehézvíz	nehézvíz
Könnyűvízes grafitos reaktor (RBMK)	Orosz o.	14	14.6	dúsított UO <sub>2</sub>	víz	grafit
Gyors neutronos szaporító reaktor (FBR)	Japán, Francia o., Orosz o.	4	1.3	PuO <sub>2</sub> és UO <sub>2</sub>	folyékony Na	nincs
más	Orosz o., Japán	5	0.2			
	<b>Összesen</b>	<b>434</b>	<b>365</b>			

Dr. Pátzay György

69

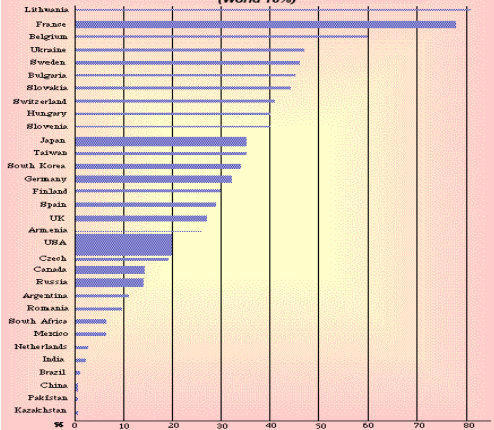
**Nuclear Power's Role in Energy Production**

	Nuclear Electricity Generation 2001		Reactors Operating Dec 2002		Reactors Under Construction Dec 2002		Reactors Planned Dec 2002		Uranium Required 2002		
	billion kWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	tonnes U	tonnes U	
Argentina	0.0	8.2	2	800	0	0	1	600	133		
Armenia	2.0	30	1	300	0	0	0	0	60		
Belgium	46.1	50	7	2720	0	0	0	0	1100		
Brazil	16.0	4.3	2	1000	0	0	0	0	200		
Bulgaria	10.2	42	6	3530	0	0	0	0	621		
Canada*	72.0	13	14	9990	0	0	0	0	1802		
Spain											
China											
CNRC	16.7	1.1*	7	5337	4	3200	0	0	677		
Denmark	30	20*	6	2800	2	2000	0	0	261		
Czech Republic	14.7	20	5	2600	1	912	0	0	200		
Finland	21.9	31	4	2600	0	0	0	0	540		
France	401.3	77	59	23200	0	0	0	0	10100		
Germany	60.0	21	10	27100	0	0	0	0	2600		
Hungary	14.1	20	4	1700	0	0	0	0	217		
India	17.0	3.7	14	2600	0	0	1	440	312		
Iran	0	0	0	0	1	900	0	0	0		
Japan	321.0	34	54	44301	3	3600	12	10000	1070		
Korea DPR (North)	0	0	0	0	1	900	0	0	0		
Korea RO (South)	112.1	39	17	10000	3	2800	0	0	2400		
Lithuania	11.2	70	2	2370	0	0	0	0	300		
Mexico	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	0		
Netherlands	3.7	4.2	1	400	0	0	0	0	110		
Pakistan	2.0	2.0	2	400	0	0	0	0	0		
Romania	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	0		
Russia	100.0	100	30	20000	3	3000	0	0	3000		
Slovak Rep.	17.1	53	6	2470	2	800	0	0	900		
Slovenia	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	0		
South Africa	13.0	6.7	2	1840	0	0	0	0	300		
Spain	61.1	20	9	7400	0	0	0	0	1017		
Sweden	60.0	48	17	5400	0	0	0	0	1300		
Switzerland	25.0	36	5	3170	0	0	0	0	300		
Ukraine	71.7	46	13	11100	0	0	2	1900	1000		
United Kingdom	62.0	23	31	12000	0	0	0	0	2000		
USA	700.0	20	104	30000	0	0	0	0	2000		
WORLD	2544	10	441	307000	34	25000	29	20000	10000		

