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]

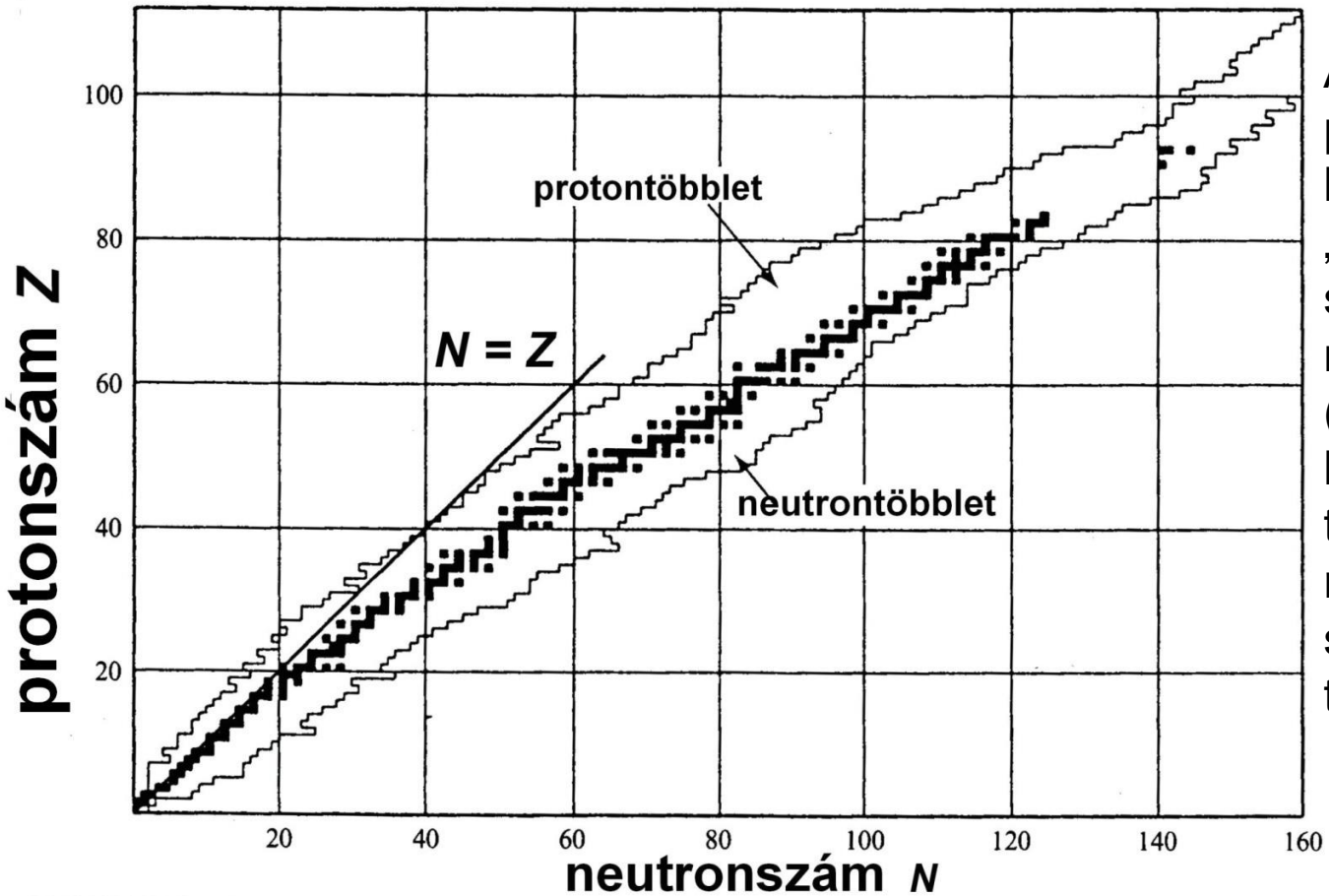
$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

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

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

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

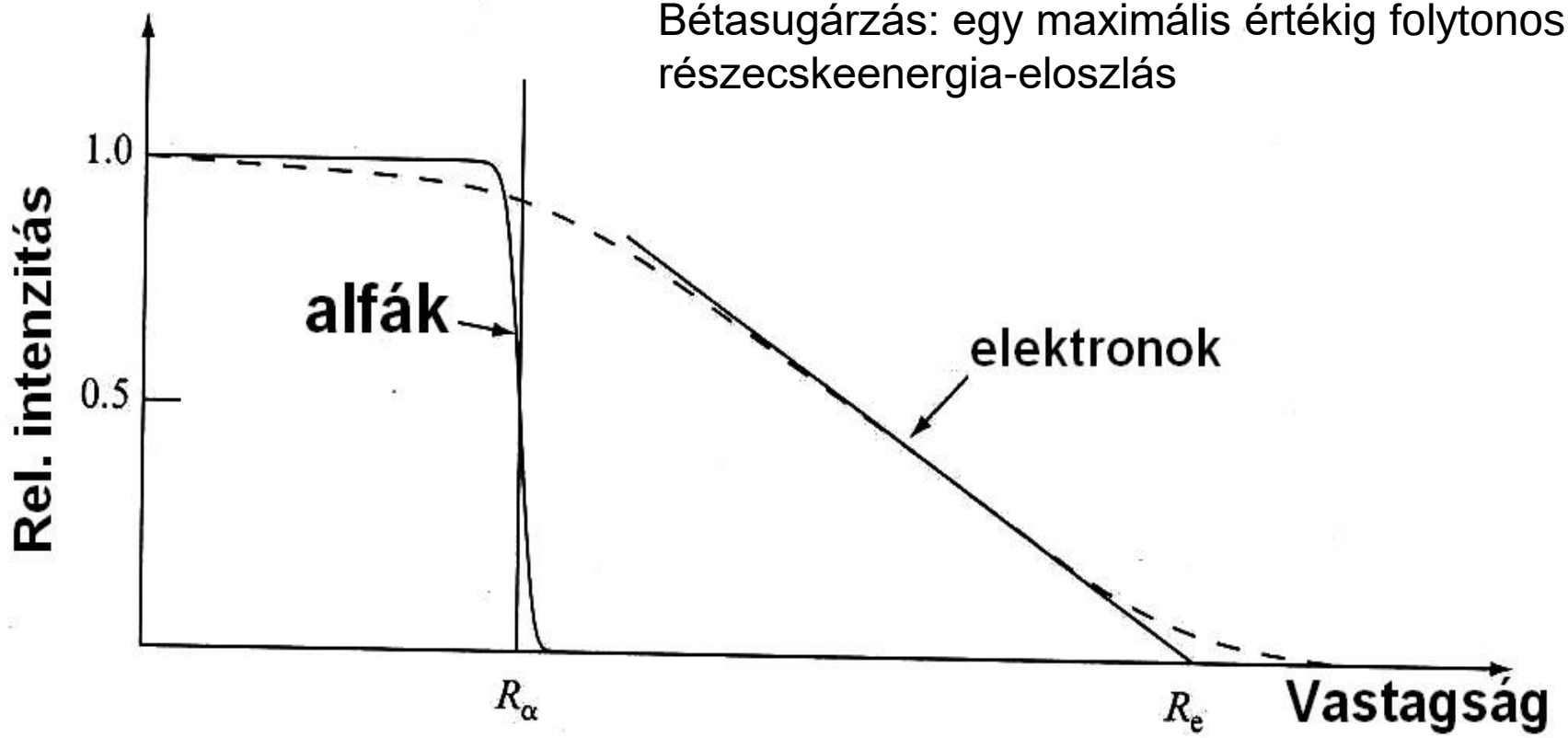
Az ionizáló sugárzások jellemző mennyiségei:

- 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

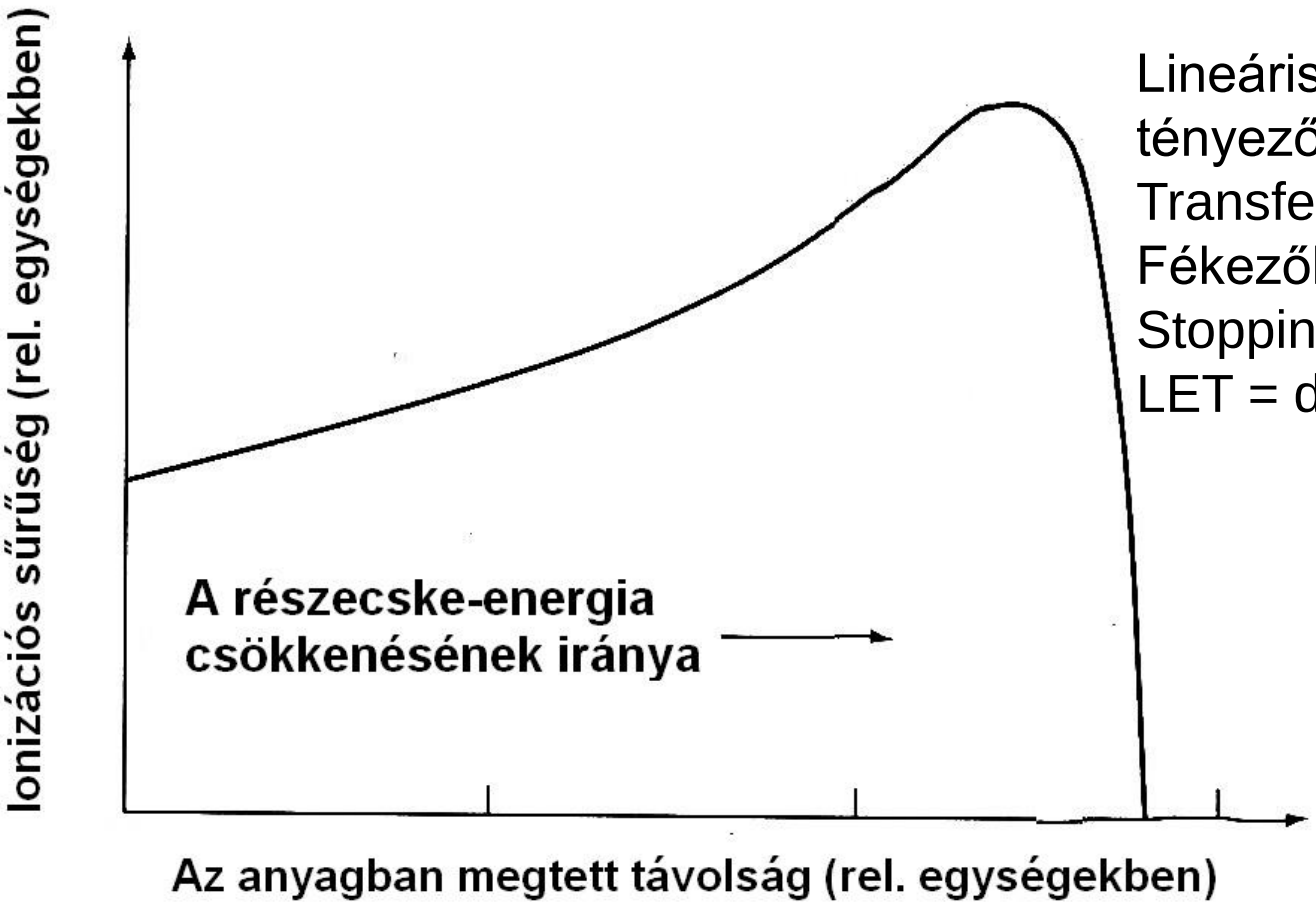
Alfa- és bétasugárzás elnyelődése és szórása az anyagban

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.

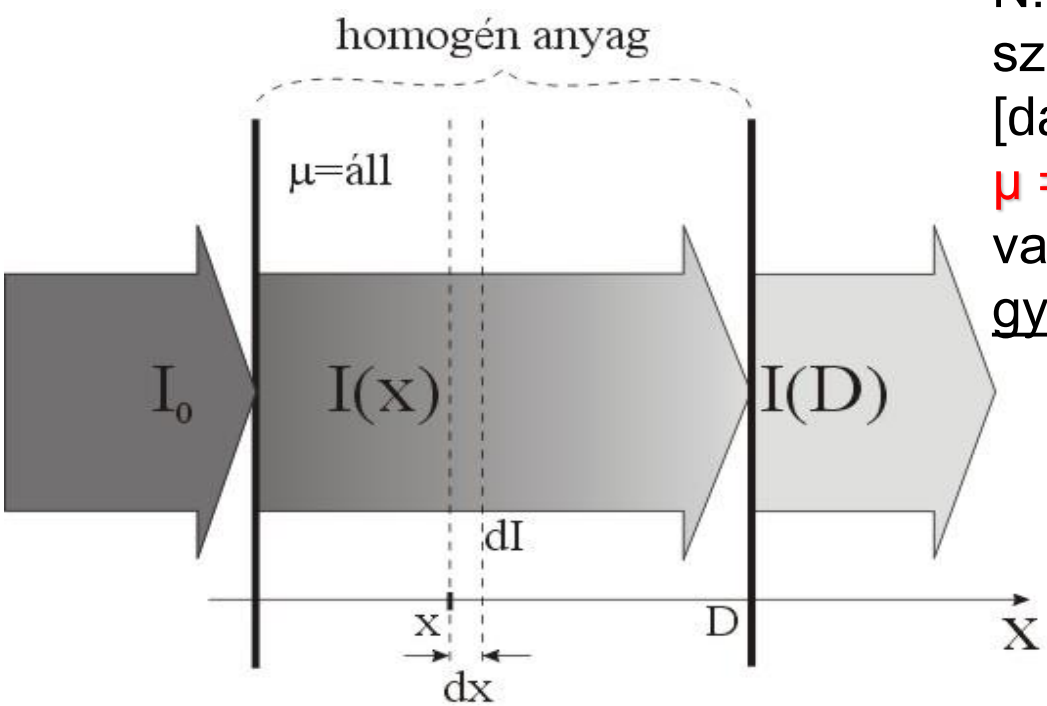
Az energiát átvett elektronok kinetikus energiája:

- 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)

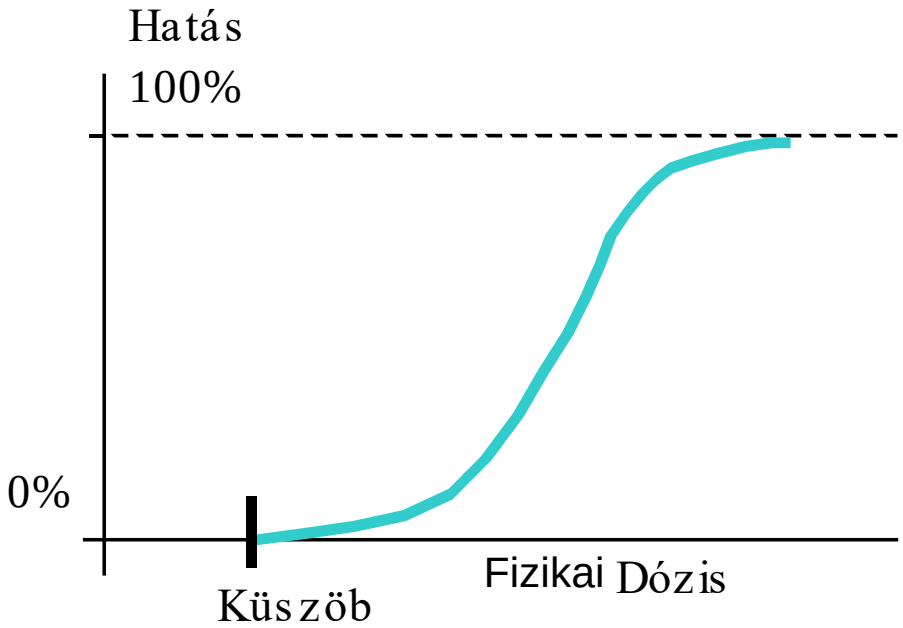
Az egyenérték dózis a sejti hatást jellemzi – de a sejtekre (és ezáltal a szövetekre) többféle hatást fejthet ki a sugárzás.

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

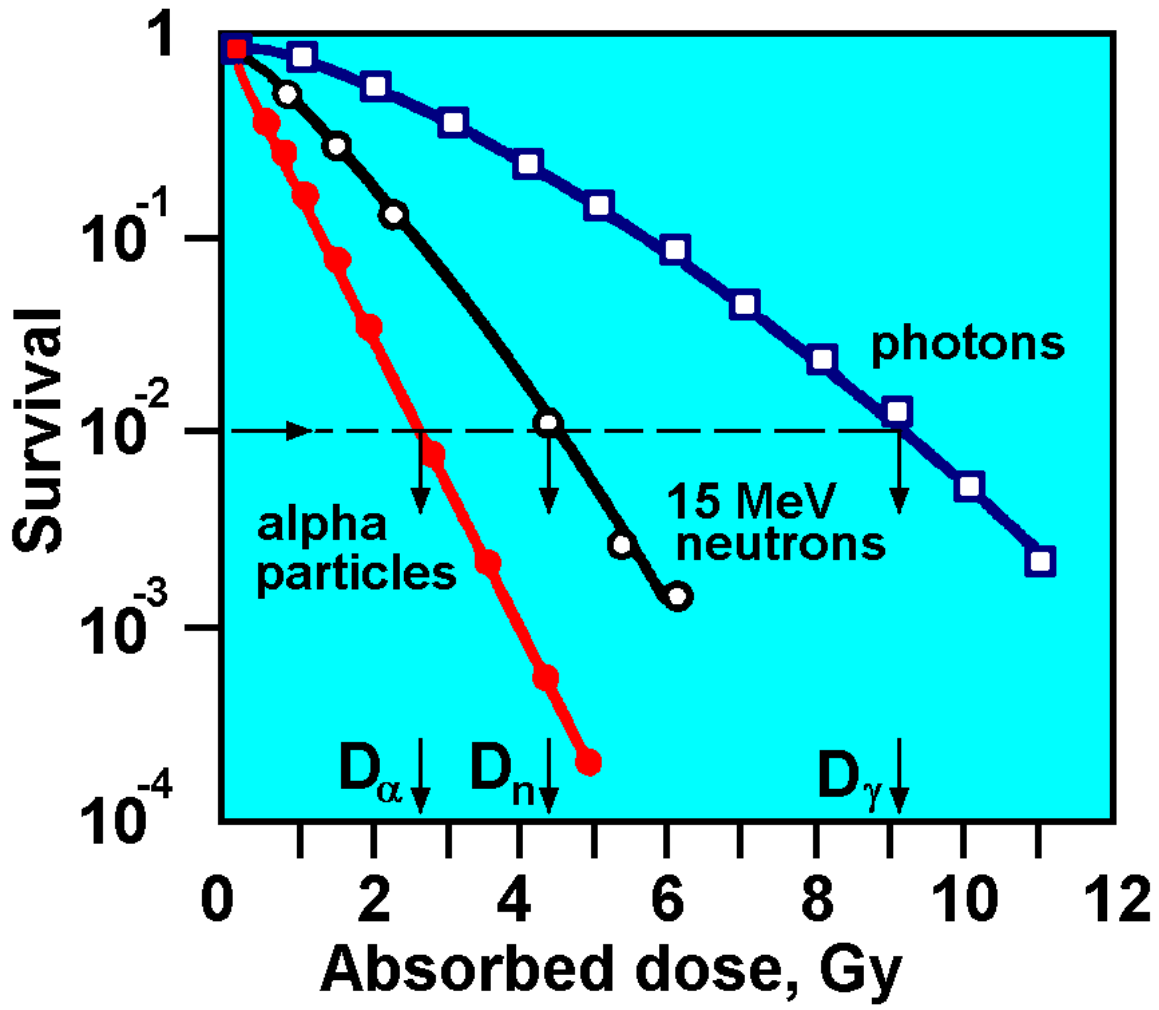
RBE: relative biological effectiveness = relatív biológiai egyenérték (nekrózist okozó képesség) – egyaránt függ a sugárzásfajtától és az expozíció körülményeitől!

