

# **Magfizikai alapismeretek**

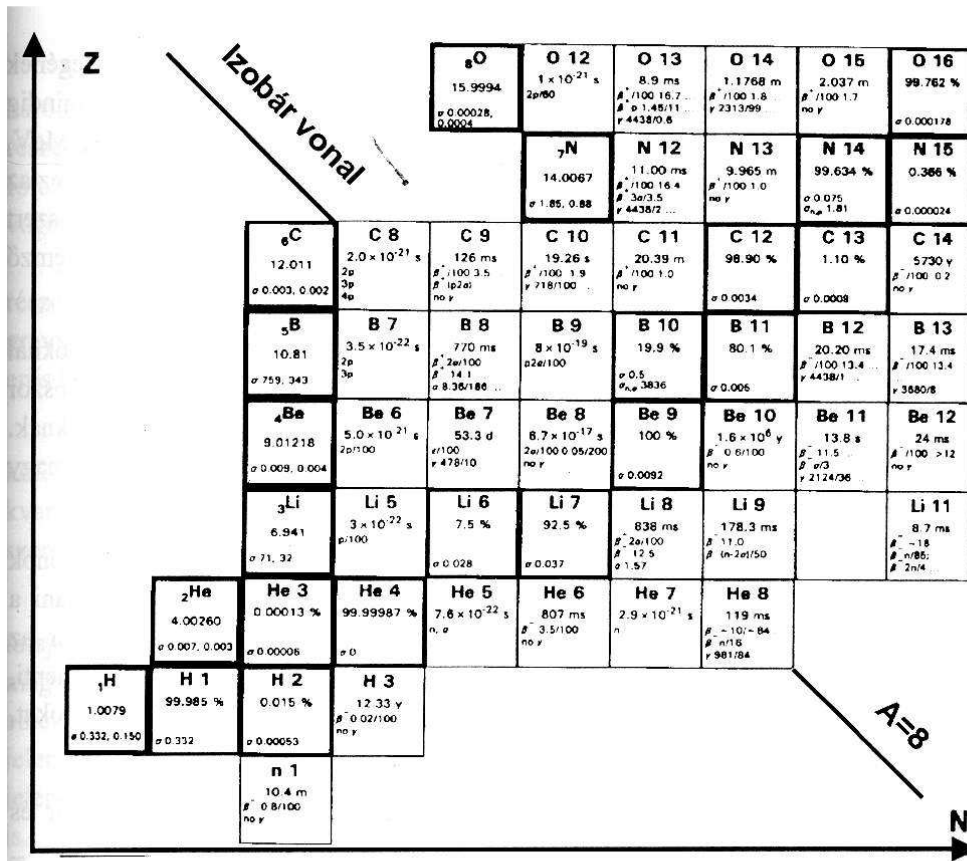
## Az atommag alkotórészei, szerkezete, mérete

	Proton	Neutron
Tömeg	$1,6736 \cdot 10^{-24} \text{ g}$	$1,6747 \cdot 10^{-24} \text{ g}$
Töltés	$+1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	0
Stabilitás	igen	nem $n \rightarrow p + e^- + \nu_a$

- Az atommag mérete: $10^{-15} \text{ m}$
- Az A tömegszámú, Z rendszámú elem magja tartalmaz Z számú protont és A-Z számú neutron

# Az atommagok csoportosítása

- Stabil magok ( $\Sigma$  264)
- Elsődleges természetes radionuklidok
  - Kezdetből léteznek; nagyon hosszú felezési idő. Pl.  $^{238}\text{U}$ ,  $T_{1/2}=4,47 \cdot 10^9$  év,  $^{40}\text{K}$ ,  $T_{1/2}=1,28 \cdot 10^9$  év,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $T_{1/2}=4,8 \cdot 10^{10}$  év ( $\Sigma$  26)
- Másodlagos természetes radionuklidok a természetes radionuklidok bomlása révén keletkeznek. Pl.  $^{226}\text{Ra}$ ,  $T_{1/2}=1600$  év,  $^{234}\text{Th}$ ,  $T_{1/2}=24,1$  nap ( $\Sigma$  38)
- Indukált természetes radionuklidok állandóan keletkeznek a kozmikus sugárzás hatására.
  - Pl.  $^3\text{H}$ ,  $T_{1/2}=12,3$  év,  $^{234}\text{Th}$ ,  $T_{1/2}=24,1$  nap ( $\Sigma$  10)
- Mesterséges radionuklidok. Pl.  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  ( $\Sigma$  kb. 2000)



# Az atommagok táblázata

- A magtáblázattal kapcsolatos fogalmak
- Izotóp: azonos protonszám (rendszám)
- Izotón: azonos neutronszám
- Izobár: azonos tömegszám

## Kémiai elem

${}^1_1\text{H}$
1.0079
$\sigma$ 0.332, 0.150

vegyjel és rendszám  
 atomtömeg  
 n befogási hatáskeresztmetszet (rezonancia integrál), barn

## Radioaktív nuklid

${}^{15}\text{C}$
2.449 s
$\beta^-$ /100 4.5 $\gamma$ 5298/68

elem és tömegszám  
 felezési idő  
 bomlási módok ( $\alpha$  és  $\beta^-$ :relatív gyakoriság és energia, Mev  
 $\gamma$ : energia, keV és relatív gyakoriság)

## Stabil nuklid

${}^1_1\text{H}$
99.985 %
$\sigma$ 0.332

elem és tömegszám  
 természetes izotópelőfordulás  
 n befogási hatáskeresztmetszet (barn)

## Izomerek

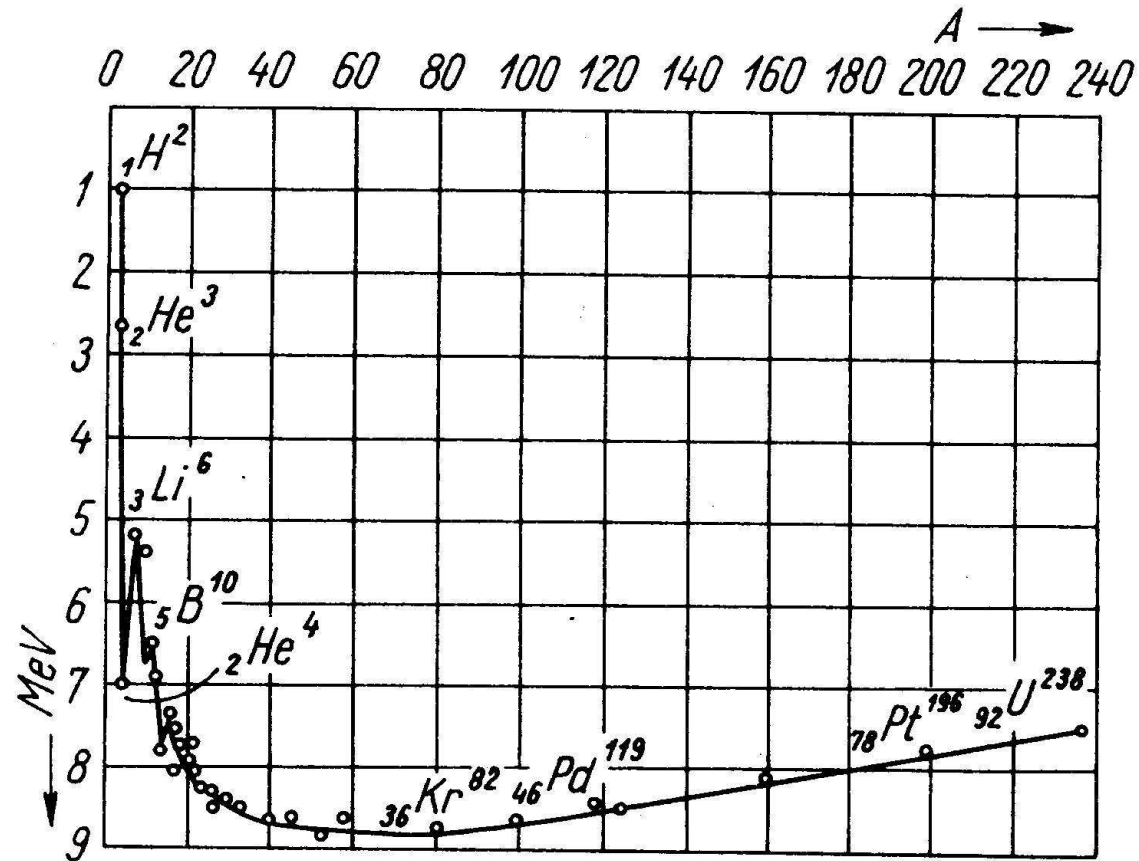
${}^{16}\text{N}$
7.6 $\mu$ s 7.13 s
$\beta^-$ /100 4.3... $\gamma$ 6129 $\beta^-$ /0 769...

