

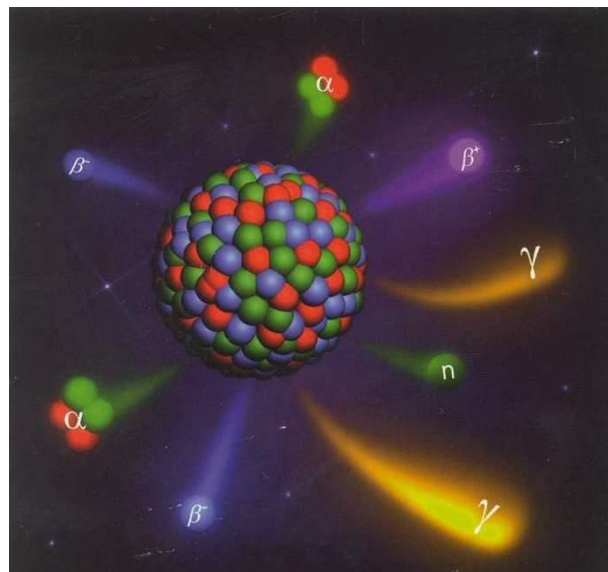
# IONIZÁLÓ SUGÁRZÁSOK

A radioaktív és a röntgensugárzás káros hatását ionizáció révén fejt ki. Az előbbi az atommagokból, az utóbbi a legbelső elektronhéjak közötti energiaugrásokból ered. Ebben a fejezetben elsősorban a radioaktív sugárzásokkal és azok hatásaival foglalkozunk; az elmondottak általában érvényesek a röntgensugárzásra is.

## A radioaktív sugárzások főbb sajátosságai

A atommagoknak két nagy csoportja van: stabil és radioaktív magok. Utóbbiak nagy energiájú sugárzások kibocsátása után más atommagokká alakulnak át. A sugárzás elektromos- és mágneses térben való eltérése alapján három összetevőre bontható:

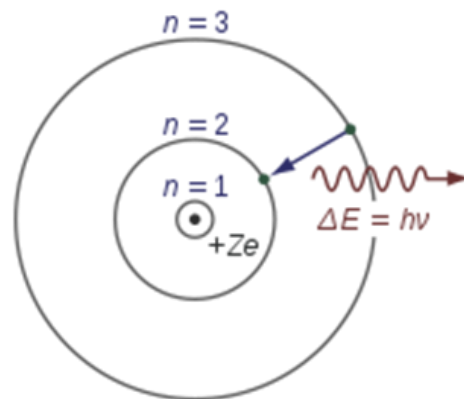
- az  $\alpha$ - (alfa-) sugárzás nehéz, két egységnyi pozitív töltésű részecskékből, He-atommagokból áll;
- a  $\beta$ - (béta-) sugárzás nagy energiájú elektronokból, vagy pozitronokból áll, ennek megfelelően negatív-, vagy pozitív béta bomlást különböztethetünk meg.
- a  $\gamma$ - (gamma-) sugárzás nagy energiájú elektromágneses sugárzás.



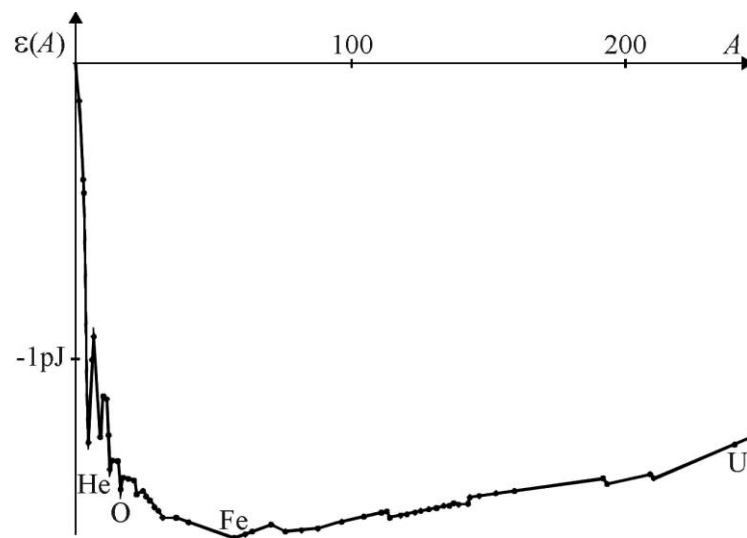
Mivel a He-atommagok töltése 2, tömegszáma 4,  $\alpha$ -bomláskor az atommag rendszáma 2-vel, tömegszáma 4-gyel csökken.  $\beta$ -bomláskor a rendszám eggyel változik (negatív  $\beta$ -bomláskor nő, pozitív  $\beta$ -bomláskor csökken),  $\gamma$ -bomláskor a bomló atommag rendszáma és tömegszáma változatlan marad.

A  $\gamma$ -bomlás általában  $\alpha$ - vagy  $\beta$ -bomlást követően jelentkezik; ez teszi lehetővé, hogy az újonnan keletkezett atommag felesleges energiájától további rendszám- és tömegszám-változás nélkül megszabaduljon.

