

Személyi dozimetria

A belső sugárterhelés ellenőrzése

Ismeretfelújító képzés

Pázmándi Tamás
HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont

pazmandi.tamas@ek.hun-ren.hu

- A sugárvédelem célja és alapelvei
- Belső sugárterhelés
 - Védekezés a belső sugárterheléssel szemben
 - A belső sugárterhelés meghatározása
- Összefoglalás

A sugárvédelem célja és alapelvei

- Cél: az **emberek és a környezet biztonságának növelése**.
- A biztonság növelése az ionizáló sugárzások **dóziskövetkezményeinek csökkentésével** érhető el.
- A **determinisztikus hatásokat ki kell zárni**, ehhez a dózisokat az egészségkárosodás küszöbdózisa alatt kell tartani.
- A **sztochasztikus hatásokat** az ésszerűen elérhető legalacsonyabb szintre - **as low as reasonably achievable (ALARA)** - kell csökkenteni, ezzel csökkentve az egészségkárosodás kockázatát.

- A sugárbiológia az ionizáló sugárzásoknak az élő anyagra való hatásaival foglalkozik.
- A sugárzás átmeneti és maradandó károsodást idézhet elő, különböző szinten:
 - Molekuláris és sejt
 - **DNS károsodás:** pontmutáció, kromoszómatörés (egy- vagy kétszeres lánc-törés)
 - **Fehérje károsodás:** indirekt, szabad gyökök hatása, enzimkárosodás
 - **Sejt életképtelensége: pusztulás** (apoptózis)
 - Szövet és szervezet
 - **Akut sugárbetegség**
 - **Késleltetett („krónikus”) sugárártalom** (leukémia, malignus daganatok)
 - Populáció
 - Sérült ivarsejtekből életképtelen, sérült **utód**
 - **Magzati** károsodás: letalitás, fejlődési rendellenesség
 - **Genetikai állomány** károsodása: meddőség

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.)

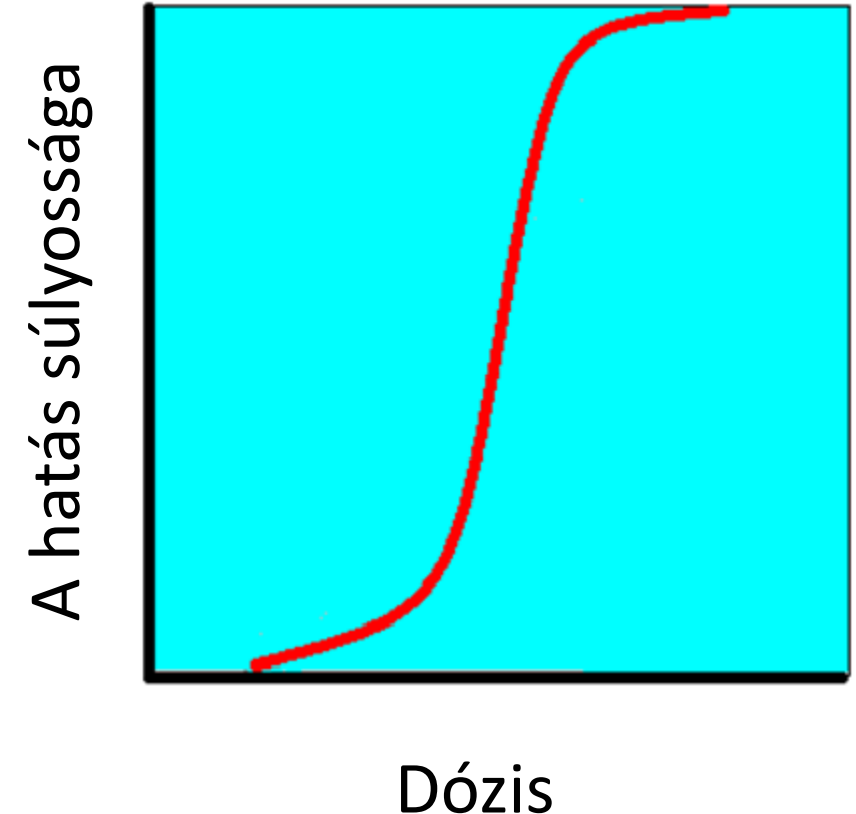
Biológiai hatás: a megváltozott anyagszerkezet megváltoztatja a biológiai „eseményeket”, életfolyamatokat.

Determinisztikus hatások

Létezik egy **küszöbérték**

Felette a **hatás súlyossága** nő a dózis növekedése esetén.

- Sok sejt elpusztul vagy megváltozik a funkciója.
- A sugárzás hatására (vagy az élettartamuk végén „természetes okokból”) elpusztult funkcionális végsejtek folyamatosan pótlódnak az érési sorból. Az osztódó sejtek lényegesen sugárérzékenyebbek, a determinisztikus tünetek akkor jelennek meg, amikor a végsejteket már nem tudják pótolni a sugárzás hatására elpusztul őssejtek.
- Megjelennek a sugárbetegség tünetei (vérképző rendszeri, gyomor-bél rendszeri, agyi-érrendszeri tünetcsoport)
- A tényleges hatás függ a sugárzás típusától és az expozíció körülményeitől, ezt az RBE (*relative biological effectiveness*, relatív biológiai hatás) arányossági tényezővel fejezzük ki, mely azt adja meg, hogy hányszor hatásosabb a sugárzás károsító hatása a 250 kV-os röntgensugárzásénál.



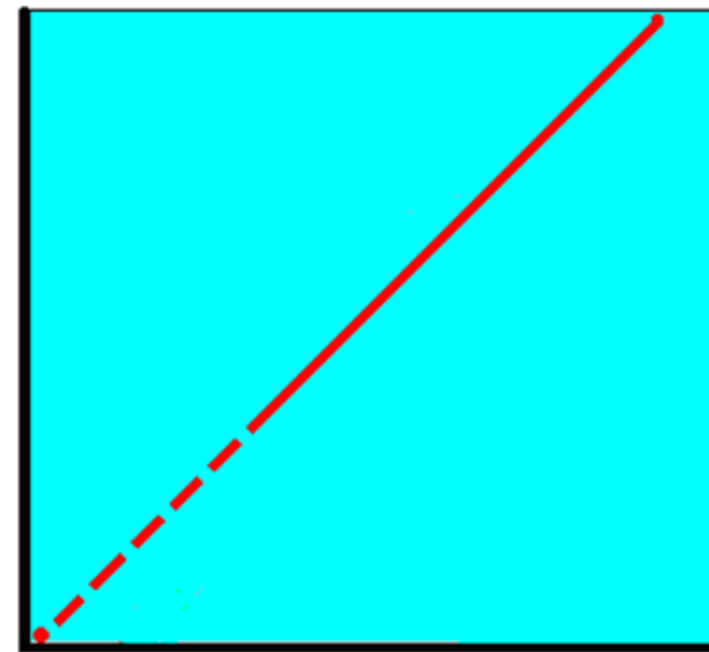
Sztochasztikus hatások

Küszöbdózis nélkül jelentkező, sugárzás okozta egészségi hatás.