bal oldal:  
 metastabil állapot  
 jobb oldal:  
 alapállapot

# Kötési energia

- Kötési energia:
  - $E(Z,N)=(m_p \cdot P+m_n \cdot N-m(Z,N)) \cdot c^2$
- Szeparációs energia:
  - $E_b=(m_b+m_r-m(Z,N)) \cdot c^2$
- Az atomi tömegegység,  $A T E=1,66 \cdot 10^{-27}$  kg és az  $E=m \cdot c^2$  formula felhasználásával
  - $E(Z,N)=(m_p \cdot P+m_n \cdot N-m(Z,N)) \cdot 931,5$  MeV
- Empírikus kötési energia formula; az atommag cseppmodellje:
- $E(z,n)=-U_v \cdot A+U_c \cdot Z \cdot (Z-1) \cdot A^{-1/3}+U_f \cdot A^{2/3}+U_t \cdot (N-Z)^2/(4 \cdot A)+U_p$ 
  - $U_v=14.0$  MeV
  - $U_c=0.61$  MeV
  - $U_f=15.0$  MeV
  - $U_t=84.2$  MeV
  - $U_p=34$  MeV ps-ps vagy ptl-ptl magra, 0 ps-ptl ptl-ps magra

# Egy nukleonra jutó kötési energia



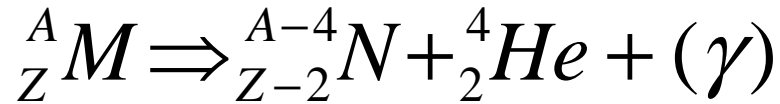
5.4 – 20 b ábra

Az egy nukleonra eső kötési energia menete

# Az atommag héjmodellje

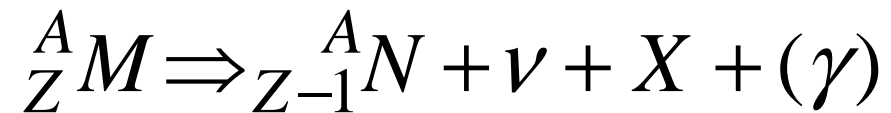
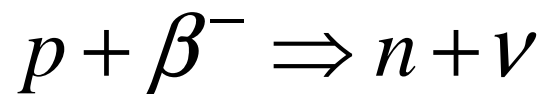
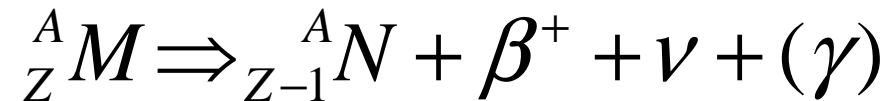
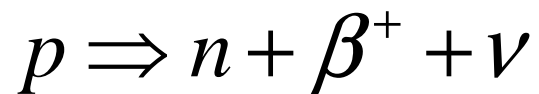
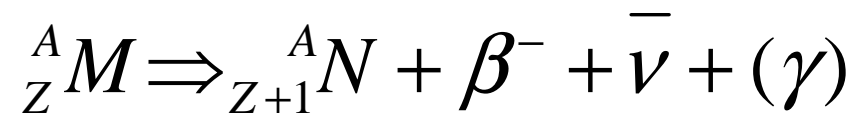
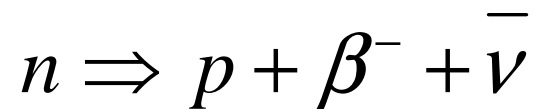
- Mágikus számok: 2, 8, 20, 50, 82, 126
- Ezen proton vagy neutronszámmal rendelkező atommagok kötési energiája nagyobb, mint a szomszédos magoké (analógia a periódusos rendszerbeli nemesgázokkal).
- Különösen stabilak az ún. kétszer mágikus magok.

# Az alfa és a béta bomlás



$$E_\alpha = \left( {}^A_Z M - {}^{A-4}_{Z-2} M - {}^4_2 He \right) \cdot 931,5 MeV$$

$\alpha$  energia=3-9 MeV/bomlás



$\beta$  energia=0,2-0,4  $E_{\max}$



# Gamma sugárzás és belső konverzió

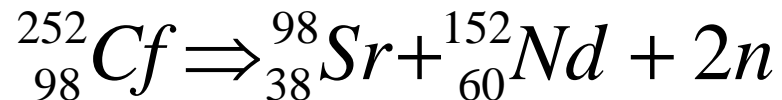
$${}^A_Z M^* \Rightarrow {}^A_Z M + \gamma \quad \nu = \frac{E^* - E}{h}$$

$\gamma$  energia = 2 keV- 7 MeV

Belső konverzió: energia átadás atomi elektronnak.

$$E_e = E_m - E_k$$

spontán hasadás



# Bomlástörvény, aktivitás

- Az időegység alatt bekövetkező bomlások számát aktivitásnak nevezzük

$$a = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda \cdot N(t) \Rightarrow N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

- Az aktivitás egysége az 1 Bq = 1 bomlás/s.
- Régebbi egysége a Ci, 1 Ci =  $3,7 \cdot 10^{10}$
- A bomlástörvényből  $N=N_0/2$ -vel adódik a felezési idő és a bomlási állandó közti összefüggés

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

# Bomlási sorozatok vagy családok

Család	Első elem	Utolsó elem	Felezési idő [év]
4k	$^{232}\text{Th}$	$^{208}\text{Pb}$	$1,80 \cdot 10^{10}$
4k+1	$^{237}\text{Np}$	$^{209}\text{Bi}$	$2,14 \cdot 10^6$
4k+2	$^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}$	$4,47 \cdot 10^9$
4k+3	$^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}$	$7,04 \cdot 10^8$