[A röntgen (Rtg) sugárzás az atomok belső elektronhéjai között történő elektron-átmenetek következménye.]



A radioaktív bomlásokat az egy nukleonra eső kötési energia rendszámfüggése (ld. az Energia és környezet c. fejezet **2.8 ábra**) alapján érthetjük meg. A termodinamika II. főtétele értelmében minden anyagi rendszer energia-minimum felé törekszik. Az atommagok energiájukat radioaktív bomlások segítségével változtatják, ezáltal haladhatnak a legmélyebb energiájú állapot felé. Az átalakulás után a mag alkotórészei (a nukleonok) erősebben kötöttek az új atommagban, mint a régiben, az energiakülönbség felszabadul és a keletkező sugárzással a környezetbe távozik. A radioaktív bomlások tehát sokféleségük ellenére egyetlen közös okra vezethetők vissza: az anyag vándorlására a nukleáris kötési energiafelület legmélyebb energiájú állapotai felé (*Marx, 1996*).



A radioaktív anyagok mennyisége az idő függvényében állandóan csökken, mivel a bomlásra képes atommagok egy része elbomlik. Az időegység alatt bekövetkező bomlások számát a radioaktív anyag aktivitásának nevezzük:

$$a = -\frac{\Delta n}{\Delta t} \quad (5.1)$$

ahol  $\Delta n$  a radioaktív atommagok számának  $\Delta t$  idő alatt történő megváltozása. Az atommagok száma csökken, ezért  $\Delta n$  negatív szám, így az a aktivitás pozitív előjelű. Az aktivitás egysége a becquerel (Bq).  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ bomlás/s}$ .

Az aktivitás időbeli változása exponenciális függvénnyel írható le (ld. a 3. fejezet Bomló szennyezések c. szakaszát). Az aktivitás az idő függvényében változik:

$$a = a_0 e^{-\lambda t} \quad (5.2)$$

ahol  $a_0$  a kezdeti aktivitás,  $\lambda$  a bomlási állandó, amely annak valószínűsége, hogy egy atommag elbomlik. Az aktivitás egyenesen arányos a radioaktív forrásban lévő bomlásra képes atommagok  $n$  számával:

$$a = \lambda n \quad (5.3)$$

A felezési idő ( $T_{1/2}$ ), az az idő, amely alatt a kezdetben meglévő radioaktív atommagok száma a felére csökken. A felezési idő és a bomlási állandó közötti összefüggés:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}} \quad (5.4)$$

Radioaktív sugárzás kibocsátása után - a  $\gamma$ -sugárzás kivételével - új atommag keletkezik. Ha ez a mag ismét radioaktív, a bomlás tovább folytatódik. Több, egymásra következő bomlás sorozatát radioaktív bomlási sornak nevezzük. Ezekben általában  $\alpha$ -,  $\beta$ - és  $\gamma$ -bomlások követik egymást.

### **A sugárzás és az anyag kölcsönhatása (Marx, 1996)**

Egységnyi idő alatt egységnyi felületen áthaladt részecskék (ill. fotonok) számát a sugárzás fluxusának nevezzük, jele:  $\phi$ . A sugárzás irányára merőleges, egységnyi felületen időegység alatt áthaladt energia az intenzitás:

$$I = \frac{E}{At} \quad (5.5)$$

A fluxus és az intenzitás egyenesen arányosak:

$$I = E_{\text{átl}} \phi \quad (5.6)$$

ahol  $E_{\text{átl}}$  a sugárzás részecskéinek, ill. fotonjainak átlagos energiája.

## A sugárzás terjedése élettelen anyagban

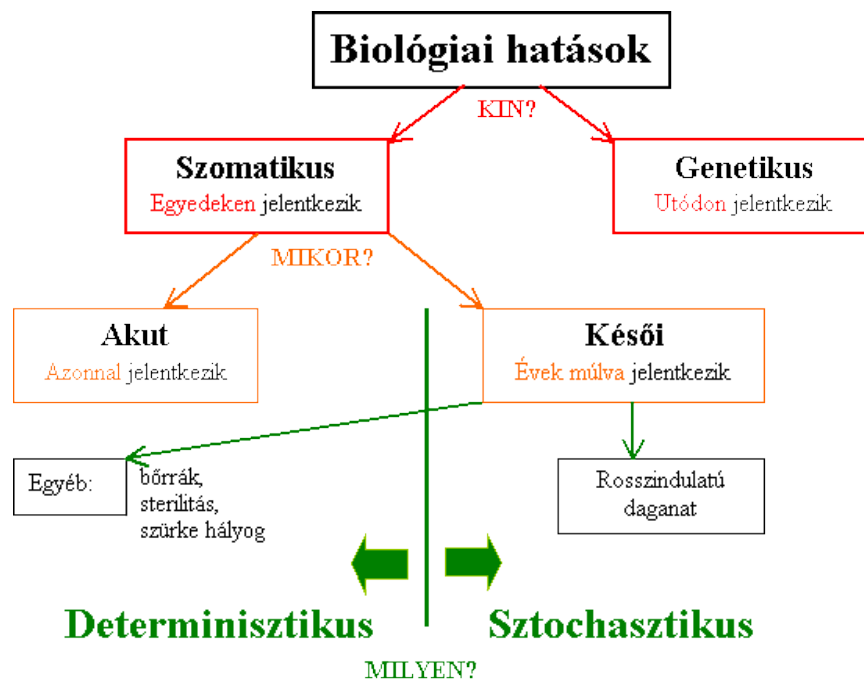
Anyaggal történő kölcsönhatáskor a sugárzás energiája a közeg atomjainak, molekuláinak ionizálására fordítódik. Az elektromosan töltött részecskék jóval nagyobb ionizációra képesek, mint a  $\gamma$ -fotonok, a semleges neutron csak közvetett módon pl. protonok meglökése révén adja át energiáját; a meglökött töltött részecskék már ionizálnak. Fajlagos ionizáció azoknak az ionoknak a száma, amelyeket a sugárzás részecskéi az anyagon áthaladva egységnyi úthosszon keltenek.

