Nukleáris környezetvédelem

Előadások: 2022. IX. 5. – XII. 5.
Félévközi dolgozatok: 2022. X. 17. (7+1. oktatási hét), 2022. XII. 5. (14. oktatási hét)

Laborgyakorlatok: a 8.-13. oktatási héten péntekenként, csoportokban. A csoportbeosztást a 3.-4. oktatási héten készítjük el. Vezető: Cservenák Ildikó (Nukleáris Technikai Intézet)

Irodalom a felkészüléshez

- Fehér I., Deme S. (szerk.): Sugárvédelem (ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2010.)
- Környezetmérnöki Tudástár sorozat 14. kötet: Somlai J.: Sugárvédelem

  http://mkweb.uni-pannon.hu/tudastar/anyagok/14-sugvedelem.pdf
- Zagyvai Péter és mások: A nukleáris üzemanyagciklus radioaktív hulladékai (PSI-EK 2013.)
- https://oktatok.reak.bme.hu/zagyvai/
- http://www.zmne.hu/tanszekek/vegyi/personal/Dozimetriasugarvedelem.pdf

Laborgyakorlatok anyaga

- https://oktatok.reak.bme.hu/zagyvai/

Az előadások tematikája

1. Sugárfizikai alapok – Ionizáló sugárzások keletkezése és dózisa
2. Az ionizáló sugárzások egészségkárosító hatásai
3. A dózis és dózisteljesítmény meghatározásának mérési és számítási módszerei
4. A sugárvédelmi szabályozás rendszere
5. Természetes radioaktivitás a környezetben, radioaktív hulladékok keletkezése és kijutása a környezetbe
6. Radioaktív szennyezések transzportja a környezetben, környezeti monitorozás

Ionizáló sugárzások

Részecskesugárzások: egy-egy, a térben szabadon haladó = kisugárzott atomi vagy szubatomi részecske kinetikus energiája akkora, hogy ütközések révén sok ezer ion képzésére (pozitív és negatív töltések szétválasztására) elegendő.

Forrásai:

- Radioaktív anyagok = gerjesztett állapotba jutott atommagok energialeadása (bomlása) során kilépő részecskék
- Nagy (akár relativisztikus) sebességre gyorsult/gyorsított szabad töltött részecskék (pl. elektronok) és azok fékeződésével berendezésekben keltett elektromágneses sugárzás (röntgengépek, gyorsítók stb.)

A radioaktivitás sztochasztikus alapegyenletei

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

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

N: bomlásra képes, azonos fajtájú atommagok száma [darab]
λ: bomlási állandó = időegység alatti <u>bomlás valószínűsége</u> [1/s]
t: idő
A: aktivitás [1/s ; Becquerel; Bq]
$T_{1/2}$: felezési idő [s]

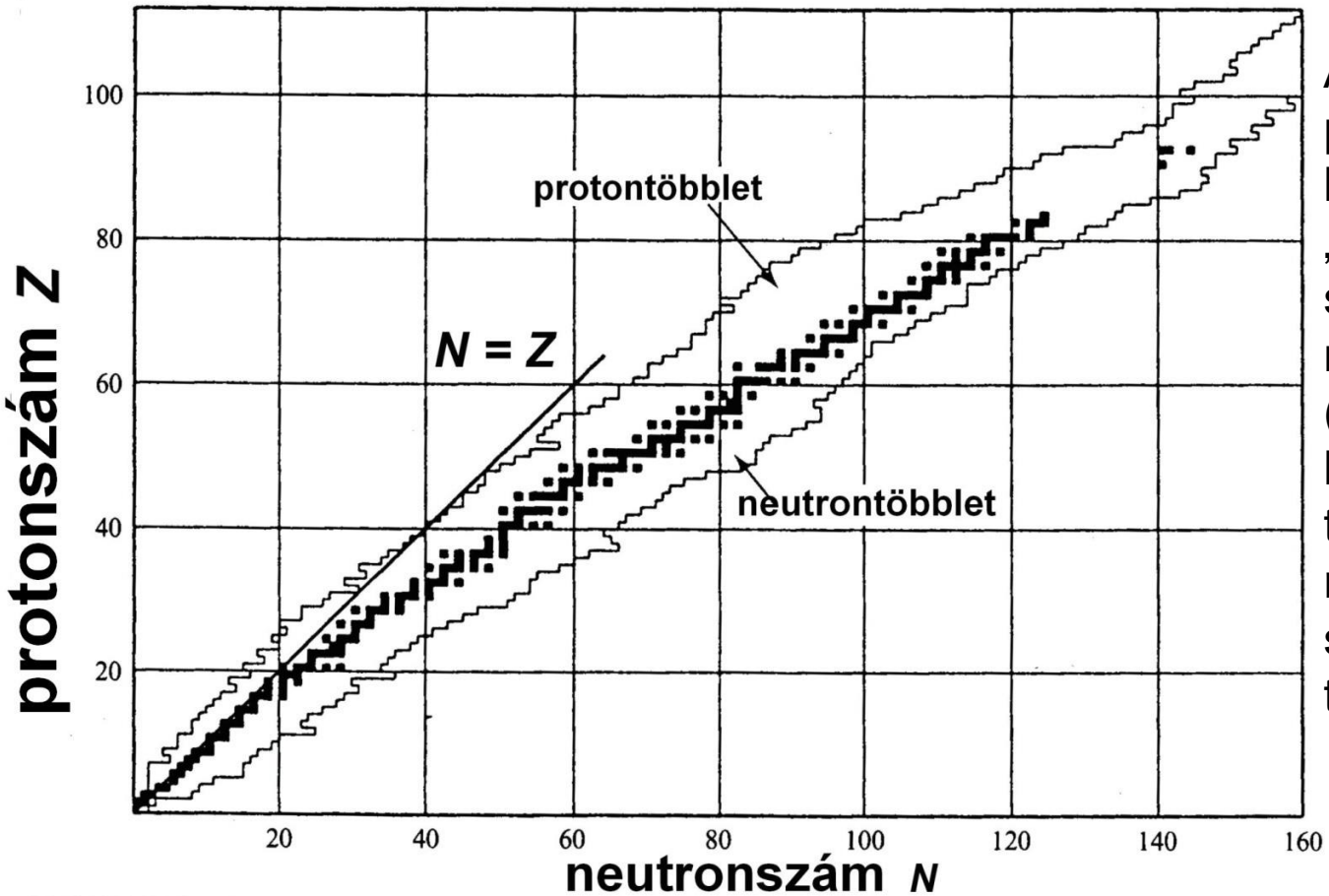
$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

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

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

A fentiek kiegészülhetnek a radioaktív anyag keletkezését (aktivációt) leíró taggal

Stabil és radioaktív izotópok



Az atommagon belüli pozitív töltések taszító hatásának „kompenzálására” a stabilitáshoz egyre több neutronra van szükség. (Az ábrán a 10^9 évnél hosszabb felezési idejű természetes radionuklidokat is stabilként, fekete ponttal tüntették fel.)

Bomlási módok: α-bomlás ($^4_2He^{2+}$ - rendszám- és tömegszámcsökkenés), β-bomlás (β- vagy β+ vagy elektronbefogás – rendszámnövekedés vagy csökkenés ±1, neutron- vagy protonkibocsátás, maghasadás stb. – Ezek többnyire egyben a kibocsátott sugárzás nevét is jelentik.

Ionizáló sugárzások és kölcsönhatások

A közeg és a sugárzás közötti kölcsönhatás szerint:

Közvetlenül ionizáló sugárzások: α, β, γ, röntgen – az elektronoknak képesek azok ionizációjához elegendő energiát átadni ütközésekkel vagy abszorpcióval. Forrásuk elsősorban a radioaktív bomlás, valamint a magreakciók.

Az α^{2+}- és β- (β^- és β^+) részecskék elektromos töltéssel rendelkeznek, sok egymást követő ütközésben ionizálnak, amíg energiájuk le nem csökken.

A töltés és nyugalmi tömeg nélküli γ- és röntgenfotonok és az elektronok közötti ütközés véletlenszerű. Csak az „első lökést” adják a céltárgyban az energiájukat részben vagy egészben átvevő elektron által továbbvitt sorozatos ionizációhoz, ezért ezt a folyamatot lehet közvetett ionizációnak is tekinteni. γ-fotonok: atommagoknak a bomlást követő azonnali vagy késleltetett energiaállapot-változásából származnak: *kísérő sugárzás, nem önálló bomlási forma*

Röntgensugárzás: elektronok energiaállapot-változásából származó elektromágneses sugárzás. Ha nagy sebességgel mozgó szabad elektronok ütköznek egy közeg atomjaival, folytonos energiaeloszlású röntgensugárzás keletkezik – orvosi és ipari röntgengépek, gyorsítók.

Ionizáló sugárzások és kölcsönhatások

Neutronsugárzás: Közvetve ionizáló sugárzás: az atommagokkal való kölcsönhatásaik során ionizációra képes részecskék jelennek meg, de ők maguk az elektronokkal közvetlenül nem cserélnek energiát ütközések által.

Egyes közlemények e kategóriába sorolják a fotonsugárzásokat is, mert kölcsönhatásaik sokkal ritkábbak, mint a töltött részecskéké, és azokkal ellentétben valószínűségi jellegűek.

További osztályozás: kis- és nagy áthatoló képességű sugárzások. Kis áthatoló képességűek = töltött részecskék; nagy áthatoló képességűek: fotonok és neutronok

Bomlási módok – alfabomlás

Az **α-bomlás** során a radioaktív 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 nukleáris kölcsönhatás.

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

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

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 <u>nem diszkrét</u>. A bomlás hajtóereje a gyenge nukleáris 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

$$e^+ + e^- = 2f$$

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

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

A „hiányzó” pályaelektron pótlódik egy külső pályáról (gömbszimmetrikus „s” pályáról) – kísérő karakterisztikus röntgensugárzás-kaszkád keletkezik

Bomlási módok – gamma átmenet

Gamma átmenet: a nukleonok energiaszintek közötti 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 fotonok 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, Eγ<2-300 keV) nem foton kibocsátásával jár, hanem az energia egy, általában belső, szimmetrikus atompályán (s pályák) 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.

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

A belső konverzióval kilépő elektron energiája <u>diszkrét!</u>

Ionizáló sugárzások és kölcsönhatások

Az anyagi közegnek a sugárzásokkal kölcsönhatásra képes alkotórészei:

- elektronok,
- az atomok elektromágneses erőtere,
- atommag.

Az elektronokkal való ütközés nem minden esetben vezet azok ionizációjára. A sugárzás által több lépésben átadott energia egy jelentős része (általában 50-70 %-a) nem ionizációt, csak gerjesztést eredményez, azaz a közeg termikus energiáját növeli meg.

