

Sugárvédelem és jogi szabályozása

Fejezetek:

1. Mag- és sugárfizikai alapok
2. Dózismennyiségek
3. Az ionizáló sugárzás egészségkárosító hatásai, sugárvédelmi szabályzás
4. Sugárzásmérés alapjai
5. Természetes és mesterséges radioaktivitás, radioaktív hulladékok
6. Sugárvédelmi eljárások és műveletek

Félévközi dolgozatok

- 2020. október 19.
- 2020. december 7.

A helyet és a módot („zárthelyi” dolgozat vagy online forma) később határozzuk meg.

Felhasználható szakirodalom

Fehér I., Deme S. (szerk.): Sugárvédelem (ELTE Eötvös Kiadó, Bp., 2010.)

Kiss D., Horváth Á., Kiss Á.: Kísérleti atomfizika (ELTE Eötvös Kiadó, Bp., 1998)

Környezetmérnöki Tudástár sorozat 14. kötet: Somlai János:
Sugárvédelem

<http://mkweb.uni-pannon.hu/tudastar/anyagok/14-sugvedelem.pdf>

Zagyvai Péter és mások: A nukleáris üzemanyagciklus radioaktív hulladékai (PSI-EK 2013.)

Előadások anyaga:

http://www.reak.bme.hu/munkatarsak/dr_zagyvai_peter/letoeltes.html

Radioaktivitás

*A radioaktív bomlás során a **gerjesztett atommag** szerkezete megváltozik.*

BOMLÁS = új belső szerkezet jön létre, és az új mag részecskesugárzás(ok) kibocsátása révén stabilizálódik – lehet, hogy továbbra is gerjesztett marad, és bomlik.

Az ionizáló sugárzások és a radioaktivitás felfedezésének első lépései:

- **Röntgen** (1895-96): a katódsugárcső falán, gyorsított elektronok beérkezését követően, nagyenergiájú foton-sugárzást figyelt meg.
- **Becquerel** (1896): az uránt vizsgálva tapasztalta, hogy annak közelében a fotópapír akkor is megfeketedik, ha nem világítják meg, tehát nem az akkor már ismert foszforeszcenciáról volt szó, az energia kizárólag „belülről” származott.
- **Curie** házaspár (1898): kémiai elválasztottak néhány elemet az urán bomlási sorából és megállapították, hogy a radioaktív sugárzás kibocsátása az adott kémiai elem olyan tulajdonsága, amely nem függ annak fizikai és kémiai állapotától.
- **Rutherford** (1911): a bomlás révén keletkezett sugárzások ionizációs tulajdonságainak vizsgálatából megállapította, hogy annak (legalább) két fajtája van:
pozitív töltésű részecskékből álló α és negatív részecskékből álló β sugárzás; az α sugárzás szóródásának vizsgálata pedig azt bizonyította, hogy az atomok nem töltik ki a teljes teret, hanem fő tömegük egy nagyon kis térfogatban, az atommagban összpontosul.

Az atommag felépítése:

az atommagok nukleonokból (protonokból és neutronokból) állnak = 10^{-15} m (fm)

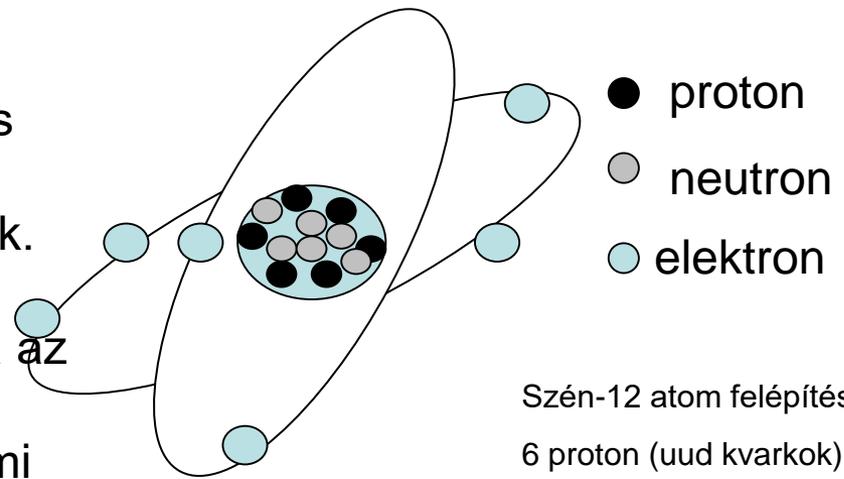
nagyságrendű átmérőjű összetett részecskék.

Protonok száma (Z):

- az elem rendszámát jelenti, meghatározza az adott elem felépítését, kémiai viselkedését

- a proton pozitív töltésű részecske, nyugalmi tömegének (m_0) **938,3 MeV** energia felel meg ($E=m_0 \cdot c^2$ – Einstein ekvivalencia-elve).

Neutronok száma (N): a neutronnak nincs töltése, $m_0 = 939,6 \text{ MeV}/c^2$. Szabad állapotban nem stabil, 10,4 perc felezési idővel bomlik.



Szén-12 atom felépítése

6 proton (uud kvarkok)

6 neutron (udd kvarkok)

6 elektron (lepton)

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



$$E_{\text{kin}} = 0,8 \text{ MeV}$$

Bomlástermékek: proton, elektron, antineutrínó

Tömegszám: $A = Z + N$

Kötési energia = „tömeghiány” = az atom „virtuális” tömege kisebb, mint az őt alkotó nukleonok nyugalmi tömegének összege

Protonok száma (**Z**): - elem rendszáma - meghatározza az adott elem felépítését

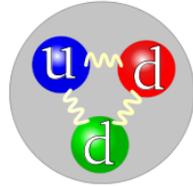
Neutronok száma (**N**):

Tömegszám: **A = Z + N**

Atomsúly \neq A \Rightarrow kötési energia

Proton = 3 (u+u+d) kvark + gluon

Neutron = 3 (u+d+d) kvark + gluon

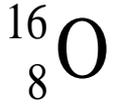


Nuklidok = atommagok: meghatározott proton és neutron számmal rendelkező összetett részecskék.

Egy nuklid lehet **stabil** v. **instabil** azaz **radioaktív**.

Egy nuklid lehet különböző energiaállapotokban (gerjesztett állapot).

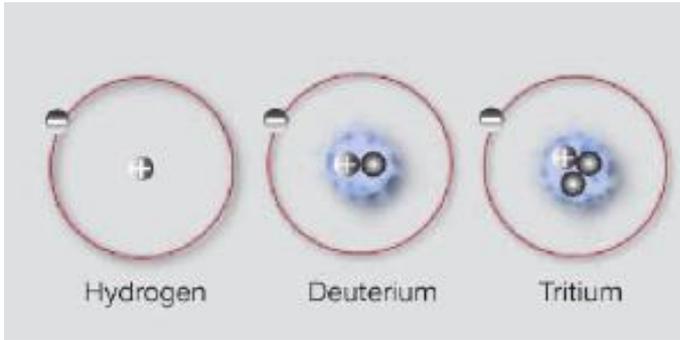
Jelölés: rendszámmal és tömegszámmal: ^{16}O (O = 8 proton)



Az atommagokban a protonok és neutronok száma lehet páros (ps) ill. páratlan (pn) - ez döntő jelentőségű a nuklid stabilitása szempontjából.

- 162 ps, ps
- 59 ps, pn
- 49 pn, ps stabil nuklidot ismerünk
- 5 pn, pn

EGY ELEMNEK TÖBBFÉLE **IZOTÓPJA** LÉTEZIK:



Hidrogén izotópjai: hidrogén, deutérium, trícium

Vas: 26 protont tartalmaz, a neutronok száma 26-tól 35-ig változhat

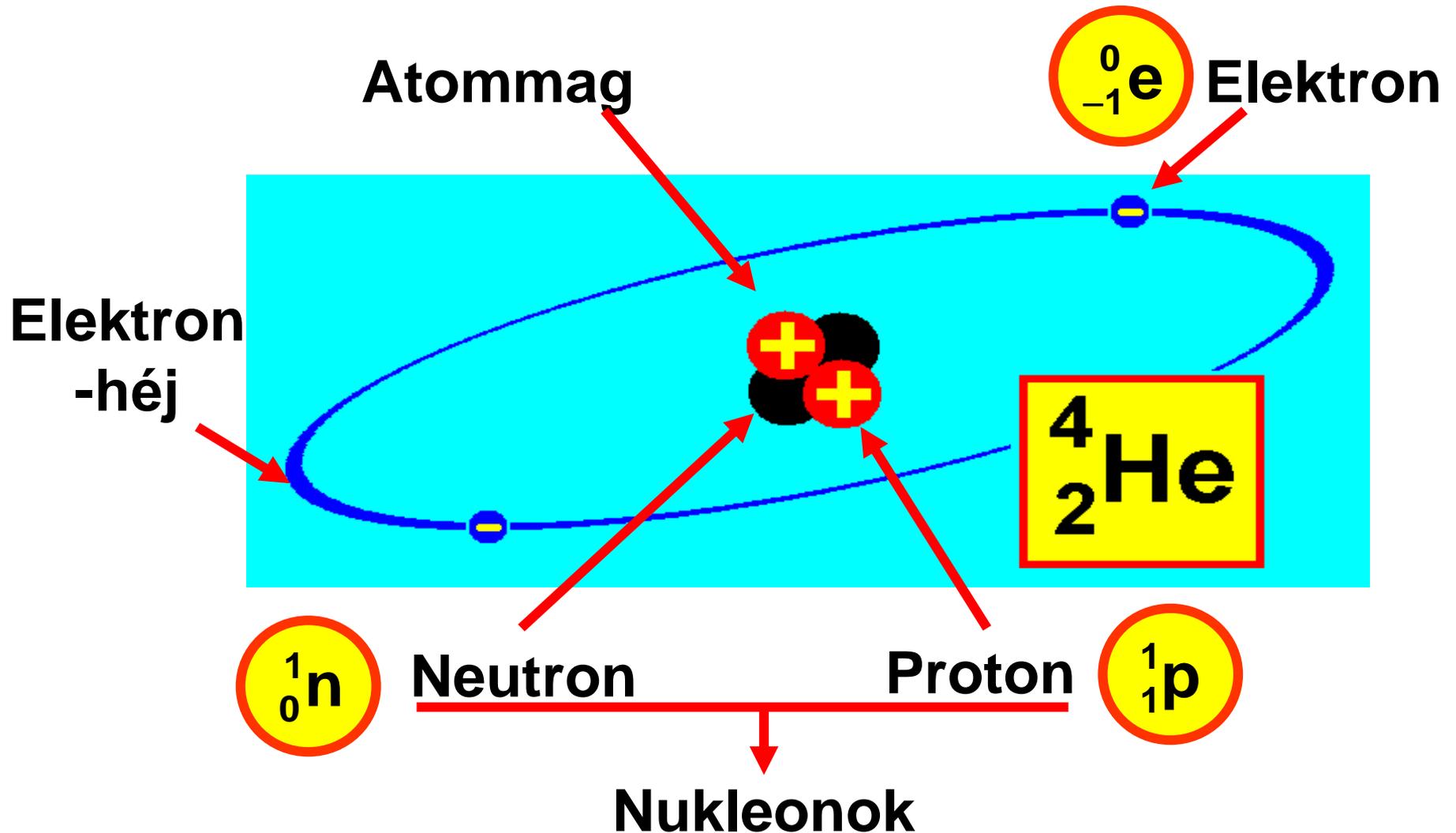
Izotópok:

stabil (H, D): az **izotópgyakoriság** jellemzi

radioaktív: a bomlás módja és a bomlás valószínűsége (felezési idő) jellemzi

^3H : β^- - bomló, $T_{1/2}$:12,3 év

A ${}^4\text{He}$ atomszerkezete



Az atommagokat összetartó erők

Magerők (erős és gyenge kölcsönhatás) sajátosságai:

- a) *vonzók*, intenzitásuk az elektromos erőkénél nagyságrendekkel nagyobb,
- b) *töltéstől függetlenek*,
- c) *rövid hatótávolságúak*, elenyésznek kb. 1,4 fm távolságon túl,
- d) *telíthetők* = egy részecske csak korlátozott számú további részecskére hat

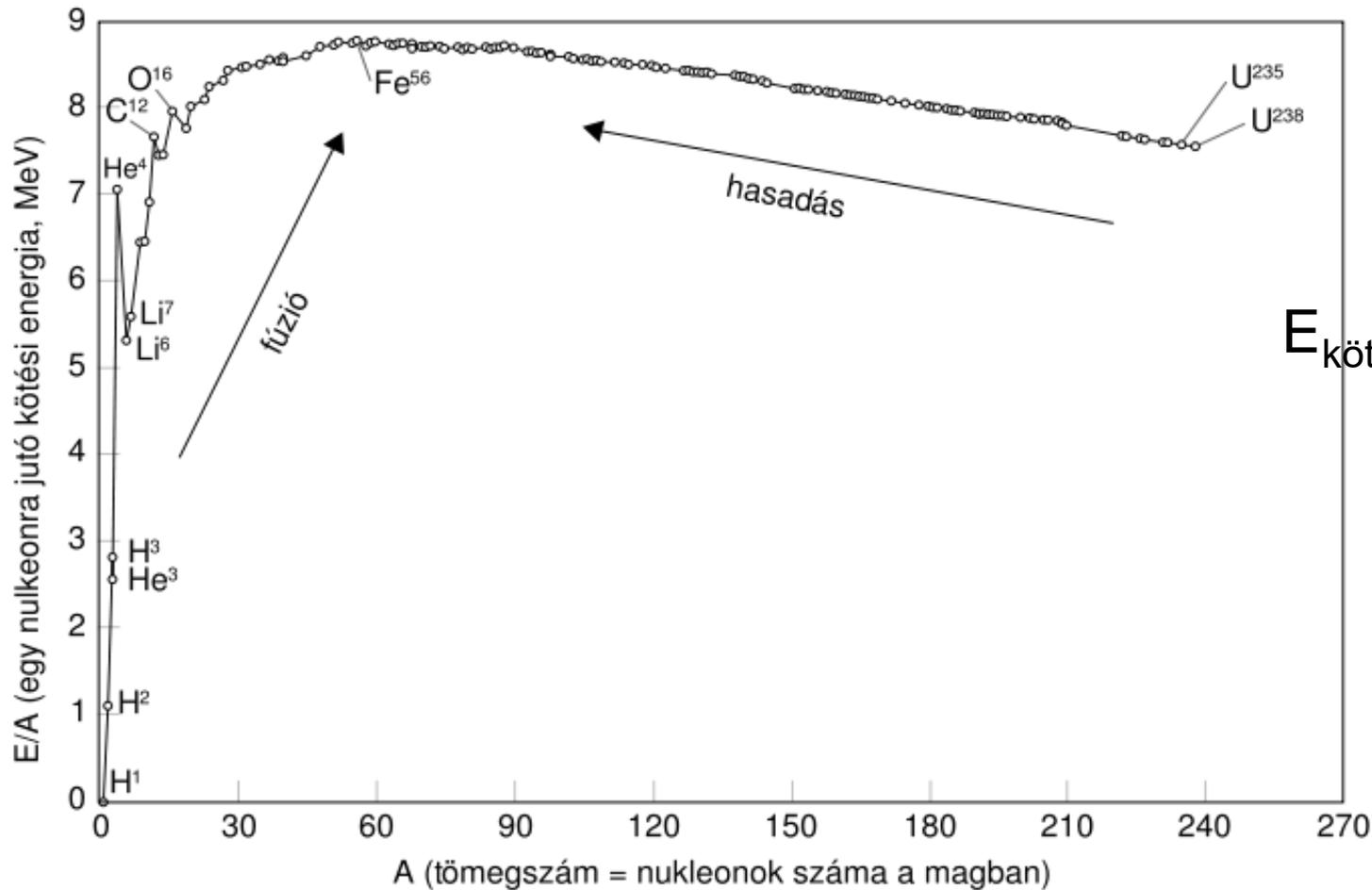
MAGMODELLEK: cseppmodell, héjmodell, fűrtmodell - kollektív modell

Az atommagot alkotó részecskék között a magerők mellett a „klasszikus” erők (tömegvonzás, elektromos és mágneses vonzás és taszítás) is hatnak.

A radioaktivitásban fontos szerepet játszó elemi részecskék

- Spin szerint: fermionok (feles spin: proton, neutron, elektron) vagy bozonok (egész spin: foton)
- Kölcsönhatás szerint: erős k.h.-t is mutató részecskék (hadronok: kvarkokból épülnek fel [barion, mezon]) és csak gyenge k.h.-ra képes részecskék (leptonok: elektron, müon, neutrínó – nem tartalmaznak kvarkokat)
- ❑ Fermionok: Pauli-elv: egy atomnak nem lehet 2 azonos állapotú fermionja
- ❑ Bozonok: „mező”-komponensek, a kölcsönhatások közvetítői (gluon)

„Stabilitás-görbe” – egy nukleonra jutó kötési energia



$$E_{\text{köt}} = (\Delta m) \cdot c^2$$

A radioaktív bomlás alapegyenletei

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$$

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$$

N: bomlásra képes, azonos
fajtájú atommagok száma
[darab]

λ : bomlási állandó = időegység
alatti bomlás valószínűsége [1/s]

t: idő

A: aktivitás [1/s ; Becquerel; Bq]

$T_{1/2}$: felezési idő [s]

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

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

Összetett bomlás: anya- és leányelemek bomlási sorozata

$$\frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 \cdot N_2 + \lambda_1 \cdot N_1$$

$$\left(\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 \cdot N_2 \right) \cdot e^{\lambda_2 t} = \lambda_1 \cdot N_{1,0} \cdot e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{\lambda_2 t}$$

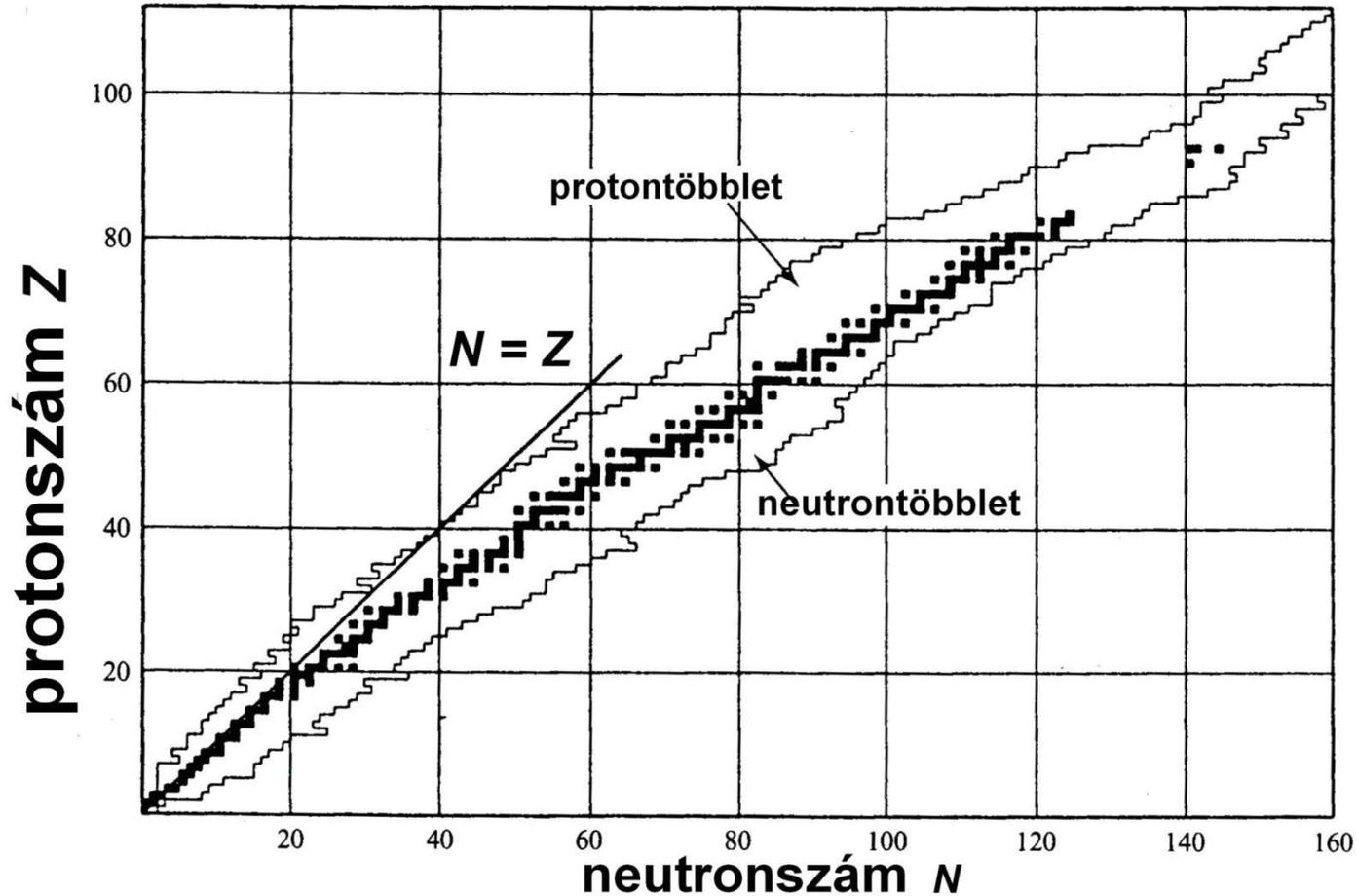
$(u \cdot v)' = u' \cdot v + u \cdot v'$

$$\left(N_2 \cdot e^{\lambda_2 t} \right)' = \lambda_1 \cdot N_1 \cdot e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}$$

$$A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot A_{1,0} \cdot \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right)$$

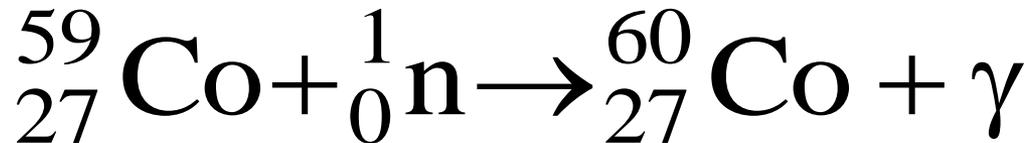
„Szekuláris” egyensúly: ha az anyaelem felezési ideje lényegesen hosszabb = bomlási sebessége sokkal kisebb, mint a leányelemé ($\lambda_2 \gg \lambda_1$) – akkor a leányelem aktivitása hamar „utoléri” az anyaelemét.

Stabil és radioaktív izotópok



Az atommagon belüli pozitív töltések taszító hatásának „kompenzálására” egyre több neutronra van szükség.

Radionuklidok keletkezése



Magreakciókkal:

- Neutronaktiváció = (n,γ) reakciók termikus neutronokkal való besugárzás, átmeneti mag kialakulásán keresztül (prompt γ-sugárzás: a reakció kísérője; ha a reakció terméke radioaktív, akkor általában β⁻ és γ-sugárzó lesz)
- Reakciók gyors neutronokkal: spalláció (n,n'; n,2n; n,α stb.) során
- Reakciók más elemi részecskékkel (p,n; α,n; γ,n reakciók: egy adott küszöbenergia meghaladása esetén jönnek csak létre)

Maghasadással: spontán vagy indukált maghasadás (ez is magreakció tkp.) révén

Radioaktív magok bomlásából, ha a termék nem stabilis

Bomlási módok

$$\Delta E = \sum_p (E_m + E_{kin}) + E_{bs}$$

p: a bomlásban kibocsátott részecskék

m: nyugalmi tömeg

E_{kin} : kinetikus (mozgási) energia

E_{bs} : a „maradék” mag visszalökési energiája

Bomlási módok: korábban létrejött gerjesztett magállapot megszűnése \neq magreakció !

α , β = „közvetlen” bomlási módok

γ = „kísérő” bomlási mód: a többi bomlási mód lezárása, „finomszerkezet”-változás nyugalmi tömeggel rendelkező részecske kibocsátása nélkül

f = fisszió = spontán maghasadás, neutronok kilépése

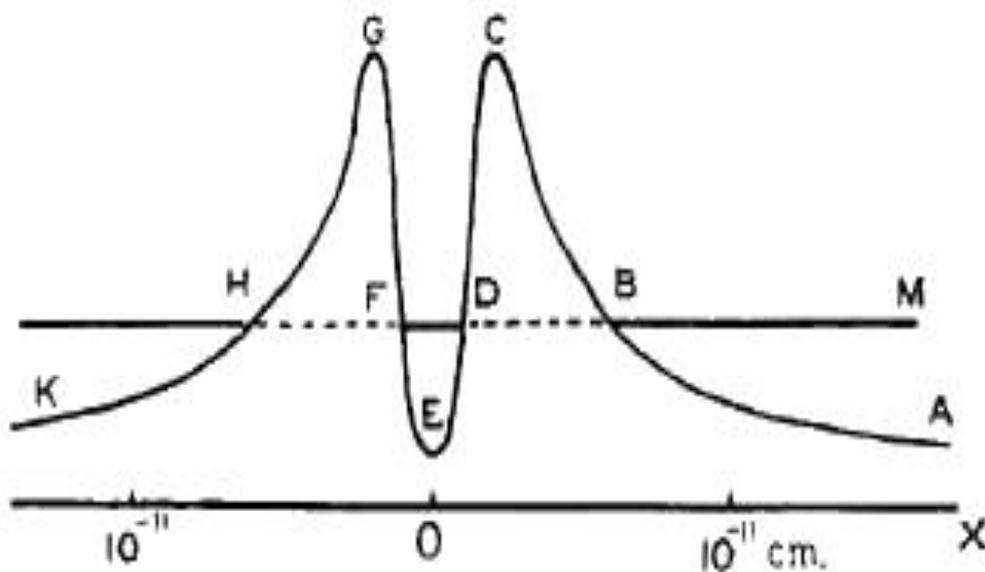
Bomlási módok – alfabomlás

Az **α -bomlás** során a kezdeti atommag egy He^{2+} részecskét, azaz He-atommagot bocsát ki 3 -10 MeV mozgási energiával. Az α -bomlás során az atommag tömegszáma 4-gyel, protonszáma 2-vel csökken. Hajtóereje az erős kölcsönhatás.

„**Diszkrét**” energiaváltozás: E_{kin} jellemző az adott radioizotópra, de megoszlik a részecske mozgási energiájára és a visszalökött mag energiájára.

Spektrum: Kibocsátott/mért részecskék száma a mérés alatt a kinetikus/leadott energia függvényében

Bomlási módok - alfabomlás

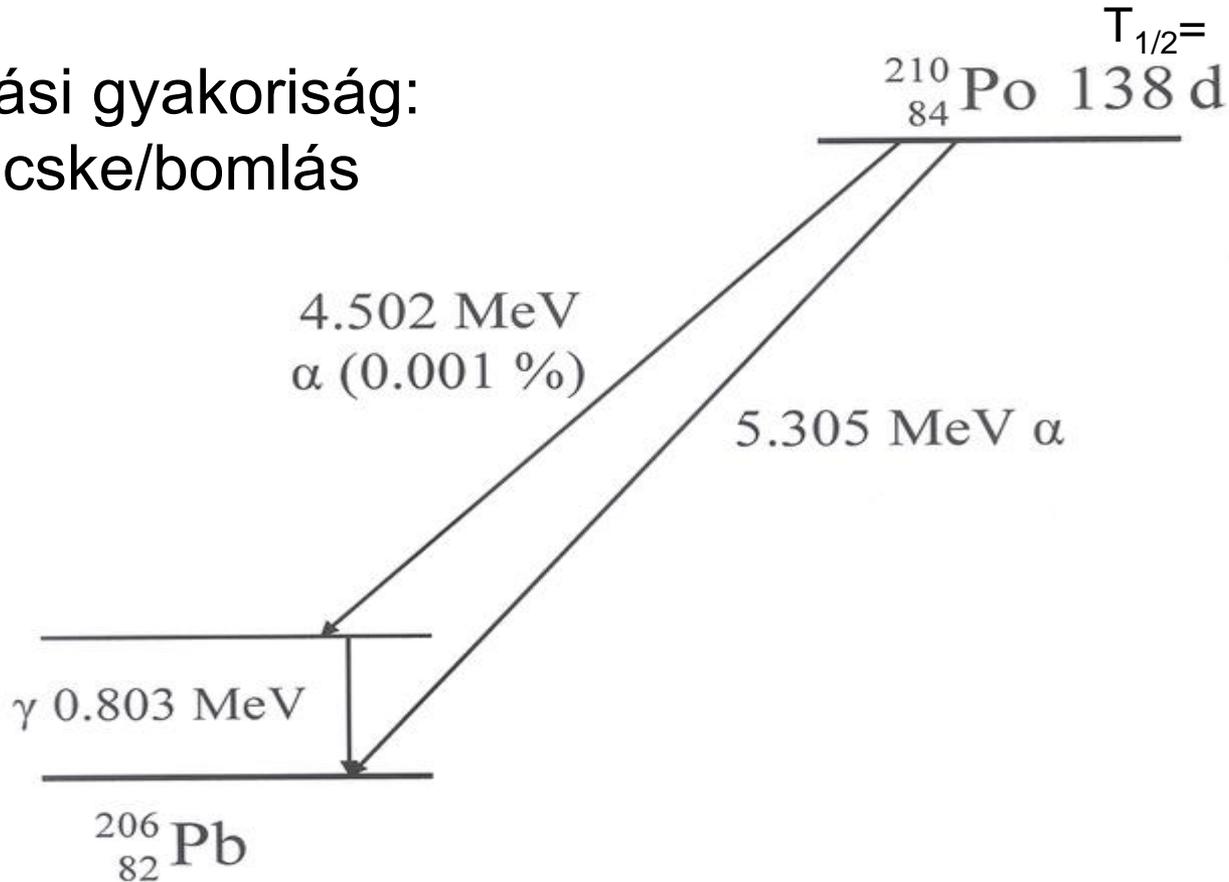


Az alfabomlás
bekövetkezése csak
az „alagút-effektus”
(Gamow, 1928.)
révén lehetséges, ami
„átvezet” a
potenciálgáton.

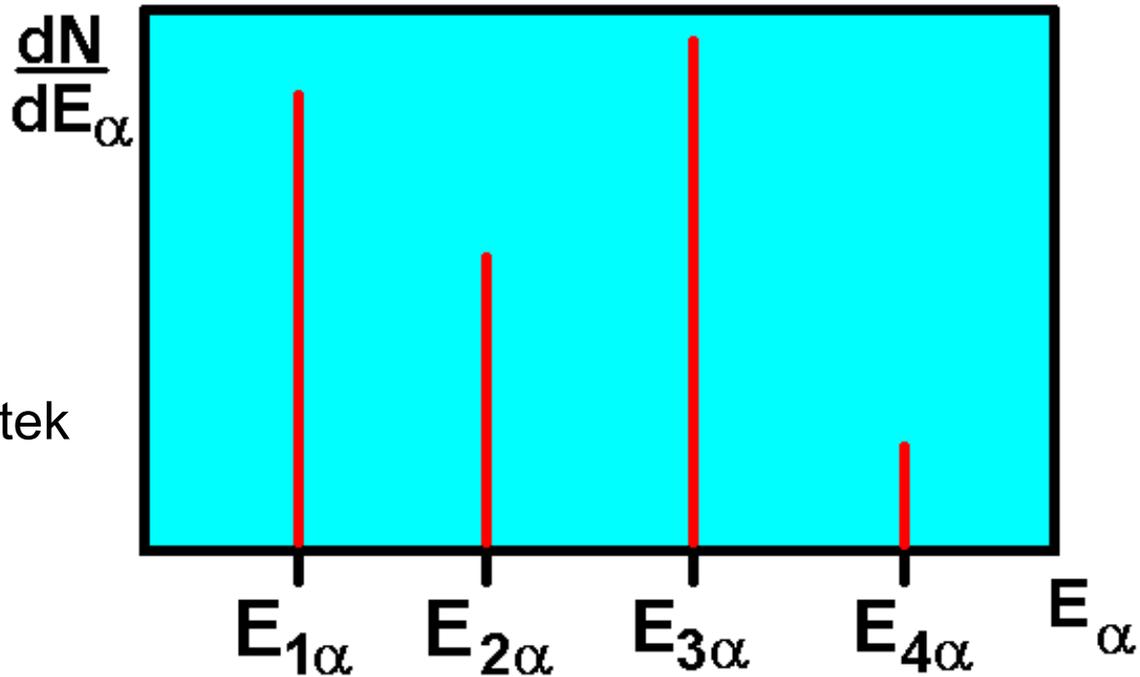
A rajz forrása: <http://www.nature.com/physics/looking-back/gurney/index.html#f1>

Az α -bomlás energiaszerkezetének vázlatja

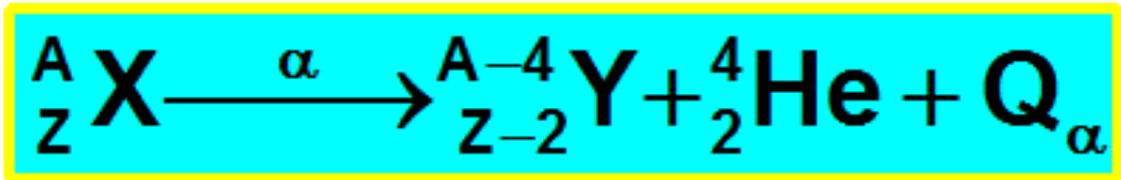
Bomlási gyakoriság:
részecske/bomlás



Alfasugárzás – diszkrét energiák



Ugyanez vonatkozik a gamma átmenetek energiáira is.



Bomlási módok – bétabomlás

A kinetikus energia véletlenszerű (átlagban kb. 1:2) arányban megoszlik az elektron/pozitron és az antineutrínó/neutrínó között. Ezért a részecskék kinetikus energiája nem diszkrét. A bomlás hajtóereje a gyenge kölcsönhatás.

1) β^- : elektron és antineutrínó kibocsátása

$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$: a rendszám eggyel nő

2a) β^+ : pozitron és neutrínó kibocsátása

$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$: a rendszám eggyel csökken

„antianyag” – annihiláció: megsemmisülés

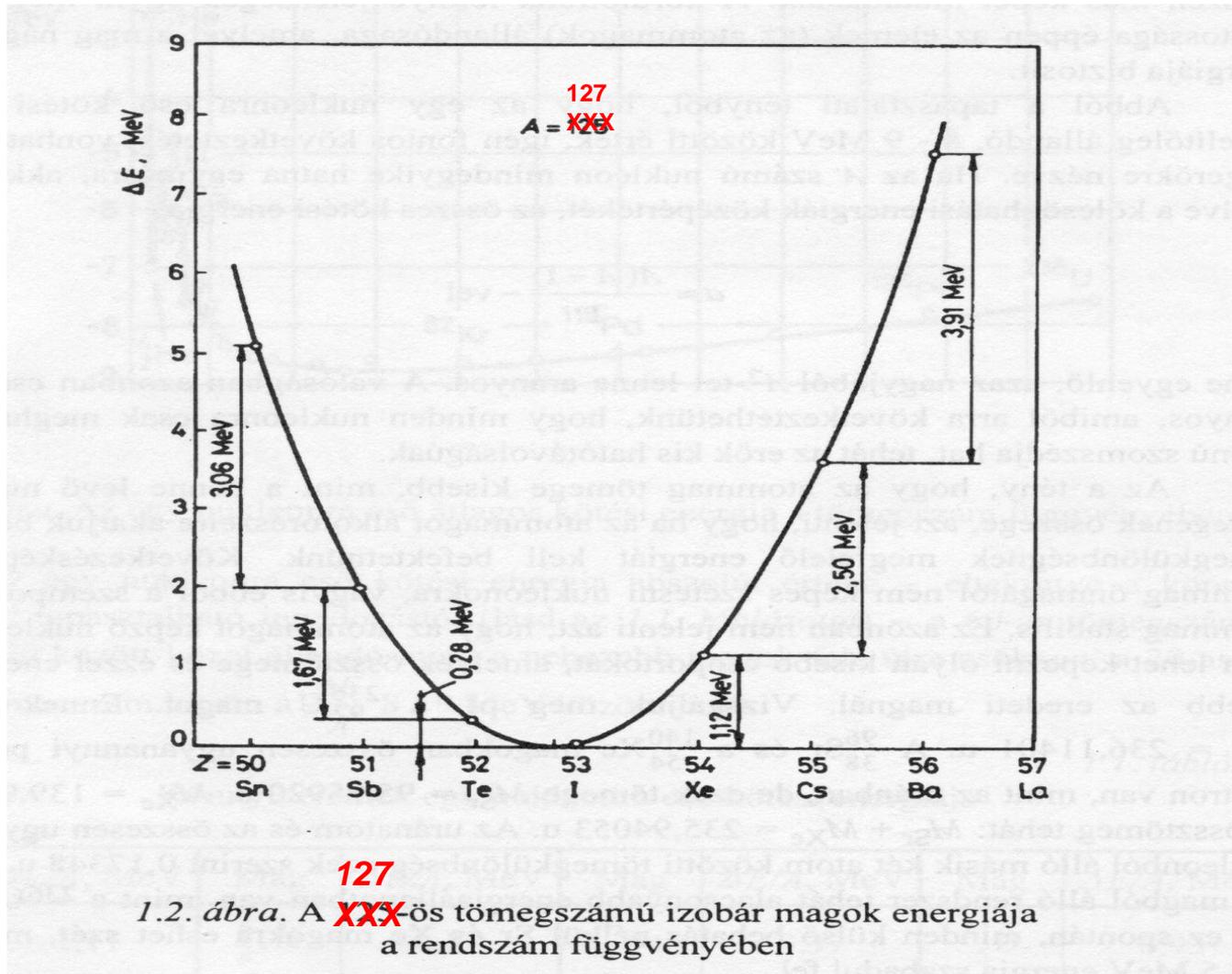
$$e^+ + e^- = 2\gamma$$

2b) elektronbefogás (EC – electron capture) neutrínó kibocsátása

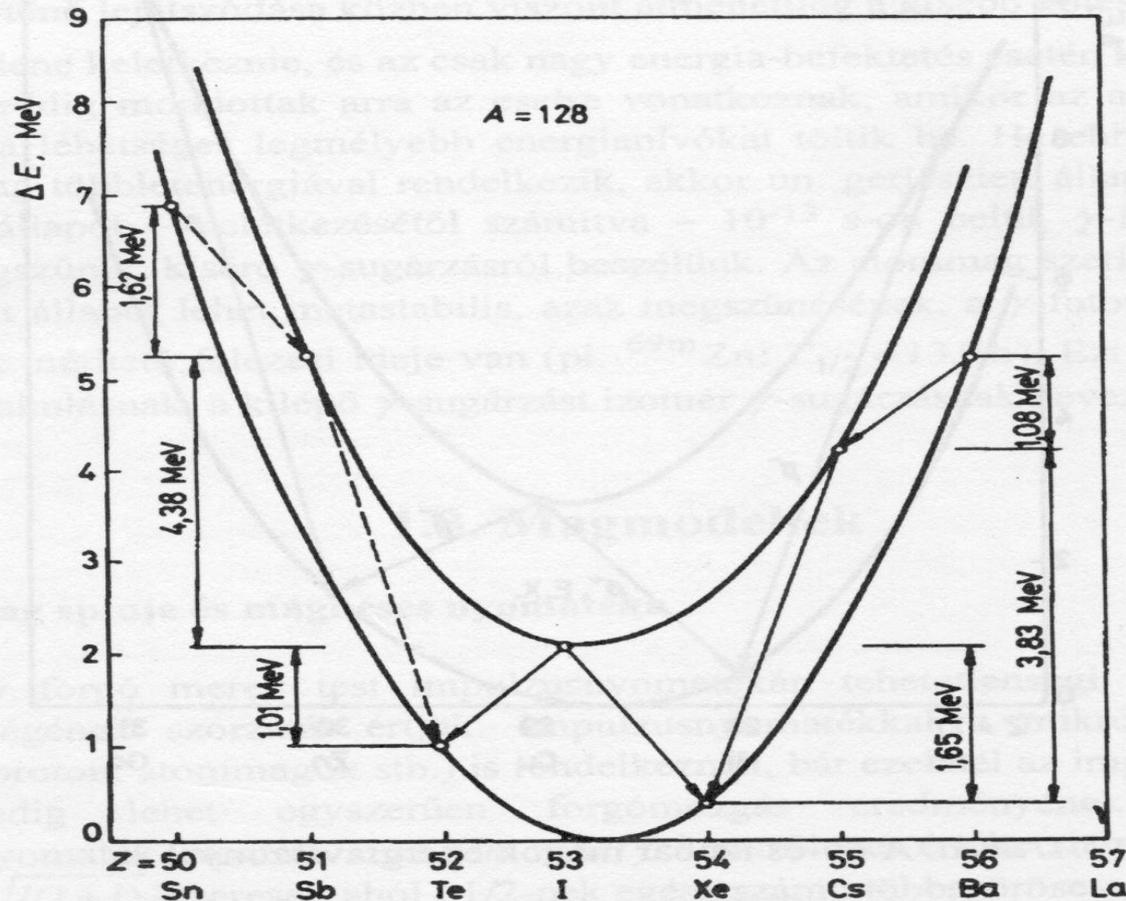
$p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$: a rendszám eggyel csökken

A „hiányzó” pályaelektron pótlódik egy külső pályáról – kísérő karakterisztikus röntgensugárzás-kaszád keletkezik

Izobár magcsoport bomlási rendje – páratlan tömegszám



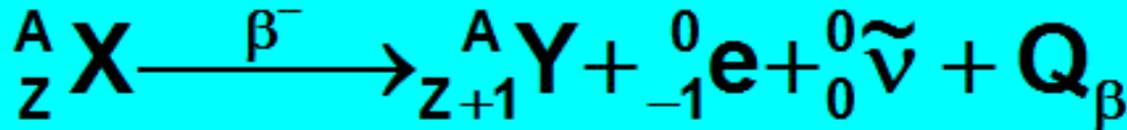
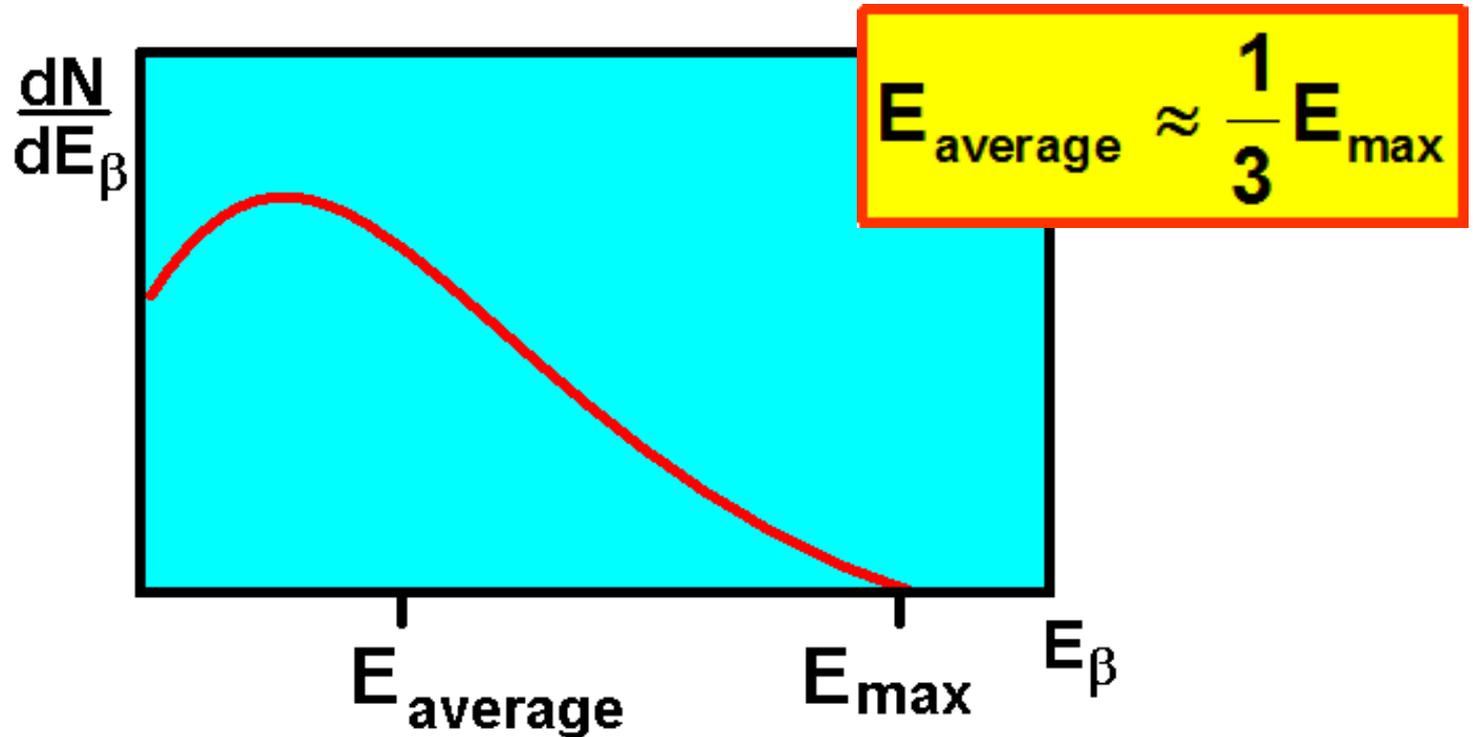
Izobár magcsoport bomlási rendje – páros tömegszám



A két „magcsoport”-
ábra forrása:
[Radiokémia és izotóptechnika](#)
([Nagy Lajos György, Nagyné László Krisztina](#))
[Műegyetemi kiadó, 1997](#)

1.3. ábra. A 128-as izobár magok energiaviszonyai

Bétasugárzás: folytonos energiaeioszlás



Bomlási módok – gamma átmenet

Gamma átmenet: a nukleonok energiaszintek szerinti átrendeződése nyugalmi tömeggel és töltéssel nem rendelkező foton kibocsátásával jár. A γ -bomlás „hajtóereje” nem határozható meg közvetlenül, mint az α - és β -bomlásé, mert ez a bomlási mód csak más magátalakulások „maradék” energiájának leadása során következik be.