Dr. Pátzay György

70

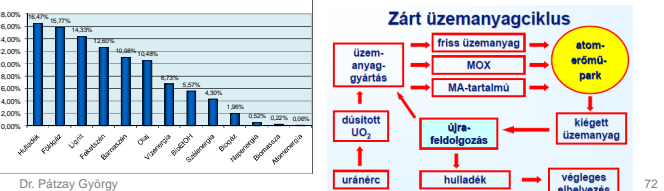
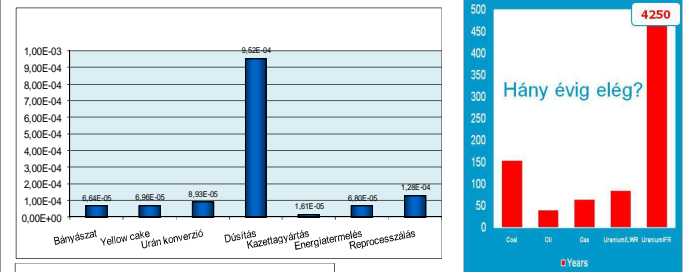
**NUCLEAR ELECTRICITY GENERATION % (World 10%)**



Dr. Pátzay György

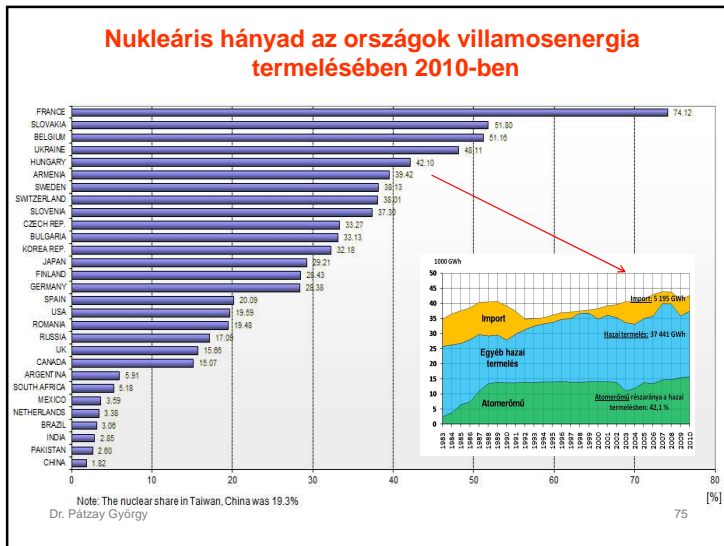
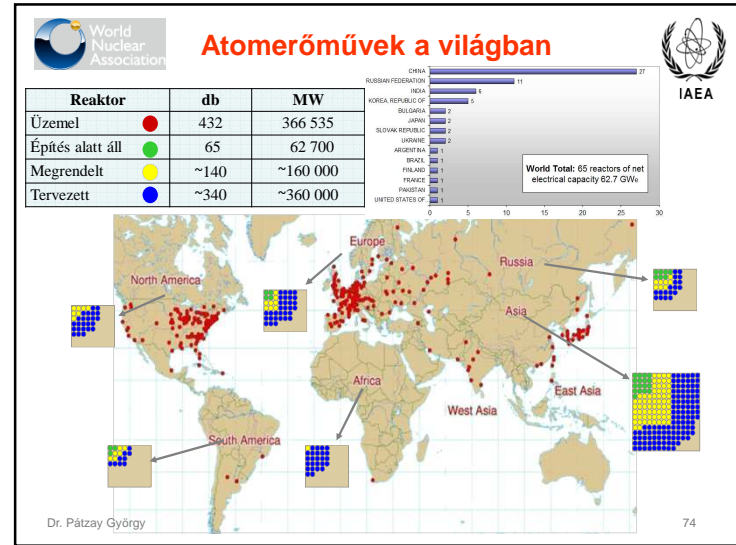
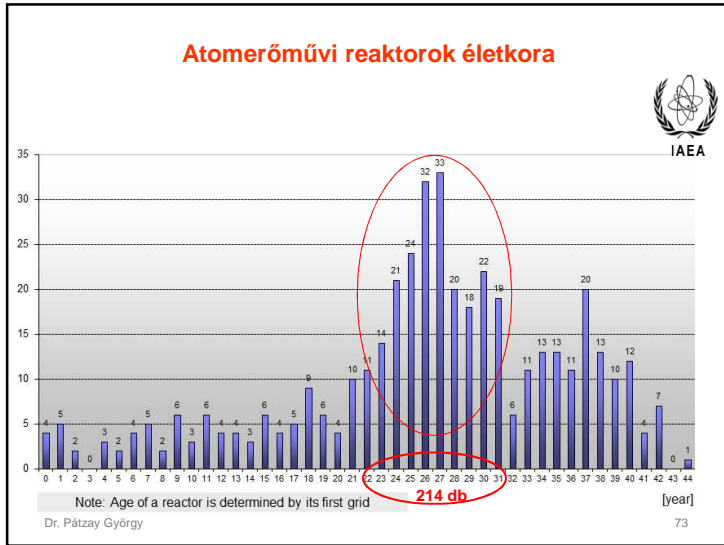
71

