



PR/B10ZP0318N0019FD003

- Dozimetria és sugárvédelem
- Dr. Zagyvai Péter egyetemi docens
- Atomenergetikai Tanszék
- Nukleáris Technikai Intézet
- Természettudományi Kar

- Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Dozimetria és sugárvédelem

Tematika:

- A nukleáris sugárzások és az anyagi közegek közti kölcsönhatások.
- Dozimetriai és sugárvédelmi alapfogalmak.
- Egyszerű dózisszámítási modellek.
- Az ionizáló sugárzások biológiai hatásai.
- A kockázat értelmezése, kapcsolata a sugárvédelem alapelveivel.
- A sugárvédelem nemzetközi és hazai szabályozási rendszere.

Dozimetria és sugárvédelem - alapok

Az ionizáló sugárzás fajtái:

- atommagok állapotváltozásából: α , β , γ -sugárzás, maghasadás/neutronsugárzás
- elektronok állapotváltozásából: fékezési sugárzás, röntgensugárzás

Közvetlen ionizáció: tömeggel és töltéssel bíró részecskéktől

Közvetett ionizáció: fotonoktól, neutronoktól

Bomlási módok – alfa-bomlás

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

p: a bomlásban kibocsátott részecskék
m: nyugalmi tömeg
 E_{kin} : kinetikus (mozgási) energia

Bomlási módok: α , β („közvetlen”), γ („kísérő”), f (maghasadás, „összetett”)

Az **alfa-bomlás** során a kezdeti atommag egy hélium atom pozitív elektromos töltésű atommagját bocsátja ki általában 5-10 MeV mozgási energiával. Az alfa-bomlás során az atommag tömegszáma 4-gyel, protonszáma 2-vel csökken.

„Diszkrét” energiaváltozás: E_{kin} jellemző az adott radioizotópra, de megoszlik a részecske mozgási energiájára és a visszalökött mag energiájára. Az alfa-bomlás „hajtóereje” a nukleonok közti erős kölcsönhatás.

Bomlási módok – béta-bomlás

A kinetikus energia megoszlik az elektron/pozitron és a neutrínó/antineutrínó között. Az elektron(pozitron) kinetikus energiája nem diszkrét.

1) β^- : elektron és antineutrínó kibocsátása

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

2) β^+ : pozitron és neutrínó kibocsátása

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

„antianyag” – annihiláció: megsemmisülés

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

3) 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 keletkezik

Bomlási módok – gamma-átmenet

Gamma-átmenet: a nukleonok átrendeződése nyugalmi tömeggel és töltéssel nem rendelkező foton kibocsátásával jár. A γ -bomlás más magátalakulások „maradék” energiájának leadása során következik be.

A foton energiája diszkrét, azonos a megváltozott belső részecske által betöltött előző és következő energiaszint különbségével, ezért jellemző az adott radioizotópra.

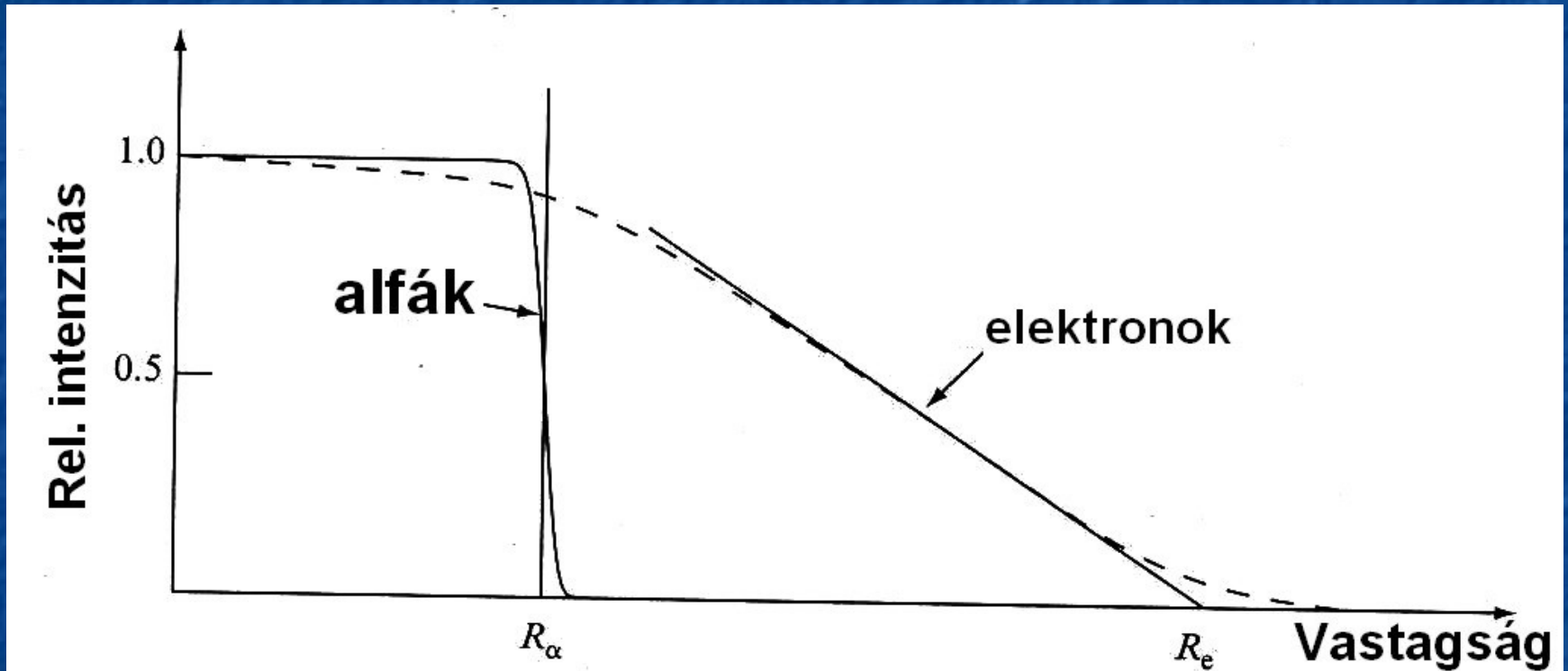
A mag belső energia-eloszlásának változása egyes esetekben nem foton kibocsátásával jár, hanem az energia egy, általában belső, szimmetrikus atompályán rezidens (azaz a magon „belül” is bizonyos tartózkodási valószínűséggel rendelkező) elektron mozgási energiájává alakul. Ez a *belső konverzió* (internal conversion, IC), amit szintén karakterisztikus Röntgen-foton kell, hogy kövessen.