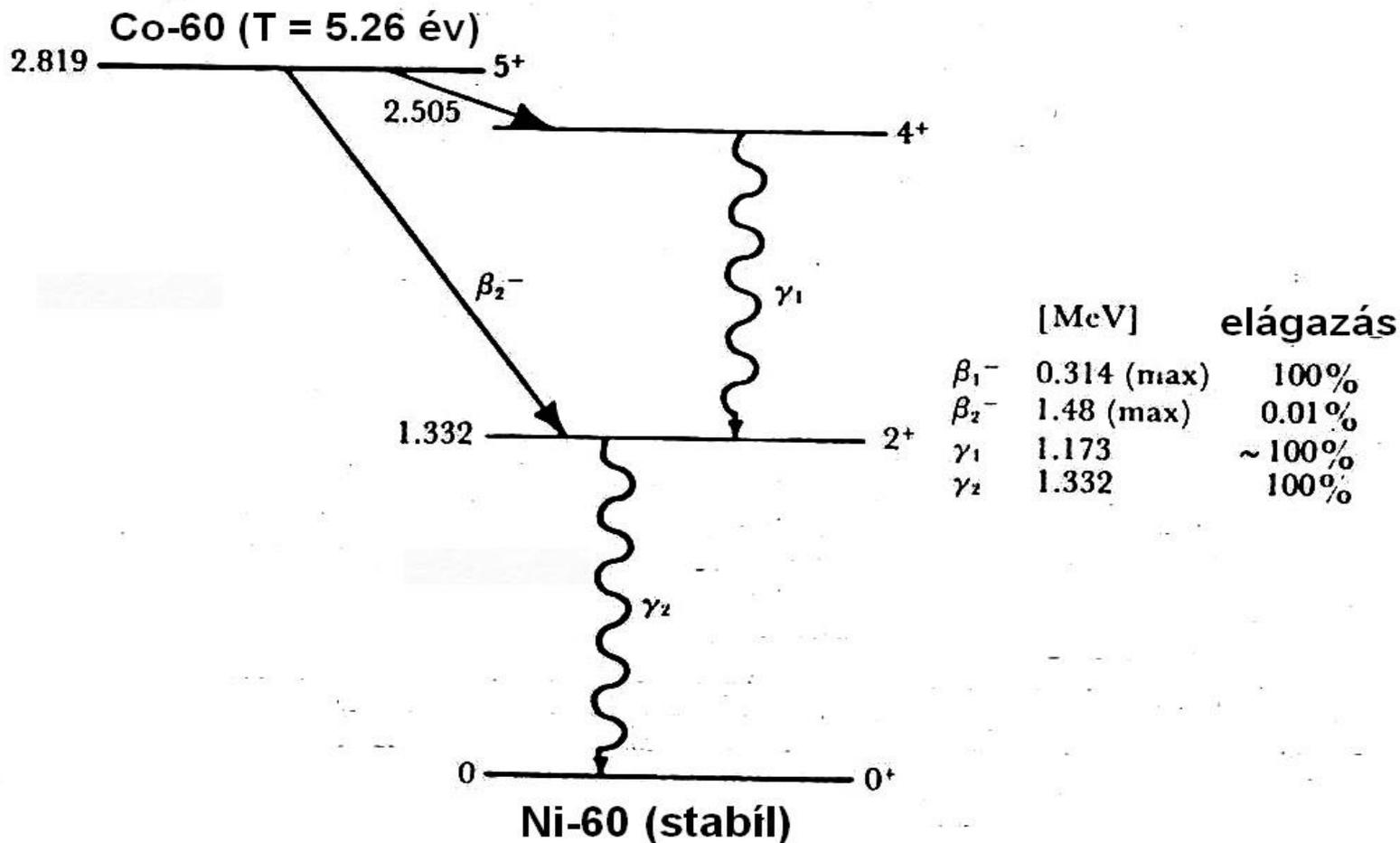
A foton energiája diszkrét, azonos a változáshoz tartozó belső szerkezeti energiaszintek különbségével, ezért jellemző az adott radioizotópra.

A mag belső struktúrájának változása egyes esetekben (főként nagyobb atommagoknál és kisebb energiaváltozásoknál, $E_\gamma < 2-300$ keV) nem foton kibocsátásával jár, hanem az energia egy, általában belső, szimmetrikus atompályán rezidens (azaz a magon „belül” is bizonyos tartózkodási valószínűséggel rendelkező) elektron mozgási energiájává alakul. Ez a *belső konverzió* (internal conversion, IC), amit az elektronbefogáshoz hasonlóan szintén egy karakterisztikus röntgenfoton kibocsátása kell, hogy kövessen.

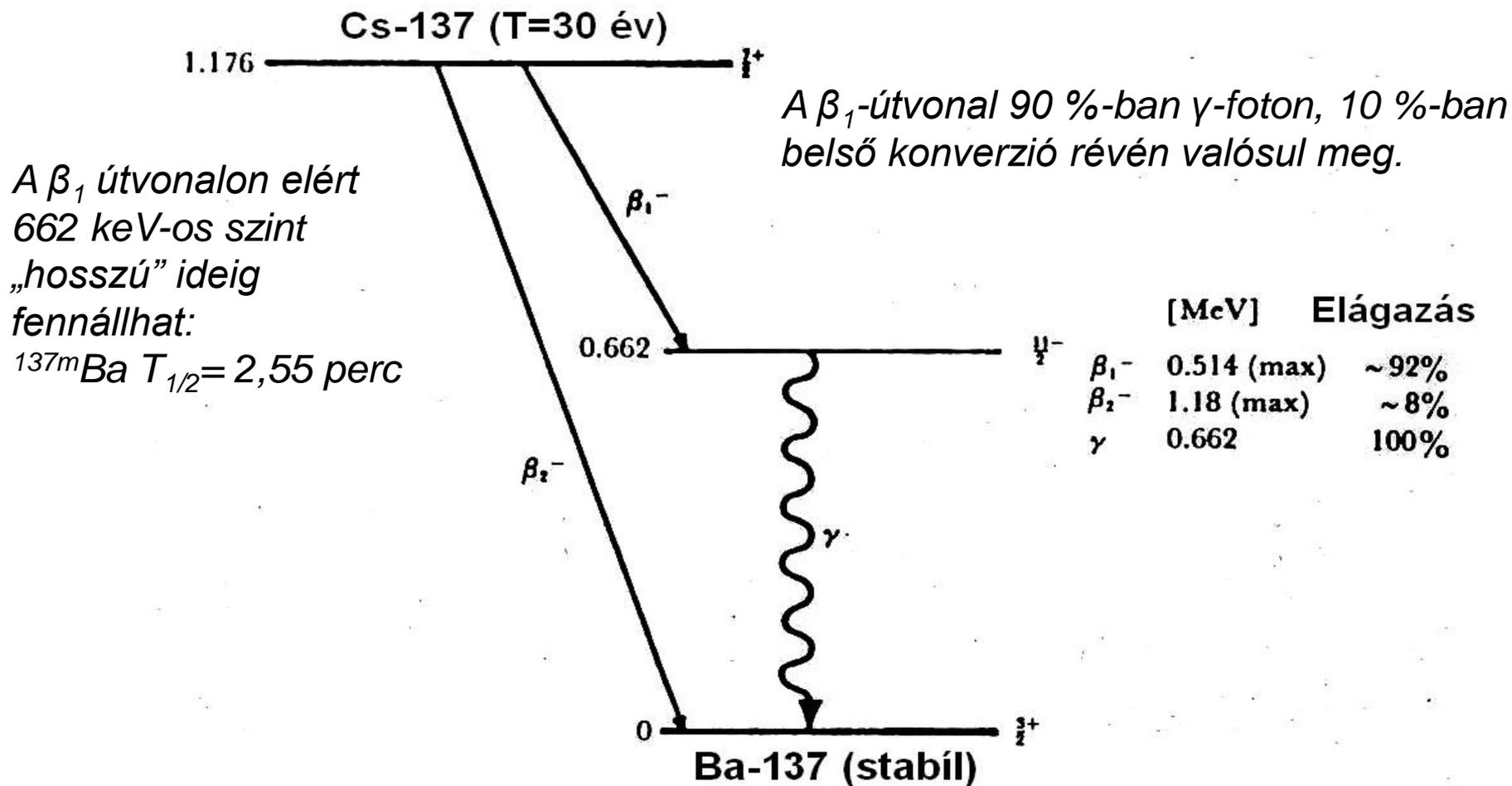
$$E_\gamma \Rightarrow E_{e^-, \text{kin}} + E_{e^-, \text{köt}}$$

A belső konverzióval kilépő elektron energiája diszkrét!

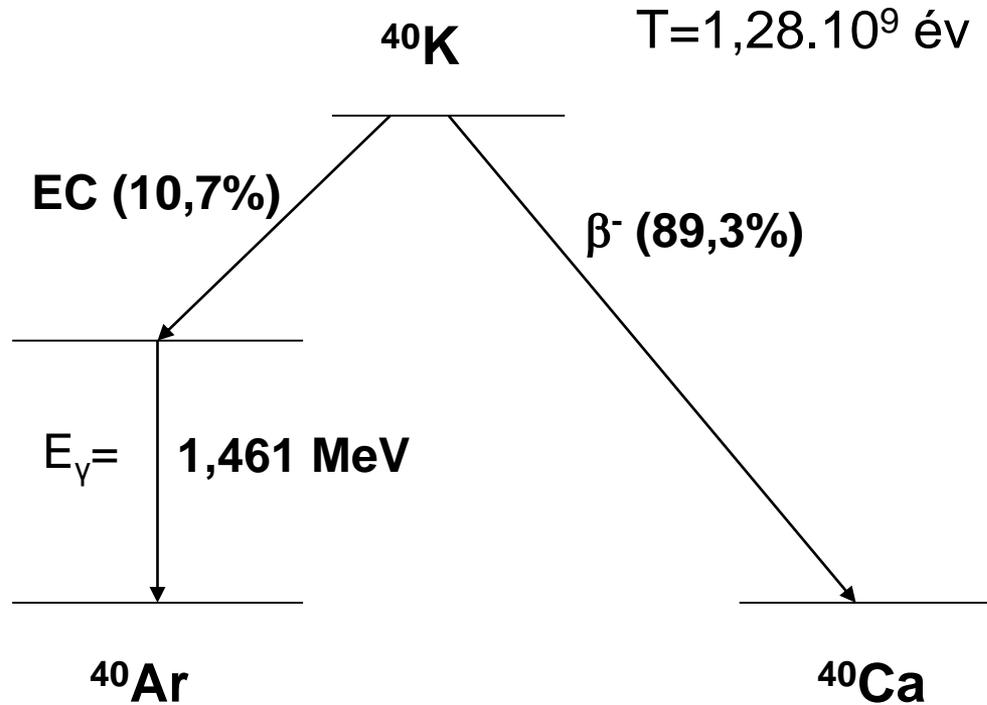
Béta-bomlás és gamma-átmenet energiaszintek és állapotok



Béta-bomlás és gamma-átmenet energiaszintek és állapotok



Béta-bomlásfajták és gamma-átmenet



Számítási példa: az emberi test ^{40}K -tartalmának radioaktivitása

^{40}K felezési ideje $1,28 \cdot 10^9$ év,
az átlagos ember testtömege
(m_e) 70 kg,

az átlagos K-tartalom (c_K):
férfiak 1,7 – 2,7 g/kg,
nők 1,3 – 2,3 g/kg
átlag: 0,2 %

izotóparány (Θ) a kálium 0,0118
%-a ^{40}K

$$A = N \cdot \lambda \quad [\text{Bq}]$$

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{1,28 \cdot 10^9 \cdot 365,25 \cdot 86400} \quad [\text{s}^{-1}]$$

$$N = \frac{m_{^{40}\text{K}}}{M} \cdot N_A$$

$$N = \frac{70 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,18 \cdot 10^{-4}}{40} \cdot 6 \cdot 10^{23}$$

Aktivitás (A):

kb. 4200 Bq

$f_\gamma = 0,107$

Fotonintenzitás:

455 foton/s

$$m_{^{40}\text{K}} = m_{ember} \cdot c_K \cdot \Theta \quad 29$$

A sugárzások és az anyagi közeg kölcsönhatásai

A közeg kölcsönhatásra képes alkotórészei: elektronok, az atomok elektromágneses erőtere, atommagok.

A közeg és a sugárzás közötti kölcsönhatás szerint:

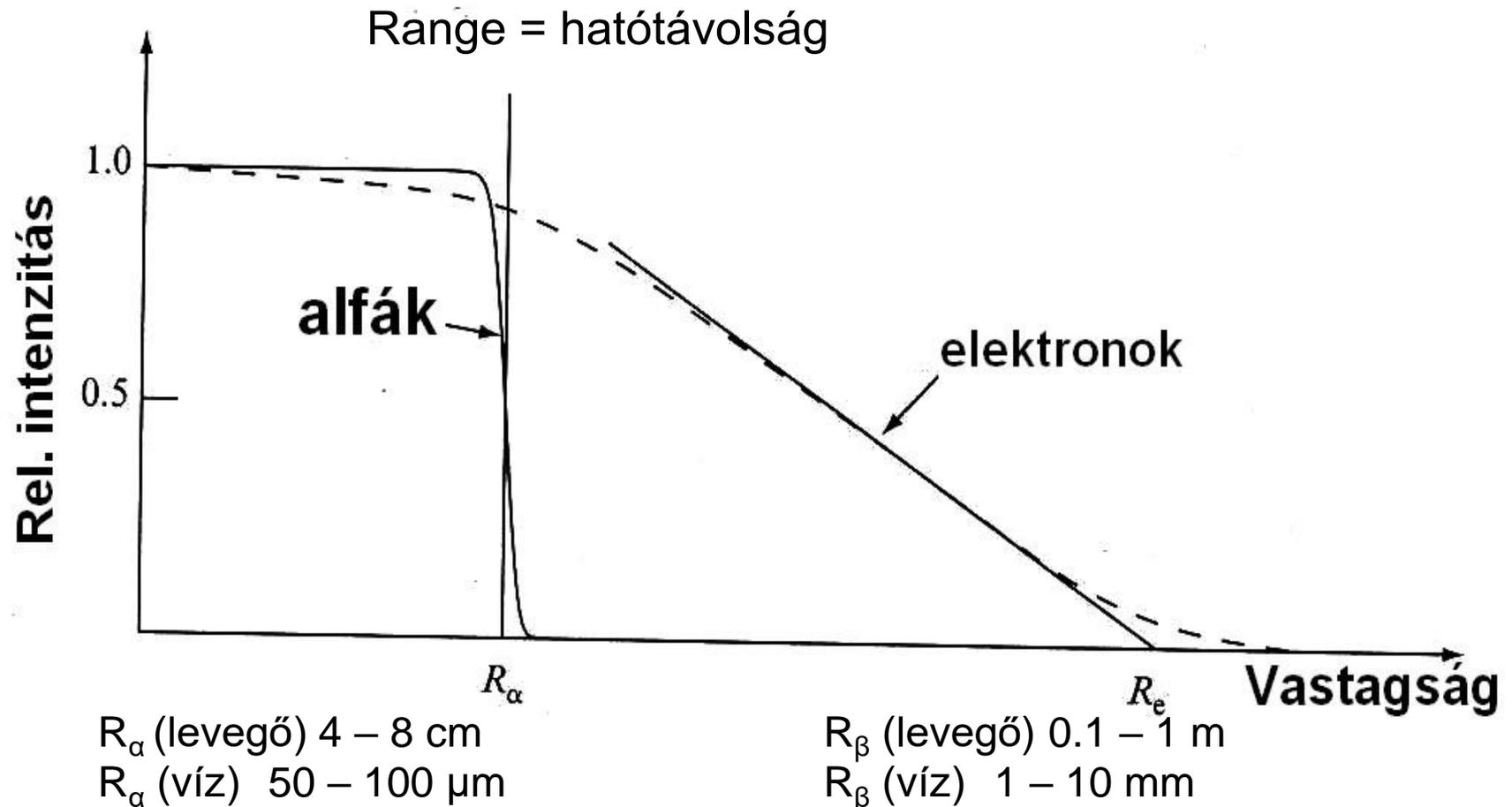
- Közvetlenül ionizáló sugárzások: α , β , γ , röntgen – az elektronoknak képesek azok ionizációjához elegendő energiát átadni. A fotonokkal való ütközés csak az energiaátadás első lépését jelenti, az átvitel további lépései már a meglökött „primer” elektronhoz köthetők. Az α - és β -részecske „végig” részt vesz az energiaátadásban.

- Közvetve ionizáló sugárzás: neutronok - elektronokkal nem képesek energiát cserélni, de az atommagokkal való kölcsönhatások során ionizációra képes részecskék jelennek meg.

Az elektronokkal való ütközés sem vezet minden esetben azok ionizációjára. A sugárzás által több lépésben átadott energia egy része (általában 60-70 %-a) nem ionizációt, csak gerjesztést eredményez, azaz összességében a közeg termikus energiáját növeli meg.

A gyorsan mozgó szabad töltéshordozók (α^{2+} , β -részecskék vagy ionizált szekunder elektronok) az atomok elektromágneses terében fékeződve járulékos ftonsugárzást = folytonos röntgensugárzást kelthetnek.

Alfa- és bétasugárzás elnyelése az anyagban



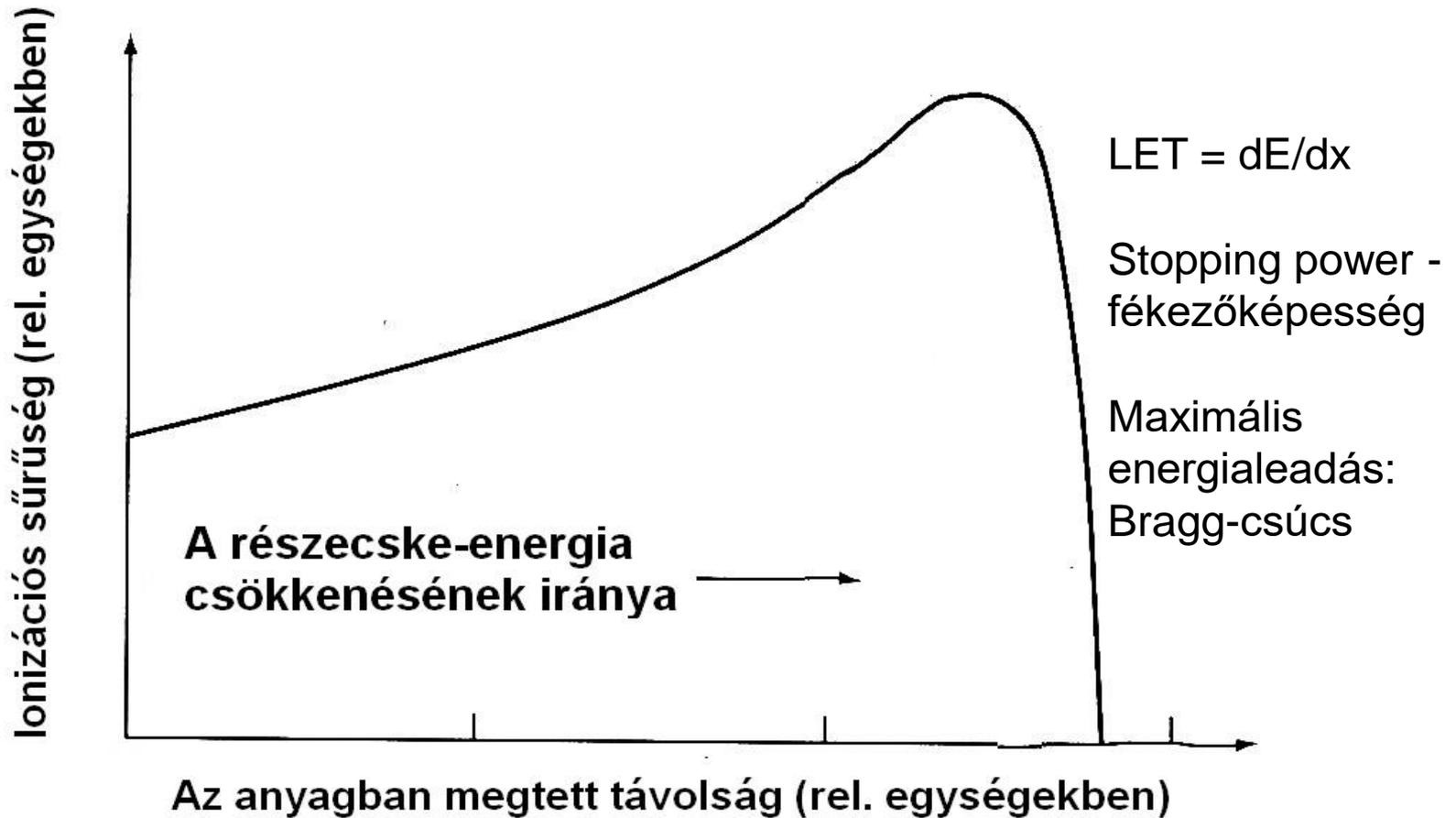
Linear Energy Transfer (LET)

Egységnyi úthosszon leadott energia:

- *LET = az ionizáló sugárzás részecskéinek a pálya mentén leadott energiája*
- *Egységnyi anyagvastagságra eső leadott energia: Stopping Power*

$$\left| \begin{array}{l} LET = \frac{\Delta E}{l} \left[\frac{keV}{\mu m} \right] \\ SP = \frac{\Delta E}{d} \left[\frac{keV}{\mu m} \right] \end{array} \right.$$

Lineáris energiaátadási tényező (LET) alfa- és bétasugárzásra



Alfa- és bétasugárzás kölcsonhatása anyagi közeggel

α -sugárzás LET-értéke vízben: $> 100 \text{ keV}/\mu\text{m}$
Energiaátvitel formái: ionizáció vagy gerjesztés

$$Q_{\alpha} = \frac{4mME}{(M + m)^2}$$

Az egy lépésben átadható energia (Q_{α}):
m: elektron tömege
M: alfarészecske tömege
E: az alfarészecske energiája a kölcsönhatás előtt

β -sugárzás LET-értéke vízben: $< 5 \text{ keV}/\mu\text{m}$
Energiaátvitel formái:

- Ütközés elektronnal: ionizáció vagy gerjesztés (Q_{α} lásd α)
- Atomok elektromágneses erőterével: fékezési sugárzás (folytonos röntgensugárzás, energiája a közeg rendszámától is függ), Cserenkov-sugárzás: az adott közegben érvényes fénysebességnél nagyobb sebességű elektron látható fényt is kibocsát.

A hatótávolság lényegesen kisebb, mint az energia-átvitelben részt vevő elektronok összes úthossza!

Az α - és β -sugárzások „gyenge áthatoló képességűek”.

Gamma-sugárzás kölcsönhatása anyagi közeggel

Foton energiaátadása részben hullám- részben anyagi természetű rendszernek – „ütközés”

- Elektronnal (ionizáció – többféle kölcsönhatásban)
- Atommaggal (abszorpció – küszöbreakció, csak >5 MeV energiánál)
- Atommag elektromágneses erőterével (küszöbreakció, csak $>1,02$ MeV energiánál))

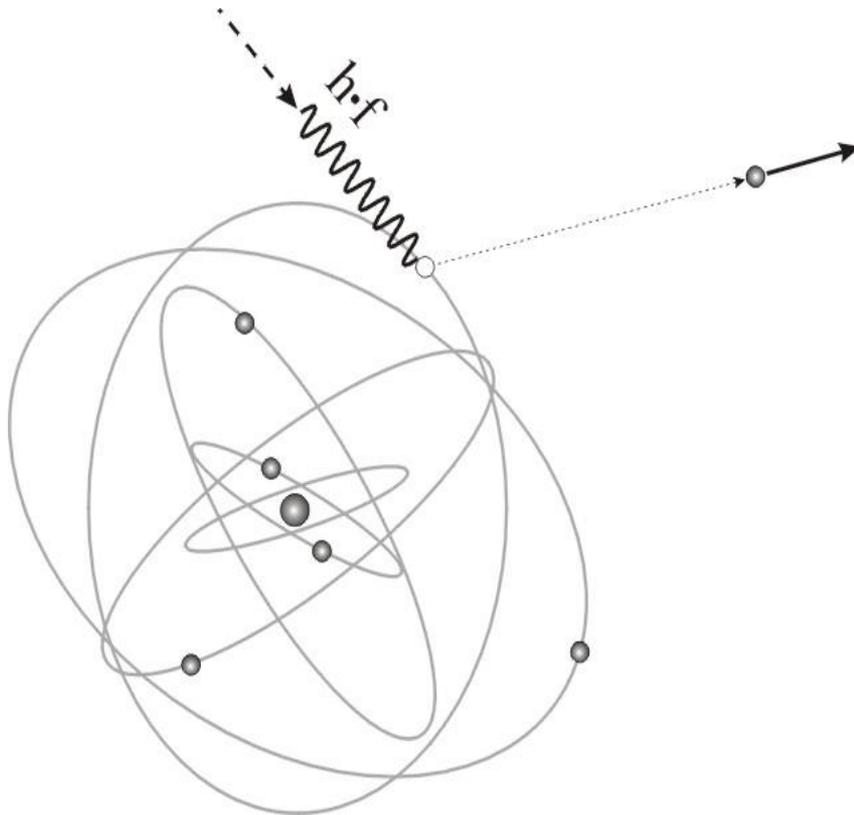
Általános sajátosság: sztochasztikus (véletlenszerű) kölcsönhatás: „fázisfüggő” energiaátvitel – nem adható meg hatótávolság.

Az energiát átvett elektronok kinetikus energiája:

- További ionizációt okozhat;
- Ionizáció nélküli gerjesztést okozhat;
- Szekunder fotonsugárzást (folytonos röntgensugárzást = fékezési sugárzást) kelthet.

A szekunder elektron már teljesen azonos módon viselkedik, mint a β -részecske!

Gamma-sugárzás kölcsönhatásai – teljes abszorpció

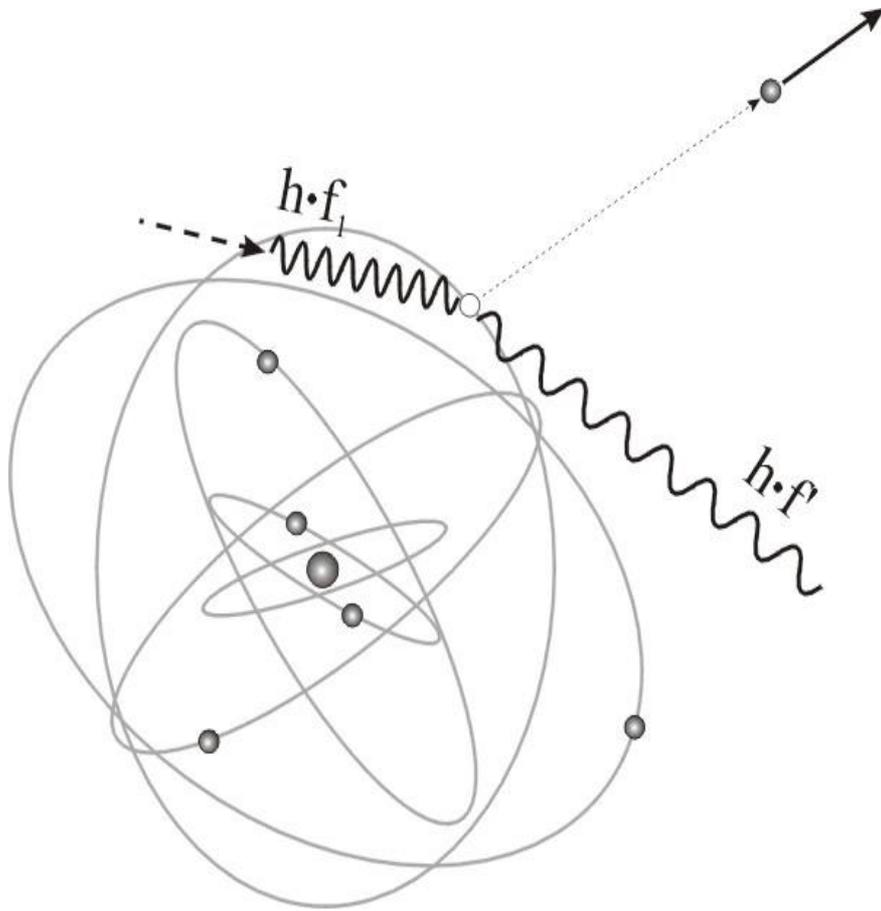


(régebbi elnevezése: fotoeffektus)

A foton teljes kinetikus energiáját átadja a vele „ütköző” elektronnak. Mivel $E_f \gg E_{ion}$, ezért az elektron nagy sebességgel „távozik” az atompályájáról. A foton megszűnik.

$$E_f = E_{e,ion} + E_{e,kin}$$

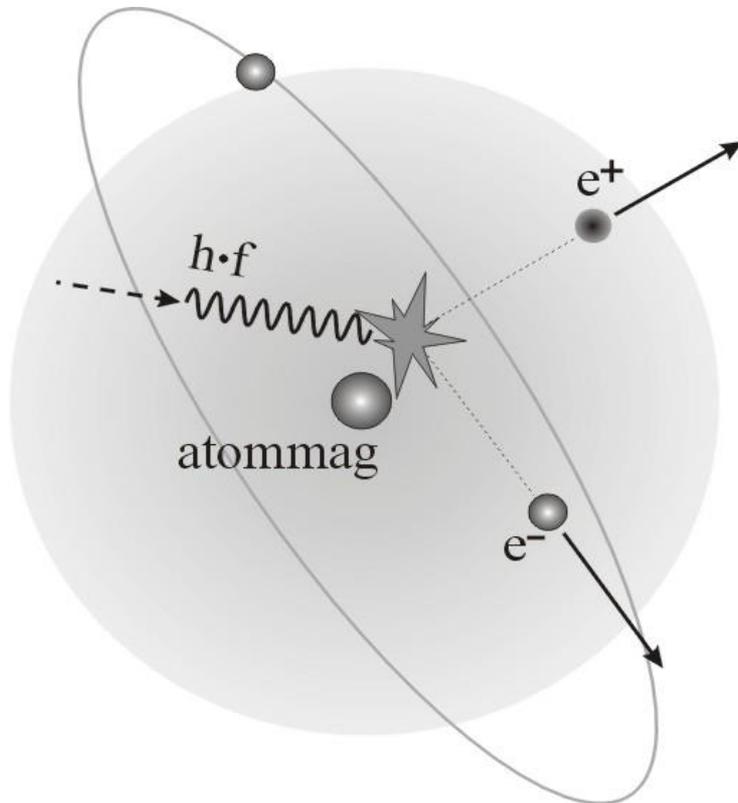
Gamma-sugárzás kölcsönhatásai – Compton-szórás



A foton kinetikus energiát ad át a vele „ütköző” elektronnak. Mivel $\Delta E_f \gg E_{ion}$, ezért az elektron nagy sebességgel „távozik” az atompályájáról. A szórt foton az eredetinel kisebb energiával, irányváltozással továbbhalad. A maximális (de nem teljes!) energiaátadás a 180° -os visszaszóráshoz tartozik.

$$E_f = E_{f'} + E_{e,ion} + E_{e,kin}$$

Gamma-sugárzás kölcsönhatásai - párkeltés



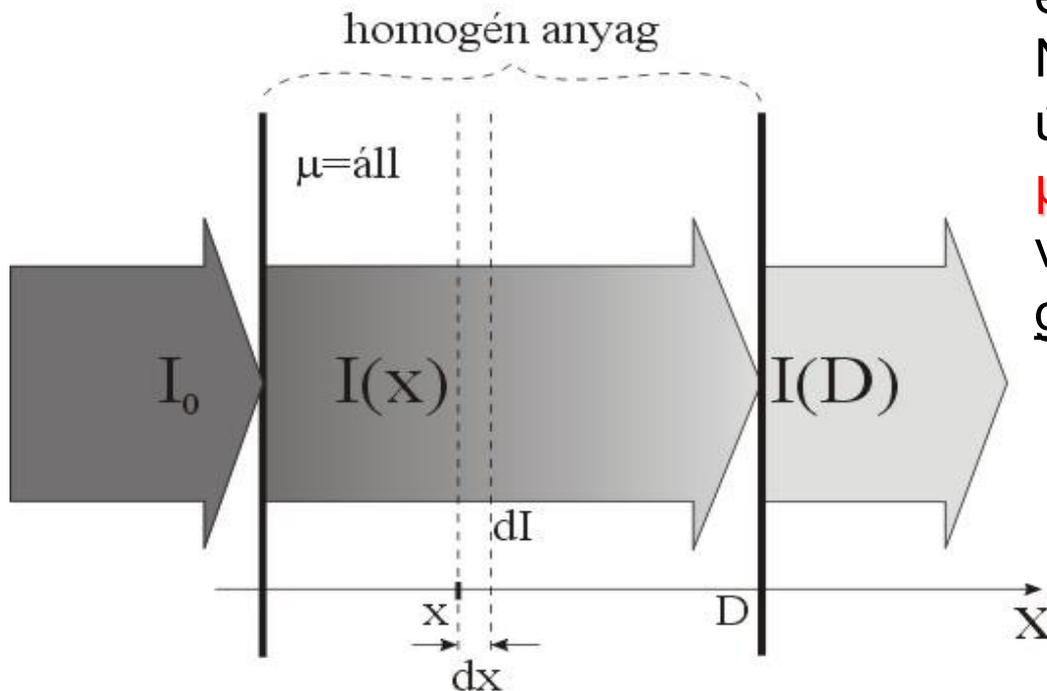
A foton az atommag elektromágneses erőterével lép kölcsönhatásba: átadja teljes energiáját és megszűnik. Egy bozon mozgási energiájából két fermion: e^- és e^+ keletkezik.

$$E_f = E_{e^-,m} + E_{e^-,kin} + E_{e^+,m} + E_{e^+,kin}$$

Csak akkor lehetséges, ha $E_f > 2 \cdot E_{e^-,m}$, azaz $E_f > 1022 \text{ keV}$
 $m_e = 511 \text{ keV}/c^2$

Gamma-sugárzás kölcsönhatása anyagi közeggel – valószínűségi modell

$$dI = -I(x) \sigma N dx$$



I : részecskeáram [darab/s]
 σ : kölcsönhatási valószínűség egy „partnerre” [-]
 N : partnerek száma egységnyi úthosszon [darab/m]
 $\mu = \sigma \cdot N$ = kölcsönhatási valószínűség [1/m] = lineáris gyengítési tényező

$$dI = -I \cdot \mu \cdot dx$$

Integrálás után:
általános gyengülési egyenlet

Gamma-sugárzás kölcsönhatása anyagi közeggel

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu x)$$

μ : összetett lineáris gyengítési tényező [m^{-1}]

I : a gyengítetlenül áthaladt részecskeáram [s^{-1}]

Egy adott kölcsönhatási esemény (energiaátvitel) mindig csak egy formában történhet = a három reális valószínűségű eseménytípus egymással csak „kizáró vagy” kapcsolatban lehet!

$\mu = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3$ – mindhárom tényező energiafüggő!

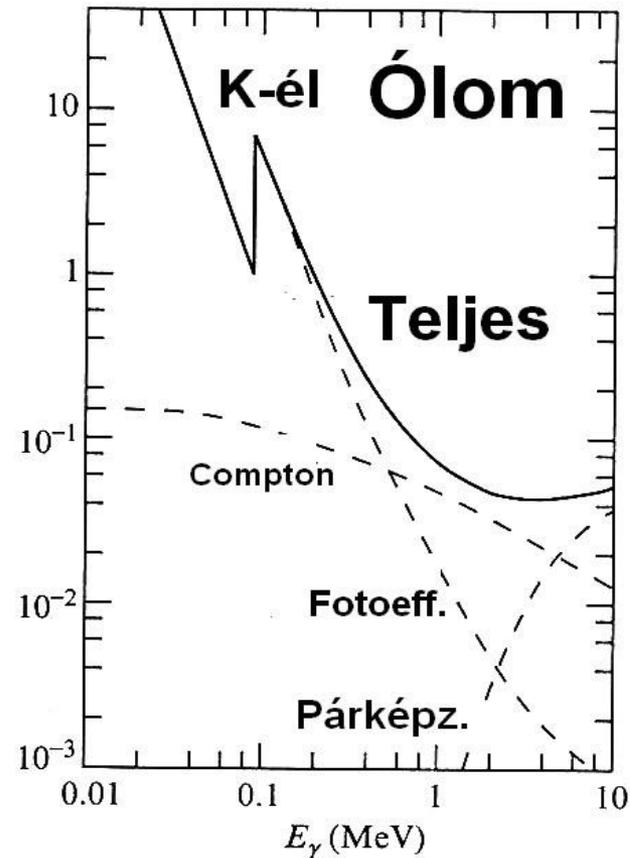
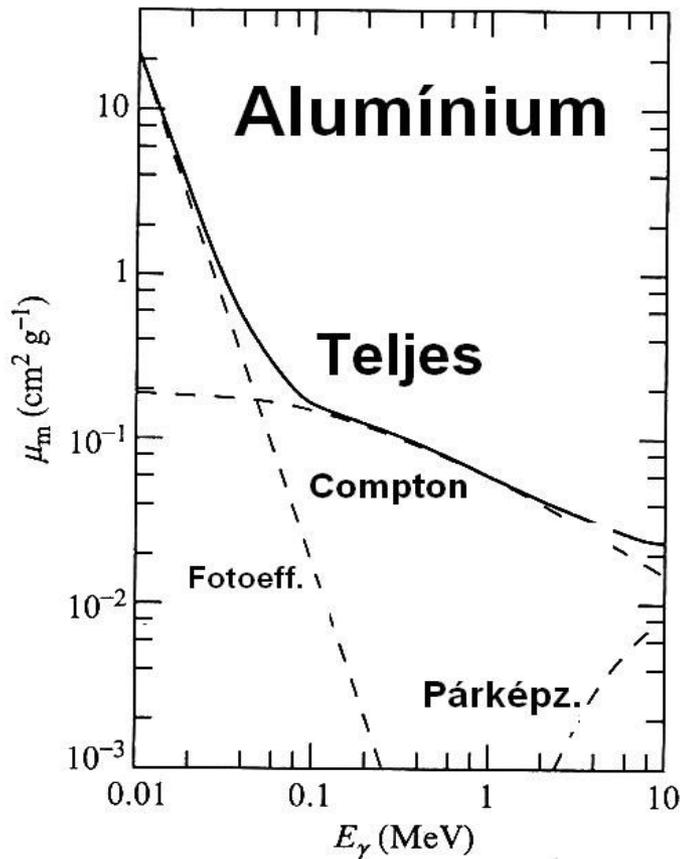
μ/ρ : egységi tömegre vonatkozó gyengítési tényező [m^2/kg]

Felezési rétegvastagságok (cm)

Anyag/ Gamma- energia	100 keV	200 keV	500 keV
Levegő	3560	4360	6190
Víz	4,15	5,1	7,15
Szén	2,07	2,53	3,54
Alumínium	1,59	2,14	3,05
Vas	0,26	0,64	1,06
Réz	0,18	0,53	0,95
Ólom	0,012	0,068	0,42

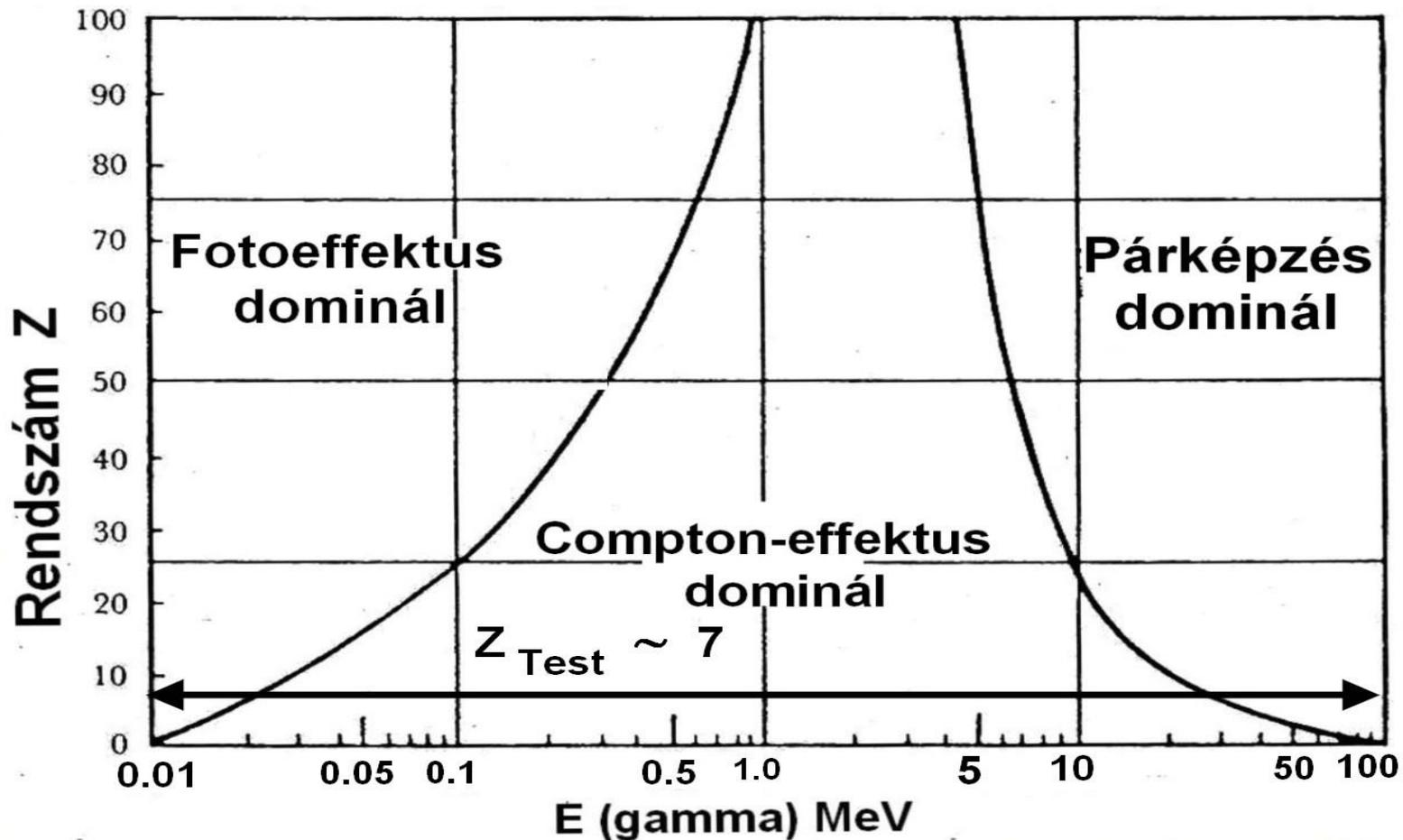
$$X_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Gamma-sugárzás és az anyag kölcsönhatása – rendszám- és energiafüggés



Ez és a következő ábra Nagy L.Gy. - László K. „Radiokémia és izotóptechnika” c. tankönyvéből való

Gamma-sugárzás és az anyag kölcsönhatása – a kölcsönhatások rendszám- és energiafüggése



Dózismennyiségek

$$D = \frac{dE}{dm} \approx \frac{\Delta E}{m} \left[\frac{J}{kg}, Gray, Gy \right]$$

Elnyelt dózis

Fizikai dózis: az anyag tömegegységében elnyelt összes sugárzási energia, csak fizikai kölcsönhatásokat foglal magába.