**A nukleáris energiatermelés szénlábnyma (Carbon footprint)**



Dr. Pátzay György

72

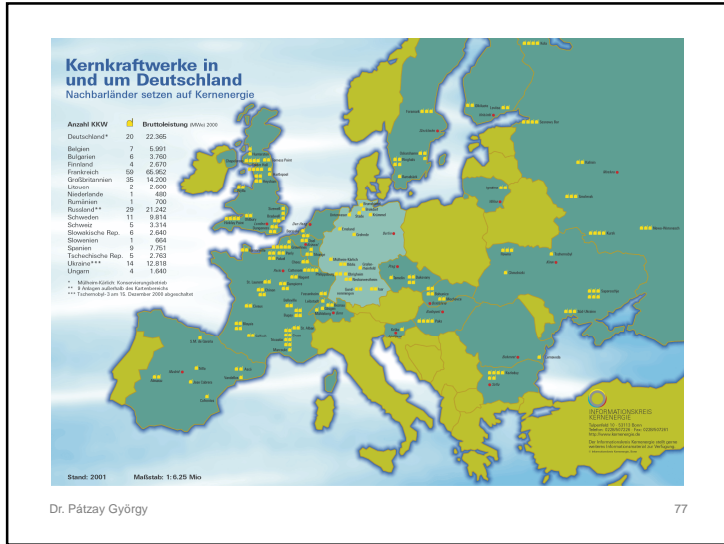


### Erőművek teljes életciklusára vonatkoztatott költségek (US cent/kWh) (nukleáris és szabályozási probléma mentes esetre)

	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	-

Dr. Pátzay György

76



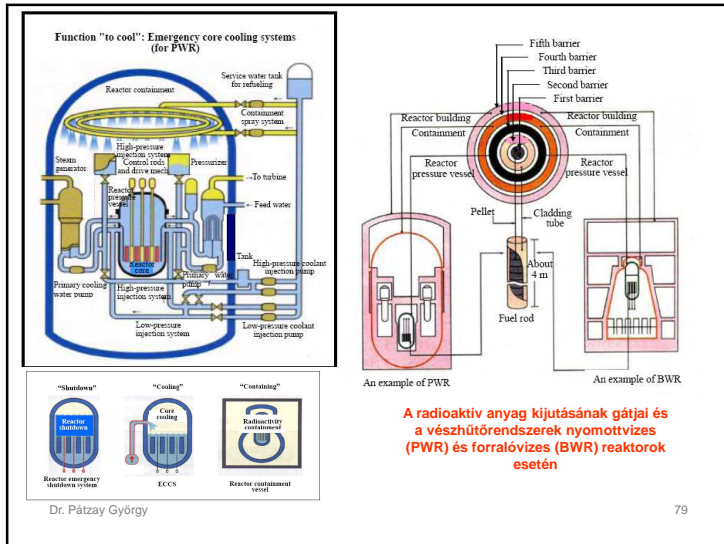
Dr. Pátzay György

**Plutonium isotópok jellemző koncentrációi energetikai reaktorokban és atomfegyverekben**

Izotóp	Felezési idő (év)	Atomfegyver Pu izotóp összetétele (átlagosan)	PWR <sup>a</sup> (33,000 MWd/t (d))	Gáz-grafit reaktor <sup>b</sup> (5,000 MWd/t)	CANDU <sup>c</sup> (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

