

ATOMERŐMŰVEK KÖRNYEZETI HATÁSAI

RADIOAKTÍV KIBOCSÁTÁSOK

2004

Somlai János

***ATOMERŐMŰVEK
KÖRNYEZETI HATÁSAI***

RADIOAKTÍV KIBOCSÁTÁSOK

2004

1. *Atomerőművek környezeti hatásai, radioaktív kibocsátások*

Az elmúlt évtizedek rohamos ipari, technikai fejlődése óhatatlanul az energiaigény megnövekedését eredményezte. Az utóbbi 100 évben az energiaigény közel húszszorosára emelkedett.

Bár egyre többen megértették az energiatakarékosság szükségességét és jelentős erőfeszítéseket is tettek, (pl. jobb hőszigetelésű épületek kialakítása, energiatakarékosabb gépek üzemeltetése, stb.) a termelés, illetve a fogyasztás rohamos növekedése újabb és újabb erőforrások bevonását igényli.

A fosszilis fűtőanyagok felhasználása nagymennyiségű széndioxid kibocsátásával jár. E mellett a szén égetésével számtalan környezetünket szennyező anyag (szénmonoxid, kén és nitrogén vegyületek, pernye) kerül a légterbe, melynek következményei riasztónak tűnnek.

Az alternatív energiaforrások nagymértékű hasznosítása még gyerekcipőben jár. Az eddig ismert technikákkal helyi igényeket részben vagy egészben ki lehet ugyan elégíteni, de mindez az összes energiaigényt figyelembe véve nagyon kismértékű. Nagyobb kapacitások esetén nem egyszer kiderült, hogy a teljesen „tisztnak” tűnő energiaforrás is befolyásolja a környezetet. (Nagykiterjedésű szélenergia telepeknél például megritkultak vagy eltűntek a madarak, ami magával hozta a rágcsálók nagyfokú elszaporodását.)

Természetesen törekedni kell a „tisztább” energiaforrások felkutatására, fejlesztésére, de be kell látnunk, hogy a civilizációval járó igények kielégítéséhez napjainkban szükség van az atomenergiára is.

A láthatatlan, sőt egyéb szerveinkkel sem érzékelhető sugárzással szemben viszont természetes az emberiség egy részének aggodalma, félelme. Mindezt megalapozták a radioaktív sugárzások alkalmazásával, illetve az atomreaktorok üzemeltetésével kapcsolatos balesetek is, amelyeket a kisebb technikai hiányosságok mellett elsősorban a kelő szaktudás hiánya, illetve figyelmen kívül hagyás okozott.

Könnyű belátni, hogy minden, pl. az elektromos áram használata, a közlekedés, a permetező szerek, vegyi gyárak és természetesen az atomerőművek is, mind-mind bizonyos mértékű kockázatot is jelentenek.

Ezt tudva – és az ésszerűség határában belül mindent megtéve a kockázat csökkentésére – el kell döntenünk, vállaljuk-e ezt a kockázatot, vagy lemondunk az igénybevétel által nyújtott számtalan civilizációs előnyről. A döntésnek természetesen kollektívnek kell lenni, mivel egy-egy ember összességében csak igen kis mértékben befolyásolná az eredményt. Amit viszont mindenképpen célszerű megtenni, az a kollektív energiatakarékosság, hogy ezzel jobban hozzájáruljunk környezetünk elszennyeződésének csökkentéséhez.

A kiadványban szeretnénk ismertetni az üzemelő atomerőművek által kibocsátott radioaktív izotópok környezeti hatását. A reális értékeléshez az alapfogalmak ismertetése mellett elengedhetetlen az egyéb forrásokból származó sugárterhelés mértékének, illetve a sugárzások egészségügyi kockázatának áttekintése is.

2. Radioaktivitás, radioaktív sugárzások

A természetben előforduló atomok többsége stabil. Az atomoknál megkülönböztetjük az atommagot, – ami pozitív töltésű protonokból és semleges, azaz töltés nélküli neutronokból áll – és a magot körülvevő elektron burkot.

A magban lévő protonok száma meghatározza az adott atom rendszámát azaz, hogy milyen atomról (pl. hidrogén, szén, urán) van szó.

A magban lévő protonok és neutronok számának összege adja meg az atom tömegszámát. Azonos protonszám (azaz azonos kémiai elemek) esetén is előfordul, hogy a magban található neutronok száma eltérő, melyeket izotópoknak nevezünk.

A magban lévő vonzó és taszító erők egyensúlyát, azaz a stabilitást nagymértékben befolyásolja a protonok és neutronok száma, illetve egymáshoz viszonyított aránya. Kedvezőtlen értékek esetén az atommagok spontán, mindenféle külső hatás nélkül kisebb részecskék, illetve energia kibocsátásával stabilabb állapotba kerülhetnek. Ezt a jelenséget radioaktív bomlásnak az adott atomot, pedig radioaktív izotópnak nevezzük, melyeket a kémiai jel (vegyjel) elé felső indexbe vagy a vegyjel után kötőjellel írt tömegszámmal jelölünk, pl.: ^{238}U vagy U-238 – a 238-as tömegszámú uránt jelöli.

A radioaktív bomlás jellemzésére az egységnyi idő alatt elbomló atommagok számát használjuk, amit aktivitásnak nevezünk. A gyakorlatban az időt egy másodpercnek vesszük, így az aktivitás az egy másodperc alatt elbomlott magok számát jelenti.

A radioaktivitás mértékegysége a becquerel (ejtsd: bekerel), jele Bq. Tehát egy adott anyagnak egy becquerel az aktivitása, ha abban egy másodperc alatt egy radioaktív atommag bomlik el. Ez nagyon kis mennyiség, így a gyakorlatban ennek többszöröseit jelentő kiló-, mega- és giga-becquerel (kBq, MBq, GBq) egységet használják.

A kezdeti időkben egy adott radioaktív anyag aktivitását 1 gramm ^{226}Ra (rádium) aktivitásához viszonyították. Mértékegysége a curie (ejtsd: küri), jele: Ci. 1 Ci másodpercenként $3,7 \cdot 10^{10}$ bomlást jelent, mivel másodpercenként ennyi bomlás játszódik le 1 g rádiumban (^{226}Ra). Az aktivitást tömeg vagy térfogat egységre vonatkoztatva kapjuk az aktivitás koncentrációt. Egységei a környezetvédelmi gyakorlatban Bq/kg, Bq/l, Bq/m³.

A radioaktív izotópok további fontos jellemzője a felezési idő (jele: T), ami azt az időt jelenti, amennyi idő alatt a radioaktív atommagok száma a bomlások során a felére csökken. Így könnyen belátható, hogy egy felezési idő alatt az aktivitás a felére, két felezési idő alatt (ennek felére azaz) a negyedére, három felezési idő alatt a nyolcadára stb. csökken. 12–15-szeres felezési idő alatt a radioaktív izotóp gyakorlatilag lebomlik. A felezési idő az egyes izotópokra jellemző, értéke igen tág határok közt változhat /Th-232 (tórium): 14000 millió év, U-238 (urán) 4500 millió év, Ra-226 (rádium): 1622 év, Cs-137 (cézium) 30,2 év, I-131 (jód): 8 nap, Tc-99m (technécium) 6 óra stb./.

A radioaktív bomlások során leggyakrabban ún. α (pozitív töltésű hélium atommag), illetve β^+ vagy β^- (pozitron vagy elektron) részecske lép ki a magból. Sokszor az így keletkezett atommag energetikai szempontból még nem a lehető legalacsonyabb, hanem egy ún. gerjesztett állapotban van. Ebből az állapotból γ -sugárzásnak nevezett elektromágneses sugárzás kibocsátásával kerül stabilabb állapotba.

Előfordulhat, hogy a keletkezett új atommag sem stabil, s így további bomlások mennek végbe egy ún. bomlási sort kialakítva.

A kibocsátott α -részecskék viszonylag nagy tömegük és méretük miatt gyakran ütköznek a környezetükben lévő anyagok atomjainak elektronjaival. Energiájuktól függően 5-

10 cm levegőben, illetve néhány mikrométer vízben vagy testszövetben elnyelődnek. Energiájukat tehát rövid távon belül leadják, így erőteljesen roncsolják az élő anyagot.

A β -részecske a testszövetben néhány mm mélységig tud behatolni, a levegőben akár több métert is megtesz.

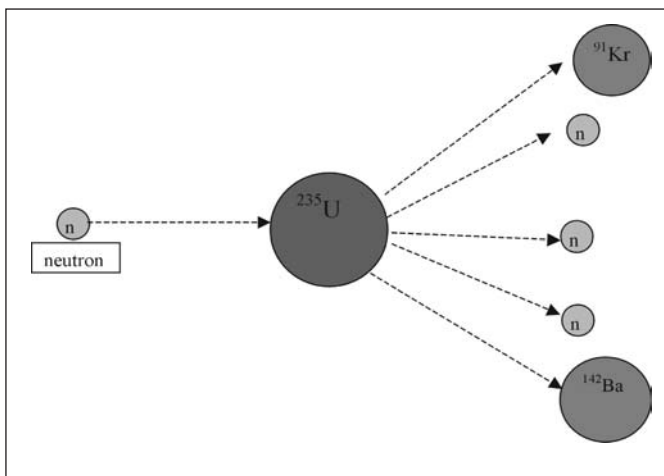
A gamma-sugárzás már nagy hatótávolságú sugárzás, energiájától függően akár számottevő gyengülés nélkül is áthaladhat a testszöveten.

Nehéz, instabil magok úgy is stabilizálódhatnak, hogy két középnehéz magra esnek szét, miközben 2-3 neutront bocsátanak ki.

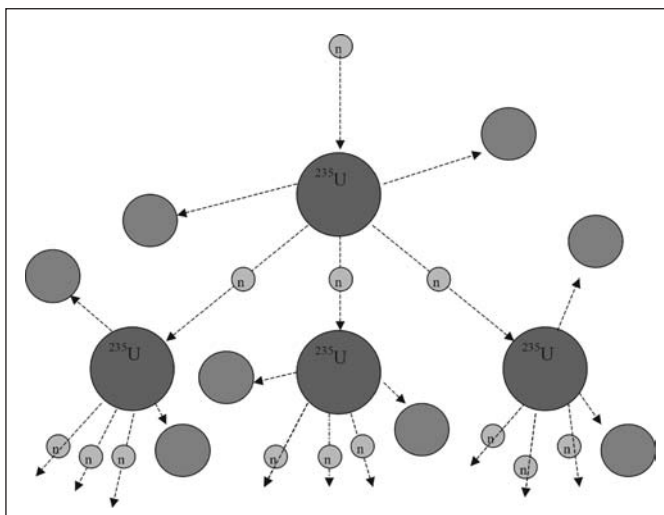
Bár nem természetes folyamat, de gyakorlati szempontból sokkal jelentősebb az ún. neutron-indukált maghasadás. A folyamat során egy neutron befogódik egy nehéz magba, amely végül két középnehéz magra hasad szét, 2-3 neutron felszabadulása mellett. A keletkezett hasadvány termékek többnyire radioaktívak, amelyek béta- és gamma-sugárzással stabilizálódnak (1. ábra.)

A felszabadult neutronok, pedig újabb hasadási reakciót válthatnak ki. Megfelelő körülmények közt a folyamat fennmarad, azaz a környező hasadó képes atommagokkal mindig kölcsönhatásba lép anynyi neutron, ami a következő hasadást kiváltja. Ez az ún. szabályozott maghasadás, az atomreaktorok működésének az alapja.

Kellően dúsított, megfelelő geometriájú, neutronreflektáló anyagokkal körülvett rendszerben az egy hasadást követően keletkezett neutronok több mint egy újabb hasadást idézhetnek elő, beindítva egy láncreakciót (2. ábra.), ami végül atomrobbanáshoz vezethet.



1. ábra Az urán neutron-indukált maghasadása



2. ábra Az urán neutron-indukált maghasadásának láncreakciója

Az atomreaktorokkal kapcsolatban meg kell említeni azt a folyamatot is, amikor egy adott stabil (esetleg radioaktív) izotóp atommagjába egy részecske (neutron, proton, α -részecske stb.) behatol, s így egy radioaktív új mag keletkezik, ami különböző sugárzás kibocsátásával bomlik. Ez az ún. magreakció tehát külső hatásra következik be. Ilyen folyamatok játszódnak le a kozmikus sugárzás hatására a légkör felső rétegeiben de a neutronok hatására az atomerőművekben is (aktivációs termékek).

3. *Dózisfogalmak*

A sugárzás energiát hordoz. Ennek egy része az egyes anyagokkal, közegekkel kölcsönhatásba lépve elnyelődik, és az energiáját átadja. Így pl. a nap sugárzása a talajban elnyelődik, miközben az felmelegszik, vagy a mikrohullámú sütőben az ételben elnyelődött mikrohullám energiája felmelegíti azt.

Ha egy anyagot radioaktív sugárzás ér, az energiájának egy része elnyelődik az anyagban. A tapasztalatok alapján az elnyelt energiával arányos a végbemenő változás.