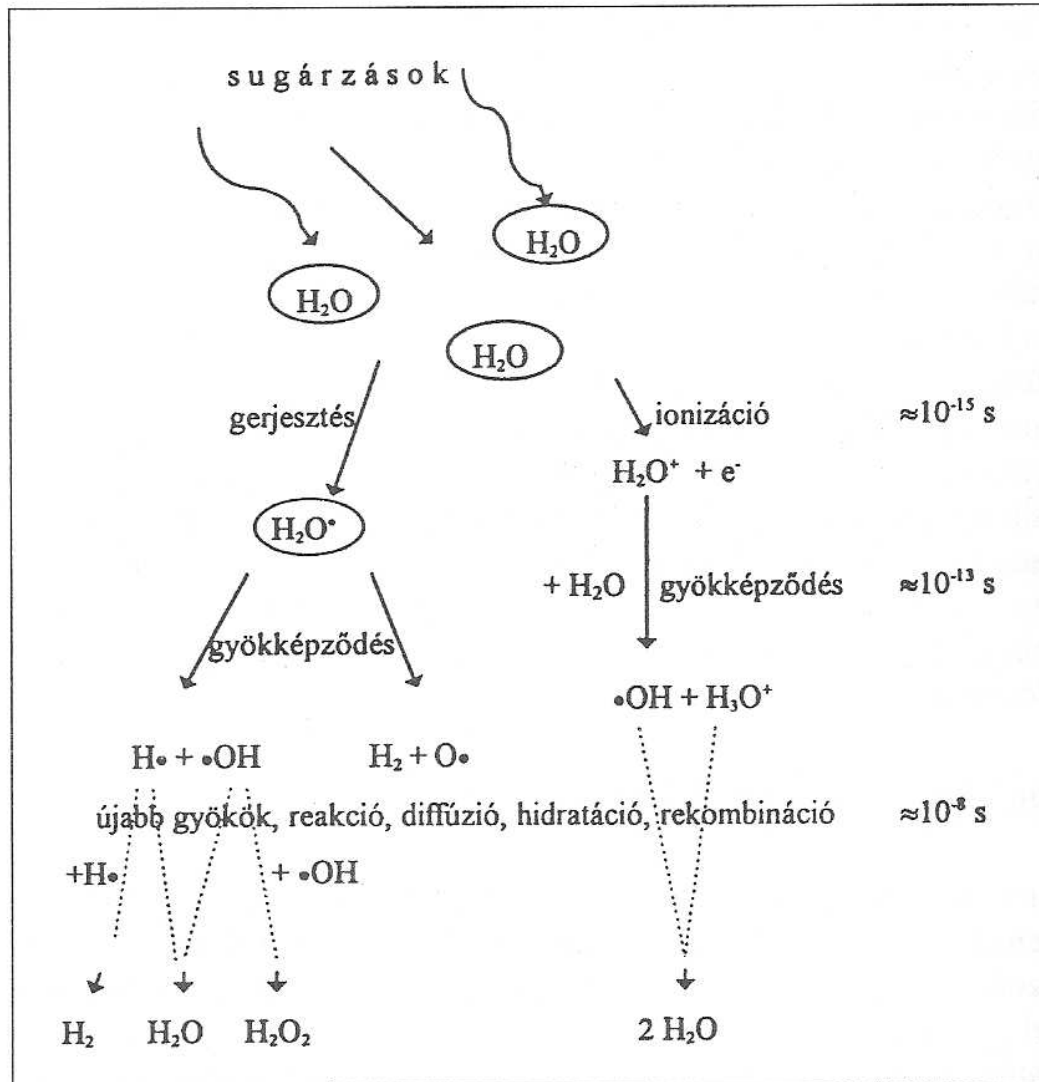
# A sugárzások hatása élő szervezetre

- A sugárzás atomokat és molekulákat ionizál vagy gerjeszt
  - Direkt hatás: az energia elnyelése és a kiváltott folyamat ugyanazon a molekulán következik be.
  - Indirekt hatás: az energia abszorpció és a kiváltott hatás különböző molekulákon következik be. Az indirekt hatás során szabad gyökök képződnek, melyek rövid élettartamúak, de nagyon reakcióképesek.

# A sugárzás hatásának időbeli lefolyása

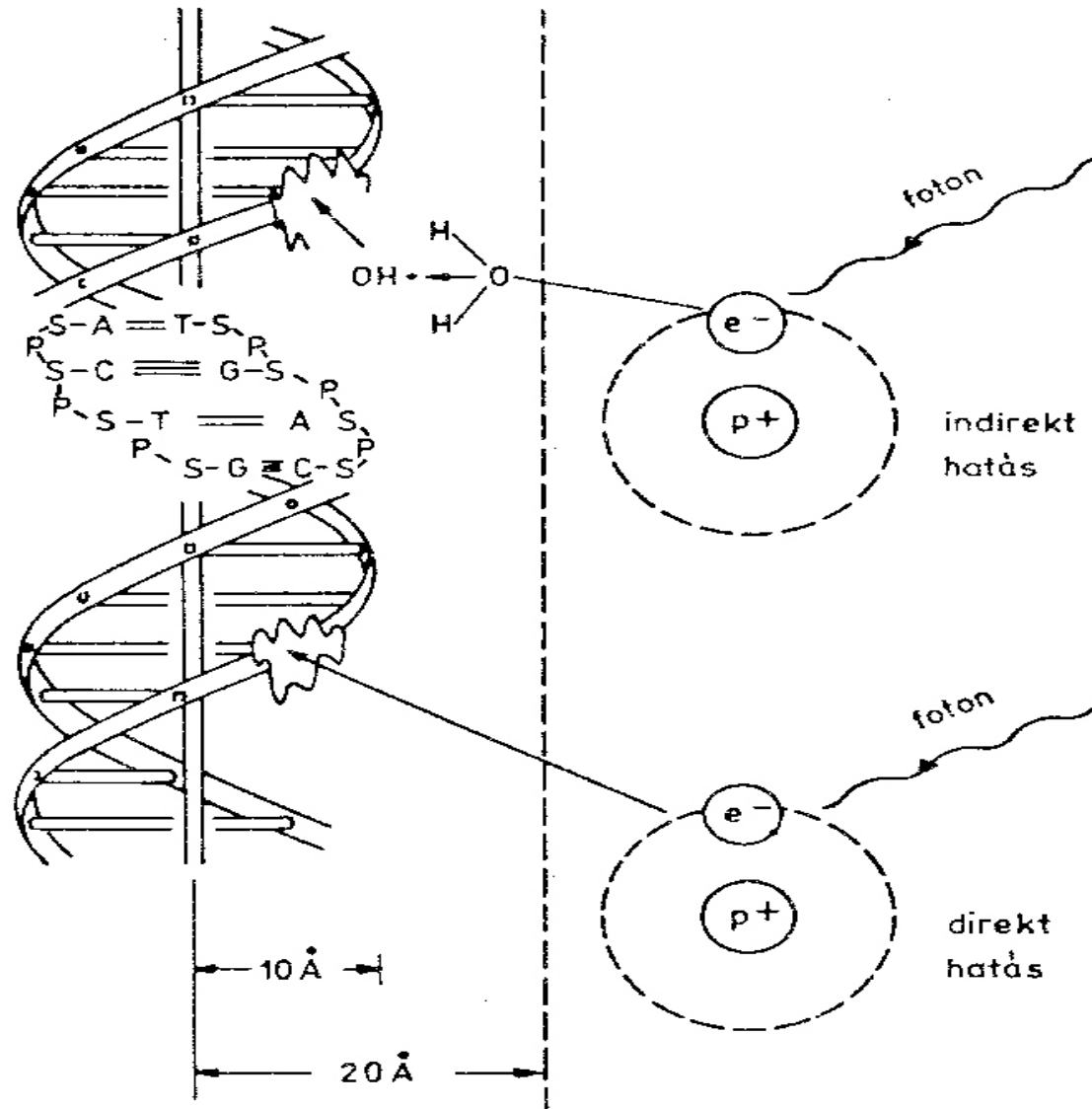
	Időtartam	Esemény
Fizikai fázis	$10^{-15}$ s	Gerj. atomok, $H_2O^+$ , $H_2O\cdot$ , $e^-$ keletkezése
	$10^{-15}$ - $10^{-11}$ s	További szabad gyökök keletkezése
	$10^{-11}$ - $10^{-6}$ s	Diffúzió révén kölcsönhatás a biol. aktív mol-al
Biol. fázis	$10^{-3}$ s	Befejeződnek és fixálódnak a mol. változások
	s/min	Biomolekulafizikai, anyagcsere változások
	órák	Sejtosztódás károsodás
	napok	Idegrendszeri, és gyomor- bélelváltozások,
	Hetek	Vérképző rendszer károsodás
	Hónapok	Tüdőfibrózis
	Évek	Daganatok, genetikai károsodás