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

A sugárzások és az anyagi közeg kölcsönhatása

- A közeg kölcsönhatásra képes alkotórészei: elektronok, az atom elektromágneses erőtere, atommag.
- A közeg és a sugárzás közötti kölcsönhatás szerint:
 - Közvetlenül ionizáló sugárzások: α , β , γ , Röntgen – az elektronoknak képesek azok ionizációjához elegendő energiát átadni.
 - Közvetve ionizáló sugárzás: neutron: atommagokkal való kölcsönhatás során ionizációra képes részecskék jelennek meg.
- Az elektronokkal való ütközés nem minden esetben vezet 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 (β -részecskék vagy ionizált szekunder elektronok) az atomok elektromágneses terében fékeződve járulékos fotonsugárzást = folytonos röntgensugárzást kelthetnek.

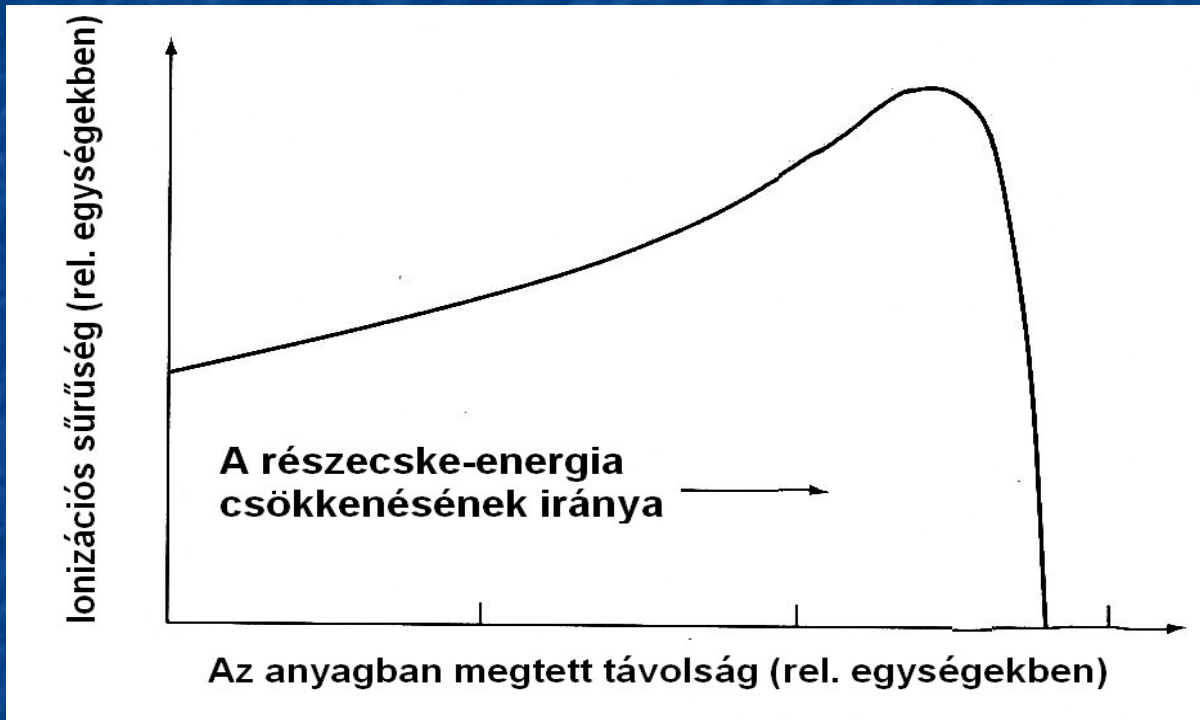
Alfa- és bétasugárzás elnyelése az anyagban



R_α (levegő) 4 – 8 cm
 R_α (víz) 50 – 100 μm

R_β (levegő) 0.1 – 1 m
 R_β (víz) 1 – 5 mm

Alfa- és bétasugárzás gyengülése



$$\text{LET} = dE/dx$$

Alfa- és béta-sugárzás

kölcsönhatása anyagi közeggel

α -sugárzás LET-értéke vízben: $> 100 \text{ keV}/\mu\text{m}$

Energiaátvitel: ionizáció

β -sugárzás LET-értéke vízben: $5\text{-}10 \text{ keV}/\mu\text{m}$

Energiaátvitel:

- elektronnal ionizáció/gerjesztés;
- atom elektromágneses erőterével: fékezési sugárzás = folytonos röntgensugárzás, energiája a közeg rendszámától is függ.

A hatótávolság lényegesen kisebb, mint az energiaátvitelben részt vevő elektronok összes úthossza!

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)
- Atom elektromágneses erőterével (küszöbreakció, csak >1.2 MeV energiánál))