A várható károsodások becslésére, előrejelzésére az elnyelt energiaadaggal (dózissal) arányos mennyiségeket használunk. Így a sugárzásnak kitett anyag egységnyi tömegében elnyelt energiát elnyelt dózissal nevezzük. Jele D . /Mértékegysége az $1 \text{ Joule} \cdot \text{kilogramm}^{-1}$, amelynek a gray Gy (ejtsd: gréj) elnevezést adták. Ez tehát azt jelenti, hogy ha a besugárzott anyag egy kilogrammjában 1 joule energia nyelődött el, akkor az elnyelt dózis, – azaz ami arányos a várható károsodás mértékével –, egy gray./

Élőlények esetén azt tapasztalták, hogy a károsító hatást az elnyelt dózis mellett a sugárzás típusa és energiája valamint a sugárzást ért szervek, szövetek minősége is jelentősen befolyásolja. Tehát a biológiai elváltozások, károsodások mértéke azonos elnyelt energia esetén is nagymértékben függ attól, hogy milyen fajta sugárzás (alfa, béta, gamma, neutron), melyik szervben vagy szövetben nyelődött el.

A sugárzás típusát, energiáját is figyelembe vevő dóziszfogalom az egyenérték dózis (jele H_T). Ezt úgy kapjuk meg, hogy az elnyelt dózis értékét megszorozzuk az adott sugárzásra jellemző W_R súlytényezővel. A súlytényezőt gamma sugárzás esetén egynek vették, és ehhez viszonyítva állapították meg, hogy a többi sugárzás esetén azonos elnyelt dózissal hányszor nagyobb károsodás várható. A károsodás szempontjából legveszélyesebb az alfa-sugárzás, hiszen a gamma-sugárzáshoz viszonyítva azonos elnyelt energia esetén hússzor nagyobb biológiai hatásra kell számítani. A neutronok esetén pedig döntő szerepe van a szervezettel kölcsönhatásba lépő neutronok energiájának.

A különböző szervek, szövetek dózissai (egyenérték dózissok) azonban nem egyforma mértékben járulnak hozzá az emberi szervezet egészének károsodásához. Vannak érzékenyebb és kevésbé érzékeny szövetek. Ezt egy újabb súlytényezővel vesszük figyelembe, ami kifejezi, hogy az egyes szövetek milyen arányban járulnak hozzá az egész szervezet károsodását előre jelző effektív dózishoz (jele E). A legérzékenyebbek az ivarszervek, de döntő hatása van a vérképző és emésztő szerveknek is. A mértékegység itt is a $\text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$ de ezt sievertnek (jele Sv) nevezik.

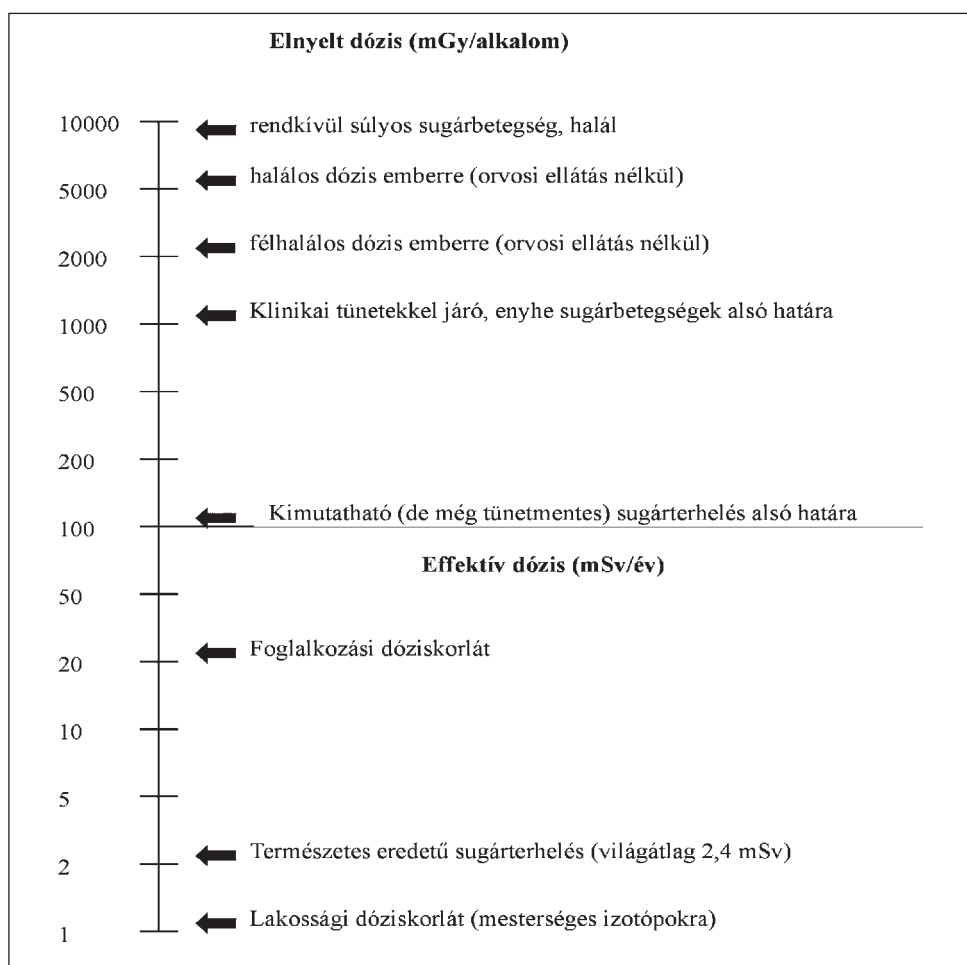
Mindhárom dózissnál használják a dózisteljesítmény fogalmát, ami az adott dózis időegységre jutó hányadát jelenti. Ez azért fontos, mert ha tudjuk, pl. egy óra alatti dózis mennyiségét, azaz a dózisteljesítményt, kiszámíthatjuk adott időtartam alatt várható dózis értéket, s így szükség esetén megfelelően beavatkozhatunk.

A sugárterhelések számításánál még számos dóziszfogalmat használnak. Ilyen a lekötött dózis fogalma, ami azt fejezi ki, hogy egy szervezetbe került radioizotóp mekkora dózist okoz az alatt az idő alatt, amíg vagy le nem bomlik, vagy a kiválasztás révén ki nem ürül a szervezetből.

Egy csoport, vagy akár a népesség sugárterhelésének jellemzésére vezették be a kollektív dózis (jele S) fogalmát, melynek értéke a sugárterhelést elszenvedett egyedek számának (N_i) és a csoport átlagos effektív dózisának (E_i) szorzata. Mértékegysége a személy · Sv.

Nagyszámú népcsoport nagyon kis dózisu sugárterhelése esetén azonban a kollektív dózis kevésbé alkalmas az egészségügyi károsodás mértékének becslésére. Ugyanis néhány ember több száz mSv, illetve sok ember néhány tized mSv sugárterheléséből számolt azonos kollektív dózis ellenére is a gyakorlatban eltérő (az utóbbi esetben jóval kisebb) egészségügyi kockázat várható.

Néhány jellegzetes dózisérték és dóziskorlát a 3. ábrán látható.



3. ábra Jellegzetes dózis-értékek, korlátok

4. *Biológiai hatások*

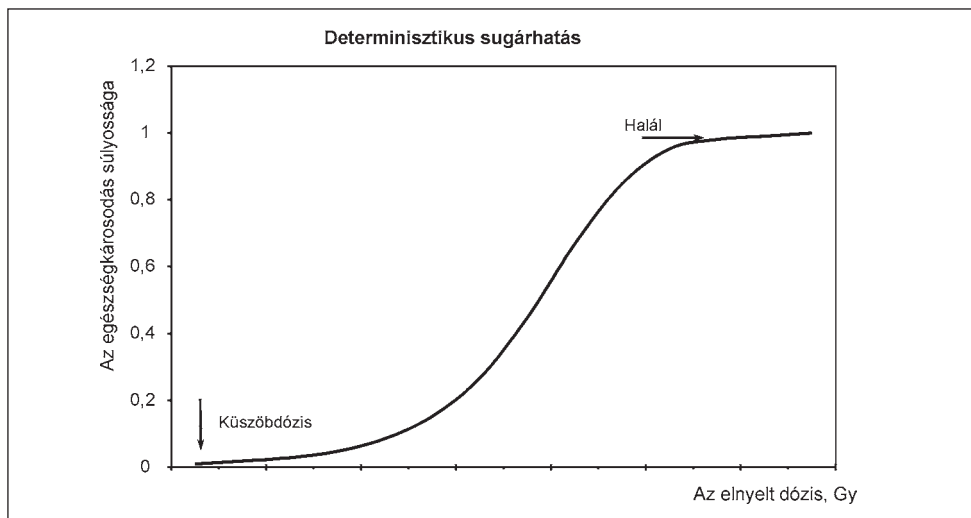
Abban az esetben, ha radioaktív sugárzás éri az élő szervezetet, akkor a pályája mentén kölcsönhatásba lép vele és részben vagy egészben elnyelődik.

A kölcsönhatás fizikai folyamattal kezdődik, amelyet kémiai, biokémiai majd biológiai átalakulások követnek, s végül (esetleg csak évek, évtizedek múlva) a sejtek, szövetek esetleg az élő szervezet pusztulásához vezet.

A nagy dózisok egészségkárosító hatását a sugárzások felfedezését követően hamar felismerték. A későbbi vizsgálatok kimutatták, hogy kis és nagy dózisok esetén jelentősen eltérő egészségkárosító hatásra számíthatunk.

Meghatározható egy – az egyéni érzékenységtől függően kismértékben változó – küszöbérték, amelynél nagyobb dózis hatására mindig fellépnek a tünetek, és a dózis növekedésével a betegség súlyosbodik. Ezt determinisztikus hatásnak nevezzük.

A dózis – hatás összefüggést egy „S” alakú görbével jellemezhetjük (4. ábra).



4. ábra Ionizáló sugárzások determinisztikus hatásának dózis – hatás összefüggése

A determinisztikus hatások közé tartoznak az akut sugársérülések szöveti-szervi károsodásai, az akut sugárbetegség tünet együttesei (csontvelő, gyomor-bélrendszer, esetleg idegrendszer tünetek), bőrégések, fekélyek keletkezése.

Az egyes elváltozások kiváltását előidéző küszöbdózisok jelentősen változhatnak.

Míg átmeneti sterilitást már 0,15 Sv dózis is okozhat, a végleges sterilitás küszöbdózisa 3,5-6,0 Sv. Általában tartós elváltozások 0,5 Sv küszöbdózistól kezdve alakulnak ki.

A sugársérülésnél meghatározó szövetféleségek sugárérékenysége a nyirokszövet, csontvelő, gyomor és bélrendszer nyálkahártyája, ivarsejtek, bőr szaporodását biztosító rétege, erek, mirigyszövetek, kötőszövetek, izom és idegszövetek sorrendjében csökken.

A sugárbetegség tünetei, és időbeni lefutása elsősorban az elszennvedett dózistól függ. Néhány Gy után 2-3 órával jelentkezik a gyengeség, hányás, hasmenés, levertség, de 10 Gy körül már 30 percen belül érzékelhetők a hatások. A betegség lefolyását te-

kintve a kezdeti tünetek után egy nyugalmi szakasz következik, ami átmeneti javulással járhat. 2-3 Gy esetén ez 10-20 napig is eltarthat, majd az ún. kritikus szakaszban a tünetek erőteljesebben visszatérnek, nyálkahártya-, és bélvérzések is felléphetnek. Nagyon súlyos esetben az idegrendszer is károsodik, majd beáll a halál. Túélés esetén nagyon lassú javulás várható. Determinisztikus hatásoknál használják a félhalálos dózis ($LD_{50/30} = 4-5$ Gy) és halálos dózis ($LD_{100/30} = 6-7$ Gy) fogalmát. Ez azt jelenti, hogy 30 napon belül mindennemű orvosi beavatkozás nélkül a sugárkárosodást szenvedett egyének fele ($LD_{50/30}$) illetve mindenki ($LD_{100/30}$) meghal. Igen nagy dózisok esetén (>15 Gy) a halál néhány órán, napon belül beáll.

Megnyugtatóként megállapíthatjuk, hogy ilyen hatások elsősorban csak igen súlyos nukleáris balesetek során, és akkor is csak az üzemen belül a kezelő vagy a beavatkozó személyzetnél léphet fel. Sajnos azonban történtek már olyan sugár-balesetek (pl. elvesztett vagy ellopott sugárforrásokkal), amelyek a lakosság szűk csoportjában is determinisztikus hatást váltottak ki, s nem egyszer halált okoztak.