A bekövetkezés

- valószínűsége arányos a dózissal,
- súlyossága független a dózistól.
- Sztochasztikus egészségi hatások:
 - Sugárzás okozta daganatos megbetegedések
 - Örökletes hatások
- A daganatok kialakulásának akár **több éves lappangási ideje** van
- A sugárzás okozta sztochasztikus **hatások hasonlók** a nem besugárzott népességben kialakuló hatásokhoz.
- Nincsenek olyan jelek vagy jellemzők, amelyek arra utalnának, hogy az expozíciónak kitett személynél a rákot vagy utódainál az örökletes hatást a sugárzás okozta.
- Az **ok-okozati összefüggést** (annak valószínűségét) **csak megbecsülni lehet**.

A hatás valószínűsége



Dózis

- Az egyén kockázata a szöveti kockázatok összege
- Sztochasztikus hatás
- Nincs dózisküszöb (az alacsony dózisok rákkeltő hatása nem igazolt)
- A kis dózisok (<100 mSv) biológiai hatására a nagy dózisok hatásai alapján következtetünk
- A dózis/kockázat függvény lineáris (?) (LNT = Linear no-threshold)

Kockázat

(a daganat kialakulásának a valószínűsége)

$$m = 5 \cdot 10^{-2} / \text{Sv}$$

[Sv]

Az összefüggést a hirosimai és a nagaszaki bombázások túlélőinek járványügyi statisztikái alapján határozták meg, később állatkísérletek és in-vitro sejtkísérletek eredményei alapján pontosították.



Journal of Epidemiology



Special Article

J Epidemiol 2018;28(4):162-169

Japanese Legacy Cohorts: The Life Span Study Atomic Bomb Survivor Cohort and Survivors' Offspring

Kotaro Ozasa¹, Eric J Grant², and Kazunori Kodama³

Áldozatok száma 1945 végéig: 214 000

Az epidemiológiai vizsgálatokba bevont személyek száma:

- Túlélők 10...100 mSv dózissal : 120 000
- Magzati korban lévőek: 3600
- Túlélők gyermekei: 77000

Kontrollcsoportok: Hasonló életkörülmények között élő japán emberek

„Méréstechnikai” probléma: mekkora dózist kaptak?

LINEÁRIS KÜSZÖBNÉLKÜLISÉG (LNT) MODELL

Sugárvédelmi célokból bizonyos egyszerűsítő feltételezéseket kell tenni. A Bizottság (ICRP) ajánlásait alátámasztó egyik ilyen **alapfeltevés** az, hogy a sztochasztikus hatásokat illetően a sugárveszélyes munkák során általában előforduló expozíciós feltételek tartományán belül **lineáris kapcsolat van küszöbérték nélkül a dózis és a hatás valószínűsége között**.

AZ LNT HIPOTÉZIS KÖVETKEZMÉNYEI

A szövet vagy szerv által kapott dózisok egyszerű összegzése a **teljes kockázat** mértéke, valamint a **kollektív egyenérték dózis** [dózisegyenérték] számítása, mint a **populációt érő teljes károsodás index**, csak ezen feltételezés alapján érvényes, és hogy az egyes hatástípusok súlyossága a dózistól független.

AZ EFFEKTÍV DÓZIS ALKALMAZÁSA

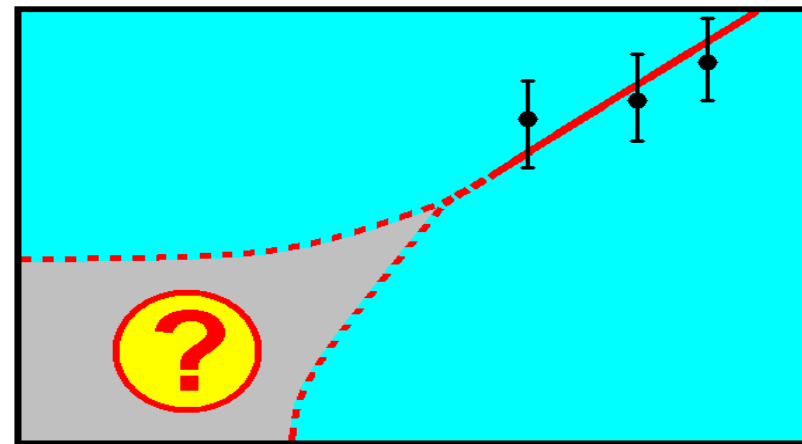
Az effektív dózis fő és elsődleges felhasználási területei a sugárvédelemben mind a munkahelyi dolgozók, mind a lakosság számára a következők:

- prospektív dózisbecslés a **védelem tervezéséhez és optimalizálásához** ; és
- retrospektív dózisértékelés a **dózishatárok betartásának bizonyítására, vagy a dóziskorlátokkal vagy referenciaszintekkel való összehasonlításra**

[1977 Recommendations of the ICRP]

A sztochasztikus dózis-kockázat összefüggés

- Az LNT modell a szabályozás alapja
- Számos kérdés is megfogalmazható
 - A megfigyelt hatások biztosan kizárólag a sugárzásnak tulajdoníthatók, kizárhatók az egyéb tényezők? (A „minta” és a sugárzások kívül azonos tulajdonságokkal rendelkező „kontroll” csoportok meghatározásának problémája)
 - Lehetséges-e a kis dózisok pozitív hatása? (A sugárzás aktiválja a hibajavító mechanizmust, melynek következtében sugáradaptáció alakul ki és hatékonyabb lesz a védelem)
 - Bystander (szomszéd) hatások? Ez akár pozitív is lehet?
 - A szöveti súlytényezők általános sebezhetőséget tükröznek?
 - Az összefüggések megállapításánál csak a primer tumort vagy a metasztázist is figyelembe veszik?
 - Mennyi ideig integrálhatók a dózisok?
- Tudományos szempontból nincs konszenzus
 - A nagy bizonytalanság miatt általánosan nem bizonyítható/cáfolható
 - A megfigyelhető következmény több párhuzamos folyamat, hatás együttes eredménye



Indokoltság

- A sugárforrás alkalmazása során az **előnyök meghaladják annak kockázatát**.
- A kívánt előnyt más, sugárzást nem alkalmazó **módon nem lehet elérni**

Optimálás

- A lakossági vagy foglalkozási sugárterhelésnek kitett személyek sugárvédelmét optimalni kell, azzal a céllal, hogy a személyi **dózisok nagysága, a sugárterhelés valószínűsége**, valamint a sugárterhelésnek kitett **személyek száma** az aktuális műszaki ismereteket, valamint a gazdasági és a társadalmi tényezőket figyelembe véve **az észszerűen elérhető legalacsonyabb legyen**. (ALARA - As Low As Reasonably Achievable)
- Az így kapható (foglalkozási és lakossági) **feltételezett dózisok átlagos értékek**; a **várható eloszlást is** ki kell számítani, és az engedélyezési eljárás során be kell nyújtani a szabályozó hatóságnak.