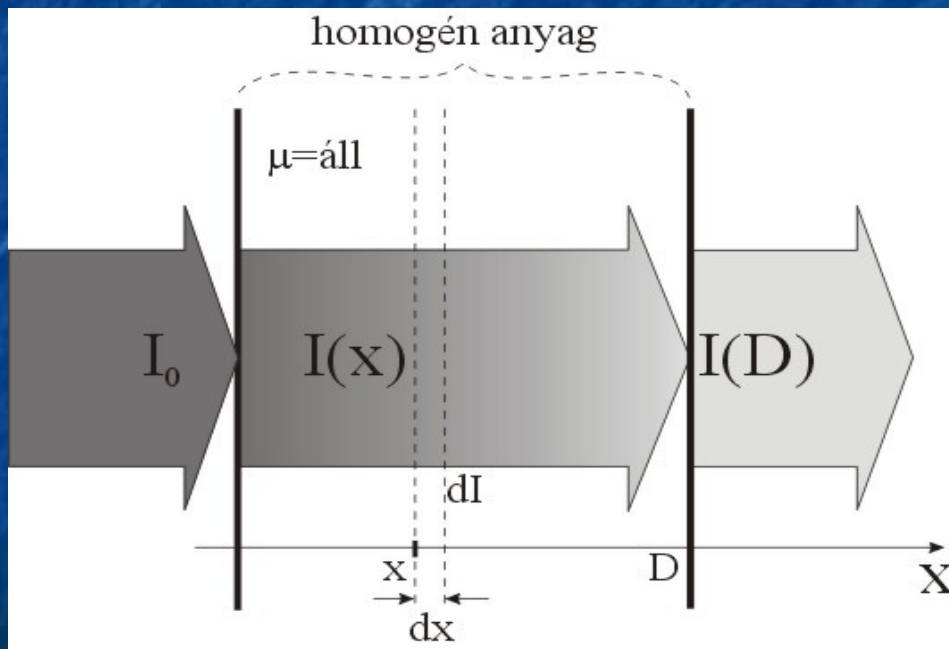
Általános törvényszerűség: sztochasztikus (véletlenszerű) kölcsönhatás: „fázisfüggő” energiaátvitel

Az energiát átvett elektronok kinetikus energiája:

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

Gamma-sugárzás kölcsönhatása anyagi közeggel

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



Párhuzamos sugárnyaláb!!!

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

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

Integrálás után:
általános gyengülési
egyenlet

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.

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

„Egyesíti” a különböző forrásokból származó energia-beviteleket.

Külső dózisteljesítmény

$$\frac{dD}{dt} = \Phi_E \times \frac{\mu}{\rho} \quad \Phi_E = \frac{\left(\frac{dN}{dt}\right) \times f_R \times E_R}{4 \times r^2 \times \pi}$$

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]

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

Érvényesség: pontszerű γ -sugárforrásra,
gyengítetlen (primer) fotonsugárzásra.

Négyzetes gyengülési törvény – a dózisszámítás alapja

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

a sugárforrások „külső veszélyességének” mérőszáma

Fizikai hatástól a biológiai hatásig

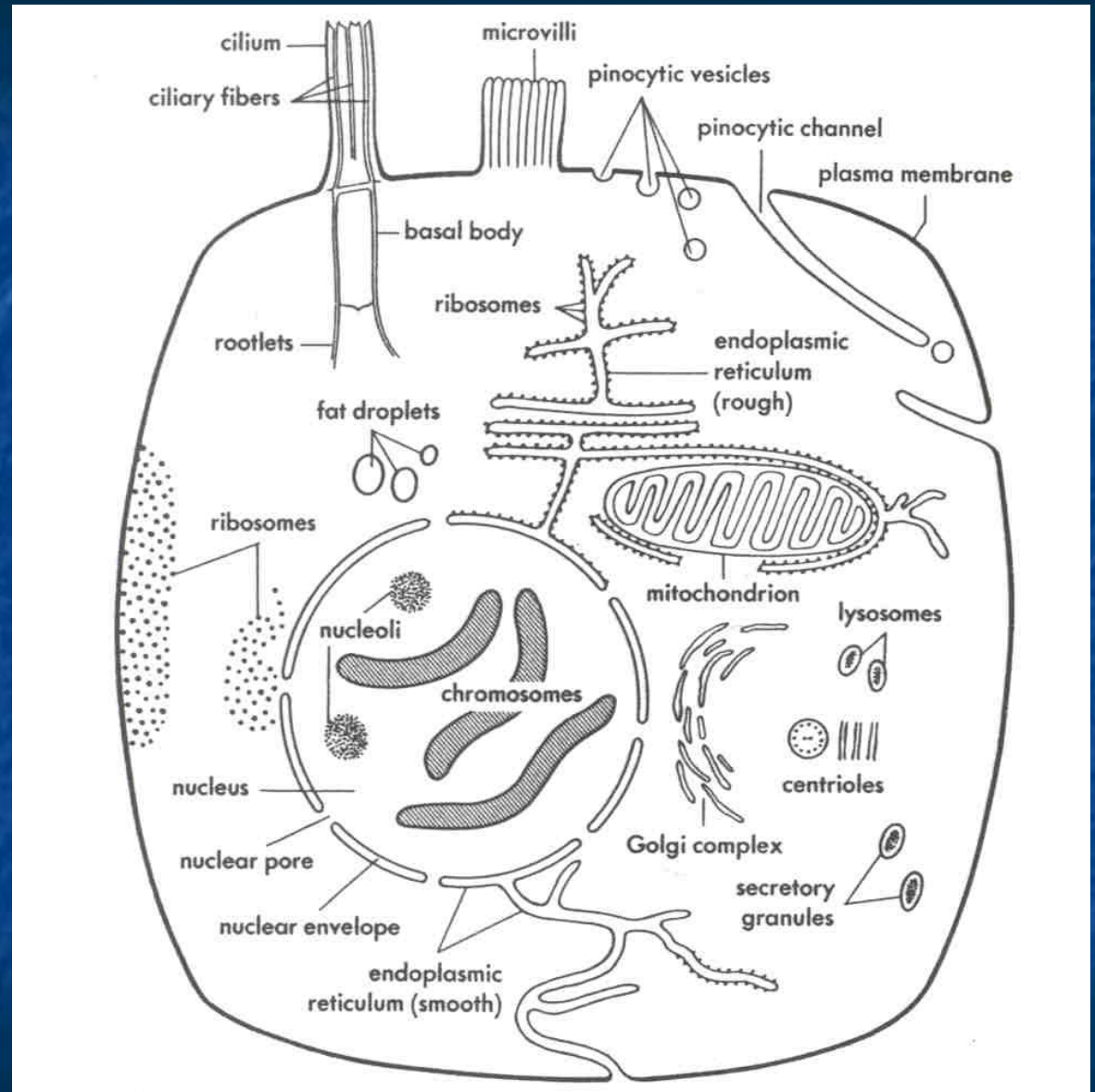
Elnyelt dózis (fizikai hatás) – ionizáció és gerjesztés