A népesség szempontjából sokkal jelentősebbek a kis dózisokat követő késői ún. sztochasztikus hatások. Az ionizáló sugárzások rákkeltő hatásának a dózistól való függésére epidemiológiai megfigyelések utalnak. Ezek az adatok elsősorban a hirosimai és nagaszakii atombomba támadások túlélői, sugárkezelést kapott betegek, illetve sugárveszélyes munkakörben dolgozók körében végzett egészségügyi felmérésekből származnak. A felmérést nehezíti, hogy sokszor a kapott dózist csak becsülni lehet (pl. atomtámadásnál), illetve a daganatos megbetegedések csak évek, évtizedek múlva alakulnak ki. Az epidemiológiai megfigyelések egyértelműen bizonyították, hogy az ionizáló sugárzás rákkeltő környezeti ágens, azaz minden szövetben és minden életkorban képes daganatot okozni. Ugyanilyen daganatok spontán módon egyéb hatásra (pl. permetező szerek, kipufogógázok, speciális porok stb.) is kialakulhatnak.

Tipikus, sugárzás hatására is kialakuló rákfajta a csontvelőrák, tüdődaganatok, emlőrák, pajzsmirigyrák, gyomorrák, vastagbél tumor, viszont nem tapasztaltak még sugárzás hatására kialakult végbél tumoros vagy méhnyak rákos esetet.

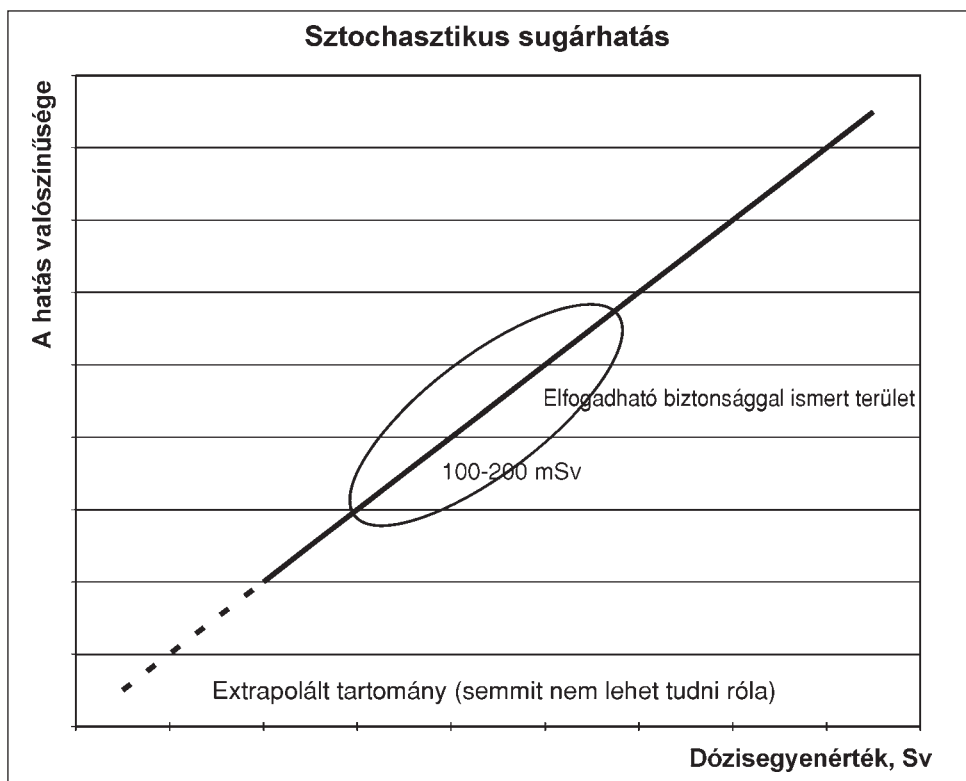
A kis dózisokat követő késői, ún. sztochasztikus hatások jellemzője tehát, hogy nincs küszöbdózis, hosszú lehet a lappangási idő és gyakorlatilag a rákos megbetegedések számának megnövekedésére kell számítani.

A lakosság szempontjából az a kérdés, hogy milyen következménnyel jár, azaz mekkora kockázatot jelent alacsony dózisteljesítménynél egy alacsony dózisú és évek során lassan felhalmozódó sugárterhelés.

Kérdés tehát, hogy a kis dózisok mekkora kockázatot jelentenek. Az epidemiológiai vizsgálatokat néhány 100 mSv dózist kapott embereknél végezték el. Ennél lényegesen kisebb dózisoknál a várható kockázat mértéke olyan kicsi, azaz olyan alacsony esetszámmal lehet számolni, hogy már epidemiológiai vizsgálatokkal nem deríthető fel.

Ilyen esetekben a dózis-hatás modelleket alkalmazzák, amikor magasabb sugárdózisokból (néhány 100 mSv) származó epidemiológiai adatokból következtetnek az alacsonyabb sugárzások kockázatára. Az általánosan elfogadott vagy legalábbis ajánlott modell a küszöbdózis nélküli lineáris összefüggés. Tehát már igen kis dózis is kiválthat rákos elváltozást és ennek valószínűsége a dózis változásával lineárisan változik. (5. ábra).

Ezek alapján, ha egy csoport minden tagja 100 mSv helyett 10 mSv sugárterhelést kap, akkor a várható megbetegedések száma is a tízedére csökken. A felmérések alapján ez a linearitás több 100 mSv tartományban jó közelítést ad a várható megbetegedé-



5. ábra Ionizáló sugárzások sztochasztikus hatásának dózis – hatás összefüggése

sek becslésére. Igen kis dózisos esetén azonban már többen támadják a lineáris modell alkalmazását, és jelentős felülbecslésről beszélnek. Ezt részben a felmérési statisztikákkal, a daganat kialakulásának folyamatával, a szervezet sérüléseit helyreállító mechanizmussal stb. indokolják. A „konzervatív” tábor viszont legyeken végzett és a linearitást igazoló kísérletekre, sejtbiológiai mérésekre és kisebb csoportoknál jóval 100 mSv alatti sugárterhelésnél fellépő daganatos megbetegedésekre hivatkoznak. Ebben a tartományban olyan nagy a bizonytalanság, hogy a társadalom védelme és megnyugtatása végett a lineáris modellt célszerű használni.

A felmérések alapján megállapították, hogy rövid idő alatt (ún. akut módon) kapott 1 Sv effektív dózis $5 \cdot 10^{-2}$ valószínűséggel okoz halálos és $1 \cdot 10^{-2}$ valószínűséggel nem halálos kimenetelű rákos megbetegedést; illetve $1,3 \cdot 10^{-2}$ valószínűséggel genetikai károsodást. Tehát $7,3 \cdot 10^{-2}$ a valószínűsége annak, hogy 1 Sv az egészségre káros hatással lesz. A várható halállal végződő rákos megbetegedések megoszlása a 1. táblázatban látható.

A linearitást feltételezve tehát ez azt jelenti, hogy egymillió ember 1 mSv-es sugárterhelése esetén $7,3 \cdot 10^{-5} \cdot 10^6 = 73$ ember megbetegedése – 50 halálos és 10 gyógyítható, azaz nem halálos kimenetelű rák eset és 13 genetikai károsodás – várható.

Mint a 3. ábrán volt látható, a lakossági dóziskorlát a mesterséges izotópokra vonatkoztatva 1 mSv/év. A nemzetközi ajánlások szerint akkor lehet ezt biztosítani, ha 0,1 mSv/év értéknél nem származik több egy-egy forrásból. Ezért azt ajánlják, hogy pl.

atomerőművek esetén még a legkritikusabb csoport (azaz a közelben élők) sugárterhelése se érje el a 0,1 mSv/év értéket. A Paksi Atomerőmű esetén az eddigi mérések alapján ez kisebb, mint 0.1 μ Sv/év volt kivéve a 2003 évi üzemzavart, amikor elérte a 0.32 μ Sv értéket. Más szóval az ajánlott korlát ezrede körüli értéket tett ki. A kritikus csoportnál kapott átlagos értékkel (0.1 μ Sv/év) számolva valamint hazánk teljes lakosságát (10^7 fő) figyelembe véve és a linearitást ilyen kis dózisoknál is feltételezve évente 0.73 fő egészségkárosodása várható. Ebből 0.6 fő kapna rákos megbetegedést, miközben például 2001 évben a Nemzeti Rákregiszter adatai alapján hazánkban 51136 új daganatos beteget regisztráltak.

Ekkora kockázatot az előnyök figyelembe vételével érdemesnek tűnik vállalni.

1. táblázat. Halállal végződő rákos megbetegedések valószínűsége alacsony dózisu (100 mSv) sugárterhelés esetén 100 000 fős népességre vonatkoztatva

Szerv, szövet	Esetszám (100 mSv) ⁻¹
Hólyag	30
Csontvelő	50
Csontfelszín	5
Mellkas	20
Vastagbél	85
Máj	15
Tüdő	85
Nyelőcső	30
Petefészek	10
Bőr	2
Gyomor	110
Pajzsmirigy	8
Maradék szövetek	50
Összesen	500

5. Sugárzások forrásai

Felmerül a kérdés milyen módon, és honnan érhet bennünket radioaktív sugárzás.

Az emberiséget érő sugárzásokat különböző szempontok szerint csoportosíthatjuk. Elterjedt a sugárzás forrása és a sugárhatást elszenvedő egyén relatív elhelyezkedése, illetve a sugárzások eredete szerinti besorolás.

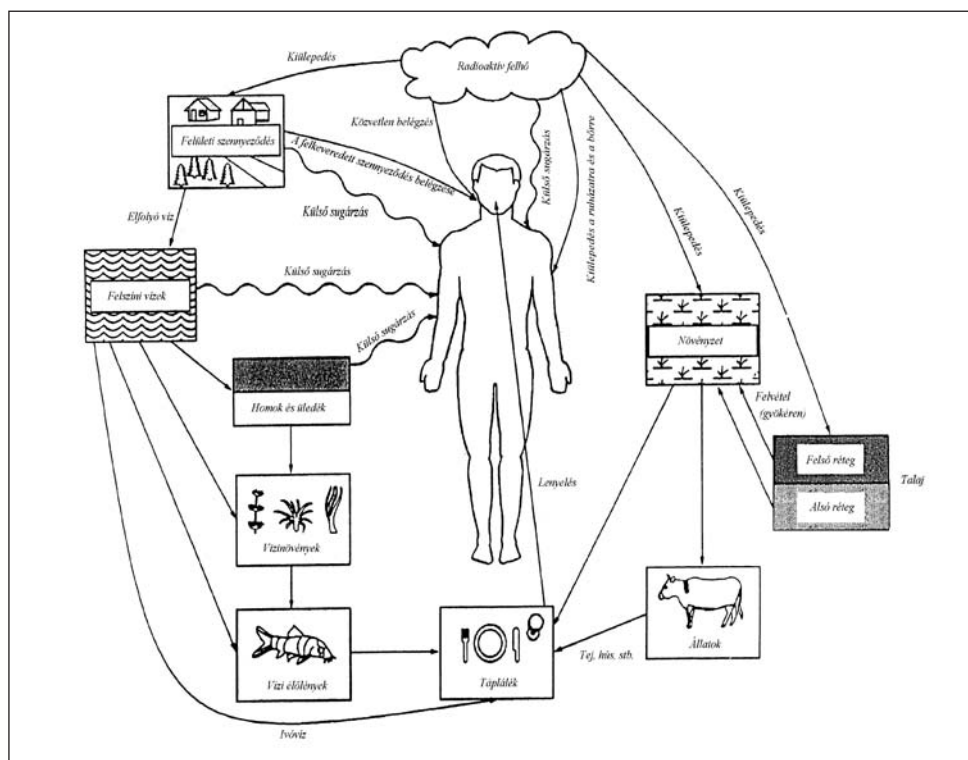
5.1. Külső és belső sugárforrások

A sugárforrás és egy személy elhelyezkedése alapján megkülönböztethetünk külső és belső forrásokat. Amennyiben a sugárforrás a szervezetünkön kívül helyezkedik el külső forrásról beszélünk. Ez ellen sok esetben könnyű védekezni, hiszen ha távolabb megyünk, vagy kevesebb időt töltünk el a közelében, esetleg különböző árnyékoló anyagokat használunk, jelentősen csökkenthetjük a sugárterhelést. Persze ha az egész környezetünk szennyezett a sugárzó anyaggal, már közel sem ilyen egyszerű a megoldás. Ez az eset állhat fent egy nukleáris balesetet követően a szabadban, vagy nem megfelelő építőanyag (pl. magas ²²⁶Ra koncentrációjú salak) használata esetén a lakásban, stb. Ezek káros hatásának minimalizálása céljából vezették be a dózisteljesítményre, illetve a külső forrásokból származó dóziszra vonatkozó korlátokat.

Amennyiben egy radionuklid táplálkozás vagy légzés (esetleg sérülés) során bejut a szervezetbe, és ott hosszabb-rövidebb ideig megkötődik, belső sugárterhelésről beszélünk. Itt az egyetlen hatásos védekezés a megelőzés. Természetesen az is segítség, ha valamilyen

módon meg tudjuk gyorsítani a szervezetbe került radionuklid kiürülését, de ez a lehetőség bonyolult és jelentősen függ az adott szennyező izotóp kémiai tulajdonságaitól. Különösen veszélyesek azok a radionuklidok, melyeknek felezési ideje hosszú és jól kötődnek, beépülnek a különböző szervekben, szövetekben. Ilyen például a ^{226}Ra (rádium), ^{90}Sr (stroncium), melyek a csontszövetbe épülnek be és a csontdaganatos, illetve – a vérképző szervek közvetlen károsítása révén – a leukémiás megbetegedések előfordulási valószínűségét növelik meg. Van olyan radionuklid is, pl. a ^3H (trícium), amely a szervezet nagy vízforgalma miatt gyorsan kiürül, így viszonylagos egészségkárosító hatása jóval kisebb.