# Szabad gyökök képződése



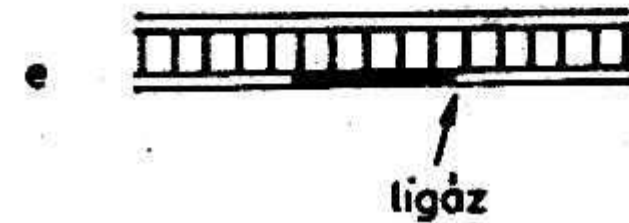
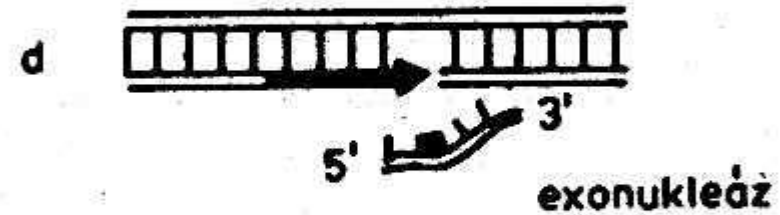
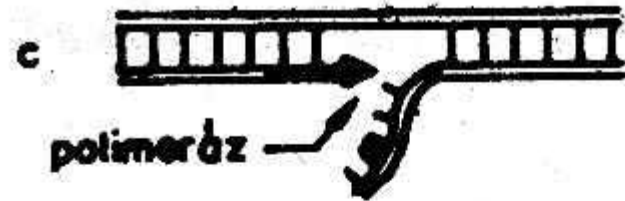
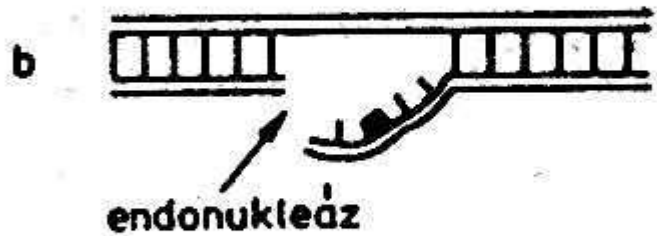
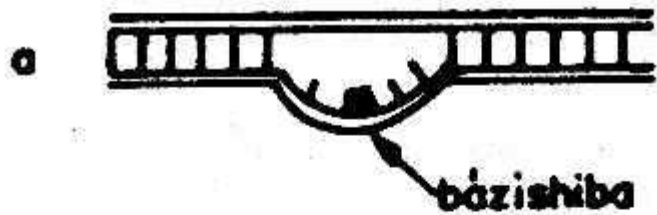
- A szabad gyökök képződésének egyik legegyszerűbb módja a vízmolekulák szétbontása, radiolízise.

# A sugárzás hatása biológiailag aktív molekulára



- Kettős száltörés
- Egyes száltörés
- Bázishiány
- keresztkötés

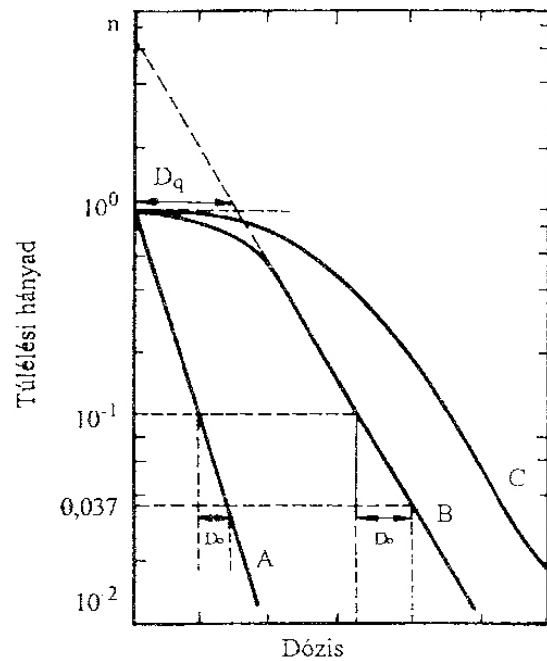
# A DNS sérülése javító mechanizmusa



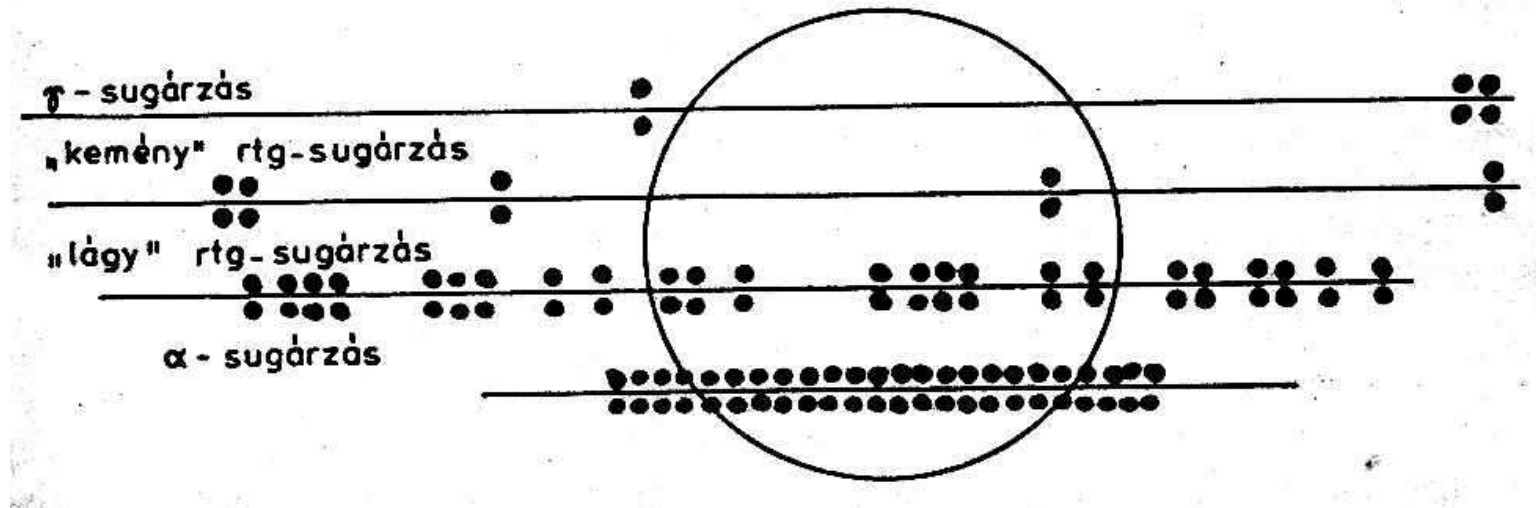


# A sugárzás sejtszintű hatásai

- Az inaktiváció mindig valamilyen funkcióra vonatkozik
  - DNS szintézis gátlás
  - Enzimszintézis gátlás,
  - Sejtosztódás gátlás
- Egytalálatos inaktiváció:  $N=N_0 \cdot e^{-\sigma \cdot D}$  vagy  $\ln N/N_0 = -\sigma \cdot D$
- Többtalálatos inaktiváció:  $N=N_0 \cdot (1-(1-e^{-\sigma \cdot D})^p)$  vagy  $\ln N/N_0 = \ln p - \sigma \cdot D$



# A sugárhatást befolyásoló tényezők



- Vegyi anyagok: protektívek vagy szenzitizálók
  - SH csoportot tartalmazó vegyületek csökkentik a szabad gyökök számát
  - Oxigén jelenléte fokozza a peroxid típusú szabad gyökök keletkezését
- Biológiai tényezők
- Hőmérséklet

# Szövetek és szervek sugárérzékenysége csökkenő sorrendben

- Nyirokszövetek
- Fehérvérsejtek, éretlen vörösvérsejtek
  - Gyomor-bél nyálkahártya
    - Ivarsejtek
      - Bőr
      - Erek
    - Mirígyyszövetek, máj
      - Kötőszövet
      - Izomszövet
      - Idegszövet