Bármelyik ionizáló sugárzásra értelmezhető.

Csak ionizáló sugárzásra értelmezett, de nem csak ionizációs energiát jelent, hanem a teljes elnyelt energiát.

Nem tartalmazza az anyagból kilépett (szórt, szekunder) sugárzási energiát.

„Egyesíti” a különböző forrásokból származó energia-beviteleket = a céltárgy dózisát számos egyidejű folyamat összegzett energiájának felvétele jelenti.

Külső foton-dózisteljesítmény

$$\frac{dD}{dt} = \Phi_E \cdot \frac{\mu}{\rho} \qquad \Phi_E = \frac{A \cdot f_R \cdot E_R}{4 \cdot r^2 \cdot \pi}$$

Φ_E : energiaáram-sűrűség (fluxus) [J/(m²s)]

$dN/dt = A$: a sugárforrás aktivitása [bomlás/s = Bq]

f_R : részecske-(foton)gyakoriság [foton/bomlás]

E_R : fotonenergia [J/foton]

μ/ρ : egységnyi tömegre vonatkozó gyengítési tényező [m²/kg]

$$\frac{dD}{dt} = k_\gamma \cdot \frac{A}{r^2}$$

Érvényesség: pontszerű γ -sugárforrásra,
gyengítetlen (primer) fotonsugárzásra.
„Izodózis”-felület = r sugarú gömb felszíne
r: távolság a pontszerű sugárforrástól

Négyzetes gyengülési törvény – a dózisszámítás alapja

k_γ : **dózistényező**, szokásos dimenziója: [(μ Gy/h)/(GBq/m²)]

Tartalmazza az összes anyagi és geometriai paramétert

„Szabadon” választhatók: A és r

A sugárbiológiai és a sugárvédelem kapcsolata

A sugárbiológia alapvető feladata, hogy adatokat szolgáltatson a sugárvédelemnek, és ezek alapján biztosítani lehet a lakosság, a sugárveszélyes munkát végző dolgozók és a betegek védelmét, illetve csökkenteni lehet a kockázatot.

A sugárbiológia az ionizáló sugárzásoknak az élő anyagra való hatásaival foglalkozik.

Átmeneti és maradandó károsodást idéz elő a sugárzás, különböző szinten:

- molekula
- sejt
- szövet
- szervezet

Sugárzás biológiai hatása

Molekuláris- és sejti szintű:

- ❑ *DNS károsodás: pontmutáció, kromoszómatörés*
- ❑ *Fehérje károsodás: indirekt, szabad gyökök hatása, enzimkárosodás*

Szövet- és szervezet szintű:

- ❑ *Akut sugárbetegség*
- ❑ *Krónikus sugárártalom (leukémia, malignus daganatok = rák)*

Populáció szintű:

- ❑ *Magzati károsodás: letalitás, fejlődési rendellenesség*
- ❑ *Genetikai állomány károsodása: meddőség*

Fizikai hatástól a biológiai hatásig

Elnyelt dózis (fizikai hatás) – ionizáció és gerjesztés

Kémiai változások: az ionok igen reaktív szabad gyököket hoznak létre (vízből, szerves molekulákból)

Biokémiai hatás: a közvetlen ionizáció és/vagy a szabad gyökök megváltoztatják egyes molekulák biokémiai viselkedését (DNS láncok törése stb.)

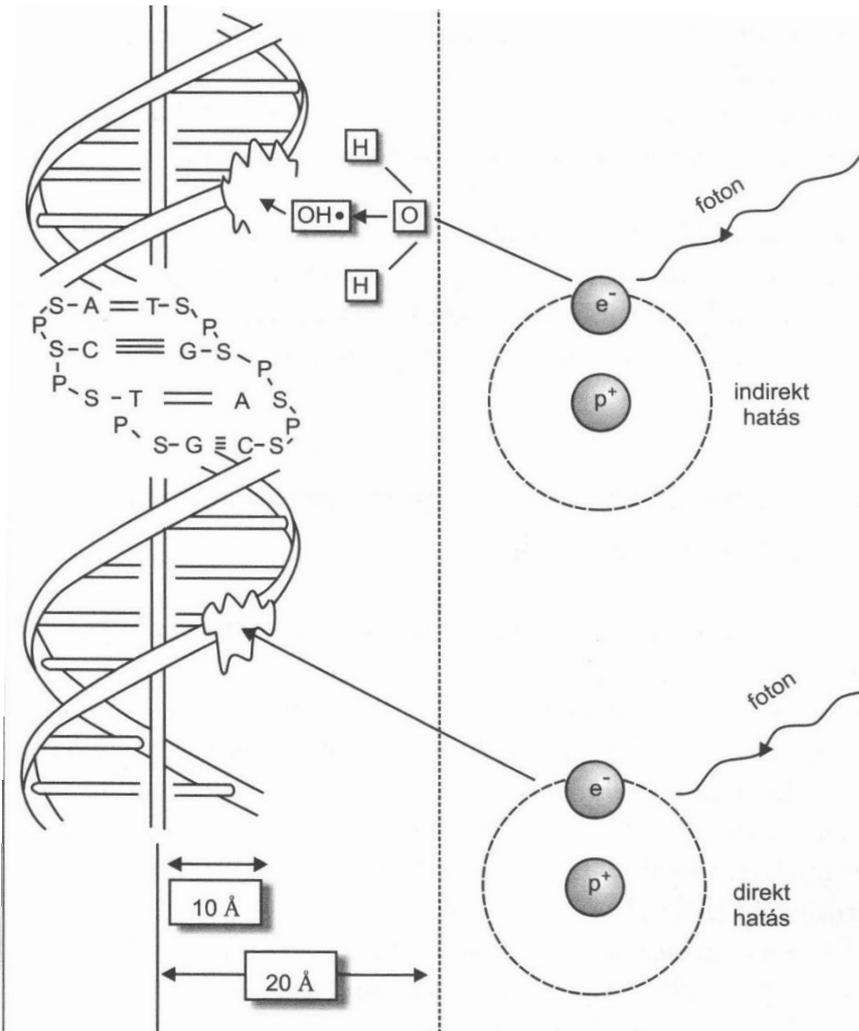
Biológiai hatás: a megváltozott anyagszerkezet megváltoztatja a biológiai „eseményeket”, életfolyamatokat.

A biológiai hatások kialakulásának időbeni lefolyása

A reakciósorozatok több részfolyamatból állnak, amelyek különböző sebességgel, különböző idő alatt mennek végbe és kölcsönösen függenek egymástól.

Fizikai-fizikokémiai fázis		
10^{-17} – 10^{-12} s	Ionizáció:	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + \text{e}^-$
	Gerjesztés:	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^*$
	Disszociáció:	$\text{H}_2\text{O}^* \rightarrow \text{H}^\bullet + \text{OH}^\bullet$
	Hidratált elektron képződés:	$-\text{e}_{\text{aq}}^-$
Kémiai-biokémiai fázis		
10^{-10} –1 s	A hidratált elektron reakciója más szabad gyökökkel A szabad gyökök homogén eloszlása A szabad gyökös reakciók befejeződése	
1– 10^3 s	Biokémiai folyamatok	
Biológiai fázis		
Korai	órák	Sejtosztódás-károsodás, sejt és szöveti változások
	napok–hetek–évek	Idegrendszer, gyomor-béltraktus változásai vérképző rendszer károsodása, szomatikus károsodások

Az energiaátadás módjai biológiai rendszerben



- **Direkt hatás** – az energia elnyelődése és a kiválasztott elsődleges folyamat ugyanazon molekulán következik be, amelyen a fixálódott szerkezeti és működésbeli változásokat észleljük.
- **Indirekt hatás** – az energia abszorpciója, majd az általa kiváltott hatás különböző molekulákon jön létre. Legfontosabb példa a szabad gyök képződés (legtöbbször vízből keletkeznek, nagy a reakcióképességük, külső elektronhéjukon páratlan spinű elektront tartalmazó atomok, molekularészek).

Szabad gyök képződés

- ❑ A szabad gyök olyan atom, melynek külső elektronhéján egy páratlan spinű elektron van, így igen reaktív.
- ❑ Képződhet egy atomból vagy atomcsoportból, molekulából.
- ❑ A szabadgyökök reagálnak egymással vagy a sejt molekuláival, beleértve a vizet is.
- ❑ Reakció során a szerves molekulákból, biomolekulákból is képződhetnek szabad gyökök.
- ❑ A reakciósorozat elsősorban a két sugárzásra érzékeny molekulatípus: a DNS és a membránok többszörösen telítetlen zsírsavmolekuláinak (PolyUnsaturated Fatty Acid - PUFA) károsítását okozhatják.
- ❑ A szabad gyök képződésével a sugárzás hatásának a kémiai szakasza kezdődik meg.

Az emberi sejtmag modellje

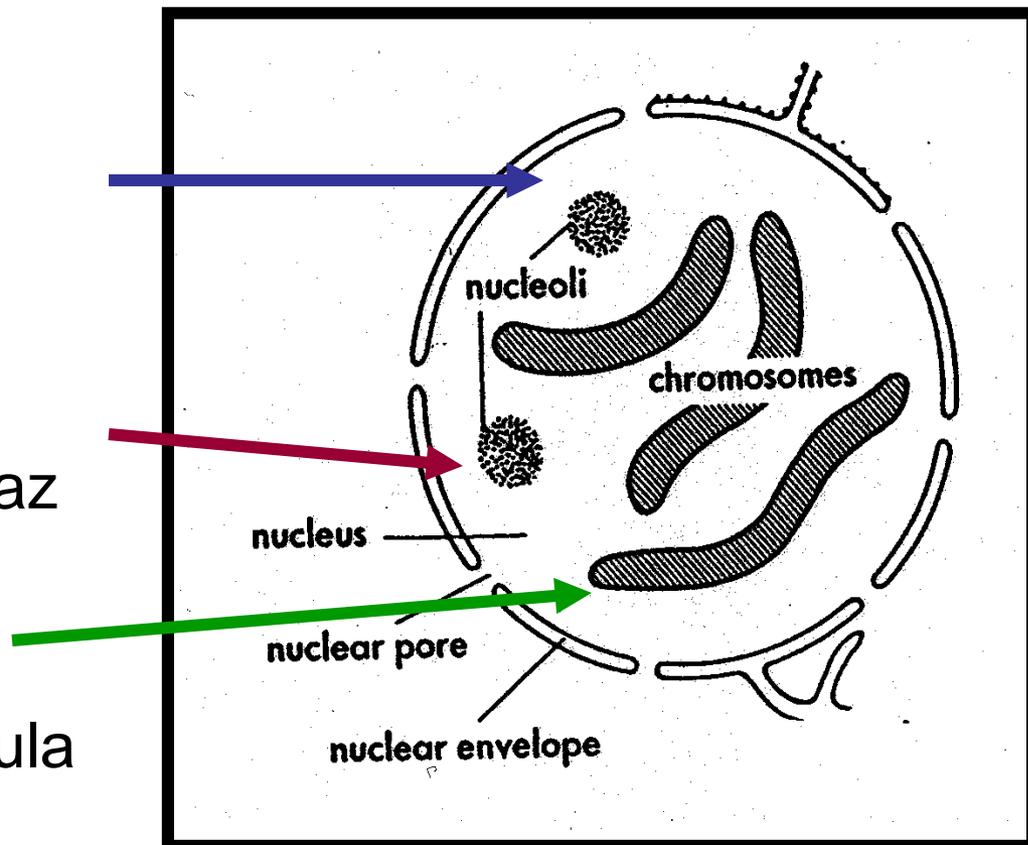
Membrán - burkolat

- félig áteresztő
- elválasztja a sejtmagfolyadékot a citoplazmától

Nucleolus – RNS-t
(ribonukleinsav) tartalmaz

- fehérje és DNS szintézis

DNS – a genetikus kódot tartalmazó makromolekula (dezoxi-ribonukleinsav)



A sejtek adatátviteli rendszere

A következő sejt generációhoz szükséges információt a sejtmag DNS-állománya tárolja.

DNS: cukor- és foszfátcsoportokból felépülő kettős spirál, amelyekhez szerves bázisok kapcsolódnak. Lánclemek: nukleotidok. A láncot a bázisok között hidrogénhidak tartják össze.

DNS-ből felépülő örökítő elemek: kromoszómák.

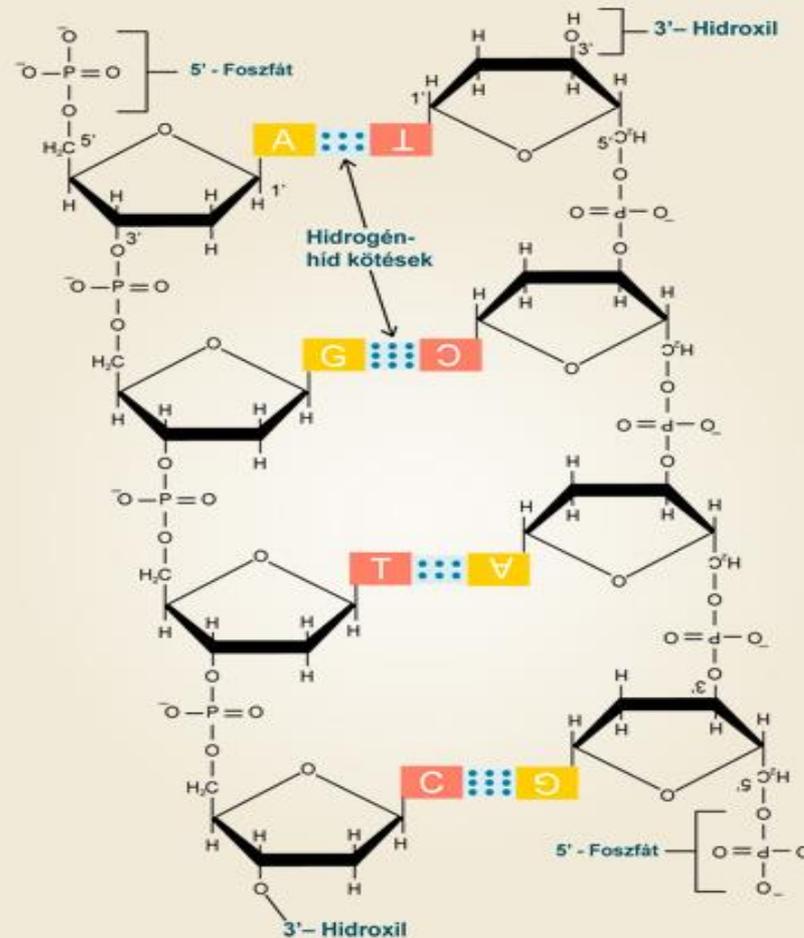
A DNS a sejtet felépítő fehérjék összetételét kódolja.

Gén: a DNS egy fehérjét kódoló, vagy egy sejt tulajdonságot meghatározó darabja.

A gének együtt alkotják az egyed genetikai információit tartalmazó genomot.

A DNS cukor + foszforsav-diészter lánc általános, a különbségeket a lánchoz kapcsolódó bázispárok jelentik.

A sejtek adatátviteli rendszere



8.2. ábra. A DNS másodlagos szerkezete. A két antiparallel lefutású DNS szál az adenin (A) – timin (T) és guanin (G) – citozin (C) bázisok közötti hidrogénhíd kötésekkel kapcsolódik össze kettőshélix szerkezetet alkotva

Biomolekulák sérülései

A sejtben kétfajta sugárzásra különösen érzékeny célpont van, sérülésük komoly biológiai következményekkel jár.

*Egyik a sejtmagon belül a kromatin struktúrába rendeződött **DNS-készlet**, a másik a sejt **membránrendszere**.*

Ezek a sejt organellek sérülhetnek az ionizáló kvantumok közvetlen hatására, vagy szabadgyökök képződésén közvetetten.

Sugárzások káros hatásai

9. táblázat. 1 Gy kis LET-értékű sugárzás okozta károk gyakorisága egy emlőssejt magjában	
Első fizikai események	
ionizációk a sejtmagban	100000
ionizációk a DNS-ben	2000
gerjesztések a DNS-ben	2000
Biokémiai károk	
DNS egylánctörés	1000
8-hidroxiadenin-képződés	700
timinkárosítás	250
DNS kettőslánctörés	40
DNS-fehérje keresztkötés	150
Sejtszintű károsodások	
sejtpusztulás	0,2–0,8
kromoszómaaberráció	1
HPRT-mutáció	10^{-5}

A sejtekben sugárhatásra létrejövő károsodások

- A **letális károsodás** azt jelenti, hogy a sejt a sérülést nem képes kijavítani, és mindenféleképpen el fog pusztulni. Ha két törés keletkezik, akkor mindkét lánc sérülése fennáll, a törtvégek messze kerülhetnek egymástól. Emiatt letális kromoszómaaberrációk alakulhatnak ki, ami ún. mitotikus sejthalálhoz vezethet. Ionizáló sugárzás hatására a sejt nem azonnal pusztul el, hanem még megkísérel osztódni, s csak ezután következik be az apoptózis.
- A **potenciálisan letális** károsodás letális károsodás lenne, de a sejt bizonyos feltételek mellett képes kijavítani, pl. lehetőségük van arra, hogy a javító mechanizmusok működése beinduljon és a potenciálisan letális károsodásokat a sejt kijavítsa.
- A **szubletális** károsodás egy kevésbé súlyos, kijavítható sérülés (ebben az esetben sugárhatásra általában egyláncú DNS-törés keletkezik, melyet a sejt a javító mechanizmusok (DNS repair-rendszer) segítségével gyorsan ki tud javítani).

Az ionizáló sugárzások biológiai hatásai

A biológiai hatások osztályozása:

Szomatikus: a hatást elszenvedő személyen jelentkezik

Genetikai: a személy utódain jelentkezik

Determinisztikus: A károsodás súlyossága függ a dózistól, a hatás egy bizonyos küszöbdózis fölött következik be.

Sztochasztikus: A károsodás valószínűsége függ a dózistól, küszöbdózis nincs.

Szomatikus és genetikus hatás; determinisztikus hatás

A két sugárbiológiai hatásmód megkülönböztetésének csak akkor van értelme, ha a genetikai anyag intracellulárisan helyezkedik el.

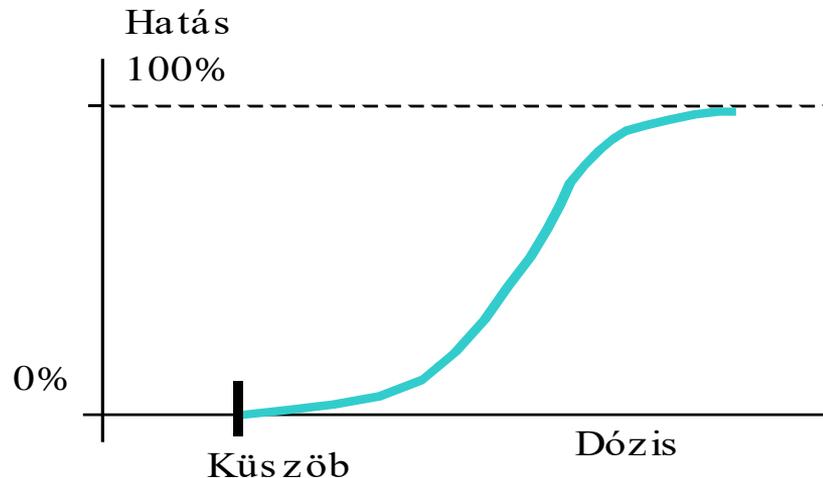
Ha egy csírsejt sugárártalma az utódokban nem manifesztálódik, úgy az ártalom a csírsejt szomatikus, de nem genetikai ártalmának minősül.

A szomatikus determinisztikus hatás egyik jellemző adata az $LD_{50/30}$ -érték. Ez akkora sugárdózisnak felel meg, amely a kérdéses populáció 50%-át 30 napon belül elpusztítja, illetve a sugárterhelt molekulák felét inaktiválja.

Az ionizáló sugárzás determinisztikus hatása

Determinisztikus hatás:

- küszöbdózishoz kötött (érzékeny szövetekre: 0.3 – 0.4 Gy, magzat: 0.1 Gy)
- szövetpusztulást okoz a sugárzás
- akut/azonnali hatás
- életveszélyes károsodások: központi idegrendszer, emésztőrendszer, vérképző rendszer



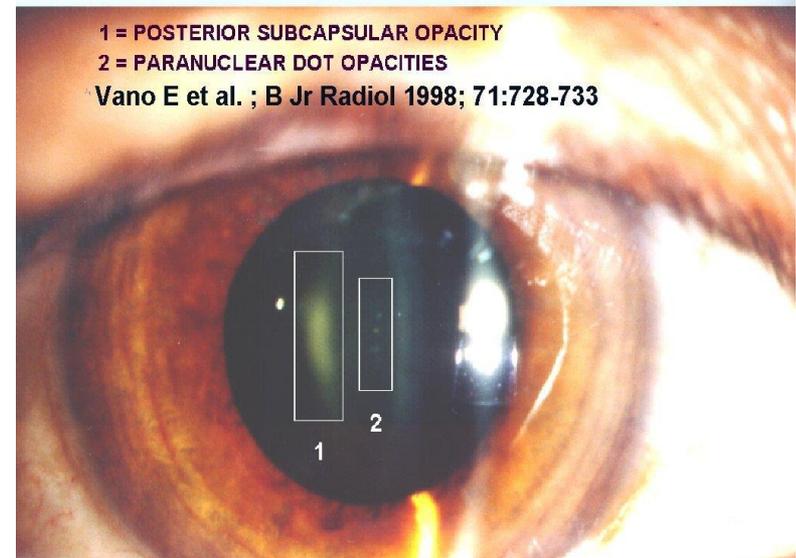
Determinisztikus hatások

Küszöbdózis felett a sugárzás károsító hatása egyértelmű

- ❑ *Determinisztikus jellegű, mindenkinél elkerülhetetlenül fellép*
- ❑ *A hatás súlyossága arányos a dózissal*

A determinisztikus hatások típusai

- ❑ **Sugársérülés:** lokális expozíció
következménye
- ❑ **Sugárbetegség:** egész test expozíció
következménye



AZ AKUT SUGÁRBETEGSÉG SZAKASZAI

1 Gy-nél nagyobb dózis (egész test)

- 1. Kezdeti szakasz*
- 2. Lappangási szakasz*
- 3. Kritikus szakasz*
- 4. Regeneráció szakasza*

8 Gy már mindig halálos dózis

Kezdeti szakasz (néhány óra) tünetei:

*hányás,
étvágytalanság,
émelygés,
fejfájás,
levertség,
mozgáskordinációs zavar*

*Minél nagyobb
a dózis, annál
rövidebb a
kezdeti szakasz*

Lappangó szakasz: 2-3 Gy dózisonál 3-4 hét is lehet
10 Gy nincs lappangás

Kritikus szakasz:

magas láz, pontszerű bőrbevézések
vérbében elváltozások
immunrendszer károsodása
egésztest dózis 3-4 Gy 60 napon belül halál

Csernobil:

4.2-6.3 Gy	21 sugársérült	14 túlélő
2-4 Gy	43 sugársérült	42 túlélő

Regeneráció szakasza: kedvező lefolyás, a 3 szakasz tünetei
visszafejlődnek

genetikai eltérések kimutatása 0.15 Gy citogenetika

Szövetek sugárérzékenységi sorrendje

1. *Nyirokszövet*
2. *Fehérvérsejtek, csontvelői éretlen vörösvérsejtek*
3. *Gyomor-, béltraktus-nyálkahártya*
4. *Ivarsejtek*
5. *Bőr osztódó sejtrétege*
6. *Erek*
7. *Mirigyszövetek, máj*
8. *Kötőszövet*
9. *Izomszövet*
10. *Idegyszövet*

Determinisztikus hatást kiváltó dózis

$$ND = D \cdot RBE(R)$$

ND: necrotic dose = szövetpusztulást okozó elnyelt dózis

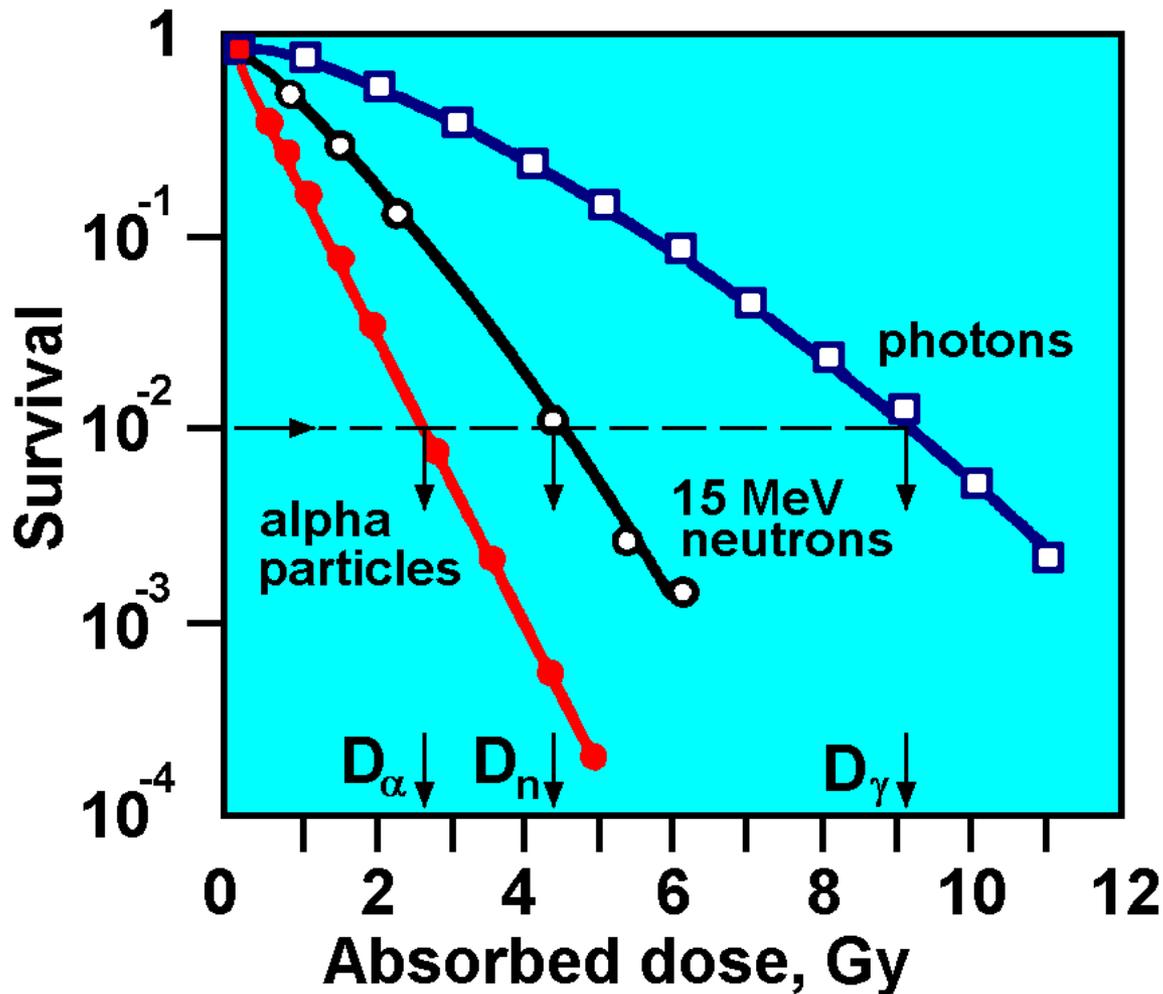
RBE: relative biological effectiveness = relatív biológiai egyenérték (károkozó képesség) – egyaránt jellemzi a sugárzástípusát és az expozíció körülményeit!

R: sugárzástípus

Relatív biológiai egyenérték (RBE)

- Az egyes sugárfajták nekrotikus biológiai károsító hatását az un. relatív biológiai hatással (RBE értékkel = relative biological effect) jellemezzük).
- Az RBE érték megmutatja, hogy hányszor nagyobb az adott sugárzás biológiai hatása a 250 kV-os röntgengéppel keltett sugárzás hatásánál.
- Az RBE érték függ attól is, hogy milyen típusú biológiai végpontnál nézzük.
- Az RBE belső sugárterhelésnél a sugárzást hordozó anyag fizikai és kémiai tulajdonságaitól is erősen függ.
- *A neutronsugárzás RBE értéke 2-6-szorosa a röntgensugárzásénak, a fotonok RBE értéke megközelítőleg 1, az energiától függetlenül.*

A sugárzás minőségének szerepe a determinisztikus hatásban - kísérlet



$$D_{\alpha} < D_n < D_{\gamma}$$

$$RBE_{\alpha} = \frac{D_{\gamma}}{D_{\alpha}}$$

$$RBE_n = \frac{D_{\gamma}}{D_n}$$

$$RBE_{\alpha} > RBE_n$$

Az ionizáló sugárzás sztochasztikus hatása

A „fő célpont” a sejtmag DNS-állománya

Őssejtek és szöveti sejtek osztódása: mitózis – ennek során az új sejt DNS-e átveszi a kiindulási sejttől az szöveti funkciókra vonatkozó információt.

Információ-átadási hiba esetén

- életképtelen az új sejt, vagy
- a hibás információt kijavítja egy mechanizmus, vagy
- a hibás információra nincs szüksége a sejtnek, vagy
- hibás sejt keletkezik, amely tumorsejtté alakulhat.

Az ionizáló sugárzás (a dózis) is okozhat DNS-hibát, ennek károsító hatása véletlenszerű.

Sztochasztikus hatás

Az ionizáló sugárzás hatása nem különbözik a természetes mutációktól, csak növelheti azok gyakoriságát.

A testi sejtekben átlagosan $0,77 \cdot 10^{-9}$ DNS-mutáció keletkezik osztódásonként és bázispáronként. Az emberi genom átlagos hossza $6,4 \cdot 10^9$ bázispár, így minden osztódásnál hozzávetőlegesen öt mutáció keletkezik; függetlenül a "különleges" környezeti hatásoktól.

(forrás: <http://mutaciok-a-szomszedban.blogspot.hu/>)

Az ionizáló sugárzás determinisztikus és sztochasztikus hatása

Sejti életciklus:

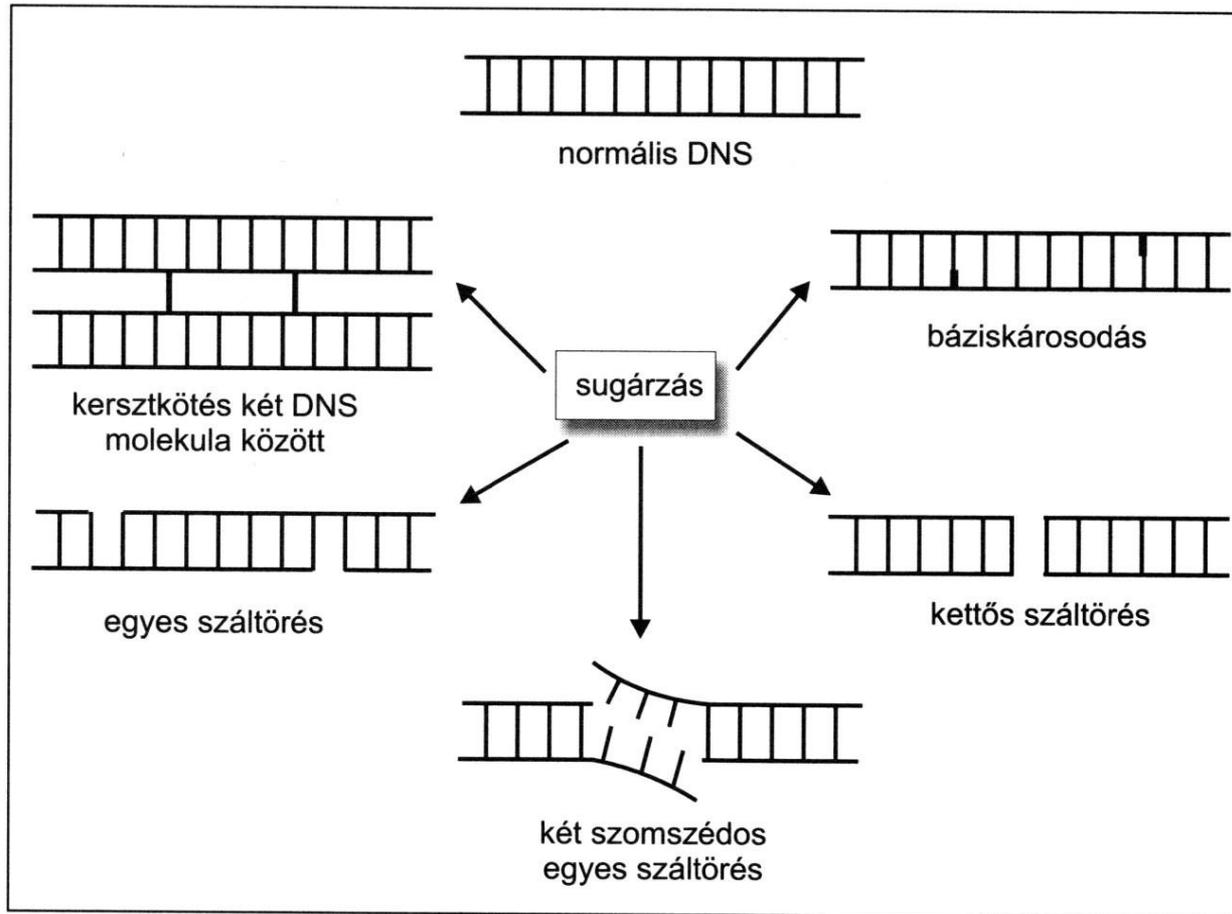
mitózis – interfázis – mitózis vagy apoptózis

Sejti rendszerek sérülése:

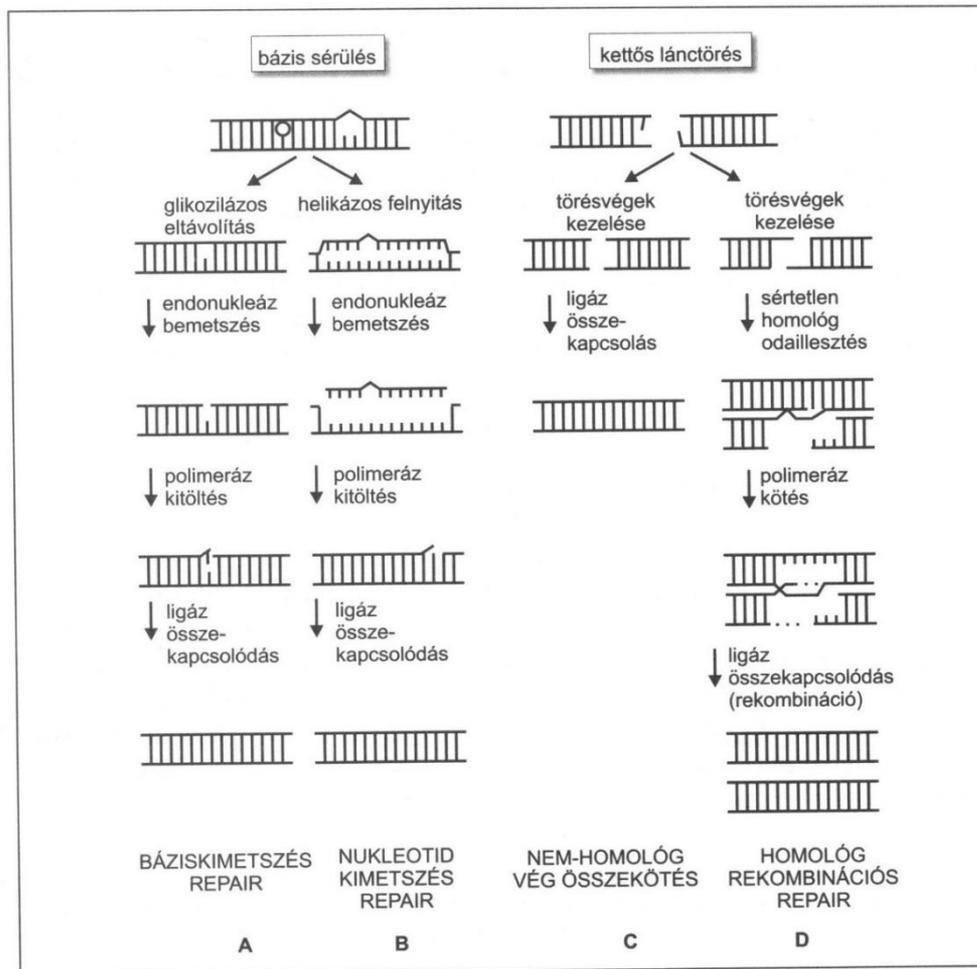
- Azonnali pusztulás: nekrozis
- Életképtelenség: apoptózis
- DNS-lánchibák: fennmaradás → mutáció