Ionizáló sugárzások és kölcsönhatások

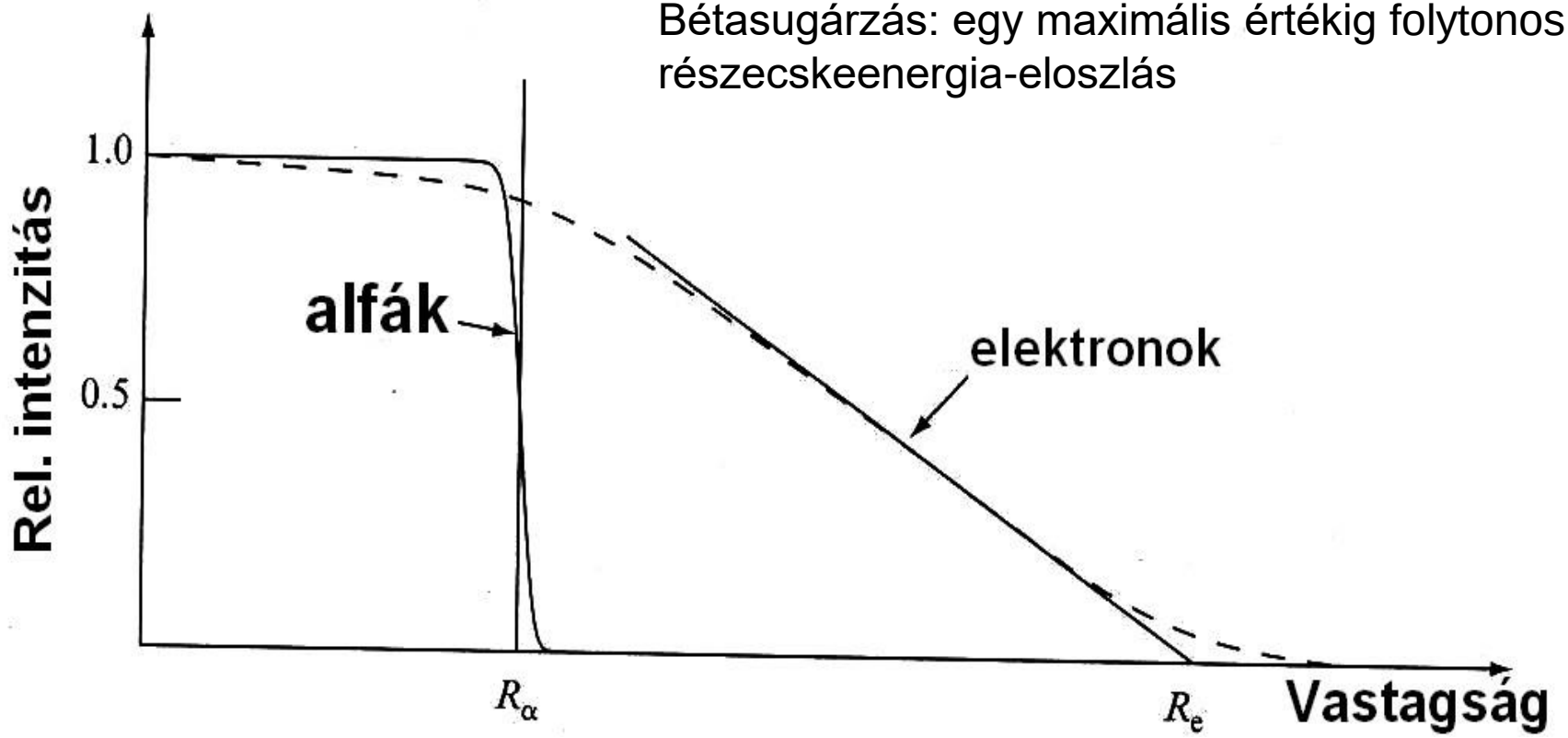
Az ionizáló sugárzások jellemző mennyiségei:

- Energia és energiacsökkenés - [J] és [eV]

  1 eV = 1,602 . 10^{-19} J - Ha egy elektronnyi töltés 1V potenciálkülönbségen áthaladva felgyorsul, akkor mozgási (kinetikus) energiája 1 eV-tal nő meg. **(W=Q.U)**
- Alfa- és gammasugárzás: diszkrét energiájúak
- Bétasugárzás: folytonos energiaeloszlás nullától egy maximális értékig
- Intenzitás = adott irányba haladó, egy megfigyelési helyen időegység alatt áthaladt részecskék száma - [s^{-1}] = áram

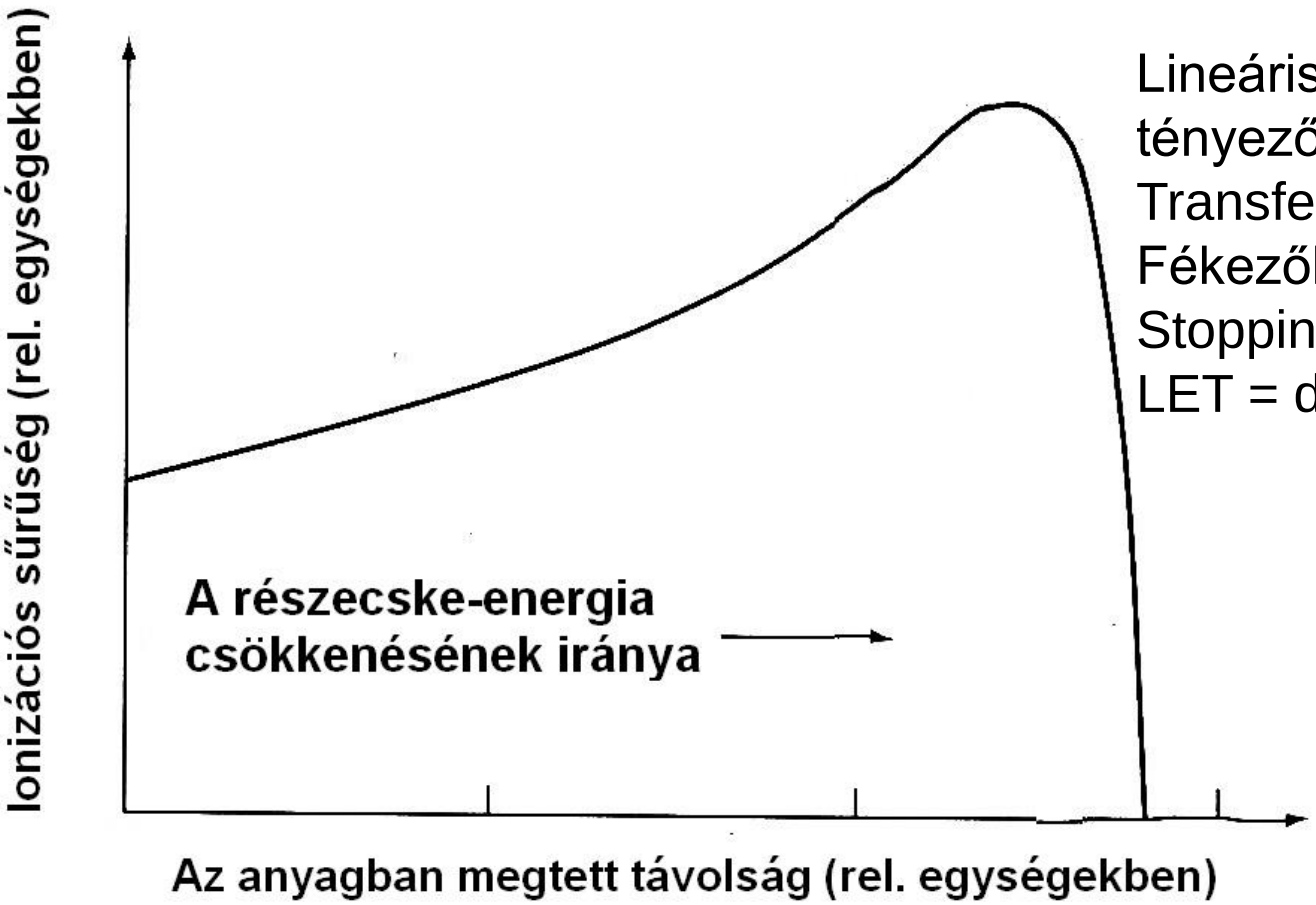
Alfa- és bétasugárzás elnyelődése és szórása az anyagban

Alfasugárzás: diszkrét energiák
Bétasugárzás: egy maximális értékig folytonos részecskeenergia-eloszlás



Ütközés elektronokkal – energia átadása: ionizáció, gerjesztés (Coulomb-kölcsönhatás)
Szórás: ütközés utáni mozgás megváltozott irányban és sebességgel

Lineáris energiaátadási tényező (LET) alfa- és bétasugárzásra



Lineáris energiaátadási tényező = Linear Energy Transfer ≈ Fékezőképesség = Stopping Power = LET = dE/dx

Alfa- és bétasugárzás elnyelődése anyagi közegekben

α-sugárzás LET-értéke vízben: ~ 100 keV/μm

Energiaátvitel: a meglökött elektronok ionizációja vagy gerjesztése (Coulomb-kölcsönhatás), egyes speciális atommagok (Be) esetében magreakció is lehetséges.

Hatótávolság (range) vízben 20 – 70 μm, levegőben 4 – 8 cm (útvonala kb. egyenes)

β-sugárzás LET-értéke vízben: < 10 keV/μm

Energiaátvitel formái:

- elektronokkal Coulomb-kölcsönhatás: ionizáció vagy gerjesztés;
- atom elektromágneses erőterével: fékezési sugárzás (folytonos röntgensugárzás, energiája az elektron energiájától, intenzitása a közeg rendszámától függ)
- Cserenkov-sugárzás: az adott közegben érvényes fénysebességnél nagyobb sebességű elektron látható fényt is kibocsát.

A sugárzás hatótávolsága lényegesen kisebb, mint az elektronok összes úthossza (előbbi vízben mm-cm nagyságrendű).

Gamma- és röntgensugárzás elnyelődése és szórása – valószínűségi modell

Foton energiaátadása részben hullám-, részben anyagi természetű rendszernek – sztochasztikus modell: „sikeres ütközések”

- Elektronokkal (ionizáció – többféle kölcsönhatásban, a foton elnyelődik vagy rugalmas vagy rugalmatlan szórás (energia- és irányváltozás) után továbbhalad)
- Atommagokkal (abszorpció = magreakció, >5 MeV energiaküszöb felett)
- Atomok elektromágneses erőterével (elektron + pozitron párkeltés - küszöbreakció, >1,2 MeV energiánál)

Általános törvényszerűség: sztochasztikus (véletlenszerű) kölcsönhatás: nem hatótávolsággal, hanem gyengítési együtthatóval/felezési rétegvastagsággal jellemzik, az egyes valószínűségek és így az összegük is energiafüggő.