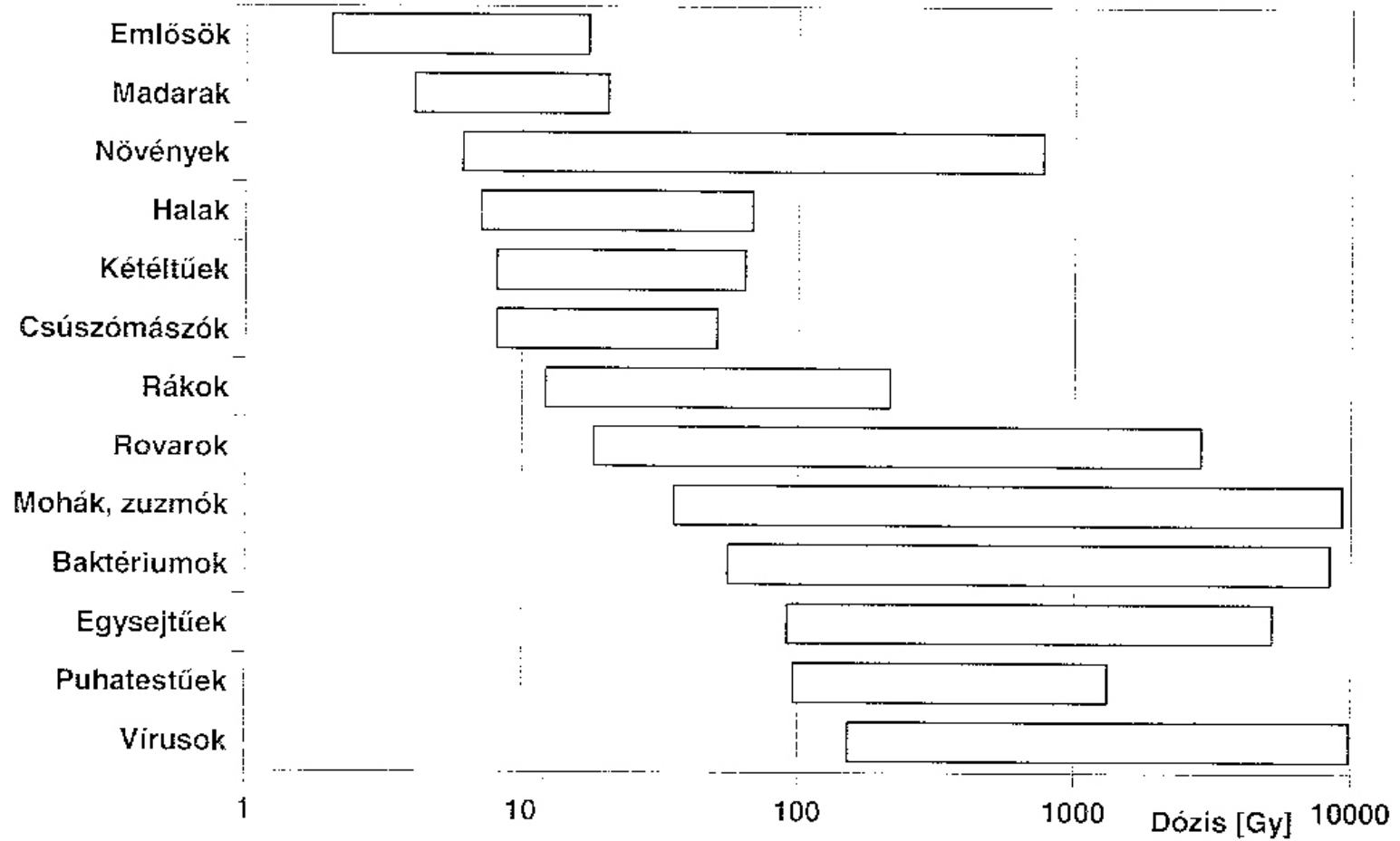
## A dózis fogalmak áttekintése

- Elnyelt dózis:  $D$  egysége: Gray (Gy)=1J/kg
- Egyenérték dózis:  $H_{T,R}=W_R \cdot D_{T,R}$  (Sievert; Sv)
- $H_T=\sum W_R \cdot D_{T,R}$
- Effektív dózis:  $E=\sum W_T \cdot H_T$ , ahol  $W_T$  a szöveti súly
- Kollektív dózis:  $S=\sum E_i \cdot N_i$

sugárzás	$W_R$
x, $\gamma$ , elektron	1
Neutron	5-20
Proton	5
Alfa, nehéz magok	20

Szövet, szerv	$W_T$
Ivarszervek	0,20
Csontvelő, bél, tüdő, gyomor	0,12
Hólyag, mell, máj, nyelőcső	0,05
Bőr, csont	0,01
Összes többi	0,05

## Félhalálos dózistartományok különböző élőlények akut sugárterhelése esetén



# Éves sugárterhelés

Komponens	Évi effektív dózis (mSv)
<i>Természetes forrás</i>	
Kozmikus sugárzás	0,38
Kozmogén radioizotóp	0,02
Terresztikus sugárzás	2,00
Külső	0,46
Belső	1,54
Rn és leányelemei	1,30
<i>Összes természetes</i>	2,4
<i>Mesterséges forrás</i>	
Orvosi alkalmazás	0,43
Egyéb (pl. TV)	0,10
Nukleáris energia	<0,01
Kutatási, oktatási alkalmazás	<0,01
Nukleáris fegyver kísérletek	<0,01
Nukleáris balesetek	<0,02
<i>Összes mesterséges</i>	0,60
<b>Összesen</b>	<b>3,00</b>

## Dózis korlátok

Dózis féleség	Foglalkozási korlát	Lakossági korlát
Effektív dózis	20 mSv/év (5 évente egyszer max 50 mSv)	1 mSv/év (5 évente egyszer max 5 mSv)
Évi dózisegyenérték		
szemlencsére	150 mSv/év	15 mSv/év
bőrre	500 mSv/év	50 mSv/év
Kézre, lábra	500 mSv/év	

# Nukleáris energiatermelés

- Rövid kezdeti történet
- 1942: A láncreakció beindul
- 1946: Hanfordi reaktorok: grafit moderátor, vízűtés
- 1951: 250 kW villamos teljesítmény az EBR (Experimental Breeding Reactor) épületének világítására
- 1954: 5 MW teljesítmény villamos hálózatra a SzU-ban
- 1956 60 MW villamos teljesítmény Calder Hall-ban