DNS lánchibák javítása „repair” enzimekkel

DNS molekula sugárkárosodásának lehetőségei



DNS molekula sugárkárosodásának helyreállítása – enzimes „repair” folyamatok

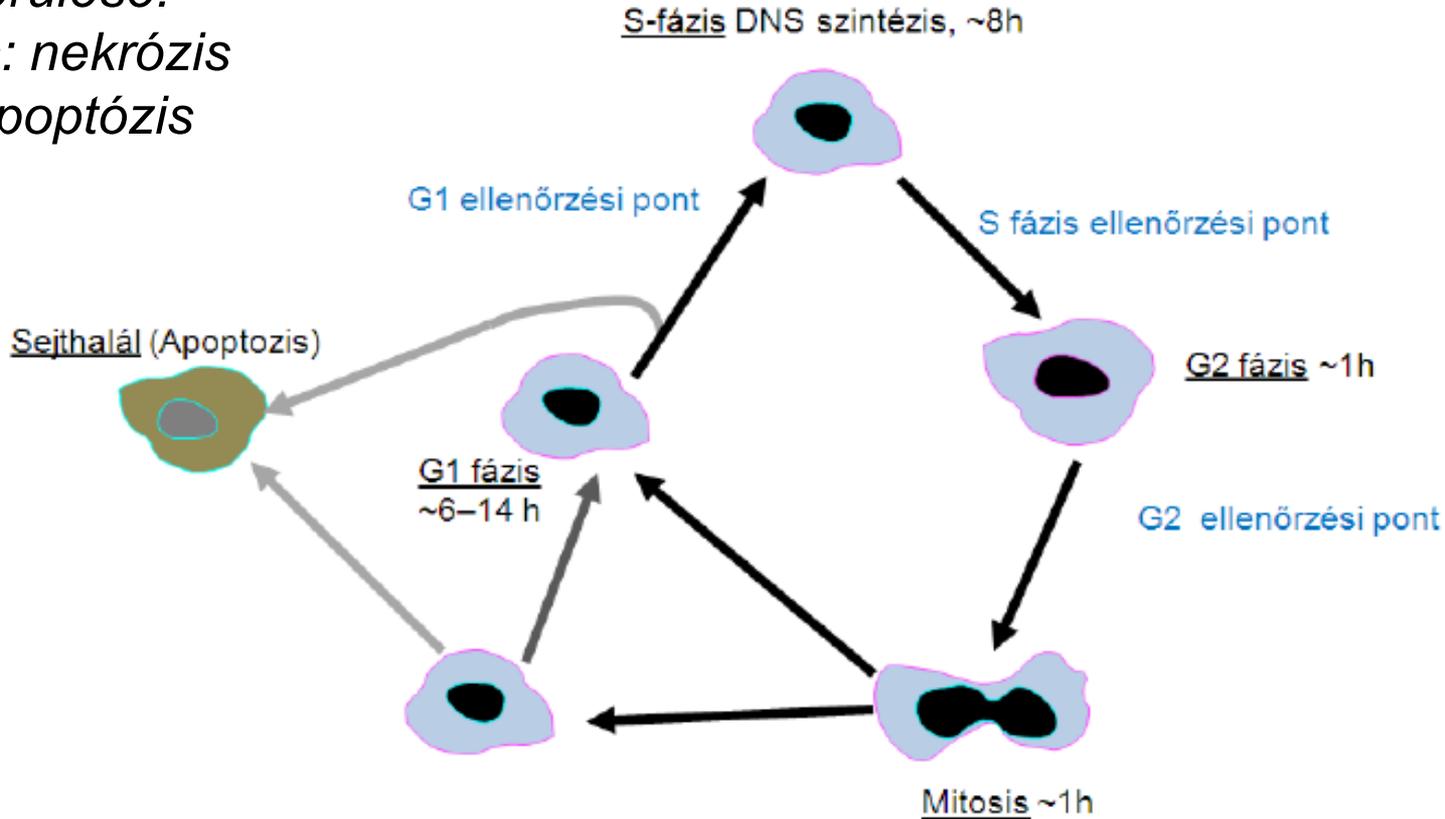


36. ábra. A DNS károsodását helyreállító mechanizmusok vázlatos szemléltetése

- A: a sérült bázist egy specifikus glikoláz kimetszi, a DNS-lánc felnyitása után a hiányt egy polimeráz enzim segítségével kitölti
- B: a sérült bázist néhány oligonukleotiddal együtt eltávolítja, a szemben lévő lánc mintául vételével a hiányt kitölti
- C: a kettős lánc-törésben a végeket összekapcsolja
- D: a kettős lánc-törést egy azonos nem sérült molekula mintájára kijavítja. A láncok egymásba hatolása lehetővé teszi a kiegészítő szakasz újraszintézisét, majd a láncok visszaalakulását és összekötését

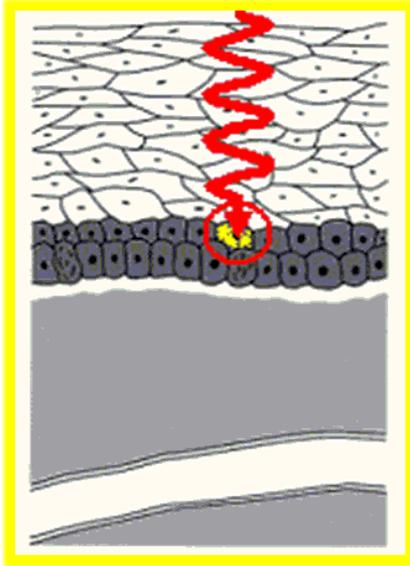
Sejti élekciklus

Sejti rendszerek sérülése:
Azonnali pusztulás: nekrozis
Életképtelenség: apoptózis

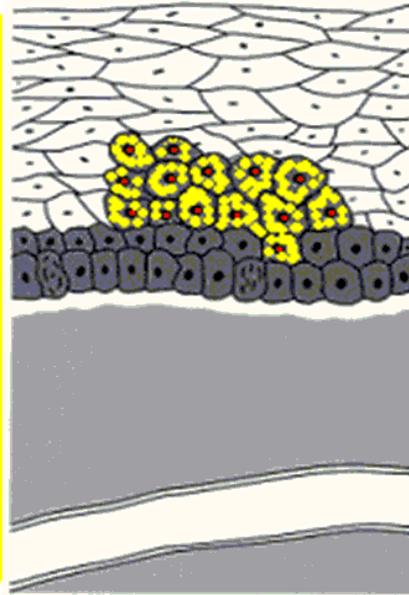


DNS-lánchibák: **fennmaradás** → **mutáció**
DNS lánchibák **javítása** „repair” enzimekkel

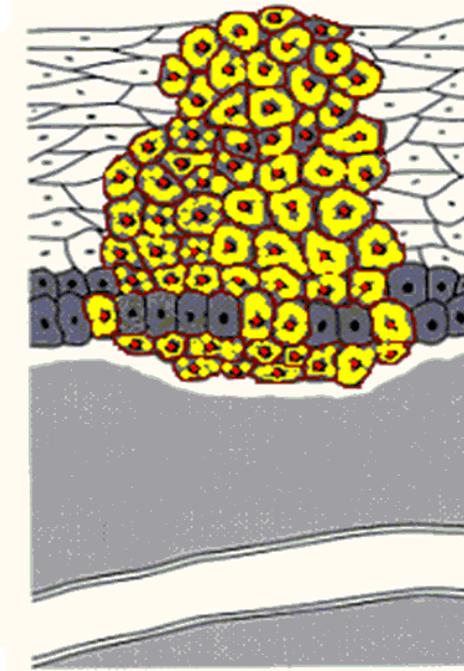
Sztochasztikus károsító hatás



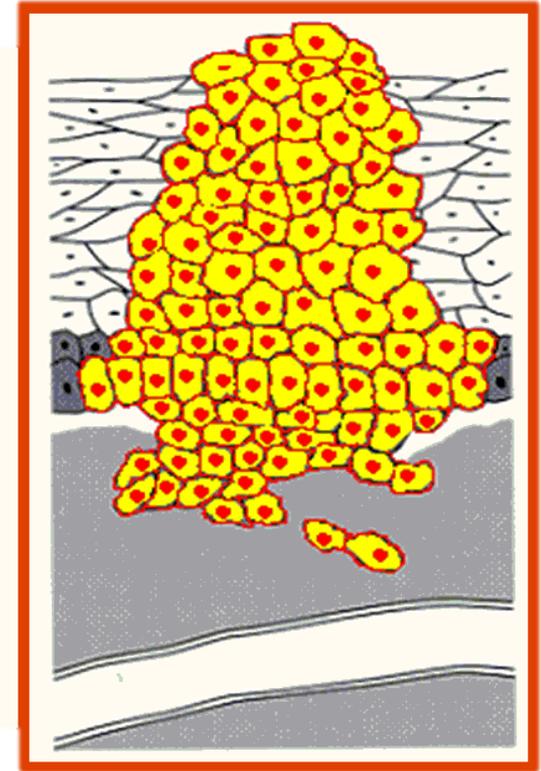
Kezdeti
"találat"



Dysplasia



Jóindulatú
daganat



**Rákos
daganat**

Évek a besugárzás után

Egyenértékdózis – az ionizáló sugárzás sztochasztikus biológiai hatásával arányos mennyiség

$$H = D \cdot w_R \text{ [Sievert, Sv]}$$

w_R sugárzási tényező - a LET függvénye

$$w_{R,\alpha} = 20$$

$$w_{R,\gamma} = 1$$

$$w_{R,\beta} = 1$$

$$w_{R,n} = 2,5 \div 20 \text{ a neutron-energia függvényében}$$

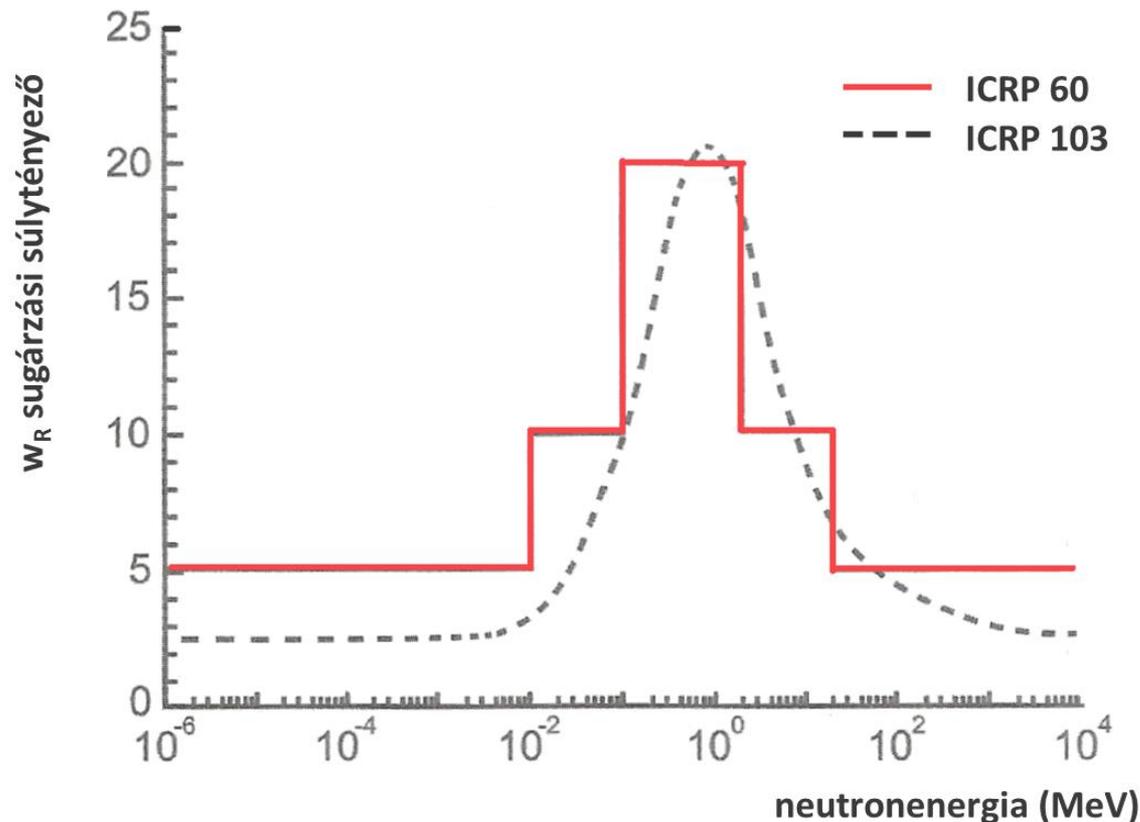
A sejt méretű élő térfogatba bevitt energia (mikrodózis) dönti el az elnyelt dózis veszélyességét (kártételét).

„Antropomorf” dózisfogalom és mértékegység: a sugárzási tényezők csak emberre érvényesek, más fajtájú élőlényeknél mások lehetnek.

Az egyenértékdózis CSAK a sztochasztikus hatás jellemzésére szolgál – a sugárzási tényező az egy sejtben okozható DNS-hibák számával arányos.

Egyenértékű dózis változó sugárzási tényezővel - neutronok

A sugárzási súlytényező értékének ábrázolása a neutronok energiájának függvényében az ICRP 103 ajánlása alapján.



A dózist okozó sugárforrás és a dózist elszennvedő személy kölcsönös pozíciója szerint külső és belső sugárterhelés jöhet létre.

$$E = (H_E) = \sum_T H_T w_T [Sv]$$

Effektív dózis

w_T szöveti súlyozó tényező

$$\sum_T w_T = 1$$

2007-ben, az ICRP#103 kiadványban javasolt szöveti súlyozó tényezők:

ivarszervek $w_T=0,08$ (genetikus hatásra)

szomatikus hatásokra

legérzékenyebbek

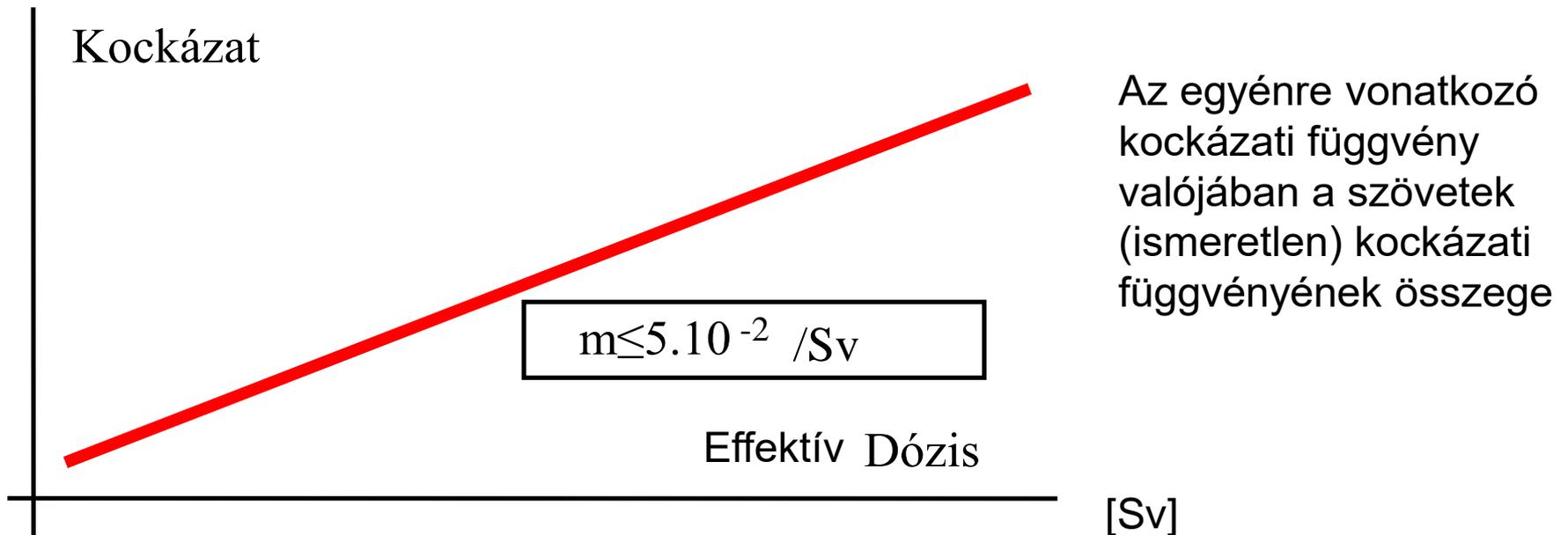
$w_T=0,12$ tüdő, gyomor, belek, vörös csontvelő, emlő

érzékenyek $w_T=0,04$ máj, vese, pajzsmirigy stb.

kissé érzékeny $w_T=0,01$ bőr, csontfelszín

Az ionizáló sugárzás sztochasztikus hatása:

- nincs küszöbdózis (kis dózisok hatása nem igazolt)
- sejtmutációt okoz a sugárzás (javító mechanizmusok)
- kockázat-dózis-függvény lineáris (?)



Ezt az összefüggést a Hiroshima és Nagasaki elleni atomtámadások túlélőinek statisztikájából határozták meg.

Biztonság és kockázat

Biztonság definíciója:

Gyakorlati bizonyosság arról, hogy meghatározott körülmények között egy ágens okozta expozíció nem eredményez káros hatást. A kockázat ellentéte.

Kockázat definíciója:

Speciális körülmények között megvalósuló expozíció okozta káros hatások valószínűsége egy szervezetben, rendszerben vagy (al)populációban.

Veszély-, kockázat- és expozíció becslésben használt fogalmak egységes harmonizált gyűjteménye (Országos Közegészségügyi Központ Budapest 2005)]

Kockázatbecslés

Adott célszervezetre, -rendszerre vagy -(al)populációra adott ágens expozíciója által jelentett kockázat számításának vagy becslésének folyamata, amihez hozzátartozik kísérő bizonytalanságok azonosítása, figyelembe véve az ágens inherens jellemzőit, valamint a sajátos célrendszer jellemzőit.

A kockázatbecslés négy lépésből áll: a veszély-azonosítása, a veszélyjellemezése (kapcsolódó kifejezés: *dózis-válasz becslés*), expozícióbecslés és kockázatjellemezés. Ez az első eleme a kockázatelemzés folyamatának.

Veszély-, kockázat- és expozíció becslésben használt fogalmak egységes harmonizált gyűjteménye (Országos Közegészségügyi Központ Budapest 2005)]

A kockázat – effektív dózis függvény

Elfogadott modell: LNT (linear – no threshold)

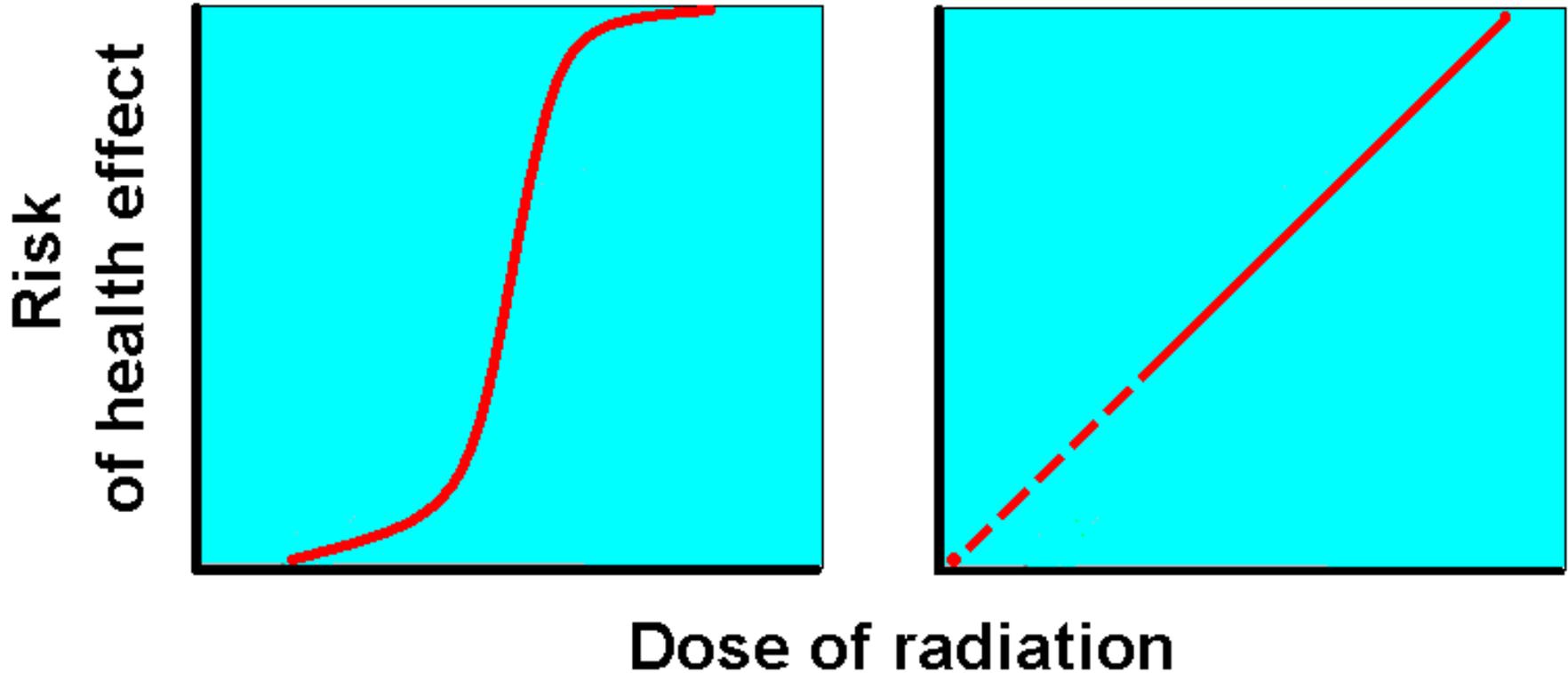
Kérdőjelek:

- A függvény megállapításához „tisztá” adatok (pontos mérések, „minta” és „kontroll csoport” szükségesek) – de hogyan?
- Hormézis: a kis dózisok „immunitást” okoznak ?
- Szupralinearitás: a kis dózisoknál nincs nekrozis: „javul” a mutáns sejtek túlélési hányada ?
- Nonlinearitás: nagyobb dózisoknál az elpusztult nagyszámú sejt „sürgős” pótlása gyorsítja az osztódási ciklust – ez is mutagén hatású ?
- A függvény „összes” kockázatra vonatkozik, de a tumor szervekben manifesztálódik. „Primer” tumor vagy metasztázis ?
- Mennyi időn át adhatók össze a dózisok?
- Bystander- (szomszéd-) hatás?

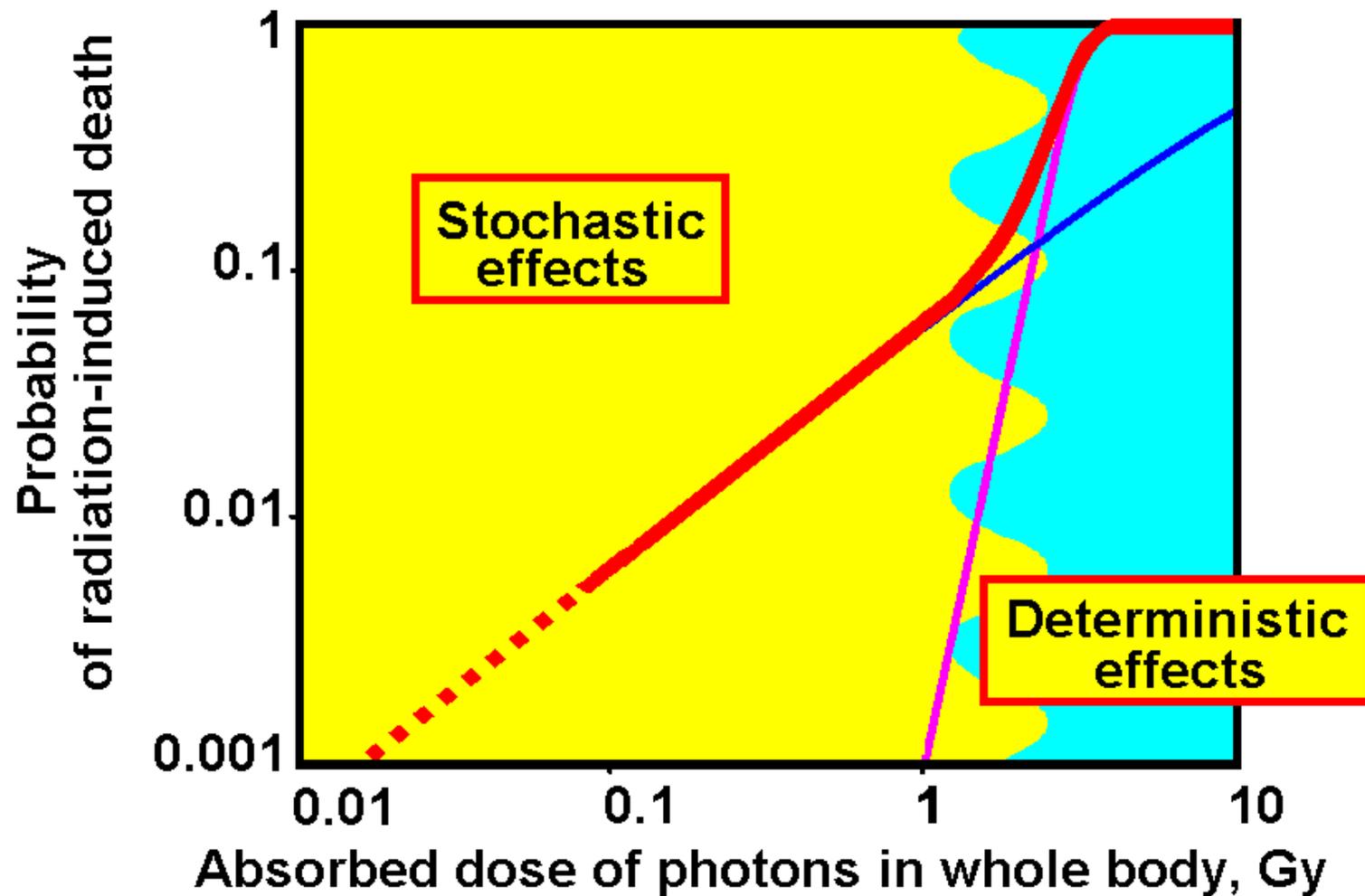
Az ionizáló sugárzás hatásai - összefoglalás

Deterministic

Stochastic



A sugárzás káros hatásának függése a dózistól - összefoglalás



Kockázatok összehasonlítása – 10^{-6} -nyi kockázat: mikrorizikó

Nemzetközi statisztikák szerint kb. 1 mikrorizikó kockázattal jár:

*2500 km utazás vonaton,
2000 km utazás repülőn,
80 km autóbuszon,
65 km autón,
12 km kerékpáron,
3 km motorkerékpáron,
egy cigaretta elszívása,
két hónap együttélés egy dohányossal,
meginni egy palack bort,
kövér embernek még egy vajas szendvicset enni,
egy órán át Budapest belvárosában lélegezni,
egy hétig házban aludni,
öt éven belül méhcsípéstől meghalni és
tíz éven belül villámcsapást kapni.*

*Forrás: Marx György: Születni veszélyes -
http://epa.oszk.hu/00700/00775/00001/1999_01_04.html*

Kockázatok összehasonlítása

Tevékenység, foglalkozás	mikrorizikó/év-ben kifejezett kockázat
Kereskedelmi munka	2-3
Gyári munka	10-100
Hivatásos autóvezetés	400
Építőipari munka	400
Szénbányászat	800
Elektromos távvezeték építés	1200
Mélytengeri halászat	800
Gyilkosság, Magyarország	30
Öngyilkosság, Magyarország	490
Dohányzás okozta halálesetek, Magyarország	3000

Forrás: Marx György: Születni veszélyes - http://epa.oszk.hu/00700/00775/00001/1999_01_04.html

További dózismennyiségek

Lekötött dózis (H_C): inkorporálódott, és a szervezetben 1 évnél tovább jelenlévő radioaktív anyag effektív dózisa

$$H_C = \int_0^T \frac{dH_E}{dt} dt \quad \text{Gyermekeknél } T = 70 \text{ év, felnőtteknél } T = 50 \text{ év}$$

Kollektív dózis: Egy embercsoport tagjai által egy adott sugárforrástól kapható effektív dózisának összege.

$$C = \sum_i H_{E,i} \cdot n_i \quad [\text{személy.Sv}]$$

Elvileg sem mérhető - csak az emisszió mértékéül használható!

Sugárvédelmi szabályozás

Nemzetközi ajánlások, irányelvek:

ICRP #103 (2007), IAEA General Safety Requirements (GSR) Part 3
(2014) IBSS = international basic safety standards,
2013/59/EURATOM direktíva.

Magyar jogszabályok: a fentiekkel teljes összhangban.

2011. évi LXXXVII. tv. (atomtörvény)

- Általános és személyi sugárvédelem: 487-491/2015. kormányrendeletek, felelős hatóság: Országos Atomenergia Hivatal (OAH)
- Radioaktív hulladékok: 47/2003. sz. ESzCsM. r. - OAH
- Környezeti kibocsátások: 15/2001. sz. KöM. r., felügyelőségek és OAH
- Nukleáris biztonság: 118/2011 és 37/2012. sz. korm. r. = Nukleáris Biztonsági Szabályzat kötetei - OAH

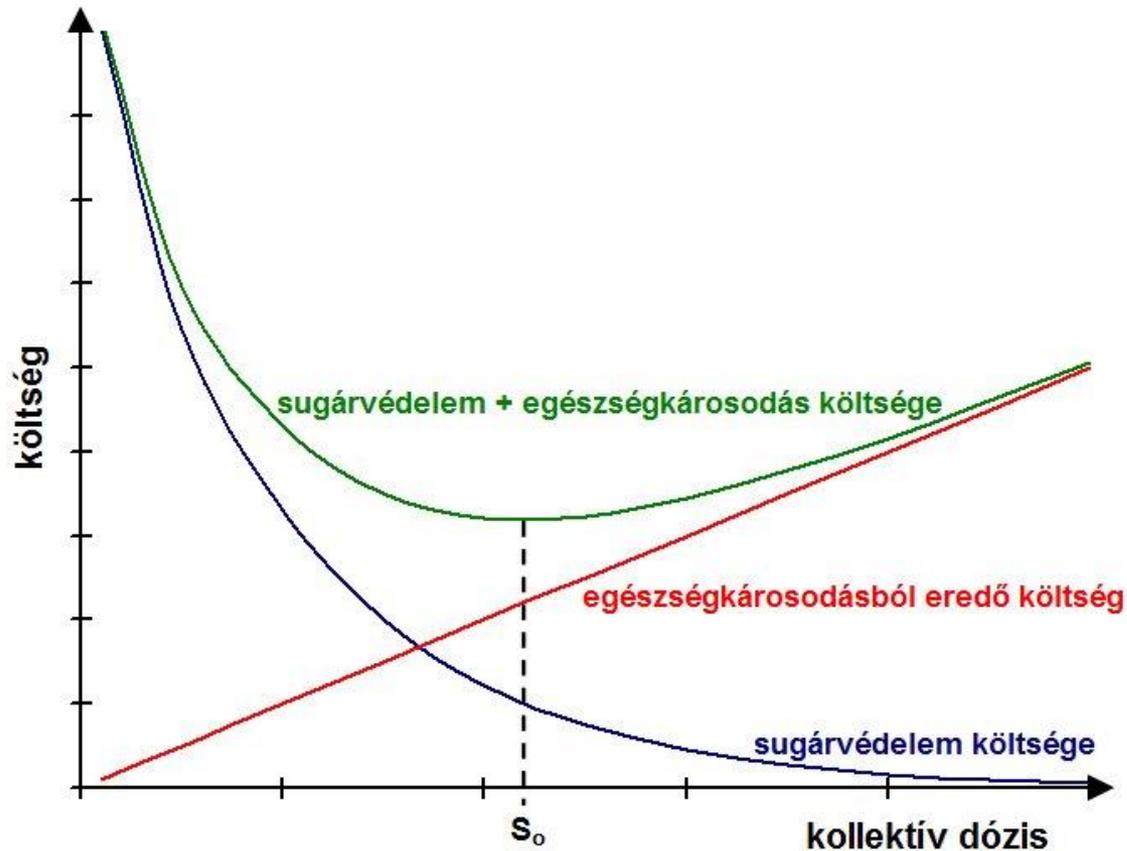
Sugárvédelmi szabályozás

- Determinisztikus hatáshoz vezető „forgatókönyv” legyen lehetetlen még „tervezhető balesetek” (design basis accident) esetén is
- Csak az „alkalmazásokhoz” kapcsolható dózis korlátozható, a természetes eredetű nem – a korlátozás a többletdózisra vonatkozik = kizárás (*exclusion*)
- Szabályozandó sugárzási helyzetek: tervezett, baleseti, fennálló

A sugárvédelem alapelvei

- Indokoltság: a sugárforrás alkalmazásának több előnye legyen, mint kára (*justification*)
- Optimálás: az „alkalmazás” a lehető legnagyobb előnnyel kell, hogy járjon – optimális dózisszint – tervezési alap – ALARA (As Low As Reasonably Achievable - *optimization*)
- Egyéni korlátozás – immissziós és emissziós korlátok – át nem léphetők, ha a tervezési alap helyes volt. (*limitation*)

Optimálás - ALARA-elv



ALARA (As Low As Reasonable Achievable) - A dóziskorlát alatti észszerűen elérhető legalacsonyabb szint = célérték

A sugárvédelmi szabályozás alá tartozó sugárzási helyzetek

- ICRP 103 (2007), IAEA GSR Part 3 és EU BSS (Basic Safety Standards – 2013/59/EURATOM) alapján:
Tervezett, veszélyhelyzeti és fennálló sugárzási helyzetek
- EU BSS (42. pont): A sugárzási veszélyhelyzetekhez és a meglévő (=fennálló) sugárzási helyzetekhez tartozó vonakoztatási szintek bevezetése ugyanolyan módon segíti az egyének védelmét és más társadalmi kritériumok figyelembevételét, mint a tervezett sugárzási helyzetekhez tartozó dóziskorlátok és dózismegszorítások.

Sugárvédelmi korlátok tervezett sugárzási helyzetekre

„Elhanyagolható dózis” $\leq 10 - 30 \mu\text{Sv/év}$ – közvetlenül nem deklarált szabályozó \rightarrow a MENTESSÉG és FELSZABADÍTÁS alapja – ilyen kicsi dóziskövetkezménynél a védelmi ráfordítások nem indokoltak

DL – dóziskorlát - *immisszió* korlátozása (miniszteri rendeletben):

effektív (lekötött) dózis; a külső és belső sugárterhelés összege	
foglalkozási korlát	20 mSv/év (5 év átlagában)
lakossági korlát	1 mSv/év

DC - dózismegszorítás - *emisszió* korlátozása (a létesítmények engedélyében): egy, a kritikus (lakossági vagy foglalkozási) csoporthoz tartozó fiktív személynek (=representatív személynek) az adott sugárforrástól származó effektív dózisa

kiemelt létesítményekre $DC = 0,1 - 0,03 \text{ mSv/év}$ \rightarrow kibocsátási szintek az egyes radionuklidokra

$$DC \ll DL$$

s: emissziós forrás (*source*)

$$DL \neq \sum_s DC_s$$

Sugárvédelmi szabályozás

Mentesség: Előzetes döntés alapján nem tartozik az atomtörvény hatálya alá az a radioaktív anyag,

a) amelyben a radionuklid teljes aktivitása, **vagy**

b) amellyel kapcsolatos tevékenység során az anyagban előforduló radionuklid egységnyi tömegre vonatkoztatott aktivitás koncentrációja

nem haladja meg a külön jogszabályban meghatározott mentességi szintet.

Mentességi szint (exemption level): [Bq] és [Bq/g] – a legkedvezőtlenebb forgatókönyv mellett sem okozhat az elhanyagolhatónál (= **10 μ Sv/év**) nagyobb dózist.

Előzetes mentesség = az alkalmazás tervezése során sem kell védelmi intézkedéseket alkalmazni, mert kicsi a károsítás kockázata.

Sugárvédelmi szabályozás

Felszabadítási szint (*Clearance level*)

A hatóság által meghatározott, aktivitás-koncentráció [Bq/kg] vagy [Bq/m²] egységekben kifejezett értékek, amelyeknél, ill. amelyek alatt a korábban még ellenőrzött sugárforrások kivonhatók a hatósági felügyelet alól.

Feltételes és feltétlen felszabadítás: a forgatókönyvtől függően vagy függetlenül szabadítható fel az anyag.

Korábban, az alkalmazásuk folyamán felügyelt (védelmi intézkedésekkel korlátozott) anyagok = üzemi és leszerelési radioaktív hulladékok – az alkalmazás befejezése, valamint kezelés után lecsökkent a kockázatuk – nem okoznak nagyobb dózist az elhanyagolhatónál. (= **10 µSv/év**)

Származtatott emissziós határértékek

Az egy személybe *bejutó* aktivitás (A_{\max}) sokkal kisebb, mint a *kibocsátható* (A_{ki})

$$\sum_i (A_{i,\max} \cdot e(g)_i) \leq DC$$

A_{\max} : Az adott dózismegszorítást betartva még bevihető aktivitás az i -edik nuklidból
 $e(g)$: belső dózistényező (egységnyi aktivitás által okozott belső sugárterhelés, ld. még később is)

$$KHK = \sum_i \frac{A_{i,ki}}{KH_i} < 1$$

$$A_{i,\max} \ll A_{i,ki} \text{ és } A_{i,\max} = f(A_{i,ki})$$

A normális üzemelés során kibocsátott aktivitásra **kibocsátási határérték (KH)** vonatkozik [Bq/év]. Kibocsátási határérték kritérium: KHK

Az emissziós korlátozás két lényegi eleme, a létesítmény környezetében élő lakosságra vonatkozó *dózismegszorítás* és a létesítményből

- * levegőbe és
- * vízi úton

kibocsátott *radioaktivitás* közötti kapcsolatot a **TERJEDÉSI MODELLEK** teremtik meg. A modell és egy valóságos terjedési folyamat összevetése a validálás.

A szabályozásban szereplő „standard” mérendő dózismennyiségek

- A dózismérők pusztán a fizikai (elnyelt) dózis mérésére alkalmasak
- A biológiai dózis a test minden pontján más, még homogén külső dózistérben is
- Személyi dózisegyenérték $H_p(d)$ – az emberi testszövetben d mm mélységben mérhető dózis
- Környezeti dózisegyenérték $H^*(d)$ – a standard összetételű ICRU gömbben (76% O, 11% C, 10% H, 3% N) d mm mélységben mérhető dózis
- Áthatoló sugárzásra $d = 10$ mm
- Gyengén áthatoló sugárzásra $d = 0,07$ mm

Irányadó szintek a dóziskorlátozáshoz baleset-elhárításban résztvevő személyek részére

Beavatkozás

$H_p(10)$

Életmentés

$< 500 \text{ mSv}^{(*)}$

Magyarország: 250 mSv

Determinisztikus sugárhatás megakadályozása

$< 500 \text{ mSv}$

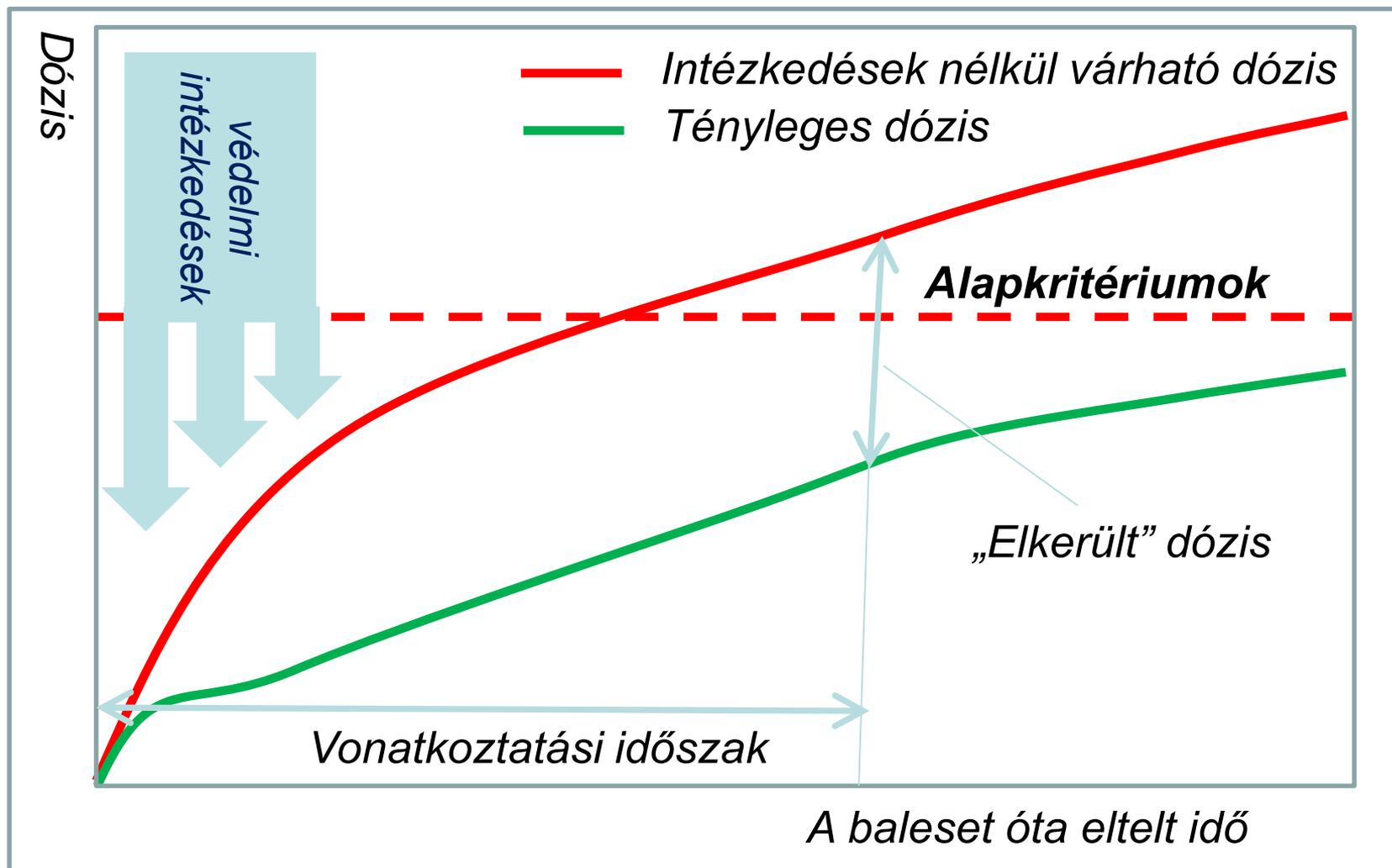
Súlyos baleset kifejlődésének megakadályozása

Nagy kollektív dózis megakadályozása

$< 100 \text{ mSv}$

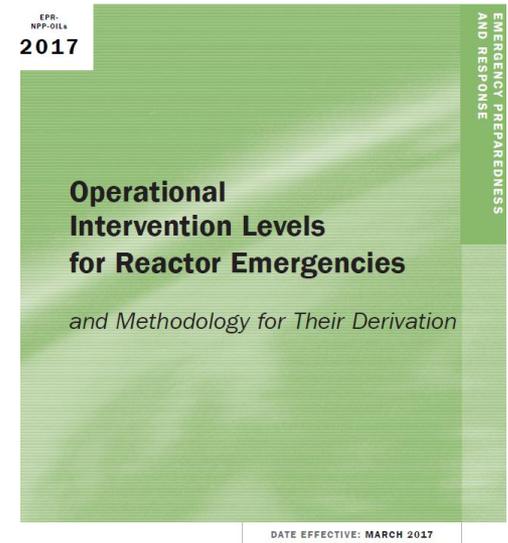
(*) Ez a szint túlléphető, amikor a másokkal kapcsolatban elérhető kedvező hatás fontosabb, mint a beavatkozó személy kockázata, a beavatkozó önként cselekszik, megismerte és elfogadja a kockázatot.