Az ionizáció miatt a sugárzás részecskéi veszítenek energiájukból, ezért a sugárzás intenzitása és fluxusa az anyagon áthaladva rohamosan csökken. Azt a távolságot, amely után a párhuzamosan haladó sugárnyaláb fluxusa felére csökken, felezési rétegvastagságnak nevezzük. Azokat a sugárzásokat, amelyekre nézve a felezési rétegvastagság értéke nagy (ilyen pl. a  $\gamma$ -sugárzás) nagy áthatoló képességű sugárzásoknak nevezzük. Az alábbiakban megadjuk néhány anyag felezési rétegvastagságát közepes energiájú  $\gamma$ -sugarakra vonatkoztatva:

hó:	50 cm	beton:	10 cm
víz:	23 cm	acél:	2,8 cm
fa:	25 cm	ólom:	1,8 cm
talaj:	14 cm		

Az adatok alapján nyilvánvaló, hogy miért alkalmazzák a sugárzások elnyelésére leggyakrabban az ólomot.

## A sugárzások hatása élő szervezetekre



Az emberiség (az egész élővilággal együtt) a kozmikus sugárzás és a természetes radioaktivitás révén évmilliók óta állandó sugárzásnak van kitéve (ez az ún. háttérsugárzás). Ezt a sugárzást az emberi szervezet észrevehető károsodás nélkül viseli el. Természetesen törekedni kell arra, hogy a háttérsugárzáson felül a szervezetet ért sugárzás mennyiségét a minimálisra csökkentsük. Erre a következő lehetőségek állnak rendelkezésre:

- minimálisra kell csökkenteni a sugárforrások közelében eltöltött időt;
- növelni kell a sugárforrás és az élő szervezet közötti távolságot (sugárzó anyagokkal foglalkozó személyek esetén ez pl. csipeszek, fogók, manipulátorok alkalmazását jelenti);
- megfelelő árnyékolásokat, (abszorbens anyagokat) kell alkalmazni.

Az ionizáló sugárzások biológiai hatásának vizsgálatával a sugárbiológia és a dozimetria foglalkozik. Az alábbiakban néhány dozimetriai alapfogalmat ismeretünk.

Az elnyelt dózis az élő anyag által tömegegységenként elnyelt energia, egysége a gray (Gy).  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ . Az okozott sugárkárosodás azonban nemcsak az elnyelt energia nagyságától függ, hanem attól is, hogy az elnyelt energia milyen elváltozásokat hoz létre. Ezt viszont egyrészt a besugárzó részecske minősége, másrészt az élő szövet tulajdonságai határozzák meg. A bonyolult folyamat elemzése helyett a gyakorlatban inkább a következő empirikus módszert követik. Azonos mértékű biológiai károsodást okozó, de különböző eredetű dózisokat biológiai szempontból egymással egyenértékűnek tekintünk, és az ún. dózis-egyenértékkel vesszük figyelembe.

A dózisegyenérték definíciója a következő:

$$H = DQq \quad (5.7)$$

ahol D az elnyelt dózis, Q a sugárzás minőségi faktora, q pedig a besugárzott objektum minőségi tényezője. Q értéke a különböző sugárzásokra a következő:

Rtg-,  $\gamma$ - és  $\beta$ -sugárzásra: 1; neutronsugárzásra: 2,4 ... 10,5 (az energiától függően);  $\alpha$ -sugárzásra: 10 ... 20. A q tényező értéke a különböző szöveteknél ill. szöveteknél változó; a globális hatások szempontjából  $q = 1$  értékkel számolnak. A dózisegyenérték egysége a sievert (Sv). 1 Sv a dózisegyenértéke annak az ionizáló sugárzásnak, amelynek biológiai hatása ugyanakkora, mint 1 Gy röntgen-sugárzásnak.

A természetes eredetű sugárforrásokból származó, egy személyre vonatkoztatott évi dózis-értékeket az alábbi táblázatban adjuk meg. A számadatok a világot átlagot fejezik ki, ettől régióként jelentős eltérések lehetnek (Köteles, 1994).