Dr. Pátzay György



Dr. Pátzay György

**Kiégett fűtőelemek feldolgozása (reprocessálás)**

Üzemelő atomreaktorban két fő folyamat megy végbe:

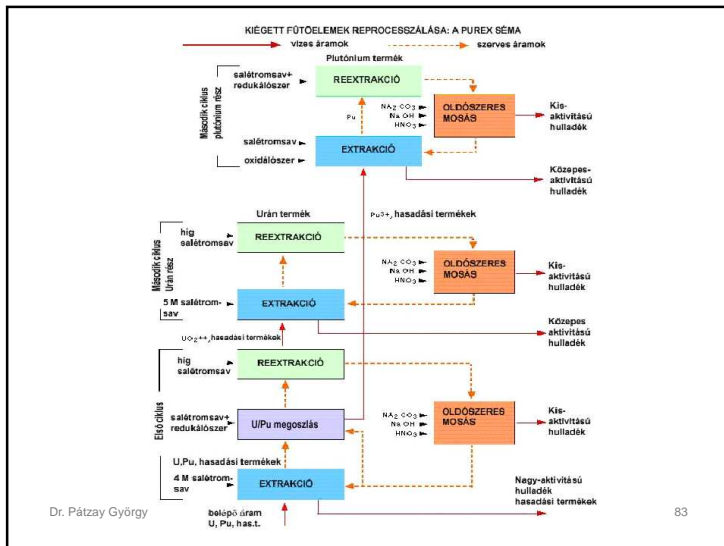
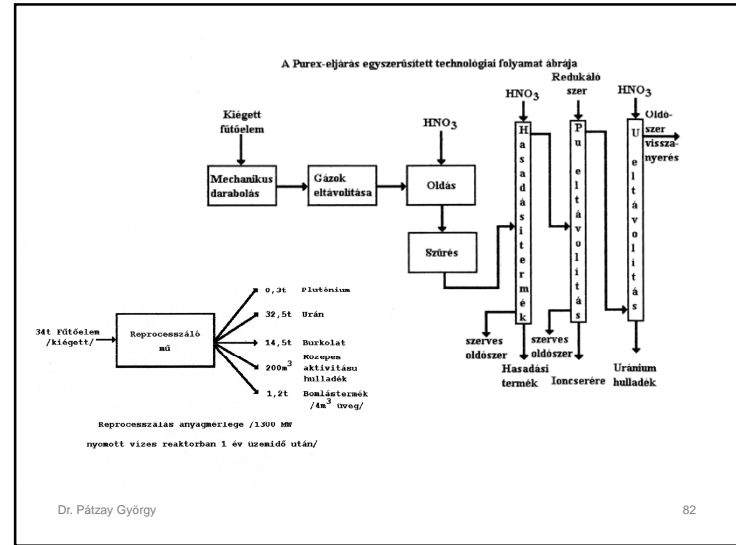
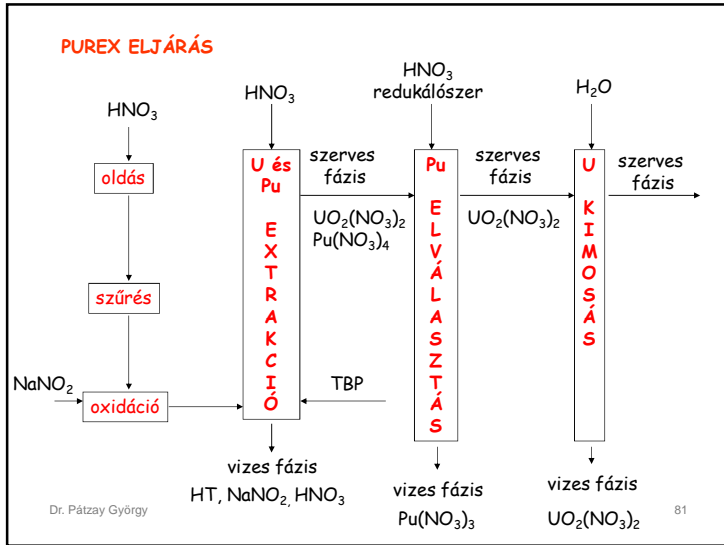
1. Neutronok hatására az U-235 magok hasadnak és energiabocsátás, neutronkibocsátás mellett hasadvány magokat képeznek, melyek e folyamat hulladékai.
2. A neutronok ütköznek az U-238 magokkal is. Az U-238 nem hasad, hanem két rövid átmenet után egy teljesen új hasadóképes magot a Pu-239 magot hozza létre.