A levegővel vagy vízzel a környezetbe került radionuklidok okozta sugárterhelés lehetséges útvonalai a 6. ábrán láthatók.



6. ábra A levegővel vagy vízzel a környezetbe került radionuklidok okozta sugárterhelés lehetséges útvonalai

A belső sugárterhelés elkerülése, vagy minimalizálása céljából ún. származtatott korlátokat vezettek be, azaz a levegőre vagy az élelmiszerekre megadják azt a maximális aktivitáskoncentráció értéket, aminek belégzése vagy lenyelése még nem okoz a dóziskorlátnál nagyobb sugárterhelést. Ezért van nagy jelentősége a nukleáris létesítmények környezetében végzett levegő, illetve élelmiszer vizsgálatoknak.

Az egyes sugárzások jelentősen eltérő veszélyt jelenthetnek külső, illetve belső sugárforrásként. Az alfa-sugárzás nagyon rövid hatótávolságú, a bőrre kerülve a legfelső, többnyire már nem élő hámrétegben elnyelődik, így mint külső sugárforrás nagyobb

aktivitások esetén is veszélytelennek mondható. Más a helyzet, ha ugyanez az α -sugárzó radionuklid lenyelés, belégzés során a szervezetünkbe kerül. Akkor is rövidtávon belül leadja az energiáját, csak most az elnyelő közeg éppen a mi szervezetünk. Megállapították, hogy azonos elnyelt dózis esetén az alfa-sugárzásnál a gamma-sugárzáshoz viszonyítva hússzor nagyobb károsodásra kell számítani. Tehát az alfa-sugárzó radionuklidokkal azért kell különösen óvatosan bánni, mert szervezetbe jutásuk esetén komoly egészségkárosító hatást fejtenek ki. Ide sorolható a későbbiekben tárgyalt ^{222}Rn (radon) és leányelemei okozta sugárterhelés, de ugyancsak jelentős α -sugárzást bocsáthat ki egy nukleáris baleset során a légkörbe került fűtőelem szemcse (ún. forró szemcse), amely belelegezve a tüdőben megtapadhat és ott hosszú ideig károsíthatja a szöveteket.

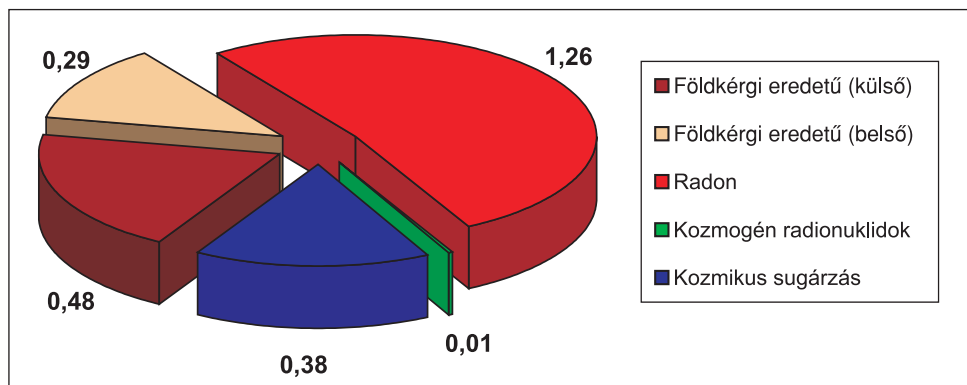
A béta-sugárzás hatótávolsága már nagyobb, a bőr mélyebb rétegeibe is behatol. Nagyobb dózisok esetén számítani kell a bőrdaganatos megbetegedések és a szemlencse károsodások számának megemelkedésére. A szervezetbe kerülve néhány mm távolságon belüli szerveket, szöveteket károsítja. A béta sugárzó ^{90}Sr a csont spongyaszerű állományába beépülve a környezetében lévő vérképző szerveket roncsolja, ami leukémiához vezethet.

A gamma-sugárzás hatótávolsága már nagynak mondható. A szervezet mélyebb rétegében elhelyezkedő sugárérzékeny szerveket, szöveteket is eléri, sőt egy része kölcsönhatás nélkül halad át rajtuk. Így a gamma-sugárzás külső és belső forrásként az egész testet egyaránt károsíthatja.

5.2. Természetes eredetű sugárterhelés

Mivel az élő szervezetet a radioaktivitás felfedezése előtt is állandóan érte radioaktív (ionizáló) sugárzás, a csoportosítás a sugárzás eredete, forrása alapján is történhet.

Természetes eredetűnek a természetben előforduló formában lévő sugárzástól származó sugárterhelést értjük. Ennek a népességgel súlyozott világátlagos 2,4 mSv/év. Ide tartoznak a kozmikus sugárzások, illetve a kozmikus sugárzásnak a légkör atomjaival lejátszódó kölcsönhatás során keletkező úgynevezett kozmogén radionuklidok, továbbá a föld kialakulásakor már jelen lévő, de hosszú felezési idejük miatt mindmáig le nem bomlott földkérgi eredetű (primordiális) radioizotópok. A természetes eredetű sugárzást háttérsugárzásnak is nevezzük, s értékét nagymértékben befolyásolják a környezeti tényezők. A természetes eredetű sugárterhelés megoszlását a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra A természetes eredetű sugárterhelés megoszlása (mSv/év)

Kozmikus sugárzás

Az űrből a Föld légkörébe érkező nagy energiájú részecske sugárzásokat elsődleges kozmikus sugárzásnak nevezzük. Ezek vagy a galaxisból – például a szupernóva robbanásokból – vagy a Napból származnak. Egy részét a Föld mágneses tere eltéríti, melynek mértéke a földrajzi szélességtől, illetve a naptevékenység miatti mágneses terek változásától függ.

A légkörbe érkező kozmikus sugarak a légkör atomjaival kölcsönhatásba lépve másodlagos kozmikus sugárzásokat, illetve magreakció során úgynevezett kozmogén radionuklidokat hoznak létre. A talajfelszínen mérhető kozmikus sugárzást nagymértékben befolyásolja a tengerszint feletti magasság, a földrajzi szélesség és az árnyékolás. A tengerszinten például a kozmikus sugárzástól származó éves effektív dózis 0,27 mSv, a közel 4000 m magasban fekvő, La Pazban (Bolívia) ez már 2,02 mSv, míg a népességgel súlyozott világtálag 0,38 mSv.

Kozmikus sugárzás esetén nem feledkezhetünk meg a légi közlekedésnél fellépő sugárterhelésről sem. Mértéke a repülési magasságtól és az esetleges naptevékenységektől is nagymértékben változhat. 10 km magasságban repülve 5 $\mu\text{Sv}/\text{óra}$, míg 15 km magasságban már 10 $\mu\text{Sv}/\text{óra}$ átlagos dózisteljesítménnyel kell számolni.

A kozmikus sugárzás hatására keletkezett kozmogén radionuklidok külső sugárterhelés szempontjából elhanyagolhatóak, de a belső terhelést tekintve is csak a ^{14}C (szén) izotóp említhető meg, amely évi 12 μSv dózist eredményez.

Földkérgi eredetű sugárzások

A földkérgi eredetű radionuklidok közül, dóziszárulék tekintetében legjelentősebb a ^{238}U (urán), ^{232}Th (tórium) és leányelemei, illetve a ^{40}K (kálium). Mivel az urán és tórium bomlásakor keletkező leányelemek is radioaktívak, így bomlási sorok alakulnak ki.

A természetes eredetű radioizotópok a talaj mellett a levegőben, a vízben, növényekben is jelen vannak, melyek a táplálékláncot is figyelembe véve az emberi szervezet külső és belső sugárterhelését idézik elő.

A földkérgi eredetű külső sugárterhelést a szabadban, a földkéregben lévő radionuklidok okozzák. A ^{238}U , ^{232}Th , illetve a ^{40}K népességgel súlyozott átlagos koncentrációja a talajban 33-45 illetve 420 Bq/kg. A dózisteljesítmény becslésénél a hatótávolságok alapján csak a gamma-sugárzást kell figyelembe venni, de a 30 cm-nél mélyebben fekvő kőzetek sugárzása a talajban elnyelődik, így a felszíni értékhez alapvetően már nem járul hozzá. A talaj víztartalma, az esetleges hótakaró vastagsága is nagymértékben befolyásolhatja a mérhető dózisszinteket. Az 1 m magasságban mért elnyelt dózisteljesítmény, népességgel súlyozott világtálag 59 nGy/óra, de a világ néhány pontján ennek akár ezerszerese is előfordulhat.

Az emberek átlagosan idejük 80%-át épületekben töltik, így a sugárterhelés szempontjából az épületeken belüli dózisteljesítményt is célszerű megvizsgálni. Az építőanyagok egyrészt leárnyékolják a külső sugárzást, másrészt viszont a természetes eredetű radionuklid tartalom miatt sugárforrásként jelentkeznek. Az épületeken belüli nemzeti átlagok 20-200 nGy/óra közt ingadoznak, a népességgel súlyozott világtálag 84 nGy/óra. Hazánkban az OSSKI (Országos Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutató Intézet) legutolsó felmérése alapján 116 nGy/óra.

Meg kell jegyezni, hogy amennyiben az elnyelt dózisteljesítmény adatokból az emberi szervezet várható károsodását is kifejező effektív dózist kívánunk számolni, figye-

lembe kell venni az érzékenyebb szervek szervezeten belüli árnyékoltságát is. (Ez felnőtteknél 0,7 Sv/Gy, gyerekeknél 0,8 Sv/Gy szorzótényezőt jelent). Így a földkérgi izotóptól származó külső sugárterhelés (effektív dózis) világátlaga 0,48 mSv/év.

Belső sugárterhelés szempontjából – a külön tárgyalt ^{222}Rn (radon) izotópot nem tekintve – a táplálékláncban mindig előforduló ^{40}K a legjelentősebb. A légzés és élelemfogyasztás révén szervezetbe került földkérgi radionuklidok okozta éves belső sugárterhelés (lekötött effektív dózis) világátlaga 0,29 mSv/év, melyből 0,17 mSv/év a ^{40}K míg 0,12 mSv/év a ^{238}U és ^{232}Th radionuklidtól származik.

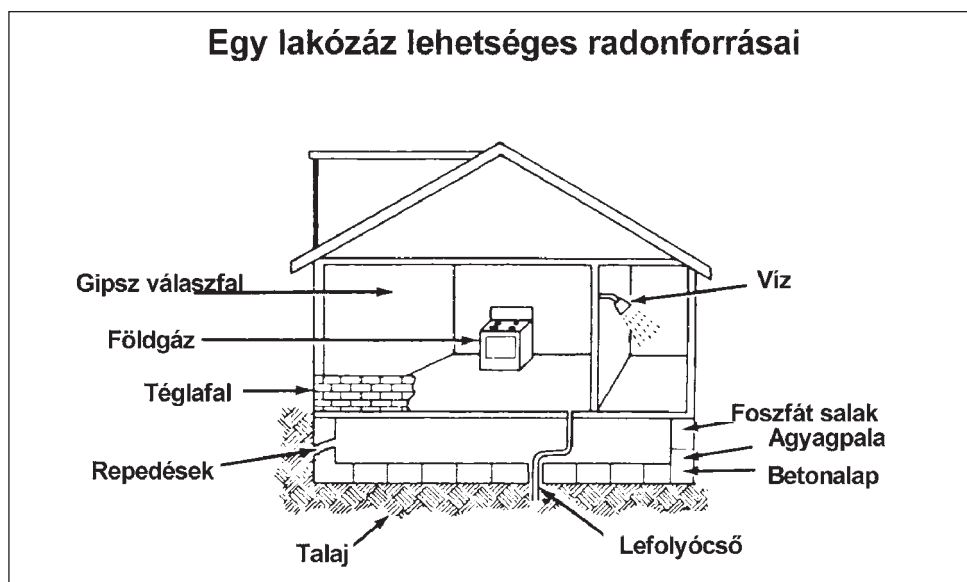
A radontól származó sugárterhelés

Mivel a természetes eredetű sugárterhelés közel fele a radontól származik külön figyelmet érdemel. A ^{222}Rn (radon) az urán sorban található ^{226}Ra (rádium, T:1622 év) alfa-bomlása során keletkezik. A talaj szemcsék felszínéhez közel elhelyezkedő rádium bomlásakor a keletkezett radon atom kilökődhet a szemcséből. A pórusterbe került radongáz ezután feláramolhat a talajfelszínre. A kiáramlás sebességét sok tényező együttesen befolyásolja (póruseloszlás, szemcseméret, talaj tömörség, nedvességtartalom, hőmérséklet és nyomás viszonyok, ár-apály jelenség stb.) de általában a felső 1-2 m mélységből kell számolni jelentős feláramlással. Ennek oka, hogy a ^{222}Rn felezési ideje 3,8 nap, így a mélyebb rétegből származó radongáz a feljutás előtt már elbomlik. Repedések, törésvonalak esetén azonban sokkal mélyebb rétegekből is feláramolhat.