Korlátozás

- **dóziskorlátok** (DL, dose limit) lekötött effektív vagy egyenérték dózisok, az egyes személyekre.
- Tervezett sugárzási helyzetben egy adott személy által kapott dózisok összege nem haladhatja meg foglalkoztatás esetén a foglalkozási sugárterhelés vagy a lakosság tagjai tekintetében a lakossági sugárterhelés esetére megállapított dóziskorlátokat.
- A dóziskorlátokat nem szabad túllépni, azoknál lényegesen alacsonyabb **kivizsgálási és beavatkozási** szinteket is meghatároznak a foglalkozási sugárterhelésre vonatkozóan.

Tervezett

- Radioaktív sugárforrások szándékos alkalmazásából eredő sugárterhelési helyzet, a sugárforrás használata érthető, és a következmények kezdettől fogva előre láthatóak és ellenőrizhetőek.

Baleseti

- Váratlan helyzetek, amelyek sürgős védelmi intézkedéseket tehetnek szükségessé a következmények kockázatának csökkentése érdekében.

Fennálló

- Már létező helyzetek, amikor a következmények kockázatának csökkentése érdekében ellenőrzésről kell dönteni. (olyan sugárzási helyzet, amely már a hatósági felügyeletről és ellenőrzésről szóló döntés meghozatalakor fennáll, és amely nem igényli sürgős intézkedés bevezetését vagy korábban meghozott sürgős intézkedés fenntartását)

Foglalkozási sugárterhelés

- A munkavállalókat, gyakornokokat és tanulókat munkavégzésük során érő sugárterhelés;
- képzettek és tisztában vannak a sugárzási kockázattal.

Lakossági sugárterhelés

- Az egyéneket érő sugárterhelés, a foglalkozási és az orvosi sugárterhelés kivételével, a normál helyi természetes háttérsugárzás felett.

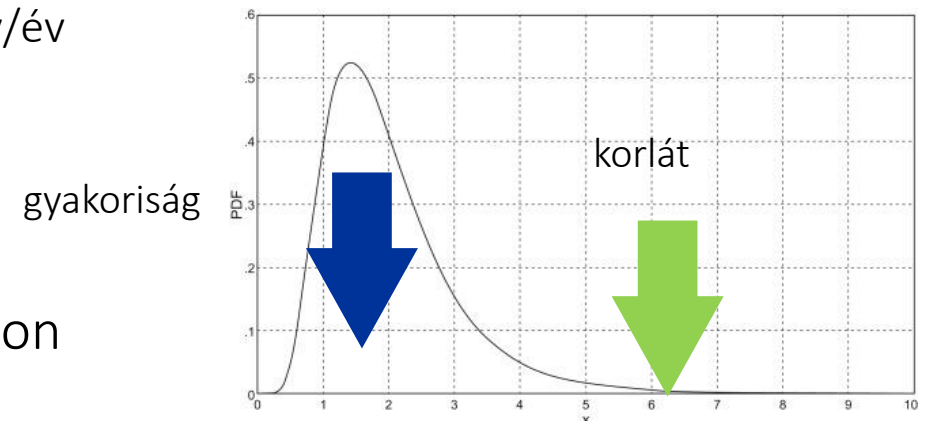
Orvosi sugárterhelés

- A betegeket vagy tünetmentes személyeket az egészségük érdekében alkalmazott orvosi vagy fogorvosi diagnózis vagy kezelés (terápia) részeként érő sugárterhelés;
- továbbá a gondozókat és a segítőket, valamint az orvosi vagy orvosbiológiai kutatásban részt vevő önkénteseket érő sugárterhelés;
- kockázatukat a felelős egészségügyi személyzet határozza meg és értékeli.

- **Dóziskorlát (DL – dose limits):** lekötött effektív vagy egyenérték dózis → az egyes személyek sugárterhelésének korlátozására (valamennyi forrásból, a külső és belső sugárterhelés összege)
 - foglalkozási sugárterhelésre: **20 mSv/év**
(Indokolt körülmények között legfeljebb 50 mSv/év, de bármely egymást követő öt évben az éves átlagos dózis nem haladja meg a 20 mSv értéket)
 - Lakosság tagjai: **1 mSv/év**

További dóziskorlátok – egyenértékdózis a szemlencsére, a bőrfelületre és a végtagokra

- Munkavállalókra a szemlencse egyenértékdózisa 20 mSv/év (korábban 150 mSv/év volt!), bőrfelületre (1 cm²-es felületre átlagolva) és végtagokra: 500 mSv/év
- A lakosság tagjaira a szemlencsére 15 mSv/év, bőrfelületre és végtagokra és 50 mSv/év
- A dóziskorlátok nem tervezési célértékek!
- A megadott korlátok túllépésének valószínűsége „nagyon valószínűtlen” legyen ($<10^{-6}$).



Effektív dózis [relatív egység]

DC – dózismegszorítás (dose constraint) → emissziókorlátozás (egyetlen szabályozott forrásból; az optimálás folyamatában van meghatározva; az értéket a létesítmények és tevékenységek működési engedélye tartalmazza)

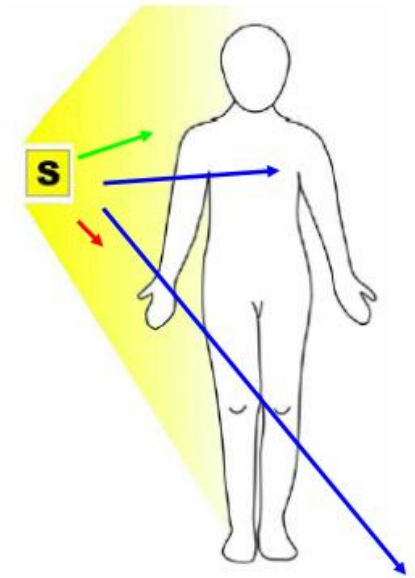
Foglalkozási sugárterhelések: A DC-ket a szabályozó hatóság által rendszeresen jóváhagyott és felülvizsgált helyi sugárvédelmi dokumentumokban (munkahelyi sugárvédelmi szabályzat, sugárvédelmi leírás, munkautasítás, kísérleti engedély stb.) határozzák meg a munkafolyamatokra, vizsgálatokra, kísérletekre.

Lakossági sugárterhelés: A DC a lakosság leginkább érintett tagjainak (reprezentatív személynek, korábban „kritikus csoport” tagjainak) az adott létesítmények vagy tevékenységek által okozható maximális dózis – közvetlenül nem mérhető.