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

Dr. Pátzay György



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

A jelenlegi uránérc készlet  $^{235}\text{U}$  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  $^{235}\text{U}$  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  $^{235}\text{U}$  és 95-97 tömeg%  $^{238}\text{U}$ . A reaktorban történő felhasználás során a  $^{235}\text{U}$  zöme a termikus neutronok hatására elhasad, míg az „inert”  $^{238}\text{U}$  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  $^{238}\text{U}$  egy neutron befogásával járó folyamat, melynek végén a keletkezett  $^{239}\text{U}$  magból két negatív béta-bomlás után új, mesterséges hasadóanyag a  $^{239}\text{Pu}$  keletkezik, ahogy azt az ábra mutatja.

Dr. Pátzay György 84

A transzuránok keletkezése

A <sup>239</sup>Pu új mesterséges hasadóanyag keletkezése

Az <sup>238</sup>U magokból keletkezett <sup>239</sup>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:

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

Dr. Pátzay György 85

an atom of uranium-238

A <sup>239</sup>Pu keletkezésének animációja

Dr. Pátzay György 86

A szokványos reaktorok ún. konverter reaktorok, ahol CR<1, tipikusan CR=0,6. Ez azt jelenti, hogy 10 db <sup>235</sup>U mag fogyasztásához, 6 <sup>239</sup>Pu atom keletkezése rendelhető az <sup>238</sup>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 <sup>238</sup>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 rendkívül jelentőséggűek, mert lehetővé teszik a <sup>238</sup>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 energiamennyiséget körülbelül egy standard 1300 MW-os erőművi reaktor termeli meg egy év üzemidő alatt 80%-os teljesítménytényező mellett.

Dr. Pátzay György 87

Reaktor típus és stratégia	Természetes urán szükséglet	Hulladék-vesztesség	Újra felhasználva
Könnyűvízes atomerőmű reprodukálás nélkül	205 tonna természetes urán 120 tonna természetes urán	168 tonna szegényített urán 107 tonna szegényített urán	35 tonna urán 1,2 tonna hasadási termék 0,3 tonna plutónium
Könnyűvízes atomerőmű reprodukálással	1,5 tonna természetes vagy szegényített urán		1,0 tonna hasadási termék 0,3 tonna plutónium

1 GW.év elektromos energia termeléséhez tartozó hasadóanyag felhasználások

Dr. Pátzay György 88



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 <sup>235</sup>U-ra nézve 3%-os fűtőelem pasztilla nyerhető. A visszamaradt 168 tonna szegényített urán (<sup>235</sup>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 <sup>235</sup>U, tartalmaz még 0,3 tonna hasadóképes plutóniumot és 1,2 tonna radioaktív hasadási termék. A reaktorból kikerült kiégett fűtőelem teljes mennyiségbe hulladékba kerül.