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

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

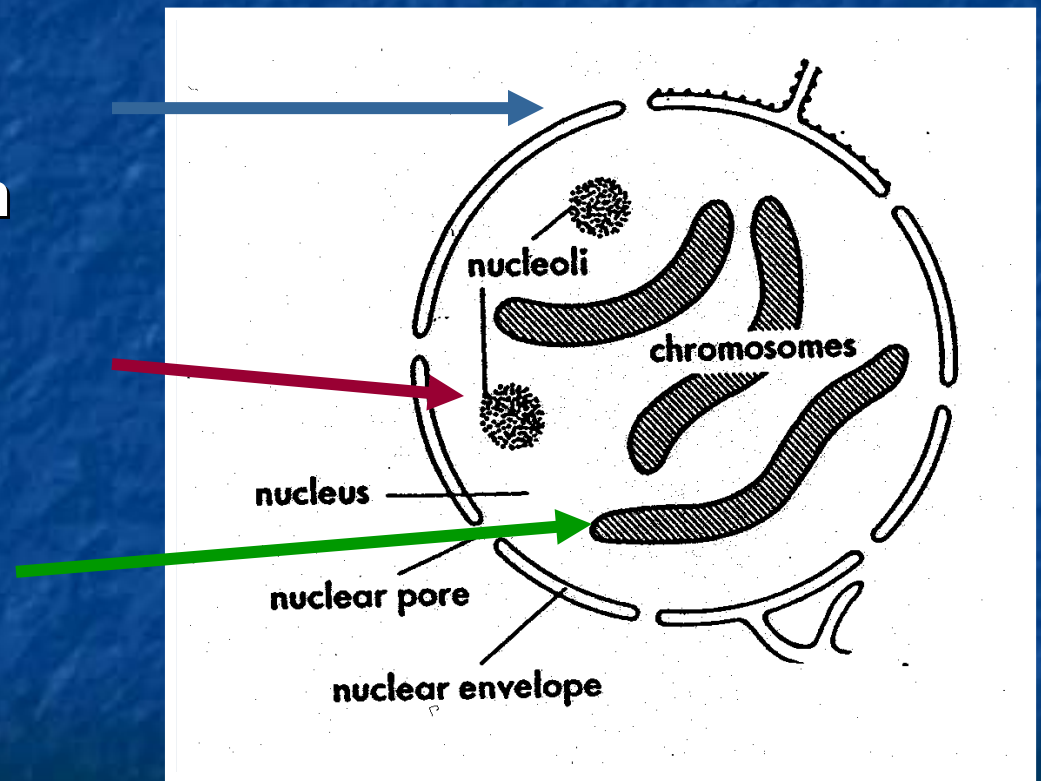
Biológiai hatás: a megváltozott anyagszerkezet megváltoztatja a biológiai „eseményeket”

„Célpontok” a sejtben



A „legismertebb” célpont: a sejtmag

- Membrán - burkolat
- - félig áteresztő
- - elválasztja a sejtmagfolyadékot a citoplazmától
- Nucleolus – RNS-t tartalmaz
- - fehérje és DNS szintézis
- DNS – a genetikus kódot tartalmazó makromolekula



Egyenérték dózis – az ionizáló sugárzás biológiai hatása

$$H = D * w_R \left[\frac{\text{Sievert}}{\text{t}}, \text{Sv} \right]$$

w_R sugárzási tényező - a LET függvénye

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

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

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

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

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

„Antropomorf” dóziszfogalom és mértékegység: a kártétel mértéke az emberi szövetek, sejtek viselkedésében mutatkozik meg.

A sejt, szöveti reakció nem egységes – akkor mit jellemez az egyenérték dózis?

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 biztosan bekövetkezik.

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

Az ionizáló sugárzás determinisztikus és sztochasztikus hatása

Sejti rendszerek sérülése:

- Azonnali pusztulás: nekrózis
- Életképtelenség: apoptózis
- DNS-lánchibák: fennmaradás → mutáció
- Manifesztáció: mitózis után, utódsejt által

DNS lánchibák javítása „repair” enzimekkel

Az ionizáló sugárzás determinisztikus hatása

Determinisztikus hatás:

- küszöbdózishoz kötött (0.3 – 0.4 Gy)
- szövetpusztulást okoz a sugárzás (sok sejt egyidejű elvesztése)
- akut/azonnali hatás
- életveszélyes károsodások: központi idegrendszer, emésztőrendszer, vérképző rendszer



Az ionizáló sugárzás sztochasztikus hatása

A „fő célpont” a sejtmag DNS-állománya

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

DNS-ből felépülő örökítő elemek: kromoszómák.

A DNS a sejtet felépítő fehérjék összetételét kódolja.

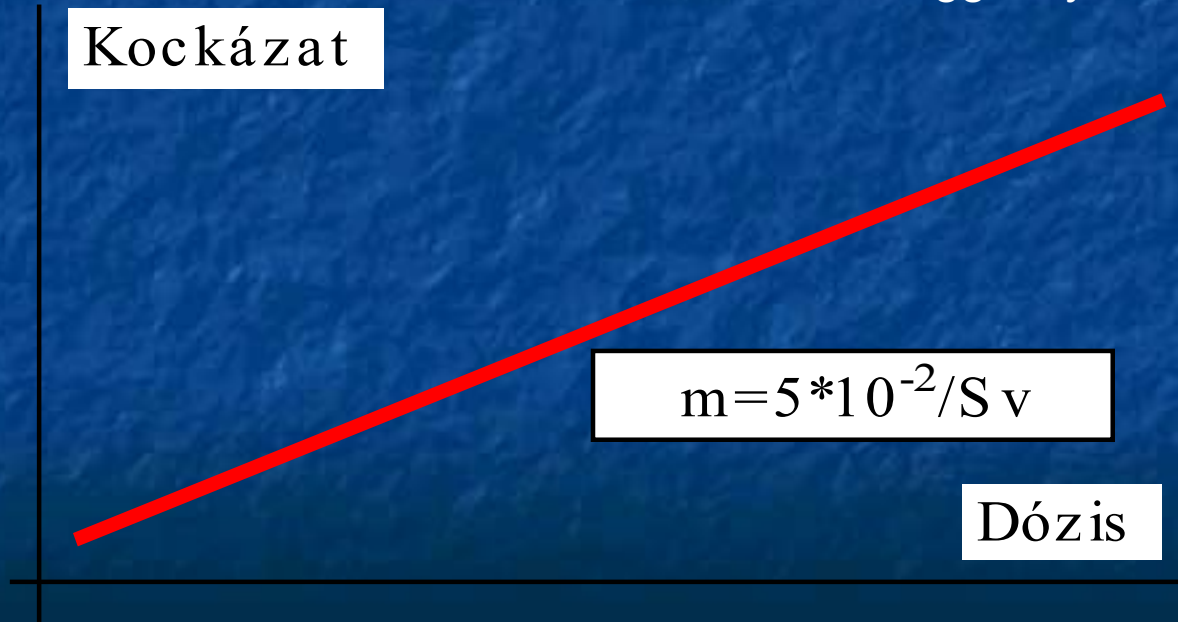
Gén: a DNS egy fehérjét kódoló, vagy egy sejt tulajdonságot meghatározó darabja.