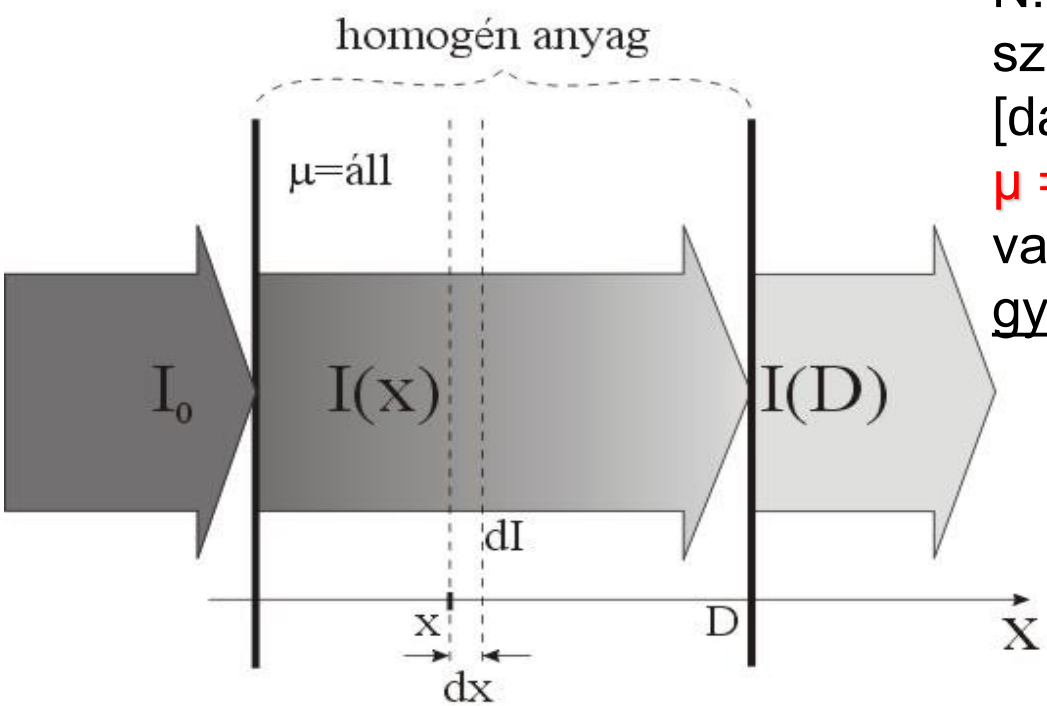
Az energiát átvett elektronok kinetikus energiája:

- További ionizációt okozhat;
- Ionizáció nélküli gerjesztést okozhat;
- Szekunder fotonsugárzás (folytonos röntgensugárzás = fékezési sugárzás) keltését eredményezheti.

Ionizáló fotonsugárzás kölcsönhatása anyagi közeggel – valószínűségi modell

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

I: részecskeáram [darab/s]
σ: kölcsönhatási valószínűség egy „partnerre” [-]
N: lehetséges ütközési partnerek száma egységnyi úthosszon [darab/m]
μ = σ.N = kölcsönhatási valószínűség [1/m] = <u>lineáris gyengítési tényező</u> (1. értelmezés)



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

Integrálás után: általános gyengülési egyenlet

Párhuzamos és monoenergiás sugárnyaláb esetén

Fotonsugárzás elnyelése és szórása

Párhuzamos, homogén fotonnyaláb <u>gyengülése</u> anyagi közegben (gyengülés = minden, a foton haladási irányát és/vagy energiáját befolyásoló kölcsönhatás)

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

$$\sigma_A \sim Z \left[\frac{m^2}{atom}\right]$$

atomi hatáskeresztmetszet, a rendszámmal nő

$$\rho_A = \frac{N_A}{V_M}\left[\frac{\frac{atom}{mól}}{\frac{m^3}{mól}}\right]$$

atomsűrűség

$$\mu = \sigma_A \cdot \rho_A \left[\frac{m^2}{m^3}\right]$$

lineáris gyengítési együttható

μ= lineáris energiaátadási tényező
= <u>térfogategységre jutó hatásos ütközési keresztmetszet</u> (2. értelmezés, $[m^2/m^3] = [m^{-1}]$)

μ/ρ = tömegabszorpciós vagy tömeggyengítési tényező
= <u>tömegegységre jutó gyengítési együttható</u>

LET = dE/dx = a szabaddá tett <u>elektronokra</u> jellemző lineáris energiaátadási tényező

σ_A= atomi hatásos ütközési keresztmetszet
ütközés: abszorpció vagy rugalmatlan szórás,
μ ezek valószínűségének összegét jelenti, függ az anyagtól és a sugárzás energiájától is.

Fizikai dózismennyiségek

Elnyelt (fizikai) dózis = ionizáló sugárzásokból tömegegységre jutó elnyelt energia

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

Általános (de csak az ionizáló sugárzásokra érvényes) dózisdefiníció!

<u>Fotonsugárzás</u> elnyelt dózisteljesítménye [Gy/s]

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

$$\frac{dD}{dt} = \Phi_E \cdot \frac{\mu}{\rho}$$

$$\Phi_E = \frac{A \cdot f_R \cdot E_R}{4 \cdot r^2 \cdot \pi}$$

Négyzetes gyengülési törvény – dózisszámítás <u>pontszerű</u> radioaktív sugárforrástól származó külső sugárterhelés esetére

<u>k_γ: dózistényező</u>

Φ_E: energiaáram-sűrűség (fluxus) [J/(m^{2}s)]
A = dN/dt : a sugárforrás aktivitása [bomlás/s = Bq]
f_R: részecske-(foton)gyakoriság [foton/bomlás]
E_R: fotonenergia [J/foton]
Hasonló összefüggés írható fel a neutronsugárzásra is

Biológiai dózismennyiségek

Egyenérték dózis = a fizikai dózisnak az emberi szövetekre irányuló, de szövetek pusztulásával nem járó biológiai kártételével arányos mennyiség

$$H = D \cdot w_R$$

[J/kg, sievert, Sv]

w_R sugárzási tényező – a kártétellel arányos, a LET függvénye
$w_\alpha = 20$,
$w_\gamma = 1$,
$w_\beta = 1$,
$w_n = 2{,}5 \div 20$ (az energiától függően, a maximális érték a közepes energiákhoz tartozik)

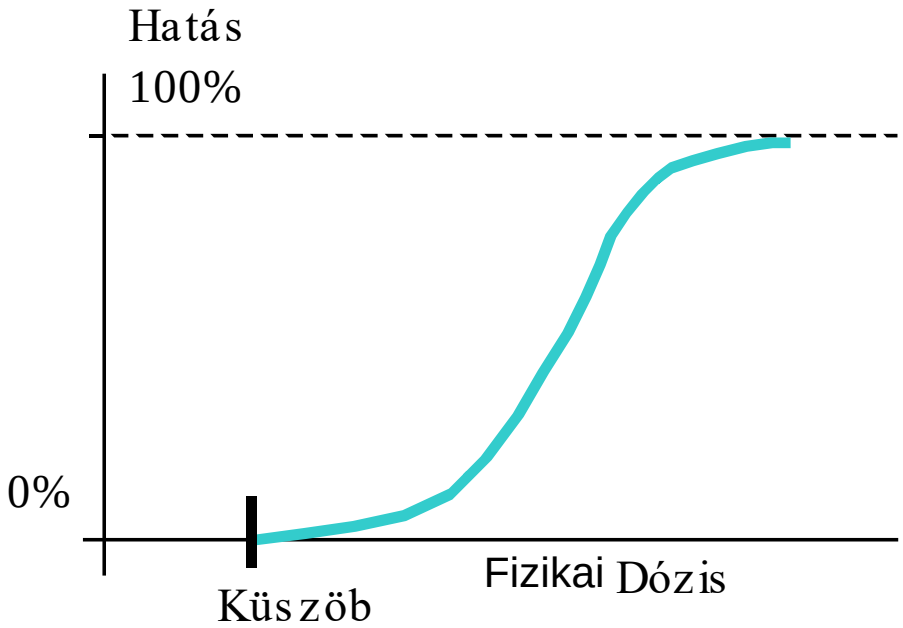
Az egyenérték dózis a sejti hatást jellemzi – de a sejtekre (és ezáltal a szövetekre) többféle hatást fejthet ki a sugárzás.

Sugárzási tényező: a sejt méretének megfelelő szerves molekulákban okozható elváltozások számával arányos.

Az ionizáló sugárzások egészséget károsító hatásai

Determinisztikus hatás:

- küszöbdózishoz kötött (≥ 0,3 – 0,4 Gy szervtől és életkortól függően, magzat: 0,1 Gy);
- szövetpusztulást = sok sejt egyidejű nekrózisát okozza a sugárzás;
- a hatás súlyossága függ a dózistól;
- akut/azonnali hatás (~ égés);
- halált okozhat: központi idegrendszert, emésztőrendszert, csontvelőt érő nagy dózis
- erre a hatásra NEM alkalmazható az egyenérték dózis, csak egy másik, szintén az elnyelt dózisból származtatott sajátos „antropomorf” mennyiség



Determinisztikus hatást kiváltó dózis

ND = D . RBE(R)