Balesetelhárítás tervezése – várható és tényleges lakossági dózis, alapkritériumok (10 – 100 mSv)

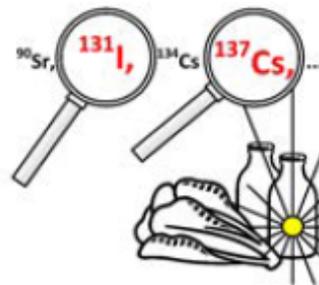


Származtatott intézkedési szintek (SzISz = OIL) élelmiszerek fogyasztásának tilalmára

Két, γ -spektrometriával könnyen meghatározható radionuklidot jelöltek ki: ^{131}I -t (az első hetekben jelentős) és ^{137}Cs -t (hosszú felezési idejű) reaktorbalesetekből származó kibocsátásokhoz. Ha $c_A < \text{OIL7}$, akkor az élelmiszerfogyasztásból származó dózis $< 10\text{mSv}$, az erre vonatkozó alapkritérium.



OIL7 1000 Bq/kg of I-131 and
200 Bq/kg of Cs-137



MONITORING OF FOOD,
MILK^e AND DRINKING
WATER SAMPLES
Activity concentration of I-131^f
and Cs-137^f in food, milk and
drinking water samples

A környezeti sugárzás monitorozásának szabályozása

489/2015. kormányrendelet (azóta többször módosítva) a lakosság természetes és mesterséges eredetű sugárterhelését meghatározó környezeti sugárzási helyzet ellenőrzési rendjéről és a kötelezően mérendő mennyiségek köréről – OKSER: Országos Környezeti Sugárvédelmi Ellenőrző Rendszer

Az ellenőrző adatszolgáltató központok segítségével végzett OKSER adatgyűjtési tevékenység minimális terjedelme: környezeti dózisteljesítmény, aktivitáskoncentráció: levegő, felszíni víz, ivóvíz, tej, egyéb élelmiszerek és takarmányok.

Jelentési szintek ^{137}Cs -re: levegőben $3 \cdot 10^{-2} \text{ Bq/m}^3$, tejben $0,5 \text{ Bq/dm}^3$

Környezeti jelentési szintek fennálló sugárzási helyzetek felismerésére

- A környezetbe jutott radioaktivitás belső sugárterhelésének hatása \leq a lakossági dóziskorlát. Határérték: c_L [Bq/kg]
- Meghatározása (esetenként):

m: élelmiszerfajta

(víz, tej stb.)

Q: fogyasztás [kg/év]

i: radionuklid

Γ : biztonsági tényező >1 (max. 5)

$e(g)_i$: az i-edik radionuklid inkorporációjára jellemző belső dózistényező (dóziskonverziós tényező) [Sv/Bq] – lásd később a belső sugárterhelésnél

$$c_{L,m,i} = \frac{RL}{\Gamma \cdot Q_m \cdot e(g)_i}$$

5. előadás

2020. X. 5.

RL: vonatkoztatási (irányadó) szint, a dóziskorlátnál kisebb

Sugárvédelem és jogi alapjai

2. rész

Fejezetek:

1. Mag- és sugárfizikai alapok
2. Dózismennyiségek
3. Az ionizáló sugárzás egészségkárosító hatásai, sugárvédelmi szabályzás

4. Sugárzásmérés alapjai

5. Természetes és mesterséges radioaktivitás, radioaktív hulladékok

6. Sugárvédelmi tevékenységek

Ionizáló sugárzás dózisának mérése és számítása

Külső dózis

- Hitelesített dózismérővel, dózisteljesítmény-mérővel mérhető
- Számítási egyenlet (foton-dózisteljesítményre)
- k_y [($\mu\text{Gy/h}$)/(GBq/m^2)] külső dózistényezők: radioaktív pontforrásokra és detektoranyagra (=levegő- vagy testszövet-ekvivalens) határozható meg

Belső dózis - közvetlenül nem mérhető, csak radioanalitikai mérési eredményekből számítható

- Meghatározás módjai: egésztest-számlálás, résztestszámlálás, vér- és exkrétum-analízis, bejutó anyagok (levegő, víz, ételek) analízise
- $e(g)$ [Sv/Bq] belső dózistényezők (dóziskonverziós tényezők) – egységnyi radioaktivitás inkorporációjához köthető effektív dózis – használatához az „egyszerre” bevitt aktivitás ismerete szükséges
- A dózist főként a radioaktivitást hordozó anyag tartózkodási ideje határozza meg, $e(g)$ függ a bevitt anyag kémiai formájától, a személy életkorától és a beviteli útvonaltól is
- Akut (pillanatszerű) vagy krónikus (folyamatos) bevitel – eltérő effektív dózist eredményeznek

Külső sugárterhelés mérése

Dózismérés: „utólagos” kiértékelés – személyi dozimetria

- filmdózismérő - kémiai változás
- TLD: szilárdtest-dózismérő (termolumineszcencia) – 2014 óta ez a hatósági eljárás Magyarországon is
- „aktív” dózismérők (EPD = electronic personal dosimeter): impulzusüzemű gáztöltésű detektorok, félvezető detektorok – működésükhöz energiaforrás szükséges
- buborék detektorok stb.

Dózisteljesítmény-mérés: azonnali kiértékelés – területi dozimetria

- Impulzus- vagy áramüzemű gáztöltésű detektorok
- szerves szcintillációs detektor

Követelmények:

- „energiafüggetlenség”: a kijelzett összes (=összegzett) dózis ne függjön az egyes részecskék által külön-külön leadott energiától
- Intenzitás/dózisteljesítmény arányosság
- Felejtés = 0 – a dózis ne változzék a mérés és a kiértékelés között

Külső sugárterhelés mérésének feltétele – a szövetekvivalencia követelménye

A detektort és a mérendő személyt azonos távolságba helyezve a sugárforrástól mindkettőt azonos fotonenergiafluxus éri.

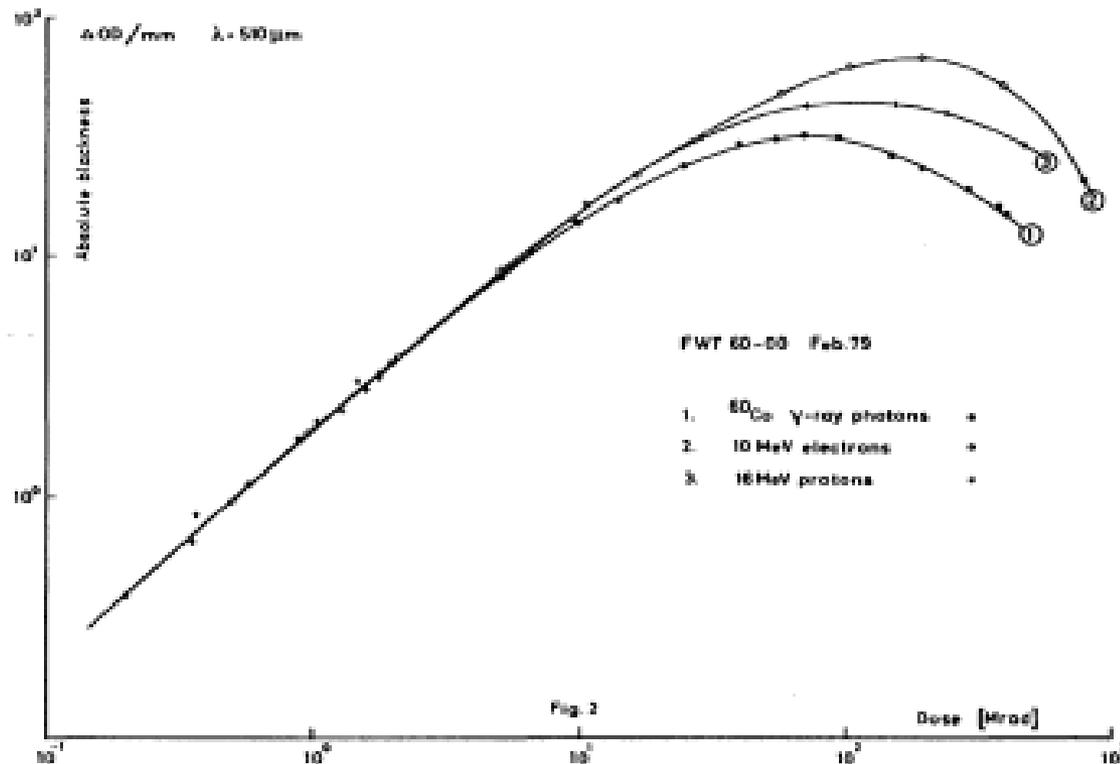
$$\frac{D_x}{D_m} = \frac{\Phi_{E,x}}{\Phi_{E,m}} \cdot \frac{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_x}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_m} = f_m$$

Dózisarányosság = Az összetett abszorpciós együttható energiafüggése legyen azonos a detektorra és a testszövetre = szövetekvivalens detektor („energiafüggetlenség”)

Az energiafüggés csökkentése: energiaszűrők a forrás és a detektor érzékeny térfogata között

Külső sugárterhelés mérése

Filmdózismérő válaszjelének dóziszfüggése



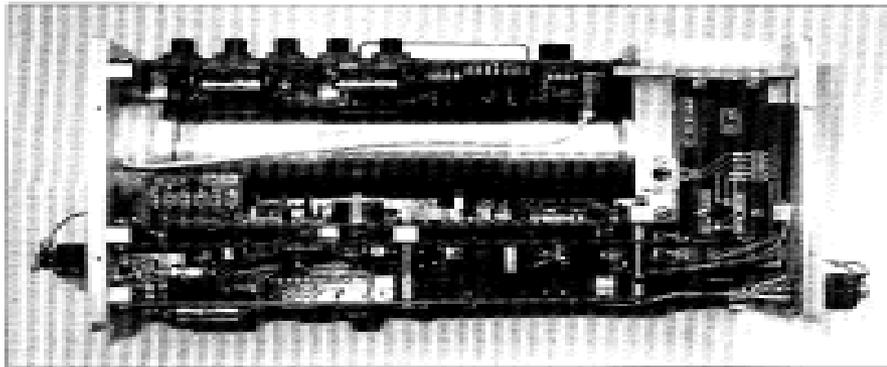
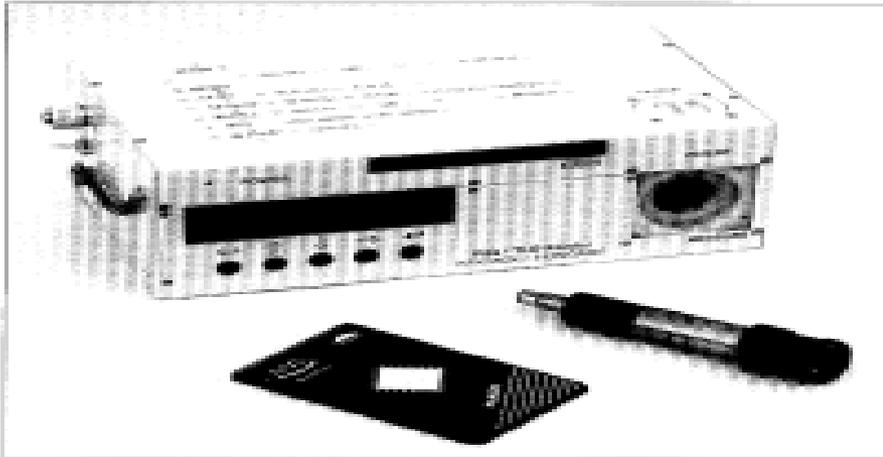
Hivatalos dózismérő
Magyarországon
2013-ig, utána: TLD

Külső sugárterhelés mérése

TLD detektor és kiolvasó „Pille” és az újabb „PorTL”

1-2. ábra Az ASES-en repülő Pille rendszer elemei (kiolvasó, dózismérő Asics, mandriklány) és a kiolvasó berendezések képe

3. ábra TL-erőforrás felvétel boratónium



TL anyagok:

Fotonsugárzásra:

CaF_2 , CaSO_4 , LiF , Al_2O_3

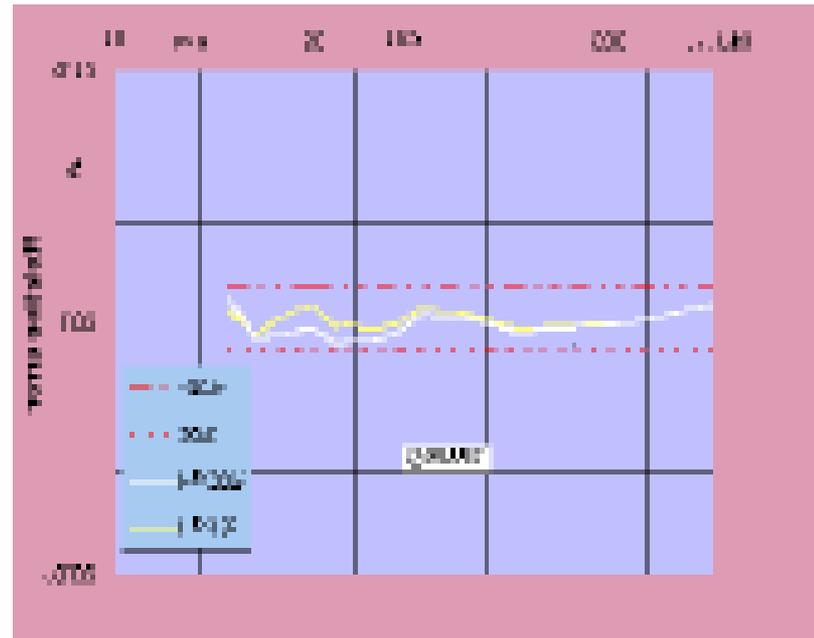
Neutronokra is alkalmas:

$^6\text{LiF} + ^7\text{LiF}$



Külső sugárterhelés mérése

Személyi elektronikus dózismérő (EPD) félvezető detektorral (GN = gamma és neutron)



Egységnyi kijelzett dózis függése a sugárzás energiájától

Külső sugárterhelés mérése

FH-40-G
dózisteljesítménymérő



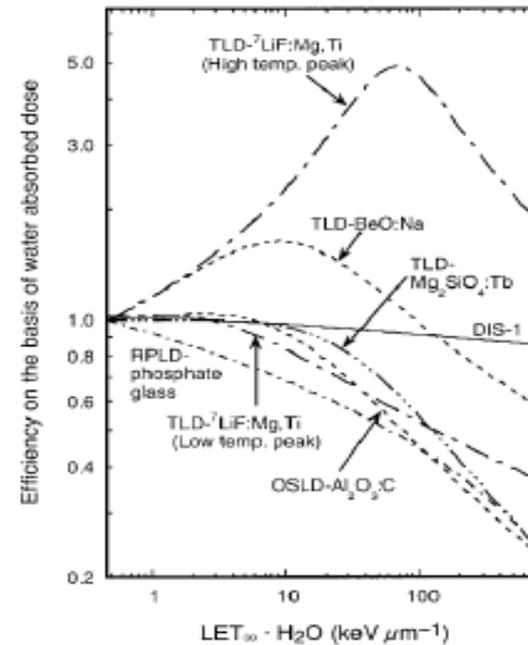
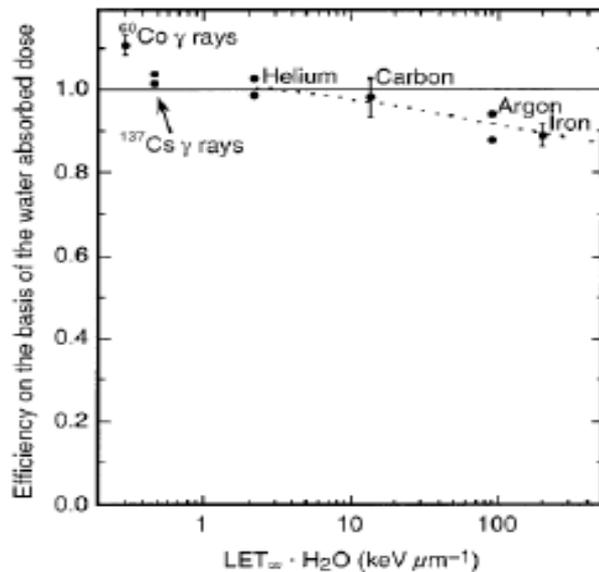
Buborékdetektor neutronok
dózisának mérésére



Dózismérők válaszjelének energiafüggése

DIS = Direct Ion Storage (elektronikus dózismérő)

DIS 1

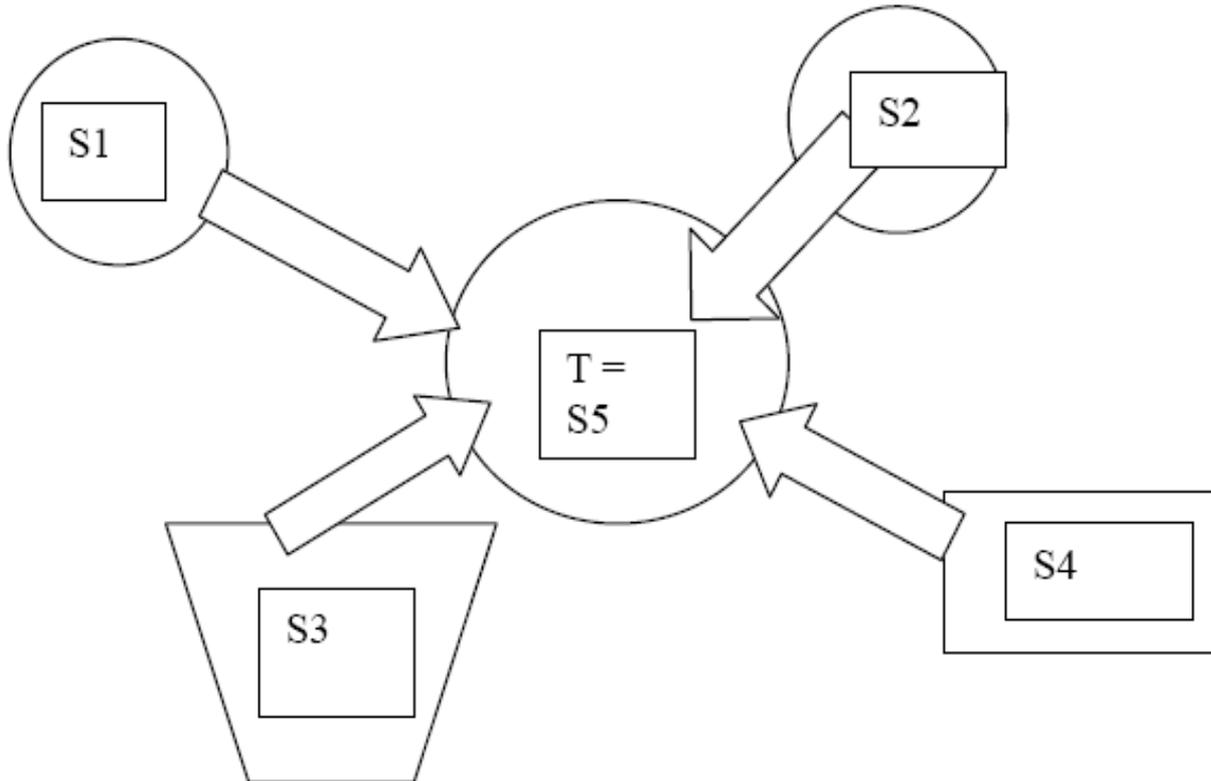


Absorbed dose response of the DIS-1 to heavy charged Particles [Ysuda, 2001] even better than that of TLDS



Belső sugárterhelés

A személy belső sugárterhelésével előálló effektív dózist az egyes szövetek eltérő egyenértékdózisainak összegzéséből kapjuk, a dózist a radioaktív anyagot tartalmazó szövetekből kiinduló sugárzás (radiation R) okozza: célpont- (target T) és forrás- (source S) szöveteket különböztetünk meg. (S=T is lehetséges)



Belső sugárterhelés dózisa egy adott inkorporált radioizotóptól

Egy adott radionuklidtól származó effektív dózist az egyes szövetek egyenértékdózisából kapunk. A radionuklidot tartalmazó szövetekből kiinduló sugárzás (radiation - R) okozza: célpont- (target - T) és forrás- (source - S) szöveteket különböztetünk meg. (S=T is lehetséges)

$$H_T = \left[\sum_S u_S \cdot \sum_R w_R \cdot E_R \cdot f_R \cdot Q_R (S \rightarrow T) \right] \cdot \frac{1}{m_T}$$

A H_T szöveti egyenértékdózszt radioizotóponként külön-külön kell meghatározni.

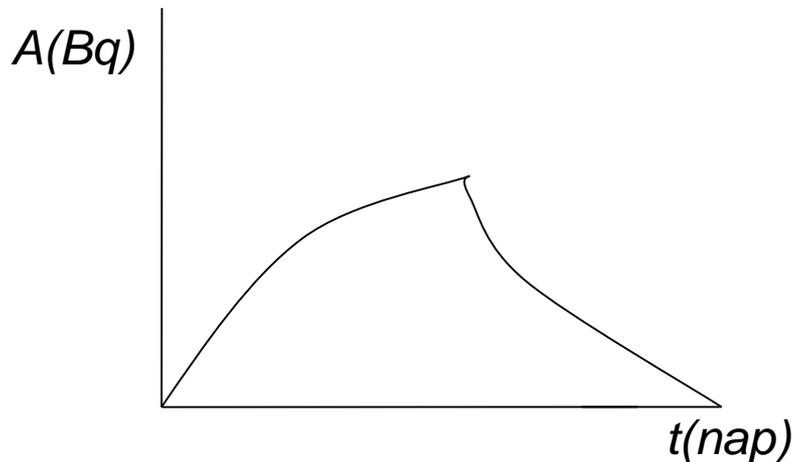
u_S : az egyes forrás-szövetekben bekövetkező bomlások száma [darab]

w_R : sugárzási tényező [Sv/Gy] E_R : sugárzási energia [keV/részecske]

f_R : részecske-gyakoriság [részecske/bomlás] m_T : a célpont-szövet tömege [kg]

Q az R sugárzásfajtának az S szövetből kiinduló és a T szövetben energiát leadó hányada (elnyelési hányad)

Belső sugárterhelés számítása



Az aktivitás bejutását, megkötődését és kiürülését leíró időfüggvény egy példája – u_s (a „forrás” szövetben történő bomlások száma) e függvény integráljaként számítható. Meghatározásához a radioaktív anyag biokémiai formájának ismerete elegendő – nem kell hozzá besugárzás.

$Q_R(S \rightarrow T)$ az R sugárzási alkotó részecskék energiájának az S szövetből a T szövetbe jutó és ott elnyelődő hányada. Függ

- a sugárzás hatótávolságától
- a szövetek „geometriai” elrendezésétől
- a szövetek sugárzáselnyelő képességétől

Meghatározása modellszámításokkal történik.

Külső és belső sugárterhelés számítása

Külső sugárterhelés: a sugárforrás aktivitásának és a detektor-forrás távolságnak ismeretében számítható. (A forrás és a személy közötti közegek sugárzásgyengítő hatását egyelőre elhanyagoljuk.)

$$\dot{D}_0 = k_\gamma \cdot \frac{A}{r^2}$$

$k_\gamma =$ külső dózistényező

Belső sugárterhelés: a forrás- és célpontszövetekre meghatározott számítási egyenlet elemeit modellezzük, és a modellből meghatározzuk a dóziskonverziós tényezőt:

$e(g)$ [Sv/Bq] – egységnyi aktivitás egyidejű inkorporációjából származó effektív dózis (H_E/A_{BE})
– függ: sugárzástípus, kémiai forma, beviteli mód, életkor

Együtt vonatkozik

- radionuklidra
- az elnyelő anyagra

$$H_E = e(g) \cdot A_{BE}$$

$e(g)$ = belső sugárterhelés dózistényezője (dóziskonverziós tényező)

A bejutott aktivitást radioanalízissel kell meghatározni.

Példa külső sugárterhelés számítására

Külső sugárterhelés: egy 0,5 GBq-es ^{60}Co sugárforrás szerelését hány percig végezheti valaki 10 cm távolságból úgy, hogy dózisa kisebb legyen, mint $10\ \mu\text{Sv}$ (az adott munkára meghatározott dózismegszorítás)?

$$k_{\gamma}=305\ (\mu\text{Sv/h})/(\text{GBq}/\text{m}^2)$$

(Az előadáson bemutatjuk a számítást.)

Példa belső sugárterhelés számítására

Belső sugárterhelés: Mekkora dózisa lesz 1 év alatt egy embernek a saját ^{40}K -tartalmától?
Feltételezzük, hogy a kálium – mivel igen jól oldódik – egyenletesen oszlik el a testnedvekben, és így a testben. (K-tartalom 0,2 %, ^{40}K -atomhányad 0,0117 %, testsúly 70 kg, ^{40}K -felezési idő $1,277 \cdot 10^9$ év, gamma-sugárzás elnyelési hányada 37 %, béta- és röntgensugárzás elnyelési hányada 100 %, gamma-energia (elektronbefogás kísérője) 1461 keV, gamma-gyakoriság 11 %, átlagos béta-energia 510 keV, béta-gyakoriság 89 %, röntgen-energia 3 keV)

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

(Az előadáson bemutatjuk a számítást.)

Természetes radioaktivitás

Összetevői:

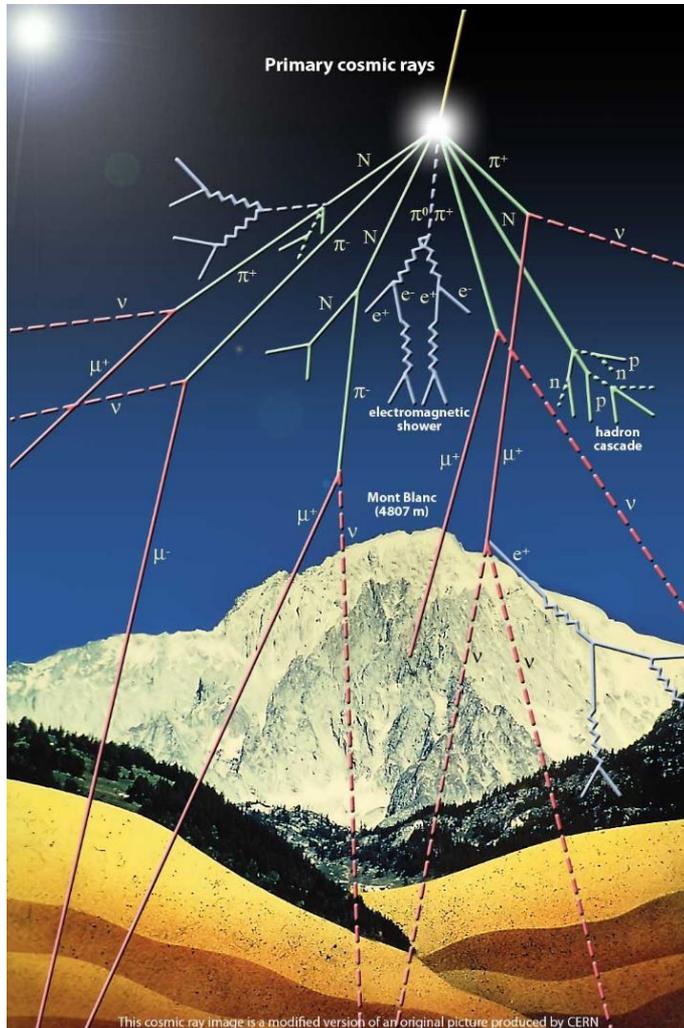
- Kozmikus sugárzás (*primer sugárzás*: protonok, más atomok, fragmentumok jutnak el a felső légkörbe, *szórt sugárzás*: müonok, fékezési fotonsugárzás és egyre kisebb intenzitású neutronsugárzás a Föld felszíne közelében, a primer részecskék szóródásából)
- Kozmogén radionuklidok (a primer kozmikus sugárzás és a légkör atomjainak magreakcióiból)
- Ősi radionuklidok: a mintegy 5 milliárd éve létrejött Naprendszer előtti ősnap „termékei”

A kozmikus sugárzás külső-, a radionuklidok külső és belső sugárterhelést is okoznak.

Természetes radioaktivitás

- **Kozmikus sugárzás:** *primer* - eredet szerint: szoláris, galaktikus, extragalaktikus (szoláris: „Napszél” – ciklikusan változó intenzitású) >95 %-ban protonok
szórt: müonok (elektronokká és fotonokká bomlanak), neutrínók, neutronok; a felszínen a kozmikus eredetű foton-dózisteljesítmény 30 – 40 nSv/h, neutrontól 0,1 – 1 nSv/h.
- **Kozmogén radionuklidok:**
N és O magreakcióiból: ^3H ($T_{1/2}=12,3$ év, igen lágy β^- -sugárzó),
 ^7Be ($T_{1/2}=53,3$ nap, EC és γ -sugárzó)
 ^{14}C ($T_{1/2}=5730$ év, lágy β^- -sugárzó)
 ^{36}Ar , ^{38}Ar , ^{40}Ar (99,6 %) magreakcióiból:
 ^{22}Na , ^{36}Cl

Kozmikus sugárzás összetevői



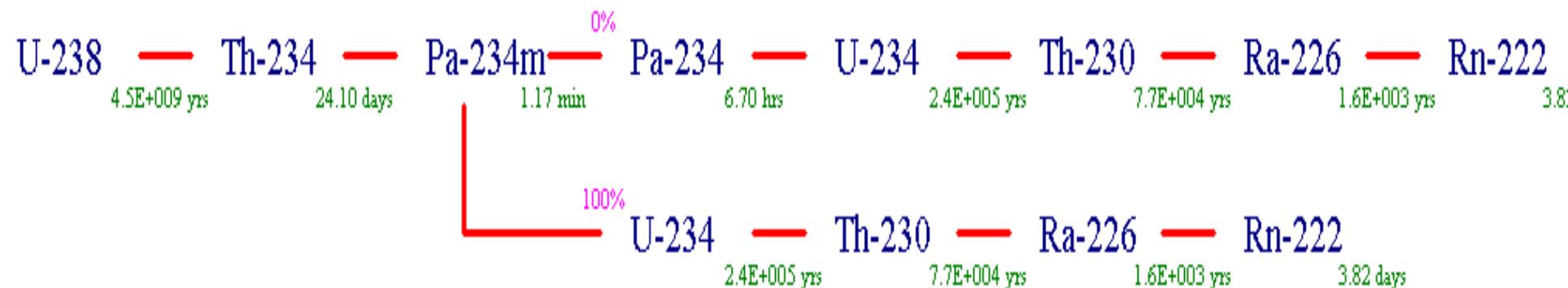
Nagy tengerszint feletti magasságban „pulzált” sugárzási tér – elektromágneses- és hadronikus kaszkádok a ritkán beérkező nagyenergiás kozmikus részecskéktől kiindulva; a tengerszinten „folyamatos, véletlenszerű” sugárterhelés – eltérő típusú berendezések szükségesek a pontos meghatározáshoz.

Forrás: CERN

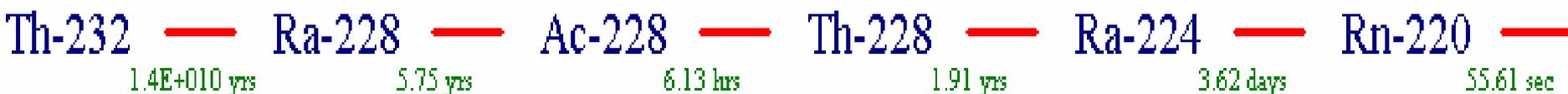
Természetes radioaktivitás

Elem	Ősi radionuklid
Kálium	^{40}K (0,012%) $T_{1/2} = 1,28 \cdot 10^9 \text{ a}$
Tórium	^{232}Th (100%) [4n] $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ a}$
Urán	^{234}U (0,00548%) $T_{1/2} = 2,44 \cdot 10^5 \text{ a}$
	^{235}U (0,714%) [4n+3] $T_{1/2} = 7,04 \cdot 10^8 \text{ a}$
	^{238}U (99,28%) [4n+2] $T_{1/2} = 4,47 \cdot 10^9 \text{ a}$

Természetes bomlási sorozatok a radonig



Radon

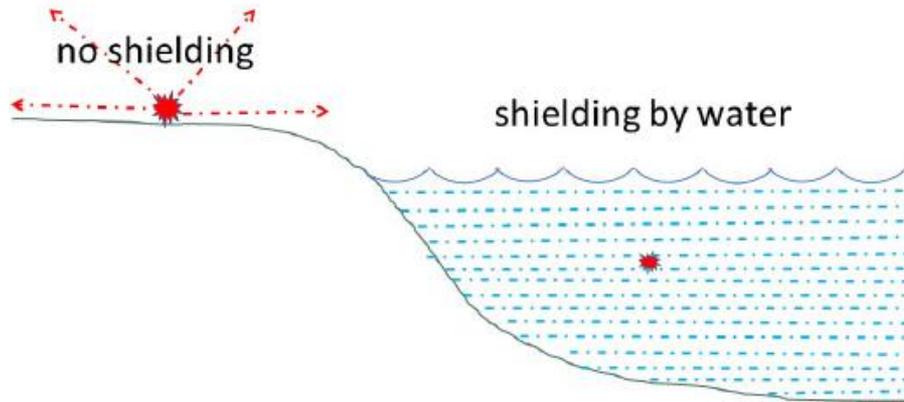


Toron

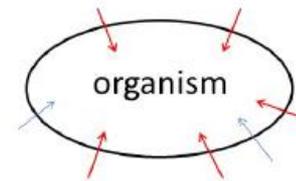
A radon (^{222}Rn) leányelemei

^{222}Rn	$T_{1/2} = 3,82 \text{ d}$	α (5,5 MeV)	
<hr/>			
^{218}Po	$T_{1/2} = 3,05 \text{ m}$	α (6,00 MeV)	
^{214}Pb	$T_{1/2} = 26,8 \text{ m}$	β (185 keV – 1,02 MeV) γ (295 keV, 352 keV + gyengébb vonalak)	
^{214}Bi	$T_{1/2} = 19,9 \text{ m}$	β (526 keV – 1,26 MeV) γ (76 keV...2,45 MeV 14 intenzív gammavonal)	
^{214}Po	$T_{1/2} = 0,16 \text{ ms}$	α (7,69 MeV)	<i>A légúti dózist okozó radionuklidok</i>
<hr/>			
^{210}Pb	$T_{1/2} = 22 \text{ a}$	β, γ (kis energiájú)	
^{210}Bi	$T_{1/2} = 5 \text{ d}$	β (300 keV...1,16 MeV)	
^{210}Po	$T_{1/2} = 138 \text{ d}$	α (5,3 MeV)	

„Too much fear for radioactive contamination in seawater”

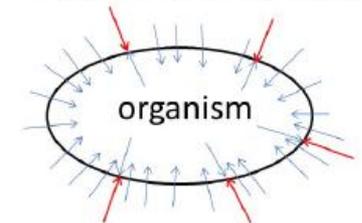


few competing isotopes

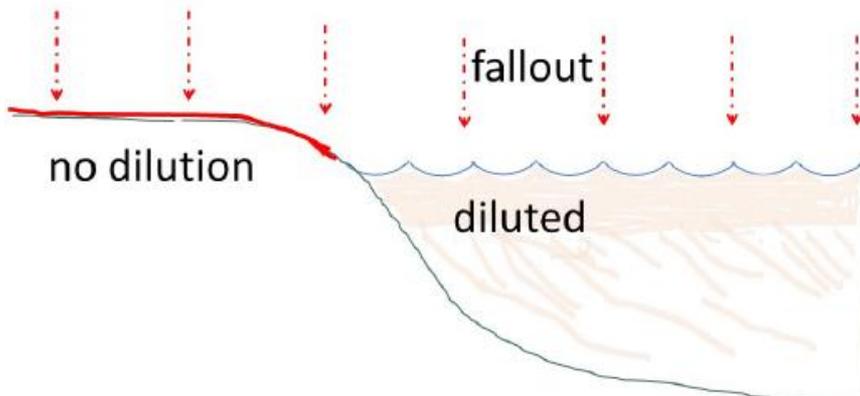


fresh water

many competing isotopes



seawater



no dilution

diluted

J. Goudriaan cikke az „*Europhysics News*” folyóiratban

Fukushima után a maximális tengervíz-koncentráció: 25 Bq/dm^3 ^{137}Cs és ^{134}Cs volt – IAEA által javasolt „intézkedési szint” ^{137}Cs -ra élelmiszerben 200 Bq/kg .
Viszont...

„Too much fear for radioactive contamination in seawater”

the Radiation Dose Chart <https://xkcd.com/radiation/>. Bio-accumulation of polonium also explains the large internal radiation dose in dolphins which was found to be even three orders of magnitude higher than the average radiation dose in man (Malta and Carvalho, 2011). In dolphins 97% of their radiation dose came from polonium against only 3 % from ^{40}K and ^{14}C .

A hosszú felezési idejű ^{222}Rn -származék ^{210}Pb -ot követő utolsó radioaktív izotóp az α -sugárzó ^{210}Po . A tengeri növényevők fő táplálékforrása a tengeri „mikroplankton” flóra, ami sok ^{210}Po -t köt meg.

polonium (Hosseini et al., 2008; Carvalho, 2018). Seafood has an important share in the Japanese diet and it contributes 0.80 mSv per year to the average human radiation dose in Japan, largely due to polonium. The average radiation dose from food is only 0.12 mSv per year worldwide (Ota et al., 2009). An instructive visual representation of the contribution of various

További természetes bomlási sorozatok

^{232}Th : $T_{1/2} = 14,1$ milliárd év (7-10 ppm a földfelszín közelében)

bomlási sor: $4n$ (α és β^- bomlások)

leányelemek: köztük ^{220}Rn „toron”

^{220}Rn ($T_{1/2} = 55$ s) – kevésbé tud kikerülni a levegőbe
dózisjárulék $0,1$ mSv/év

^{235}U : $T_{1/2} = 0,71$ milliárd év (a természetes urán $0,7$ %-a)

bomlási sor: $4n+3$

a nukleáris energiatermelés legfontosabb alapanyaga:

indukált hasadás neutronok hatására

leányelemek: köztük ^{219}Rn „aktinon” ($T_{1/2} = 4$ s)

A ^{220}Rn (toron) leányelemei

^{220}Rn	$T_{1/2} = 55,6 \text{ s}$	α (6.3 MeV)
<hr/>		
^{216}Po	$T_{1/2} = 0,15 \text{ s}$	α (6.77 MeV)
^{212}Pb	$T_{1/2} = 10,6 \text{ h}$	β (100 keV) γ (87keV-300KeV)
^{212}Bi	$T_{1/2} = 61 \text{ m}$	γ (70keV – 1.8MeV)
^{212}Po	$T_{1/2} = 0,3 \mu\text{s}$	α (8,78 MeV)
^{208}Tl	$T_{1/2} = 3,1 \text{ m}$	β (200....700keV) γ (84keV...2.6MeV)

A ^{222}Rn -tól és jóval kisebb mértékben ^{220}Rn -tól származó légúti belső sugárterhelés mechanizmusa

- A radon és toron elbomlik a légtérben;
- A bomlástermékek fémionként rátapadnak a levegőben lebegő porra, vízgőzre;
- A belélegzett részecske kiülepedik/rátapad a légúti sejtekre (egyenetlen eloszlásban);
- Az alfabomlások a ^{222}Rn termékeinél általában még a kiürülés (nyirok általi lemosás) előtt bekövetkeznek.
- A légutak általános állapota befolyásolja a kitapadást és az eltávolítás sebességét. (pl. a dohányzás által okozott irritáció káros hatású)

Radonszintek

^{222}Rn ($T_{1/2} = 3,8$ nap)

rövid felezési idejű, α - és β -sugárzó leányelemei:

^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po

belső sugárterhelés: átlagosan **1,0 – 2,0 mSv/év**

^{222}Rn -leányelem koncentráció (EEC – egyensúlyi egyenérték koncentráció = az a radonszint, amelyhez a mért leányelem-koncentrációk tartoznának bomlási egyensúly esetén) értékei:

szabad levegőn 1 – 10 Bq/m³

zárt térben általában 5 – 100 Bq/m³ (a radon mennyiségét csökkentő intézkedés szükséges 200 – 1000 Bq/m³ felett – országonként változó határérték)

sok radon: pince, bánya, barlang (de a vizes barlang kevésbé veszélyes), salakos fedés

kevés radon: víz (tenger) felett

uránbányában 10⁵ – 10⁶ Bq/m³

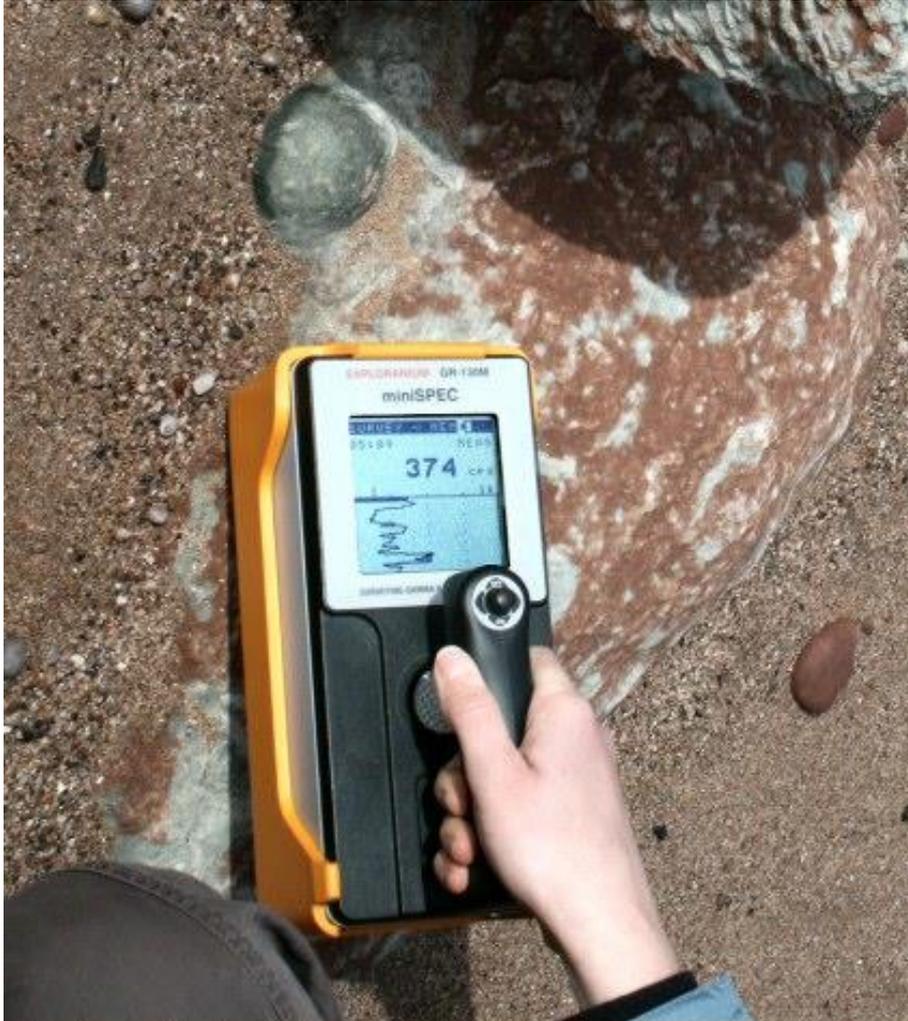
tiszta, párás levegőben EEC $\ll c_{\text{Rn}}$

Radonban gazdag terület Európában: Devon, Egyesült Királyság



A LARGE, RADIOACTIVE, VANADIUM-URANIUM NODULE IN THE PERMIAN LITTLEHAM MUDSTONES AT LITTLEHAM COVE, NEAR BUDLEIGH SALTERTON, DEVON. This example is of about 8cm diameter and has been exposed by recent storms. They are partially replacive and partially displacive. Thus they do not split the red mudstone wide-open, but produce radial cracks, both horizontally and vertically. They are strongly reducing in an oxidising environment (which can transport uranium). While not particularly dangerous, they should not be carried away from the beach in a trouser pocket for obvious reasons and not handled more than is necessary. Perutz (1939) estimated the total content of radioactive elements to be equivalent to 0.3% to 0.5% uranium. In the dark, their radiation will affect photographic paper. They occur in the general area of the Exmouth radon peak of South Devon. Photograph courtesy of Jason Mark Scott. webpage - Ian West, 2016.