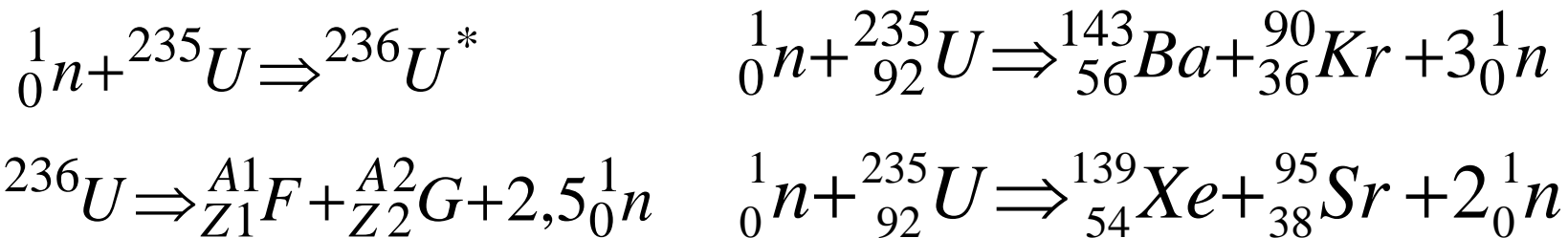
# A chicagoi reaktor építése



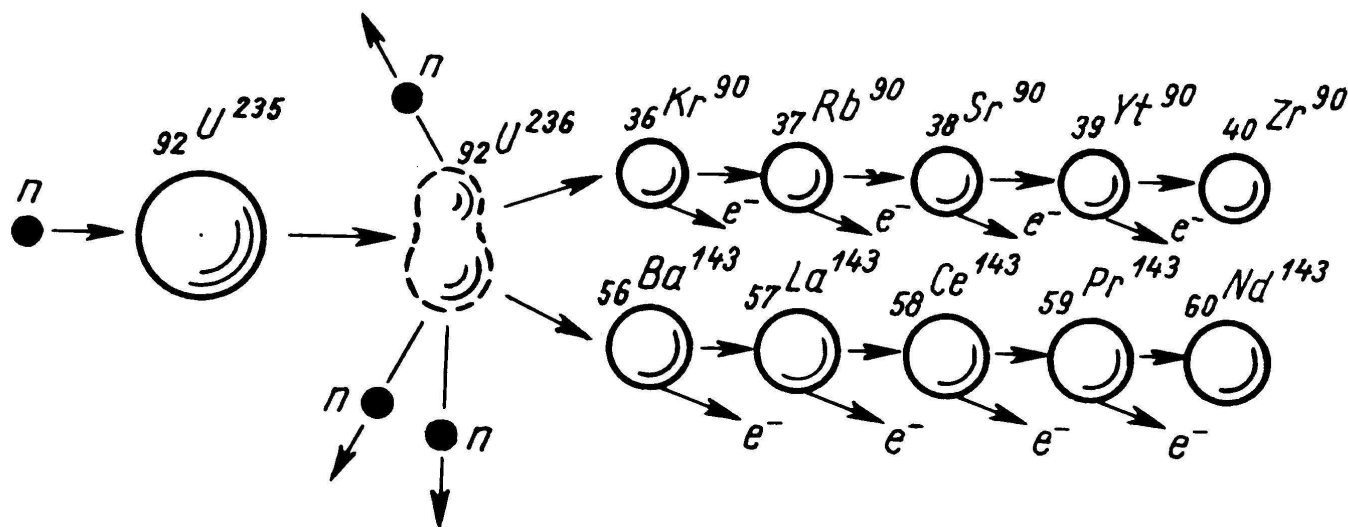
# Energia felszabadulás $^{235}\text{U}$ atommagok hasadásakor

$^{235}\text{U}$  hasadása termikus (lassú) neutronok hatására;  $m \cdot v^2/2 = k \cdot T$ . Pl.  $20^\circ\text{C}$ -on  $k \cdot T = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 = 404,34 \cdot 10^{-23} \text{ J} = 252,7 \cdot 10^{-4} \text{ eV} = 0,02527 \text{ eV}$ .

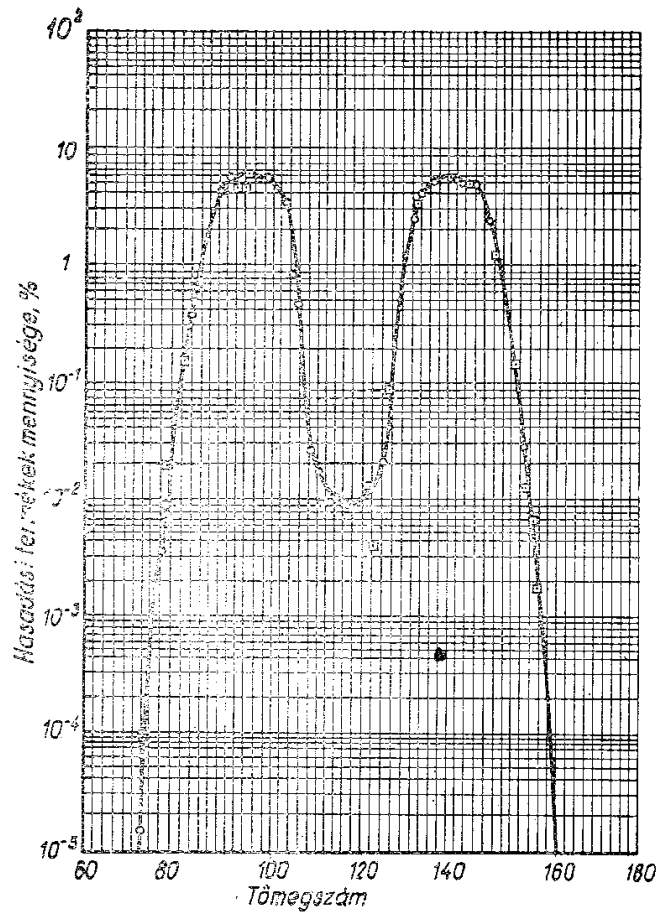
A termikus neutronok sebessége:  $v = (2 \cdot k \cdot T/m)^{1/2}$ . Pl.  $20^\circ\text{C}$ -on  $v = 2200 \text{ m/s}$



Hasadási termékek száma > 30



# Az $^{235}\text{U}$ hasadási termékeinek tömegszám szerinti eloszlása



- A legnagyobb valószínűséggel keletkező hasadvány termékek tömegszáma 90 és 140 körül van

# A hasadás energiamérlege

- A hasadási termékek kinetikus energiája: 167 MeV
- A  $\beta$  bomlás energiája: 5 MeV
- A  $\gamma$  bomlás energiája: 5 MeV
- A neutrínókkal távozott energia: 11 MeV
- A keletkezett neutronok energiája: 5 MeV
- A hasadás pillanatában keletkező sugárzás: 5 MeV
- Szumma: 198 MeV

# Magenergia ↔ Atomenergia

- Egyetlen  $^{235}\text{U}$  hasadásakor felszabaduló energia: **198 MeV**
- Egyetlen C atom  $\text{CO}_2$ -vé égésekor felszabaduló energia: **10 eV**
- Az arány:  $2 \cdot 10^7$  (húsz millió)
- 1 mol (235 g)  $^{235}\text{U}$  hasadásakor felszabaduló energia 19000 GJ. Ehhez 6300 tonna 30 MJ/kg fűtőértékű szén kell.

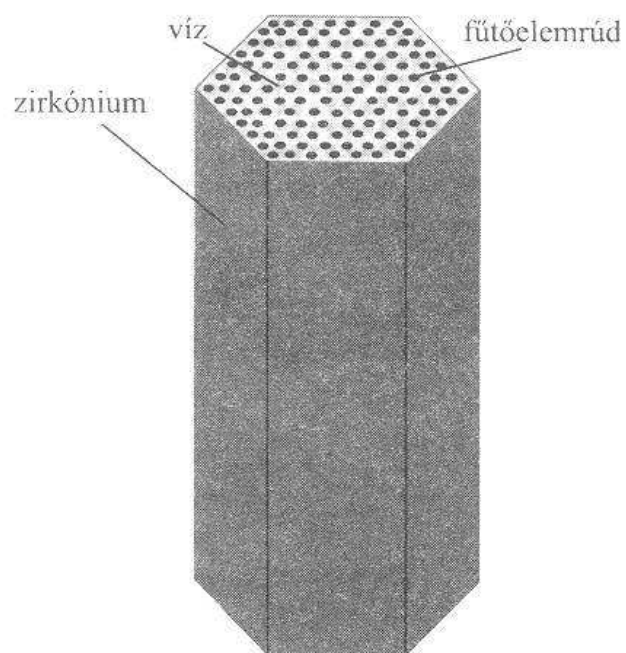
A nukleáris reaktorok egyik leggyakrabban alkalmazott típusa, az ún. nyomottvizes reaktor és főbb szerkezeti elemei, anyagai

- Fűtőanyag:  $^{235}\text{U}$
- Szabályozó anyag: Cd
- Moderátor anyag: víz
- Hűtőközeg: víz