Az ábra középső sorában a könnyűvízes reaktor hasadóanyag reciklációs 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 hasadóanyag termék adódik hozzá és a visszamaradt <sup>235</sup>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 reaktor 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 üzemanyag szükségletének kevesebb mint 1%-a. Kevesebb, mintegy 1 tonna a hasadóanyag termékek mennyisége is. A feleslegben termelt mintegy 0,3 tonna plutónium felhasználható egy újabb gyors szaporító reaktor indításához. A gyors szaporító reaktorok 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 reciklációs könnyűvízes reaktorokkal üzemelő üzemanyagciklusok jöhetnek szóba. Környezetvédelmi szempontból a legkisebb fajlagos üzemanyag szükségletű és fajlagos radioaktív hulladék termelő üzemanyag ciklus módokat kell megválasztani.

Dr. Pátzay György 89

Dr. Pátzay György 90

10 GW<sub>e</sub> teljesítményű könnyűvízes reaktor éves anyagáram adatai

Dr. Pátzay György 91

## RADIOAKTÍV HULLADÉKOK

**Aktivitás-koncentráció szerint osztályozva:**

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

**Halmazállapot szerint osztályozva:**

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

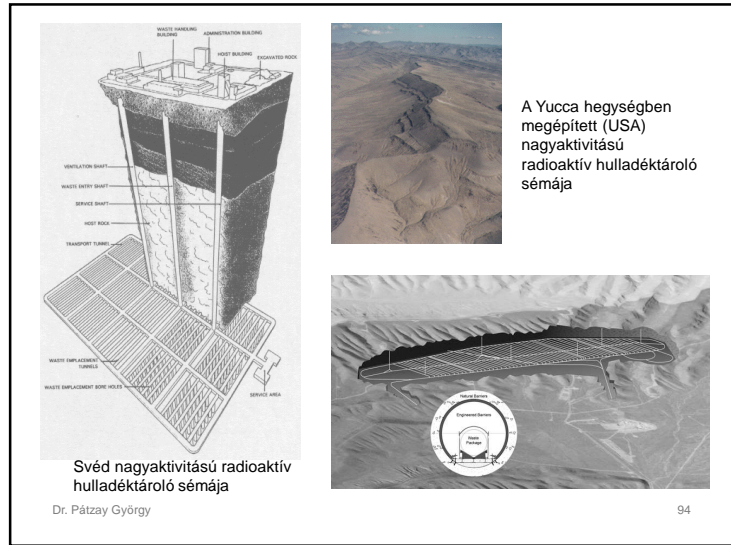
**Felezési idő szerint osztályozva:**

- 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\*10<sup>-2</sup> Gy/óra
- közepes dózisteljesítményű hulladékok: 3\*10<sup>-2</sup>-10<sup>-2</sup> Gy/óra
- nagy dózisteljesítményű hulladékok: >10<sup>-2</sup> Gy/óra

Dr. Pátzay György 92



## ÚJ NUKLEÁRIS TECHNOLÓGIÁK

Alapvetően két technológia a fúzió és a gyorsítóval működő energiaerősítő jöhet szóba. Mindkét technológia esetén h-1, azaz a „tűzelőanyag” teljes „elégítésre” kerül és lényegében végtelen nagyságú készlet áll rendelkezésre.

**1. Fúzió**

- A legegyszerűbb esetben komprimált trícium ( $^3\text{H}$ ) „égéséről” beszélünk:

$$^3_1\text{H} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n} + 17,6 \text{ MeV}$$

A radioaktív tríciumot lítiumból fejlesztik a keletkezett neutron segítségével:

$$^6_3\text{Li} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^3_1\text{H} + 4,9 \text{ MeV}$$

További trícium szükséges a veszteségek pótlására a következő reakcióban keletkezik:

$$^7_3\text{Li} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^3_1\text{H} + ^1_0\text{n}$$

Dr. Pátzay György 95

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

- A következő fúziós reakció **kevesebb felaktivált anyagot generál**:

$$^3_2\text{He} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_1\text{p} + 18 \text{ MeV}$$