A gének együtt alkotják az egyed genetikai információit tartalmazó genomot.

Az ionizáló sugárzás egészségkárosító hatásai - Sztochasztikus hatás:

- nincs küszöbdózis (kis dózisok hatása nem igazolt)
- sejtmutációt okoz a sugárzás (javító mechanizmus)
- kockázat-dózis-függvény lineáris (?)
- a manifesztáció időben elkülönül a kiváltó októl

Az egyénre vonatkozó kockázati függvény a szövetek kockázati függvényének összege



A dózist okozó sugárforrás és a dózist elszenvedő 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

$$\sum_T w_T = 1$$

Szöveti súlyozó tényezők (ICRP #103 alapján):

ivarszervek $w_T=0.08$ (genetikus hatás)

szomatikus hatások

legérzékenyebbek

$w_T=0.12$ tüdő, gyomor, belek, vörös csontvelő, emlő,

maradék

érzékenyek $w_T=0.04$ máj, vese, pajzsmirigy stb.

kissé érzékeny $w_T=0.01$ bőr, csontfelszín

A kockázat – effektív dózis függvény meghatározása

Elfogadott forma: LNT (linear – no threshold)

Kérdőjelek:

- A függvény megállapításához „tisztá” adatok (pontos mérések, „minta” és „kontroll csoport” szükségesek)
- Hormézis: a kis dózisok „immunitást” okoznak ?
- Szupralinearitás: a kis dózisoknál nincs nekrozis: „javul” a mutáns sejtek túlélési hányada ?
- A függvény „összes” kockázatra vonatkozik, de a tumor szervekben manifesztálódik. „Primer” tumor vagy metasztázis ?
- Mennyi időn át adhatók össze a dózisok?
- Bystander-hatás, adaptív válasz – javul vagy romlik az érzékenység ?

További dózisfogalmak

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

$$H_C = \int_0^T \frac{dH_E}{dt} dt$$

Kollektív dózis: Egy embercsoport tagjainak egy adott sugárforrástól származó effektív dózisának összege.

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

Csak az emisszió mértékéül használható!

Sugárvédelmi szabályozás

A sugárvédelem alapelvei

- Determinisztikus hatáshoz vezető dózis legyen lehetetlen
- Csak az „alkalmazásokhoz” kapcsolható dózis korlátozható, a természetes eredetű nem – a korlátozás a többletdózisra vonatkozik
- Indokoltság: a sugárforrás alkalmazásának több előnye legyen, mint kára
- Optimálás: az „alkalmazás” a lehető legnagyobb előnnyel kell, hogy járjon – optimális dózisszint – tervezési alap – ALARA (As Low As Reasonably Achievable)
- Egyéni korlátozás – immissziós és emissziós korlátok – át nem léphetők, ha a tervezési alap helyes volt.

Sugárvédelmi szabályozás

Nemzetközi ajánlások, irányelvek:

ICRP #60 (1991), IAEA Safety Series #115 (1996), 96/29 EU Directive

Magyar jogszabályok: 1996. évi CXVI. tv. (atomtörvény)

- Személyi sugárvédelem: EüM, ÁNTSZ (16/2000. sz. EüM. rend., 47/2003. sz. ESzCsM. rend.)
- Környezeti sugárvédelem: KvVM, felügyelőségek (15/2001. sz. KöM. rend.)
- Nukleáris biztonság: Országos Atomenergia Hivatal

**ÚJ SZABÁLYOZÁS ALAPJA: ICRP #103
(2007)**

Sugárvédelmi korlátok

„Elhanyagolható dózis” $\leq 10 \mu\text{Sv}/\text{év}$ – közvetlenül nem deklarált szabályozó \rightarrow MENTESÉG, FELSZABADÍTÁS vonatkozik a csak ekkora dózist okozó anyagra

DL – dóziskorlát (dose limit) - immisszió korlátozása
effektív (lekötött) dózis; a külső és belső sugárterhelés összege

foglalkozási korlát	20 mSv/év (5 év átlagában)
lakossági korlát	1 mSv/év
normális és baleseti helyzetre külön szabályozás	

DC - dózismegszorítás (dose constraint) - emisszió korlátozása: egy, a kritikus (lakossági vagy foglalkozási) csoporthoz tartozó fiktív személynek az adott sugárforrástól származó effektív dózisa
kiemelt létesítményekre DC = 0.1 – 0.01 mSv/év
kibocsátási szintek egyes radionuklidokra

$$DL \gg DC \quad DL \neq \sum_s DC_i$$

Emissziós sugárvédelmi korlátok

Az egy személybe bejutó aktivitás sokkal kisebb, mint a kibocsátható

$$\sum_i A_{\max,i} \leq \sum_i \frac{DC}{DCF_i}$$

A_{\max} : Az adott dózismegszorításnál bevihető aktivitások összege

DCF = dóziskonverziós tényező
Egységnyi bevitt aktivitás által okozott H_E

$$A_{i,\max} \ll A_{i,ki}$$

A normális üzemelés során kibocsátott aktivitás (**Kibocsátási korlát** [Bq/év]) nem koncentrálódhat egyetlen személyben.