Természetes sugárzási környezet – Devon, UK



„Forró pontok” felismerése

A Southampton University student uses an Exploranium Gamma Spectrometer to record the radiation output at various wavelengths of a uranium-vanadium nodule at Littleham Cove, Devon, UK. The data is transferred in the field to a laptop computer for further investigation.
Jon West & Joanna Bentley (c) 2007.

2015-ös EURATOM-ajánlás a radonszintre

- Recent epidemiological findings from residential studies demonstrate a statistically significant increase of lung cancer risk from prolonged exposure to indoor radon at levels of the order of 100 Bq m^{-3} .
- National action plans are needed for managing long-term risks from radon exposure. They also provide a means to consider other factors including tobacco smoking. It is scientifically established that most lung cancers attributable to radon can be avoided by smoking cessation.
- Magyarországon: 1114/2019. kormányhatározat a „Nemzeti Radon Cselekvési Terv” elfogadásáról (országos reprezentatív radonvizsgálati program stb.)

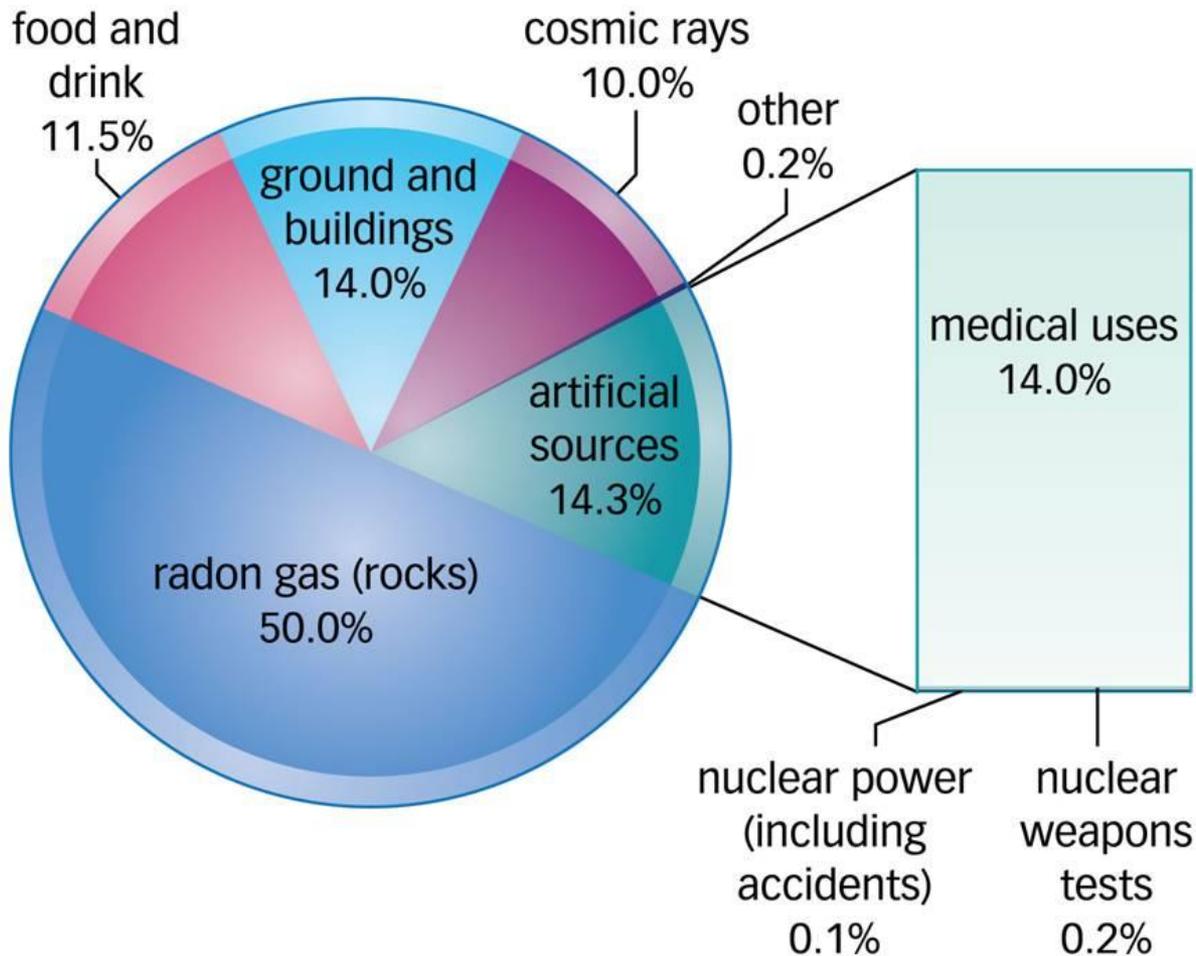
Teljes természetes sugárterhelés

Európában átlagosan **2 - 3 mSv/év**

- belső sugárterhelés 65 – 70 % (radon, toron, ^{40}K , ^{14}C)
- külső sugárterhelés 30 – 35 % (kozmosz sugárzás, ősi nuklidok γ -sugárzása a talajból, építőanyagokból)

orvosi eredetű sugárterhelés: átlagosan 1,2 mSv/év (Mo., 2008-ban)

Lakossági sugárterhelés – „radiation pie”



Forrás: Public Health England

Mesterséges radioaktivitás – radioaktív hulladékok/üzemi kibocsátások

- ❑ Nukleáris reaktorok hulladékai
 - hasadási termékek (pl. ^{131}I , ^{137}Cs – az illékony és reaktív anyagok a veszélyesebbek)
 - fűtőanyag neutronaktivációs termékei (pl. ^{239}Pu – α -sugárzó, nagy DCF)
 - szerkezeti anyagok (acél, beton, egyéb) neutronaktivációs („korróziós”) termékei (pl. ^{60}Co)
- ❑ Egyéb nukleáris létesítmények (kutatóreaktorok stb.) hulladékai
- ❑ Katonai hulladékok: nukleáris robbantások, fegyverkísérletek, elhagyott források stb.
- ❑ Hulladékká váló ipari sugárforrások
- ❑ Orvosi (diagnosztikai és terápiás) hulladékok
- ❑ „TENORM”: mesterséges okból megnövekedett természetes sugárterhelés – nem zárható ki a szabályozásból

TENORM - természetes eredetű, de mesterséges okból megnövekedett radioaktivitás

TENORM – ot produkáló eljárások:

1. *Bauxitbányászat, -feldolgozás*
2. *Cirkonhomok felhasználás (pl. kerámiagyártás)*
3. *Fémércbányászat, érckohászati feldolgozás*
4. *Foszfátérc feldolgozás, műtrágyagyártás*
5. *Geotermikus energia felhasználás*
6. *Kőolaj és földgáz kitermelés (beleértve a kutatófúrásokat is)*
7. *Ritkaföldfém bányászat és -feldolgozás*
8. *Szénbányászat, széntüzelésű erőművek*
9. *Uránércbányászat és –feldolgozás (nem nukleáris célokra)*

Radioaktív hulladékok szabályozása Magyarországon

A mentességhez és felszabadításhoz rendelt effektív dózis 10 - 30 $\mu\text{Sv}/\text{év}$. A hatályos szabályozás a 487/2015. és 27/2018. kormányrendelet szerint:

$$S = \sum_i \frac{AK_i}{MEAK_i}$$

S (=HI „hazard index” =WI „waste index”) veszélyességi mutató

MEAK: Specifikus vagy általános mentességi aktivitás-koncentráció [Bq/kg]

AK: aktivitás-koncentráció [Bq/kg]

i : a hulladékcsomag radioizotópjai

Nagyon kis aktivitású hulladék (VLLW) $S \leq 50$, $T_{1/2} < 30$ év

Kis aktivitású hulladék (LLW) $1 < S < 1000$

Közepes akt. h. (ILW) $10^3 < S < 10^6$

Nagy akt. h. (HLW) $S > 10^6$, hőfejlődés $> 2 \text{ kW}/\text{m}^3$

Radioaktív hulladékok szabályozása

IAEA General Safety Guide (GSG) - 2009 és General Safety Requirements Part 3 = GSR Part 3 – 2014) ajánlása = új magyar szabályozás:

„csekély” (= moderate) mennyiség: mentességi szintek [MEAK] → specifikus mentességi aktivitáskoncentráció [SMEAK]

„jelentős” (= bulk) mennyiség (>1 t): felszabadítási szintek [FEAK] → általános mentességi aktivitáskoncentráció [ÁMEAK]

Radioaktív hulladékok minősítése – viszonyítási alap: SMEAK vagy ÁMEAK

„Forgatókönyv”: a radioaktív anyag felhasználási vagy tárolási helyétől a sugárzástól a legnagyobb dózist elszenvedő reprezentatív személyhez (a kritikus csoport tagjaihoz) vezető „dózisokozási” útvonal.

Kiindulás: forrástag (aktivitás-koncentráció) = az izotópleltár adott hányada;

Végpont: okozott külső és/vagy belső sugárterhelés = effektív (lekötött) dózis.

Radioaktív hulladék menedzsment

- Gyűjtés
- Osztályozás, minősítés I.
- Térfogatcsökkentés
- Kondicionálás (immobilizálás, elhatárolás a környezettől)
- Minősítés II.
- Átmeneti és/vagy végleges elhelyezés

További, radioaktív hulladékokkal kapcsolatos műveletek = kiégett nukleáris üzemanyag reprocesszálása, hosszú felezési idejű hulladék-komponensek transzmutációja

Radioaktív hulladék menedzsment

- 1) Gyűjtés – munkahelyen (az engedélyes által), kijelölt tárolóhelyeken. Szempontok:
- (későbbi) minősítés várható értéke szerint; felületi dózisteljesítmény segítségével
 - halmazállapot szerint
 - éghetőség szerint
 - toxicitás (egyéb veszély) szerint

Radioaktív hulladék menedzsment

2) Minősítés:

- elsődlegesen a veszélyességi index alapján
- felezési idő szerint (nagyon rövid/rövid/hosszú; határoló értékek: 65 nap/30 év)
- felületi γ -dózisteljesítmény szerint
 - < 300 $\mu\text{Sv/h}$: KAH (=LLW)
 - 0,3 – 10 mSv/h : KöAH (=ILW)
 - > 10 mSv/h : NAH (=HLW)
- α -sugárzó izotópok jelenléte/hiánya

Radioaktív hulladék menedzsment

- Minősítés – „kulcsnuklidok” és nehezen (csak mintavételezéssel és radioanalízissel) mérhető radionuklidok arányának („scaling factor”) meghatározása az egyes hulladéktípusokra
- Kulcsnuklidok: gammaspektrometriával, a burkolat megbontása nélkül, a hulladék feldolgozásának teljes időtartama (akár több év) mérhető radionuklidok – pl. ^{137}Cs (hasadási termék), ^{60}Co (aktivációs „korróziós” termék)

Radioaktív hulladék menedzsment

3) Térfogatcsökkentés: *gazdaságossági (minél kisebb térfogat) és sugárvédelmi (minél kisebb dózis) szempontok optimuma*

Általános és szelektív eljárások – aszerint, hogy az adott *hulladékáram* valamennyi komponensére hatnak, vagy csak egy (vagy több) kiválasztottra.

Általános: prézelés, bepárlás, szűrés, hőkezelés

Szelektív: csapadékképzés, ioncsere, adszorpció, extrakció

Radioaktív hulladék menedzsment – térfogatcsökkentés

Térfogatcsökkentés présseléssel: „supercompactor”



Radioaktív hulladék menedzsment

4) Kondicionálás: célja a hulladék *szilárdítása, hosszú távú ($\sim 20 T_{1/2}$) stabilitás* a kijutás gátlására

Módszerek: cementezés (LLW – ILW), üvegesítés (vitrifikálás - HLW), öntvénykészítés, bitumenezés

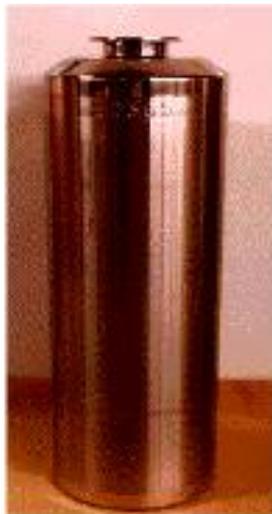
Paksi Atomerőmű: FHF - folyékony hulladékok elválasztására és cementezésére kidolgozott és engedélyezett eljárás, fő szempontok: ^{137}Cs és ^{60}Co megkötése, kondicionálás cementezéssel

Bátaapáti NRHT, Püspökszilágyi RHFT: hulladéklerakók, kondicionálásra alkalmas munkaterülettel

Cementező berendezés és egy próbadarab a Cernavodă-i (Románia) atomerőműben



Üvegesített radioaktív hulladék tárolókonténerre és próbatestek (Svájc, Nagy-Britannia)



19.3.5-14. ábra: Üvegezett hulladékot tartalmazó konténer [19-32]



Radioaktív hulladék menedzsment

5) Végső minősítés

A kondicionált és csomagolt hulladék már nem bontható meg

Lehetséges elemzések: gamma-spektrometria, „átvilágítás”

„Scaling factor”-ok használata a nem gamma-sugárzó radionuklidokra - a feldolgozás kezdete előtt kell ezeket megállapítani

Radioaktív hulladék menedzsment

6) Radioaktív hulladék elhelyezése:

Többszörös mérnöki gátak és mélységi védelem feltételei : a radioaktivitás kijutása illetve a víz bejutása ellen.

Gátak: hulladékforma, konténer, aknafal, tömedékelés, „backfill” (bentonit = természetes alapú, sok víz megkötésére képes agyagszármazék), befogadó geológiai rendszer

Mélységi védelem: az egyik gát sérülése ne segítse elő a következő gyengülését.

Radioaktív hulladék menedzsment

Radioaktív hulladék elhelyezése:

Átmeneti elhelyezés: telephelyen belül vagy önálló felszíni telephelyen (Mo.: Paks KKÁT), korlátozott ideig, folyamatos felügyelet mellett

Végleges elhelyezés: önálló telephelyen, korlátlan ideig (lebomlásig), korlátozott idejű felügyelettel – felügyeleti idő lejártá után elhanyagolható kell, hogy legyen a dóziskövetkezmény a hozzáférhető területen

Felszíni/felszínközeli tároló: a vízkivételi réteg(ek) a tároló alatt (is) vannak

Mélységi tároló: a vízkivételi rétegek a tároló felett vannak.

KAH – KöAH: felszínközeli vagy mélységi lerakóhely (Mo.: Püspökszilágy RHFT [1976-], Bábaapáti NRHT [2012-])

NAH: tervezett mélységi lerakóhely (Mo.: Boda – BAF)

Felszínközeli LLW tároló építése – Dounreay, UK



Paks – Kiégett Kazetták Átmeneti Tárolója (KKÁT)



Püspökszilágy – felszínközeli tároló (KAH, KöAH)

Kapacitás: 5000 m³

**A telephelyen belül még feldolgozó üzem és átmeneti tároló is van.
Agyaglencse (18 – 20 m vastagon)**



Püspökszilágy – felszínközeli tároló (KAH, KöAH)



Püspökszilágy – felszínközeli tároló (KAH, KöAH)



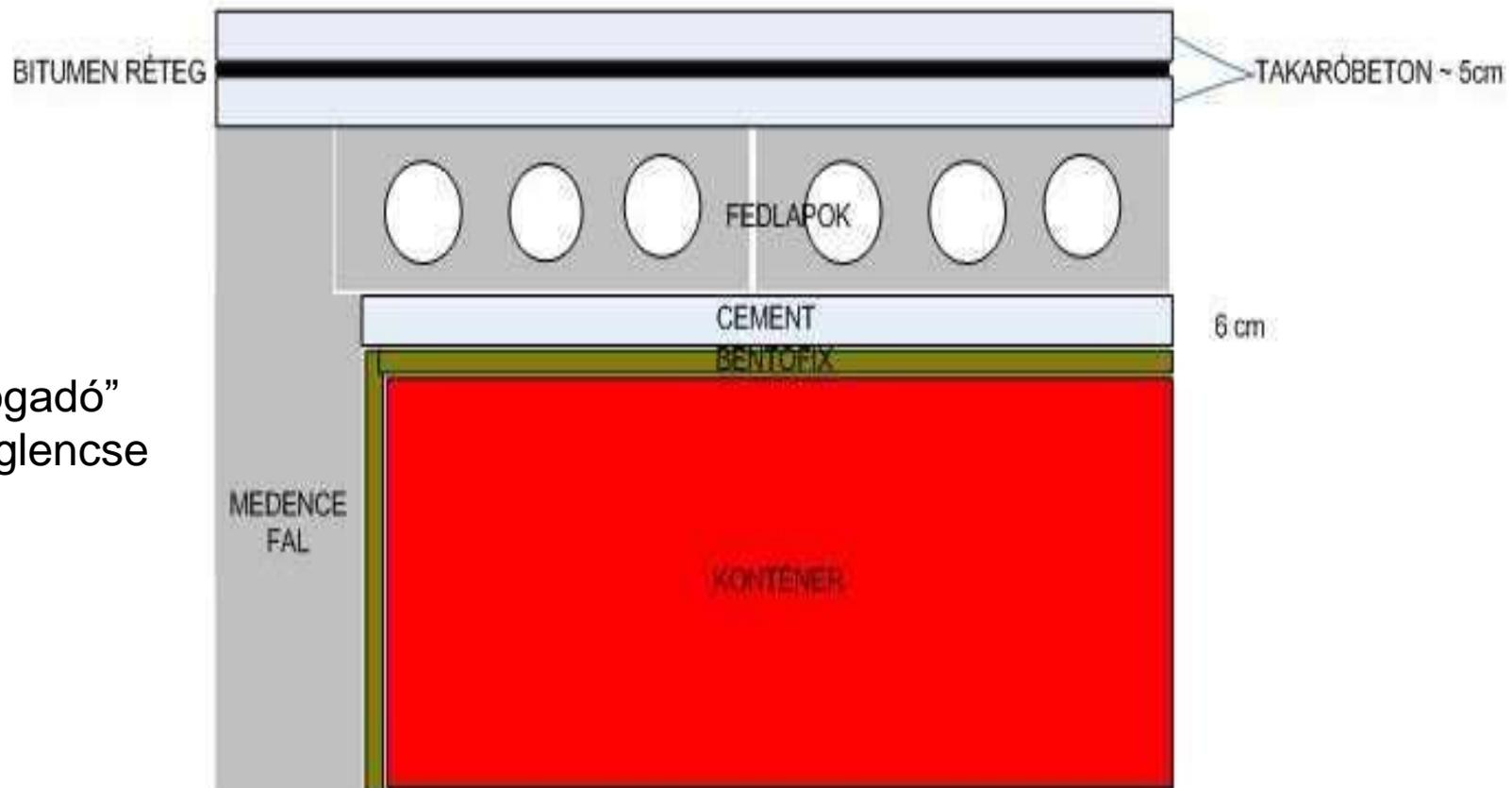
Radioaktív hulladék menedzsment

Felszínközeli végleges KAH - KöAH tároló

Tömörítés után visszatemetett hulladék elhelyezése Püspökszilágyon

Mérnöki gátak

Visszapótolt talajréteg növényzettel



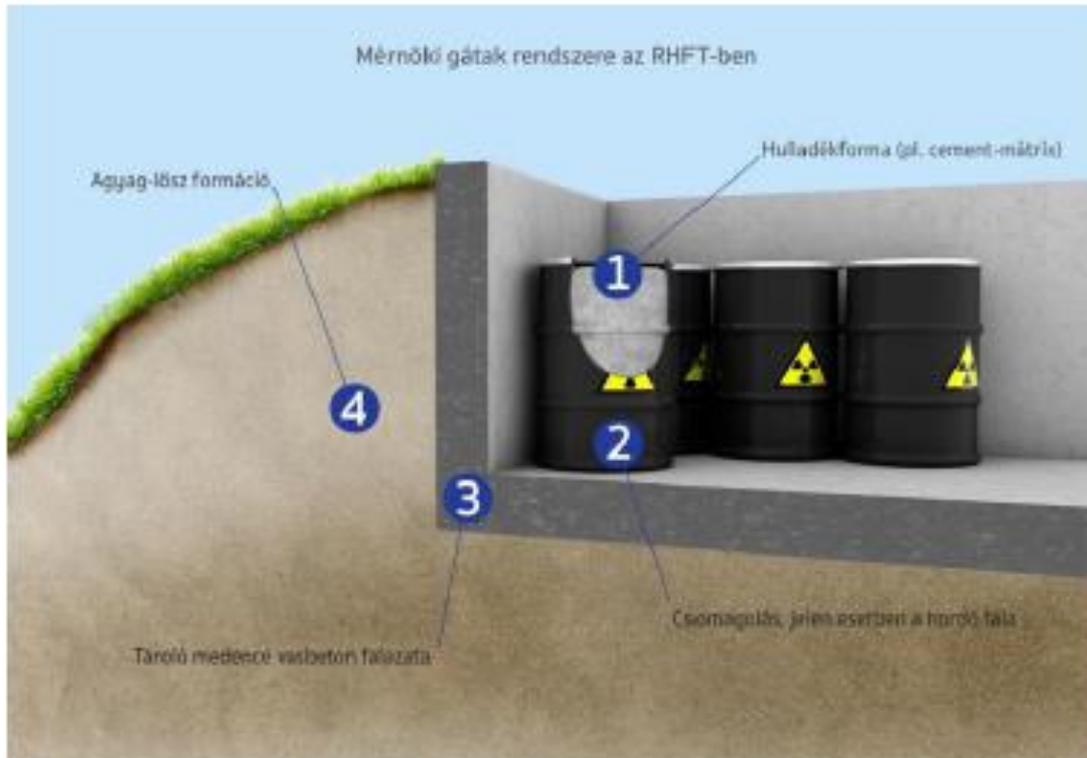
Püspökszilágyi radioaktív hulladék- tároló – elhelyezés 1978-ban



Püspökszilágyi radioaktív hulladék-tároló – 2008-as visszahelyezés előkészítése

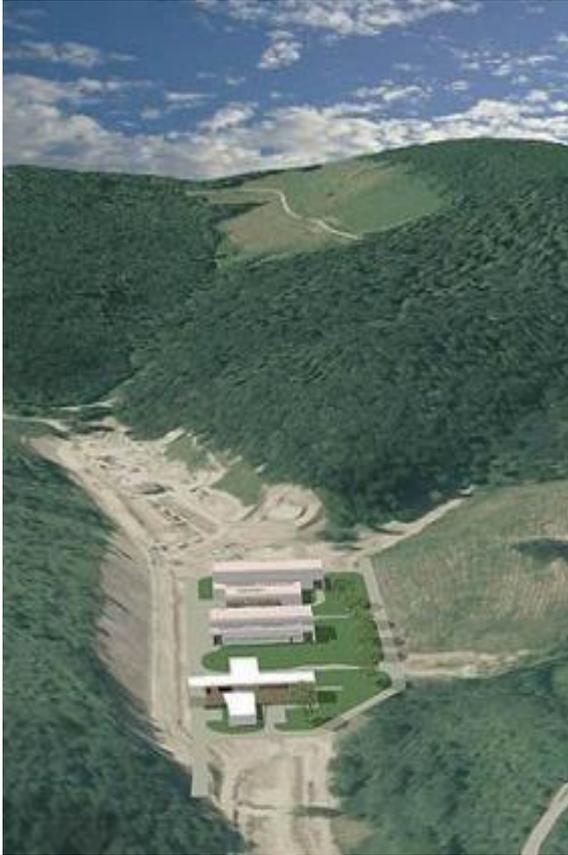


Püspökszilágyi RHFT



A felújított medencék mérnöki gátjai és a természeti környezet az új koncepcióban.

**Mélységi elhelyezés – Bátaapáti (KAH, KöAH)
Felszíni feldolgozó üzem és átmeneti tároló
Végleges elhelyezés: gránitban, 300 m mélyen**



Mélységi elhelyezés – Bátaapáti (KAH, KöAH) „Mária” lejtősakna bejárata a járáshajtás alatt



Az első, hulladékot tartalmazó betonkonténer az NRHT-ban (2012 december)



Bátaapáti NRHT



Átmeneti tárolás a felszíni épületben

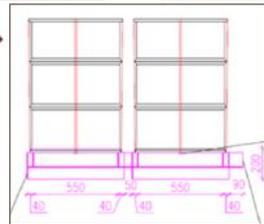
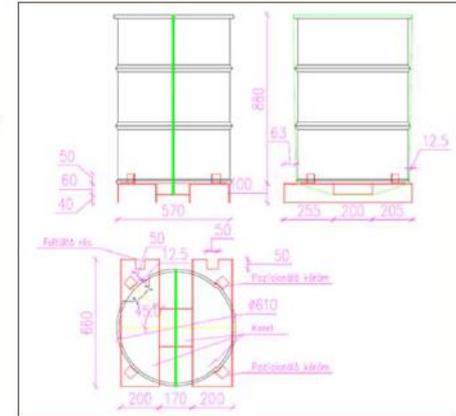
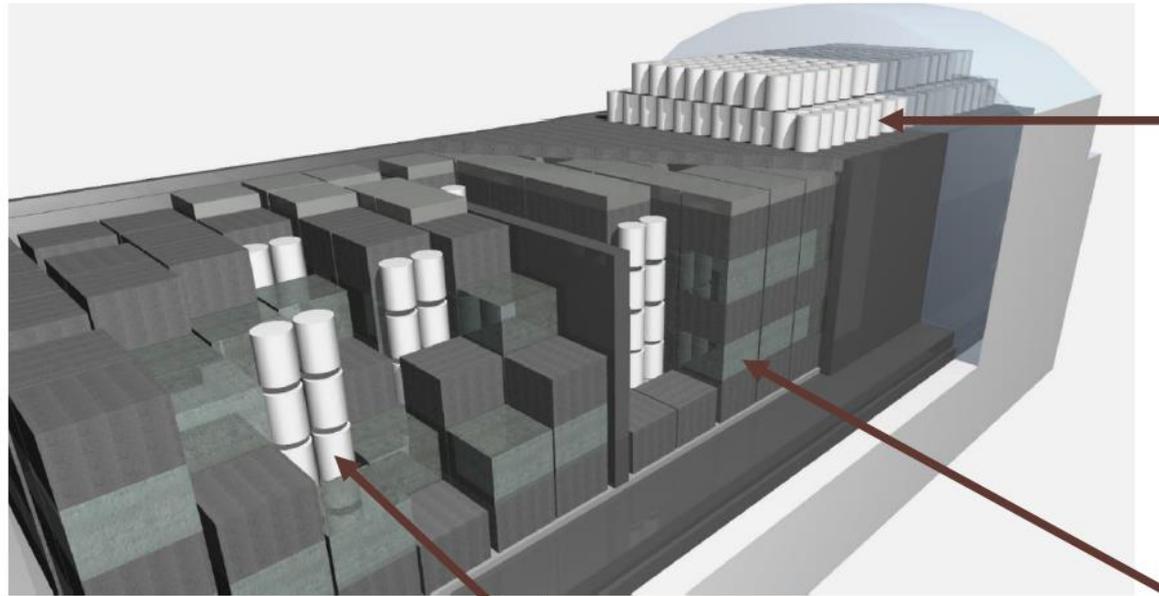


Aknakitöltés az eredetileg tervezett és engedélyezett módon a K-1 vágatban.

Bátaapáti NRHT - hulladékékelhelyezés

- 2012-2017: egy vasbeton konténerben 9 acélhordó, a hordók közti teret cementpéppel töltötték ki.
- 2018-: 100×8×6,5 m-es vasbetonmedence, benne acél konténerek 4-4 hordóval, a hordók közti teret folyékony radioaktív hulladékkal kevert cementpéppel töltik ki.

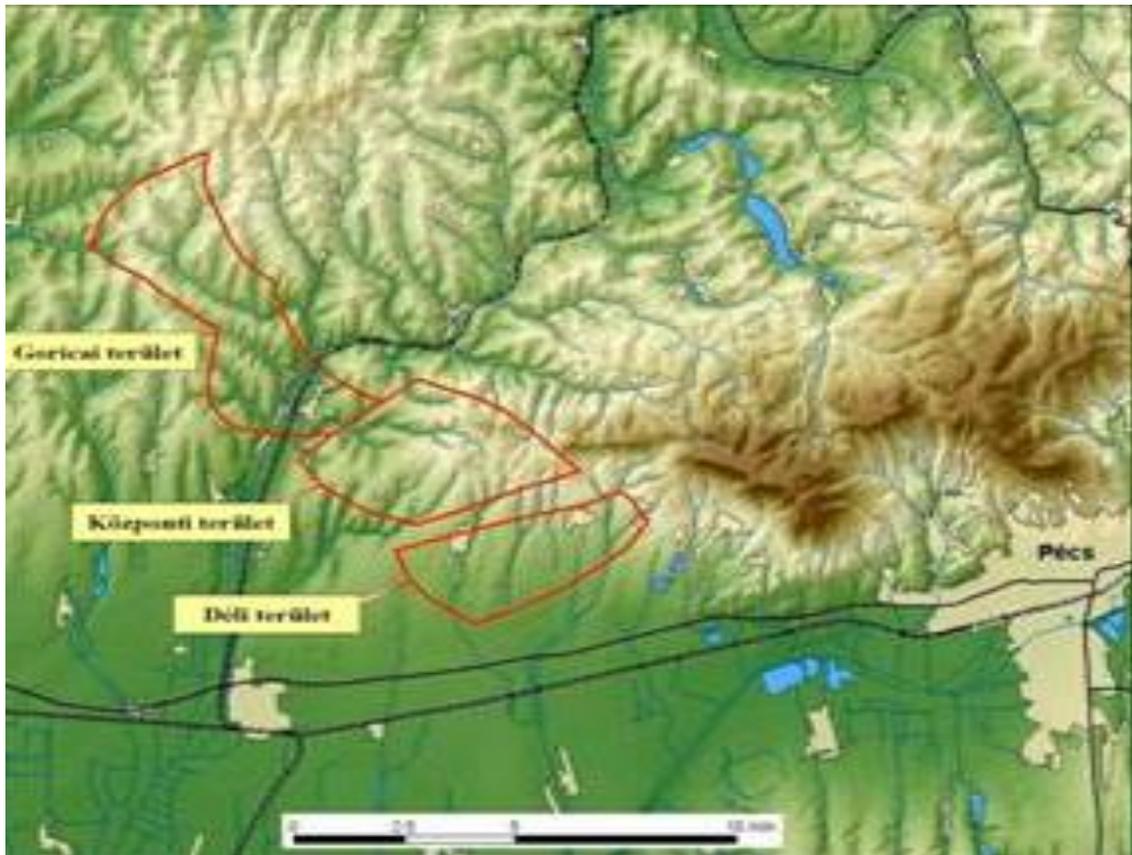
Bátaapáti NRHT



Az új hulladékelhelyezési rendszer: 30%-kal több hulladék ugyanakkora helyen, azonos biztonsággal elhelyezve – K2 vágat.

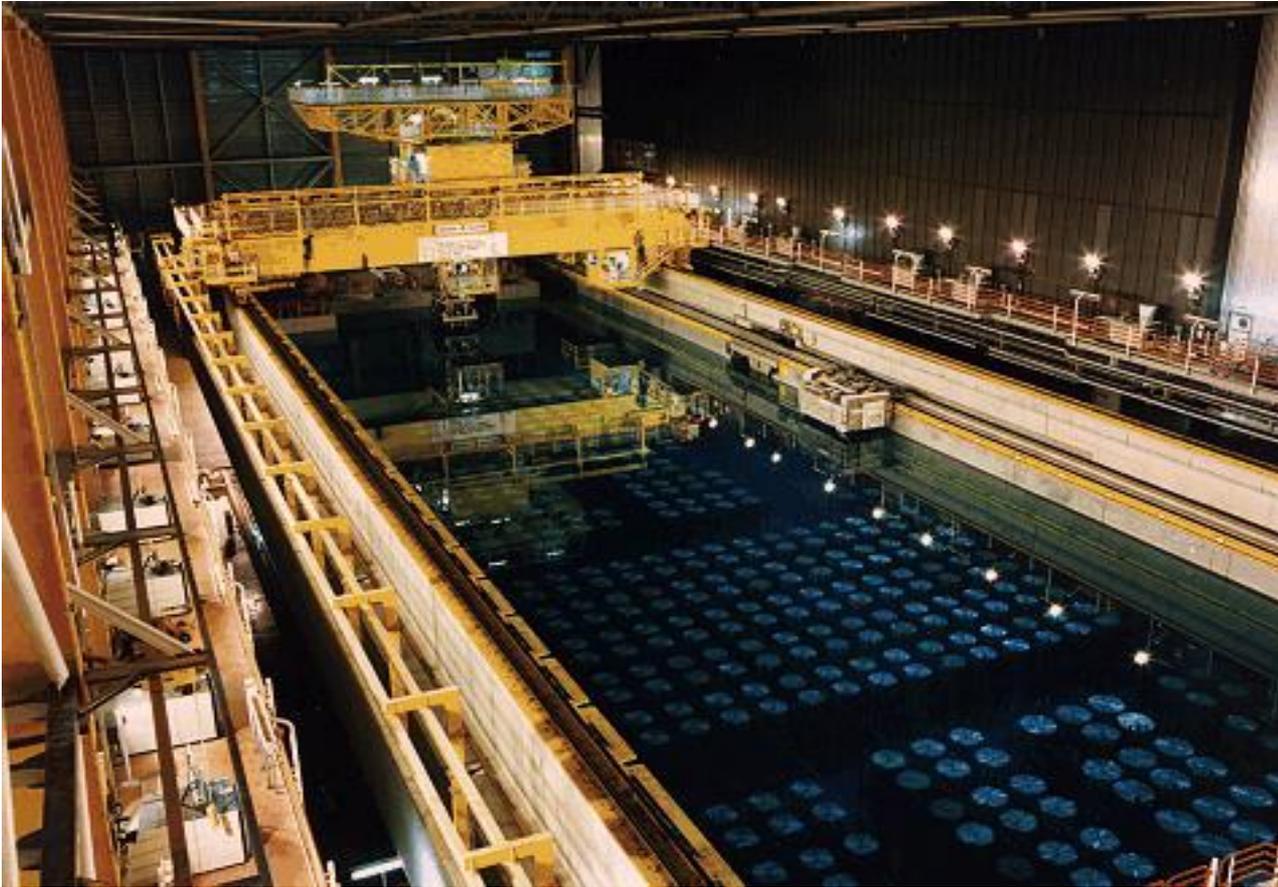
Tervezett mélységi elhelyezés – NAH

Bodai Aleurolit Formáció (BAF)



**350 – 1200 m mélyen
lévő, összetömörödött
agyagásvány
Terepi kutatások
1999-ig: kutatóvágat az
uránbánya alatt
2003-tól folytatódó
kutatási projekt**

Radioaktív hulladékok feldolgozása - Reprocesszálás



**Kiégett fűtelemek
pihentető
medencéje a
Sellafield-i (Nagy-
Britannia)
reprocesszáló
üzemben**

Műszaki (munkahelyi) sugárvédelem feladatai

Monitorozás

Üzemi (belső), kibocsátási és környezeti monitorozás

Belső (*ellenőrzött* és *felügyelt* munkaterületen): személyi dózismérők, területi dózisteljesítmény-mérés, felületi szennyezettség mérése.

Környezeti: lokális (emissziót ellenőrző) és regionális/országos (immissziót ellenőrző) hálózatok rendszere.

Hulladékkezelés, dekontaminálás

Hulladékkezelési technológiák: lásd a korábbi fejezetben

Dekontaminálás: radioaktív anyagok szelektív leoldása felületekről, ügyelve, hogy a lehető legkisebb térfogatú radioaktív hulladék keletkezzék.