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

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

$$^1_1\text{p} + ^{11}_5\text{B} \rightarrow 3\left[^4_2\text{He}\right] + 8,78 \text{ MeV}$$

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

Dr. Pátzay György 96



## A NUKLEÁRIS ENERGIATERMELÉS II. MAGFÚZIÓ JELENLEG

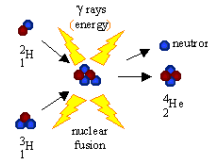
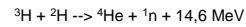
Energia nyerhető a könnyű atommagok egyesítésével, fúzióval is. Fúzió - az atomok egyesülnek:

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

- $d + d \rightarrow t + p + 4,04 \text{ MeV}$
- $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n + 3,27 \text{ MeV}$
- $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17,58 \text{ MeV}$
- ${}^3\text{He} + d \rightarrow {}^4\text{He} + p + 18,34 \text{ MeV}$

• Zum Vergleich:  $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 4,1 \text{ eV}$

Jelenleg a hidrogén izotópjait próbálják fúzióztatni.

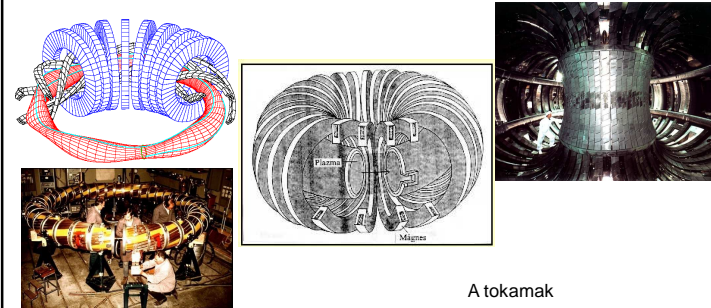


Dr. Pátzay György

97

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  $4.10^7 \text{ K}$  hőmérséklet elérése szükséges!



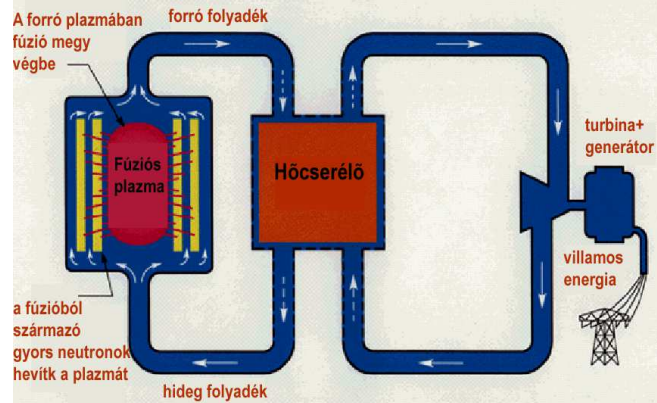
Dr. Pátzay György

A stellarator

A tokamak

98

### FÚZIÓS ERŐMŰ

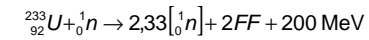


Dr. Pátzay György

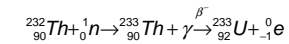
99

### 2. Fisszió

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



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



Dr. Pátzay György

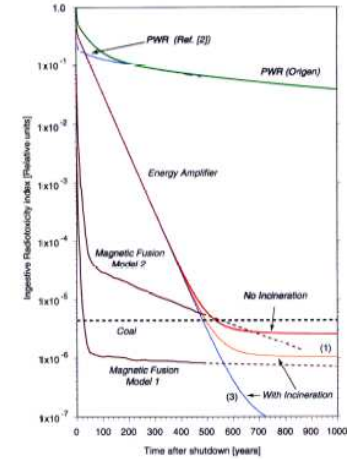
100

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

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

Dr. Pátzay György

101

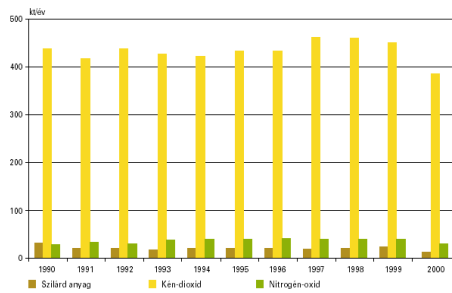


Az ábrán a könnyűvízes hasadási reaktorokban (LWR), a fúzió és az energiaerősítő rendszerekben keletkező radioaktív hulladékok radiotoxicitását mutatjuk be az idő függvényében. Az energiaerősítő rendszerekben a keletkezett radioaktív hulladékok mennyisége kevesebb és gyorsabban bomlik, a fúziós rendszerekben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