A talajból a szabad légterbe került radon általában gyorsan felhígul, zárt terekben (lakásokban) azonban feldúsulhat. A lakásokban mérhető évi átlagos radonkoncentráció világátlaga 40 Bq/m³, míg a szabadban 5-10 Bq/m³. Az elbomló radonból keletkezett leányelemek a levegőben lévő porszemekhez, vízgőzhöz kötődnek. Ezt belelegezve a hordozó szerepét betöltő porszem méretétől függően a tüdő különböző részein hosszabb-rövidebb ideig megtapadhatnak. Mivel a bomlási sorban α -sugárzó leányelemek is vannak, a tüdő hámrétegét jelentős károsító hatás éri. Magas radonkoncentrációjú helyeken megfigyelték a tüdőrák kialakulási valószínűségének megnövekedését. Régóta folyik a vita, hogy egy adott radonkoncentráció hány mSv dózisterhelésnek felel meg, illetve lakóépületek esetében milyen értékek felett lenne célszerű beavatkozni, a radonszintet csökkenteni.

A kezdetben használt, de sok szempontból nem kellően megalapozott összefüggések helyett újabban, a radon terhelésnek kitett bányászokon végzett epidemiológiai vizsgálatokra alapozzák a radon által okozott károsodás kockázatának becslését. Ezek alapján évi (7000 órás benntartózkodást és a radongáz és leányelemei közti egyensúlyi tényezőt 0,4-nek feltételezve) 100 Bq/m³ átlagos radonkoncentráció közelítőleg 1,7 mSv/év effektív dózissal felel meg. A nemzetközi szervezetek 200-600 Bq/m³ közti éves átlagos radonkoncentrációnál ajánlják az egyes országoknak a cselekvési (beavatkozási) szintek megállapítását. Ez évi 3-10 mSv/év effektív dózist eredményez. (Elgondolkodtató, hogy míg egy atomerőműtől maximum 0.1 mSv/év sugárterhelést kaphat a közelben élő lakosság, addig a lakásokban a radontól ennek akár százszorosát is elfogadhatónak tartják.) Az ajánlott 200-600 Bq/m³ tartományon belül megállapított szint jelentősen függhet az ezt az értéket várhatóan meghaladó lakások számától és az adott ország anyagi helyzetétől. Néhány ország ennél szigorúbb korlátot is bevezetett. Egyes kutatók szerint a 150-200 Bq/m³ körüli radonkoncentrációnak pozitív hatása is van. Ilyen kis dózisonál nehéz egyértelmű hatást kimutatni. Az eddigi tapasztalatok szerint 400 Bq/m³ feletti átlagos értéknél már a károsító effektus dominál.

A talajon kívül jelentős radonforrás lehet a nem megfelelő (magas ^{226}Ra koncentrációjú) építőanyag, zuhanyozás, főzés alkalmával a vízben oldott radon, illetve ahol az égéstermékek a zárt térbe kerülnek, a földgáz (8. ábra).



8. ábra A radon forrásai egy épületben

5.3. Mesterséges eredetű sugárforrások

Az ember okozta ionizáló sugárforrásoktól származó hatások a röntgen sugárzás felfedezésétől, azaz 1895-től érik az emberiséget. Jelenlegi forrásai közül legismertebbek a működő atomerőművek – beleértve az egész nukleáris fűtőanyag ciklust –, a radioaktív hulladékok és az atomfegyver kísérletek, de ide tartozik a radioizotópok előállítása, felhasználása és a lakosság mesterséges eredetű sugárterhelésének nagyobb részét jelentő orvosi alkalmazások is. Itt kell megemlíteni a fent említett források bármelyikénél előforduló, de jelentőségénél fogva külön tárgyalt sugár és nukleáris baleseteket, melyek a nagy kiterjedésű hatásaik miatt komoly környezetvédelmi problémát okozhatnak.

Az atomerőműveket a következő részben részletesen tárgyaljuk, így itt csak a többi forrásra térünk ki.

Radioaktív hulladékok

A radioizotópok termelése, felhasználás során, illetve a nukleáris iparban radioaktív hulladékok keletkeznek. Sajnos köztük nagyon hosszú felezési idejű radionuklidok is találhatóak. Beláthatatlan az, hogy a ma biztonságosnak tűnő hulladék elhelyezése néhány ezer év múlva okoz-e környezeti szennyezést. Tény, hogy radioaktív hulladék van, tehát minél biztonságosabban el kell helyezni. Ezt az emberi és természeti környezettől való minél tökéletesebb elszigetelésével – azaz a hulladékok szilárd halmazállapotba és vízoldhatatlan formába hozásával, acéltartályokba való csomagolásával, a tároló létesítmé-

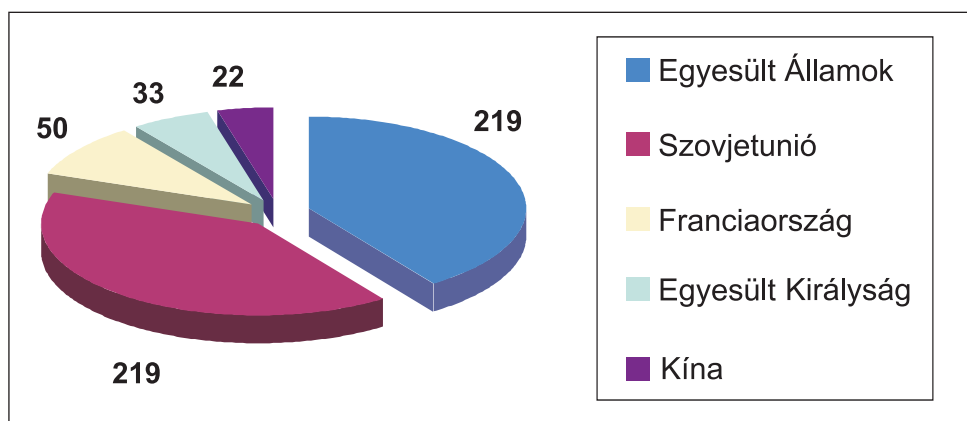
nyeknél falakkal, szigetelésekkel, födém szerkezetekkel, vízelvezetéssel, vízzáró és izotóp megkötő anyagokkal – és az alkalmas geológiai környezet biztosításával lehet legjobban elérni. A nagyaktivitású hulladékoknál hűtésről, szellőzésről néhány évig gondoskodni kell, így a végleges elhelyezéssel kapcsolatban még ma is folynak a kutatások.

Nem elképzelhetetlen egy olyan megoldás sem, hogy a hosszú felezési idejű radionuklidokat viszonylag rövid (10 év alatti) felezési idejű radioizotópokká alakítsák, és a lebomláshoz szükséges 100-120 év garantáltan ellenőrzött elhelyezése már biztosíthatónak látszik.

Atomfegyver kísérletek

Az első 1945-ös kísérleti robbantást eddig 542 légtérbeli atomrobbantás követte (9. ábra). Szerencsére az Atomcsend Egyezmény erősen korlátozta a nagyhatalmak kísérleteit.

A környezetben szétszóródott radioizotópok a lakosság mind külső mind belső sugárterhelését megnövelték. Természetesen a robbantási kísérletek helyéhez közel élők az átlagértékeknél jóval magasabb terhelést kaptak.



9. ábra Légtérbeli atomrobbantási kísérletek száma

Radioizotópok előállítása, felhasználása

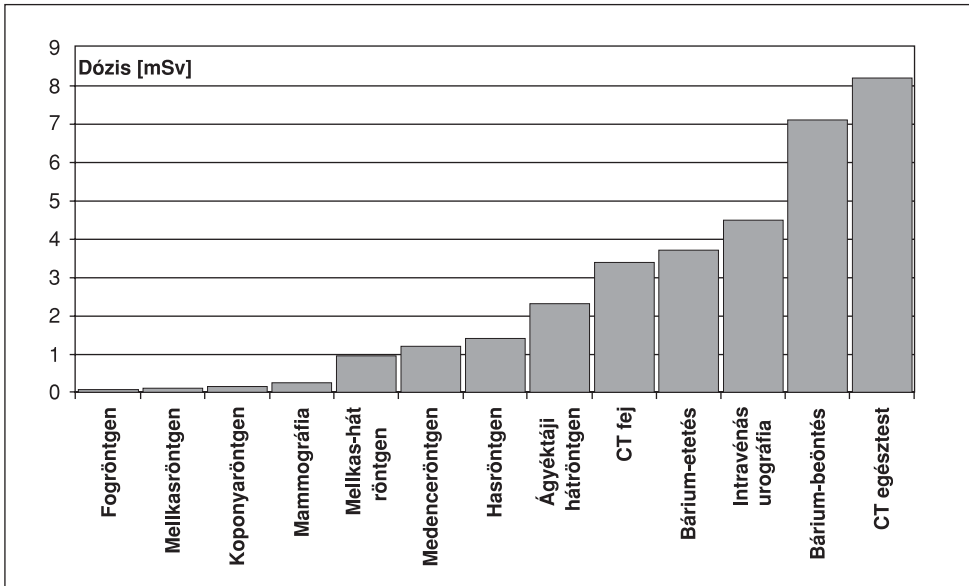
Az iparban sűrűség, szint, vastagság stb. mérésére, illetve hegesztési varratok vizsgálatára használt zárt források csak a külső sugárterhelést növelik, ezt is csak a közelben dolgozóknál.

A kutatásban, gyógyításban használt nyílt izotópok egy része a vízi kibocsátással a környezetbe kerülhet, de szerencsére a laboratóriumok zöme csak rövid felezési idejű és kevésbé veszélyes izotópokat használ. A kibocsátás mindig szigorú ellenőrzés és az aktivitásra vonatkozó korlátok betartásával történik.

Orvosi alkalmazás

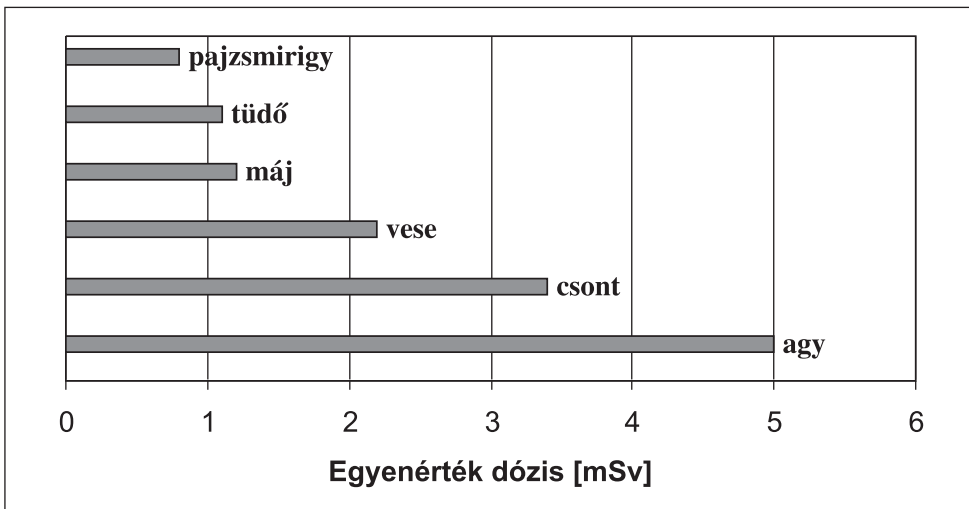
A röntgensugárzás felfedezése után szinte azonnal elkezdték alkalmazni a diagnosztikában. A lakosság mellkas-szűrése is röntgensugárzással történik. A korszerű gépek egy-egy felvétel esetén már csak kis dózist eredményeznek. Szakemberek szerint előfordul, hogy a szükségesnél több röntgenfelvételt készítenek, ami feleslegesen terheli a

pacienst. Mindezekhez hozzájárulnak a nagyobb terhelést jelentő újabb vizsgálati módszerek (pl. komputer tomográfia, röviden CT) egyre gyakoribb alkalmazása is. Egy-egy vizsgálatnál járó sugárterhelés a 10. ábrán látható.



10. ábra Néhány orvosi vizsgálatnál járó sugárterhelés

Az izotópdiagnosztikai vizsgálatoknál a megfelelő hordozóhoz kötött radionuklidot beadják a vizsgált egyén szervezetébe és nézik az eloszlást. Jellemző izotópdiagnosztikai sugárterhelések a 11. ábrán láthatók.