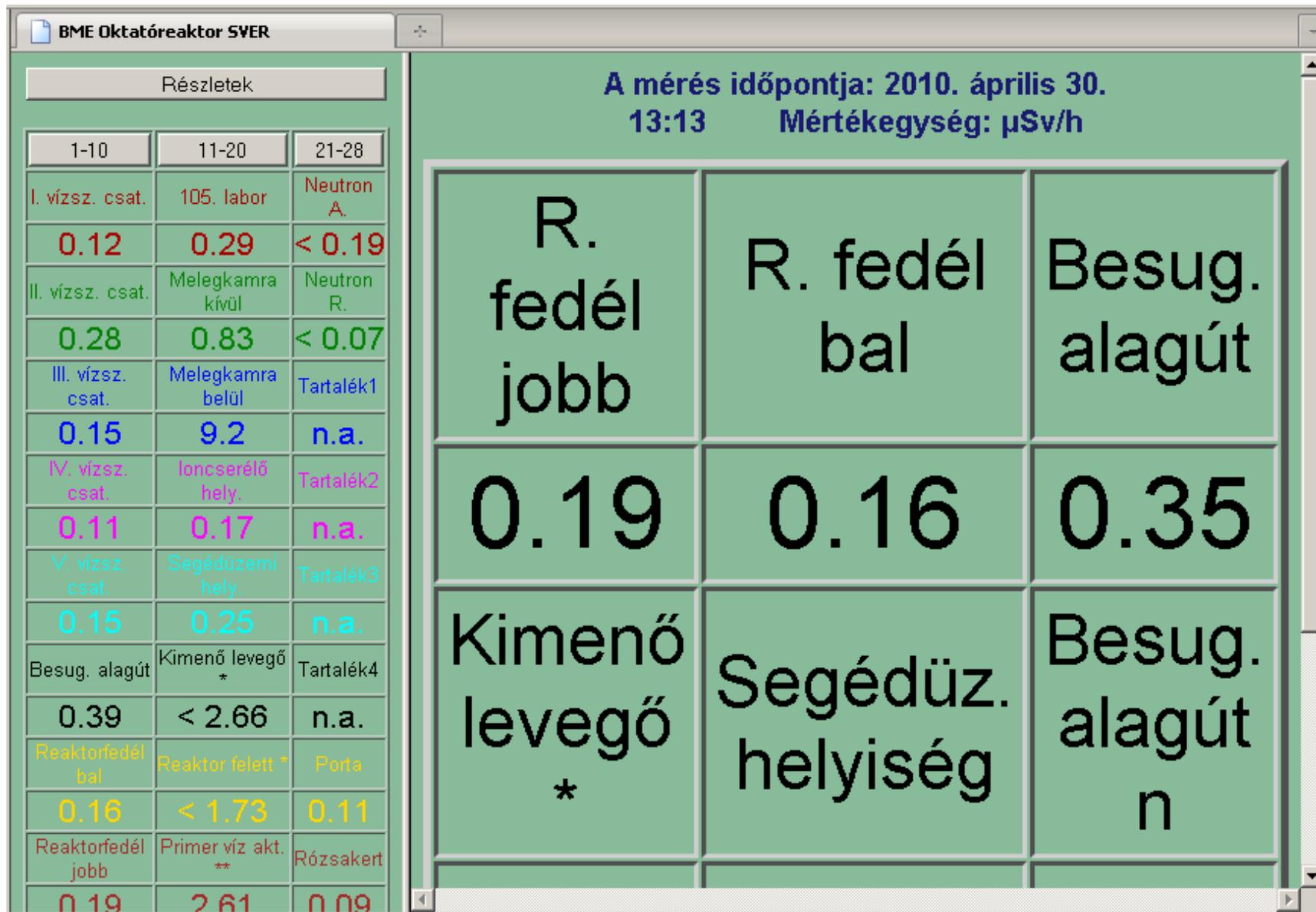
Árnyékolás: személyi sugárvédelem a gamma- vagy neutronsugárzás abszorpciója által

Gamma: nagy rendszámú anyagokkal, szekunder sugárzás keltését figyelembe véve

Neutron: ne legyen aktiváció, csak minél hatékonyabb lassítás

További védelmi intézkedések: idő- és távolságvédelem, védőöltözet

Belső (üzemi) monitorozás – BME OR



Kibocsátások monitorozása

- Kibocsátási helyen vagy annak közvetlen közelében: kémény, üzemvízcsatorna
- A dózismegszorításból származtatott éves kibocsátási határértékek [Bq/év] közvetlenül ellenőrizhetők
- Paksi üzemzavar 2003-ban: az éves határértékből származtatott napi szintet 1 napig 50%-kal lépték túl
- Kimutatási érzékenység \ll rövid időtartamra vonatkozó szintek

Folyamatos kibocsátások határértékei

Kiindulás: a létesítményre megadott dózismegszorítás

Meghatározás terjedésszámítással a reprezentatív személyt érő dózusra

Kibocsátási határérték-kritérium: $KbHK$ [-]

Kibocsátási határérték: KbH [Bq/év] izotóponként

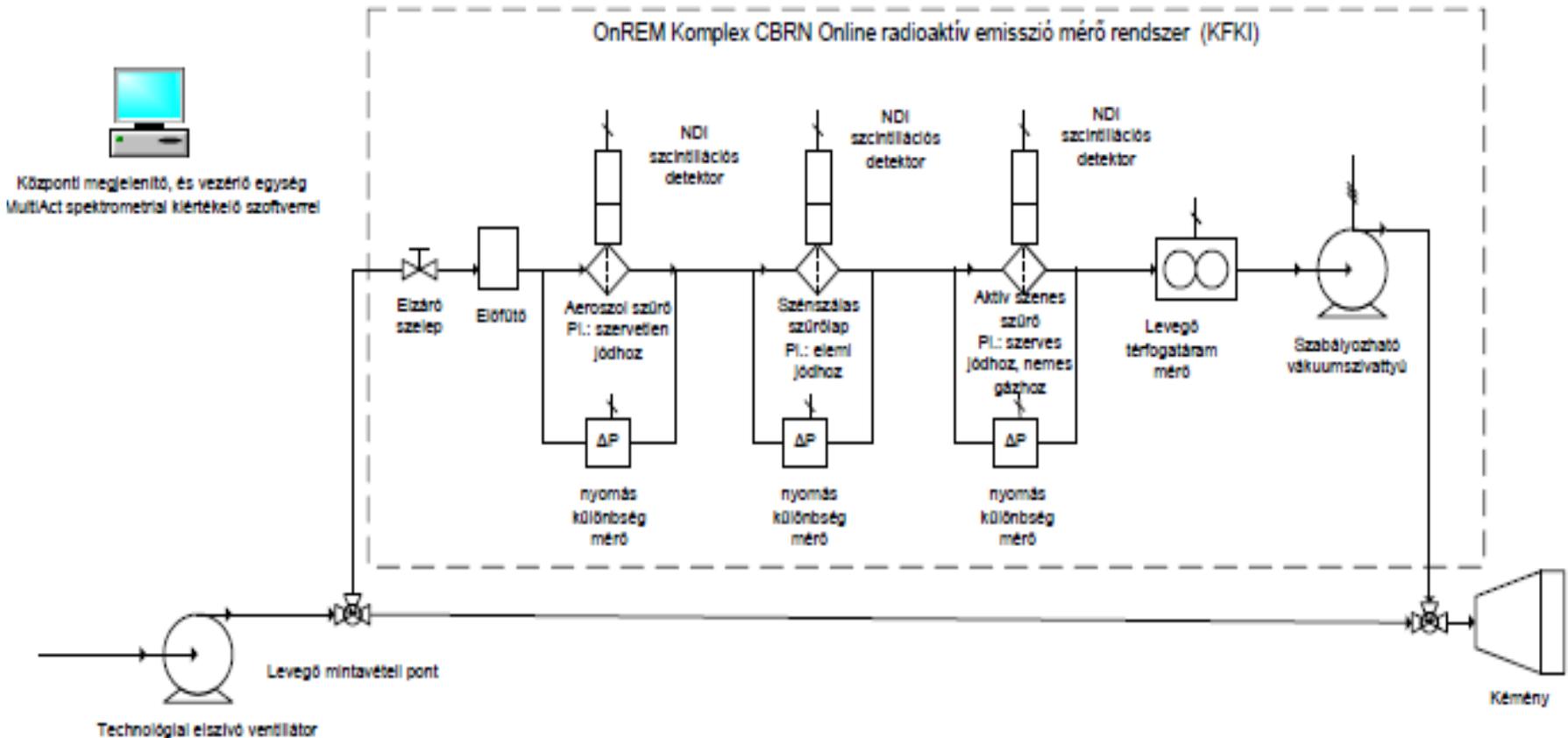
$mf_{i,KRIT}$: mobilitási tényező [-] – az i -edik radioizotóp hígulása a kibocsátás helyétől a kritikus csoportig

$e(g)$: belső dózistényező (dóziskonverziós tényező, DCF [Sv/Bq])

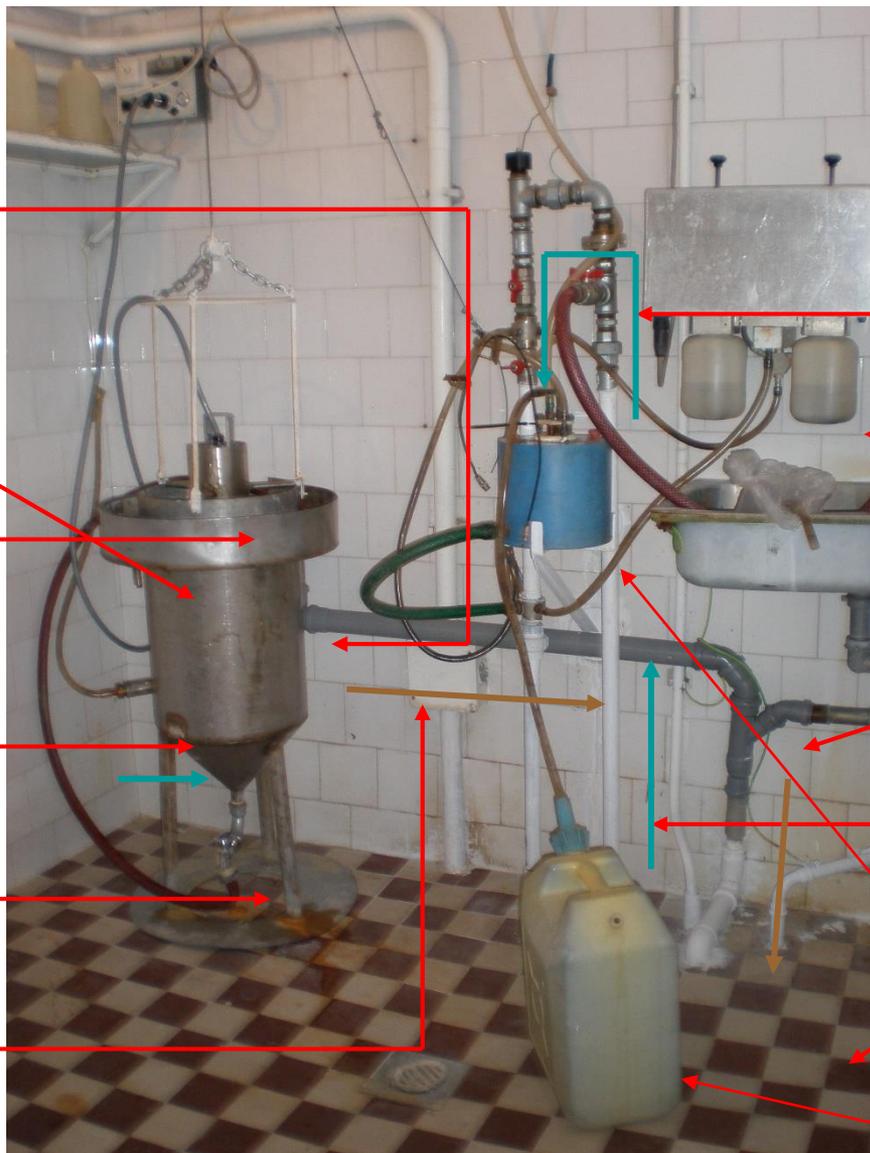
$$KbHK = \sum_i \frac{A_{KI,i}}{KbH_i} \leq 1$$

$$KbH_i = \frac{DC}{e(g)_{i,KRIT}} \cdot \frac{1}{mf_{i,KRIT}}$$

Levegő kibocsátás monitorozása – BKR és II közös kéményrésze a KFKI telephelyen



Víz kibocsátás monitorozása – KFKI telephely



Mérő edény
5 cm-es Pb
árnyékolás

Túlfolyó
(feszített víztükör)

ND-302/E,F
Szcintillációs
detektor

Detektorba
bemenő ág

Víz leeresztő
csap

Detektorból
Kimenő ág

→
Bemenő vízáram
→
Kimenő vízáram

Visszacsapó
szelep

Momentán
edények

Kimenő ág
(Dunába)

Bemenő ág

Szivattyú
a padlószint
alatt

Átlag mintavevő

Környezeti monitorozás és terjedésszámítás

A terjedés (*migráció, diszperzió, transzfer*) során a szennyező radioaktív anyagok koncentrációja időben és térben is változik.

$$\frac{dc_i}{dt} = Ad + Df + Re + Pr + S(t) - \lambda_i \cdot c_i$$

Minden radioaktív komponensre külön alkalmazandó differenciálegyenletek – kémiai forma szerint is!

Részfolyamatok:

Ad – advekción, Df – diffúzió, Re – reakción, Pr – üledés

S(t): időben változó forrástag , radioaktív bomlás

Környezeti terjedés modellezése

- Advekción: a szennyezés együtt áramlik a közeggel; hajtóerő: a gravitációs és termodinamikai potenciálok gradiense
- Diffúzió: hajtóerő a szennyezés kémiai potenciáljának gradiense
- Reakció (pl. szorpció, csapadékképzés): hajtóerő a szennyezés adott komponenseire vonatkozó kémiai potenciál gradiense
- Ülepedés: hajtóerő a szennyezés gravitációs potenciáljának gradiense

Környezeti terjedés modellezése

- Homogén környezeti rendszerek: levegő, felszíni- és karsztvizek (folyó, tó, óceán, mesterséges tározók) – térben és időben végbemenő terjedés együttes modellezése
- Heterogén rendszerek: talaj- és kőzetvíz (pórusos szerkezet), ökoszisztémák (pl. talaj – növényi részek – állati szervezetek – emberi fogyasztás); gyakori megoldás a térben és időben történő terjedés szétválasztása

A terjedési számítások alkalmazása a sugárvédelemben – a forrástag jellege

Időben állandó forrástag:

folyamatos üzemi kibocsátás esetei:

- nukleáris reaktor szellőzőkéményén távozó üzemi kibocsátás komponensei
- folyamatos víztisztítás és/vagy részleges vízcsere atomerőművek reaktorainál

↔ dózismegszorítás

Időben változó (pillanatszerű) forrástag:

- üzemzavari és baleseti kibocsátások hatásának számítása ↔ hatósági szabályozásban (Magyarországon: Nukleáris Biztonsági Szabályzat - NBSZ) az adott eseménytípushoz rendelt maximális dóziskövetkezmény ↔ vonatkoztatási szint és alapkritériumok az egyes besugárzási helyzetekre
- nem folyamatos üzemi kibocsátások (pl. hulladékfeldolgozás, leszerelés) ↔ dózismegszorítás (üzemidő alatt) vagy elhanyagolható dózis (a felszabadított anyagokra)

Ismeretlen forrástag:

mesterséges radioaktivitás detektálása a környezetben → eredet felderítése: „back projection”

Forrástag (Source term) ≤ Radionuklid-leltár (Inventory)

Terjedési egyenletek megoldása

- Radioaktív anyagok koncentrációja a környezeti közegekben; a kiterjedt vagy bonyolult szerkezetű közegeket azonos tulajdonságú részekre oszthatjuk = rekesz = compartment \approx nódus (csomópont) – ezek között történik a terjedés, változik az aktivitáskoncentráció.
- Közegek közötti állandó koncentrációarányok (CF – concentration factor) vagy dinamikus koncentrációváltozások (SA – system analysis)
- Dózisarányosság:

$$E_C \sim \int_{t_1}^{t_2} c(x, y, z) dt$$

Egy radionuklid által okozott E_C lekötött effektív dózis (belső vagy külső sugárterhelés) arányos a kibocsátás helyétől vett (x, y, z) koordinátájú helyen ($z=1\text{m}$ – a talajszínt) az ottani koncentráció időintegráljával. Ennek megadásához kétszer kell integrálni a terjedési differenciálegyenletet. Az arányosság jelentősen eltérő lehet külső (a szennyezett területen való tartózkodás) illetve belső (belégzés, szennyeződött anyagok fogyasztása) sugárterhelés esetében.

Nukleáris környezeti monitorozás

A feladatok hasonlóak minden sugárzási helyzetben. (ICRP 103: a sugárzási helyzet lehet tervezett, baleseti és fennálló) Korlátozás tervezett helyzetben: dóziskorlát (DL) és dózismegszorítások (DC). Baleseti és fennálló helyzetben: vonatkoztatási = referencia szint (reference level)

DL és DC betartásának ellenőrzése:

- *Mérés*
- *Kiértékelés*
- *Beavatkozás*

Irányadó szintek (Guidance levels) szükségesek minden radionuklidra a környezeti közegekben (levegő, víz, talaj stb.) – ezek különböznek a kibocsátási (emissziós), illetve a mentességi és felszabadítási szintektől, mivel ezek már immissziós (kibocsátott, így a környezetben már jelenlévő = a terjedés során „hígított”) koncentráció értékek

***Biztonság**: a szint mérhető kell, hogy legyen jóval előbb, mielőtt az irányadó szintet túllépnénk. Az irányadó szint túllépése \neq veszély, csak tisztázandó rendellenesség.*

***Monitorozás**: mintavétel, mérés és kiértékelés szervezett, standard rendszere.*

Nukleáris környezeti monitorozás

- *Helyi rendszerek: jelentős emissziót produkálni képes létesítmények körül – kevésbé érzékeny, mint a kibocsátás ellenőrzése, de közvetlenül alkalmas a terjedés kezdeti szakaszának vizsgálatára*
- *Regionális rendszerek: immisszió ellenőrzése nagyobb területen egyenletesen vagy a népesség arányában elosztott mérőállomásokkal*

Módszerek:

- *Gamma-dózisteljesítmény folyamatos mérése – KORAI RIASZTÁS*
- *Légköri szennyeződés folyamatos mérése dúsításos mintavétellel – KORAI RIASZTÁS – aeroszol- és jódszűrés (elemi, szerves)*
- *További mintavételezéses módszerek:*
 - *száraz és nedves légköri kihullás (szakaszosan)*
 - *felszíni-, ivó- és talajvíz, (ha nincs légköri kibocsátás, folyamatos mérés esetén erre is alapozható korai riasztás)*
 - *talaj- és biológiai minták gyűjtése és értékelése*

Magyarország: OKSER (Országos Környezeti Sugárzás-ellenőrző Rendszer)

>100, központi rendszerbe csatlakozó mérőállomás több üzemeltetővel

Nukleáris környezeti monitorozás – magyarországi korai riasztást adó rendszerek

Gamma-dózisteljesítmény - folyamatos és automatizált adatgyűjtés

környezeti dózisteljesítmény (talajszint felett 1 m-re) : 70 – 170 nSv/h

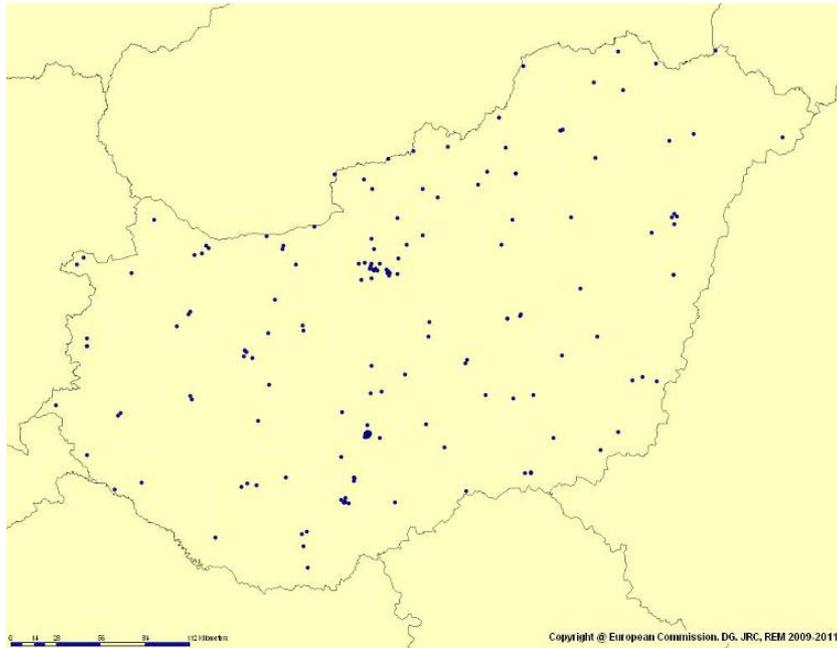
OKSER figyelmeztetési szint : 250 nSv/h

OKSER riasztási szint : 500 nSv/h

Lehetséges források:

- *Természetes radioaktivitás: szintje eltérő a környezetben, általában nem tárgya a szabályozásnak. („kizárás” = kozmikus sugárzás, talajban lévő radioaktivitás)*
- *TENORM: „technologically enhanced naturally occurring radioactive material” – „alkalmazásnak” tekintendő, szabályozott.*
- *Mesterséges radioaktivitás: „alkalmazások” kibocsátása, radioaktív hulladékok stb. – szabályozott.*
- *Berendezések ionizáló sugárzása (pl. röntgen) – kikapcsolható, szabályozott.*

Országos Környezeti Sugárvédelmi Ellenőrző Rendszer

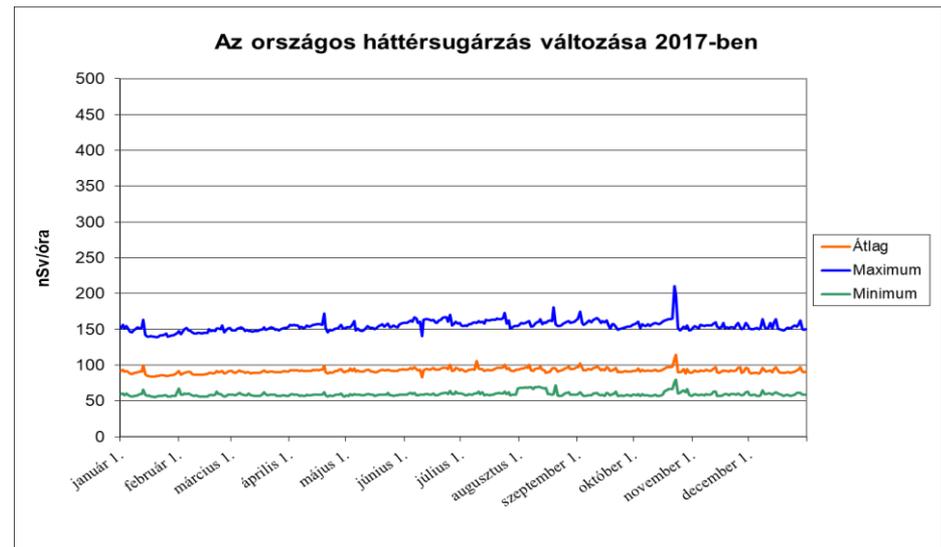


Az OKSER folyamatosan működő mérőállomásainak elhelyezkedése – lokális és regionális mérőpontok együttese

Hálózati központ: Országos Atomenergia Hivatal (OAH)

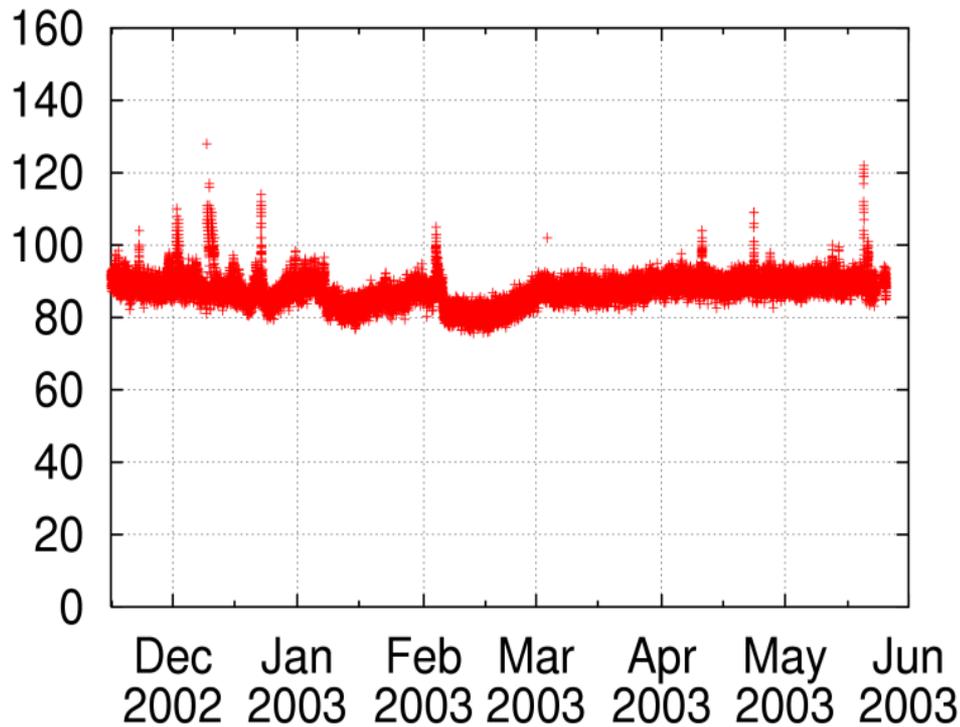


Országos Atomenergia Hivatal



Nukleáris környezeti monitorozás – korai riasztást adó rendszerek – az OKSER részeként működő egyetemi állomások

dózisteljesítmény
[nSvh]



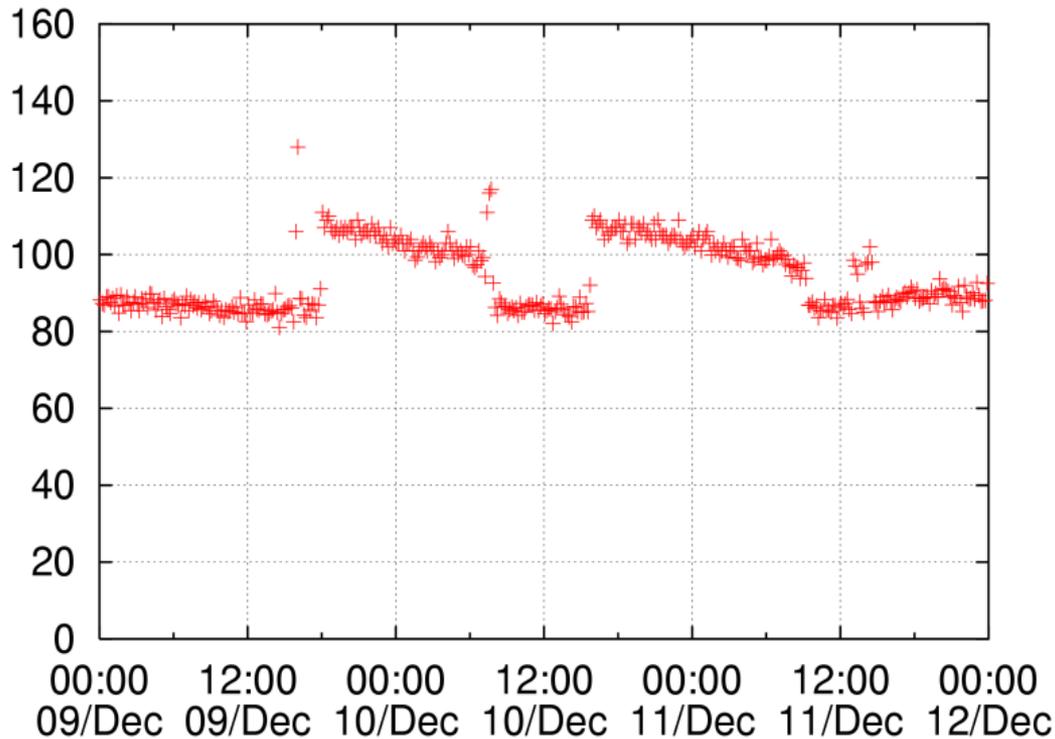
*Fél év alatt három különböző
hatás látható:*

- *helyi hatások (emisszió),*
- *gyors környezeti változás
(változó szintű szennyezés),*
- *lassú környezeti változás.*

*A jelszint nem éri el a
figyelmeztetési küszöböt sem. A
felvétel részletes értékelésre e
formában nem alkalmas.*

Az OKSER részeként működő egyetemi állomások helyi hatások a környezeti dózisteljesítményre

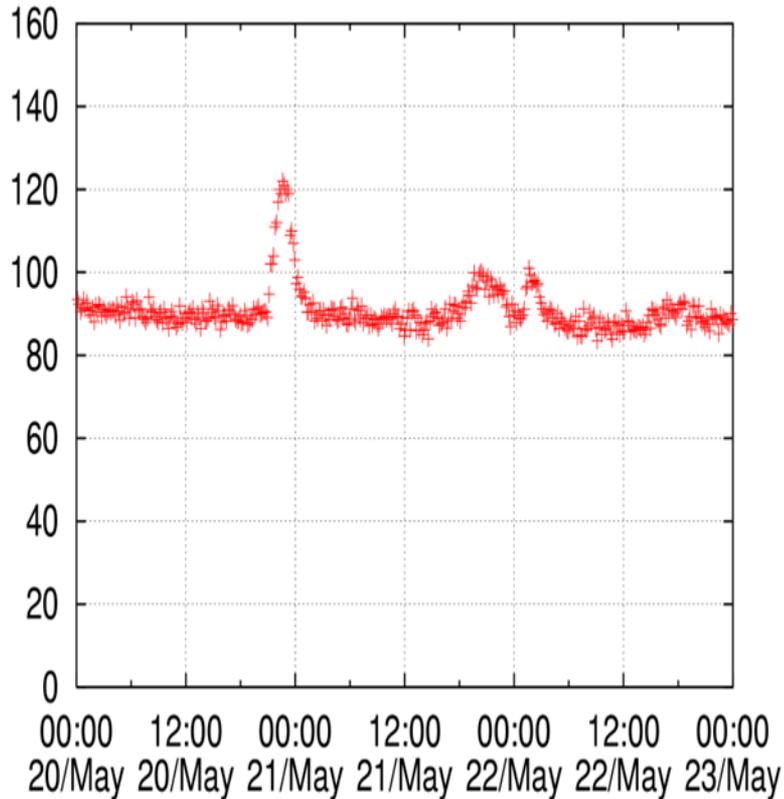
dózisteljesítmény
[nSvh]



Az oktatóreaktorban frissen előállított ^{24}Na -sugárforrások ideiglenes tárolását észékelte a közeli dózisteljesítmény-mérő. A felfutó él a művelet pillanatszerűségére, a lefutás a főkomponens felezési idejére jellemző.

Az OKSER részeként működő egyetemi állomások környezeti csapadékcsúcsok

dózisteljesítmény
[nSvh]



A csapadék kimossa a levegőből a talaj felszínére az aeroszolhoz kötött radonleányelemeket . Ezek (^{222}Rn - és ^{220}Rn -származékok) feldúsulása a ülepedési sebességtől és határfoktól, bomlása az effektív felezési időtől függ. Hasonló alakú profilok származhatnak azonban mesterséges eredetű radioaktív szennyezést tartalmazó „pöfföktől” is.

Nukleáris környezeti monitorozás – korai riasztást adó rendszerek környezeti dózisteljesítmény mérése

Következtetések:

- *A dózisteljesítmény változása képet ad a mérőállomás környezetének állapotáról.*
- *Helyi rendszerek: jelzik a helyi változásokat is.*
- *Regionális rendszerek: nehéz (néha lehetetlen) megkülönböztetni a természetes növekedést a mesterséges szennyezéstől.*
- *A „biztonságos” riasztási küszöb jóval nagyobb kell, hogy legyen a természetes ingadozás maximumánál.*
- *További mérési módszer szükséges a jobb érzékenység eléréséért és a téves riasztások kizárásához, valamint a szennyezés azonosításához.*

Nukleáris környezeti monitorozás – korai riasztást adó rendszerek légköri mintavételezés és mérés

Légköri mesterséges eredetű radioaktív szennyezés dúsítása és azonnali mérése - főként atomerőművek (nukleáris reaktorok) kibocsátásának azonosítására

mintavétel: speciális szűrők az alábbi anyagok megkötésére:

- aeroszol,
- atomos jód,
- szerves jódvegyületek

mérés: alfa/béta energiaszelektív mérés, gamma-spektrometria = minőségi és mennyiségi azonosítás (minőségi azonosítás csak az alfa- és gammaspektrumokból lehetséges elméletileg, a tisztán bétasugárzó radionuklidokat csak radiokémiai feldolgozással lehet azonosítani).

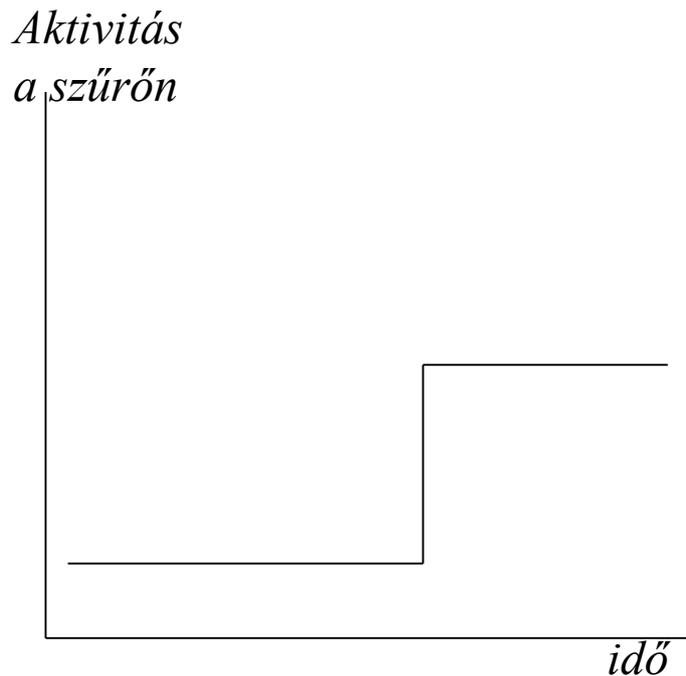
eljárás: folyamatos/automatikus működés, *mozgósűrős* vagy *állósűrős* kivétel

Nukleáris környezeti monitorozás

aeroszol és jód mintavételezés és mérés a kibocsátási források közelében

Lokális rendszer egy emissziós forrás köré telepítve

Elméleti szennyezési profil: egységugrás-függvény



*Előnyös módszer: mozgó szűrőszalag (differenciálás)
Nem gyűlhet össze sok aktivitás a szűrőn – de azonnal megjelenik a növekmény, csekély alapvonalon.*

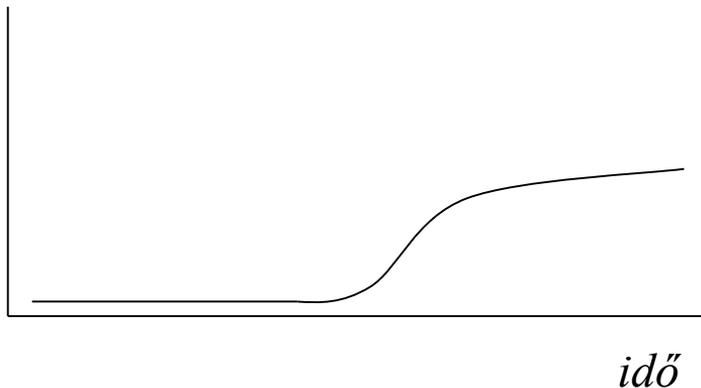
Nukleáris környezeti monitorozás

aeroszol mintavételezés és mérés a kibocsátási forrásoktól távol

Regionális rendszer – egyenletesen elosztott állomások -
immisszió ellenőrzése

Elméleti szennyezési profil a szűrőn: elnyújtott, egy ideig lassan növekvő, aztán – ha nincs már megkötődés – a bomlás miatt csökkenő

*Aktivitás
a szűrőn*



Előnyös módszer: rögzített szűrőlap (integrálás) – egy ideig növekszik a természetes radon eredetű „alapvonal”, de akumulálódik a mesterséges eredetű aktivitás is, ami feltehetően – a forrás távolsága miatt – a radon-leányelemeknél hosszabb felezési idejű komponenseket tartalmaz, így a növekedés jól látható lesz.

Nukleáris környezeti monitorozás

környezet-ellenőrzés aeroszol és jód mintavétellel – AMS rendszer

Az állomás vezérlő programja az alábbi feladatokat látja el:

- Adatgyűjtés a detektor(ok)tól;
- Nukleáris spektrumok kiértékelése – mesterséges radioaktivitás azonosítása változó természetes “alapvonalon” – mért értékek [Bq/m^3] feljegyzése;
- Természetes radioaktivitás értékének becslése: ^{222}Rn EEC [Bq/m^3]
- **KIMUTATÁSI HATÁROK** (LD [Bq/m^3]) megadása, ha mesterséges radioaktivitást nem detektált;
- A detektor(ok) rendszeres kalibrálása;
- Elektromechanikus elemek vezérlése (szivattyú, szűrőkezelés stb.);
- Adatgyűjtés más mérőberendezésekből (meteorológiai szenzorok, dózisteljesítmény-mérő stb.);
- Kommunikáció a központi számítógéppel.

Nukleáris környezeti monitorozás - Detektorok válasza

Közvetlenül mért érték: adott radioizotóp sugárzásának intenzitása (I_m). Keresett érték: az azonosított radioizotóp aktivitáskoncentrációja (C) a levegőben – ebből lehet dózist számolni.

Basic equation for **activity build-up** on filter surface (I_m = measured intensity [cps])

$$I_m = \frac{\eta_\gamma \cdot f_\gamma}{t_{LIVE}} \cdot \int_0^{t_{TRUE}} \frac{\bar{C}}{\lambda} \cdot \dot{V} \cdot (1 - e^{-\lambda t}) dt \cdot \frac{t_{LIVE}}{t_{TRUE}}$$

η_γ : efficiency for the gamma line of the radioisotope, f_γ : gamma abundance of the gamma line, t_{LIVE} : live time, t_{TRUE} : true time, λ : decay constant, \dot{V} : volume rate of pump.

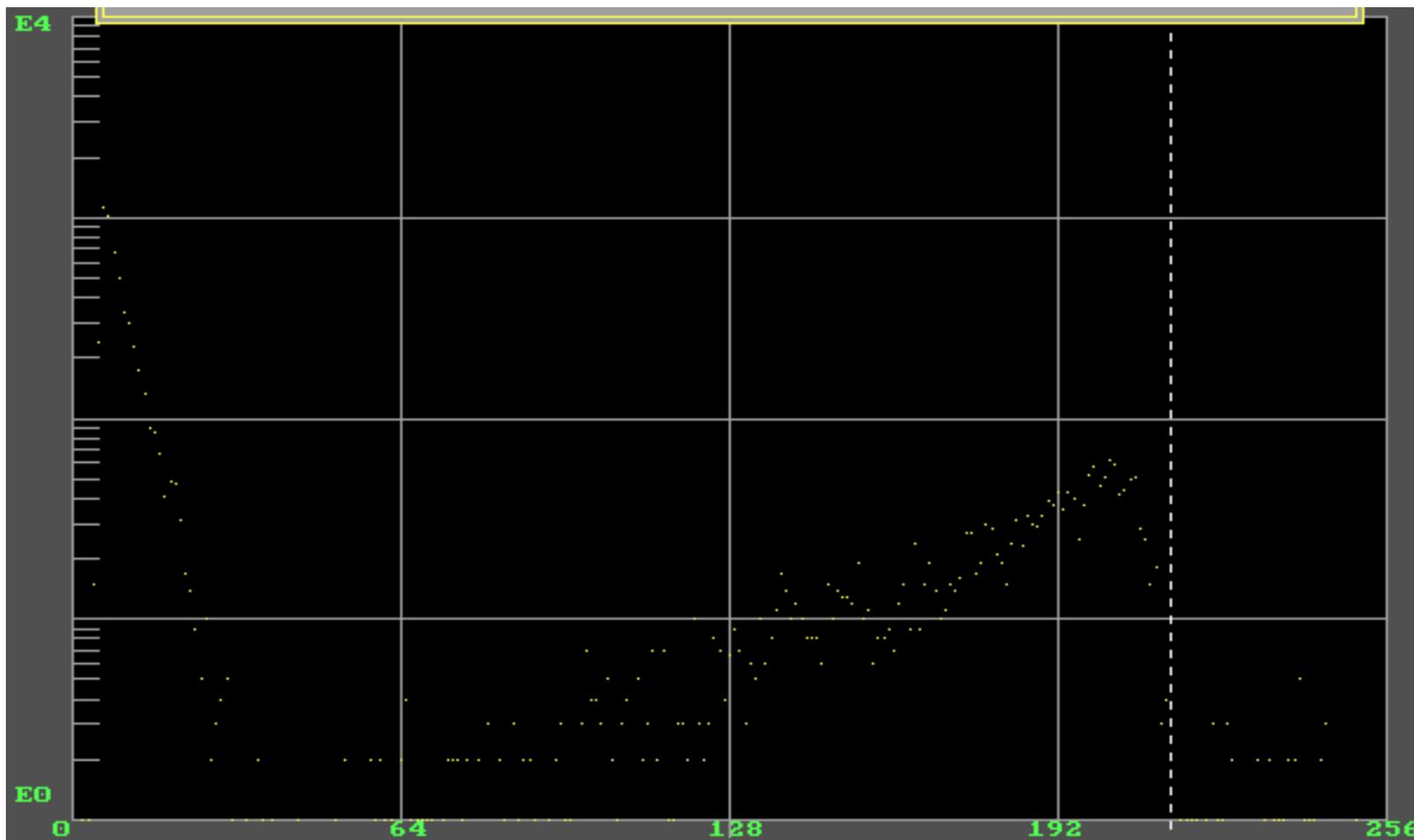
After integration and solving the equation for \bar{C} , mean activity concentration during sampling cycle [Bq/m^3]

$$\bar{C} = \frac{I_m}{\eta_\gamma \cdot f_\gamma} \cdot \frac{1}{\dot{V}} \cdot \left(\frac{\lambda \cdot t_{TRUE}}{1 - \frac{1 - e^{-\lambda \cdot t_{TRUE}}}{\lambda \cdot t_{TRUE}}} \right)$$

Ezeket a számításokat végzi el a kiértékelő program – a végeredmény az azonosított komponensek átlagos koncentrációja a mintavétel időtartamára vonatkoztatva.