Dr. Pátzay György

102

### MVM erőművi kibocsátások



Dr. Pátzay György

103

### Atomerőművi kibocsátások, 2000

Radioaktív kibocsátások a hatósági korlát százalékában

Év	Üzemelő blokkok száma, db	Légutató, %				Folyékony, %		
		Nemesgáz összes	Aeroszol (T <sub>102</sub> >24 h)	Jód*	<sup>90</sup> Sr	Összes béta	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
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		1,9x10 <sup>-11</sup>	1,1x10 <sup>-6</sup>	1,1x10 <sup>-6</sup>	5,6x10 <sup>-4</sup>	3,7	37	7,5
		(Bq/nap) / 1000 MW <sub>e</sub> -ra				Blokkonként		

\*: a <sup>131</sup>I egyenértékét jelenti

Dr. Pátzay György

104

**A paksi atomerőművel azonos elektromos teljesítményű erőművek levegőszennyezése**

Erőmű fajtája	Termelt szén-dioxid tonna/év	Elfogyasztott oxigén tonna/év
Atomerőmű	0	0
Földgázüzemű	4760000	3470000
Olajüzemű	9520000	6950000
Modern széntüzemű	10220000	7460000

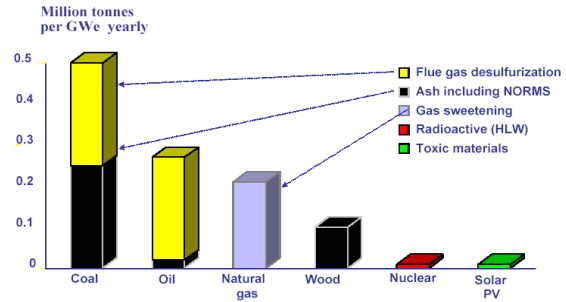
Ha Paksot szeszes erőmű helyettesíténé, az kb. a következő szennyezőanyag-mennyiségeket bocsátaná ki a légkörbe évente:

- 650 ezer tonna kén-dioxid,
- 60 ezer tonna nitrogén-oxid,
- 100 ezer tonna por és hamu,
- 40 ezer tonna szén-monoxid.

Dr. Páztay György

105

**Wastes in Fuel Preparation and Plant Operation**

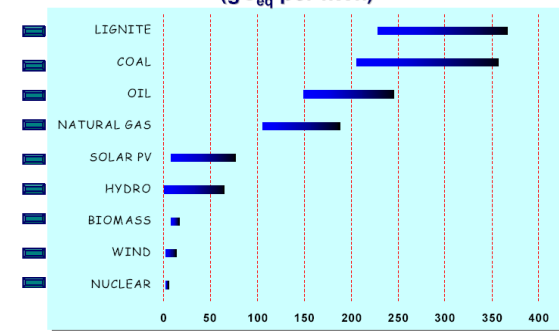


International Atomic Energy Agency

Dr. Páztay György

106

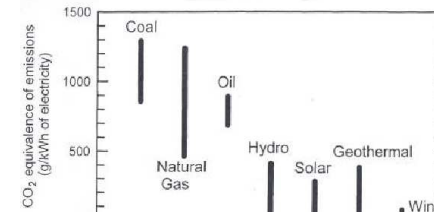
**Full Chain Greenhouse Gas Emissions (gC<sub>eq</sub> per kWh)**



International Atomic Energy Agency

Dr. Páztay György

107



Dr. Páztay György

108