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.

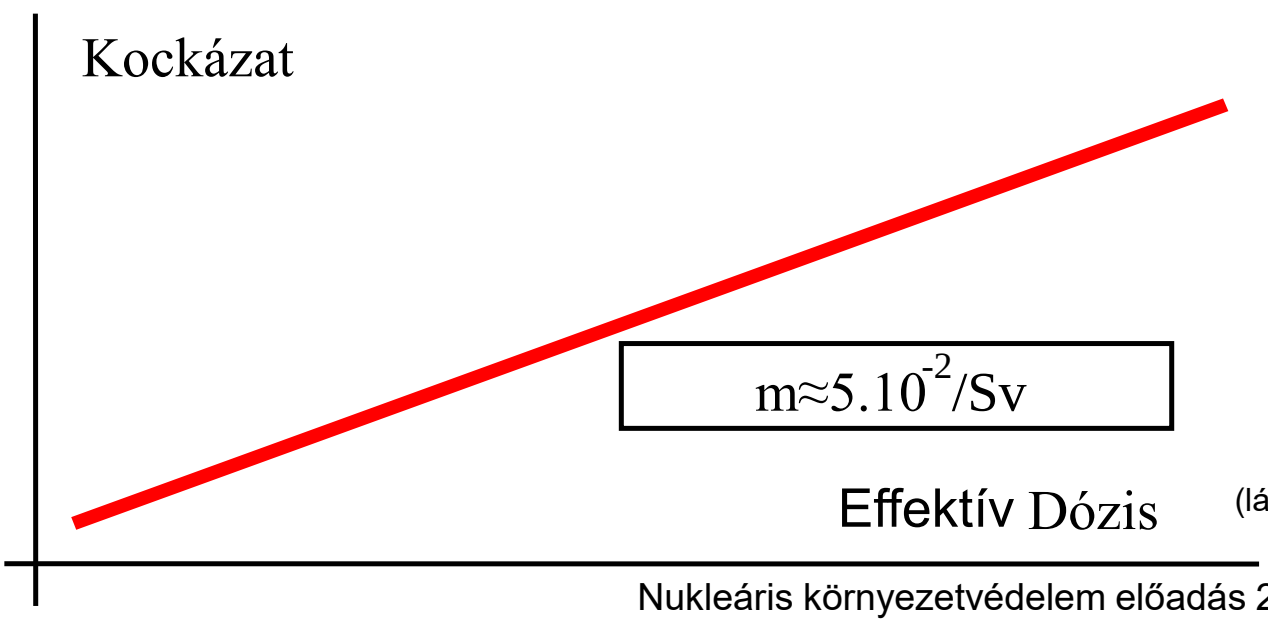
A testi sejtekben átlagosan $0{,}77.10^{-9}$ DNS-mutáció keletkezik (manifesztálódik) osztódásonként és bázispáronként, természetes okokból. Az emberi genom átlagos hossza $6{,}4.10^{+9}$ bázispár, így minden osztódásnál hozzávetőlegesen öt mutáció keletkezik; a „mesterséges" hatások ezt még megnövelhetik.

(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

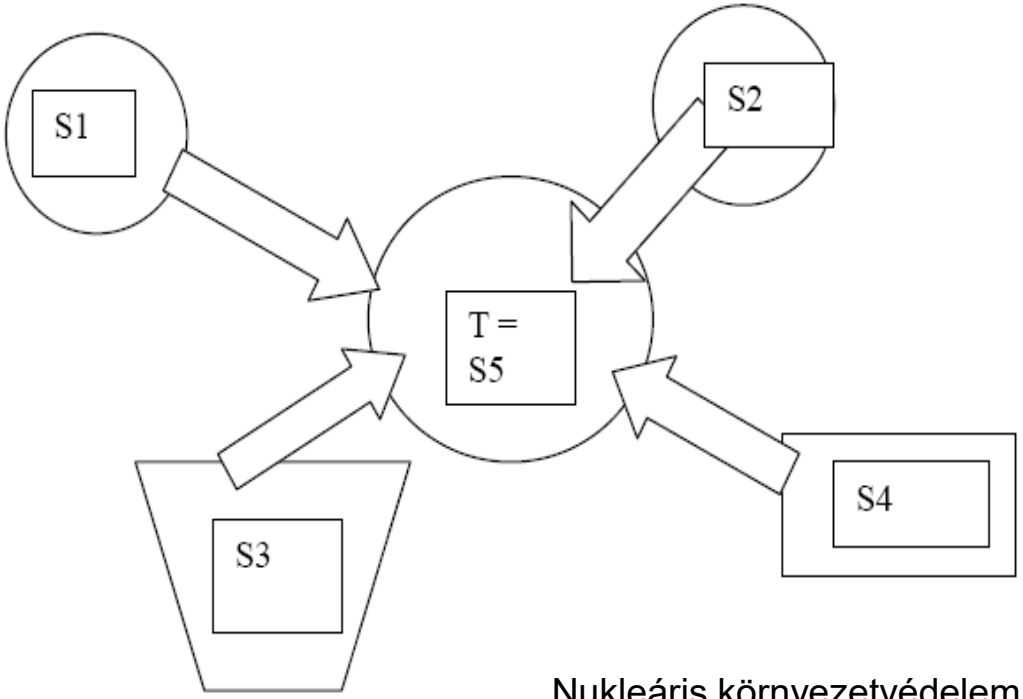
- TLD - Panasonic UD802AT
- Igazgatás szolgáltatási díj = **2630** Ft/személy/időszak 4/2016 (III. 5.) NFM rendelet

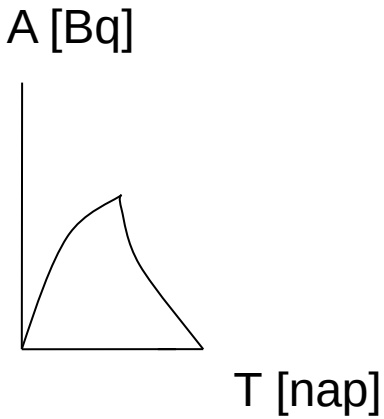
•4 db szűrő / 4 db TL-detektor:
14 mg/cm^2 műanyag / $Li_2B_4O_7$:Cu (β, γ)
160 mg/cm^2 műanyag / $Li_2B_4O_7$:Cu (β, γ)
160 mg/cm^2 műanyag / $CaSO_4$:Tm (β, γ)
700 mg/cm^2 ólom / $CaSO_4$:Tm (γ)
•E_γ = 10 keV … 10 MeV
•Tartomány = 10 μSv … 10 Sv
•Kimutatási határ = 1,6 μSv (Cs-137)
•Kalibrálás = 1…5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

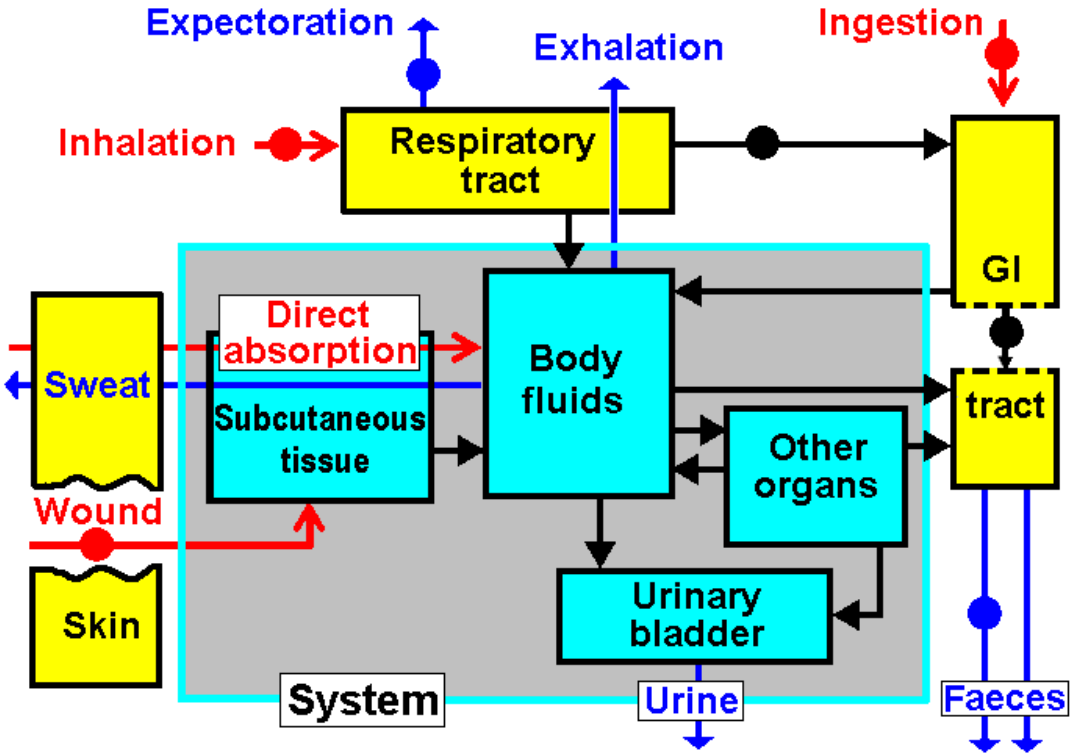




Retenció: a radioaktivitást hordozó anyag tartózkodása egy szövetben. Időfüggő aktivitás – a dózis az integrállal = a bomlások számával lesz arányos.

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.

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

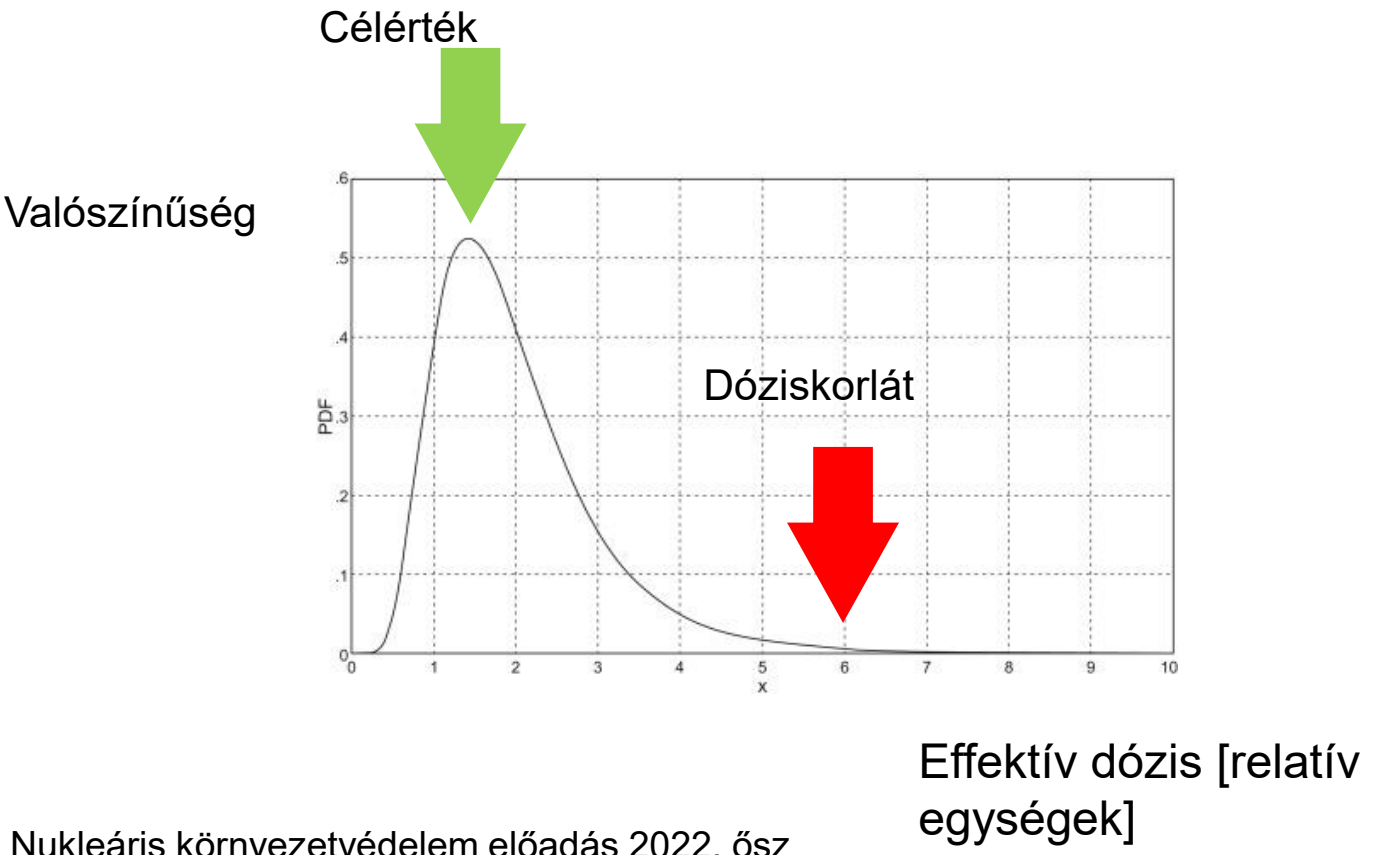
$$DC < DL$$

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

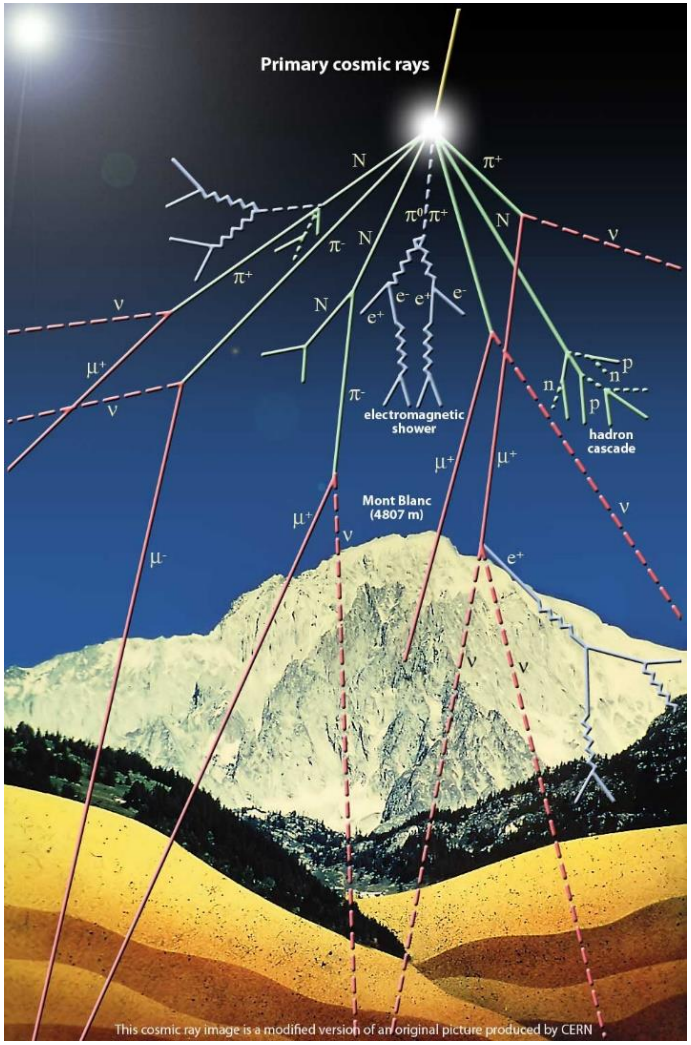
Természetes radioaktivitás összetevői (külső és/vagy belső sugárterhelést is okoznak):

***** 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 <u>vonatkoztatási szintjei</u> levegőben mért éves átlagos aktivitáskoncentráció-értékben kifejezve:

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

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

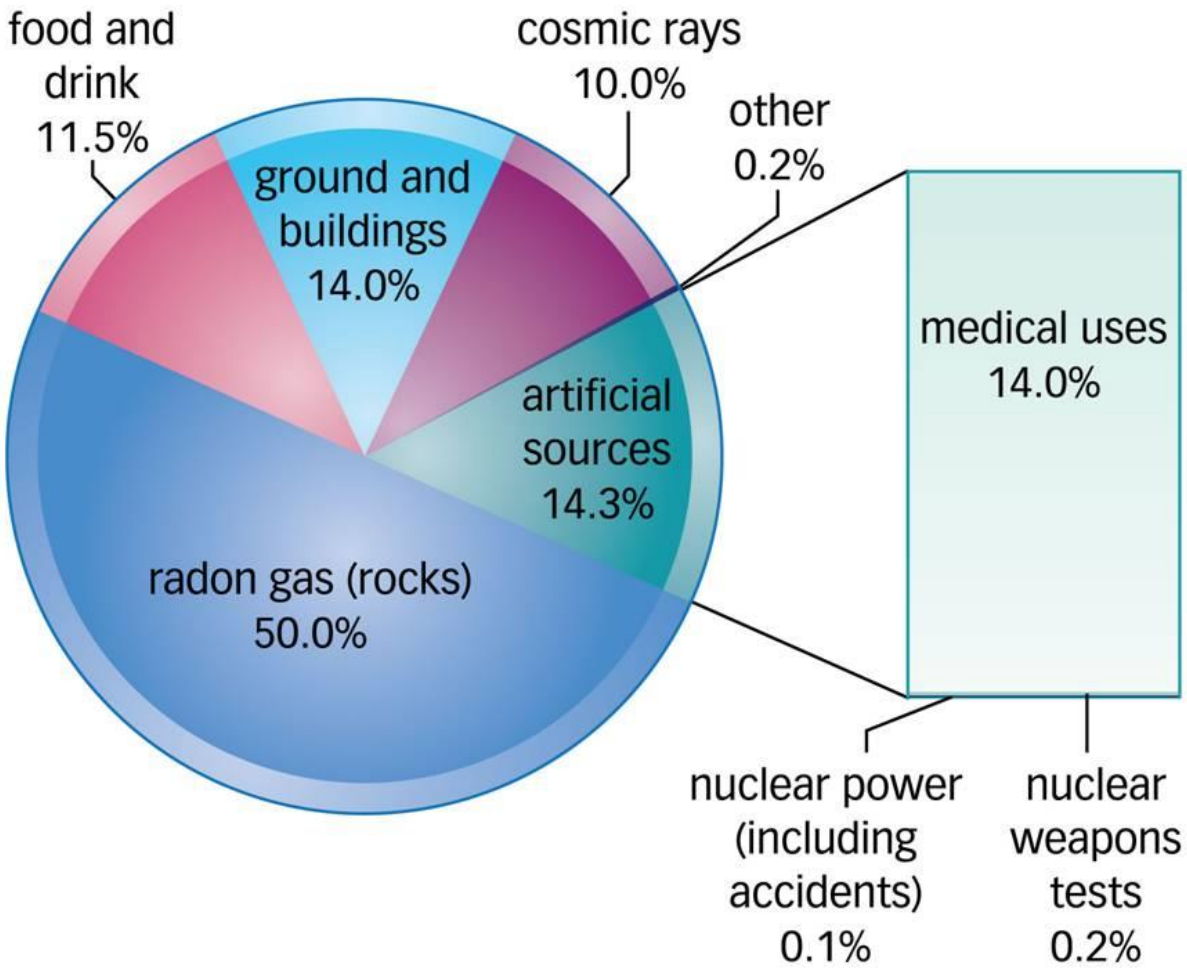
külső sugárterhelés ~ 35 % (kozmikus sugárzás, terresztriális sugárzás a talajból, építőanyagokból)