Aeroszolszűrőn rövid idő alatt gyűjtött ^{222}Rn leányelemek alfa-béta spektruma

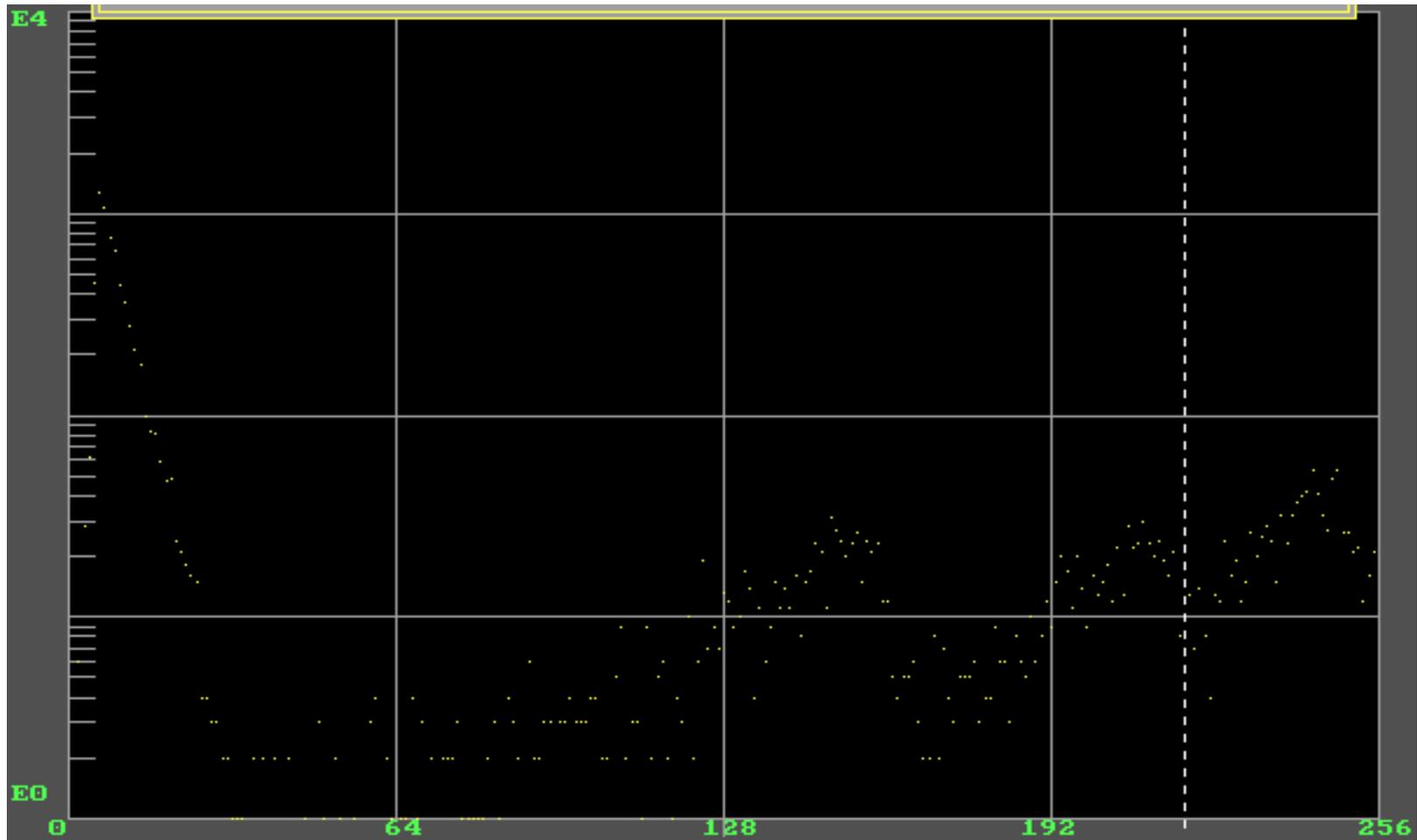
beütésszám



csatornaszám → energia

Aeroszűrőn hosszú idő alatt gyűjtött ^{220}Rn + ^{222}Rn leányelemek alfa-béta spektruma

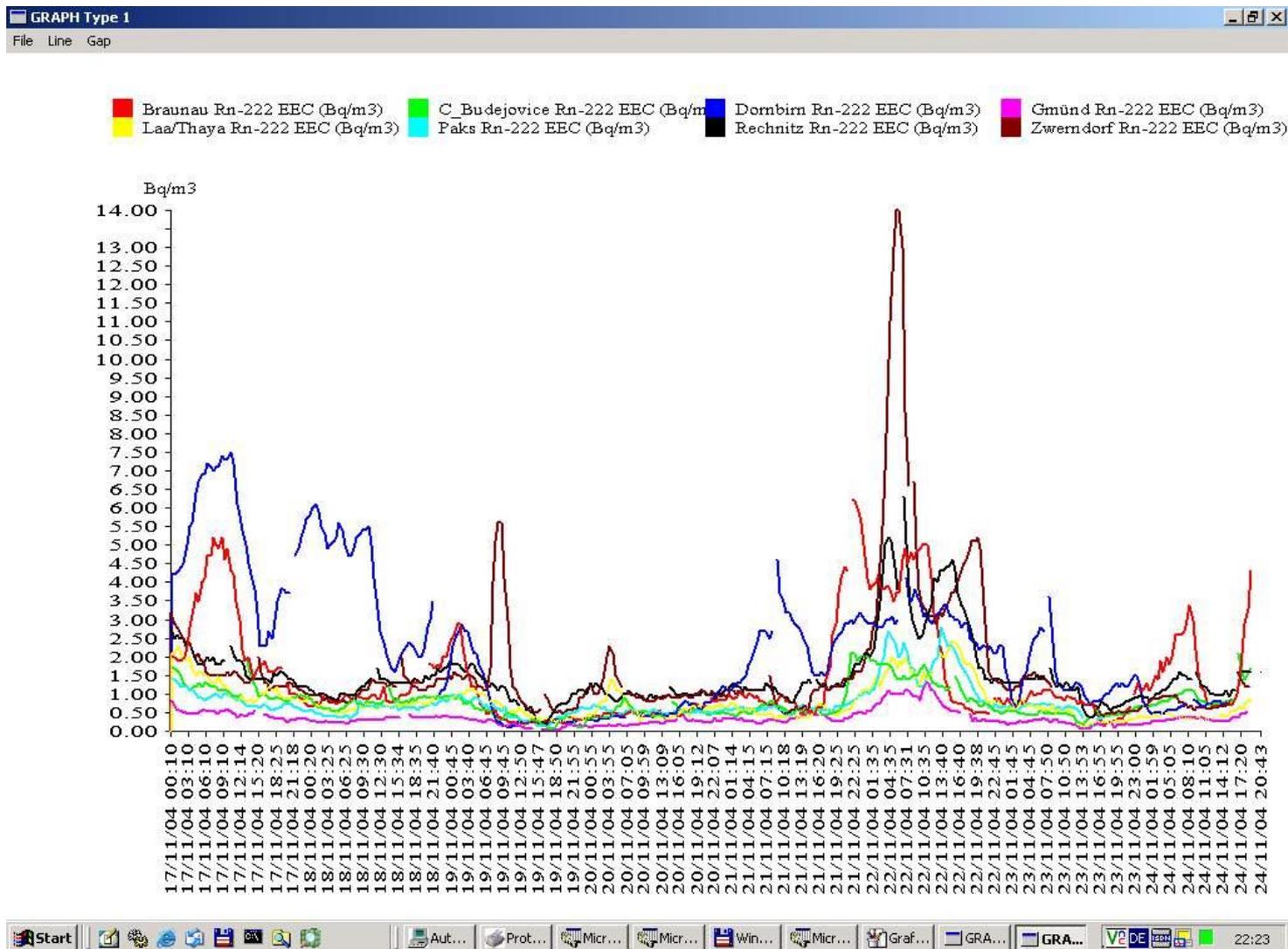
beütésszám



csatornaszám → energia

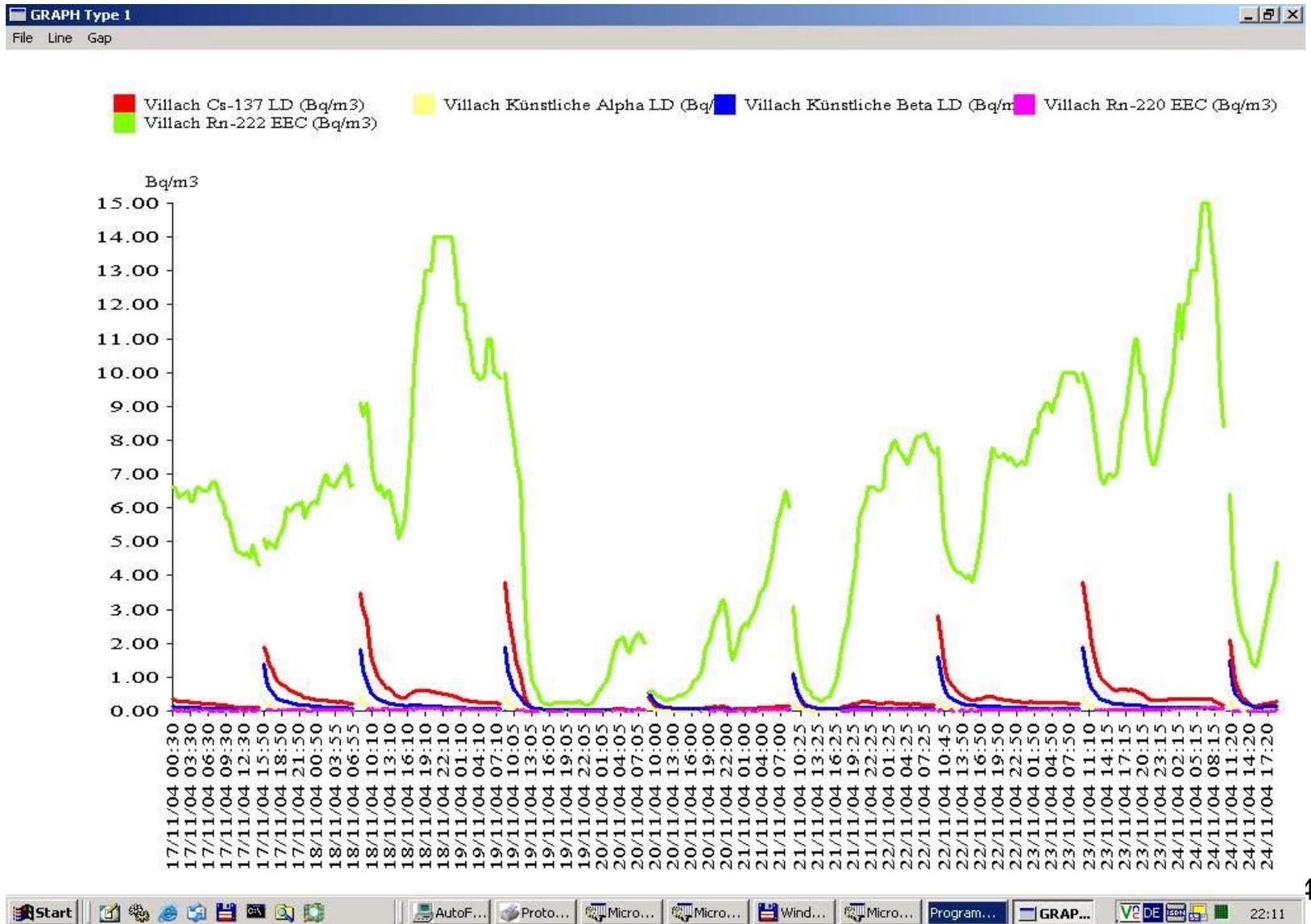
^{222}Rn

Rn EEC változása környezeti mérőállomásokon



Radon EEC és LD-k az idő függvényében

α -, β - és γ -sugárzó (^{137}Cs) mesterséges radioaktivitás mérési érzékenysége (LD) változása egy környezeti mérőállomáson



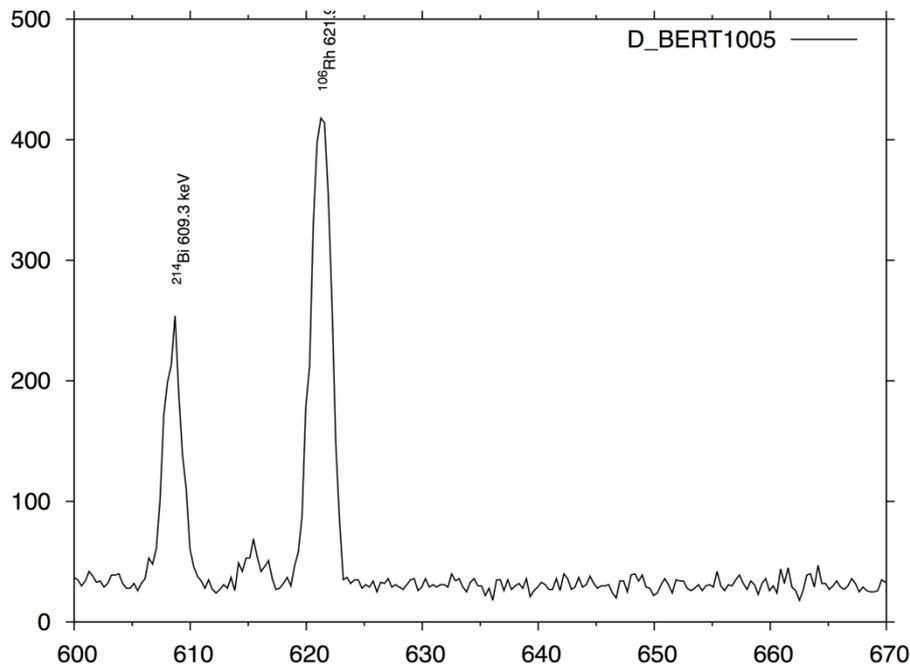
Nukleáris környezeti monitorozás – korai riasztást adó rendszerek aeroszol-mintavétellel

Összefoglalás:

- *Részecskeszűrőt és azt követően jódszűrő(ke)t is alkalmazhatnak.*
- *Regionális rendszereknél az álló szűrő előnyösebb.*
- *Nuklidspecifikus meghatározás szükséges, hogy megkülönböztessük a természetes és a mesterséges radioaktivitást.*
- *Jelentendő értékek:*
 - *természetes radioaktivitás (^{222}Rn -EEC stb.) – „minőség-ellenőrzés”*
 - *mesterséges radioaktivitás (radionuklid, aktivitás-koncentráció vagy KIMUTATÁSI HATÁR (limit of detection - LD)*

Környezeti monitorozási tapasztalat európai mérőállomásokon 2017 szeptember végén

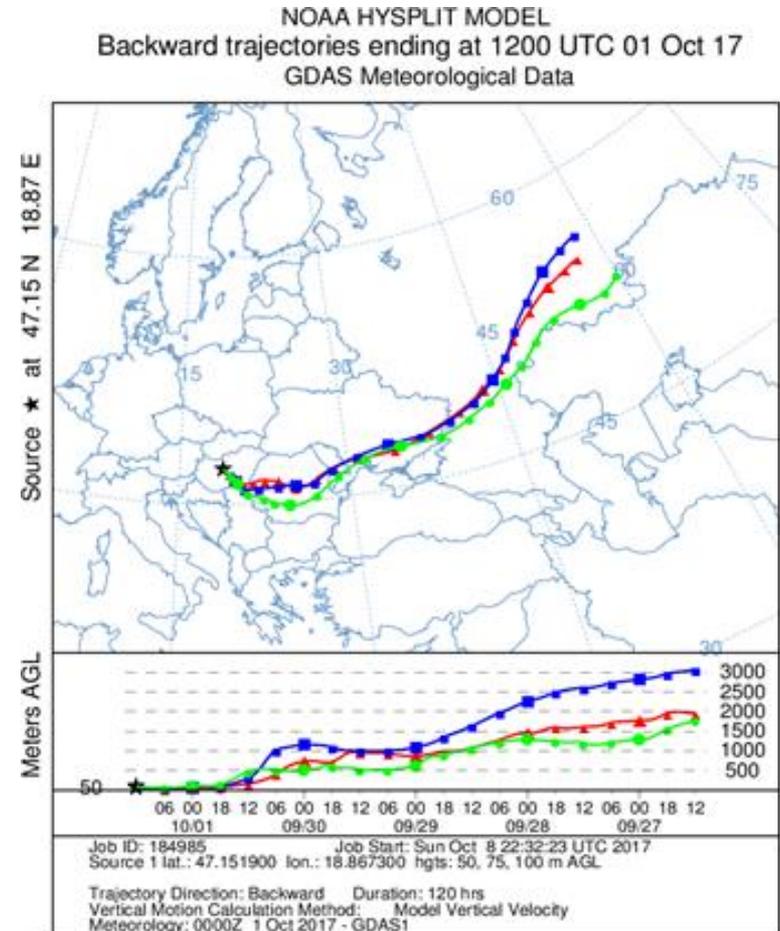
$^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$ -t (felezési idő: 374 nap) detektáltak környezeti levegőmintákban (aroszolszűrő, kihullás) a természetes radioaktivitás mellett, annál nagyságrendekkel kisebb mennyiségben



Valószínű ok: reaktorok használt fűtőelemeit feldolgozó és/vagy sugárforrásokat előállító radiokémiai laboratórium kibocsátása „may have been generated from southern regions of Ural or located close to those” (IRSN – francia sugárvédelmi hatóság)

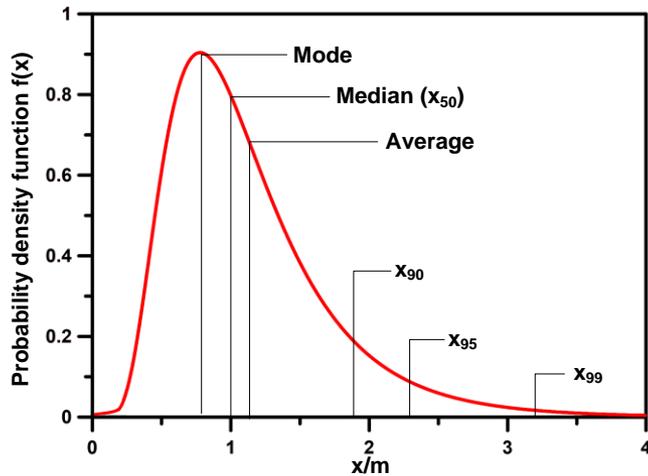
A becsült maximális dóziskövetkezmény Magyarországon <100 nSv

^{106}Ru detektálása Európában 2017 szeptember végén



„back projection” a magyarországi mérési eredményekből – a kibocsátás valahol az Ural déli részén történhetett.

Baleseti monitorozás



Characteristics of lognormal distribution with $\sigma = 0.5$.

Súlyos nukleáris balesetek (Csernobil, Fukushima) kibocsátása által okozott környezeti szennyezettségi értékek eloszlása egy adott területen nem Gauss-típusú, hanem lognormál eloszlást követ. (Forró pontok = hot spots a szennyezést összegyűjtő környezeti helyeken – pl. összefolyók a csapadékvíz összegyűjtéséhez)

Árnyékolás (biológiai védelem, shielding) számítása

A dózisteljesítmény gyengülését a párhuzamos fotonnyaláb gyengülésére alkalmazható egyenlet alapján írjuk le:

$$\dot{D} = \dot{D}_0 \cdot B \cdot \exp(-\mu \cdot x)$$

- B: build-up tényező: a szórt sugárzás megnöveli a dózist okozó intenzitást a primer fotonnyaláb hatásához képest (de azzal egyirányba); B függése:
- (μx) függvényében, azaz az anyagba történő behatolással együtt nő,
 - a szóró közeg rendszámával erősen növekszik (nő a fékezési sugárzás valószínűsége)
 - A sugárzás energiájával fordítottan arányos, mert μ (az abszorpció együttható) is csökken az energiával.

A build-up tényező függése az anyag minőségétől és vastagságától

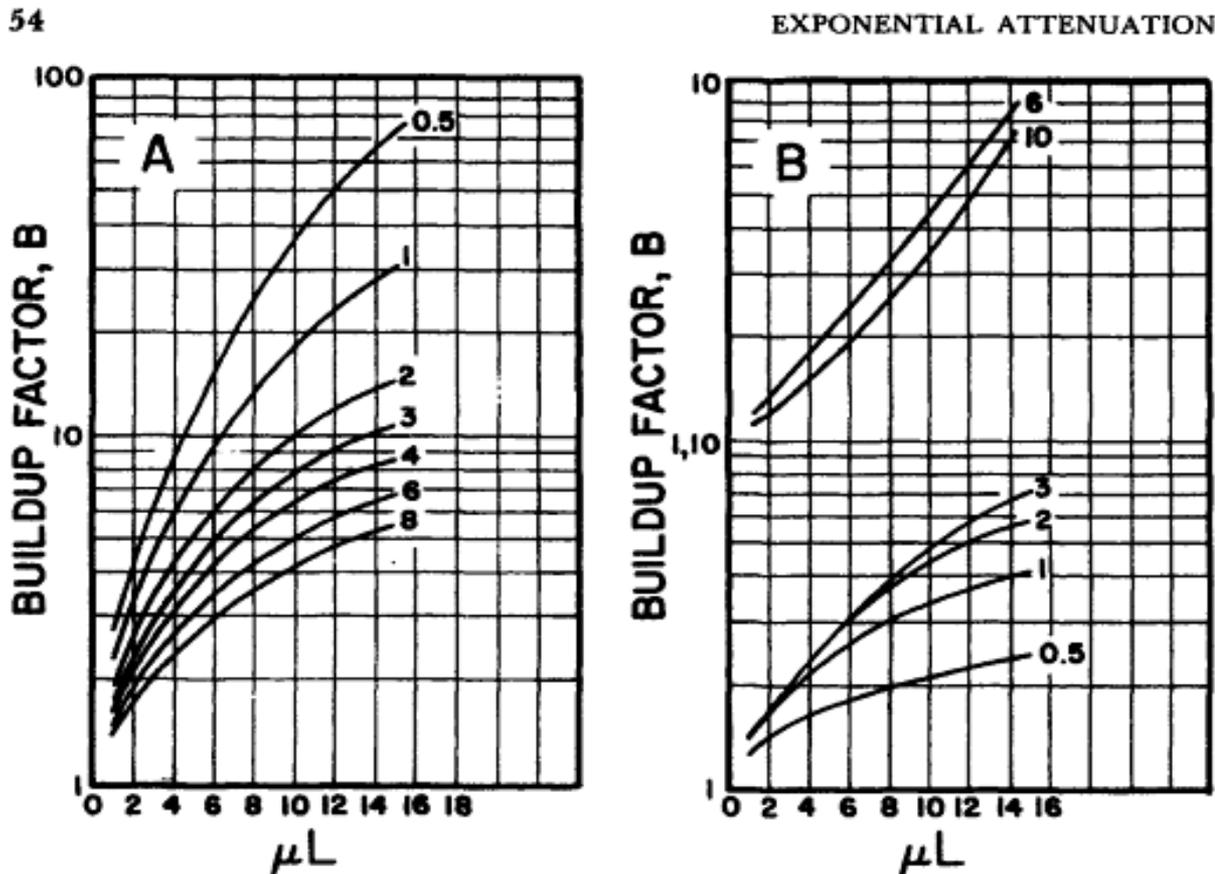


FIGURE 3.6. Exposure buildup factors for a plane, infinitely wide beam of photons perpendicularly incident on semi-infinite media of (A) water and (B) lead. Curves are labeled with photon energies in MeV. Abscissae indicate the depth in units of the mean free path $1/\mu$. (Goldstein, 1957.) Reproduced with the author's permission.

Forrás:
google books
[Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry](#)
F. H. Attix (2008)

Árnyékolás (biológiai védelem, shielding) számítása

Számítási példa: az alkalmazandó védelmi fal vastagságának meghatározása egy adott dózisteljesítmény adott mértékű gyengítéséhez.

Milyen vastag ólomlemez kell alkalmaznunk ahhoz, hogy egy hulladékcsomag közelében „szabadon” = időbeli korlátozás nélkül lehessen munkát végezni? A hulladék ^{60}Co -t tartalmaz, a „szabad szint” a Paksi Atomerőműben $1 \mu\text{Sv/h}$, a mért érték $15 \mu\text{Sv/h}$, az ólom lineáris abszorpciós együtthatója az adott energiára $0,47 \text{ cm}^{-1}$, B várhatóan (az MSZ 62-2 szabványban közölt adatok alapján) $\leq 1,4$

Árnyékolás számítása

$$x = \frac{\ln\left(\frac{\dot{D}}{B \cdot \dot{D}_0}\right)}{-\mu} = \frac{-3,044}{-0,47} = 6,5 \text{ cm}$$

Műszaki sugárvédelem – fizikai védelem, baleset-elhárítás

Fizikai védelem: illetéktelenek behatolásának megakadályozása

Baleset-elhárítás

Baleseti dózisos szabályozása (foglalkozási dózisos korlátozása: az elhárítható veszély arányában nő; lakosság: vonatkoztatási és intézkedési szintek)

BEIT: Baleset-elhárítási Intézkedési Terv (intézményi, területi, ágazati, országos)

Nukleáris és radiológiai (ipari és orvosi sugárforrásokkal történt) balesetek: Windscale, Three Mile Island, Csernobil, Goiania, Fukushima.

Műszaki sugárvédelem – balesetek, baleset-elhárítás

A sugárterhelést okozó „sugaras” balesetek >95 %-a nem nukleáris létesítményhez köthető, hanem *nagyrészt* IPARI és ORVOSI sugárforrások helytelen kezeléséből állt elő!

Baleset-elhárítás: IAEA-ajánlások alapján működő országos és helyi baleset-elhárítási szervezetek

Lessons Learned from Past Emergencies



Nukleáris balesetek – INES kategóriák



Forrás:

http://ion.elte.hu/~pappboti/radioaktivitas/cimlap/tematika/radioakt/ipar/ko_rnyhatas.htm

Nukleáris és radiológiai balesetek

Somlai János: Esetek, sugárbalesetek (Veszprém, 2008.)

Rövid, pontos leírás néhány sugaras balesetről:

http://www.zmne.hu/tanszekek/vegyl/personal/Balesetek_leiras.pdf

1957 Windscale (Anglia)

Katonai plutóniumtermelő reaktorban túlmelegedett a grafit reflektor = a Wigner-hő felszabadulása következett be (a rácshibák „rendeződtek” – exoterm folyamat)

Részleges fűtőelem-olvadás, grafittűz

A környezetbe radioaktív anyagok (hasadási termékek) kerültek, melyek körülbelül 700 km² nagyságú terület szennyeztek el. Ezekben a területeken hónapokig tilos volt a legelő tehének tejének fogyasztása. (Főként ¹³¹I felvétel veszélye miatt.)

Összes kibocsátás: $4 \cdot 10^{16}$ Bq



Nukleáris balesetek

*1979 Three Mile Island
(Pennsylvania, USA) – LOCA:
hűtőközeg-vesztékes baleset
(loss of coolant accident)*



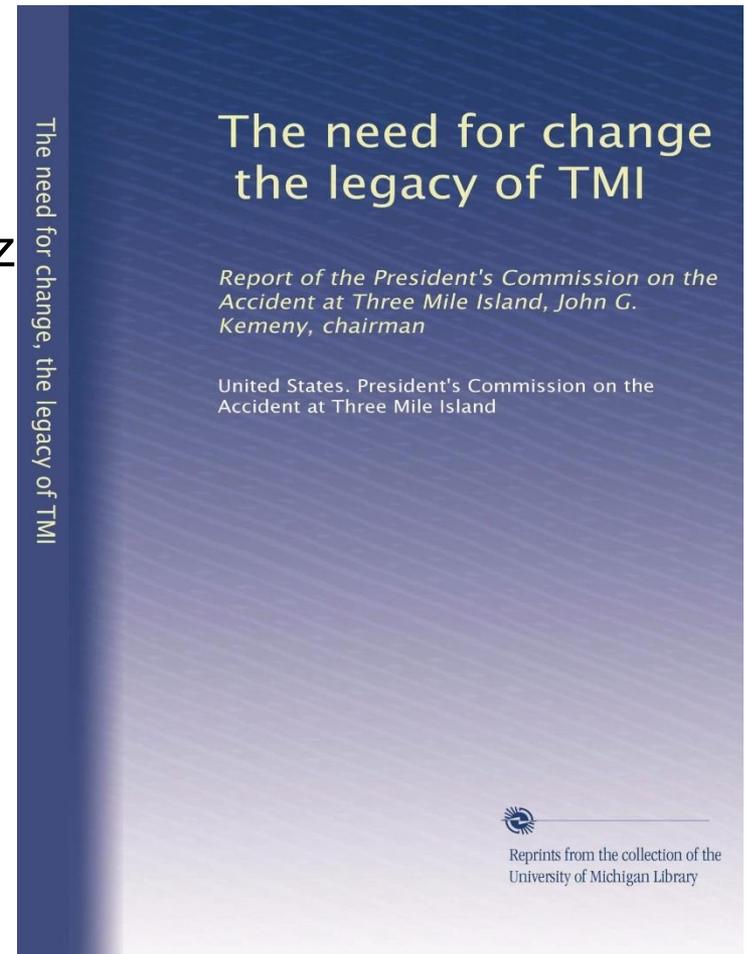
Több, egymást követő meghibásodás és az operátorok hibás döntései miatt a leállított reaktor primervize elfolyt, az aktív zóna kiszáradt, a reaktorzóna egy része megolvadt. A környezetbe kis mennyiségben radiojódok (fő képviselő: ^{131}I) és radioaktív nemesgázok kerültek. A balesetelhárítás során keletkezett szennyezett víz egy kis részét a Susquehanna folyóba, ezen át az óceánba engedték, a nagyobb részt megtisztították.

Összes jódkibocsátás: 10^{15} Bq

A TMI-baleset fontos következménye: Nuclear Safety

Önálló tudományterületként jelent meg a „Nukleáris biztonság”

- A passzív biztonság előnyösebb az aktívnál: a védelmi rendszer működéséhez ne kelljen energia-betáplálás
- Üzemzavar kezelésének módja: a jelenség-orientált döntési rendszer előnyösebb az ok-okozati elemzésre alapuló döntésnél
- Üzemzavari és baleseti helyzetek rangsorolása a tervezési szakaszban a bekövetkezési valószínűség és a következmény súlyossága alapján



Nukleáris balesetek

**1986 Csernobil
(Szovjetunió, ma
Ukrajna =
Csornobil)**

RBMK: vízhűtéses,
grafitmoderátoros
reaktortípus

RIA: reaktivitás-
beviteli baleset
(reactivity insertion
accident)



Csernobil - 1986

A reaktorban kísérletet hajtottak végre, melynek során a vészhűtő szivattyúkat és a vészleállító rendszert kikapcsolták. Az elégtelen hűtés miatt a víz a zóna egyes helyein elforrt, de a hibás reaktorfizikai tervezés (pozitív üregeffektus) miatt a reaktor teljesítménye tovább nőtt. A reaktor szabályozhatatlanná vált, és leállítása többszöri próbálkozásra sem sikerült. Grafittűz keletkezett, a vízbontás miatt hidrogéngáz fejlődött, ami felrobbant.

A robbanás során nagy mennyiségű radioaktív anyag került a környezetbe. A feláramlás több km magasba jutott, ezért a szél a csóvát több ezer kilométeres távolságra is elvitte. A kibocsátás több napig tartott. 47 közvetlen haláleset: kezelőszemélyzet, tűzoltók, baleset-elhárítók.

Kibocsátott összes radioaktivitás: $2 \cdot 10^{18}$ Bq

Kép forrása:

<https://energycentral.com/sites/default/files/users/256309/o5.J>

PG

The moderator – fuel ratio is calculated using the equation:

$$\frac{V_{\text{moderator}}}{V_{\text{fuel}}} = \frac{(d^2 - \pi R^2)h}{\pi R^2 h}$$

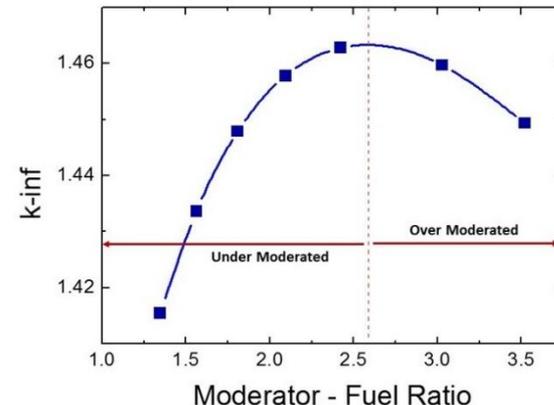
where,

V – volume

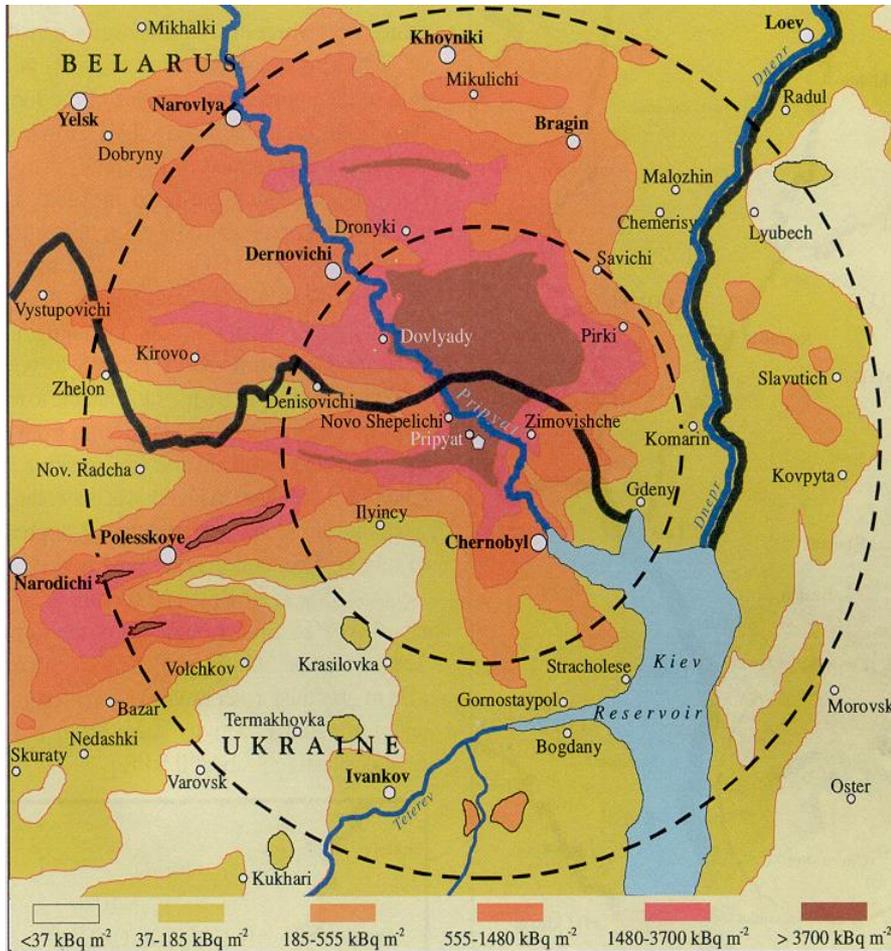
d – pin pitch

R – outermost radius of the fuel

h – length of the pin

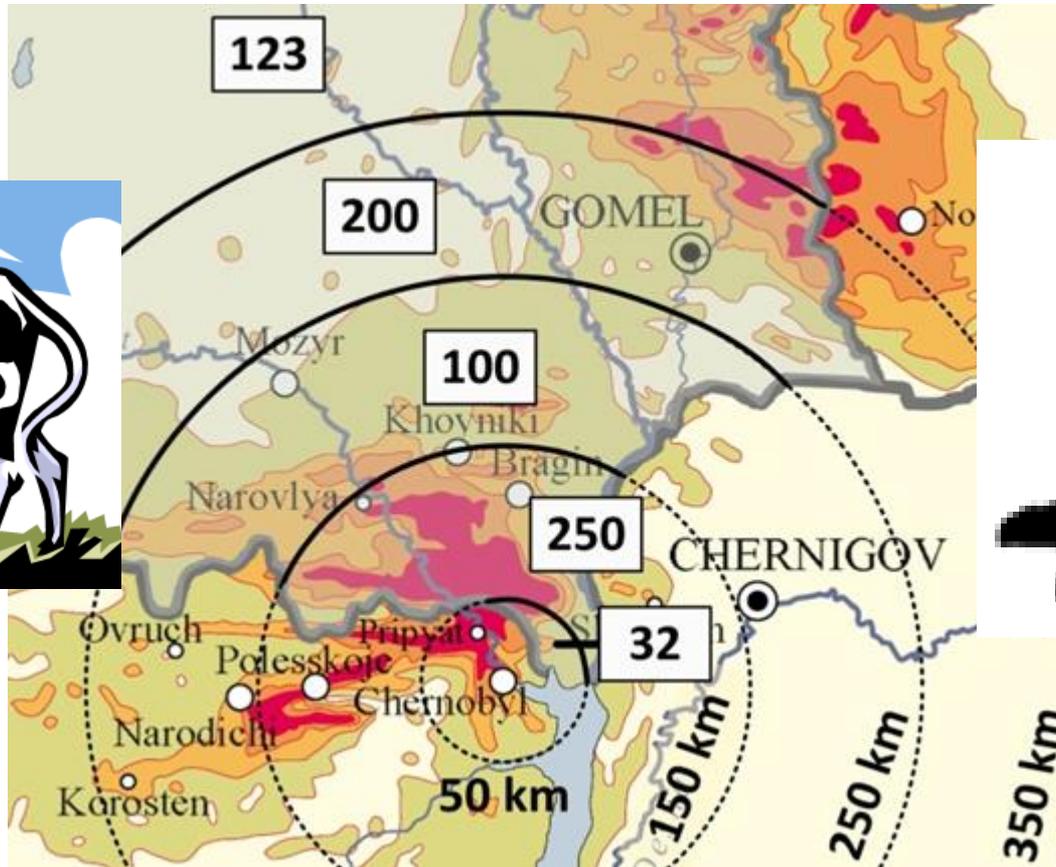


Következmények



- 134 akut sugárbetegség (ARS – acute radiation syndrome) a baleset-elhárítók között
 - 28 személy halt meg 1986-ban a nagy külső γ -dózistól és β -sugárzóktól származó bőrfelület-sérüléstől
 - 19 további személy halt meg 1987-2004 között, részben a balesethez is köthető okból
- ~ 120,000 embert kitelepítettek
- Élelmiszerkorlátozások > 1000 km-re európai országokban, de...

Gyermekkori pajzsmirigy-rák-esetek >350 km
– a korábbi esetszám sokszorososa –
gyermekek és terhes anyák tejfogyasztásától



Esetszámok



Radiológiai baleset

Goiania (Brazília) 1987: ellenőrizetlen sugárforrás okozta baleset

Egy megszüntetett klinika terápiás besugárzó állomásán felejtettek egy 50 TBq aktivitású ^{137}Cs -sugárforrást.

Guberálók megtalálták, és egy hulladéktelepre vitték, ahol megpróbálták szétszerelni.

„Kék fényű por” – sokan kértek belőle.

250 személy kapott jelentős dózist, 50-en lettek súlyosan sugárbetegek, 4-en meghaltak, a közvetlen ok a csontvelő pusztulása volt. (A maximális dózis 5 Gy volt)

A városban 85 házat kellett lebontani, ebből közel 3000 m³ radioaktív hulladék keletkezett.

Goiânia Radiological Accident (Brazil, 1987)

- Goiânia: the capital of Goiás State, Brazil
- Population: approximately 1 million
- The emergency happened in a poor section of the city, in an old abandoned radiotherapy facility



Goiânia Radiological Accident (2)

- 13 Sept. 1987:
 - source removed
 - sold to scrap yard
 - shielding destroyed
 - blue light powder was spread among different families
 - after two weeks first signs of deterministic effects
- 29. Sept. 1987: response initiated
- March 1988: decontamination completed
- Radioactive waste: 3.500 m³



Goiânia Radiological Accident (3)

Lessons Learned

- Proper implementation of regulatory control would have prevented this accident.
- Large scale radiological accidents are possible.
- Proper EPR would have limited the consequences.
- International assistance can be timely and extremely useful (IEC was formed later)

Nukleáris baleset

1999 Tokai-mura (Japán) – kritikussági baleset

A JCO üzemében kutatóreaktorokhoz fűtőelemeket gyártó munkások egy feldolgozó tartályba tévedésből az adott dúsítási szinten már a kritikus tömeget meghaladó mennyiségű uránoldatot töltöttek, így beindult a láncreakció. A munkások elmondásuk szerint kék villanást láttak, majd rövid időn belül nagyon rosszul lettek.

Sugárbetegség: 2 halott (emésztőrendszer pusztulása),
1 gyógyult áldozat (tüdősérülés)

Egy „enyhe” radiológiai baleset leírása

Event date: 2010-04-20

Location/facility: Ohio State University, Columbus Ohio, USA

The potentially overexposed individual may have spent a significant amount of time visiting his fiancée who was receiving a temporary implant of ^{137}Cs and ^{192}Ir seeds via low dose-rate remote afterloader brachytherapy. The licensee instructed the patient's visitor to visit no longer than 2 hours and to stay behind the bedside shield during these visitations. On Tuesday, April 20, 2010, the Assistant Nurse Manager informed the licensee that the visitor claimed to have spent the night in the bed with the patient on two consecutive nights. A preliminary and conservative dose estimate for the visitor is 60 mSv whole body exposure, based on a 16-hour stay time (8 hours each night for two nights) and an estimated distance of 15.2 cm from the sources. Investigation of the event continues.

Fukushima 2011

- Baleset alapvető oka: 9,0 erősségű földrengést követő szökőár
- Tervezési gyengeségek: túl alacsony volt a védőfal a szökőár ellen, a hőelvonás tartós elmaradása lehetséges volt, mert tönkrementek a dízelgenerátorok.
- Tervezési előnyök: hatásos konténment
- INES minősítés = 7 (a lehető legsúlyosabb baleset ???)

Fukushima 2011.

Status of

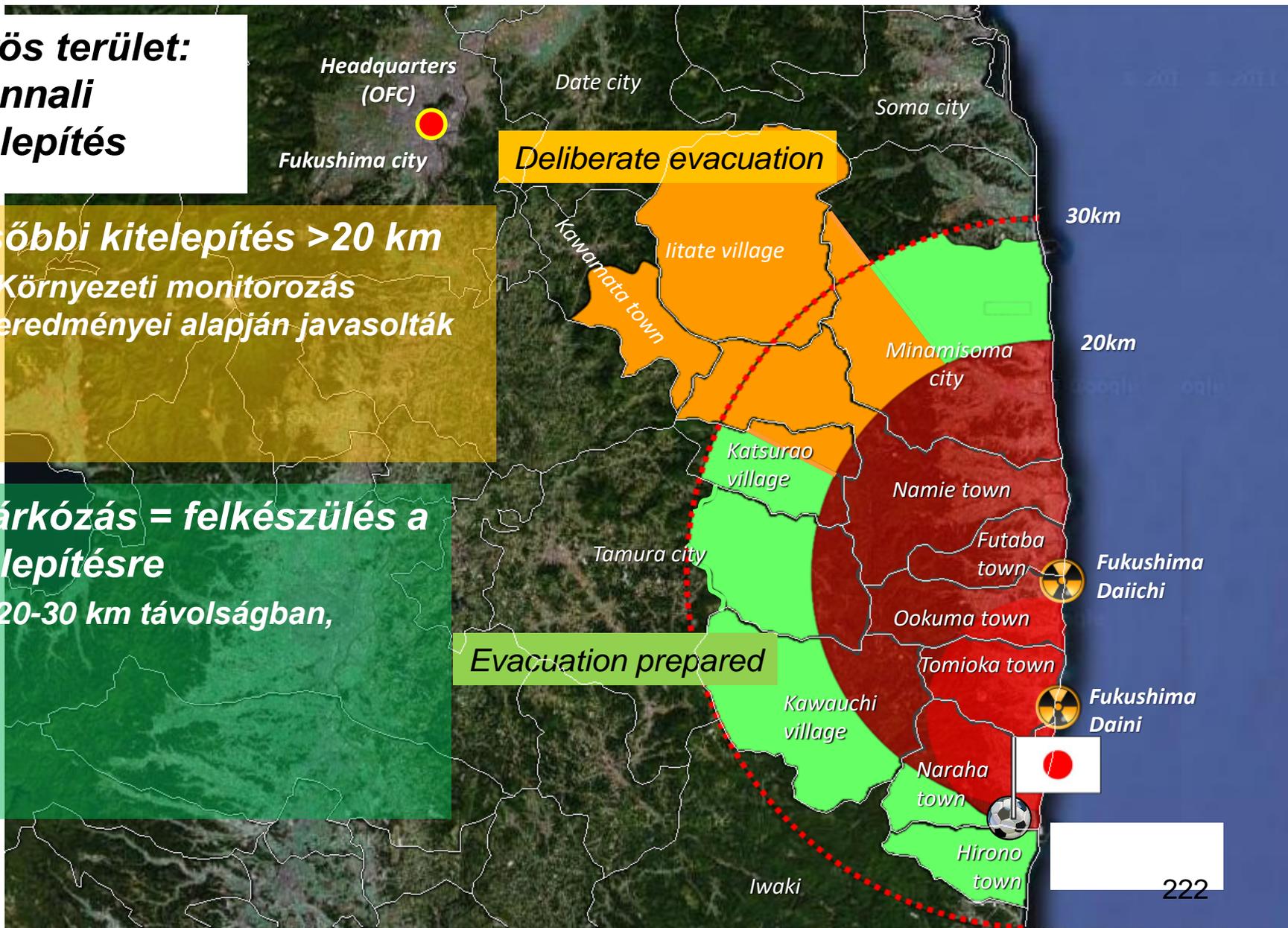
Power Station	
Unit	1
Electric / Thermal Power output (MW)	460 / 1380
Type of Reactor	BWR-3
Operation Status at the earthquake occurred	In Service → Shutdown
Fuel assemblies loaded in Core	400
Core and Fuel Integrity (Loaded fuel assemblies)	Damaged (55%*1)
Reactor Pressure Vessel structural integrity	Unknown
Containment Vessel structural integrity	Not Damaged (estimation)
Core cooling requiring AC power 1 (Large volumetric freshwater injection)	Not Functional
Core cooling requiring AC power 2 (Cooling through Heat Exchangers)	Not Functional
Building Integrity	Severely Damaged (Hydrogen Explosion)
Water Level of the Reactor Pressure Vessel	Fuel exposed partially or fully
Pressure / Temperature of the Reactor Pressure Vessel	Gradually increasing / Decreased a little after increasing over 400°C on Mar. 24th
Containment Vessel Pressure	Decreased a little after increasing up to 0.4Mpa on Mar. 24th
Water injection to core (Accident Management)	Continuing (Switch from seawater to freshwater)
Water injection to Containment Vessel (AM)	Feed water to fill up the CV (started 4/27)
Containment Venting (AM)	Temporarily stopped

Kitelepítések a baleset után

- **Vörös terület: azonnali kitelepítés**

- **Későbbi kitelepítés >20 km**
 - **Környezeti monitorozás eredményei alapján javasolták**

- **Elzárkózás = felkészülés a kitelepítésre**
 - **20-30 km távolságban,**



*J village: Japan Football Association's National Training Centre

Fukushima - értékelések

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

31. Adults living in the city of Fukushima were estimated to have received, on average, an effective dose of about 4 mSv in the first year following the accident; estimated doses for 1-year-old infants were about twice as high.

SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION
UNSCEAR 2013 Report

Volume I

REPORT TO THE GENERAL ASSEMBLY

SCIENTIFIC ANNEX A:

Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami

A reaktorok közelében élő lakosság effektív dózisa az első évben 4 mSv volt. Ez kb. kétszerese a természetes háttérnek. Az 1 éves gyermekekre számított dózis kb. 8 mSv volt.

IAEA Report on

Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

 IAEA
International Atomic Energy Agency

Sugárvédelem és jogi szabályozása – 2020. őszi félév

Köszönöm a figyelmet!