Belső sugárterhelés

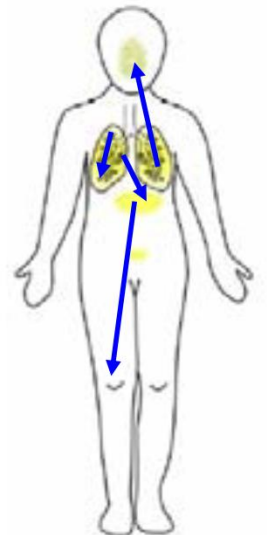
Külső terhelés: a sugárforrás a személy testén kívül helyezkedik el

- Pontforrás
- Ionizáló sugárzást létrehozó berendezések (röntgenkészülék, gyorsító, reaktor)
- Szennyezett vagy felaktiválódott tárgyak, felszínek
- Test külső felszíne



Belső terhelés: a radioaktív anyag bekerült a szervezetbe

- Szennyezett levegő belégzése
- Szennyezett élelmiszer vagy víz lenyelése
- Bekerülés a bőrfelszínen vagy seben keresztül



A radionuklid lehet természetes vagy mesterséges eredetű

Ami NEM lehet: ~~sugárfertőzés~~

Bevitel

Belégzés, lenyelés, bőrfelületen, seben keresztül

A szervezetén belül

A vér- és nyirokkeringéssel juthatnak a célszervekbe (pl. stroncium a csontokba, jód a pajzsmirigybe)

Rövidebb vagy akár hosszabb ideig raktározódhatnak

Kiürül

Kilélegzett levegő; Vizelet, széklet; Verejték, nyál, orrváladék; Spontán vagy terápiás hányás

Felezési idő

Fizikai, biológia és effektív

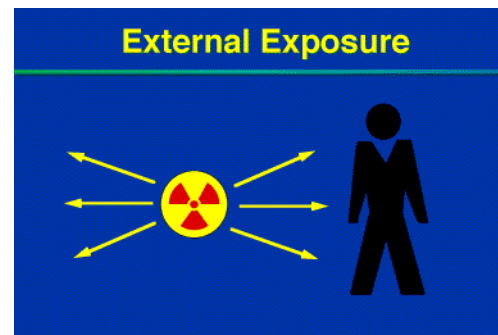
Védőintézkedések:

Általános: a jogszabályoknak és a szabályozó hatóság határozatainak megfelelően.

Egyedi: a helyi szakértők által kidolgozott helyi szabályok és munkarend szerint;
az engedélyezési eljárások során jóváhagyott szabályok szerint

Védekezés a külső sugárterheléssel szemben:

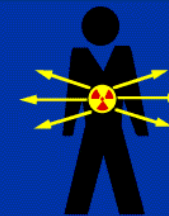
- Idő (a dózis arányos az idővel)
- Távolság (pontforrásnál a dózis fordítottan arányos a távolság négyzetével)
- Árnyékolás (ólom, beton, víz, ...)



Védekezés a belső sugárterheléssel szemben:

- ??????

Internal Exposure



Kontamináció csökkentése

- Közeg aktivitásának csökkentése (elszívás, hermetikus tér)
- Bekerülés mennyiségének csökkentése (dohányzás és étkezés tiltása potenciálisan szennyezett helyeken, étel-miszerfogyasztás korlátozása, nyílt sebek elfedése)
- Bekerülés során az aktivitáskoncentráció csökkentése (egyéni védőeszközök, pl. maszk, szűrő, kesztyű, védőruha...)
- További bekerülés elkerülése érdekében a külső felületek dekontaminálása (bőr mosása, haj és szőrzet leborotválása, seb kimetszése...)

Szervezetben felszívódás, raktározás mennyiségének csökkentése

- Mechanikus eljárások (öblítés, kifújás, gyomormosás, ...)
- Jódprofilaxis: stabil jód bevitelével a pajzsmirigy „telítése”

Kiürülés gyorsítása

- DTPA - dietilén-triamin-penta-acetát (Am, Pu)
- Berlini kék (Cs)

Radionuklid	Kimutatás módja	Dekorporálás
H-3	In vitro	Bőséges folyadékfogyasztás és vízajtók
Co-60	In vivo és in vitro	0,5 g DTPA iv. 250 ml izotóniás oldatban (több napon át ismételhető)
Sr-90	In vitro	Izotóphígítás Sr-laktát per os vagy Sr-glukonát iv.; Ca-glukonát per os vagy iv.; Ammónium klorid per os (savasítás)
I-131	In vivo és in vitro	Mielőbb elvégzett jódprofilaxis (12,5-100 mg jód életkortól függően)
Cs-137	In vivo és in vitro	1-10 g berlini kék per os
U-235, 238	In vitro (in vivo)	250 ml izotóniás 1,4 %-os nátrium bikarbonát iv. (komplexbépzés)
Pu-239	In vitro (in vivo)	0,5 g DTPA iv. 250 ml izotóniás oldatban (több héten, hónapon át ismételhető)
Am-241	In vivo és in vitro	0,5 g DTPA iv. 250 ml izotóniás oldatban (több héten, hónapon át ismételhető)

Elnyelt dózis

Egységnyi tömegű anyagban elnyelt összes sugárzási energia, csak a fizikai kölcsönhatásokat foglalja magába.

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

Egyenértékdózis

Az ionizáló sugárzás sztochasztikus biológiai hatásával arányos mennyiség

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

Effektív dózis

Az egyes szervek eltérő sugárérzékenységét is figyelembe veszi

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

w_R sugárzási súlytényező

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

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

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

$$w_{R,n} = 2,5 \dots 20 \text{ a neutronenergia függvényében}$$

w_T szöveti súlytényező

$$w_T = 0,12 \text{ tüdő, gyomor, belek,} \\ \text{vörös csontvelő, emlő (legérzékenyebbek)}$$

$$w_T = 0,08 \text{ ivarszervek}$$

$$w_T = 0,04 \text{ máj, vese, pajzsmirigy stb. (érzékenyek)}$$

$$w_T = 0,01 \text{ bőr, csontfelszín (kissé érzékeny)}$$

Lekötött dózis

A szervezetbe (pillanatszerűen) bekerült és ott hosszabb ideig jelenlévő radioaktív anyag effektív dózisa

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

gyermekeknél $T = 70$ év

felnőtteknél $T = 50$ év

Kollektív dózis

Egy embercsoport tagjai által egy adott sugárforrástól kapható effektív dózisok összege.

$$C = \sum_i H_{E,i} \cdot n_i$$

[személy*Sv]

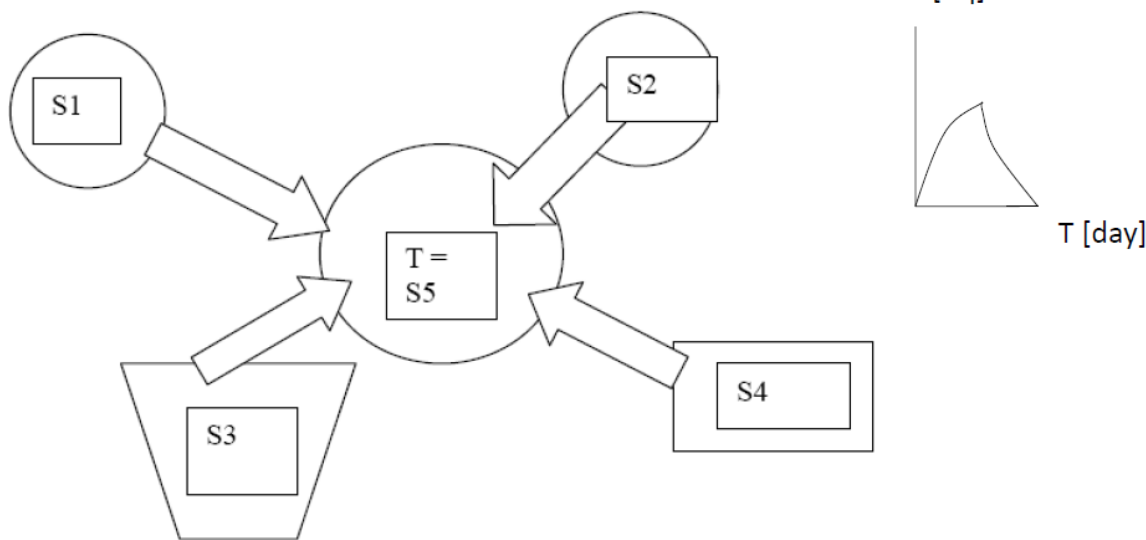
Nagyon „veszélyes” mennyiség!