Rendszeres lakossági = természetes + orvosi **sugárterhelés**

orvosi eredetű sugárterhelés (diagnosztika, terápia):

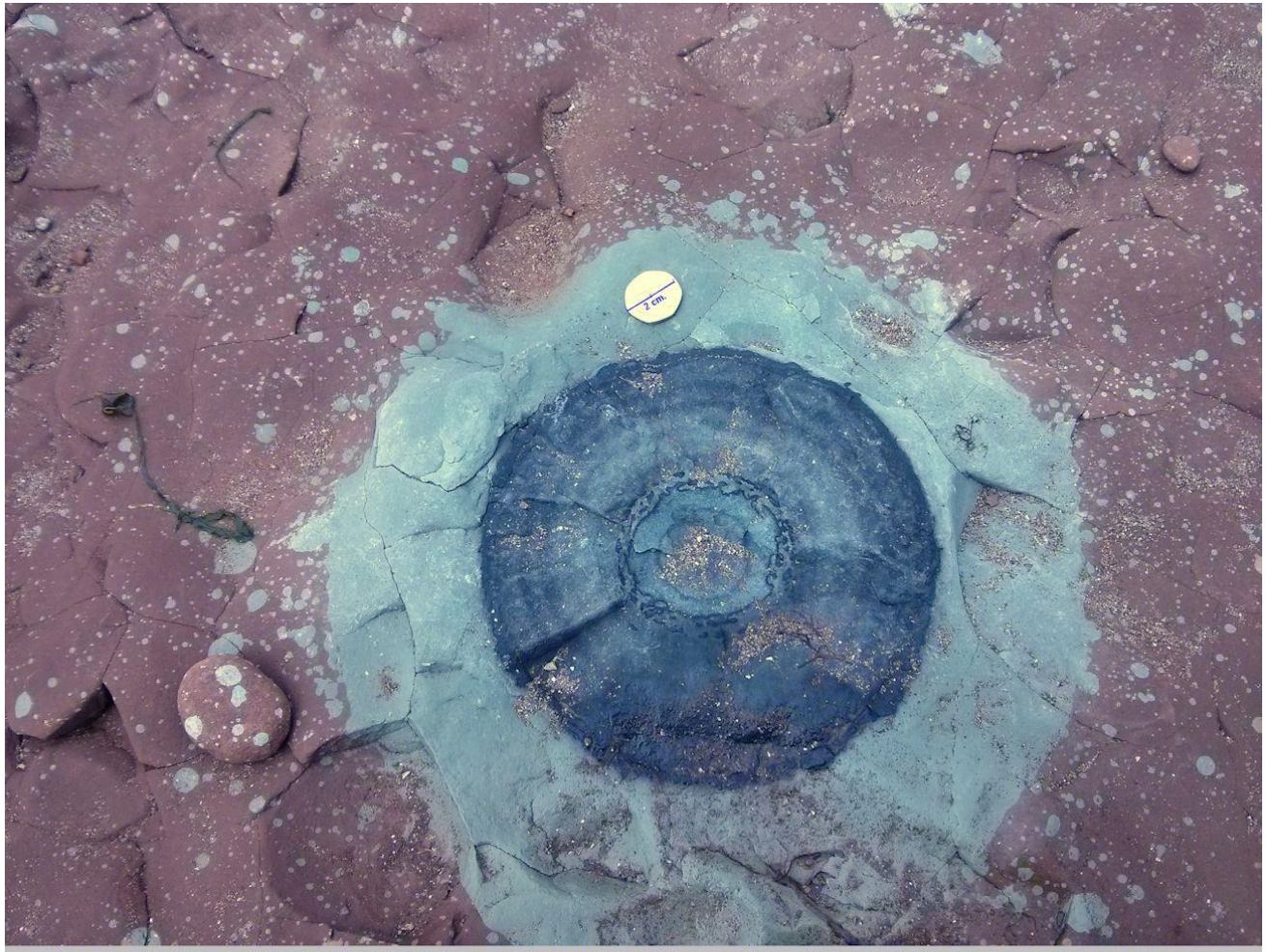
Magyarországon átlagosan 0,5 mSv/év, de évről évre nő (PET-CT diagnosztikai vizsgálatok, röntgen stb.)

Lakossági sugárterhelés – „radiation pie”



Forrás: Public Health England

Természetes sugárzási környezet – Devon, UK

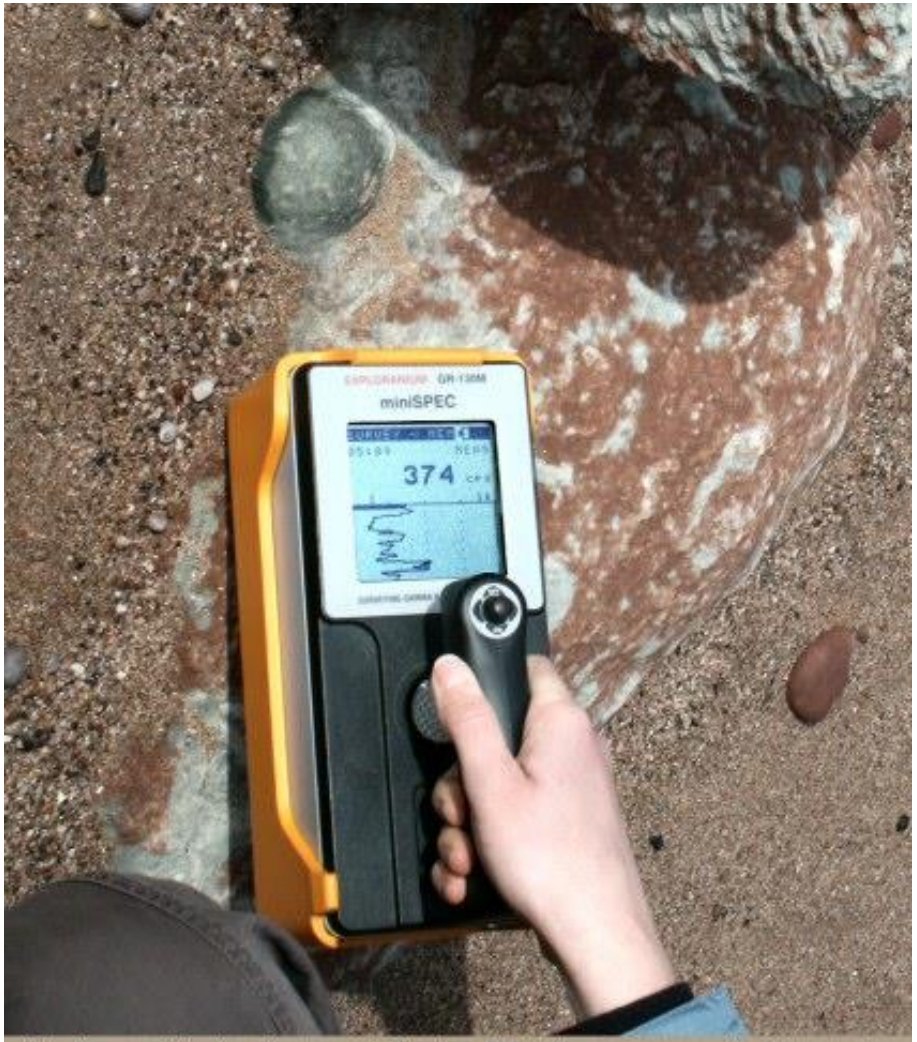


THE INTERNAL, CIRCULAR, CONCENTRIC STRUCTURE OF A RADIOACTIVE VANADIUM-URANIUM NODULE IN THE LITTLEHAM MUDSTONES AT LITTLEHAM COVE, DEVON. This nodule has grown perfectly spherically and concentrically in mudstone that had already been compacted and semi-lithified. The dark nodules do not follow any 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.

Radioaktív hulladékok

Radioaktív hulladékok = Emberi tevékenységhez (általában tervezett, engedélyezett sugárveszélyes munkához) köthető, további felhasználásra nem szánt radioaktív anyagok, melyek radiológiai hatásával szemben védelmi intézkedések szükségesek. A radioaktív hulladék gyakran más engedélyeshez, az üzemi területen kívülre kerül, és ott átmenetileg vagy véglegesen elhelyezik.

A radioaktív hulladékok fő típusai keletkezésük módja szerint:

– Folyamatosan keletkező, egy ideig az üzem területén tárolt hulladék - kezelésük üzemeltetési feladat, hatásukat a dózismegszorítás részeként veszik tekintetbe.
– Leszerelési hulladék (költségviselő: Magyarországon önálló állami alap – KNPA, dózismegszorítás a munkákra: új engedélyezési folyamatban állapítják meg)
– Baleseti helyzetből vagy korábbi időből, más szabályozási helyzetből származó „örökölt” hulladék (legacy waste) - kezelésük egyedi, lakossági dózisukra vonatkoztatási szintet állapítanak meg.

A folyamatos (légnemű és folyékony) üzemi kibocsátás kezelése üzemeltetési feladat, mennyiségük minimalizálása része az optimálásnak, hatásukat a dózismegszorítás részeként veszik tekintetbe – ezek jogi, szabályozási értelemben nem tekinthetők radioaktív hulladéknak.

A radioaktív hulladékok forrásai

- Nukleáris energiát termelő reaktorok hulladékai

  - hasadási termékek különböző illékonysággal (pl. ^{131}I, ^{137}Cs, ^{90}Sr)

  - fűtőelem anyagából aktivációs termékek (pl. ^{239}Pu),

  - szerkezeti anyagok neutronaktivációs termékei (fémes szerelvények: „korróziós” termékek: pl.^{60}Co stb.; „biológiai védelem” = beton: pl. ^{41}Ca)

  - a hűtőközeg (könnyűvíz, nehézvíz stb.) aktivációs termékei

  a reaktor védőburkolata a **konténment,** még súlyos baleset esetén is nagyrészt ezen belül maradnak a radioaktív anyagok
- Egyéb nukleáris létesítmények (pl. kutatóreaktor) hulladékai
- Nukleáris robbantások, fegyverkísérletek hulladékai
- Ipari sugárforrások (előállításuk, felhasználásuk hoz létre hulladékot)
- Orvosi (diagnosztikai és terápiás) sugárforrások (-”-)
- „TENORM”: mesterséges okból megnövekedett, de természetes radioaktivitástól származó anyagok - radioaktív hulladékok lehetnek, ha hulladékok és meghaladják a mentességi vagy felszabadítási szintet (lásd a következő diát a hulladékok osztályozásáról)

  * szén-, olaj- és gáztüzelés (vezetékek, salak, hamu, pernye)

  * bányászati hulladékok (a kőzetek urán- és tóriumtartalmától, ide tartoznak az uránbányák meddőhányói is)

  * egyéb (műtrágyagyártás stb.)

Radioaktív hulladékok besorolása Magyarországon

$$S = \sum_i \frac{c_i}{VAK_i}$$

VAK: vonatkoztatási aktivitás-koncentráció = kis mennyiségnél a mentességi szint (specifikus mentességi szint, SMEAK; 1 t felett a felszabadítási szint (általános mentességi szint, ÁMEAK) [Bq/g]
Csoportosítás a lehetséges maximális dóziskövetkezmény alapján
c: aktivitás-koncentráció [Bq/g]
i: a <u>hulladékcsomag</u> minden komponense → elemzés szükséges!

S: Hulladékindex (veszélyességi index), gyakran WI-ként jelölik

Kisaktivitású hulladék (LLW)	$1 < S < 1000$
ezen belül: nagyon kis akt. h. (VLLW)	$1 < S < 50$ (elhelyezés egyszerűbb)
Közepes akt. h. (ILW)	$10^3 < S < 10^6$
Nagy akt. h. (HLW)	$S > 10^6$, hőtermelés > 2 kW/m^3

<u>Felszabadítás</u>: egy korábban radioaktív anyag inaktív hulladékként kezelhető vagy újra hasznosítható, ha S<1

Mentesség ≈ Felszabadítás ??? (SMEAK és ÁMEAK)

hasonlóság: kapcsolat az elhanyagolható dózissal (10 μSv/év)
eltérés: expozíciós forgatókönyvek – az értékek eltérők!
közös sajátosság: a számítás kiindulási pontja a környezetbe jutás helye, nem egy szennyezetté váló környezeti pont!

Előzetes mentesítés sugárforrásokra [Bq] alkalmazható.

Radioaktív hulladék menedzsment

Fő elemek:

- Gyűjtés
- Osztályozás, minősítés
- Tárolás, szállítás
- Térfogatcsökkentés (a „kezelés” = waste processing része)
- Kondicionálás (a „kezelés” = waste processing része)
- Osztályozás II.
- Átmeneti és/vagy végleges elhelyezés (= waste disposal)

Menedzsment = kezelés (feldolgozás) és elhelyezés, valamint a hatósági rendszer és finanszírozás együttesen

Reprocesszálás: a kiégett reaktor-fűtőelemek nem tekinthetők hulladéknak, mert feldolgozhatók, de így hulladék is keletkezik

Alternatív, de ipari méretben jelenleg nem létező megoldás: hosszú felezési idejű hulladék-komponensek transzmutációja.

Radioaktív hulladékok feldolgozása

Gyűjtés, osztályozás, minősítés

Fő szempont: a hulladékindex értéke szerint külön gyűjtendők az eltérő kategóriákba sorolt hulladékok – minőségi és mennyiségi analízis alapján. „Kulcsnuklidok (KN)” (γ-sugárzók, pl. ^{137}Cs) és „nehezen mérhető nuklidok (DTM)” (tisztán α- és β-sugárzók, pl. ^{90}Sr) összekapcsolása: „scaling factor”

Besorolási szempontok: <u>hulladékindex</u>, felezési idő, halmazállapot, ideiglenesen helyben tárolt hulladékoknál: felületi dózisteljesítmény a hulladékcsomagon.

-Kis akt.: $1 \leq dD/dt \leq 300$ μSv/h

-Közepes akt.: $0,3 \leq dD/dt \leq 10$ mSv/h

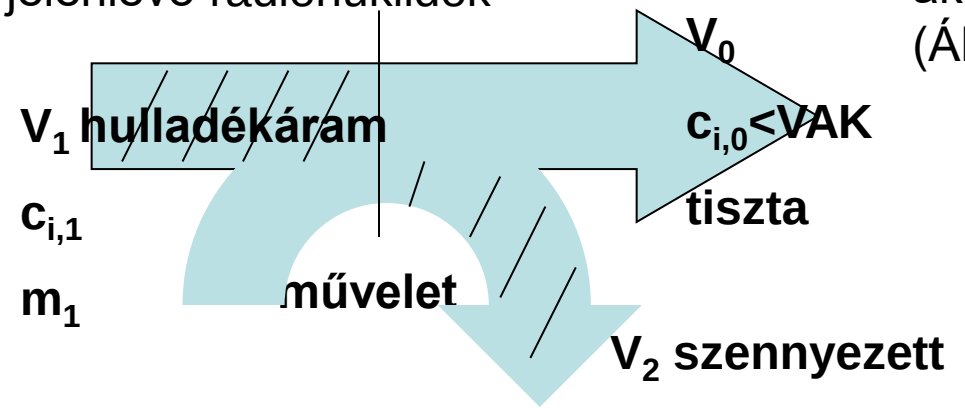
-Nagy akt.: $dD/dt > 10$ mSv/h

Tárolás: a további feldolgozási lépések végrehajtásához szükséges mennyiség összegyűjtése helyi védett tárolóban

Radioaktív hulladékok kezelése - térfogatcsökkentés

VAK: vonatkoztatási aktivitás-koncentráció (ÁMEAK vagy SMEAK)

i: a hulladékban jelenlévő radionuklidok



A hulladékáram jellemzői

V_1, $c_{i,1}$, m_1: a kiindulási állapotot jellemző térfogat, koncentráció és tömeg

V_2, $c_{i,2}$, m_2: ugyanezek a végállapotban

A tiszta anyag jellemzői

V_0, $c_{i,0}$

Térfogatcsökkentés

- Általános eljárások: préselés, bepárlás, hőkezelés (égetés vagy hőbontás),
- Specifikus (szelektív = egy vagy néhány összetevőre optimált) eljárások: felületi (szorpció), térfogati (extrakció) – szubsztitúciós (ioncsere) vagy addíciós folyamatok egy vagy több, kiemelt jelentőségű összetevőre
- Dekontaminálás: szennyezett felület tisztítása (általános és specifikus is lehet: porszórás illetve oldószeres kezelés)

Mutatók a minősítéshez: térfogatcsökkentési tényező (VR), dekontaminációs tényező (DF)

$$VR = \frac{V_1}{V_2}$$

$$DF_i = \frac{c_{i,1}}{c_{i,0}}$$

Radioaktív hulladékok kezelése - Térfogatcsökkentés

Préselés: „supercompactor” (bal oldali kép: Dounreay, UK)

Kondicionálás

Eljárások:

- Cementezés (szilárd hulladékokhoz; folyadékok: előbb kovafölddel felitatás lehet szükséges) - LLW, ILW-hez használatos – ez a leggyakrabban alkalmazott eljárás.
- Bitumenezés szerves LLW-hez, cementezéssel is kombinálható
- Üvegesítés = vitrifikáció - főként HLW-hez.
- Fémhulladék olvasztása (fémes LLW térfogatcsökkentése és kondicionálása egy közös műveletben – a salakban(oxidok) feldúsulnak egyes szennyezők, ezáltal tisztul a fém)

Cél a hulladékot olyan egységes mátrixba építeni, amelyben nincsenek fázishatárok, zárványok, és elviseli a hő- és sugárterhelést.