Forrás	Külső sugárzás ( $\mu\text{Sv}$ )	Belső sugárzás ( $\mu\text{Sv}$ )	Összesen ( $\mu\text{Sv}$ )
Kozmikus sugárzás	355	-	355
Kozmogén radionuklidok ( $^3\text{H}$ ; $^{14}\text{C}$ , $^{22}\text{Na}$ )		15	15
Eredeti radionuklidok ( $^{40}\text{K}$ , $^{87}\text{Rb}$ )	150	186	336
$^{238}\text{U}$ bomlási sora ebből Rn és származékai	100	1239	1339
$^{232}\text{Th}$ bomlási sora	160	176	336
Összesen (kerekítve)	770	1600	3400

A szervezet a természetes háttérsugárzásnál magasabb dózist is elvisel anélkül, hogy észrevehető egészségkárosodás jönne létre. Sok éves nemzetközi tapasztalat alapján megállapították az egyénekre megengedhető maximális dózist. Ennek értéke különböző testrészekre a következő:

Az egész test besugárzása esetén évente	50 mSv
hetenként	1 mSv
Kézre, lábra hetenként	5 mSv
Szemlencsére, ivarmirigyekre hetenként	1 mSv

Meghatározták ezen kívül az ún. halálos dózis nagyságát is, a következőképpen: halálos (letális) dózis az a dózis amely az egyének 50%-át 30 napon belül elpusztítja, ennek értéke 3,5 Sv (3500 mSv).

Különböző fajlagos ionizációjuk miatt az  $\alpha$ -,  $\beta$ - és  $\gamma$ -sugárzások különbözőképpen veszélyesek.

Kívülről jött sugárzás esetén a legkevésbé veszélyes az  $\alpha$ -sugárzás, mert nagy fajlagos ionizációja miatt már a bőr legfelső rétegében elnyelődik. A  $\beta$ -sugárzás - energiájától függően - a testszövetben néhány mm-től néhány cm-ig is behatolhat. A  $\gamma$ -sugárzás fajlagos ionizációja kicsi, ezért áthatoló képessége nagy, így belső szöveteket is károsíthat. A védekezés az  $\alpha$ -sugárzás esetén a legkönnyebb, ezt már néhány cm vastag levegőréteg, vagy akár a ruhaszövet is elnyeli. A  $\beta$ -sugarak hatótávolsága a levegőben néhányszor tíz centiméter, fémekben 0,1 mm-től néhány mm-ig terjed. A  $\gamma$ -sugarak ellen vastag fémlemezekből (leggyakrabban ólomból) készült árnyékoló fallal védekeznek.

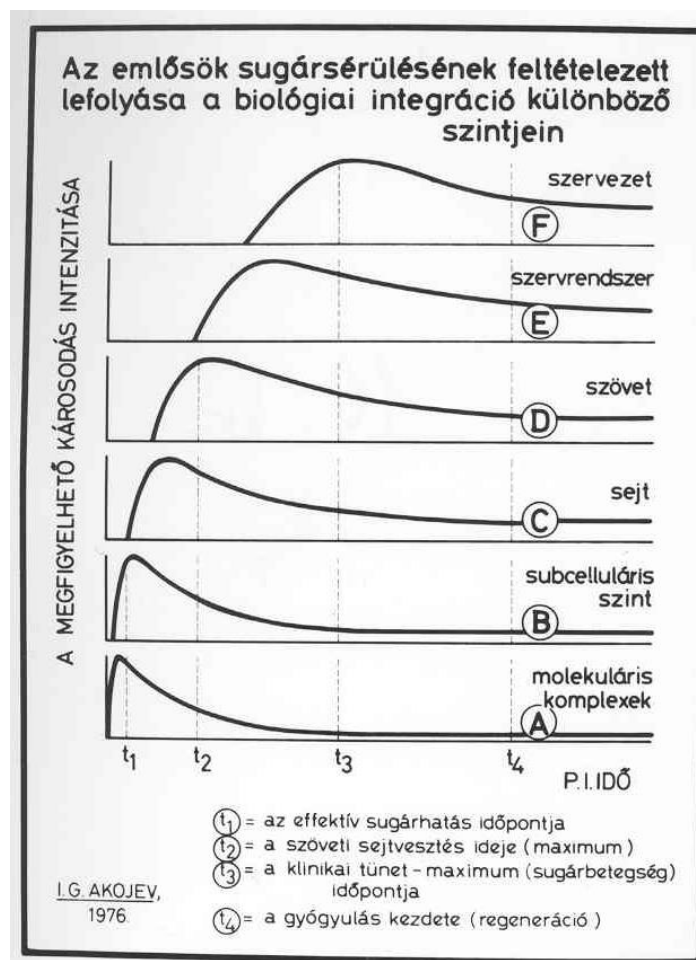
A testbe bejutott (inkorporált), egyébként azonos aktivitású radioaktív anyagok közül a legveszélyesebb az  $\alpha$ -sugárzó, mert az teljes energiáját egy nagyon kis térrészben adja le. Ezért ott nagy roncsolást, az égési sebekhez hasonló elváltozásokat okoz. A többi inkorporált sugárforrás nagyobb testrészeket, esetleg az egész testet veszélyezteti, de kisebb fajlagos károsodást okoz.