ND: necrotic dose = szövetpusztulást okozó elnyelt dózis

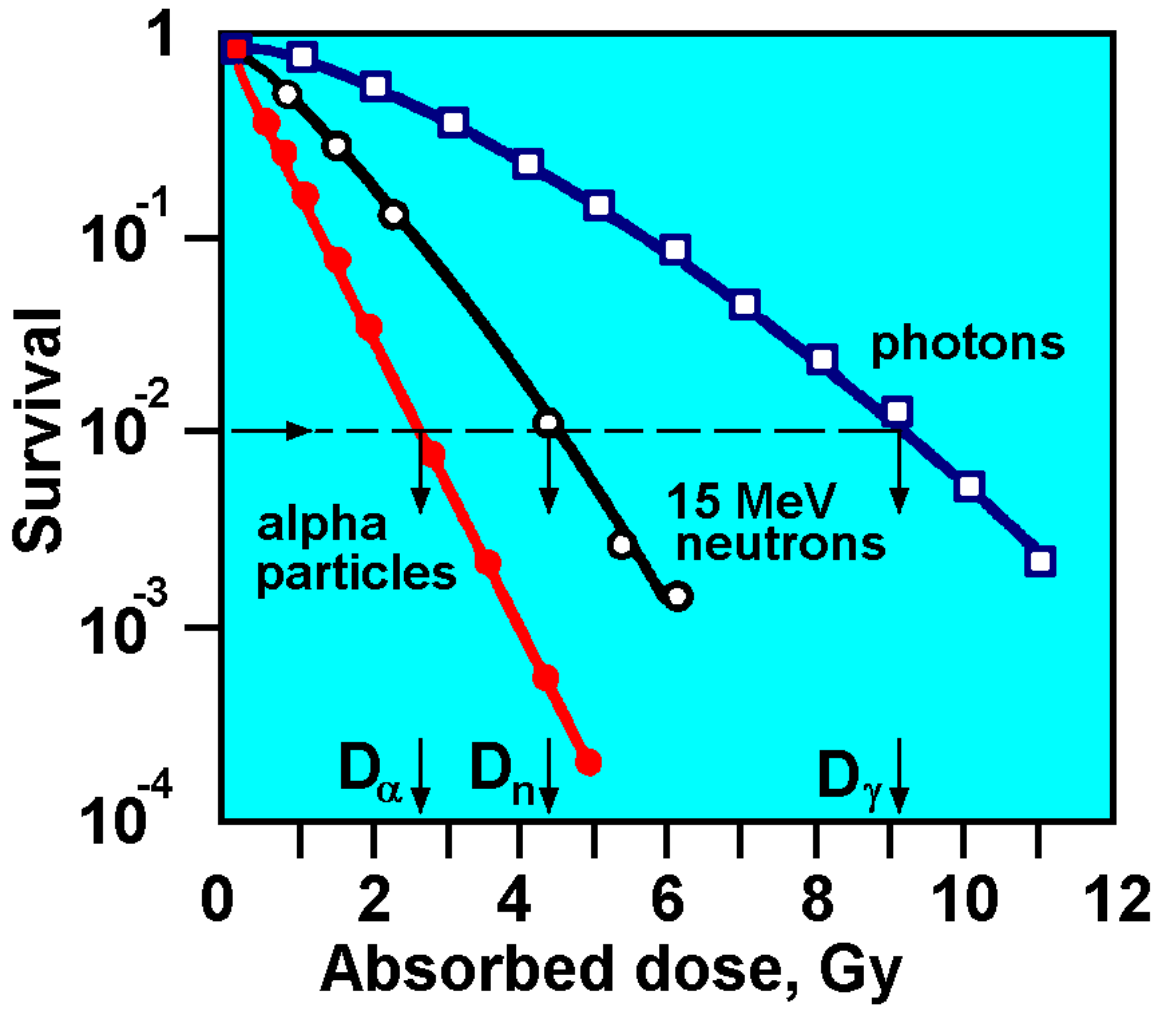
RBE: relative biological effectiveness = relatív biológiai egyenérték (nekrózist okozó képesség) – egyaránt függ a sugárzásfajtától és az expozíció körülményeitől!

R: sugárzásfajta

RBE

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

RBE a sugárzás károkozó képességét jellemzi determinisztikus hatásra



$$D_\alpha < D_n < D_\gamma$$

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

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

$$RBE_\alpha > RBE_n$$

Sztochasztikus hatás – a túlélő sejtek mutációjának kockázata

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

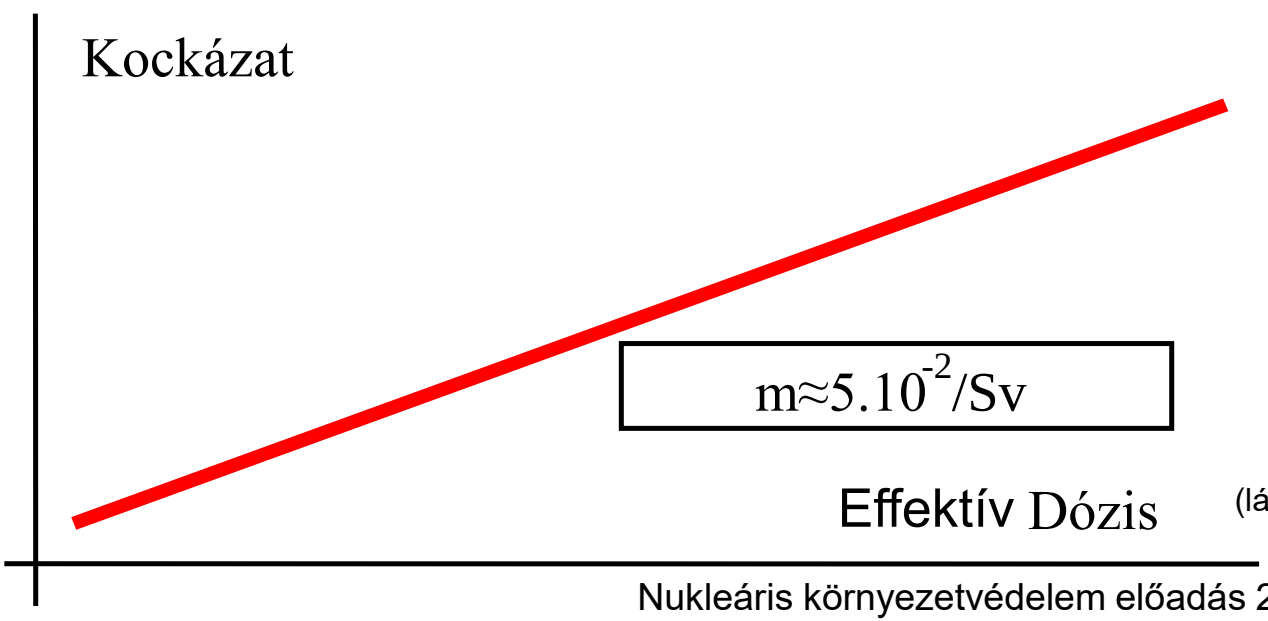
A testi sejtekben átlagosan $0{,}77.10^{-9}$ DNS-mutáció keletkezik (manifesztálódik) osztódásonként és bázispáronként, természetes okokból. Az emberi genom átlagos hossza $6{,}4.10^{+9}$ bázispár, így minden osztódásnál hozzávetőlegesen öt mutáció keletkezik; a „mesterséges" hatások ezt még megnövelhetik.

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

Az ionizáló sugárzás egészségkárosító hatásai

Sztochasztikus hatás:

- nincs küszöbdózis (bár a kis dózisok hatása nem igazolható);
- sejtmutációt okoz a DNS-szerkezet megváltoztatásával (de vannak DNS-javító mechanizmusok, a mutáció csak az osztódásnál érvényesül);
- a hatás (rosszindulatú daganat = rák) valószínűsége függ a dózistól;
- a kockázat/dózis függvény lineáris (?);
- CSAK erre a hatásra vonatkozik az egyenértékdózis



Az 1945-ös japán atombomba-támadások túlélőinek statisztikájából származtatva (1950 – 2002: adatgyűjtés időszaka)

(lásd a következő diát)

Biológiai dózismennyiségek

$$E(= H_E) = \sum_T H_T \cdot w_T$$

J/kg = Sievert [Sv]

<u>Effektív dózis</u> = az emberi szövetek egyenértékdózisának súlyozott összege, arányos a teljes kockázattal

$$\sum_T w_T \equiv 1$$

w_T szöveti súlyozó tényező
Az adott szövettípusnak rosszindulatú daganat kialakulására vonatkozó relatív érzékenységétől függ (általános statisztikai adatokból származtatták, mert nincs elegendő adat a radiológiai okból keletkezett esetekről)

kockázat/effektív dózis-egyenes becsült meredeksége:

≤ <u>5.10^{-2} eset / Sv</u>

w_T – Változó ajánlások

Szövet	ICRP-26 (1976)	ICRP-60 (1990)	ICRP-103 (2007)
Ivarszervek (*genetikus*)	0,25	0,20	0,08
Vörös csontvelő	0,12	0,12	**0,12**
Tüdő	0,12	0,12	**0,12**
Emlő	0,15	0,05	**0,12**
Pajzsmirigy	0,03	0,05	0,04
Csontfelszín	0,03	0,01	0,01
Maradék	0,30	0,05	**0,12**
Belek	-	0,12	**0,12**
Gyomor	-	0,12	**0,12**
Hólyag	-	0,05	0,04
Máj	-	0,05	0,04
Nyelőcső	-	0,05	0,04
Bőr	-	0,01	0,01
Nyálmirigyek	-	-	0,01
Agy	-	-	0,01

Ezek szerepelnek a hatályos magyar szabályozásban (2/2022. OAH r.)

Két további, a sugárvédelemben használt dózismennyiség

Lekötött dózis

$$E_C = \int_0^T \dot{E}(t)dt$$

A szervezetben 1 évnél hosszabb ideig jelenlévő, oda akut módon bejutott radioaktív anyag által T=50 év (felnőtt) vagy T=70 év (gyerek) alatt okozott effektív dózis.

Kollektív dózis

$$C = \sum_k E_k \cdot n_k$$

Adott forrásból i számú, egyenként n_i tagú embercsoportnak okozott effektív dózis, egysége személy.Sv. Csak sugárvédelmi tervezéshez ajánlja használatát az ICRP-103, szabályzási célra a használata nem javasolt.

Dózis mérése és számítása

Külső sugárterhelés dózisa = a sugárforrás céltárgyon (a detektoron, az ember testén) kívül, attól mérhető távolságra van (lehet pontszerű és kiterjedt forrás is)

- Az elnyelt dózis dózismérővel, dózisteljesítmény-mérővel mérhető
- Számítási összefüggések (foton-dózisteljesítményre) – lásd 19. dia
- k_y (külső) dózistényező: egységnyi radioaktivitás által egységnyi távolságban lévő testnek okozott dózis; elsősorban pontforrásokra és adott elnyelő anyagokra (levegő, víz, testszövet) találhatók meg a szakirodalomban

Belső dózis = a sugárforrást inkorporálták – a dózis közvetlenül nem mérhető

- Inkorporáció belégzéssel, lenyeléssel, esetleg seben vagy a bőr pórusain át
- Meghatározás módjai: egésztest-számlálás, vér- és exkrétum-analízis, bejutó anyagok (levegő, víz, ételek) analízise – közelítések
- DCF [Sv/Bq] (belső) dózistényező vagy dóziskonverziós tényező – egységnyi radioaktivitás pillanatszerű inkorporációjától származó lekötött effektív dózis
- A dózist az elnyelt energia és a radioaktivitást hordozó anyag tartózkodási ideje határozza meg
- Akut (pillanatszerű) vagy krónikus (folyamatos) bevitel: adott aktivitástól eltérő effektív dózist eredményeznek

Külső sugárterhelés hiteles (pontos) mérésének feltétele

Ha a detektort és a mérendő személyt a sugárforrástól azonos távolságba helyezve mindkettőt azonos energiafluxus éri, akkor a dózismérőt érő dózis csak annak sugárgyengítési sajátossága miatt lehet más, mint az emberé.