Csak az emisszió értékelésénél vagy munkafolyamat tervezésekor használható!

- A belső sugárterhelés (a dózis és/vagy a dózisteljesítmény) **közvetlenül nem mérhető**, csak közvetett módon határozható meg
- **A szennyeződés típusa, jellemzői és mennyisége határozható meg**
 - Az emberi **szervezetben lévő** radioaktivitás meghatározása in vivo módszerekkel (pl. egész- vagy résztestszámlálás)
 - Aktivitás(koncentráció) mérése az **exkrétumokban** (általában vizelet, széklet)
 - A **levegőből/vízből/élelmiszerekből származó minták** aktivitáskoncentrációjának meghatározása
- A mérendő mennyiség minden esetben az **aktivitás(koncentráció)** a közegben vagy a vizsgált személyben.
- Ehhez **a sugárzás jellemzőit és intenzitását** kell mérni (pl. a gammaspektrum felvételét követően a sugárzás energiájából következtetünk a szennyeződés típusára, intenzitásából a nagyságára)

Internal dose

Dose is summed from the equivalent doses of tissues caused by the ionizing radiation (R) from source (S) tissues containing radioactive species imparting energy in target (T) tissues (S=T is possible)



Egy radioaktív anyag szövetben való visszatartásának (felhalmozódásának és felszabadulásának) időfüggése

A dózis a T célszövetben arányos az S forrásszövetben (több is van, S=T is lehetséges) tapasztalható retenciós görbe integráljával

Az „i” radionuklidnak a szervezet különböző szervein keresztül történő átjutását leíró megfelelő modell szükséges a beviteltől (belélegzéstől vagy lenyeléstől) a kiürülésig az adott radionuklid belső lekötött effektív dózisának meghatározásához. Az egyes szövetek közötti átvitel paraméterei és a tartózkodási idők a bevitel módjától, a hordozóanyag típusától és a kitett személy életkorától függenek.

A „T” célszövet egyenértékdózisának számítási modellje egy adott radionuklidtól

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

H_T : egyenértékdózis a T célszövetben egy adott radionuklidból [Sv]

u_S : az S forrásszövetben előforduló bomlások száma [-] = az aktivitás időintegrálja

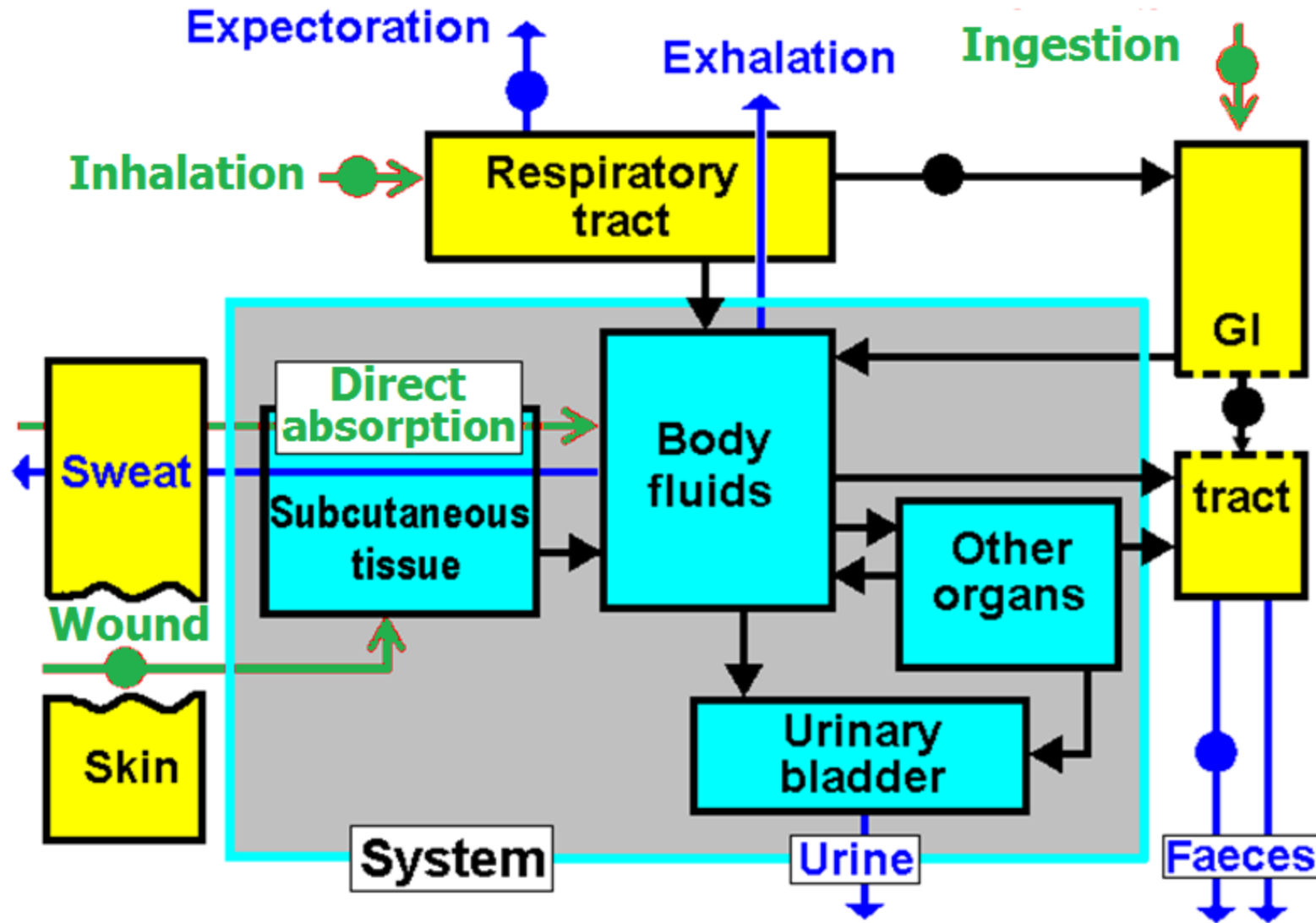
w_R : sugárzási súlyozó tényező [Sv/Gy]