A sugárbiológiai hatásláncban megkülönböztetünk primer és szekunder reakciókat. Az  $\alpha$ - és a  $\beta$ -sugárzás kölcsönhatásait, mivel azok ionizációjuk révén teljes energiájukat átadják a sejteknek, primer reakcióknak nevezzük. A lassú neutronok, valamint a  $\gamma$ - és röntgensugarak energiájukat elektronoknak adják le, amelyek az atomok energiafelhőjéből kiszakadva, az anyagon áthaladva számtalan atomkötést bonthatnak meg. A primer és szekunder hatások eredményeként kémiai reakciók mennek végbe a testszövet-, valamint az ivarsejtekben, elsősorban a sejtmagok örökítő anyagában.

A DNS-molekula sugárzás hatására történő károsodása az **5.2 ábra** szerinti módon történhet. A sugárzás károsíthatja az egyes bázisokat (adenin, citozin, guanin, timin), vagy bázis-párokat. Egy másik lehetőség a lánc egyes szálainak törése, vagy mindkét szál törése. A báziskárosodások és az egyes láncok törései gátolják a sejt javító mechanizmusát. A kettős lánc törései irreverzibilis hatásokat (kromoszóma-darabok elvesztése, vagy átrendeződése) okozhatnak. Ezek kisebb dózis esetén egyes sejtek, nagy dózis esetén az egész szervezet életét veszélyeztetik.



A sugárzás hatására a sejtosztódás (mitózis) is zavarokat szenved. A sejtosztódás zavara rosszindulatú daganatok képződéséhez vezethet; magzatoknál a terhesség első hónapjaiban embrionális fejlődési rendellenességek, elsősorban agykárosodások léphetnek fel. A sejtosztódások nagyobb gyakorisága miatt a fiatal szervezetek veszélyeztetettsége nagyobb, mint a felnőtteké.



## Élelmiszerek radioaktivitása (Szabó, 1987)

A kísérleti atomrobbantások, vagy a reaktorbalesetek révén az atmoszférába kerülő radioaktív anyagok a földfelszínre túlnyomórészt (Magyarországon 80-90%-ban) a csapadékkal kerülnek. Ezenkívül előfordulhat (Csernobilnál is megtörtént) a szél által szállított radioaktív por leülepedése is. Ezeket együttesen radioaktív légköri kihullásnak nevezik; aktivitása érzékeny mutatója a korábbi, sugárzást keltő tevékenységeknek.

A felszínre került sugárzó anyag további transzportja a felszín anyagának, és a talaj tulajdonságainak függvénye. Homok és más laza szerkezetű talaj esetén a migráció gyors, agyag és vályogtalajok esetén igen lassú.

A talaj radioaktív szennyezését főleg a  $^{90}\text{Sr}$  és  $^{137}\text{Cs}$  izotóp okozza. A  $^{90}\text{Sr}$  könnyen leszivárog a csapadékvízzel a mélyebb rétegekbe (hasonlóan viselkedik a trícium:  $^3\text{H}$ , amelyet környezeti nyomjelző izotópként is használnak), a  $^{137}\text{Cs}$  viszont igen gyorsan adszorbeálódik a felső néhány cm talajrétegben. Szántóföldeken, és kertekben a talajművelés miatt a felső 20-30 cm-es rétegben nagyjából azonos koncentráció alakul ki.



## Kiürülési és szeparációs folyamatok

A növényi és állati szervezetekben a radioaktív anyagok mennyisége nemcsak a fizikai bomlás miatt csökken, hanem a szervezetek természetes anyagcseréje

folytán is. A biológiai jellegű kiürülést az ún. biológiai felezési idővel jellemzik; ez az az időtartam, amely alatt a vizsgált anyag mennyiségének fele kiürül. A tényleges kiürülés a fizikai lebomlás és a biológiai kiürülés eredője, amelyet az effektív felezési idővel jellemezhetünk. Ez a következőképpen számítható:

$$T_{eff} = \frac{T_{fiz} T_{bio}}{T_{fiz} + T_{bio}} \quad (5.8)$$

ahol  $T_{fiz}$  a fizikai,  $T_{bio}$  a biológiai felezési idő. (A formulából következik az a gyakorlati szabály, hogy ha a két felezési idő közül valamelyik jóval kisebb, akkor az effektív felezési idő szempontjából ez a meghatározó. A pontos értéket természetesen a fenti formulából lehet számítani.)

Közismert, hogy a periódusos rendszer azonos oszlopában lévő elemek kémiai folyamatokban könnyen helyettesíthetik egymást. A kálium és a cézium az első oszlopban, a kalcium és a stroncium pedig a második oszlopban foglal helyet, ezért a talaj  $^{137}\text{Cs}$  izotóppal történő szennyezése esetén kálium bevitelével (pl. műtrágya adagolással) elérhető, hogy a növények csak igen kevés céziumot vesznek fel a talajból. Hasonlóan, ha  $^{90}\text{Sr}$  szennyezés van, akkor kalcium adagolásával (meszezés) megakadályozható a radioaktív anyag felvétele.