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

Pontos mérés akkor lehetséges, ha a tömeggyengítési együttható energiafüggése azonos a detektorra és a testszövetre. **<u>Szövetekvivalens</u>** detektor → „energiafüggetlenség” = azonos energiafüggés a két közegre. <u>Ekkor a mérőeszközt és a személyt érő dózis aránya minden sugárzási energiánál azonos lesz.</u> (f_m állandó, az energiától függetlenül)

Külső sugárterhelés mérése – mérendő mennyiségek

- A mérőeszköznek általában nem a test külső felszínére jutó dózisteljesítményt kell mérnie, hanem a sugárzásra érzékeny szövetek mélységében fennálló értéket.
- $H_p(10)$ – „személyi dózisegyenérték” 10 mm mélyen a testben, a belső szervek becsült dózisa
- $H^*(10)$ – „környezeti dózisegyenérték” 10 mm mélyen egy mesterségesen előállított, megadott összetételű testszövet-ekvivalens anyag, az ICRU-gömb felszíne alatt
- $H_p(0{,}07)$ – személyi dózisegyenérték 70 μm mélyen a testben, a bőrsejtek dózisa
- $H_p(3)$ – személyi dózisegyenérték 3 mm mélyen, szemlencse dózis meghatározásához

Külső sugárterhelés mérési eljárásai

Dózismérés: „utólagos” kiértékelés

- filmdózismérő, nyomdetektor – a dózissal arányos kémiai változást regisztrálnak
- TLD: szilárdtest-dózismérő (termolumineszcencia) – gerjesztett, de rögzített elektronokat = kristályrácshibákat okoz a sugárzás; melegítésre megszűnnek → dózisarányos fénykibocsátás
- elektronikus dózismérők: elektroszkóp, impulzusüzemű gáztöltésű és félvezető detektorok

Dózisteljesítmény-mérés: „azonnali” kiértékelés

- impulzusüzemű gáztöltésű és félvezető detektorok
- áramüzemű gáztöltésű detektorok
- szerves szcintillációs detektor

Hatósági dózismérők Magyarországon

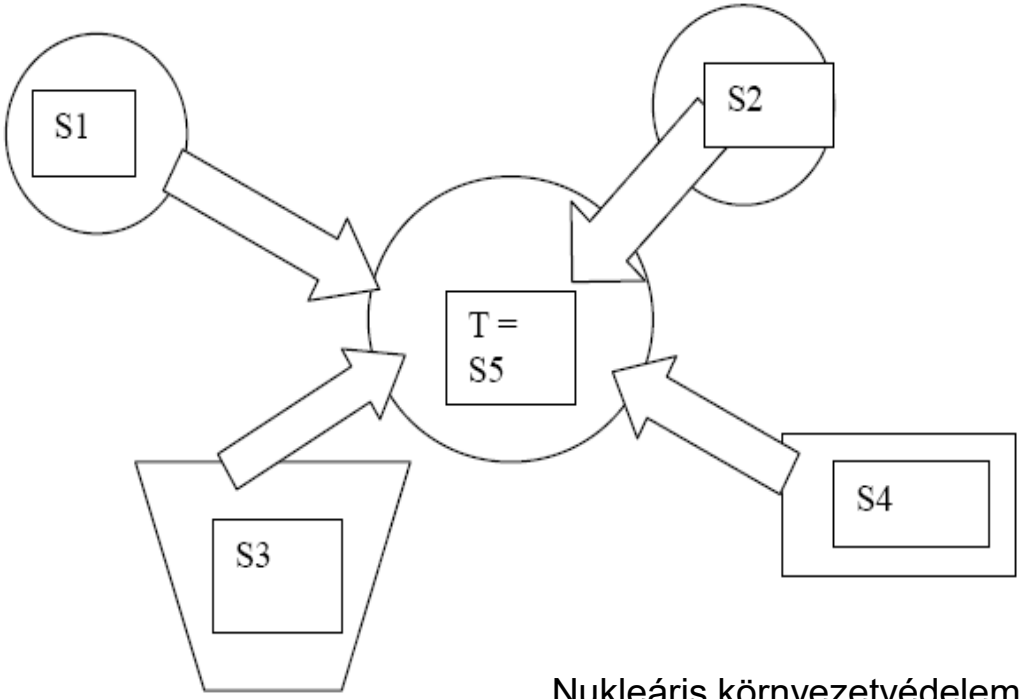
- TLD - Panasonic UD802AT
- Igazgatás szolgáltatási díj = **2630** Ft/személy/időszak 4/2016 (III. 5.) NFM rendelet

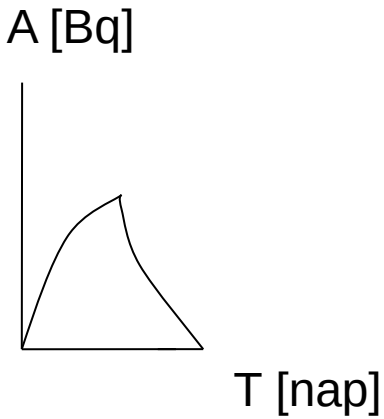
•4 db szűrő / 4 db TL-detektor:
14 mg/cm^2 műanyag / $Li_2B_4O_7$:Cu (β, γ)
160 mg/cm^2 műanyag / $Li_2B_4O_7$:Cu (β, γ)
160 mg/cm^2 műanyag / $CaSO_4$:Tm (β, γ)
700 mg/cm^2 ólom / $CaSO_4$:Tm (γ)
•E_γ = 10 keV … 10 MeV
•Tartomány = 10 μSv … 10 Sv
•Kimutatási határ = 1,6 μSv (Cs-137)
•Kalibrálás = 1…5 mSv
•Élettartam > 1000 (7000) kiolvasás
•Fading (felejtés) ≤ 5% / év

Forrás: OSSKI, Fülöp N.

Belső sugárterhelés számítása (közvetlen mérés nem lehetséges)

Egy adott radionuklidtól származó 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)

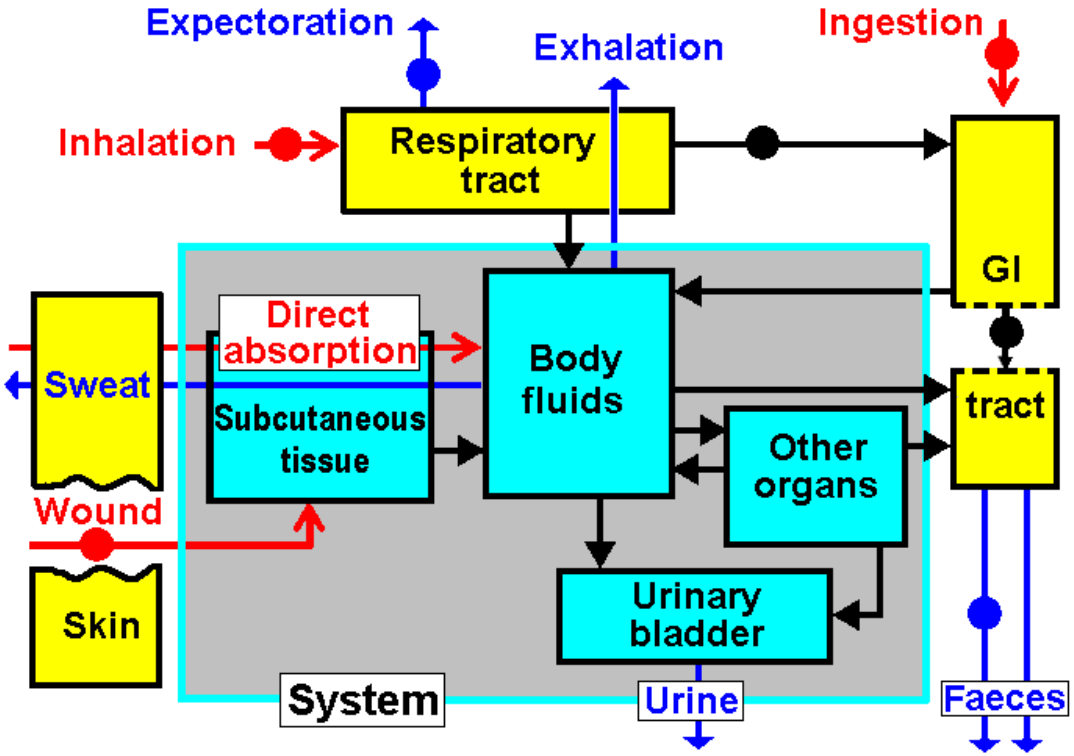




Retenció: a radioaktivitást hordozó anyag tartózkodása egy szövetben. Időfüggő aktivitás – a dózis az integrállal = a bomlások számával lesz arányos.

Belső sugárterhelés – általános biokinetikai modell

A „Methods of Internal Dosimetry” IAEA-kurzus anyagából



Belső sugárterhelés számítása

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

Belső dózis a „T” cél (target) szövetben, az „S” forrás (source) szövetekből kiinduló „R” sugárzásoktól; **u: a forrás-szövetekben bekövetkező bomlások száma** (a forrás-szövetben lévő aktivitás integrálja a retenció teljes ideje alatt); **Q: az „R” sugárzásnak az „S” szövetből kiinduló és a „T” szövetben elnyelődő hányada**; E_R, f_R,w_R: a sugárzásra jellemző fizikai és dozimetriai adatok

$$DCF = \frac{E_C}{A_{\mathrm{BE}}}$$

Modellkísérletekből, mérésekből meghatározandók: u, Q (0 és 1 közötti szám)

E_C: effektív (lekötött) dózis adott radionuklid felvételétől
A_{BE}: felvett radioaktivitás (rövid idő alatt, a kiürüléshez képest)
DCF: dóziskonverziós tényező [Sv/Bq] – belső dózistényező, egy adott radioizotópra jellemző, de ezen belül a DCF-ek még különböznek:
- Beviteli útvonal szerint (belégzés vagy lenyelés),
- Kémiai forma szerint (a testnedvekben oldható vagy nem oldható)
- Fizikai forma szerint (belégzésnél: milyen átmérőjű aeroszolhoz kötődik)
- Életkor szerint

Belső sugárterhelés számítása

A belső sugárterhelés meghatározásához alkalmazott mérések:

- Felvett és a mérés időpontjáig „bent maradt” radioaktivitás: egésztest, testrészek, exkrétumok, vér stb. aktivitás analízise – nem tudjuk, mikor jutott be az anyag a szervezetbe.
- Felvehető radioaktivitás analízise: (levegő, víz, táplálék) – ami bejut(-hatott) a szervezetbe

A dózis a minták minőségi és mennyiségi analíziséből határozható meg.

Az <u>analízis</u> akkor lehetséges, ha

- ismertek a minta radioaktív összetevői, vagy azok az analízis eredményeiből meghatározhatók,

- a mennyiségi összetétel számításához <u>hatásfok-kalibráció</u> készült.

$$\eta = \frac{I_m}{A \cdot f_R} \qquad \text{hatásfok: } \frac{megszámolt}{\text{összes}} \text{ részecske}$$

A: aktivitás [Bq]

I_m: mért <u>intenzitás</u> az adott (azonosított) izotópot jellemző sugárzástól [jel/s]

f_R: a sugárzás részecske-gyakorisága [részecske/bomlás]

A sugárvédelem alapelvei – sugárvédelmi szabályozás

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

A fenti 3 alapelv egyre szigorodó feltételrendszert képez az engedélyezésben.