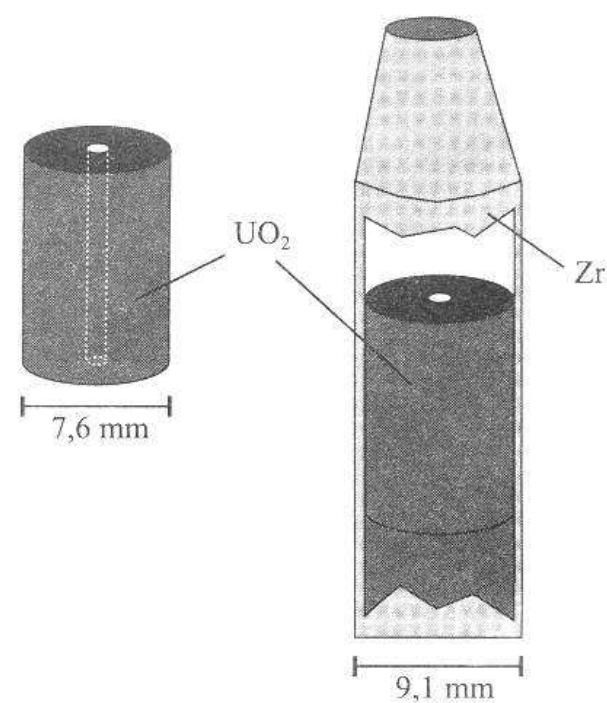
# Uránérc feldolgozás

- Bányászat után őrlés, kénsavban való oldás után  $U_3O_8$  kinyerése, a kapott sárga port pogácsává sajtolják
- Konverzió:  $UF_6$  előállítása
  - Az  $^{235}U$  moláris tömege  $235+6*19=349$
  - Az  $^{238}U$  moláris tömege  $238+6*19=352$
- Izotópdúsítás: az  $^{235}U$  aránya csak 0,72 %. Ezzel az összetétellel csak nehézvíz vagy grafit moderátor alkalmazásával tartható fenn a láncreakció, ezért 2-4%-ra kell dúsítani
  - Gázdiffúzió
  - Gázcentrifugálás
- Fűtőelem gyártás:  $UF_6 \Rightarrow UO_2$

# Fűtőelem és fűtőelem köteg

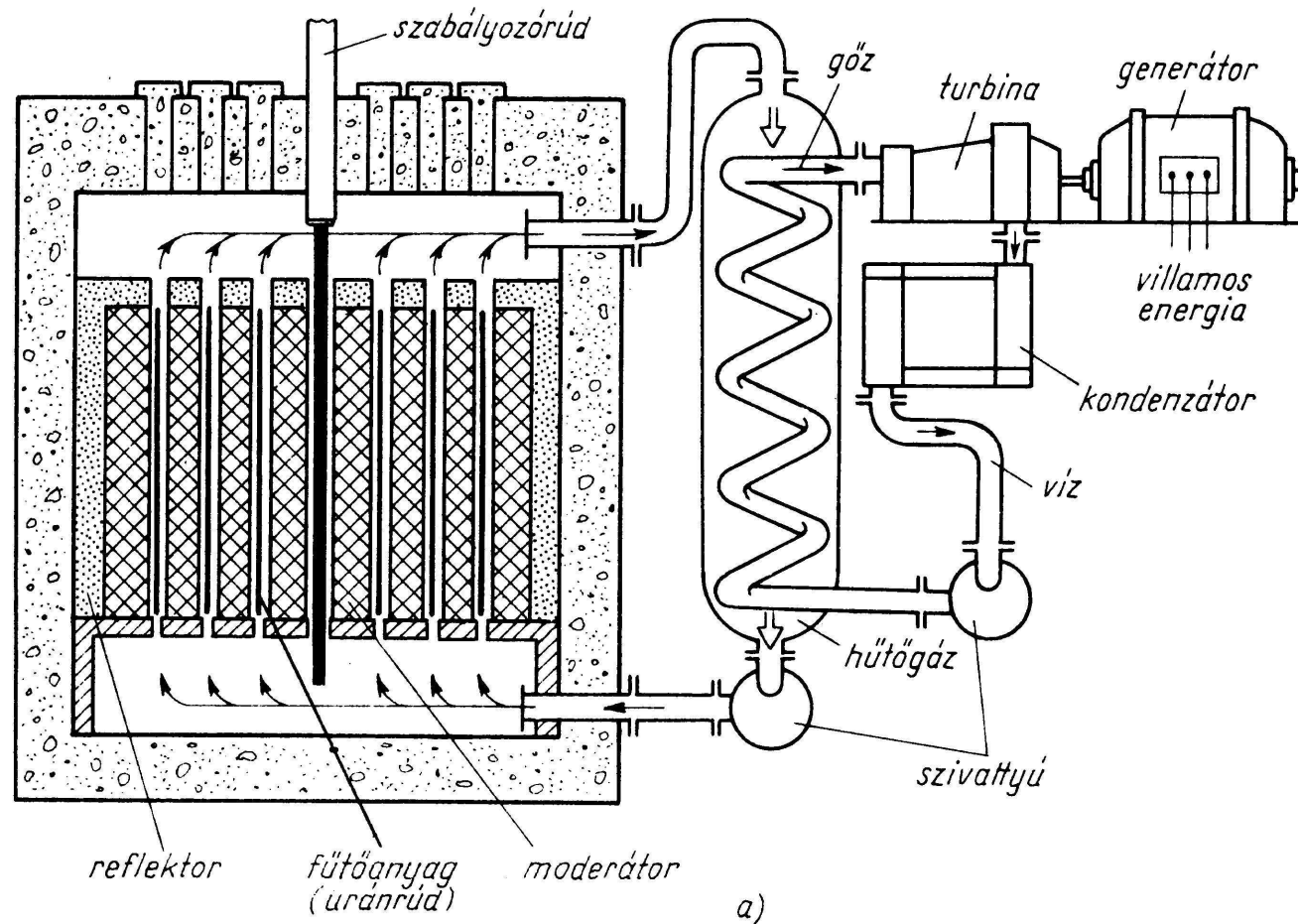


4. ábra. A nyomottvízes reaktor üzemanyagkötege.





# Az energia termelés blokk diagrammja nyomottvizes reaktorban



# Különbségek a nukleáris és a hagyományos erőművek közt

- A nukleáris erőműben radioaktív sugárveszély áll fenn, főleg neutron és  $\gamma$  sugárzás formájában. A sugárvédelmet biztosítani kell.
- Üzemzavar esetén radioaktív anyag kerülhet a levegőbe és a vízbe, ezért az erőmű környezetében élőket is védeni kell.
- A nukleáris erőmű különböző munkahelyein dozimetriai szolgálatot kell szervezni.

# Szabályozó anyagok, moderátorok, hűtőközegek

- Szabályozó anyagok: a  $k_{\text{eff}}=1$  értéket biztosítják. Leggyakrabban kadmium, de lehet bór, indium vagy hafnium
- Moderátorok: A hasadáskor keletkező gyors neutronokat (0,8 – 2 MeV) lassítják 0,025 eV energiára. Leggyakrabban víz (egyúttal hűtőközeg is), nehézvíz ( $\text{D}_2\text{O}$ ), grafit, berrilium
- Hűtőközeg: jó hővezető, vegyileg stabil, ne aktiválódjon fel. Lehet víz vagy gáz, pl.  $\text{CO}_2$ , vagy He