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

- * levegőbe és
- * vízi úton

kibocsátott aktivitás közötti kapcsolatot a **TERJEDÉSI MODELLEK** teremtik meg. A terjedés során a szennyezés hígul, de vannak dúsulást okozó részfolyamatok is. A modell és egy valóságos terjedési folyamat összevetése a validálás.

Sugárvédelmi szabályozás - mentesség

Mentesség: 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: [Bq] és [Bq/g] – a legkedvezőtlenebb **forgatókönyv** mellett sem okozhat az elhanyagolhatónál nagyobb dózist.

Már az alkalmazásnál sem kell védelmi intézkedéseket alkalmazni, mert kicsi a károsítás kockázata.

Sugárvédelmi szabályozás - felszabadítás

Felszabadítási szint (*Clearance level*)

A hatóság által meghatározott, aktivitás-koncentráció [Bq/g] és/vagy aktivitás [Bq] egységekben kifejezett értékek, amelyeknél, ill. amelyek alatt a sugárforrások kivonhatók a hatósági felügyelet alól. Feltételes és feltétlen felszabadítás: a **forgatókönyv**től függően vagy függetlenül szabadítható fel az anyag.

Korábban, az alkalmazásuk folyamán felügyelt (védelmi intézkedésekkel korlátozott) anyagok = hulladékok – az alkalmazás befejezése, valamint kezelés után lecsökkent a kockázatuk.

ICRP#103 – ICRP#60

ICRP 103 – Table 1. Risk per Sv



Detriment-adjusted nominal risk coefficients for stochastic effects after exposure at low dose rate

Exposed population	Cancer		Heritable effects		Total	
	ICRP103	ICRP60	ICRP103	ICRP60	ICRP103	ICRP60
Whole	5.5	6.0	0.2	1.3	5.7	7.3
Adult	4.1	4.8	0.1	0.8	4.2	5.6

“It is therefore the recommendation of the Commission that the approximated overall risk coefficient of 5% Sv⁻¹ on which current international radiation safety standards are based continues to be appropriate and should be retained for the purposes of radiological protection”

ICRP#103 – ICRP#60

New ICRP recommendations - important features



- No changes to the operational quantities
- No changes to the dose limits
- “No change” to operational health physics (?)
- Changes to effective dose
 - Changes to w_R for neutrons and protons
 - Changes to w_T (tissue weighting factors – independent of radiation type)
 - Changes to the male/female specification

ICRP#103 – ICRP#60

New ICRP recommendations - operational implications



- Removed “practices” and “interventions”
- Retain justification and optimization
- Same source related principles to all controllable exposure situations:
 - planned
 - emergency
 - existing

Sugárzások dózisának mérése és számítása

Külső dózis

- Dózismérővel, dózisteljesítmény-mérővel mérhető
- Számítási egyenlet (foton-dózisteljesítményre)
- k_{γ} dózistényezők: pontforrásra, detektoranyagra határozható meg

Belső dózis közvetlenül nem mérhető

- Meghatározás módjai: egésztest-számlálás, vér- és exkrétum-analízis, bejutó anyagok (levegő, víz, ételek) analízise
- DCF [Sv/Bq] dóziskonverziós tényező – egységnyi radioaktivitás inkorporációjához köthető effektív dózis – a radionuklidok „belső veszélyességének” mértéke
- A dózist főként a radioaktivitást hordozó anyag tartózkodási ideje határozza meg
- 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)
- Elektronikus dózismérők: elektroszkóp, impulzusüzemű gáztöltésű detektorok, félvezető detektorok, szcintillációs detektorok

Dózisteljesítmény-mérés: azonnali kiértékelés – területi dozimetria

- Impulzusüzemű gáztöltésű detektorok
- Szerves szcintillációs detektor
- Félvezető detektor

Külső sugárterhelés mérésének feltétele – Bragg-Gray elv

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

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

Az abszorpciós együttható energiafüggése legyen azonos a detektorra és a testszövetre -szövetekvivalens detektor -„energiafüggetlenség” = azonos energiafüggés a két közegre

Külső dózis mérése

Dmért/Dszám

A Bragg-Gray feltétel teljesülése $\pm 20\%$ -on belül „elvárható”.