Mutatók a minősítéshez: kimoshatóság (standard méretű felületről kioldódó anyaghányad), mechanikai szilárdság, hő- és sugárállóság. A radioaktív anyag viselkedését befolyásolja, hogy van-e jelen vele azonosan viselkedő inaktív hordozó.

Radioaktív hulladékok kondicionálása cementezéssel

Keverék = cement + hulladék + víz + adalékok

Portlandcement = 75-80% mészkő és 20-25% agyag zsugorodásig történt kiégetésével (kalcinálás, >1400 ^{o}C) előállított *klinker* + kötéslassító (néhány százalék) *gipszkő*. További cementadalékok: lösz, pernye, kohósalak, homok, trasz = őrölt vulkáni tufa, szerpentin = hidratált magnézium-szilikát (A betont = cement + kavics + adalékok Pakson is alkalmazzák a biológiai védelem anyagaként – de hulladékmátrixnak a beton alkalmatlan.)

Kémiai alkotórészek: SiO_2, Al_2O_3, CaO, FeO stb.

Szilárdulás = Hidratáció (kristályosodás víz felvételével)

Klinker + Víz → Hidrátok + Mész

Kalcium-alumínium-szilikátok átalakulnak Ca-Al-szilikát-hidrátokká és kalcium-hidroxiddá. A szilárdulás során utóbbi a levegővel érintkezve (a felületen) kalcium-karbonáttá alakul.

A kötéshez felhasznált víz is lehet radioaktív hulladék, pl. ^{3}H-tartalommal

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

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

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

Radioaktív hulladékok feldolgozása – Osztályozás II.

- A hulladékcsomag megbontása nélkül is pontosan mérhető kulcsnuklidok analízise;
- A nehezen mérhető nuklidok aktivitáskoncentrációjának becslése a korábban megállapított arányosságok (*scaling factor*) alapján;
- Cél: a hulladékleltár pontos ismerete a hozzáférhetőség megszűnése után is, végleges osztályba sorolás (VLLW, LLW, ILW, HLW)

Radioaktív hulladékok tárolása és elhelyezése

- Tárolás (storage): a hulladékot elkülönítetten, de még az „üzem” (= a sugárzó anyag alkalmazásának engedélyese) ellenőrzött területén tárolják;
- Elhelyezés (disposal) (átmeneti vagy végleges; lerakás): a hulladékot erre a célra szolgáló külön létesítményben, külön engedély alapján helyezik el. Mélységi és felszínközeli tárolók: besorolás a használatba vonható talajvízrétegek elhelyezkedéséhez képest

Kép forrása: https://www.drct.com/Decay_Drums.html

Radioaktív hulladékok elhelyezése

Engedélyezési feltételek: *<u>többszörös műszaki gátak</u>* és *<u>mélységi védelem</u>* igazolt fennállása

Műszaki gátak (multiple engineered barriers): épített és/vagy vegyi eljárásokkal kialakított rendszerek a víz és a benne oldott anyagok terjedésének megakadályozására (kondicionált hulladék, tárolóedény, térkitöltő cement, beton, bentonit, geopolimer stb., befogadó kőzet)

Mélységi védelem (defence-in-depth) elve: az egyik gát sérülése (ami a radioaktív anyagok környezetbe jutását elősegítheti) nem ronthatja a többi gát védelmi képességét

Radioaktív hulladékok elhelyezése

- Átmeneti elhelyezés: telephelyen belül vagy önálló felszíni telephelyen (Paks KKÁT) – nedves vagy száraz tárolás 50 – 100 évig – kiégett fűtőelemekre; Üzemeltető/engedélyes: RHK Kft.
- Végleges elhelyezés:
  - VLLW: nemrég meghatározott hulladék-kategória, várhatóan PAE leszerelési hulladékaihoz; tervezett lerakóhely még nincs kiválasztva
  - LLW – ILW: felszínközeli vagy mélységi lerakóhelyre (Püspökszilágy, Bátaapáti – RHK kft.)
  - HLW: tervezett mélységi lerakóhelyre (Boda – BAF)
- Nyílt üzemanyagciklus: a kiégett fűtőelemet HLW-ként eltemetik
- Zárt üzemanyagciklus: reprocesszálás, 4. generációs atomerőművek, transzmutáció

Radioaktív hulladékok Magyarországon

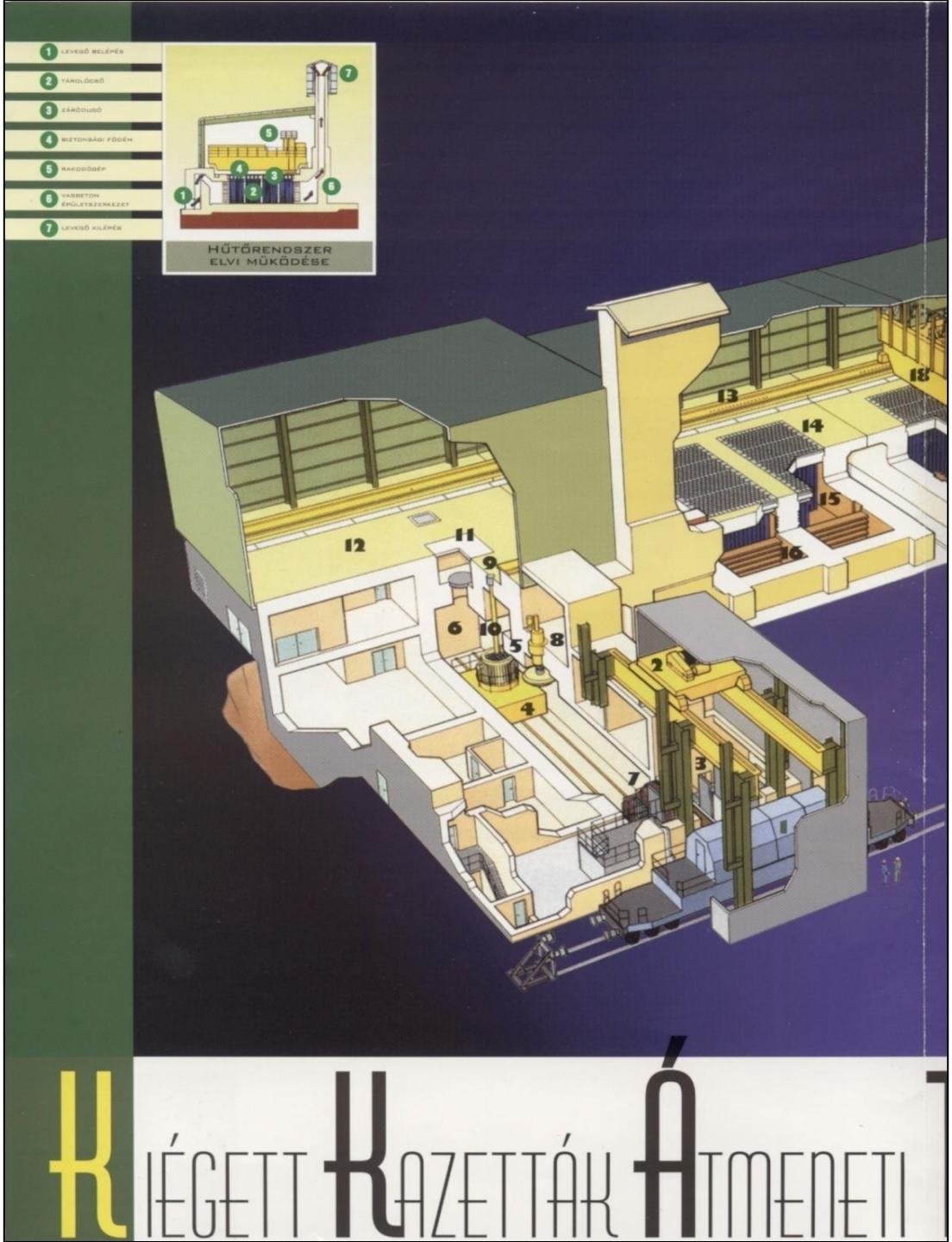
Kiemelt létesítmények: a radioaktív hulladékok nagy része ezekben keletkezik/keletkezhet

- Paksi Atomerőmű (4 blokk)
- Budapesti Kutatóreaktor (Budapest, KFKI telephely)
- Egyetemi Oktatóreaktor (BME)
- Kiégett Kazetták Átmeneti Tárolója (Paks)
- Izotóp Intézet kft. „A” szintű radioizotóp-laboratóriuma (Budapest, KFKI telephely)

A Paksi Atomerőmű jelenlegi négy blokkja (Paks I)

Paks – Kiégett Kazetták Átmeneti Tárolója (KKÁT)

Forrás: RHK



Száraz, aknás tárolórendszer
Modular Vault Dry Storage = MVDS
<u>Természetes hőáramlás</u> a padozatba süllyesztett, többszörösen szigetelt tárolókazetták között; felső szint: kazettaszállító-rendszer; meleg levegőt kivezető kémény
Egymáshoz illeszkedő elemek: bővíthetőség

„Passzív” biztonsági rendszer: a működtetéshez nem szükséges külső energiaforrás, melynek elvesztése balesethez vezetne. A léghűtést a természetes konvekció tartja fenn.

Radoaktív hulladékok mélységi elhelyezése – Bátaapáti (Csak paksi eredetű kis- és közepes aktivitású hulladékhoz – LLW, ILW)
Gránitban, két lejtős aknán elérhető 300 m mély keresztvágatokban

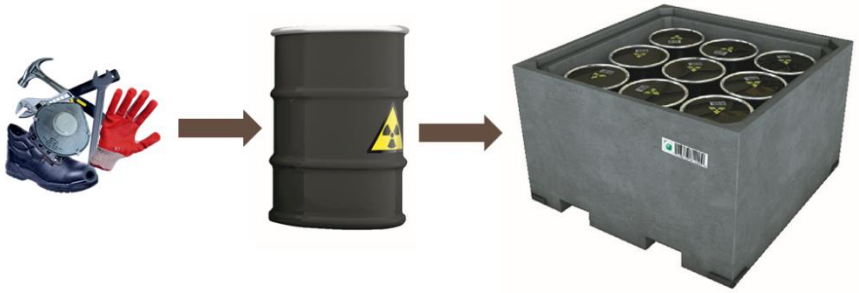
Mélységi elhelyezés – Bátaapáti (LLW, ILW) „Mária” lejtősakna bejárata a vágathajtás alatt

Bátaapáti NRHT modellje

Tároló vágatok
a „friss” gránitban (egy korábbi terv szerint, a megvalósítás ettől különböző alakzatban történt)
A létesítmény jövőbeli lezárása: tömedékelés, betonozás

Bátaapáti NRHT

Első tárolótér üzembehelyezése: 2012. XII. 11.



Forrás: RHK

Bátaapáti NRHT - hulladékelhelyezés

- 2012-2017: 1-1 vasbeton konténerben 9 acélhordó, a hordók közti teret cementpéppel töltötték ki.
- 2018-: 100×8×6,5 m-es vasbetonmedence, benne acél konténerek 4-4 hordóval, a hordók közti teret folyékony radioaktív hulladékkal kevert cementpéppel töltik ki.

Radioaktív hulladékok elhelyezése

Püspökszilágy RHFT – felszínközeli tároló LLW és ILW elhelyezésére (kapacitás: 5000 m^3) + feldolgozó üzem és átmeneti tároló
Befogadó természeti környezet: agyaglencse (18 – 20 m vastag a tárolónál)

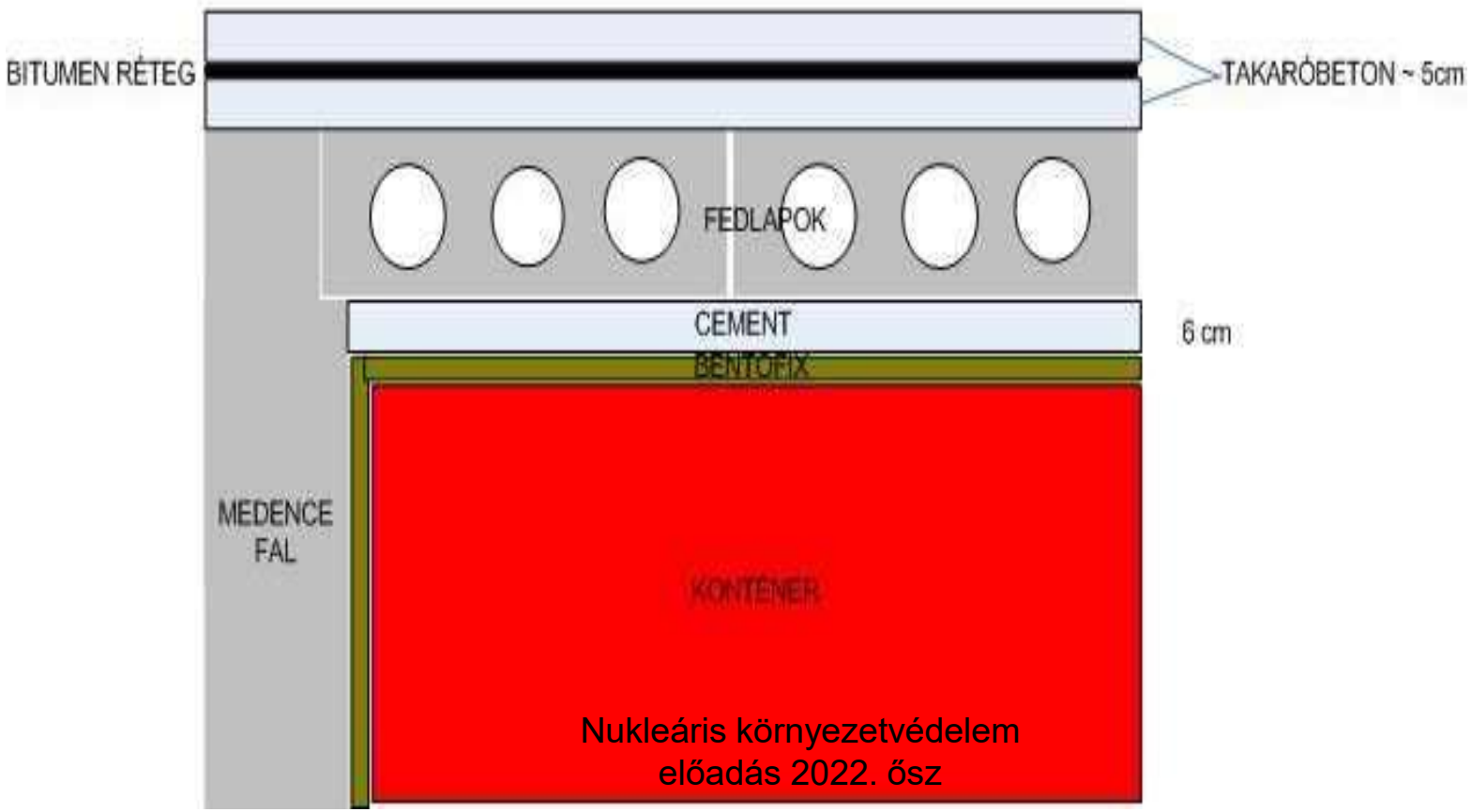
Püspökszilágy – „A” típusú medencék

Nukleáris környezetvédelem
előadás 2022. ősz

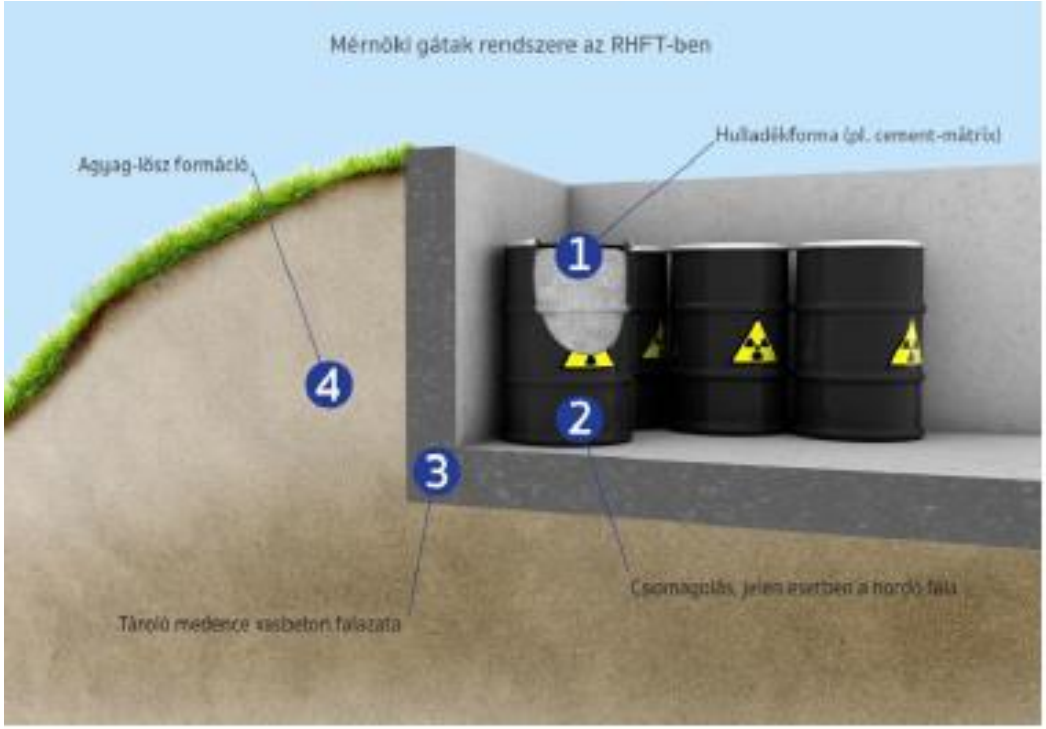
Nukleáris környezetvédelem
előadás 2022. ősz

Radioaktív hulladékok elhelyezése

Püspökszilágy - felszínközeli véglegesnek szánt LLW tároló
Tömörítés után visszatemetett hulladék elhelyezése: 2006 – 2009 (4 medence)
Mérnöki gátak az új lerakó aknákban



RHFT Püspökszilágy



Felülvizsgálat: az elhelyezés változatlan, a mérnöki gátak bővítendők, a tárolt hulladék egy része felszabadítandó, a maradék kisebb térfogatban helyezhető el. (2006 – 2009: „4 medencés” projekt)

Az 1978-ban feltöltött, majd kibontott egyik akna

A műanyag zsákok közé 1978-ban még nem töltöttek kötőanyagot. A folyamatos elszívásra azért volt szükség, mert a feljegyzések szerint a hulladék tríciumot (^3H) is tartalmazott, ami a tárolás alatt víz formába került. Ki-vagy beszivárgásra utaló nyomot nem találtak.

A tömörített, szilárdított hulladékot tartalmazó visszarakott hordók

A hordókban elhelyezett, cementezéssel kondicionált hulladék visszarakását követő technológiai lépésben cementpéppel öntötték ki a hordók közötti teret, majd elvégezték az aknák többrétegű lezárását.

Pécs környéki uránbánya területének helyreállítása = TENORM hulladék elhelyezése

Forrás:
Mecsek-Öko ZRt.