		FÉMEK			
		Alkálifémek		Alkáliföldfémek	
		Átmeneti fémek		Belső átmeneti fémek	
		Egyéb fémek		Kevésbé ismert fiz	
	1 I.A	2		3	4
1 K	1 H 2,1 Hidrogén 53  154 1310 1,01 1s <sup>1</sup>	2 II.A			
2 L	3 Li 1,0 Lítium 167  76  520 6,94 2s <sup>1</sup>	4 Be 1,5 Berillium 112  45  900 9,01 2s <sup>2</sup>			
3 M	11 Na 0,9 Nátrium 190  102 490 23,0 3s <sup>1</sup>	12 Mg 1,2 Magnézium 145  72  730 24,3 3s <sup>2</sup>			
4 N	19 K 0,8 Kálium 243  138 420 39,1 4s <sup>1</sup>	20 Ca 1,0 Kalcium 194  100  590 40,1 4s <sup>2</sup>	21 Sc 1,3 Szkandium 184  75  630 45,0 3d <sup>1</sup>	22 Ti 1,5 Titán 176  61  660 47,9 3d <sup>2</sup>	
5 O	37 Rb 0,8 Rubidium 265  152 400 85,5 5s <sup>1</sup>	38 Sr 1,0 Stroncium 219  118  550 87,6 5s <sup>2</sup>	39 Y 1,3 Ittrium 212  90  620 88,9 4d <sup>1</sup>	40 Zr 1,4 Cirkónium 206  72  640 91,2 4d <sup>2</sup>	
6 P	55 Cs 0,7 Cézium 298  167  380 132,9 6s <sup>1</sup>	56 Ba 0,9 Bárium 253  135  500 137,3 6s <sup>2</sup>	57-71 Lantanoidák	72 Hf 1,3 Hafnium 208  71  660 178,5 5d <sup>2</sup>	
7 Q	87 Fr 0,7 Francium -  180  380 (223) 7s <sup>1</sup>	88 Ra 0,9 Rádium -  148  510 (226) 7s <sup>2</sup>	89-103 Aktinoidák	104 Rf - Raderfordium -   -   580 (261) 6d <sup>2</sup>	

A növények különböző részei különbözőképpen veszik fel a radioaktív anyagokat. Általános tapasztalat, hogy a reproduktív részek (pl. gabonamagok) kevesebb radioaktív anyagot vesznek fel, mint a vegetatív részek (pl. a szár, vagy a szalma).

Vannak olyan növények, amelyek természetes kálium-tartalma magas (pl. a paraj, saláta, sóska) ezek nagyobb valószínűséggel veszik föl a  $^{137}\text{Cs}$  izotópokat, az előbb említett mechanizmus miatt. Ezért szennyezés gyanúja esetén elsősorban ezeket kell vizsgálni, emiatt az ilyen növényeket *indikátor növényeknek* nevezik.

A táplálékláncban a tápanyagok transzportja folyamán egyes elemek (és izotópok) relatív koncentrációja megváltozik. Az állati szervezetek radioaktív szennyezése a növényi szervezetek szennyezésétől függ, a húsevők, ragadozók szervezetében pedig a radioaktív anyagok (a peszticidekhez hasonlóan) akkumulálódhatnak. A húsok radioaktív szennyezésénél tapasztalat, hogy a növekvő aktivitás sorrendje a következő: sertéshús - marhahús - hal.

Az állati szervezeteken belül (hasonlóan a növényekhez) a radioaktív anyagok szeparációja is megfigyelhető. Pl. a tej stroncium-tartalma jóval kisebb, mint a takarmányé. Az ún. diszkriminációs tényezőt a következőképpen definiálják:

$$D_{Sr} = \frac{\left( \frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{tej}}{\left( \frac{C_{Sr}}{C_{Ca}} \right)_{tak}} \quad (5.9)$$

ahol C a megfelelő koncentrációkat, a "tak" index a takarmányra vonatkozik. A tapasztalat szerint tehéntej esetén  $D_{Sr}$  értéke 0,1 körül van, vagyis a tej csak tizedannyi radioaktív anyagot tartalmaz, mint a takarmány. Érdekes megjegyezni, hogy céziumra viszont ilyen diszkriminációs folyamat egyáltalán nem működik.

### *Élelmiszerek sugárszennyezésének csökkentése*

A sugárszennyezett élelmiszerek egy része különböző módszerekkel (részben a már említett elvek alapján) mentesíthető, és fogyasztásra alkalmassá tehető. Az alábbiakban néhány ilyen lehetőséget ismertetünk.