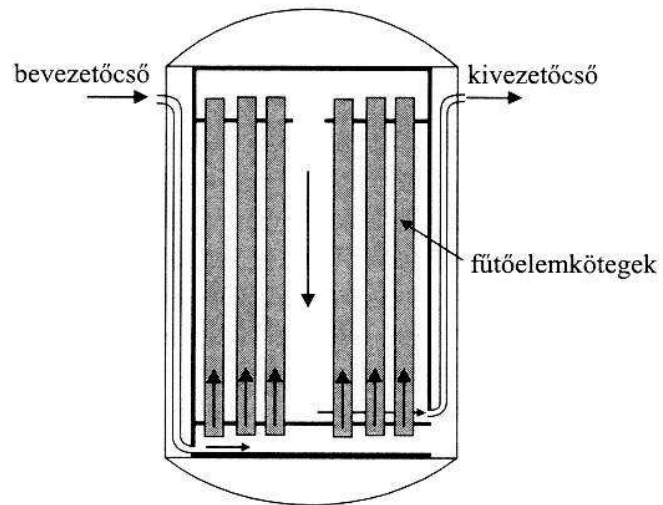
# Neutron sokszorozási tényező

- A hasadás során keletkező neutronok egy része abszorpció révén elvész (nem okoz hasadást).  $^{235}\text{U}$ -ra az ún. termikus neutronhozam  $\eta=2,07$
- Gyors neutronok is hozzájárulhatnak a hasadáshoz. A gyorsasítási tényező  $\varepsilon=1,02$
- A lassítás (moderálás) közbeni neutron veszteség  $p=0,6-0,9$
- Termikus hasznosítási érték;  $f$ . Az  $^{235}\text{U}$  által befogott termikus neutronhányad.
- Elméleti (végtelen méretű) reaktorra:  $K_{\text{végtelen}}=\eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f$
- Az aktív zónából kiszökő neutronok okozta hatásfok csökkenés;  $P$ .
- Az effektív neutron sokszorozási tényező
  - $k_{\text{eff}}=\eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f \cdot P$
- $k_{\text{eff}}<1$  szubkritikus;  $k_{\text{eff}}>1$  superkritikus;  $k_{\text{eff}}=1$  kritikus
- Reaktivitás: a  $k_{\text{eff}}$  1-től való eltérése

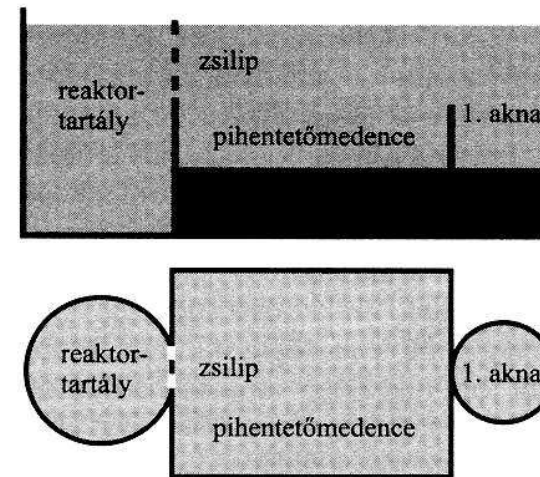
$$\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}$$

# Kiégett fűtőelemek tárolása

2. ábra. A tisztítótartály vázlatos rajza.



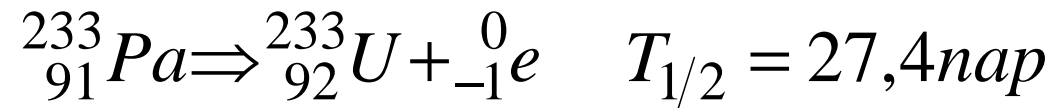
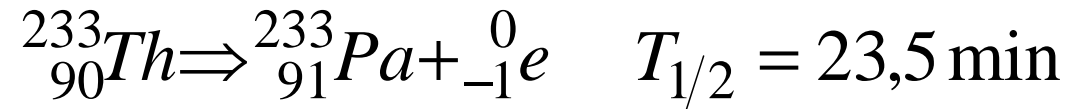
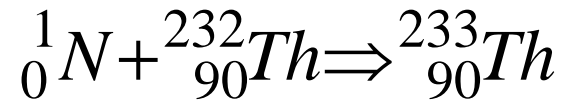
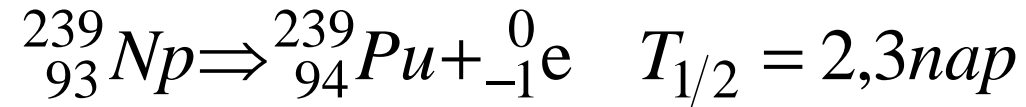
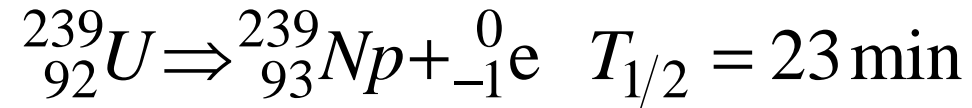
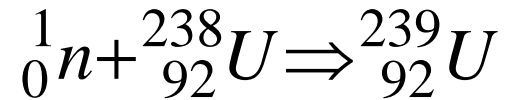
3. ábra. Átrakáskor a kirakott fűtőelemkötegeket a reaktortartályból a pihentető medencébe viszik.



# Az energiatermelésre használt nukleáris reaktorok főbb típusai

- Könnyűvízes reaktorok: mind a moderátor, mind a hűtőközeg közönséges víz
  - Nyomottvízes (PWR: **P**ressurized **W**ater **R**eactor): a primer körű víz nyomása 130-150 bar emiatt még 300-330 °C-on sem forr.
  - Forralóvízes (**B**oiling **W**ater **R**eactor): a reaktor tartályban a víz egy része elforr, ezt vezetik közvetlenül a turbinára.
- Nehézvízes reaktorok: (HWR: **H**eavy **W**ater **R**eactor) a moderátor és a hűtőközeg is nehézvíz (D<sub>2</sub>O). A nehézvíz ugyan drága, de a legjobb moderátor anyag. Így az uránt elég csak 1-2 %-ra dúsítani, vagy akár természetes uránt is lehet használni.
- Grafitmoderátoros reaktorok
  - Gázhűtésű reaktorok (GCR: **G**as **C**ooled **R**eactor)
  - Könnyűvíz hűtésű reaktorok (RBMK)
- Tenyésztőreaktor:
  - $^{238}\text{U} \Rightarrow ^{239}\text{Pu}$  6,75 eV energiájú neutron befogásával. A  $^{239}\text{Pu}$  gyors neutronokkal hasítható
  - $^{232}\text{Th} \Rightarrow ^{233}\text{U}$  szintén gyors neutronokkal hasítható
  - A hűtőközeg nem lehet víz. Moderátor anyag folyékony Na

# Tenyészreaktorok



## A nukleáris eseményskála I.

Fokozat	Hatás a telephelyen kívül	Hatás a telephelyen	Többszintű védelem sérülése	Példa
0. Skála alatti esemény	Nincs biztonsági jelentősége			
1. Rendellenesség			Az engedélyezett üzemi korlátok meghaladása	
2. Üzemzavar		Jelentős szennyeződés, Egy dogozó többlet sugárterhelése	Üzemzavar a biztonsági intézkedések jelentős hibáival	
3. Súlyos üzemzavar	Igen kismértékű kibocsátás, a lakosság sugárterhelése a korlát alatt	Súlyos szennyeződés, akut eü. Hatás egy dolgozónál	Majdnem baleset, nem marad biztonsági szint	Paks 2003



## A nukleáris eseményskála II.

Fokozat	Hatás a telephelyen kívül	Hatás a telephelyen	Többszintű védelem sérülése	Példa
4. Telephelyen kívül jelenetős hatással nem járó baleset	Kismértékű kibocsátás, a lakosság sugárterhelése a korlát közelében	A sugárzási gátak jelentős sérülése		Windscale reprocesszáló üzem, 1973
5. Baleset telephelyen kívüli kockázattal	Korlátozott kibocsátás, szükség lehet ellenintézkedésre	A sugárzási gátak súlyos sérülése		Windscale reaktor 1957
6. Súlyos baleset	Jelentős kibocsátás, szükség lehet minden ellenintézkedésre			Reprocesszáló üzem Oroszország 1957
7. Nagyon súlyos baleset	Nagymértékű kibocsátás, súlyos eü. és körny. hatások			Csernobil Ukrajna 1986