TENORM - Pécs - zagytározók rekultivációja:

Tájrendezés

- Morfológia kialakítása, felületstabilizálás
- Beszivárgást minimalizáló fedés
- Felszíni vízrendezés, vízelvezetés
- Hosszú távú stabilitás biztosítása

Geotechnika és rekultiváció ...

Az iszapmag konszolidációja a vízleengedés után

2

1

3

4

A környezeti közegekben megjelenő radioaktív anyagok meghatározása

- A radioaktív anyagok környezeti terjedését meghatározó fizikai-kémiai folyamatok áttekintése
- Környezeti monitorozás – mérési eljárások, a sugárzási tér természetes és mesterséges eredetű összetevőinek megkülönböztetése, jelzési és beavatkozási szintek alkalmazása

Radioaktív anyagok terjedése a környezetben

Általános terjedési differenciálegyenlet a környezeti közegekben (levegő, víz, talaj és kőzetek):

$$\frac{dc}{dt} = Ad + Df + Re + Pr + S(t) - \lambda c$$

Ad : advekció (hajtóerő: gravitáció és/vagy hidrosztatikai nyomás gradiense) – kényszeráramlás

Df : diffúzió (hajtóerő: kémiai potenciál gradiense) – véletlenszerű elkeveredés

Re : reakció (fizikai és kémiai szorpció, ioncsere stb.) (hajtóerő: kémiai potenciál gradiense) – növeli vagy csökkenti a koncentrációt

Pr : ülepedés (hajtóerő: gravitáció gradiense)

E függvények a helytől és a környezeti közeg állapotától (fizikai, kémiai, biológiai tényezőktől) függő paramétereket tartalmaznak.

Forrástag: S(t) lehet időben állandó vagy változó – folyamatos vagy pillanatszerű kibocsátás

Terjedési egyenletek

Megoldásuk (a differenciálegyenletek integrálásának) célja: a koncentráció (c) idő- és térbeli függésének meghatározása, folyamatos kibocsátásoknál a környezeti közegek között érvényes „állandó” koncentrációarányok számítása érdekében

Advekció, diffúzió és időben változó forrástag radioaktív szennyezésre, reakció és ülepedés nélkül, homogén rendszerben (levegő, nyílt víztestek):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \cdot grad(c) + div(D \cdot grad(c)) + S(t) - \lambda \cdot c$$

Egyetlen irányú advekció, homogén diffúzió; D: diffúziós együttható(k)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u_x \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + D_i \cdot \left(\frac{\partial^2 c}{\partial j^2}_{j=x,y,z} \right) + S(t) - \lambda \cdot c$$

Terjedési = migrációs modellek felhasználása, a számítások validálása

- Homogén rendszerek: levegő, felszíni- és karsztvíz – alapmátrix és benne kis mennyiségű egyéb (oldott, szállított) anyagok
- Heterogén rendszerek: talajvíz és kőzetvíz, biológiai anyagok
- A terjedés során általában a kibocsátás helyétől távolodva hígul a koncentráció, de szorpció (reakció) és ülepedés következtében helyenként jelentős dúsulás is lehetséges
- Terjedési egyenletek inverziója szükséges a létesítmények dózismegszorításából, illetve az elhanyagolható dózisból kiindulva a <u>kibocsátási határértékek</u> megállapításához
- A modellek <u>validálása</u>: Nukleáris és radiológiai balesetek, ismert kibocsátások rekonstruálása: koncentrációk és dózisok (példák: Majak, Windscale, Three Mile Island, Csernobil, Algeciras, Fukushima stb.) [Csernobil becsült magyarországi hatása az első évben 1 – 3 mSv effektív dózis volt]

Környezeti terjedés modellezése

- Homogén környezeti rendszerek: levegő, felszíni- és karsztvizek (folyó, tó, óceán, mesterséges tározók) – térben és időben végbemenő terjedés együttes modellezése
- Heterogén rendszerek: talaj- és kőzetvíz (pórusos szerkezet), ökorendszerek (pl. talaj – növényi részek – állati szervezetek – emberi fogyasztás); gyakori megoldás a térben és időben történő terjedés szétválasztása (térbeli „rekeszek” – compartments – kijelölése, közöttük időfüggő vagy időfüggetlen transzportegyenletek)

A terjedési számítások alkalmazása a sugárvédelemben – a forrástag jellege

<u>Időben állandó forrástag</u>:
folyamatos üzemi kibocsátás esetei:

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

↔ **<u>dózismegszorítás</u>**

<u>Időben változó (pillanatszerű) forrástag</u>:

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

<u>Ismeretlen forrástag:</u>

mesterséges radioaktivitás detektálása a környezetben → eredet felderítése: „back projection” a terjedési modell „invertálása” révén

Forrástag (source term) ≤ Radioizotóp-leltár (inventory)

Terjedési egyenletek megoldása

- Cél: radioaktív anyagok koncentrációja a környezeti közegekben
- A kiterjedt vagy bonyolult szerkezetű (heterogén) közegeket azonos tulajdonságúnak feltételezett részekre oszthatjuk = rekesz = compartment ≈ nódus (csomópont) – ezek között történik a terjedés, változik az aktivitáskoncentráció.
- Közegek közötti állandó koncentrációarányok (CF – concentration factor) vagy időfüggő koncentrációváltozások (SA – system analysis)
- Dózisarányosság:

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

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

Kibocsátás hatása és ellenőrzése

- A kibocsátott radioaktivitás hatása tervezett sugárzási helyzetben a leginkább érintett személyre sem lehet nagyobb, mint a dózismegszorítás. Az ehhez tartozó kibocsátási határértékeket a migráció modellezésével lehet csak = kell meghatározni.
- A határértékek betartásának ellenőrzésére mérni kell a <u>kibocsátott</u> és a <u>környezeti</u> radioaktivitást.
- A <u>monitorozás</u>nál meg kell különböztetni a *természetes* (≈ kizárólag természeti eredetű, emberi tevékenységhez nem köthető) és *mesterséges* (≈ kibocsátott) radioaktivitást.

Nukleáris környezeti monitorozás

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

DL és DC betartásának <u>ellenőrzése</u>:

- Mérés
- Kiértékelés
- Beavatkozás

<u>Irányadó szintek</u> (Guidance levels) szükségesek minden radionuklidra a környezeti közegekben (levegő, víz, talaj stb.) – ezek különböznek a *kibocsátási* (emissziós), illetve a *mentességi és felszabadítási* szintektől, mivel ezek már <u>immissziós</u> (kibocsátott, így a környezetben már jelenlévő = a terjedés során megváltozott, általában hígult) koncentráció értékek

<u>Biztonság</u>: a szint mérhető kell, hogy legyen jóval előbb, *mielőtt* az irányadó szintet túllépnénk. Az irányadó szint túllépése ≠ veszély, csak tisztázandó rendellenesség.

<u>Monitorozás</u>: mintavétel, mérés és kiértékelés szervezett, standard rendszere.

Nukleáris környezeti monitorozás

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

Módszerek:

- Gamma-dózisteljesítmény *folyamatos* mérése – KORAI RIASZTÁS
- Légköri szennyeződés *folyamatos* mérése dúsításos mintavétellel – KORAI RIASZTÁS – aeroszol- és jód*szűrés* (elemi, szerves)
- További mintavételezéses módszerek:

- száraz és nedves légköri kihullás (*szakaszosan*)
- felszíni-, ivó- és talajvíz, (ha nincs légköri kibocsátás, *folyamatos* mérés esetén erre is alapozható korai riasztás)
- talaj- és biológiai minták gyűjtése és értékelése

Magyarország: OKSER (Országos Környezeti Sugárvédelmi Ellenőrző Rendszer) >100, központi rendszerbe csatlakozó mérőállomás különböző üzemeltetőkkel

Nukleáris környezeti monitorozás – magyarországi korai riasztást adó rendszerek

Gamma-dózisteljesítmény - folyamatos és automatizált adatgyűjtés

környezeti dózisteljesítmény (talajszint felett 1 m-re)	: 70 – 170 nSv/h
OKSER figyelmeztetési szint	: 250 nSv/h
OKSER riasztási szint	: 500 nSv/h

Lehetséges források:

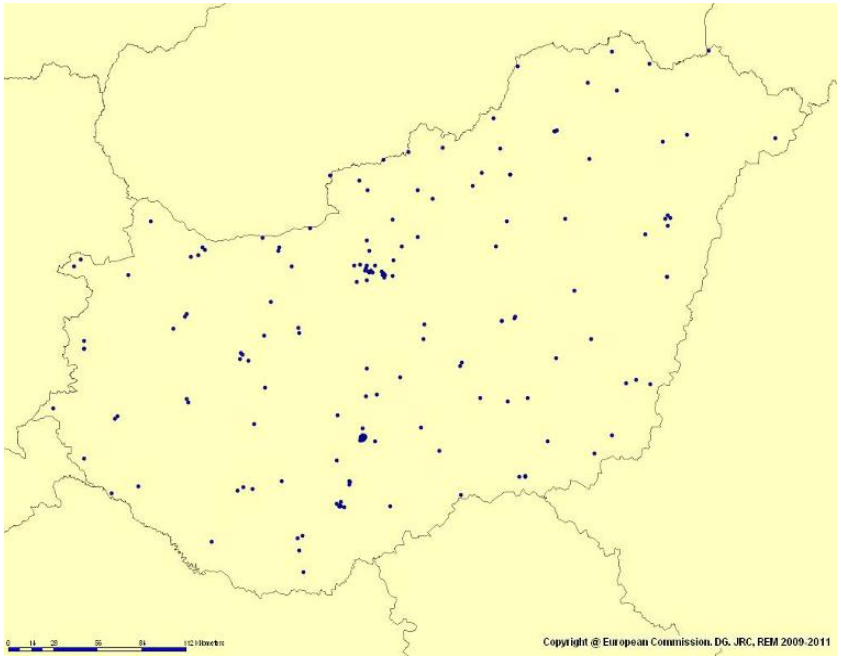
• Természetes radioaktivitás: szintje eltérő a környezetben, általában nem tárgya a szabályozásnak. („kizárás” = kozmikus sugárzás, talajban lévő radioaktivitás)

• TENORM: „technologically enhanced naturally occurring radioactive material” – „alkalmazásnak” tekintendő, szabályozott.

• Mesterséges radioaktivitás: „alkalmazások” kibocsátása, radioaktív hulladékok stb. – szabályozott.

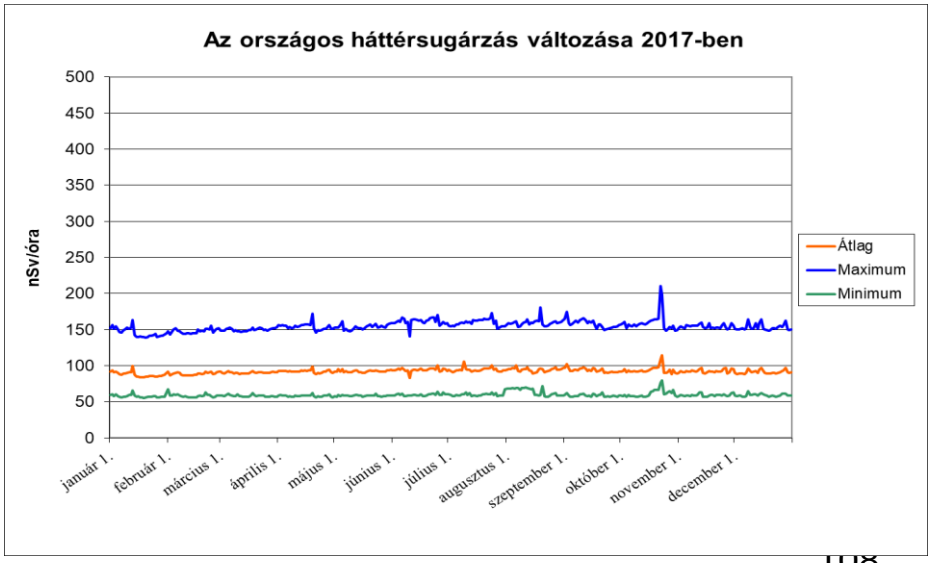
• Berendezések ionizáló sugárzása (pl. röntgen) – kikapcsolható, szabályozott.

Országos Környezeti Sugárvédelmi Ellenőrző Rendszer



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

Hálózati központ: Országos Atomenergia Hivatal (OAH)



Országos Atomenergia Hivatal

Országos Környezeti Sugárvédelmi Ellenőrző Rendszer

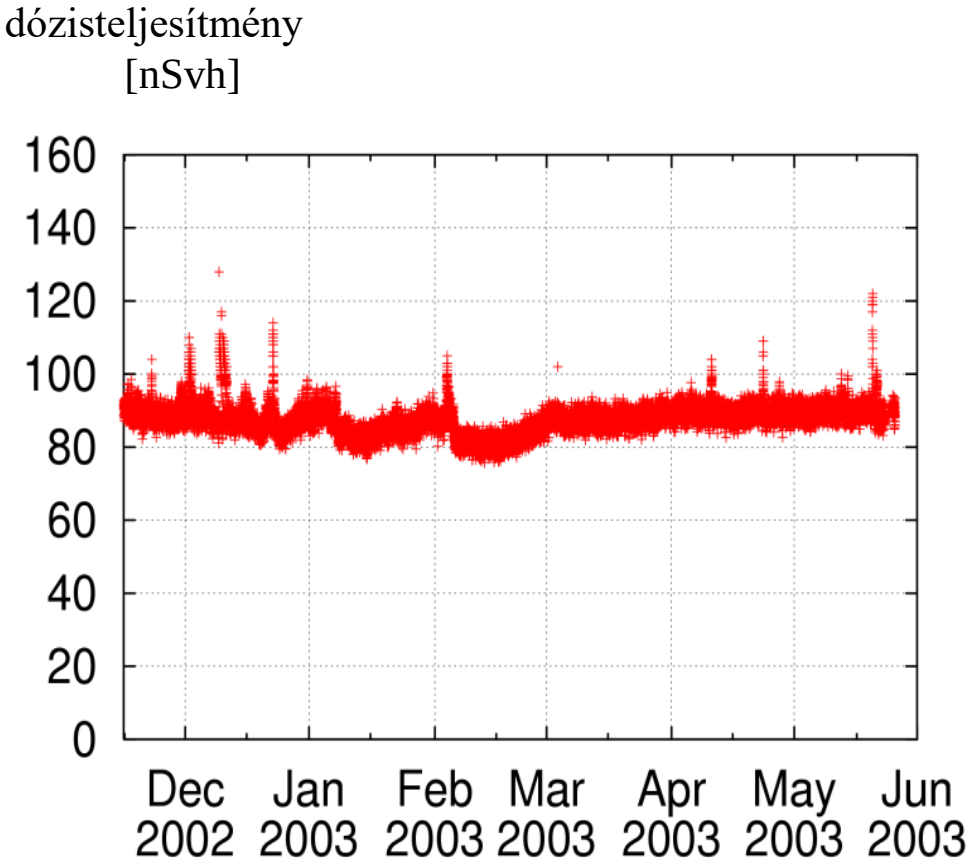
489/2015. (XII. 30.) Korm. rendelet

a lakosság természetes és mesterséges eredetű sugárterhelését meghatározó környezeti sugárzási helyzet ellenőrzési rendjéről és a kötelezően mérendő mennyiségek köréről

A γ-dózisteljesítmény mérése mellett radionuklid-specifikus monitorozást is végeznek egyes OKSER-állomásokon.

	A	B	C
1	**Minta típusa**	**Meghatározandó mennyiség**	**Jelentési szint**
2	Levegő	Összes béta (Sr-90 ekvivalens aktivitáskoncentráció) Cs-137 aktivitáskoncentráció	5 E-03 Bq/m^3 3 E-02 Bq/m^3
3	Felszíni vizek	Maradék béta (Sr-90 izotóp alapján) Cs-137 aktivitáskoncentráció	6 E-01 Bq/l 1 E+00 Bq/l
4	Ivóvíz	H-3 aktivitáskoncentráció Sr-90 aktivitáskoncentráció Cs-137 aktivitáskoncentráció Rn-222	1 E+01 Bq/l 4 E-01 Bq/l 5 E-01 Bq/l 1 E+01 Bq/l
5	Tej	Sr-90 aktivitáskoncentráció Cs-137 aktivitáskoncentráció	2 E-01 Bq/l 5 E-01 Bq/l
6	Vegyes élelmiszer	Sr-90 aktivitáskoncentráció Cs-137 aktivitáskoncentráció	1 E-01 *Bq/d.p (a) 2 E-01 *Bq/d.p (b)

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

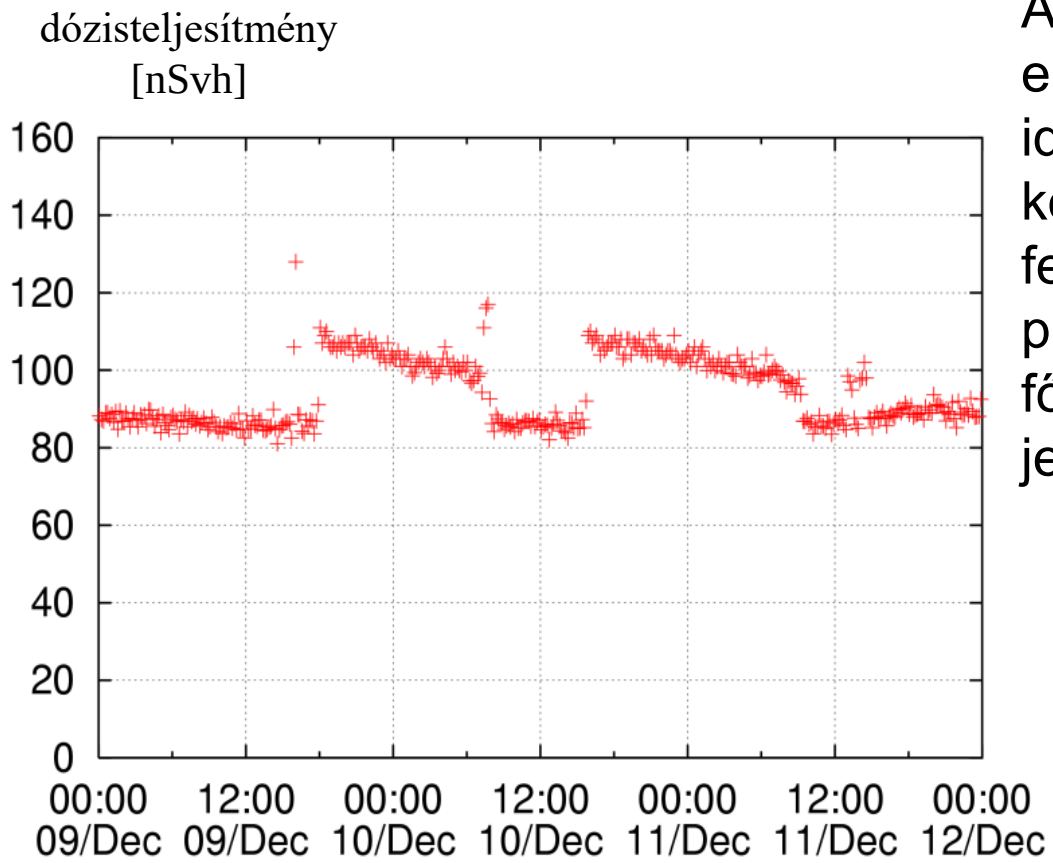


A fél évet mutató felvételen három különböző hatás látható:

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

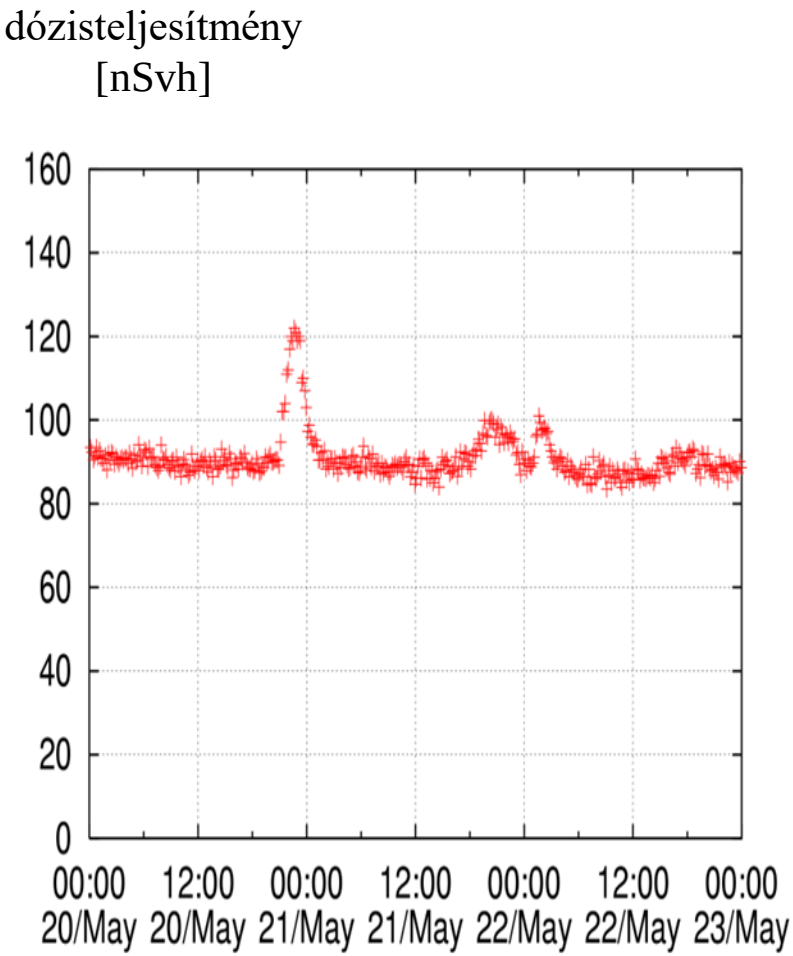
A jelszint nem éri el a figyelmeztetési küszöböt sem. A részletek értékeléséhez szűkebb időbeli felbontás kell.

Az OKSER részeként működő egyetemi állomások
helyi hatások a környezeti dózisteljesítményre



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

Az OKSER részeként működő egyetemi állomások
környezeti csapadékcsúcsok



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

Nukleáris környezeti monitorozás – korai riasztást adó rendszerek

környezeti dózisteljesítmény mérése

Következtetések:

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

Nukleáris környezeti monitorozás – korai riasztást adó rendszerek

légköri mintavételezés és mérés

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

mintavétel: speciális szűrők az alábbi anyagok megkötésére:

- aeroszol,
- atomos/molekuláris jód,
- szerves jódvegyületek

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

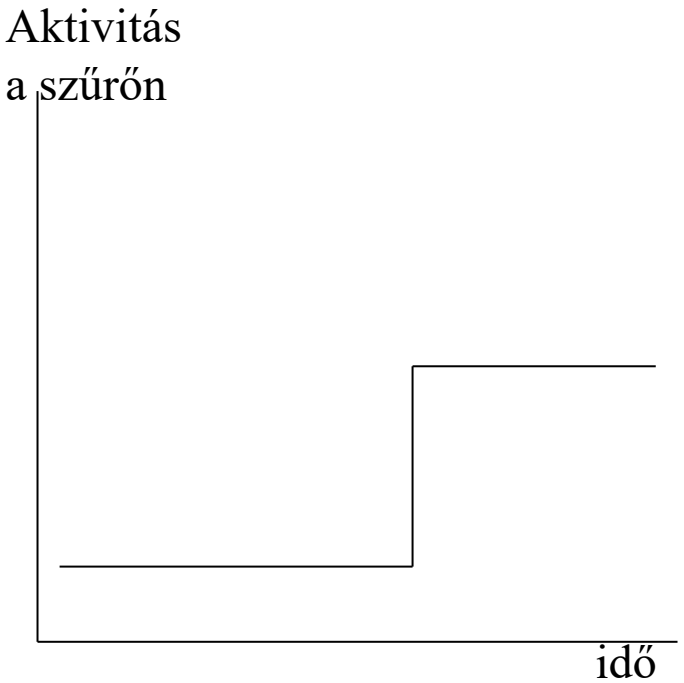
eljárás: folyamatos/automatikus működés, *mozgó*szűrős vagy *álló*szűrős kivitel

Nukleáris környezeti monitorozás

aeroszol és jód mintavételezés és mérés a kibocsátási források közelében

Lokális rendszer egy <u>emissziós</u> forrás köré telepítve

Elméleti szennyezési profil: egységugrás-függvény



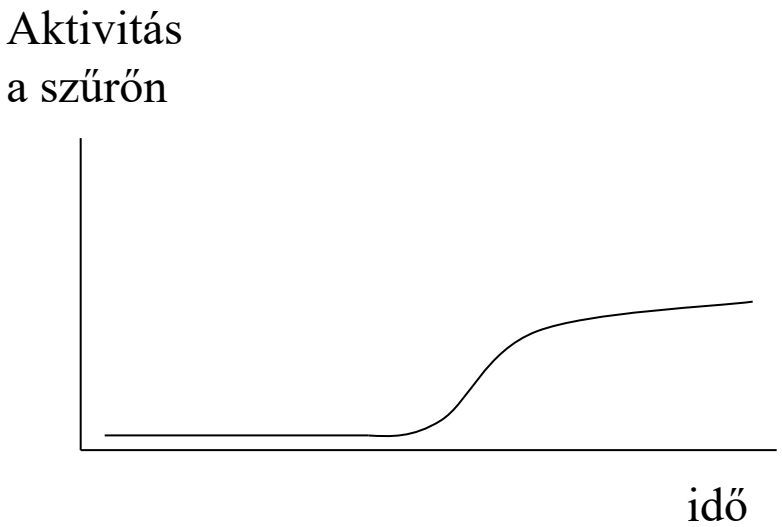
Előnyös módszer: mozgó szűrőszalag (differenciálás)
Nem gyűlhet össze sok aktivitás a szűrőn – de azonnal megjelenik a növekmény, csekély alapvonalon.

Nukleáris környezeti monitorozás

aeroszol mintavételezés és mérés a kibocsátási forrásoktól távol

Regionális rendszer – egyenletesen elosztott állomások - immisszió ellenőrzése

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



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

Nukleáris környezeti monitorozás
környezet-ellenőrzés aeroszol és jód mintavétellel – AMS rendszer

Az állomás <u>vezérlő programja</u> az alábbi feladatokat látja el:

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

Nukleáris környezeti monitorozás - Detektorok válasza

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

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

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

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

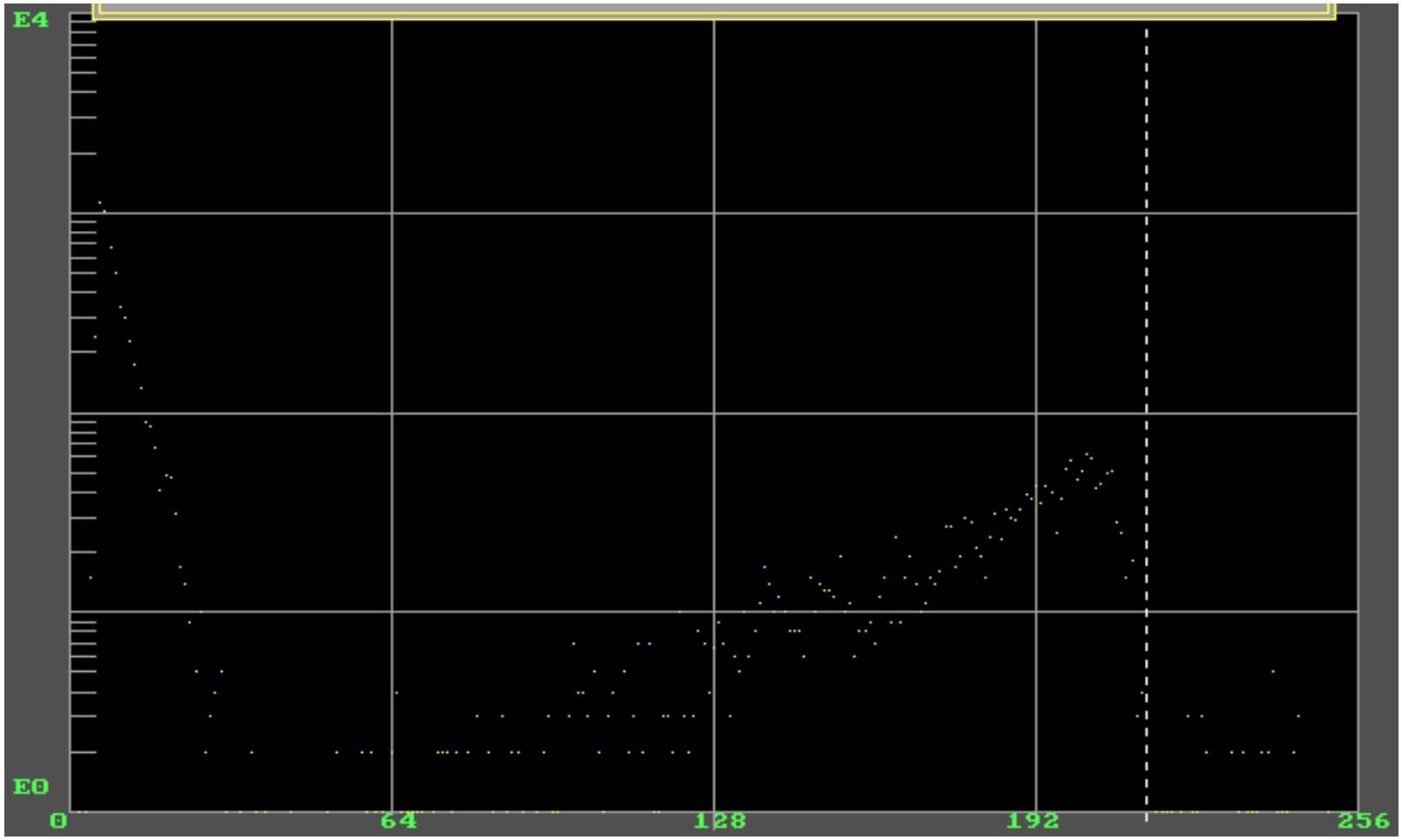
After integration and solving the equation for $\bar{C}$, mean activity concentration during sampling cycle [Bq/m^3]