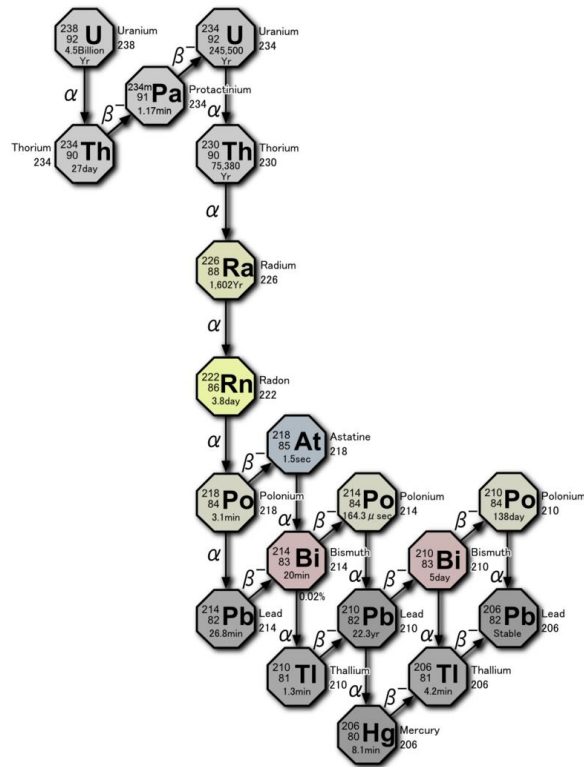
1. Stroncium-szennyezés esetén a már említett meszezés, cézium-szennyezés esetén pedig kálimútrágya adagolásával csökkenthető a szennyezett talajból a növények általi radioaktív anyagfelvétel.

2. Ha a növények radioaktív légköri kihullás révén szennyeződtek (pl. a csernobili baleset után a saláta), akkor bő vizes lemosás már jelentős mentesítést nyújthat.
3. A magvak az említetteknek megfelelően már eleve kevesebb radioaktív anyagot tartalmaznak, mint a többi növényi részek. További tapasztalat azt mutatja, hogy a felhalmozódás a magvak héjában igen jelentős. Ezért gabonaféléknél a sugárszennyezettség a kiőrléssel is csökken, az aktív anyagok a korpában halmozódnak fel. Hasonló a helyzet a zöldborsóval: a borsópüré aktivitása jóval kisebb, mint az eredeti borsószemké.
4. Az élelmiszerek készítésének folyamatában (előmosás, főzés) jelentős aktivitás csökkenés áll elő. Ezt a folyamatot kilúgozásnak is nevezik.
5. Rövid felezési idejű izotópok esetén (pl.  $^{131}\text{I}$ ) tárolás útján is csökkenthető az aktivitás.
6. Régi tapasztalat, hogy a radioaktív anyagok a savas közegekben akkumulálódnak. Ezért pl. a tej stroncium- vagy cézium-szennyezése esetén, ha sajtá vagy túróvá dolgozzák fel, akkor a fajlagos aktivitás jelentősen csökken, mivel a radioaktív anyagok túlnyomó része a savóban marad.

### **A radon és bomlástermékei** (*Köteles, 1994 és Marx, 1996*)

A bányászok idült légúti betegségét és viszonylag korai elhalálózását már a XVI. században felismerték. Ma már tudjuk, hogy a halálesetek nagy részénél a tüdőrák volt a halálok. A tüdőrák okának azonban egészen századunk első évtizedéig az arzént, és a toxikus fémeket (kobalt, nikkelt, bizmut) tartották. Csak a radioaktivitás felfedezése után vált világossá, hogy egyes bányák levegője nagy mennyiségű sugárzó radont tartalmaz.

A földkéregben található radioaktív elemek három bomlási sorának mindegyikében képződik radon, amely nemesgáz. Az  $^{238}\text{U}$  bomlási sorában a rádium  $\alpha$ -bomlásakor jön létre radon. A későbbi kutatások tisztázták, hogy az élő szervezetek számára nem is maga a radon, hanem annak bomlástermékei (a radonleányelemek), mint pl. a  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$  és  $^{214}\text{Bi}$  jelentenek veszélyt, ezek ugyanis por részecskékhez kötődnek, ami által radioaktív aeroszol képződik. A radonsorozat tulajdonképpen végterméke a  $^{210}\text{Po}$ , amelynek felezési ideje viszonylag hosszú: 22,3 év. Az egészségre káros hatásokat főleg az említett bomlástermékek okozzák és nem maga a radon.



Amikor századunk közepén ismertté vált a radon szerepe a tüdőrák kialakulásában, a bányák szellőztetésének fejlesztésével sikerült csökkenteni a bányászok megbetegedésének kockázatát. Azt viszont már csak az utóbbi évtizedekben ismerték fel, hogy a földkéregből származó radon zárt helyiségekben, lakásokban is feldúsulhat. A probléma ezáltal már nemcsak munkavédelmi, hanem közegészségügyi szempontból is fontosnak bizonyult.