Két további általános szempont a szabályozásban:

- A determinisztikus hatáshoz vezető dózis „forgatókönyve” legyen kizárható = tegyük lehetetlenné a védekezés tervezése során
- Csak az „alkalmazásokhoz” kapcsolható dózis korlátozható, a tisztán természetes eredetű nem – a korlátozás csak a többletdózisra vonatkozhat

A dóziskorlátozás rendszere

Sugárzási (expozíciós) helyzetek az ICRP-103 (2007) → IAEA General Safety Requirements Part 3 (2014) alapján:

- Tervezett → általános, egyénenként érvényes dóziskorlátok: foglalkozási és lakossági sugárterhelésre. A sugárzás forrásaira dózismegszorítások. Orvosi sugárterhelés (páciensdózis): eseti egyéni célértéket és korlátot kell megállapítani, a kezelést irányító orvos feladata.
- Baleseti → az elhárításban résztvevőknek különleges, a tervezettet meghaladó dóziskorlátok, a lakosságra vonatkoztatási szintek = ha a várható dózis ezt meghaladja, elhárító intézkedések szükségesek a dózis csökkentésére.
- Fennálló → emberi tevékenység miatt (pl. korábbi, jelentős kibocsátással járó balesetek után) tartósan megnövekedett környezeti szennyezettség - Csernobil, Fukushima környezete – vonatkoztatási szintek, eseti dózismegszorítások

A dóziskorlátozás rendszere

DL (dose limit) – immissziós korlátok = **dóziskorlát**: egyénekre érvényes tervezett sugárzási helyzetben, minden hatást számításba véve, effektív dózisban [2/2022. OAH rendelet]

- foglalkozási korlát **20 mSv/év** (kivételes esetben 5 év átlagaként)
- lakossági korlát **1 mSv/év**
- „szakmai” hallgatók, tanulók 16 év felett **6 mSv/év**

További éves dóziskorlátok szemre, bőrre, végtagokra egyenértékdózisban.

A dóziskorlátozás rendszere

DC (dose constraint) – emissziós korlátok = dózismegszorítás [Sv/év] – létesítményekre vonatkozik, annak tervezett működése következtében ez lehet a legnagyobb effektív dózist kapó fiktív személy (= reprezentatív személy) dózisa → A_{max}: ezen személy által inkorporálható maximális radioaktivitás, ami éppen a dózismegszorítással egyenlő dózist okoz. (Lakossági DC-értékek az EU-ban: 10 – 100 μSv/év a létesítményektől függően, az illetékes hatóság hagyja jóvá)

A_{ki} – kibocsátási határérték [Bq/év], a dózismegszorításból kell levezetni minden, az adott létesítménynél lehetséges radionuklidra (i) validált terjedésszámítási programokkal.

$$A_{\max,\,i} = \frac{DC}{DCF_i} \qquad \sum_i A_{\max,\,i} \cdot DCF_i < DC \qquad A_{ki,i} = \frac{A_{\max,\,i}}{h_i}$$

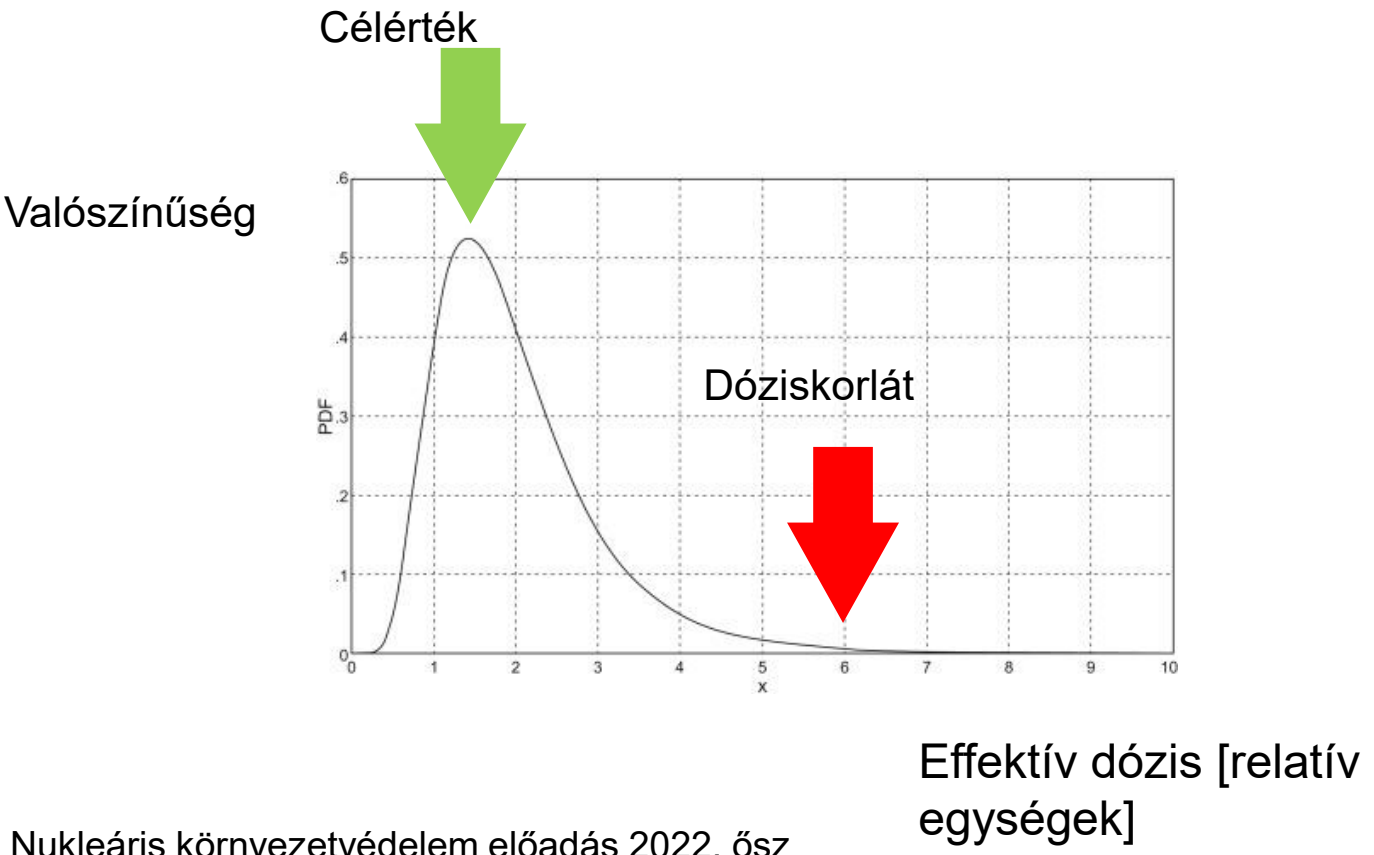
$$DC < DL$$

A kibocsátott aktivitás a környezeti terjedés során jelentősen hígul – h_i: hígulási tényező – eseti terjedésszámítással kell meghatározni

Az emissziós korlátok összegének számítása értelmetlen, mivel helyhez rendeltek, így elvileg sem vonatkozhatnak ugyanarra a személyre.

Dóziskorlát és tervezési szint

A hatósági dóziskorlátok (DL) nem lehetnek azonosak az optimálással kapott tervezési értékekkel! A DL meghaladása „nagyon valószínűtlen” ($<10^{-6}$) kell, hogy legyen, ha a sugárvédelmi szabályokat betartják.



A dóziskorlátozás rendszere

Szabályzásból kizárt sugárzási helyzetek *(Exclusion)* – természetes radioaktivitás az emberi testben, természetes forrásokból származó (terresztriális és kozmikus sugárzás) a Föld felszínén – az emberi beavatkozással összefüggő természetes radioaktivitást szabályozzák

Elhanyagolható dózis: *(Negligible dose)* H_{min} ≈10 μSv/év – annyira csekély kockázatot (≤ 5.10^{-7}/év) jelent, hogy „nem indokolt" ellene intézkedéseket hozni (= „költeni")

Mentességi szintek: *(Exemption)* egy sugárforrás, illetve egy radioaktív szennyezést tartalmazó anyag a legkedvezőtlenebb *forgatókönyv* esetén sem okozhat H_{min}-nél nagyobb dózist (*foglalkozási* vagy *lakossági* helyzetben). [Bq], [Bq/kg] – újabb szabályozásban: *speciális mentességi szintek*

Felszabadítási szintek: *(Clearance)* egy korábban sugárvédelmi szabályozás alá tartozó anyag kivonható a szabályzás alól, ha szabad elhelyezése a legkedvezőtlenebb *forgatókönyv* esetén sem okozhat H_{min}-nél nagyobb dózist – jellemzően 1 t-nál nagyobb mennyiségű hulladékokra alkalmazható (*lakossági* helyzetben). [Bq/kg], [Bq/m^2] – újabb szabályozásban: *általános mentességi szintek*

Hasonlóság: kapcsolat H_{min}-nel. *Eltérés*: **forgatókönyv**

Természetes és mesterséges radioaktivitás a környezetben; radioaktív hulladékok

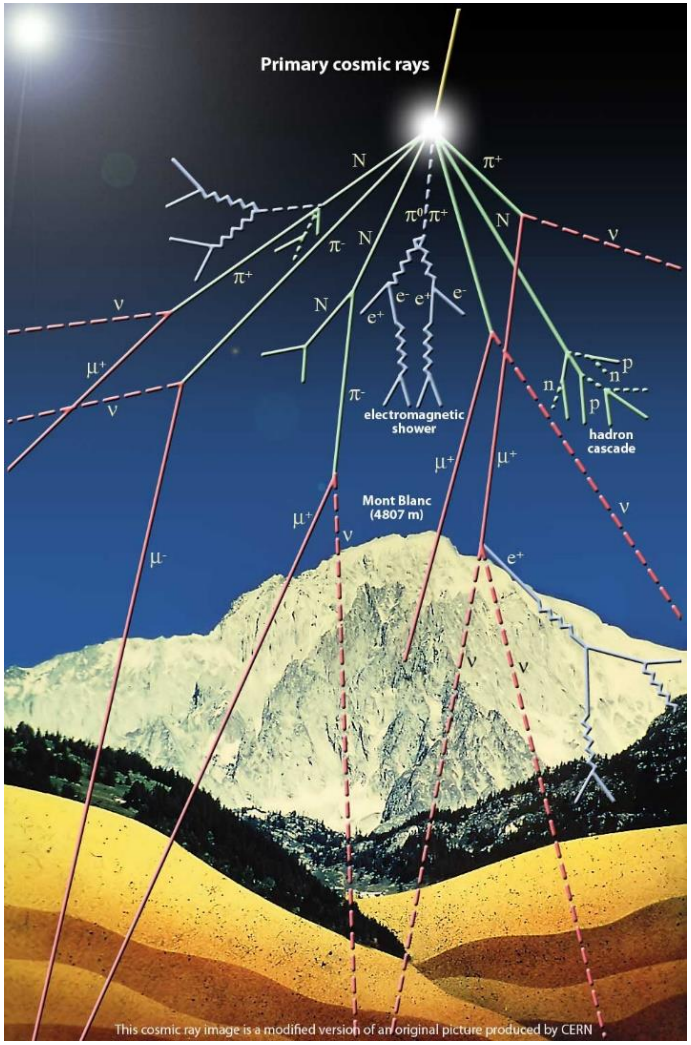
Természetes radioaktivitás összetevői (külső és/vagy belső sugárterhelést is okoznak):