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

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

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

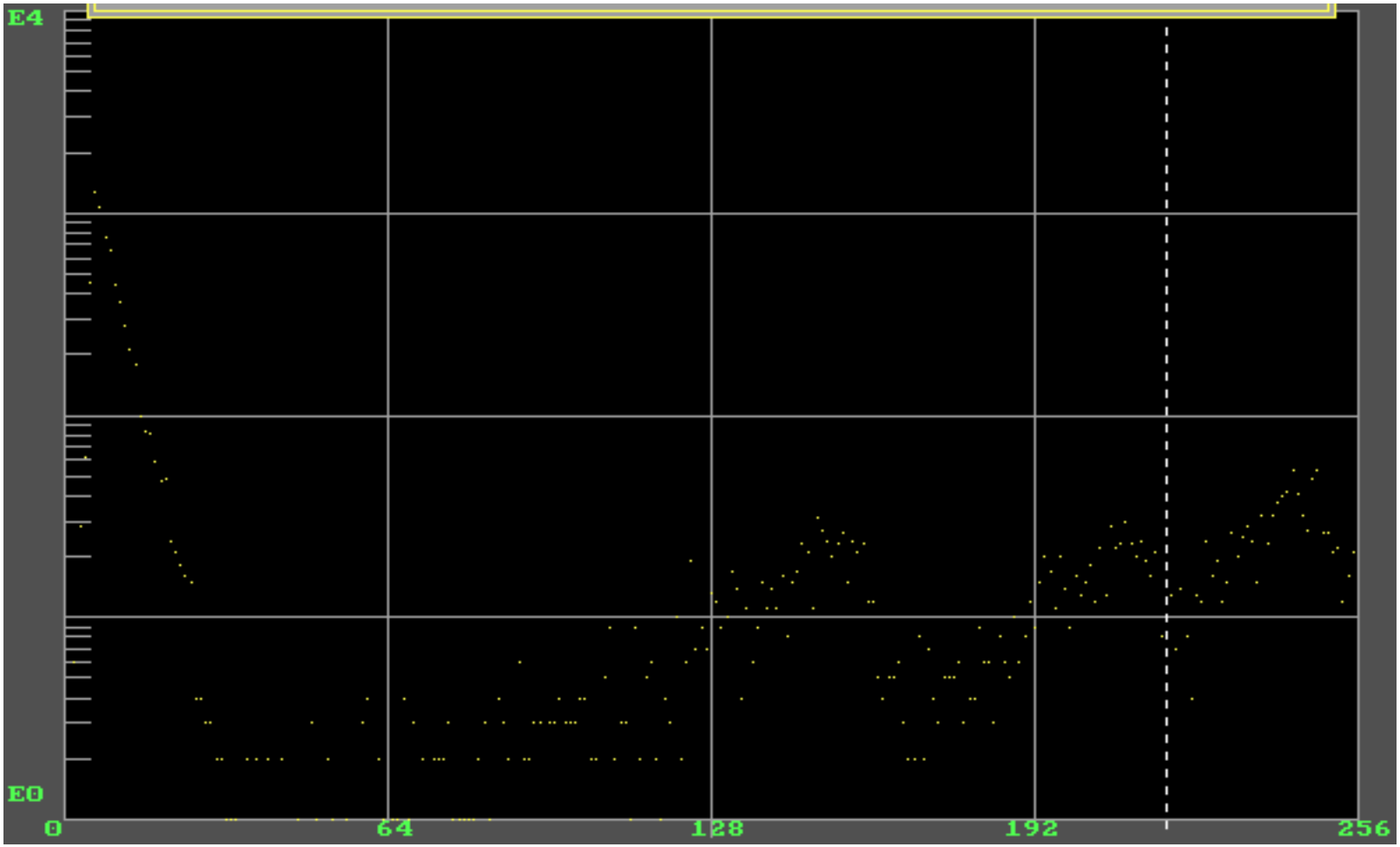
beütésszám



csatornaszám → energia

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

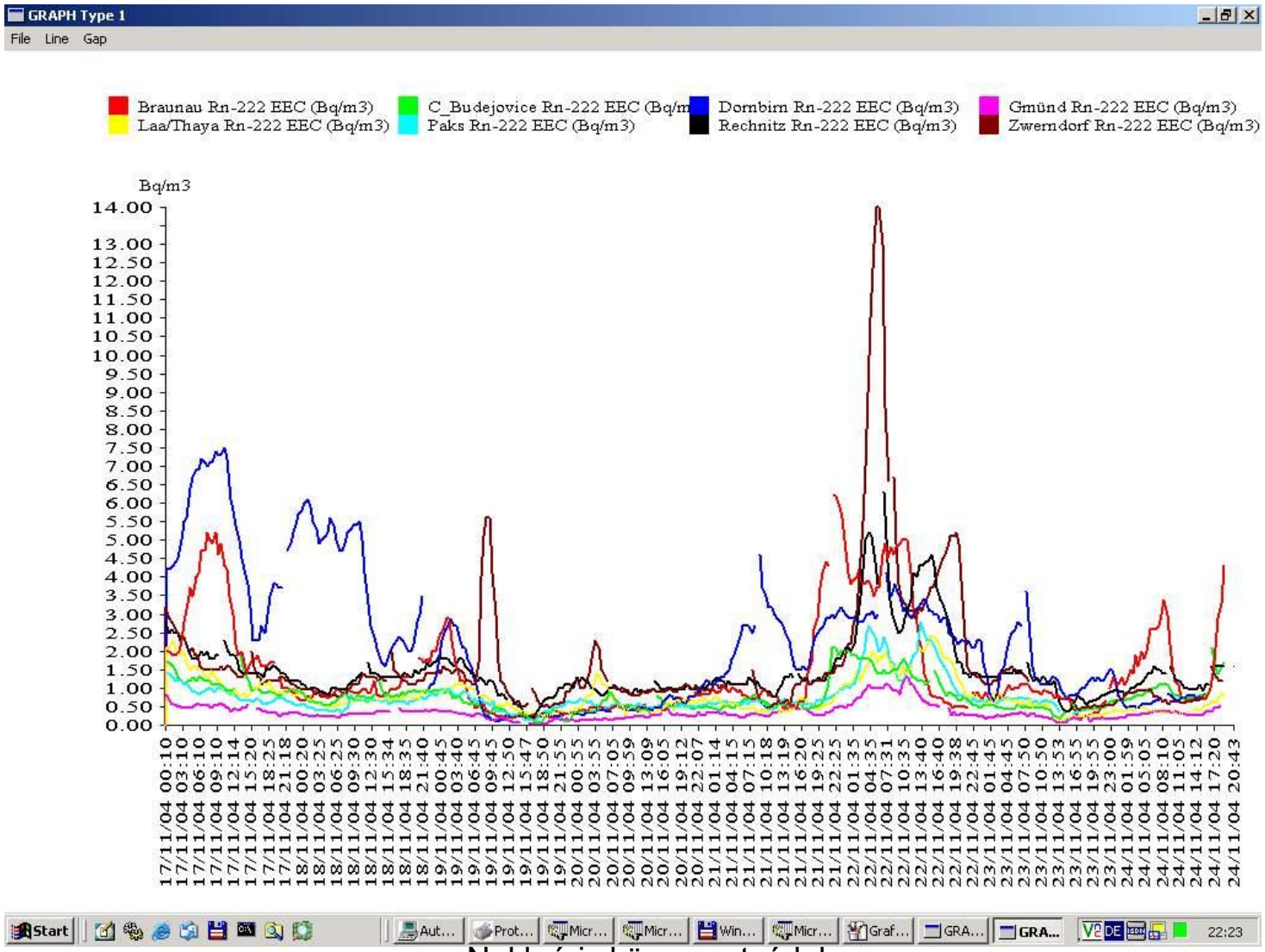
beütésszám



csatornaszám → energia

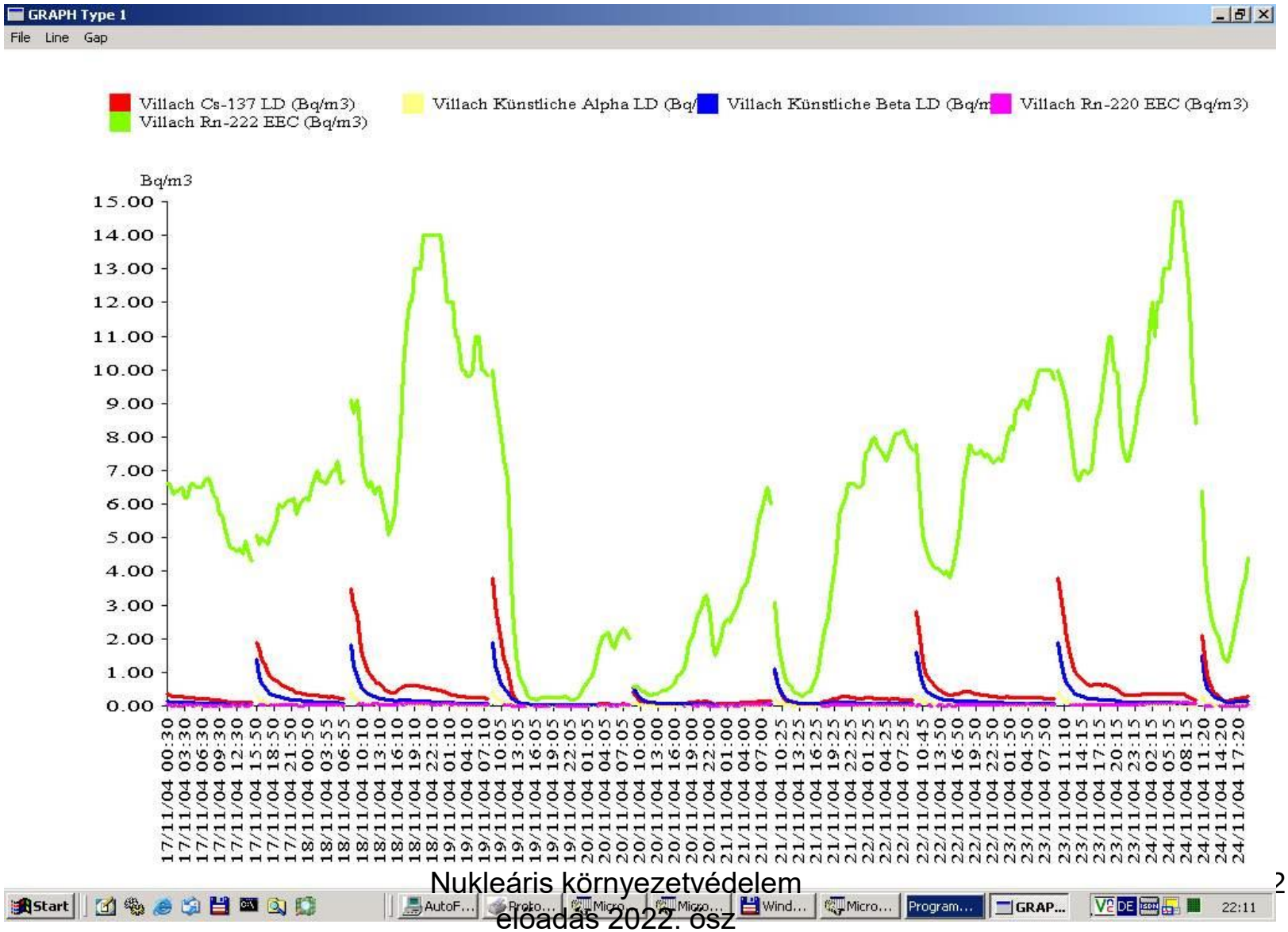
^{222}Rn

Rn EEC környezeti mérőállomásokon regisztrált változása



Radon EEC és LD-k az idő függvényében

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



Nukleáris környezeti monitorozás – korai riasztást adó rendszerek aeroszol-mintavétellel

Nukleáris környezeti monitorozás aeroszol mintavétellel - Összefoglalás:

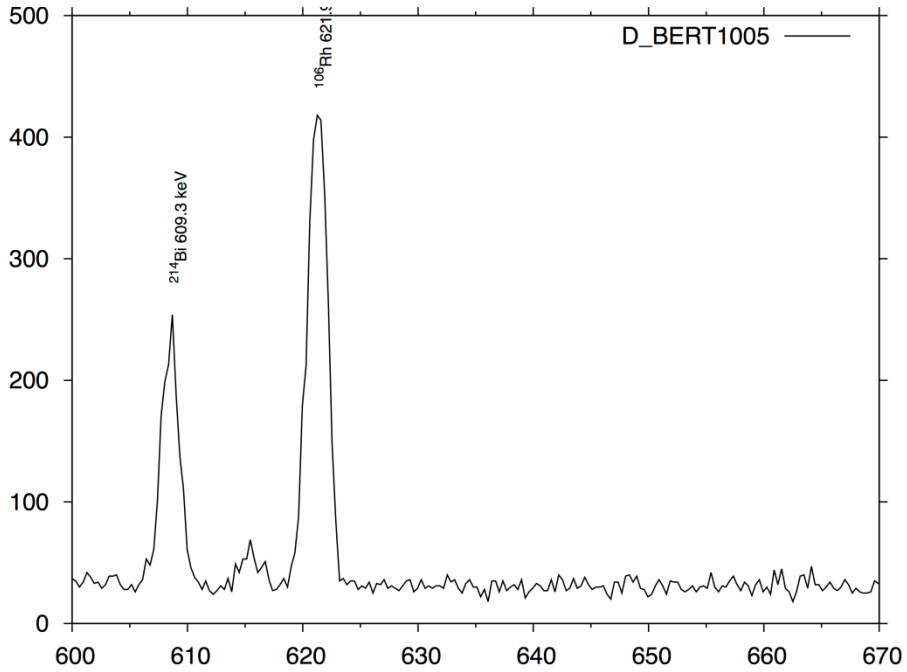
- Részecskeszűrőt és *azt követően* jódszűrő(ke)t is alkalmazhatnak, reaktorok kibocsátásának érzékelésére.
- Regionális rendszereknél az álló szűrő előnyösebb.
- Nuklidspecifikus meghatározás szükséges, hogy biztonságosan megkülönböztessük a természetes és a mesterséges radioaktivitást.
- Feljegyzendő/jelentendő értékek:

• természetes radioaktivitás (^{222}Rn-EEC stb.) – folyamatos „minőség-ellenőrzés”

• mesterséges radioaktivitás (radionuklid, aktivitás-koncentráció vagy KIMUTATÁSI HATÁR (limit of detection - LD)

Környezeti monitorozási tapasztalat európai mérőállomásokon 2017 szeptember végén

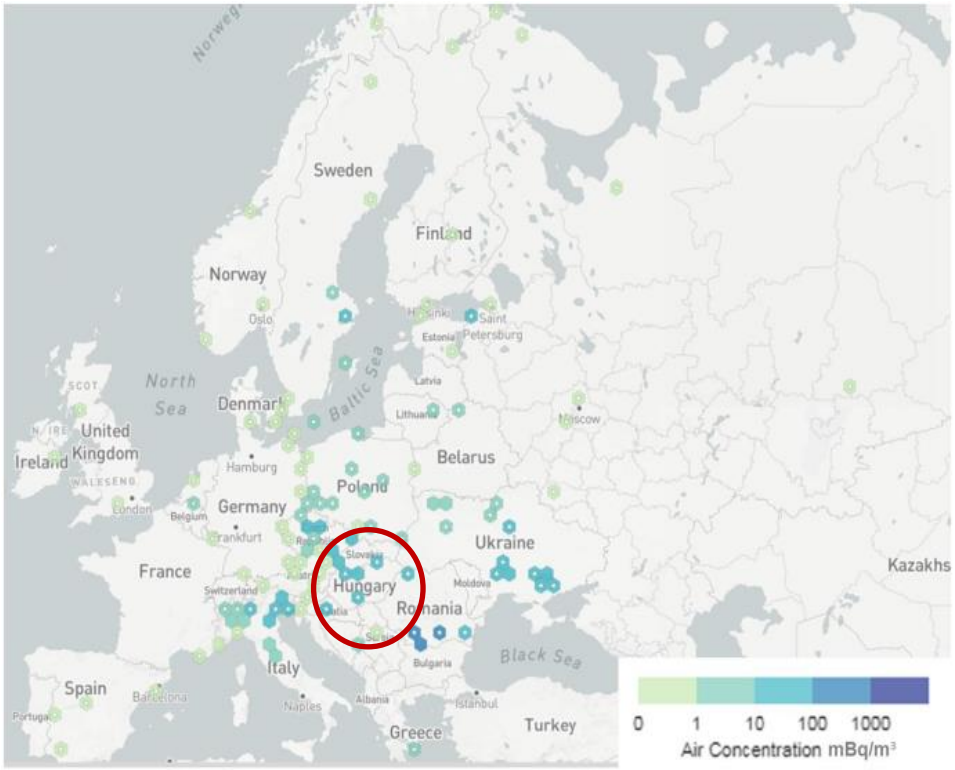
$^{106}Ru/^{106}Rh$-t (felezési idő: 374 nap) detektáltak környezeti levegőmintákban (aroszolszűrő, kihullás) a természetes radioaktivitás mellett, annál nagyságrendekkel kisebb mennyiségben

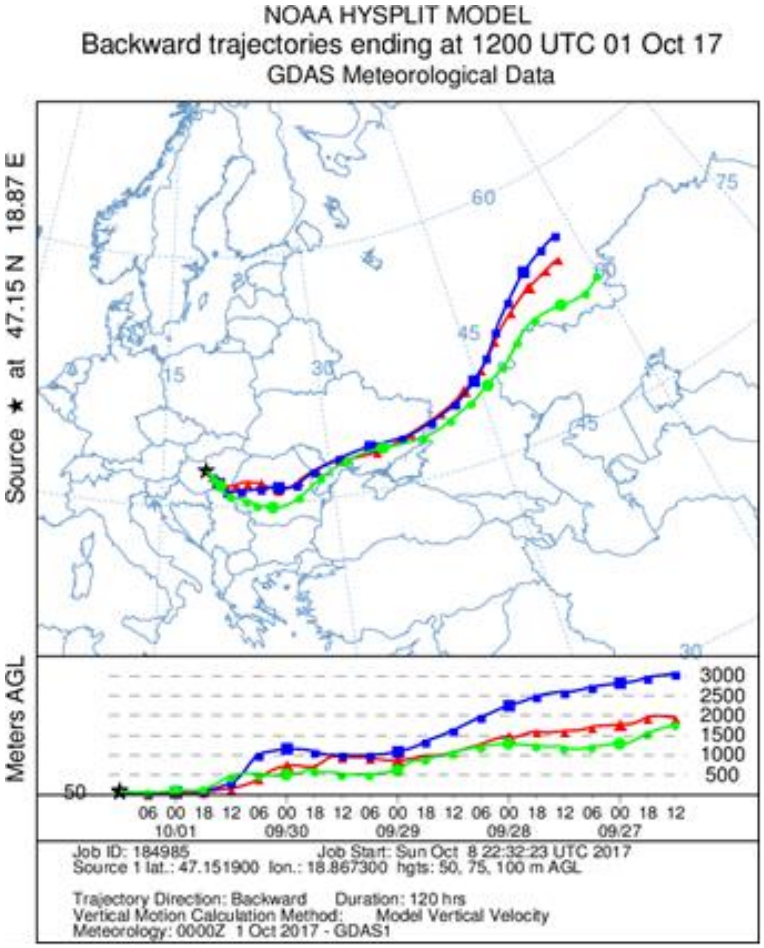


Valószínű ok: reaktorok használt fűtőelemeit feldolgozó és/vagy sugárforrásokat előállító radiokémiai laboratórium kibocsátása „may have been generated from southern regions of Ural or located close to those” (IRSN – francia sugárvédelmi hatóság)

A becsült maximális dóziskövetkezmény Magyarországon <100 nSv

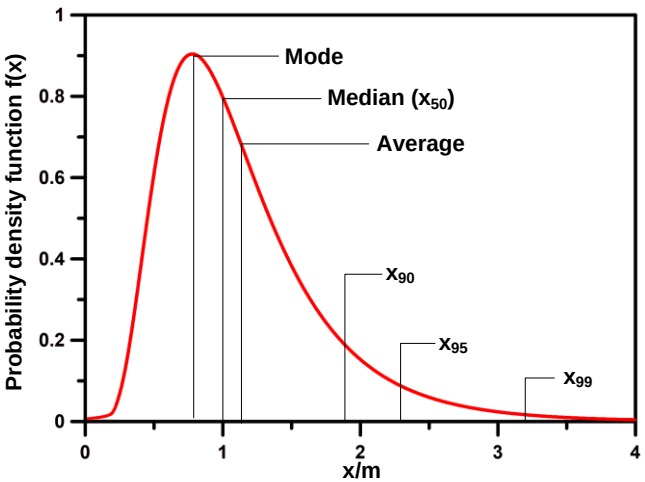
^{106}Ru detektálása Európában 2017 szeptember végén





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

Baleseti monitorozás



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

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

Nukleáris balesetek – INES kategóriák

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

Lessons Learned from Past Emergencies

Nukleáris és radiológiai balesetek

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

Rövid, pontos leírás néhány sugaras balesetről:
http://www.zmne.hu/tanszekek/vegyi/personal/Balesetek_leiras.pdf

1957 Windscale (Anglia)
Katonai plutóniumtermelő reaktorban túlmelegedett a grafit reflektor = a Wigner-hő felszabadulása következett be (a rácshibák „rendeződtek” – exoterm folyamat)
Részleges fűtőelem-olvadás, grafittűz
A környezetbe radioaktív anyagok (hasadási termékek) kerültek, melyek körülbelül 700 km^2 nagyságú terület szennyeztek el. Ezeken a területeken hónapokig tilos volt a legelő tehenek tejének fogyasztása. (Főként ^{131}I felvétel veszélye miatt.)
Összes kibocsátás: 4.10^{16} Bq

Forrás: https://www.whitehavennews.co.uk/resources/images/8951913/

Nukleáris balesetek

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

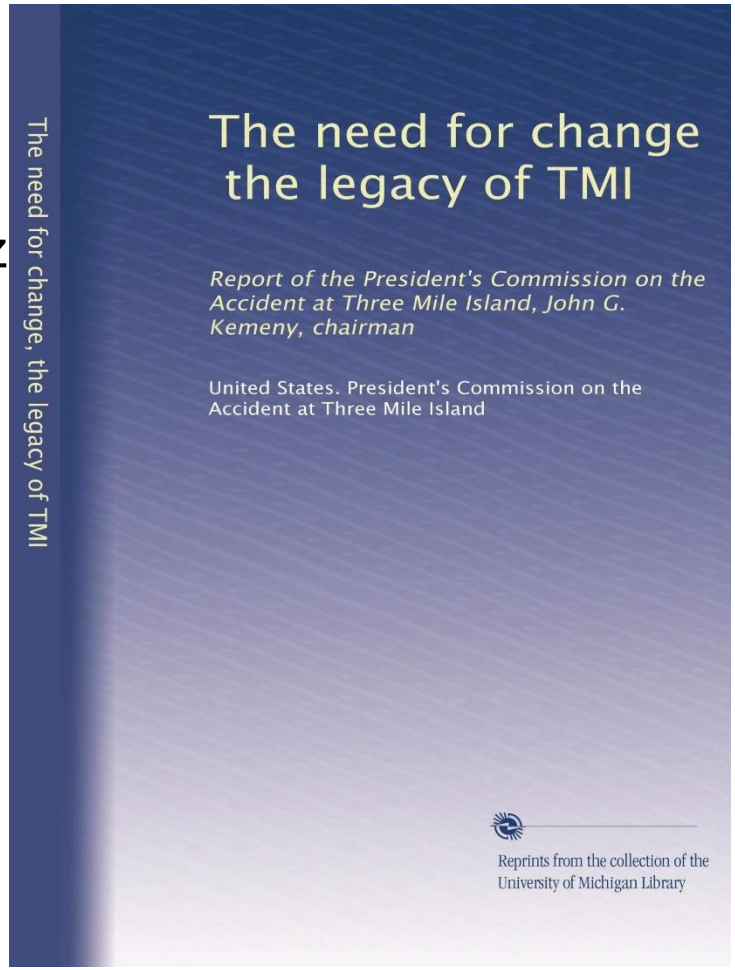
Több, egymást követő meghibásodás és az operátorok hibás döntései miatt a leállított reaktor primervize elfolyt, az aktív zóna kiszáradt, a reaktorzóna egy része megolvadt. A környezetbe kis mennyiségben radiojódok (fő képviselő: ^{131}I) és radioaktív nemesgázok kerültek. A balesetelhárítás során keletkezett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

Összes jódkibocsátás: 10^{15} Bq

A TMI-baleset tapasztalatai alapján: Nuclear Safety

Önálló tudományággá vált a „Nukleáris biztonság” (Nuclear safety)

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



Nukleáris balesetek

1986 Csernobil (Szovjetunió, ma Ukrajna = Csornobil)

RBMK: vízhűtéses, grafitmoderátoros reaktortípus

RIA: reaktivitás-beviteli baleset (reactivity insertion accident)

Csernobil - 1986

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

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

Kibocsátott összes radioaktivitás: 2.10^{18} Bq

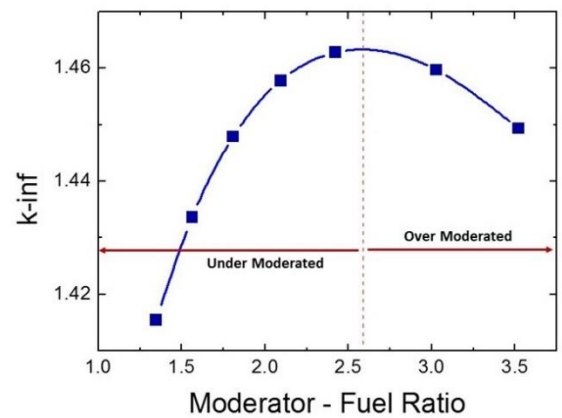
Kép forrása: https://energycentral.com/sites/default/files/users/256309/o5.JPG

The moderator – fuel ratio is calculated using the equation:

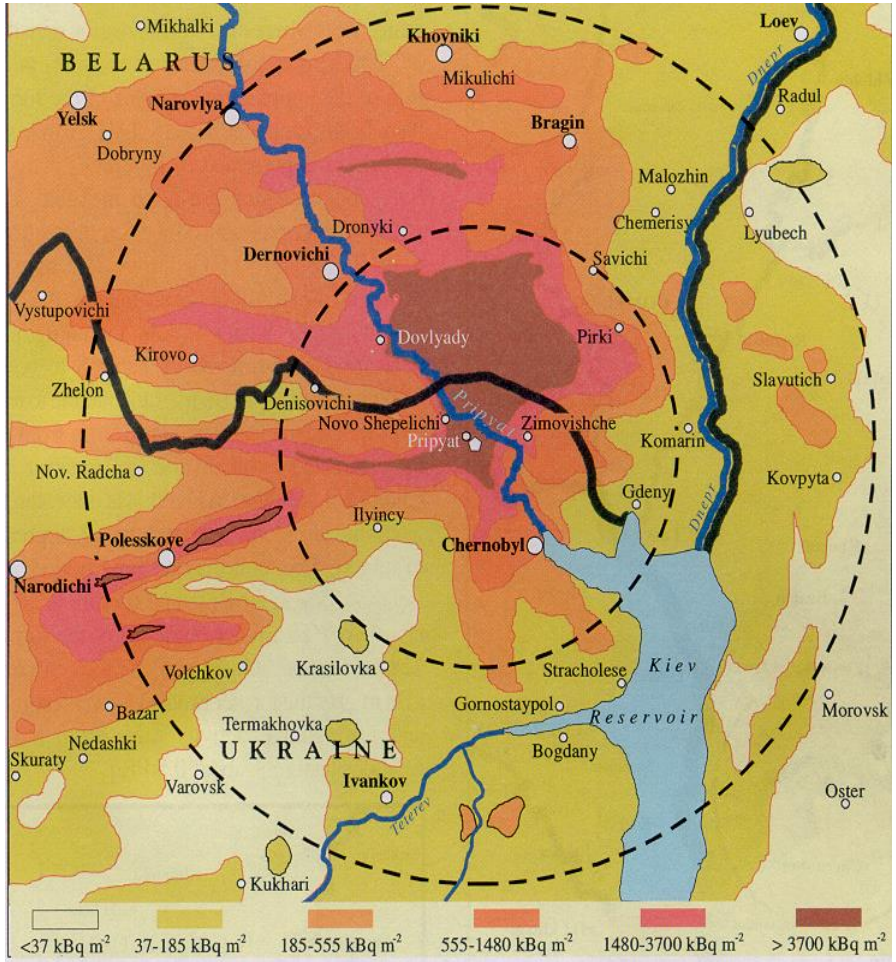
$$\frac{V_{moderator}}{V_{fuel}} = \frac{(d^2 - \pi R^2)h}{\pi R^2 h}$$

where,

V – volume
d – pin pitch
R – outermost radius of the fuel
h – length of the pin

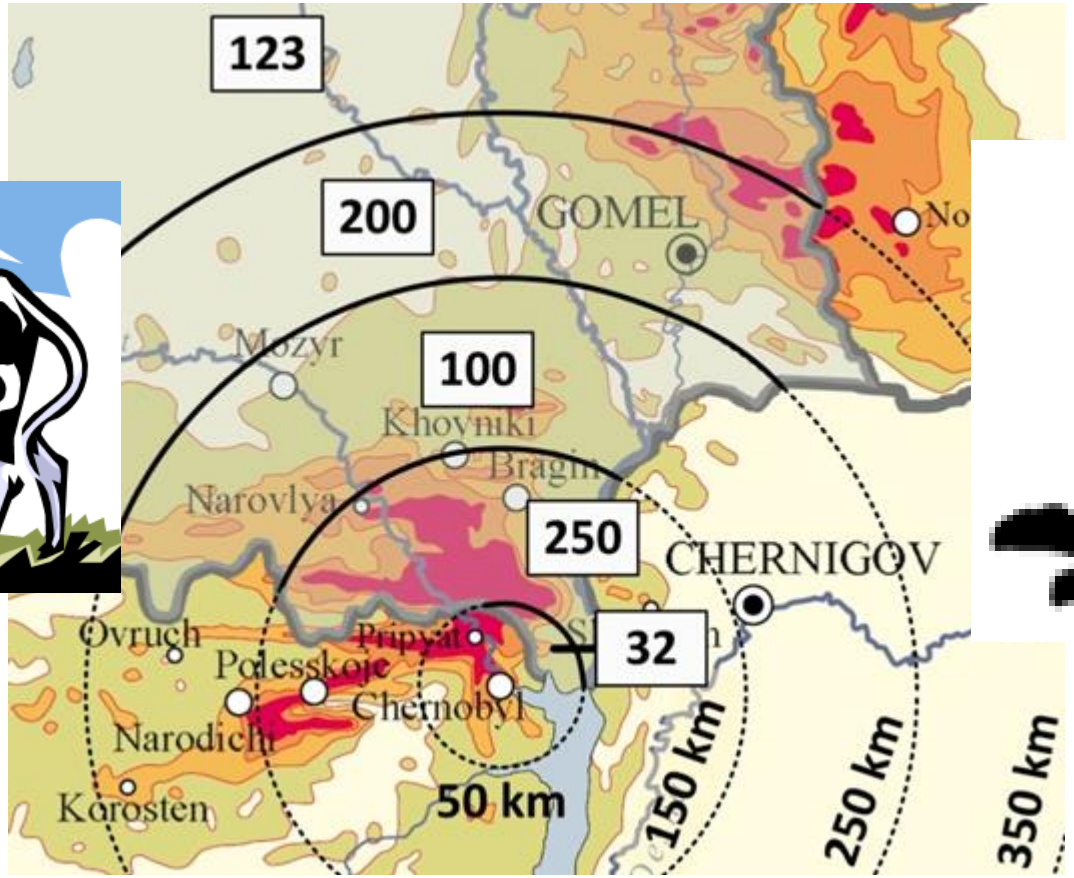


Következmények



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

Gyermekkori pajzsmirigyrák-esetek >350 km – a korábbi esetszám sokszorosa – gyermekek és terhes anyák tejfogyasztásától



Esetszámok

Radiológiai baleset

Goiania (Brazília) 1987: ellenőrizetlen sugárforrás okozta baleset

Egy megszüntetett klinika terápiás besugárzó állomásán felejtettek egy 50 TBq aktivitású ^{137}Cs-sugárforrást. Guberálók megtalálták, és egy hulladéktelepre vitték, ahol megpróbálták szétszerelni.

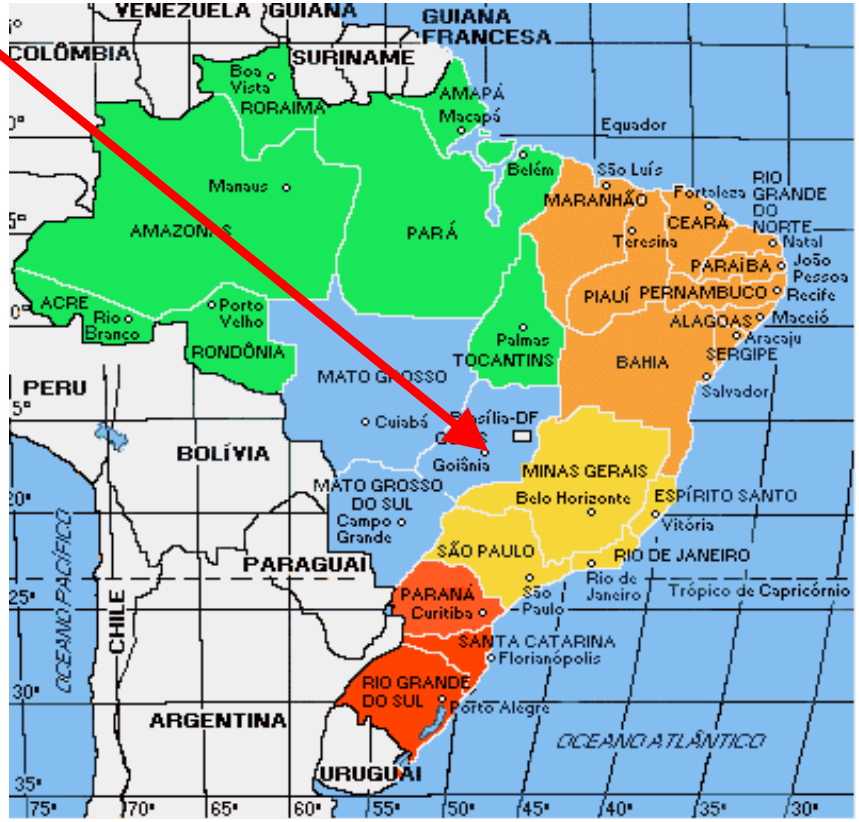
„Kék fényű por” – sokan kértek belőle.

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

A városban 85 házat kellett lebontani, összesen 3500 m^3 radioaktív hulladék keletkezett.

Goiânia Radiological Accident (Brazil, 1987)

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



Goiânia Radiological Accident (2)

- 13 Sept. 1987:
  - source removed
  - sold to scrap yard
  - shielding destroyed
  - blue light powder was spread among different families
  - after two weeks first signs of deterministic effects
- 29. Sept. 1987: response initiated
- March 1988: decontamination completed
- Radioactive waste: 3.500 m^3

Goiânia Radiological Accident (3)

Lessons Learned

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

Nukleáris baleset

1999 Tokai-mura (Japán) – kritikussági baleset

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

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

Egy „enyhe” radiológiai baleset leírása

Event date: 2010-04-20

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

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

Fukushima 2011

- Baleset alapvető oka: 9,0 erősségű földrengést követő szökőár
- Tervezési gyengeségek: túl alacsony volt a védőfal a szökőár ellen, a hőelvonás tartós elmaradása lehetséges volt, mert tönkrementek a dízelgenerátorok.
- Tervezési előnyök: hatásos konténment
- INES minősítés = 7 (a lehető legsúlyosabb baleset ?)
- A nukleáris balesethez köthető halálesetek száma ~50 a kórházak kitelepítése során.

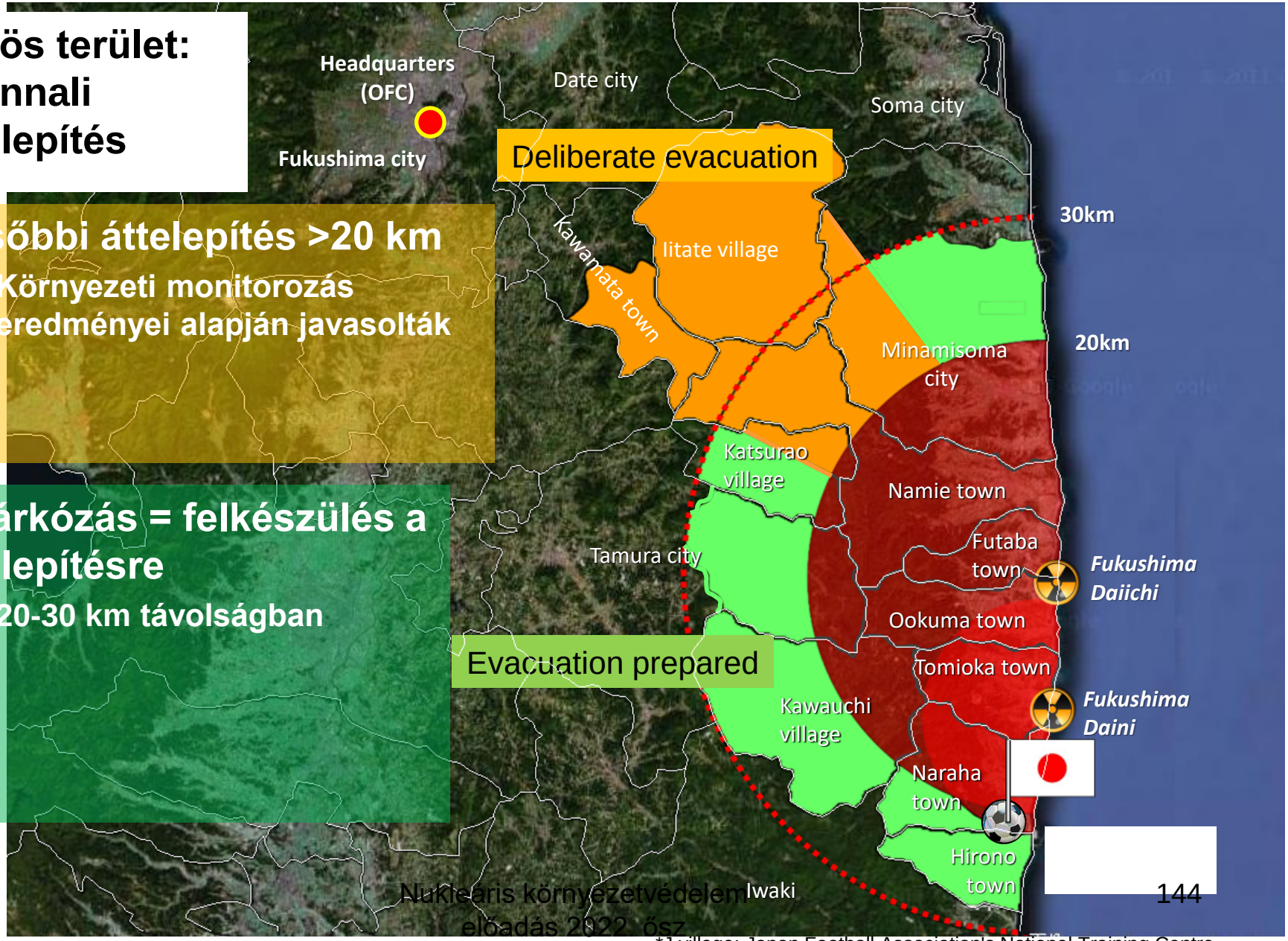
Fukushima 2011.

Status of

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

Kitelepítések a baleset után

- **Vörös terület: azonnali kitelepítés**
- **Később áttelepítés >20 km**
  - **Környezeti monitorozás eredményei alapján javasolták**
- **Elzárkózás = felkészülés a kitelepítésre**
  - **20-30 km távolságban**



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

Fukushima - értékelések

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

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

SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION

UNSCEAR 2013 Report

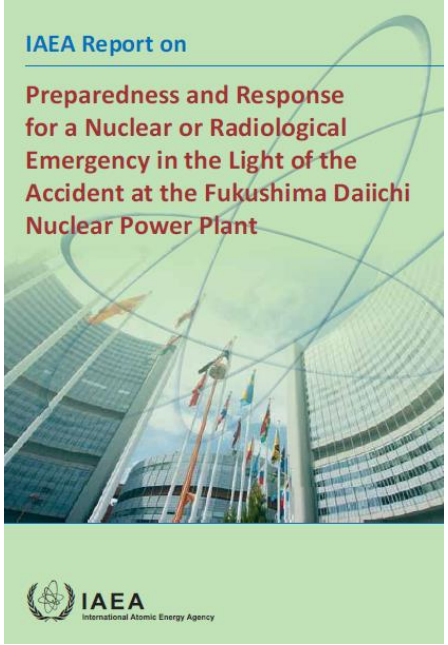
Volume I

REPORT TO THE GENERAL ASSEMBLY

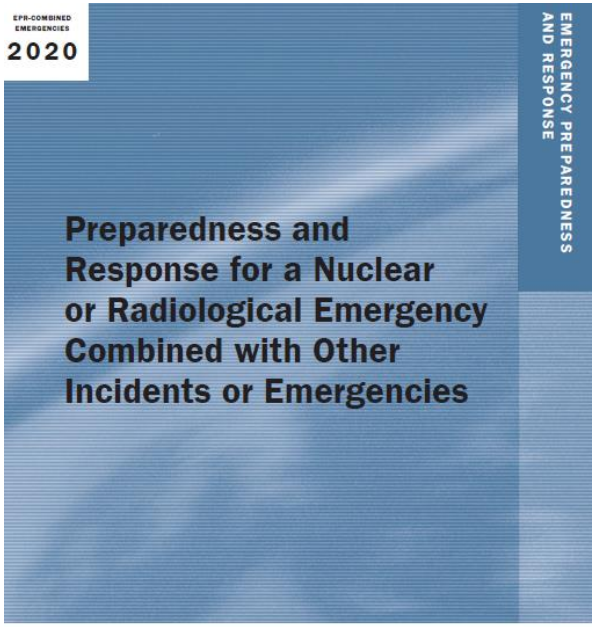
SCIENTIFIC ANNEX A:

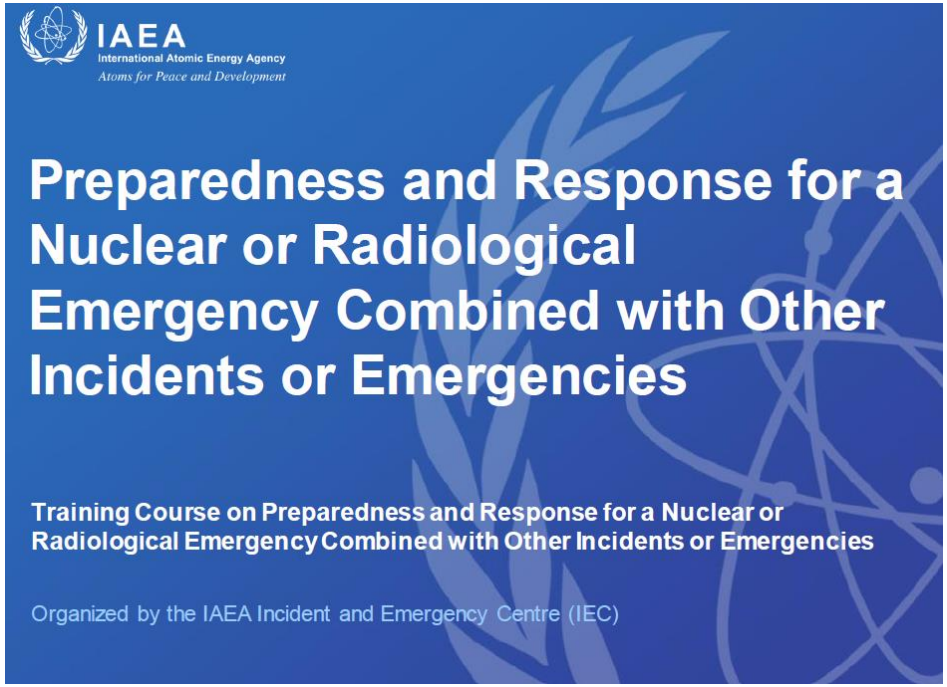
Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami

A reaktorok közelében élő lakosság effektív dózisa az első évben 4 mSv volt. Ez kb. kétszerese a természetes háttérnek. Az 1 éves gyermekekre számított dózis kb. 8 mSv volt. Kockázati szint: 4×10^{-5}



Fukushima – értékelések felhasználása a baleset-elhárításban





IAEA
International Atomic Energy Agency

Részletes útmutató készült a más természeti vagy emberi eredetű súlyos balesettel egyidőben és azonos területen történő nukleáris vagy radiológiai (pl. sugárforrások elvesztése) balesetek sikeres kezeléséről.

Nukleáris környezetvédelem 2022. őszi félév

Köszönöm a figyelmet!