11. ábra Jellemző izotópdiagnosztikai sugárterhelések

A kezelés után az izotóp kiürülve a szervezetből a közcsatornába kerül, legtöbbször ellenőrizetlenül. Szerencsére ezek rövid felezési idejű izotópok. A terápiás kezelések egy részénél lineáris gyorsítókat, illetve zárt izotópokat használnak és a sugárterhelést a besugárzás alatt csak a beteg (illetve a személyzet) kapja. A belső kezelésnél nagy mennyiségű nyílt radioizotópot (pl. pajzsmirigy tumoroknál 5-10 GBq ^{131}I izotópot) juttatnak a páciens szervezetébe, amely a tumorban feldúsulva szétroncsolja a káros szövetet. Ilyenkor a „beteg sugároz”, így például egy 5,5 GBq ^{131}I -al kezelt betegtől 1 méterre 0,3 mSv/óra dózisteljesítményt is mérhetünk. Ezért a látogatók, illetve más betegek is többlet sugárterhelést kaphatnak. Bár kevés beteget kezelnek így, de a rokonok, ismerősök körében előfordul a néhány mSv sugárterhelés is.

Az orvosi felhasználások során jelentkező kollektív dózis csökkentéséhez vagy az esetek számát, vagy az egyes kezelések egyedi dózisékat kell csökkenteni. Ez utóbbi korszerű műszerekkel lehetséges. A jelenleginél részletesebben kellene meghatározni a radiológiai vizsgálatok előnyét, célszerűségét. Újabb cél a sugaras eljárások kiváltása alternatív módszerekkel (pl. ultrahang, endoszkóp), ahol ez nem lehetséges a sugárterhelés kockázatát is figyelembe kell venni a vizsgálatok tervezésében.

Az orvosi eredetű sugárterhelés a világban nagyon eltérő. A diagnosztikai vizsgálatokból 0.33 mSv/év, a terápiás kezelésekből pedig 0.3 mSv/év az átlagos terhelés, de a fejlettebb országokban a sokkal gyakoribb vizsgálatok miatt általában magasabb.

Nukleáris és sugárbaesetek

Az atomenergia mind katonai, mind békés célú felhasználása során kisebb-nagyobb környezetszennyezéssel járó rendkívüli események, balesetek is előfordultak.

Mindenekelőtt célszerű megkülönböztetni a sugár-, illetve a nukleáris balesetet. Sugárbaesetről akkor beszélünk, ha a radioaktív anyag felhasználásával vagy az ionizáló sugárforrások alkalmazásával kapcsolatos olyan véletlen, rendkívüli esemény történik, amely során a személyzet és/vagy a veszélyeztetett környezetben tartózkodó, illetve ott élő személyek a dóziskorlátot felüli sugárterhelést kapnak, ill. külön beavatkozás nélkül kapnának.

A nukleáris hasadóanyag előállítás, szállítása, felhasználása, kezelése során (atomerőműben, kutatási vagy oktatási célú atomreaktorokban, urándúsító, reprocesszáló üzemből stb.) bekövetkező sugárbaesetet nukleáris balesetnek nevezzük. Tehát a nukleáris balesetek egyben sugárbaesetek is és a környezetbe ellenőrizetlenül kiszabaduló radioaktív anyagok – a személyzeten túl – a lakosság körében is rendkívüli sugárterhelést, egészségkárosodást okozhatnak.

A nukleáris balesetekkel kapcsolatos tájékoztatás elősegítése, elsősorban a társadalmi, politikai szervezetek és a lakosság, beleértve a média megfelelő szintű informálása céljából az OECD nukleáris kérdésekkel foglalkozó részlege, valamint a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ, angol rövidítéssel IAEA) összeállított egy „Nemzetközi Nukleáris Esemény Skálát”. E szerint az üzemzavaroknál három, a balesetknél pedig négy szintet különböztetnek meg.

Az egyes szintek magyarázata a következő:

• Üzemzavar:

1. *Rendellenesség.* A biztonsági intézkedések olyan megszegése, mely még nem jelent kockázatot sem a dolgozókra, sem a lakosságra.

2. *Üzemzavar.* Biztonsági következményei már lehetnek, de a dolgozók sugárterhelés járuléka nem haladja meg az éves dóziskorlátot.

3. *Súlyos üzemzavar:* A dolgozók sugárterhelése meghaladhatja a dóziskorlátot, de a legjobban veszélyeztetett lakosság egyedei legfeljebb csak néhány tized mSv dózist kaphatnak.

• **Baleset:**

4. *Elsősorban létesítményen belüli hatással bíró baleset.* Ilyen rendkívüli esemény már egy részleges zónaolvadás következménye. A dolgozók kis részénél akut egészségkárosító hatások jelentkezhetnek, de a legjobban veszélyeztetett lakos legfeljebb néhány mSv sugárterhelést kaphat.

5. *Télephelyen kívüli kockázattal járó baleset.* A reaktorzóna súlyos károsodása következtében a radioaktív izotópok olyan mennyiségben (10^{14} - 10^{15} Bq) juthatnak ki a környezetbe, ami már veszélyezteti a lakosságot.

6. *Súlyos baleset.* A jelentős mennyiségű radioaktív anyag (10^{15} - 10^{16} Bq) kibocsátása során súlyos egészségkárosító következmények jelentkezhetnek. (Hatos besorolású baleset ez idáig még nem történt.)

7. *Nagyon súlyos baleset.* A reaktortartályban lévő radioaktív anyagok nagy része kijut a környezetbe ($> 10^{16}$ Bq). Ilyen esetben fennáll a korai sugársérülés veszélye mind az atomerőműben, mind a közvetlen környezetében tartózkodó személyeknél. A késői egészségkárosító, illetve környezeti hatások, pedig nagy területen (esetleg a szomszéd országokban is) jelentkezhetnek. Ebbe a kategóriába tartozott a csernobili katasztrófa.

Mivel a kibocsátott izotópok veszélyessége nagyságrendekkel is eltérhet, az egyes szinteknél a kibocsátott radioaktív anyag mennyiségét a hatásával megegyező (ekvivalens) ^{131}I izotóp aktivitás értékében adják meg. Újabbban, néhány országban bevezették az un. skála alatti események, üzemzavarok jelzését is, pl. ha egy tartalékban lévő eszköz rövid időre meghibásodik. Ilyen eseménynek csak közvetett hatása lehet a sugárbiztonságra, -védelemre.

A fenti skála bármely szintjéhez tartozó eseményt az egyes fokozatok szerint előírt időtartamon belül jelenteni kell a NAÜ bécsi központjába és más, a helyi és nemzetközi egyezmények által megjelölt szervezeteknek. Pakson maximum a 3. kategóriába tartozó üzemzavar fordult elő.

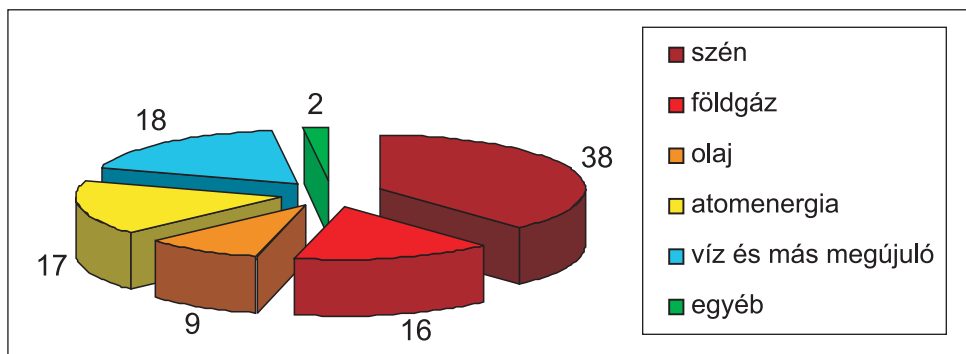
Az erőművek biztonságos üzemeléséhez az úgynevezett külső és belső biztonsági tényezőket be kell tartani. A biztonság növeléséhez nagymértékben hozzájárultak a korábbi balesetekből levont tapasztalatok is. Mindezek mellett a kezelő személyzet magas fokú képzettsége, rendszeres továbbképzése jelentheti csak a megfelelő biztonságú üzemeltetést.

6. **Atomerőművek**

Az atomreaktorok megalkotásával különböző területeken nyílt lehetőség a gyakorlati alkalmazásra. Kezdetben nagy lendületet kapott a nukleáris fegyverek alapanyagának előállítását biztosító reaktorok megépítése, de a kutatóreaktorok száma is nőtt. Gyakran alkalmazták hajók (Lenin-jégtörő), tengeralattjárók meghajtására, de a legjelentősebb fejlődést az energiatermelés területén érte el. Természetesen hosszú út vezetett az első atomreaktoroktól a nagyteljesítményű, hosszú évtizedeken át működő, energiát termelő reaktorokig, az atomerőművekig, amelyek világszerte elterjedtek.

Napjainkban a világ energia felhasználásának 80 %-át a fosszilis fűtőanyagok, 7 %-át a nukleáris energia fedezi. Így általánosan a Föld minden egyes lakójára évente mintegy 1,3 tonna olajjal egyenértékű fosszilis energiahordozó felhasználása jut.

A villamos energia a teljes energia felhasználás 37%-át teszi ki. Az egy főre eső villamosenergia-termelés azonban országonként nagyon eltérő. Az OECD országokban 7500 kWh/fő, a világátlag 2200 kWh/fő, míg a fejlődő országokban kisebb, mint 1200 kWh/fő. A világ villamosenergia-termelés forrásainak százalékos megoszlása 2000-ben a 12. ábrán látható.



12. ábra A világ villamosenergia-termelés forrásainak százalékos megoszlása 2000-ben

Az atomenergia 17%-os részesedését a 351 GW kapacitással üzemelő 438 atomerőmű biztosította.

Természetesen vannak országok, ahol nincs és vannak, ahol nem is akarnak atomerőművet építeni. Ennek elsődleges oka többnyire a lakosság félelme a sugárzástól.

Elgondolkodtató azonban, hogy az előrejelzések alapján 2020-ig a villamosenergia-igény közelítőleg 3%-kal nő évente, de a fejlődő országokban valószínű az 5%-ot is meghaladja. Ez tehát azt jelenti, hogy 2020-ra a villamosenergia-termelés megkétszereződik. Ez jelentős környezetvédelmi és egészségügyi problémát jelent.

A fosszilis fűtőanyagok jelentős CO₂ kibocsátást eredményeznek, ami az üvegházhatást tovább fokozza, és klimatikus változásokat eredményez.

Ugyanakkor a környezetbe kerülnek a savas gázok, porok, az égetés melléktermékei, elszennyeződhetnek a folyók, stb. Mindezek helyi és regionális téren problémákat okoznak.

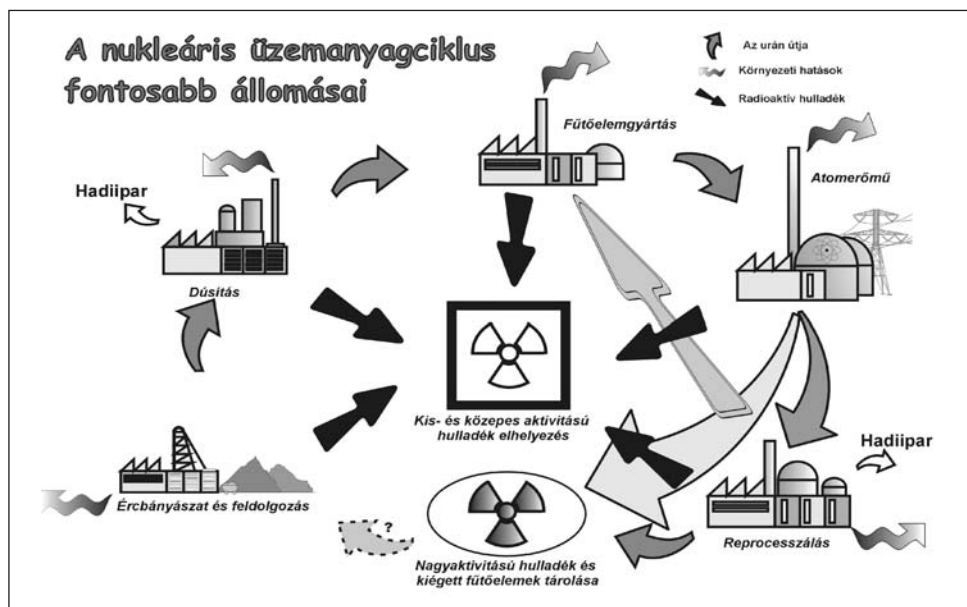
1998-ban 6,4 billió tonna szén került széndioxid gázként az atmoszférába, ami a világ népességét figyelembe véve 1 tonna/fő értéket jelent.

Egy GWe kapacitású atomerőmű ugyanakkor szén esetén 1,75 millió, olaj esetén 1,2 millió-, míg földgáz esetén 0,7 millió tonna szén emisszió elkerülését teszi lehetővé, úgy hogy kénoxidok, nitrogénoxidok és szállópor kibocsátással sem kell számolni.

Természetesen az atomerőművek esetén viszont ott van a nem látható, számunkra szokatlan, sokszor nehezen érthető, és mértékét és hatásait tekintve általában nem kelően ismert sugárzás.