***** kozmikus sugárzás
szoláris (kisebb E) és galaktikus (nagyobb E) sugárzás, befogott részecskék
- világűrben és a Föld közvetlen vonzáskörében: protonok, α-részecskék, pozitív ionok, elektronok (Van Allen-övek)
- légkörben: neutronok, müonok, fékezési fotonsugárzás (utóbbi a legjelentősebb, hozzájárulásuk a külső dózistérhez a Föld felszínén: 25-30 nSv/h → 200 μSv/év)

***** kozmogén radionuklidok (^{3}H, ^{14}C, ^{7}Be stb.) – magreakciókból; célmagok: a levegő fő alkotórészei = N, O, Ar, CO_2, H_2O
^{3}H és ^{14}C vízből és élelmiszerekből inkorporálódik, kb. állandó szint a szervezetben (átlagos lakossági dózis: ^{3}H 1,5 μSv/év; ^{14}C 13 μSv/év)

* „ősi” (primordial) radionuklidok: már elpusztult Napok létezése alatt, többféle „ciklus”-ban keletkeztek, a mai Naprendszer bolygóinak anyagát képezik – részletesen lásd a továbbiakban

Kozmikus sugárzás összetevői



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

Müon-fluxus a tengerszinten: $6\times10^{5}/m^{2}h$
2070 m mélyen (Sudbury labor, Kanada): $1{,}2\times10^{-2}/m^{2}h$

Kép forrása: CERN

Természetes „ősi” radionuklidok

Legfontosabb ősi radionuklidok:

2022. X. 10.

- **^{40}K** ($T_{1/2}$= 1,28.10^9 év) – növényi és állati szervezetekben és az emberben is állandóan jelen van, az így okozott, főként belső sugárterhelés: 0,3 mSv/év
- „Szupernehéz” atomok bomlási sorozatai: **^{238}U, ^{232}Th, ^{235}U** és leányelemeik
- Számos más, >10^9 év felezési idejű radionuklid (pl. ^{87}Rb, ^{138}La stb.)

Környezeti, földkérgi előfordulásuk nem egyenletes. Hozzájárulásuk a <u>külső</u> sugárterheléshez = terresztriális gamma-dózistér (40 – 100 (++) nGy/h → 300 – 800 (++) μSv/év)

^{238}U bomlási sorozata

^{238}U: $T_{1/2}$ = 4,47.10^9 év (4-6 ppm a Föld felszínén) – „4n+2” bomlási sor (α vagy β$^-$-bomlások: tömegszámváltozás -4 vagy 0) kiindulása
leányelemek között ^{226}Ra ($T_{1/2}$= 1600 év), ^{222}Rn - <u>radon</u>

^{222}Rn ($T_{1/2}$ = 3,8 nap)
rövid (<30 perc) felezési idejű, <u>α</u>- és β$^-$-sugárzó leányelemei:
^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{214}Po

<u>belső sugárterhelés</u>: európai átlagban **1,0 – 2,0 mSv/év**
a hatás oka: a belélegzett porra (aeroszolra) kiülepedett leányelemek sugárzása nagyrészt a légutakat (5 μm: felső-, 1-5 μm: alsó légutak, <1 μm: tüdőhólyagok) éri, mert azok természetes tisztulása lassabb, mint a leányelemek bomlása
A sorozat további radionuklidjai: ^{210}Pb ($T_{1/2}$ = 22 év), ^{210}Bi, ^{210}Po

Radonkoncentrációk

^{222}Rn-leányelemek koncentrációja EEC = egyensúlyi egyenérték-koncentráció, a rövid felezési idejű leányelemek mennyiségére jellemző, ezáltal az okozható dózissal arányos. A ^{222}Rn-koncentráció és az EEC eltérésének oka: kiülepedés. Előnyös, ha EEC<c_{Rn}.

- szabad levegőn átlagban 1 – 10 Bq/m^3
- zárt térben átlagban 5 – 100 Bq/m^3, de jóval több is lehet

- sok radon: pince, bánya, barlang, építőanyag
- kevés radon: tengerek felett

Szabályozható sugárterhelés, ha szándékolt emberi tevékenység is befolyásolja. Részletes szabályozás a 487/2015. sugárvédelmi kormányrendeletben: dózissal arányos radonkoncentrációk.

^{238}U-ból keletkező mesterséges radioaktivitás

Aktivációs termékek ^{238}U-ból nukleáris (urán fűtőelemmel működő) reaktorban: **^{239}Pu,** ^{240}Pu, **^{241}Pu** stb. köztük hasadóanyagok, hosszú felezési idejű **α**-sugárzók = igen nagy DCF belégzésre ~10^{-5} Sv/Bq, lenyelésre 1-2 nagyságrenddel kisebbek) – ^{239}Pu csekély mértékben természetes úton, a kozmikus neutronok hatására is keletkezik.

^{222}Rn és leányelemei – természetes vagy szabályozható dózis?

- Természetes eredetű radioaktivitás, de…
- Mesterséges (=szándékolt emberi tevékenység miatti) okból is megnövekedhet a mennyisége, ilyenkor nem zárják ki a szabályzásból (pl. bányák, terápiás célból használt barlangok stb.)
- Építőanyagok ^{226}Ra-tartalmára korlátozások az EU-ban
- Tervezett besugárzási helyzet: foglalkozási dóziskorlát, illetve azt okozni képes ^{222}Rn-koncentráció (egyes országokban: EEC).
- Fennálló besugárzási helyzet: korábbi sugárveszélyes tevékenység miatt visszamaradt, vagy más okból nem tervezett, az átlagost meghaladó radonkoncentráció → lakossági vonatkoztatási szint (Magyarország: 1 mSv/év)

Természetes anyagoktól származó sugárterhelés szabályozása

- 1862/2017. kormányhatározat a „Nemzeti Radon Cselekvési Terv”-ről – beépítve a sugárvédelmi rendeletbe (2/2022. OAH)
- A radon- és radon leányelem-koncentrációk vonatkoztatási szintjei levegőben mért éves átlagos aktivitáskoncentráció-értékben kifejezve:

  a) lakó- és középületekben: 300 Bq/m^3,

  b) munkahelyeken: 300 Bq/m^3.
- Tervezett sugárzási helyzet: ha a munkavállalók dózisa meghaladhatja a 6 mSv/évet; kisebb éves dózis esetén is szükséges a dózis „nyomon követése”
- Építőanyagok által kibocsátott beltéri külső sugárterhelés vonatkoztatási szintje 1 mSv/év

További természetes bomlási sorozatok

^{232}Th: $T_{1/2}$= 14,1.10^9 év (7-10 ppm a Föld felszínén – „4n” bomlási sor)
bomlási sorában a leányelemek között ^{220}Rn
($T_{1/2}$ = 55 s) – ezért sokkal kisebb térfogatból tud kikerülni a levegőbe, mint a ^{222}Rn; a leányelemek α-sugárzása következtében előálló dózisjáruléka ezért csak 0,1 mSv/év

^{235}U: $T_{1/2}$ = 0,71.10^9 év (a természetes urán 0,72 %-a – „4n+3” bomlási sor)
a nukleáris energiatermelés legfontosabb alapanyaga: indukált hasadás történik termikus (lassú; 25°C-os hőmérsékletnek megfelelő mozgási energiával rendelkező) neutronokkal való ütközés hatására

Természetes sugárterhelés - összegzés

Természetes sugárterhelés : a szárazföldön átlagosan **2 - 3 mSv/év**

belső sugárterhelés ~65 % (radon-EEC, ^{40}K, ^{14}C, ^{3}H stb.)

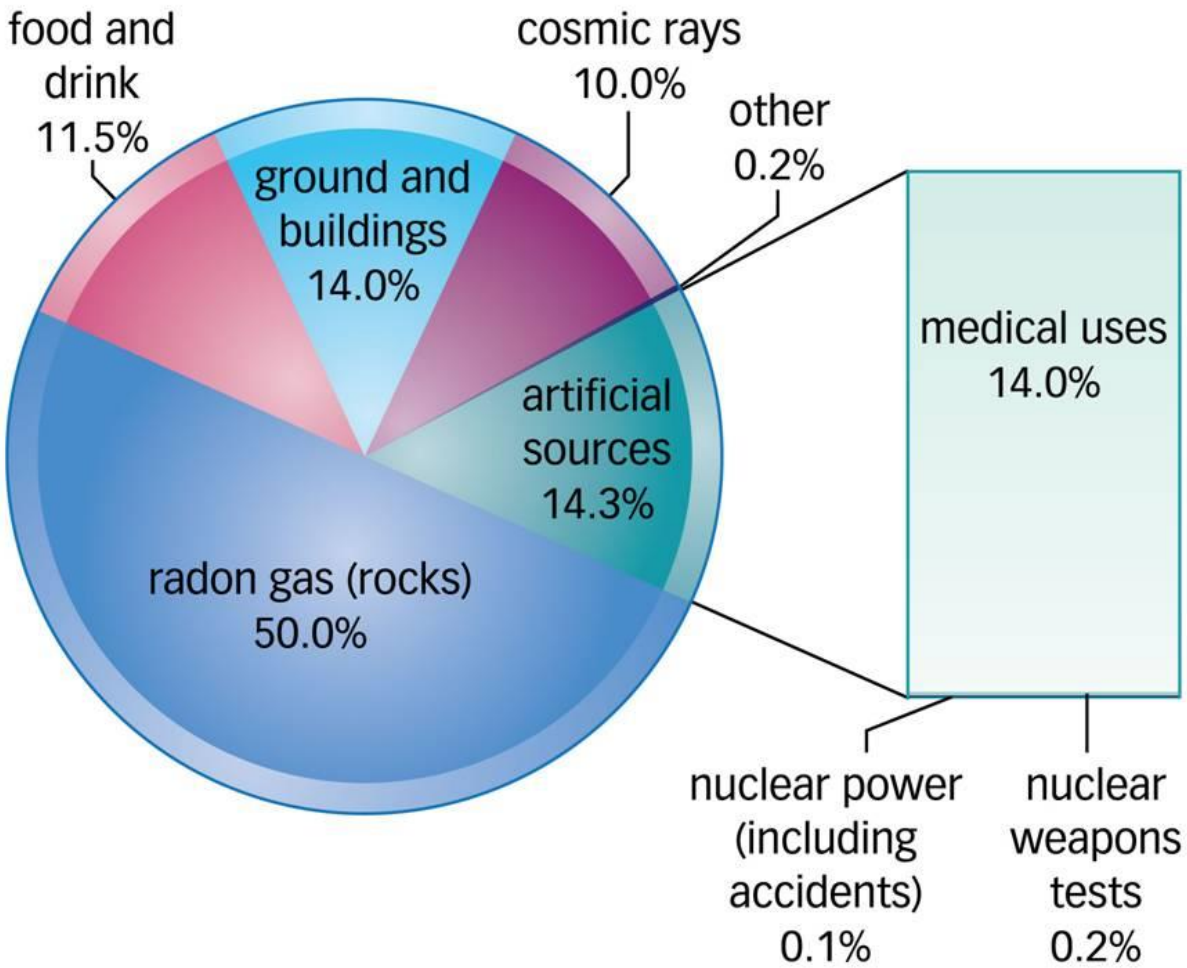
külső sugárterhelés ~ 35 % (kozmikus sugárzás, terresztriális sugárzás a talajból, építőanyagokból)