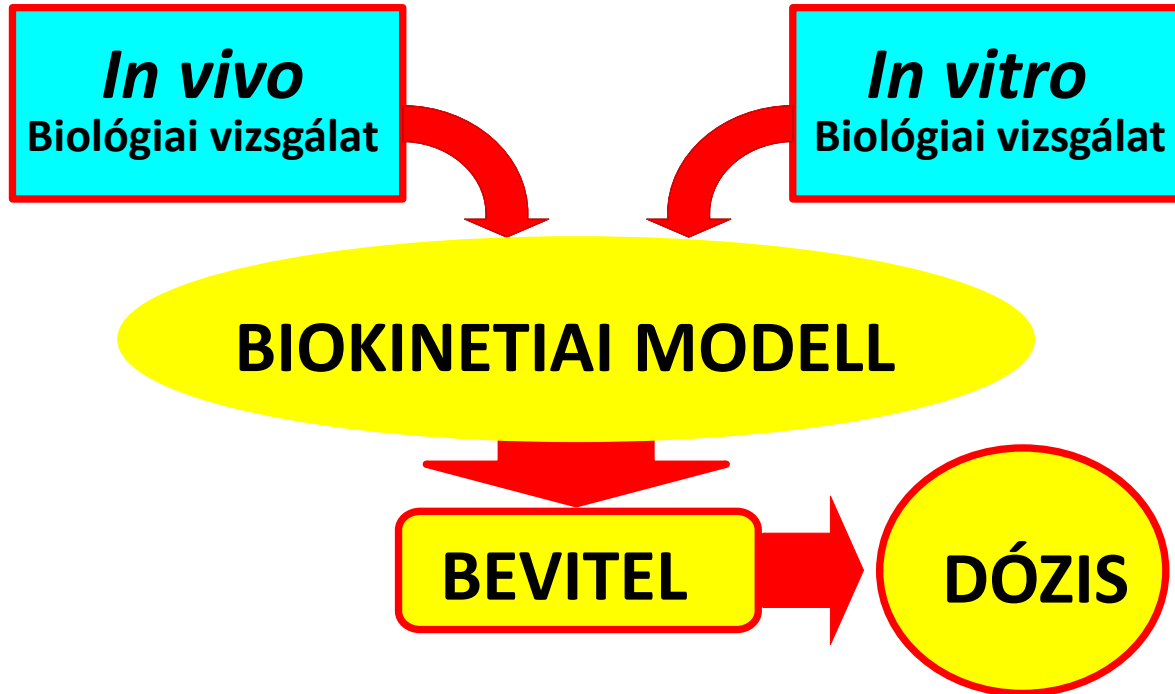
E_R : sugárzási energia [keV/részecske]

f_R : részecskegyakoriság (hozam) [részecske/bomlás]

m_T : a célszövet tömege [kg]

Q : az S forrásból a T célba érkező R sugárzás elnyelt hányada ($0 \leq Q \leq 1$) – térszögtől és az elnyelés fizikai jellemzőitől is függ. Pl. $Q=1$, ha $S=T$ és $R=\alpha$.





Radionuklid	Minta	Módszer
Urán	Vizelet, széklet	Fluorimetria, alfa spektrometria, ICP-MS
Tórium	Vizelet, széklet	Spektrofotometria, alfa spektrometria, ICP-MS
$^{226,228}\text{Ra}$	Vizelet	Alfa spektrometria
$^{238,239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am	Vizelet, széklet	Alfa spektrometria
^3H , ^{14}C , $^{89,90}\text{Sr}$, ^{32}P	Vizelet	Folyadékszintilláció, béta spektrometria
Hasadási és aktivációs termékek	Vizelet, széklet	Alfa spektrometria

BIOKINETIKA

- A bevitel becslése és a radionuklid kezdeti megkötődésének kiszámítása a szervezetben
- A radionuklidok kiürülésének modellezése
- A szervek felvételének modellezése
- A szervekben történő retenció modellezése az idő függvényében

DOZIMETRIA

- A szervek által elnyelt energia kiszámítása az idő függvényében
- Az egyes szervek elnyelt dózisának kiszámítása
- Az egyes szervekben lekötött egyenértékdózis kiszámítása a megfelelő sugárzási súlyozó tényezők segítségével
- Az effektív dózis kiszámítása a megfelelő szöveti súlyozó tényezők segítségével



Intake



Felvétel

Idő-aktivitás görbék a forrásszövetekben
→ Bomlások száma

Biokinetikai modell

Nukleáris adatok, fantomok és részecsketranszport

Szövetek által elnyelt dózis (mGy)

Sugárzási súlytényezők (w_R)

Szöveti egyenértékdózis (mSv)

Szöveti súlytényezők (w_T)**Effektív dózis (mSv)**

Dozimetriai modell

Belső dózistényező

A sugárdózisok meghatározásához olyan modellekre van szükség, amelyek szimulálják a külső sugárterhelés geometriáját, az inkorporált radionuklidok biokinetikáját és az emberi szervezetet.

A **referenciamodelleket** és a szükséges **referenciaparaméter-értékeket** fizikai kísérletekből és humán vizsgálatokból választják ki. Szabályozási okokból ezek a modellek és paraméterértékek megegyezés szerint rögzítettek, és nem kötnék hozzájuk bizonytalanságot.

Erőfeszítéseket tesznek az **egyéni retrospektív dózis- és kockázatértékelések** kritikus értékelésére és a módszeres és véletlen bizonytalanságok csökkentésére, ehhez figyelembe kell venni az **egyéni paramétereket** és bizonytalanságokat.

[ICRP Publ. 103, ICRP Publ 130]

Belső sugárterhelés meghatározásának célja

Az emberi szervezetbe került radioaktív anyag mennyiségét és minőségét meghatározva megállapítható legyen az ebből eredő, a belső szervek és szövetek által kapott **lekötött effektív dózis**.

Belső sugárterhelés meghatározásának lépései

Először **közvetlen** (pl. egésztest vagy résztest aktivitásának meghatározása) vagy **közvetett** (pl. fizikai, biológiai minták radioaktív anyagtartalmának mérése) módszerek alkalmazásával meg kell határozni a szervezetben lévő radioaktív anyag mennyiségét.

Majd ennek ismeretében, **biokinetikai és dozimetriai modellek használatával**, valamint a **felvételre vonatkozó további információk** figyelembevételével végezhető el a lekötött effektív dózis meghatározása.