Vizsgáljuk meg, hogy a lakosság sugárterhelése szempontjából valójában milyen jellegű és mértékű környezetszennyezést okoz egy működő atomerőmű. A komplex

elemzésnél természetesen nem szabad csak az atomerőművekre figyelni, mivel az emberiség szempontjából az egész nukleáris fűtőanyag-, vagy üzemanyagciklust is figyelembe kell venni.



13. ábra A nukleáris üzemanyagciklus vázlatja

Mint a 13. ábrán látható, az üzemanyagciklus az atomerőművek mellett magában foglalja az uránérc bányászatát, dúsítását, nukleáris fűtőanyaggá való átalakítását, a kiégett fűtőelemek esetleges újrafeldolgozását (reprocesszálsát), szállítást és a keletkezett hulladékok kezelését. Minden egyes állomásánál számítani kell kis és közepes (esetlegesen nagy) aktivitású hulladékok keletkezésére és a környezetbe jutó radioaktív szennyezőkre.

A környezeti sugárterhelést a hatás távolságának a függvényében lokálisnak (100 km-en belüli), regionálisnak (1000 km távolságig) és globálisnak nevezhetjük.

Normál üzemelés során az egyes állomásoknál a környezetbe kerülő radionuklidok elsősorban lokális szennyeződést okoznak és elenyésző a regionális hatások.

Vizsgáljuk meg az egyes állomásokat.

Az ércbányászat föld alatti és felszíni bányákban folyik. A feldolgozás során keletkezett meddő, zagy megfelelő rekultiváció után gyakorlatilag nem jelent nagyobb sugárterhelést mint amekkorát a környezetben található magas urántartalmú kőzetek eredményeznek. A bányászat kezdeti időszakában a bányászok azonban nagyon jelentős sugárterhelést kaphattak. A korszerű eszközök és sugárvédelmi előírások betartásával ma már nem nagyobb a dolgozók egészségügyi kockázata mint bármilyen más bányában.

Az urángyártással és dúsítással foglalkozó üzemek a biztonsági előírások következtében a környezetben élő lakosságot nem veszélyeztetik. A környezetbe kerülő egyébként természetes eredetű radionuklidok mennyisége rendszerint jelentéktelen.

Az üzemelő atomerőművekben a fűtőanyag hasadása, illetve – a nagy intenzitású neutron-sugárzás hatására – a szerkezeti és hűtőanyagok aktiválódása során keletkeznek radioaktív anyagok.

Az erőművekből kibocsátott radionuklidok minősége és mennyisége a reaktor típusától, konstrukciójától, az erőmű korától, az üzemanyag kiegészítés fokától (azaz az utolsó üzemanyag behelyezés óta eltelt időtől), hulladékkezelési technológiától, stb. függ.

A kibocsátás az időben nagymértékben ingadozhat, jelentősebb része a karbantartás során távozik.

Az üzemelő atomerőművek által kibocsátott radionuklidok vagy a légkörbe vagy a vízi környezetbe jutnak.

A légkörbe kijutó radioizotópok mennyiségének minimalizálása végett az erőmű légtérét a környezettől igyekeznek jól elszigetelni. E mellett a lépcsőzetes elszívás rendszerét valósítják meg, azaz azokban a helyiségekben, ahol nagyobb radioaktivással kell számolni, alacsonyabb a nyomás (nagyobb az elszívás), így ide az ajtók nyitásakor csak a tiszta, vagy kevésbé aktív levegő áramolhat be. A szennyezett levegőt különböző módszerekkel tisztítják, majd egy magas kéményen keresztül a légkörbe bocsátják.

A reaktor hűtőközege (hűtővíze) zárt rendszerben kering. Mivel a normál üzemi-vel „megengedi” a fűtőelem-köteg burkolatának maximálisan 1%-os meghibásodását (lyukak, hajszálrepedések keletkezését), a fűtőelemek hűtőközege (primerköri hűtőközeg) mindig tartalmaz kisebb-nagyobb mennyiségben radionuklidokat. A kétkörös hűtőrendszereknél a hőcserélők meghibásodása esetén ezek átjuthatnak az ún. szekunder körbe is.

A primer és szekunder köri vizeket tisztítják, a tisztított, kis aktivitás-koncentrációjú technológiai vizeket, ha a hatósági korlátnak megfelelnek a környezetbe bocsátják.

A reaktor technológiai helyiségeiben és a reaktorhoz kapcsolódó létesítményekben (mosoda, ioncserélő regeneráló, szennyeződésmesztető, azaz dekontamináló helyiségekben) szintén keletkeznek radioaktív szennyeződések, hulladékok.

A lakosság védelme céljából a kibocsátható radionuklidok mennyiségét szigorúan korlátozzák.

Az atmoszférába kerülnek a radioaktív nemesgázok (argon, kripton, xenon), illetve részben a ^3H (trícium), ^{14}C (szén), ^{131}I (jód) és más aeroszolokhoz kötött nuklidok.

A vízi környezetbe jut a ^3H (trícium) egy része, illetve egyéb radionuklidok.

A kibocsátott radioizotópok mennyisége általában olyan kicsi, hogy a környezetbe szétszóródott radionuklidok aktivitás-koncentrációja már nem, vagy alig mérhető. Ezért a népesség sugárterhelését a reaktorok kéményében, a vízi kibocsátás csatornáiban, illetve egyes esetekben a környezetben végzett mérésekből, megfelelő terjedési modell segítségével határozzák meg.

Nyilván a legveszélyeztetettebb, azaz várhatóan a legnagyobb sugárterhelést elszenvedő ún. kritikus csoportnak a reaktorok környékén élő lakosság számít.

Az eddigi vizsgálatok szerint e kritikus csoportok egyedei által kapott maximális éves effektív dózis – a reaktor típusától függően – 0,1-20 μSv volt. Mindez a természetes, illetve egyéb mesterséges forrásokból származó 3 mSv/év átlagos sugárterheléshez viszonyítva elenyésző értéket képvisel.

Természetesen mindez nem jelenti azt, hogy enyhíteni kellene a szabályzatokon. Az ésszerűség határán belül továbbra is mindent meg kell tennünk a sugárterhelés ellenőrzése, korlátozása, csökkentése érdekében.

A kiegészített fűtőelemek egy részét a bennük lévő urán, illetve plutónium újra felhasználása céljából feldolgozzák. A gyakorlatban a fűtőelemek 5-10%-át reprocessálják, de sok esetben ez inkább katonai céllal történt. Az üzemek környékén lakó embereknél már viszonylag jelentős sugárterheléssel kellett számolni. Az 1980-as évek elején ez elérte a 3-5 mSv/év dózist, ami napjainkban már jelentős mértékben lecsökkent (néhány tized mSv/év értékre).

A fűtőanyag ciklust tekintve a szállítások során eddig nem fordult elő olyan eset, ami a lakosság sugárterhelésnek megnövekedését eredményezte volna.

A radioaktív hulladékokról a „mesterséges eredetű források” fejezetben már tettünk említést.

Meg kell jegyeznünk, hogy radioaktív izotópok azonban nem csak az atomerőművek üzemeltetéséhez kapcsolódó nukleáris fűtőanyag ciklus során kerülnek a környezetbe. A kibányászott szén sok esetben jelentős mennyiségű uránt, rádiumot tartalmaz. Az eltüzelés során a légtérbe kikerült pernye, a folyamat végén keletkezett és hányókon elhelyezett vagy csak közvetlenül szétszórt salak, hamu, illetve a bányászat során keletkezett meddőhányók mind sugárterhelést eredményeznek. A külső és belső sugárterhelést figyelembe véve ez kb. 12-16 $\mu\text{Sv}/\text{év}$ effektív dózist okoz.

Az olajbányászat során felszínre hozott, sok esetben magas ^{226}Ra -koncentrációjú iszappal vagy a gáztermelés során felszínre került radonnal is számolni kell.

Mivel sok országban, így hazánkban sincs uránbányászat, ércdúsítás, fűtőelem gyártás, illetve nem működnek reprocessáló üzemek és a hulladékátrolás sem megoldott véglegesen, a továbbiakban a Paksi Atomerőművet vizsgáljuk részletesebben.

7. A Paksi Atomerőmű

Hazánkban véglegesen bezárták az uránérc bányát és az ércfeldolgozót, dúsítót. A terület sugárszennyezettségének megszüntetése, tájba illő rendezése a végéhez közeledik.

Így a nukleáris fűtőanyag ciklus szempontjából a Paksi Atomerőmű az egyetlen kiemelt jelentőségű létesítmény.

A Paksi Atomerőmű, illetve egyéb erőművek által megtermelt, valamint az import villamos energia mennyiségének alakulását az elmúlt évtizedekben a 14. ábrán követhetjük nyomon.

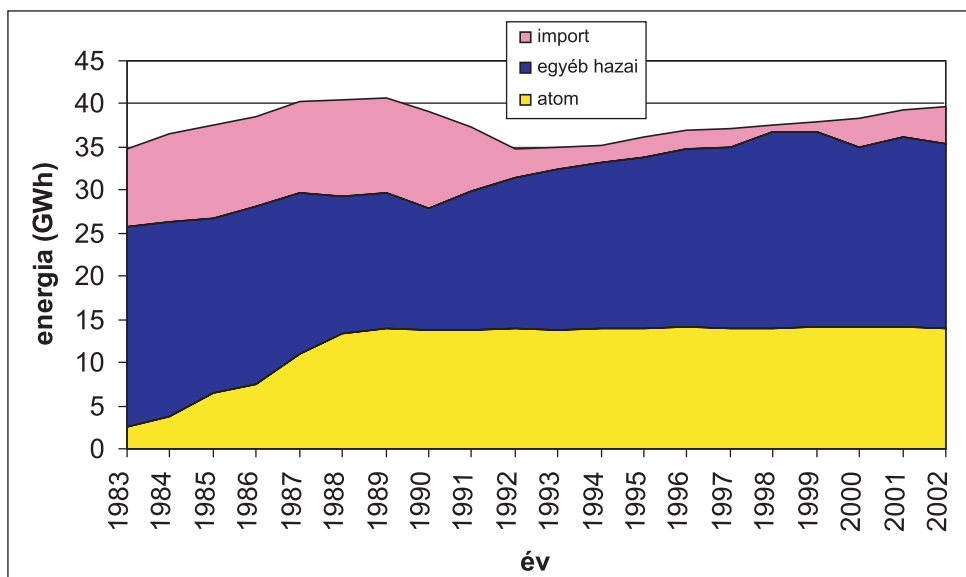
A hazai termelés közel 40 %-át egyetlen üzem, a Paksi Atomerőmű termeli. (2003. évi üzemzavar miatt ez ugyan kb. 34%-ra esett vissza, de a 2 blokk újra indításával a részesedés is visszaállt.) Mint látható a növekvő energiaigények miatt a termelt villamos energia nem elegendő, tehát importra szorul az ország.

A 2002. évi felhasznált villamos energiának a termelés szerinti részletes megoszlását a 15. ábrán láthatjuk. (A hazai termelés 35377 GWh, az import 4243 GWh volt.)

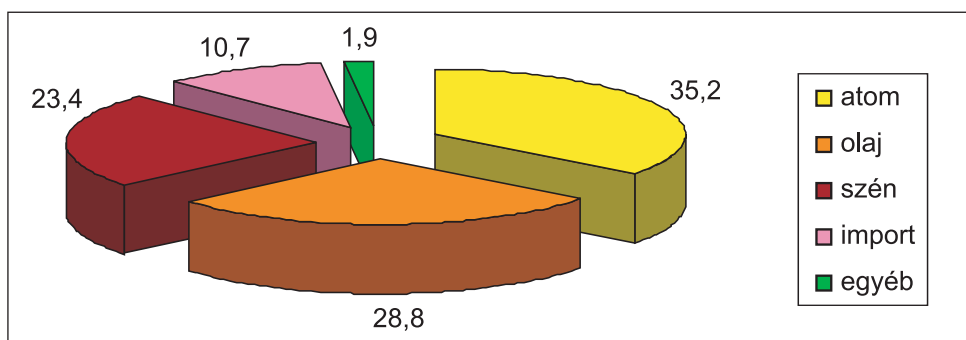
A termelés természetesen bizonyos mennyiségű radioaktív izotóp kibocsátásával jár.

A kibocsátható mennyiségeket és ellenőrzési rendszerét szigorú rendeletek szabályozzák.

A légnemű kibocsátás a folyamatos ellenőrzés mellett a 100 m magas kéményen keresztül történik. Az elmúlt hét évre visszatekintve a 2003. évet leszámítva a légköri kibocsátások messze alatta maradtak a hatósági korlátnak. Nemesgázoknál, aeroszoloznál és jó esetben is maximum 1-2 %. A 2003. évi üzemzavar miatt az értékek kismér-



14. ábra A villamosenergia-források alakulása hazánkban



15. ábra A felhasznált villamos energiának a termelés szerinti megoszlása 2002-ben

tétkben megnöttek. Aeroszoloznál, illetve nemesgázoknál még így is a korlát 1-4%-a alatt maradt. Jód esetében már jelentősebb volt a növekmény, és az éves kibocsátás elérte a korlát 54 %-át.