A radon és leányelemei által okozott egészségkárosító hatás a belégzéskor alakul ki. Az aeroszol részecskékre abszorbeált bomlástermékek (főleg a  $^{218}\text{Po}$  és  $^{214}\text{Po}$ ) a hörgők elágazásainál, ezek falára rakódnak. Ott megtapadva alfa-részecskékként bombázzák a hörgő-hám sugár-érzékeny sejtrétegét, valamint a kiválasztó sejteket és ezek sejtmagjait. Ezen kívül a radon és bomlástermékei a tüdő hólyagocskáin keresztül bekerülhetnek a vérbe is, ami által a szervezet különböző részeibe juthatnak el.

### *A radon transzportja az emberi környezetben*

A radon átlagos aktivitás-koncentrációja az emberi környezet egyes színhegyein igen változó lehet. (Aktivitás-koncentrációnak az  $1 \text{ m}^3$  gázban, vagy  $1 \text{ l}$  folyadékban lévő aktivitást nevezik, mértékegysége:  $\text{Bq/m}^3$ , vagy  $\text{Bq/l}$ .) A talajból, a vízből és a földgázból eredő radon aktivitás-koncentrációk különösen bányákban, alagutakban, fürdőkhöz magasak. A belső terek, lakások radon-forrásai a következők lehetnek:

- radon-kiáramlás az épület alatti talajból,
- radon-kibocsátás az építőanyagokból,

- radon-beáramlás a külső levegőből szellőzés révén,
- radon-felszabadulás a vízvezetéki vízből és a földgázból.

Rendszerint az első három forrás a legjelentősebb.

A radon emisszió intenzitása adott forrásból az időegység alatt egységnyi térfogatban kialakuló radon-aktivitással adható meg. Egysége: Bq/m<sup>3</sup>/óra. Néhány háztípusra vonatkozó radonemisszió-intenzitást és radonaktivitás-koncentrációt az alábbi táblázatban mutatunk be.

Források	A belső terek aktivitás-koncentrációja (Bq.m <sup>-3</sup> )	Fajlagos kiszabadulási intenzitás (Bq.m <sup>-3</sup> .h <sup>-1</sup> )
Építőanyagok		
tégla és betonházak	3-30	2-20
faházak	≤ 1	≤ 1
Talaj	2-60	1-40
Külső levegő	3-7	2-5
Más források (víz, földgáz)	≤ 0,1	≤ 0,1
Összes forrás	10-100	6-60

A hazai átlag 55 Bq/m<sup>3</sup>; vályogházaknál a koncentráció értékek magasabbak, lakótelepi lakásokban viszont az átlagnál rendszerint viszonylag kisebb értékek mérhetők.

A földkéregből eredő radon emisszió egyes helyeken rendkívül magas értékeket is elérhet. Ilyen község Mátraderecske, ahol a radon szén-dioxid és metán kiáramlással együtt jelentkezik. Egyes mátraderecskei házakban 13-14 kBq/m<sup>3</sup> aktivitás-koncentrációkat is mértek. (Megjegyezzük, hogy pl. a volt NDK területén olyan épületeket is találtak, ahol az aktivitás-koncentráció 100 kBq/m<sup>3</sup> volt.)

A jelenleg általánosan elfogadott modell szerint a radioaktív sugárzások által okozott megbetegedések kockázata egyenesen arányos a szervezet által inkorporált dózissal (lineáris kockázati modell). A legújabb kutatások azonban azt mutatják, hogy alacsony dózisoknál a linearitás nem érvényes. Az USA-ban pl. a tapasztalat szerint alacsony dózisoknál a tüdőrák gyakorisága először csökken és csak magasabb dózisértékeknél kezd növekvő trendet mutatni. Mindenesetre az alacsony dózisoknál keletkező kockázatok kérdése jelenleg még vitatott.

A lakosság védelme érdekében a legtöbb országban megállapították a zárt terekben megengedhető radon aktivitás-koncentráció értékeit. Az Európai Közösség előírása szerint új épületeknél a megengedhető érték 200 Bq/m<sup>3</sup>, meglévő épületekben 400 Bq/m<sup>3</sup>.

A magas radon aktivitás-koncentrációk csökkentésére különböző műszaki megoldások állnak rendelkezésünkre. Újabban az építkezéseknél nemcsak az építőanyag tulajdonságait elemzik, hanem azt is, hogy a talajból kiáramló radon

mennyiséget hogyan lehet csökkenteni. A csökkentés egyik módja, hogy szigetelik az épületeket; egy másik módszer szerint a zárt terekből szellőztetéssel, vagy elszívással távolítják el a radont. Az eljárások hatékonysága különböző, a radon csökkentés mértékére jellemző számértékek a következők (a törtszámok az eredeti koncentrációhoz viszonyított értékeket mutatják):

- szigetelés:  $1/2$
- nyomásnövelés:  $1/3$
- padló alatti szellőzés:  $1/2$
- padló alatti nyomáscsökkentés:  $1/8 \dots 1/20$

A radon által okozott sugárzás a lakosság természetes eredetű sugárterhelésének mintegy felét teszi ki. Az egészségkárosító hatások tanulmányozása továbbra is időszerű, mivel az a munkahelyi-munkavédelmi problémakörön túlmenően lakóhelyi-közegészségügyi problémát is jelent.