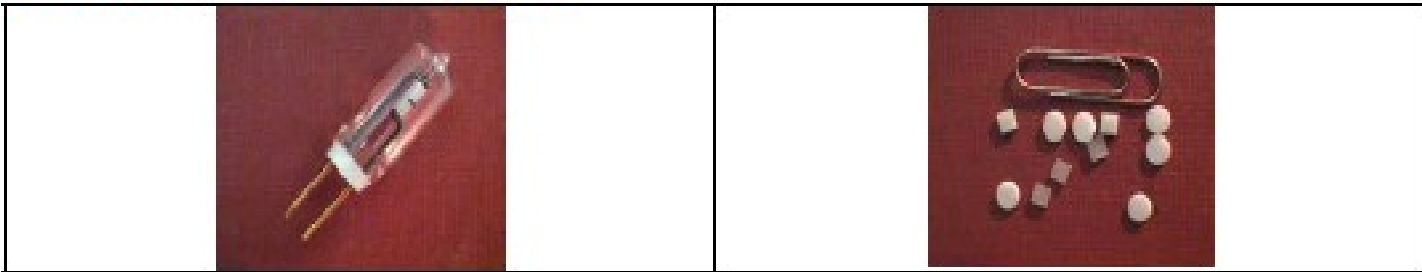
—■— Dmért/Dszám

Külső sugárterhelés mérése

Film dózismérő



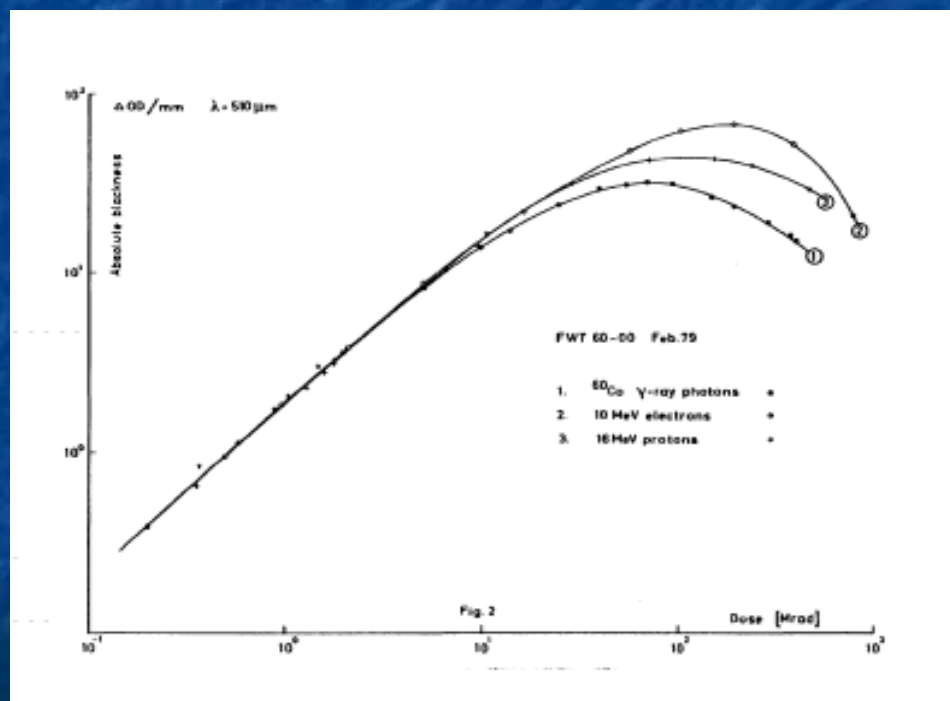
Termolumineszcens dózismérők



Külső sugárterhelés mérése

Filmdózismérő válaszjelének dóziszfüggése

feketedés



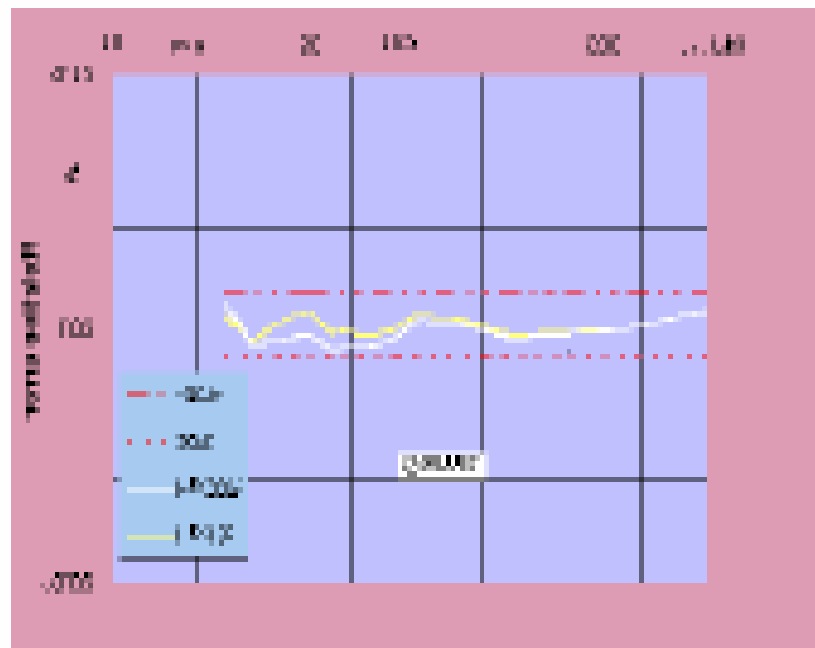
dózis

Külső sugárterhelés mérése

Személyi elektronikus dózismérő félvezető



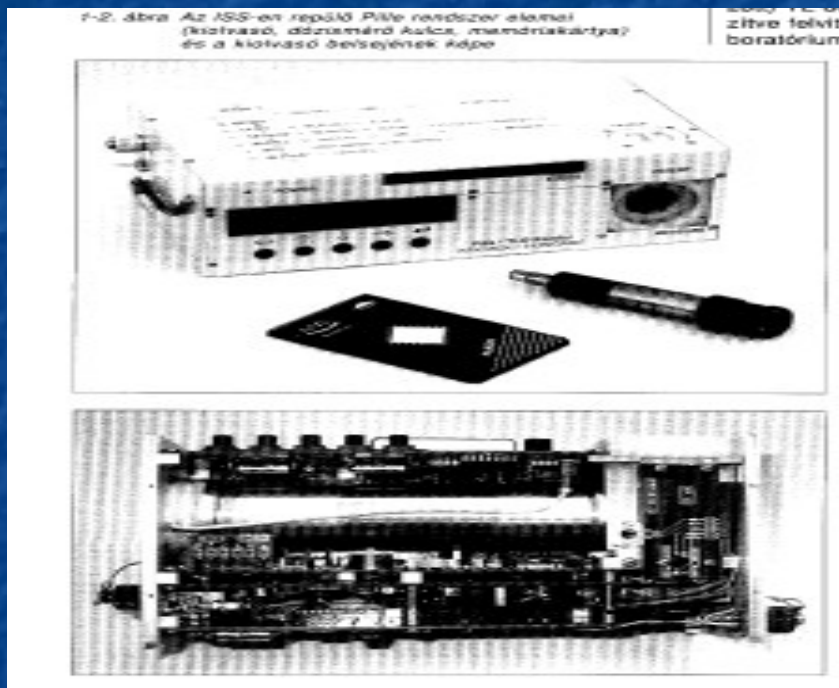
f_n



Energia

Külső sugárterhelés mérése

TLD detektor és kiolvasó „Pille”



Neutron-dozimetria

- Gáztöltésű detektorok: ^3He , BF_3
- Szcintillációs detektor: $\text{LiI}(\text{Eu})$, $\text{B} + \text{ZnS}(\text{Ag})$
- Hasadási kamra: ^{235}U