Belső sugárterhelés meghatározásának kihívásai

Az emberi test egyedi jellemzői és változatossága,

A biokinetikai és a dozimetriai modellek és a paraméterek bizonytalansága,

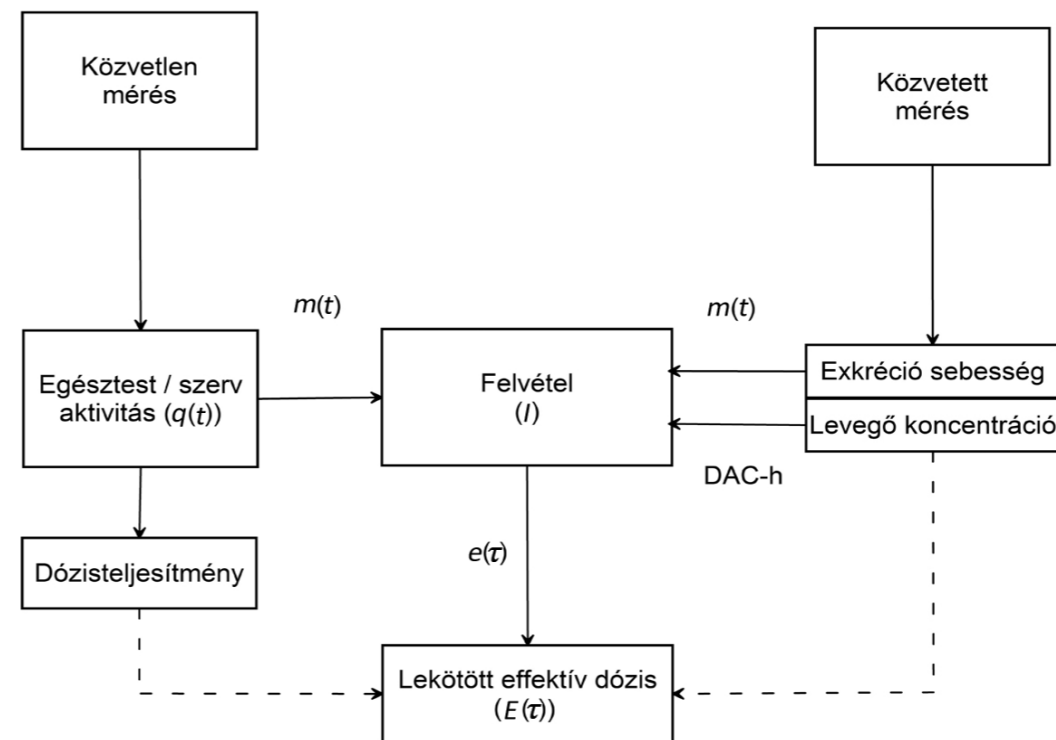
A felvétel körülményeire vonatkozó feltételezések bizonytalanságai.

Az emberi testen kívül lévő detektor segítségével, a gamma sugárzásból származó nagy áthatoló képességű sugárzást mérjük.

- egésztest-, résztestszámlálás
- gammaspektrometria
- energiaszelektív

Az emberi exkrétumok aktivitáskoncentrációjából kinetikai modellek alkalmazásával lehet következtetni a szervezetben lévő radionuklidok mennyiségére

- vizelet-, székletminták mérése
- alfa-, béta-spektrometriai, módszerek, folyadékszcintilláció
- izotóp-specifikus



Felvétel: $I = \frac{q(t)}{m(t)}$ $q(t)$ mérési adatok
 $m(t)$ retenciós függvény

Lekötött effektív dózis: $E(\tau) = \frac{I}{e(\tau)}$ $e(\tau)$ dózistényező



Álló helyzetű
egésztest
számláló



Szkennelő
egésztest
számláló ágy

Egésztest
számláló
szék

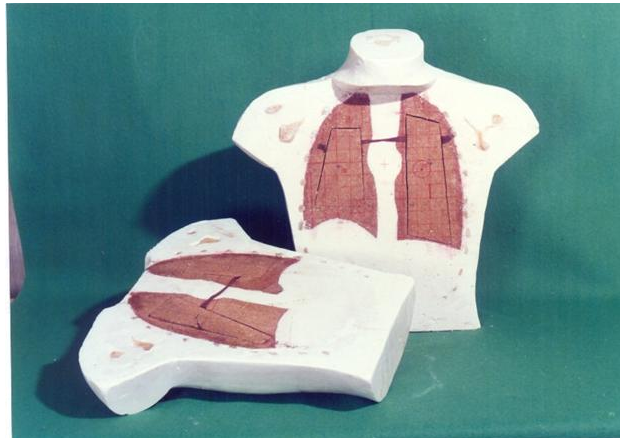


Pajzsmirigy
monitor



 detektor

- Bonyolult alakú és összetételű emberi testet utánoznak
 - Egyedi paraméterek
 - Különböző dimenziók
- Radioaktivitás eloszlása
 - Homogén
 - Szervben dúsult (pajzsmirigy, csontkereső izotópok)

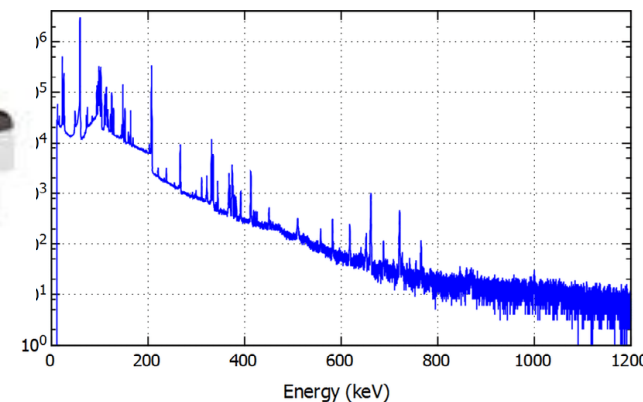


- Gamma-spektrometria in vivo és in vitro minták méréséhez – általában félvezető (HPGe) vagy szcintillációs (NaI(Tl), CsI(Tl), LaBr₃(Ce)) detektorok
- A tisztán alfasugárzó izotópoknál radiokémiai feldolgozást követően alfa-spektrometria félvezető (PIPS) detektorokkal
- Alfa számlálás spektrometria nélkül: vékonyablakos proporcionális számlálók (a felületiszennyezettség-mérőkhöz hasonlóan)
- Tisztán béta-sugárzó izotópoknál radiokémiai feldolgozást követően PIPS vagy gáztöltésű detektorokkal
- Kisenergiás béta-sugárzók (100 keV átlagos energia esetén, pl. ³H és ¹⁴C): kémiai előkészítést követően folyadékszintillációs mérés (liquid scintillation counter, LSC).

Radionuklid	Minta	Mérési módszer
U	vizelet, széklet	fluorimetria, alfa-spektrometria, ICP-MS
Th	vizelet, széklet	spektrofotometria, alfa-spektrometria, ICP-MS
^{226,228} Ra	Vizelet	alfa-spektrometria
^{238,239,240} Pu, ²⁴¹ Am	vizelet, széklet	alfa-spektrometria
³ H, ¹⁴ C, ^{89,90} Sr, ³² P	Vizelet	LSC, béta-spektrometria
Hasadási és aktivációs termékek	vizelet, széklet	gamma-spektrometria



Tri-Carb LSC



1. Meghatározzuk a lekötött egyenértékdózist és a lekötött effektív dózist
2. Elosztjuk a bevitt aktivitással.
3. Így megkapjuk $e(g)$ -t, ami az adott radionuklidra és beviteli módra vonatkozó belső dózistényező (gyakori neve még: dóziskonverziós tényező)
4. Ez függ a hordozóanyag típusától (pl. vízben vagy zsírban oldódó molekula), a bevitel módjától és a kitett személy életkorától is.

$$e(g) = \frac{E}{A_{in}}$$

Ez alapján: ha A_{in} (a bevitt aktivitás) ismert, bármilyen más, **ugyanilyen körülmények között** előálló dózis könnyen kiszámítható.