Rendszeres lakossági = természetes + orvosi **sugárterhelés**

orvosi eredetű sugárterhelés (diagnosztika, terápia):

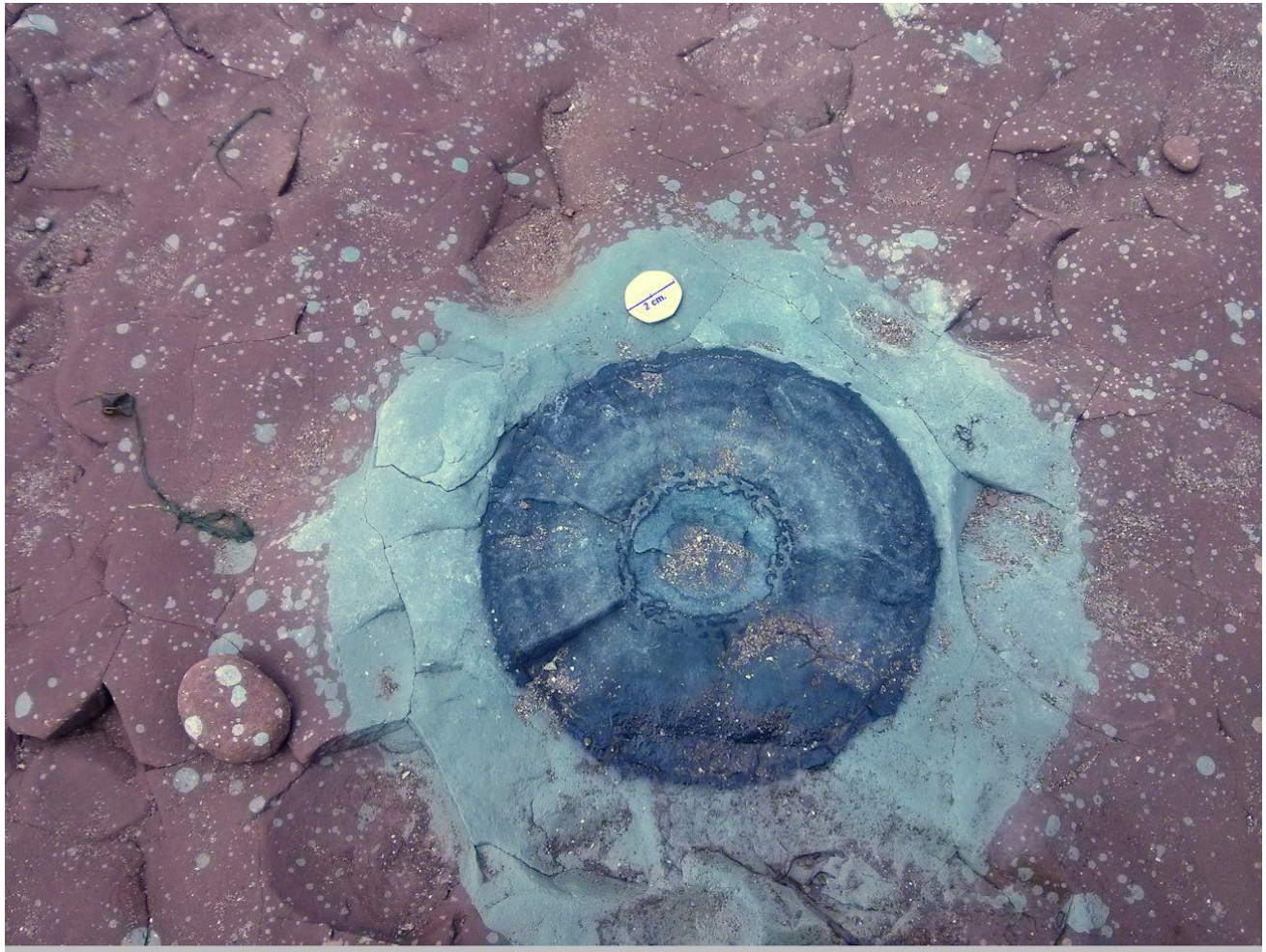
Magyarországon átlagosan 0,5 mSv/év, de évről évre nő (PET-CT diagnosztikai vizsgálatok, röntgen stb.)

Lakossági sugárterhelés – „radiation pie”



Forrás: Public Health England

Természetes sugárzási környezet – Devon, UK

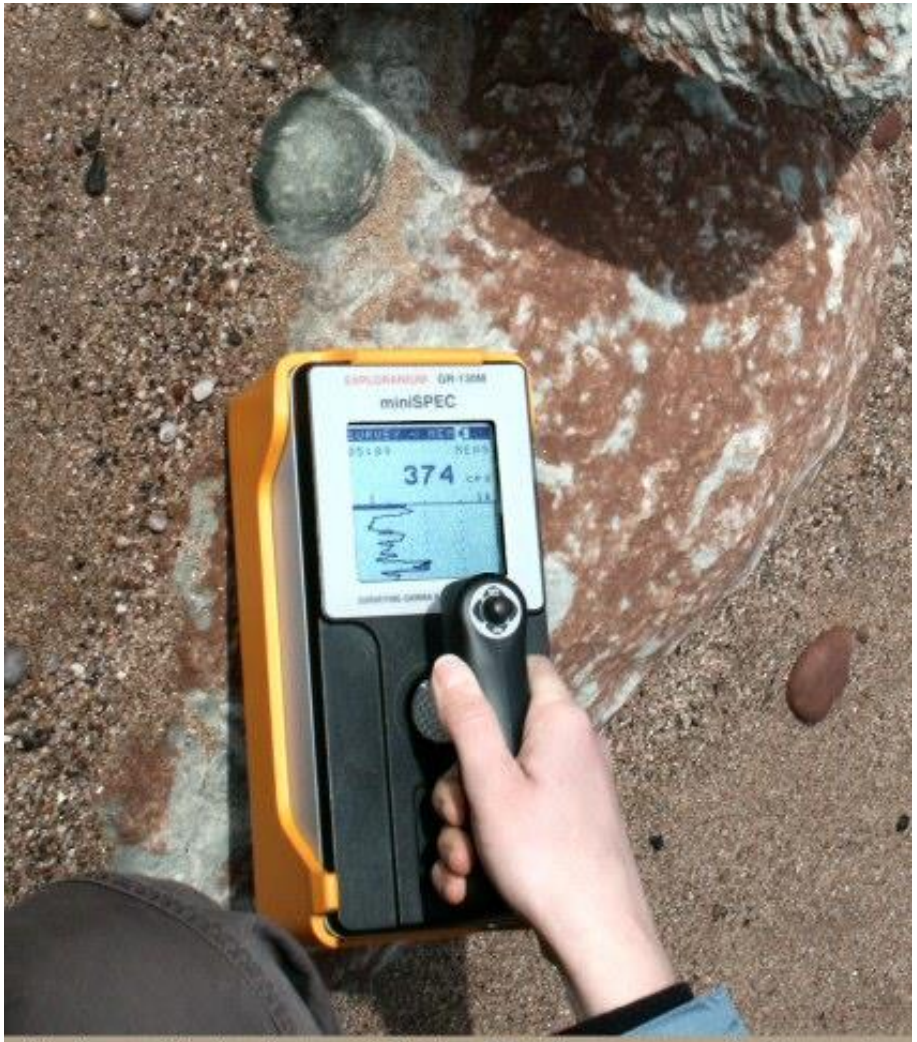


THE INTERNAL, CIRCULAR, CONCENTRIC STRUCTURE OF A RADIOACTIVE VANADIUM-URANIUM NODULE IN THE LITTLEHAM MUDSTONES AT LITTLEHAM COVE, DEVON. This nodule has grown perfectly spherically and concentrically in mudstone that had already been compacted and semi-lithified. The dark nodules do not follow any joint system and are post-lithification, post-compaction but pre-jointing in origin. The nodules are of minerals with strong mineralogical affinity and a growth in almost perfect spheres. The reduction-oxidation boundaries in the surrounding sediment are influenced by the nodules, but are not highly systematic, except for a general tendency to be spherical. There are seven concentric, dark bands within the spherical radioactive nodule. Photograph in 2016 by Jason Mark Scott © 2016. Comments by Ian West.

Vanádium- és urántartalmú gömbalakú zárvány agyagkő tömbbe ékelődve - metszet.

Forrás: Public Health England

Természetes sugárzási környezet – Devon, UK



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.
Ian West & Joanna Bentley (c) 2007.

„Forró pontok” felismerése felületiszennyezettség-mérő hordozható berendezéssel. A kijelzett érték mértékegysége cps (beütésszám másodpercenként) – felületi szennyezettség-mérőt használnak.

Forrás: Public Health England

Dózisok, dózisteljesítmények

* 0,1 μSv/h Külső háttérsugárzás a kontinensen
* 0,3 μSv/h Külső háttérsugárzás eső után
* 0,1 mSv: Fogröntgen; Budapest – New York repülőút
* 0,5 mSv: Átlagos egy éves orvosi sugárterhelés
* 1 mSv: Lakossági dóziskorlát 1 évre
* 3 - 10 mSv: Teljes természetes sugárterhelés Európában 1 évre (falvakban kisebb, városokban több)
* 50 mSv (→20 mSv): Foglalkozási dóziskorlát 1 évre
* 5 Gy (órák alatt): Nagy valószínűséggel halált okoz

2022. ősz - Az 1. dolgozat anyaga idáig tart.