Az ellenőrzött vizeket egy összegyűjtő kidobó vezetéken keresztül juttatják a Dunába. A radioaktív izotópokat tartalmazó hulladékvíz a melegvíz csatornában a hűtésre használt vízzel összekeveredve, s így nagymértékben felhígulva jut a folyóba. A kidobó vezeték, a melegvíz csatorna és kontrollként a bejövő hideg Duna víz csatorna vizét folyamatosan mintázzák, majd elemzik.

Az eddigi tapasztalatok alapján a melegvíz csatorna vizéből erőműi eredetű radionuklidokat az 1985-1992. időszakban mért tríciumon (^3H) kívül nem sikerült kimutatni.

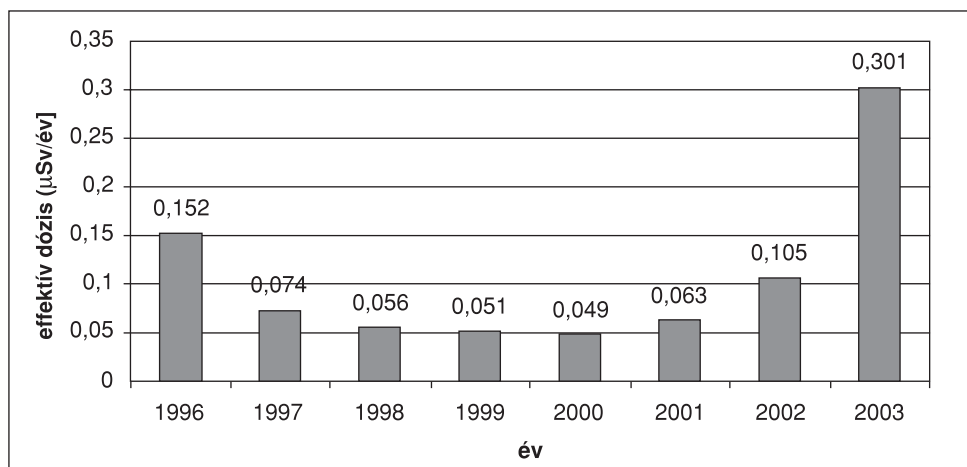
A Dunában az elkeveredés után további 5 nagyságrendnyi hígulás várható.

A kibocsátott víz aktivitás-koncentrációját és a Duna vízhozamát figyelembe véve a Duna vízében maximálisan 1 Bq/dm³-es trícium (³H) és 0,1mBq/dm³ összes többi radionuklid koncentráció növekménnyel lehet számolni. A hulladék vizekkel kibocsátott aktivitások éves értékei a ³H kivételével egyetlen évben sem érték el a hatósági korlát 10%-át. Trícium esetén maximum 74% volt. A 2003-ban bekövetkezett üzemzavar a légnemű kibocsátásokkal ellentétben a vízi úton történő kibocsátásokat nemhogy növelte, hanem éppen ellenkezőleg – a 2. blokk üzemzavar miatti leállása következtében – csökkentette azokat.

Az adatok alapján megállapíthatjuk, hogy az erőmű öregedésével járó esetleges növekmények számára így még jelentős tartalékok vannak.

Látható az is, hogy a 2003. évi üzemzavar során bár nagyobb mennyiségben jutottak ki a környezetbe a radioizotópok, de egyetlen esetben sem érték el a hatósági korlátot.

A kibocsátott radioizotópok aktivitásából – az OSSKI által – az erőmű közelében élőkre becsült átlagos lakossági sugárterhelések a 16. ábrán láthatók.



16. ábra Kibocsátott radioizotópok aktivitásából becsült átlagos lakossági sugárterhelések az erőmű közelében élőkre vonatkoztatva

1998. évig a korlát 460 µSv/év volt, ami 1998 után a kritikus lakossági csoportra vonatkozóan 90 µSv/év értékre változott. Látható, hogy a kibocsátott radionuklidok okozta lakossági sugárterhelés, még a 2003. évi üzemzavar esetén is csak a korlát 300-ad részét érte el.

A 2.4 mSv/év természetes háttérsugárzáshoz, illetve a 0.6 mSv/év orvosi eredetű átlagos sugárterheléshez képest is elenyésző értéket jelent az átlagosan 0.0001 mSv/év körüli erőműtől származó sugárterhelés növekmény. Megállapíthatjuk, hogy a 2003. évi üzemzavar miatti 0.0003 mSv/év sugárterhelés növekmény ugyancsak elhanyagolható.

A becsült alacsony értékeket az erőmű 30 km-es környezetében vett minták, illetve az erőmű által üzemeltetett mintavevő és távmérő állomások által szolgáltatott mérési eredmények is alátámasztották. A vizsgálatok kiterjednek mind a környezeti közegekre, mind a tápláléklánc elemeire.

A legtöbb környezeti minta (évi közel 4000 db) elemzését természetesen az erõmû maga végzi. Ez magában foglalja a levegõ, a talaj, a felszíni álló és folyó vizek, iszapok a körzetben termelt növények (zöldség, gyümölcs, takarmánynövények), az itt tenyésztett állatokból származó hús, a termelt tej, a vizekben élõ halak stb. rendszeres mintázását, mérését.

A mintavételeket, méréseket ugyan kisebb mintaszámmal, de természetesen más laboratóriumok is elvégzik. Ide sorolható a Környezetvédelmi Felügyelõség laboratóriuma, az ÁNTSZ laboratóriumai, a Földmûvelésügyi Minisztérium radiológiai mérõhálózata és néhány civil szervezet.

Az eddigi mérési eredmények megegyeztek az erõmû által közzé tett eredményekkel, így a kibocsátásból becsült sugárterhelések korrektnek mondhatók.

A biológiai hatásoknál már elemeztük a sugárterheléssel járó egészségügyi kockázatot ($5 \cdot 10^{-5}$ /mSv halálos kimenetelû rákkockázat).

Nézzük meg, hogy a 90 µSv/éves korlát, illetve a tényleges kibocsátásokból becsült kb. 0,1 µSv/év évi átlagos, valamint a 2003-as üzemzavar miatti, 0,3 µSv/év effektív dózis mekkora kockázatot is jelent más elfogadott kockázatokhoz képest.

A közlekedésnél például a megtett távolságot (km) és a bekövetkezett halálos baleseteket figyelembe véve megállapítottak egy kockázati valószínűséget, azaz, hogy egy adott távolság megtétele esetén milyen valószínűsége van egy halállal végzõdõ balesetnek. Mindnyájan közlekedünk és többé kevésbé elfogadjuk az ezzel járó kockázatot.

Természetesen aggodalmunkat jelentõsen befolyásolja, hogy általában mivel közlekedünk. Az autóját naponta használó és akár 5-600 kilométeres útra induló autós ritkán aggodalmaskodik útja elõtt. Ugyanakkor, ha nagyon ritkán repülõre kell ülnie és tegyük fel ugyancsak 5-600 km utat kell megtennie, magában kicsit aggodalmaskodik, és általában rendezettebben hagyja ott a környezetét mintha kocsiba ülne. A baleseti statisztikákat elemezve azonban láthatjuk, hogy a kockázat az utóbbi esetben, azaz a repülõ útnál 30-szor kisebb. Ugyanakkor esetleg motorkerékpárt vásárolunk féltett gyermekeinknek és nem gondolunk bele, hogy azonos út megtétele 30-szor nagyobb kockázatot jelent, mintha autóval közlekednének.

2. táblázat A közlekedés és a sugárzások kockázatának összehasonlítása

	Elhalálozás valószínűsége $\cdot 10^{-6}$
Közlekedés	
vonat (1000 km)	0,4
repülõ (1000 km)	0,5
autó (1000 km)	15
motorkerékpár (1000 km)	500
kerékpár (100 km*)	8,5
Természetes eredetû háttérsugárzás (2,4 mSv/év)	120
Mesterséges eredetû sugárzás lakossági korlátja (1 mSv/év)	50
Paksi Atomerõmû hatósági korlátja (90 µSv/év)	4,5
tényleges átlag (0,1 µSv/év)	0,005
2003-ban üzemzavarral együtt (0,3 µSv/év)	0,015

Valószínű így vagyunk az atomerőművekkel is. Idegen tőlünk és ritkán gondoljuk csak át ténylegesen mekkora kockázattal is jár egy jól üzemelő atomerőmű. A könnyebb szemléltethetőség végett néhány kockázatot a 2. táblázatban foglaltunk össze.

Az erőmű által okozható lakossági sugárterhelés korlátja tehát $4,5 \cdot 10^{-6}$ /év kockázatot jelent, ami gépkocsival évi 300 kilométer megtételével járó kockázattal egyenlő.

Az adatokból könnyen beláthatjuk, hogy a paksi atomerőműtől származó átlagos sugárterhelést alapul véve ($0,1 \mu\text{Sv}/\text{év}$) a sugárterhelésnek leginkább kitett környéken élő lakosság halálozási kockázata akkora, mintha 10 km távolságot utaznánk repülővel, 12,5 km-t vonattal vagy 300 m távolságot autóval.

Ekkora kockázatot jelent az üzemelő Paksi Atomerőmű, ami a hazai villamosenergia-termelés közel 40%-át biztosítja. Ekkora kockázatot valószínű érdemes vállalni.

Természetesen továbbra is mindent meg kell tenni a biztonságos üzemelés biztosítása és a kibocsátási korlátok betartása érdekében.

Gyakran használt nemzetközi és hazai szervezetek, kiadványok rövidítései

IAEA (International Atomic Energy Agency): Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ)

IBSS (International Basic Safety Standards): Nemzetközi Sugárbiztonsági Alapszabályzat (magyar fordítása nem használatos)

ICRP (International Commission on Radiation Protection): Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság)

INES (International Nuclear Event Scale): Nemzetközi Nukleáris Esemény Skála

OECD NEA: (Organization for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency): az OECD (magyar fordítása nem használatos) Nukleáris Energia Ügynöksége

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation): az ENSZ atomsugárzások hatásaival foglalkozó tudományos bizottsága (magyar fordítása nem használatos)

HAKSER: Hatósági Környezeti Sugárvédelmi Ellenőrző Rendszer (a Paksi Atomerőmű környezetének ellenőrzésére alakult hatósági együttműködés)

NBK: Nukleárisbaleset-elhárítási Kormánybizottság

OAH: Országos Atomenergia Hivatal

ONER: Országos Nukleáris Ellenőrző Rendszer

ÜKSER: Üzemi Környezeti Sugárvédelmi Ellenőrző Rendszer (a Paksi Atomerőmű üzemi ellenőrzése)

Felhasznált Szakirodalom

- 1./ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. New York, UN, 1988.
- 2./ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. New York, UN, 1993.
- 2./ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. New York, UN, 2001.
- 3./ International Commission on Radiological Protection. 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon Press; ICRP Publication No 60; 1991.
- 4./ International Commission on Radiological Protection against radon-222 at home and at work, Oxford, Pergamon Press, ICRP Publication 65, 1994.
- 5./ Nemzetközi Atomenergia Ügynökség: Biztonsági Szabályzat (BSS No-115) Budapest, 1996.
- 6./ Tóth Árpád: A lakosság természetes sugárterhelése, Akadémiai kiadó, Budapest, 1983.
- 7./ Kanyár Béla, Somlai János, Szabó D. László: Környezeti sugárzások, radioökológia, Veszprémi Egyetem Kiadó, Veszprém, 1996.
- 8./ Sztanyik B. László: Sugársérülések megelőzése és gyógykezelése, Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest, 1989.
- 9./ Koltay Ede: Fejezetek a környezetfizikából, KLTE-ATOMKI, Debrecen, 1994.
- 10./ Turai István: Sugáregészségügyi Ismeretek, Medicina Könyvkiadó Rt., Budapest, 1993.
- 11./ Kanyár Béla, Béres Csilla, Somlai János, Szabó S. András: Radioökológia és Környezeti sugárvédelem, Veszprém Egyetem Kiadó, Veszprém, 2004.
- 12./ Köteles György: SUGÁREGÉSZSÉGTAN. Medicina Könyvkiadó Rt. Budapest, 2002.
- 13./ PA Rt. Sugárvédelmi Osztály éves jelentései
- 14./ Nuclear Energy in a Sustainable Development Perspective OECD Publications; France, 2000
- 15./ Marx György: Kockázat, Fizikai szemle 1990/5.

Tartalom

1. Atomerőművek környezeti hatásai, radioaktív kibocsátások	3
2. Radioaktivitás, radioaktív sugárzások	4
3. Dózisfogalmak	6
4. Biológiai hatások	8
5. Sugárzások forrásai	11
5.1. Külső és belső sugárforrások	11
5.2. Természetes eredetű sugárterhelés	13
5.3. Mesterséges eredetű sugárforrások	16
6. Atomerőművek	20
7. A Paksi Atomerőmű	24
Gyakran használt nemzetközi és hazai szervezetek, kiadványok rövidítései ...	29
Felhasznált Szakirodalom	30



Magyar Atomforum Egyesület