BIOKINETIKAI MODELL

- A modellstruktúra megfelelősége
- A modell paraméterértékeinek bizonytalanságai
 - Forrás adatok
 - Embertani adatok
 - Egyéb emlősfajok, mint analógok
 - Élettani alapadatok
 - Korrelációk
- A fizikai felezési idők bizonytalansága elhanyagolható

DOZIMETRIAI MODELL

- Fizikai tulajdonságok
- Az emittált sugárzás energiája és spektruma jól ismert, a bizonytalanságok elhanyagolhatók
- Jelenleg számos különböző voxel fantom áll rendelkezésre, az egyénen belüli variabilitás könnyen felmérhető és számszerűsíthető
- Az inhomogén aktivitáseloszlás és a sugárzásérzékeny sejtek elhelyezkedésére vonatkozó egyszerűsítő feltételezések jelentős mértékben hozzájárulnak a bizonytalansághoz (különösen fontos a nagy LET-értékű sugárzás és az üreges szervek esetében)



Összefoglalás

- A radioaktivitás az életük része, de érzékszerveinkkel nem érzékelhető
- Nincs különbség a természetes és a mesterséges eredetű sugárzás hatásában, következményeiben
- A sugárvédelem célja: az emberek és a környezet biztonsága → a dózis mérséklése
 - a determinisztikus hatásokat ki kell zárni
 - a sztochasztikus hatásokat az ésszerűen elérhető legalacsonyabb szintre kell csökkenteni
- Külső és belső sugárterhelés
 - eltérő mechanizmus
 - eltérő mérési módszer
 - eltérő védekezési módszerek

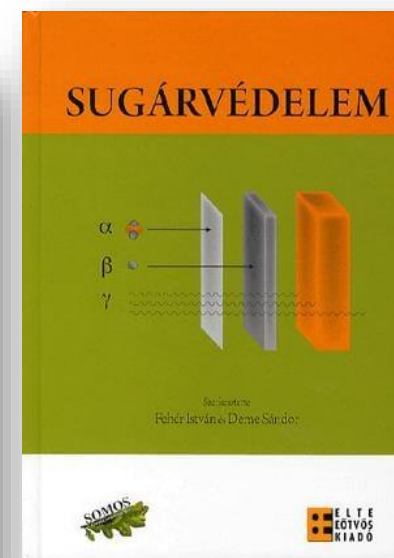
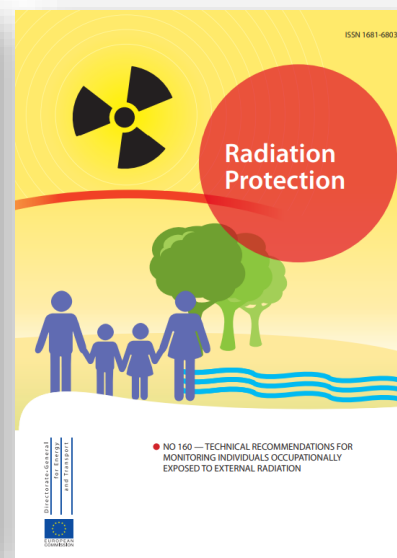
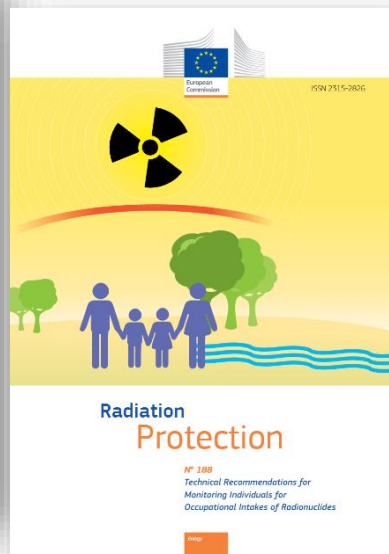
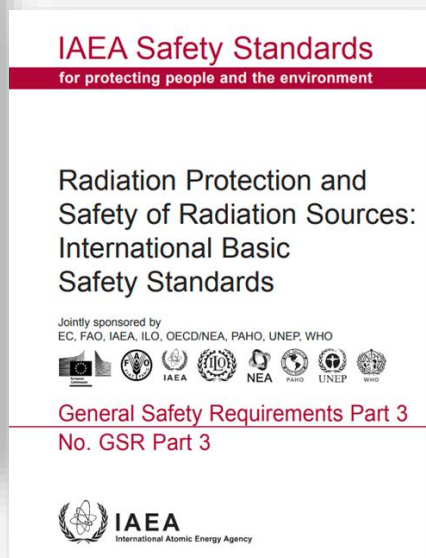
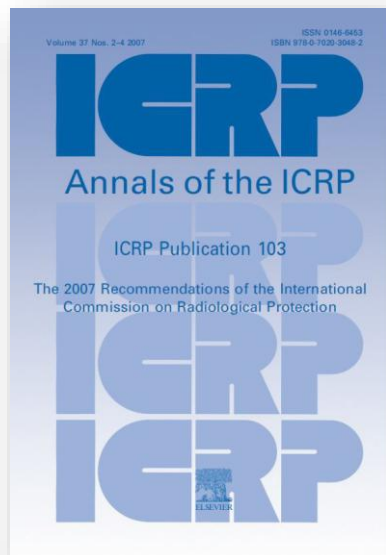
Nemzetközi ajánlások, irányelvek:

- ICRP #103 (2007)
- IAEA General Safety Requirements (GSR) Part 3 (2014)
- IBSS = International Basic Safety Standards, 2013/59/EURATOM direktíva

Magyar jogszabályok: a fentiekkel (szinte) teljes összhangban, néhány fontosabb:

- Az 1996. évi CXVI. törvény az atomenergiáról
- 2/2022. (IV. 29.) OAH rendelet az ionizáló sugárzás elleni védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről + 12 melléklete
- 489/2015. (XII. 30.) Korm. rendelet a lakosság természetes és mesterséges eredetű sugárterhelését meghatározó környezeti sugárzási helyzet ellenőrzési rendjéről és a kötelezően mérendő mennyiségek köréről
- 16/2000. (VI. 8.) EüM rendeletet az atomenergiáról szóló 1996. évi CXVI. törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról
- 15/2001. (VI. 6.) KöM rendelet az atomenergia alkalmazása során a levegőbe és vízbe történő radioaktív kibocsátásokról és azok ellenőrzéséről

- The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103.
- Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3, IAEA, 2014
- Technical Recommendation for Monitoring Individuals for Occupational Intakes of Radionuclides, RP-188, EC, 2018
- *Technical recommendations for monitoring individuals occupationally exposed to external radiation, RP-160, EC, 2007*
- Sugárvédelem (szerk.: Fehér István és Deme Sándor), ELTE Eötvös Kiadó, 2010
- Sugárvédelem a gyakorlatban (szerk.: Deme Sándor és Pesznyák Csilla), Typotex Kiadó, 2024



Köszönöm a figyelmet!

Dr. Pázmándi Tamás

pazmandi.tamas@ek.hun-ren.hu