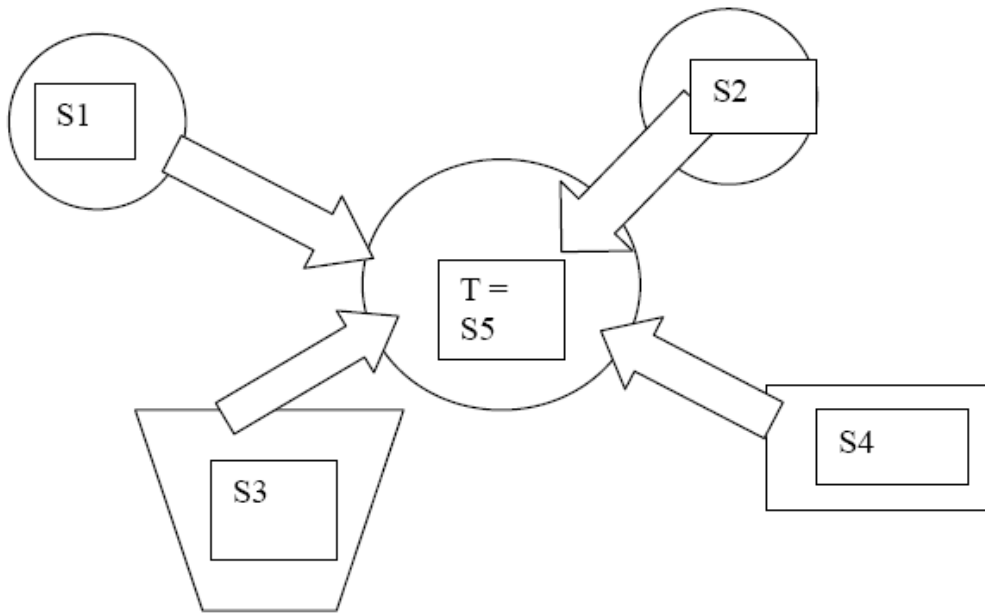
Moderátor: paraffin, műanyagok: „Bonner-gömb”



A moderálás célja:
Közvetlenül a $H=D \times w_R$
egyenértékdózissal arányos
jelszám előállítása

Belső sugárterhelés

A 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)



A [Bq]



T [nap]

Belső sugárterhelés dózisa

A 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)

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

A H_T szöveti egyenértékdózist egy adott radioizotópra határozzuk meg.

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)

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.)

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

DCF [Sv/Bq] – egységnyi aktivitás inkorporációjából származó effektív dózis (H_E/A)

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

$k_\gamma = \text{dózistényező}$

Együtt vonatkozik

- radionuklidra
- az elnyelő anyagra

$$H_E = DCF \times A_{in}$$

A bejutott aktivitást analízissel kell meghatározni.

Természetes és mesterséges radioaktivitás a környezetben – radioaktív hulladékok

Természetes radioaktivitás:

- * kozmikus sugárzás

 - szoláris, galaktikus, befogott részecskék

 - világűrben: protonok, α -részecskék, pozitív ionok

 - légkörben: neutronok (a Föld felszínén alig mérhető), fékezési foton sugárzás (a Föld felszínén: 30 - 40 nSv/h)

- * kozmogén radionuklidok (^3H , ^{14}C , ^7Be)

- * ősi radionuklidok (az ősi-Nap életciklusa során többféle „ciklus”-ban keletkeztek)

Legfontosabb ősi radionuklidok:

- ^{40}K (T= 1.28 milliárd év, belső sugárterhelés: 0.3 mSv/év)
- bomlási sorozatok: ^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U

^{238}U bomlási sorozata

^{238}U : T= 4.47 milliárd év (4-6 ppm a felszín közelében) – bomlási sor (4n+2)

α és β -bomlások; leányelemek között ^{226}Ra , ^{222}Rn

^{222}Rn (T= 3.8 nap) RADON

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):

szabad levegőn

1 – 10 Bq/m³

zárt térben

5 – 100 Bq/m³

sok radon:

pince, bánya, barlang, építőanyag

kevés radon:

víz felett

aktivációs termékek ^{238}U –ból nukleáris reaktorban:

^{239}Pu stb. hasadóanyag, nagy DCF

További bomlási sorozatok

²³² Th: T= 14.1 milliárd év (7-10 ppm a felszín közelében)
bomlási sor: 4n - α és β^- bomlások
leányelemek: köztük ²²⁰ Rn TORON
²²⁰ Rn (T= 55 s) – kevéssé tud kikerülni a levegőbe
dózisjárulék 0.1 mSv/év

²³⁵ U: T= 0.71 milliárd év (a természetes urán 0.7 %-a)
bomlási sor: 4n+3
a nukleáris energiatermelés legfontosabb alapanyaga:
indukált hasadás neutronok hatására

Természetes sugárterhelés : átlagosan 2 - 3 mSv/év

belső sugárterhelés 65 – 70 % (radon, toron, ^{40}K ,

^{14}C)

külső sugárterhelés 30 – 35 %

(kozmikus sugárzás, ősi nuklidok γ -sugárzása a talajból,
építőanyagokból)

továbbá: orvosi eredetű sugárterhelés

átlagosan 1.0 mSv/év

Mesterséges radioaktivitás – hulladékok/üzemi kibocsátások

- Nukleáris reaktorok hulladékai
 - hasadási (^{131}I , ^{137}Cs), aktivációs (^{239}Pu) és korróziós (^{60}Co) termékek
- Nukleáris robbantások, fegyverkísérletek hulladékai
- Ipari sugárforrások
- Orvosi (diagnosztikai és terápiás) sugárforrások
- „TENORM”: mesterséges okból megnövekedett természetes sugárterhelés

TENORM - természetes vagy mesterséges radioaktivitás?

TENORM – ot produkáló eljárások:

- 1. Bauxitbányászat, -feldolgozás*
- 2. Cirkonhomok felhasználás, 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, -feldolgozás*
- 8. Szénbányászat, széntüzelésű erőművek*
- 9. Uránércbányászat, -feldolgozás*