

Egésztetszámlálás

*Mérésleírás¹ a Nukleáris környezetvédelem és klónjai (pl. Környezeti sugárvédelem)
laborgyakorlatához
Osváth Szabolcs, BME NTI, 2012*

1. A radioaktív bomlás alapegyenletei

Elmélet

A nuklidok (az elemek izotópjai) stabilak vagy radioaktívak lehetnek. A radioaktív nuklidok instabilak, vagyis bizonyos idő múlva – valamilyen sugárzás kibocsátásával – elbomlanak. Az adott időtartam alatt elbomlott atomok száma egyenesen arányos az időtartam hosszával (dt) és a bomlásra képes atomok számával (N), ezért a bomlásra képes atomok számának megváltozása (dN):

$$dN = -\lambda * N * dt \quad [1]$$

Az arányossági tényező (λ) az ún. bomlási állandó, melynek értéke minden radioaktív nuklid (röviden radionuklid) esetében más és más. A bomlási állandó dimenziója 1/idő, mértékegysége lehet 1/s, 1/h, 1/év, stb.

Az [1] differenciálegyenlet megoldása, ha a kezdeti $t=0$ időpontban N_0 atomunk volt:

$$N(t) = N_0 * \exp(-\lambda * t) = N_0 * e^{-\lambda t} \quad [2]$$

A radioaktív nuklidok mennyiségét az aktivitással jellemezzük. Aktivitásnak az időegység alatt elbomlott atommagok számát nevezzük, azaz felírható, hogy:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda * N \quad [3]$$

Az aktivitás mértékegysége a Becquerel, melynek jele: Bq. 1 Becquerel aktivitás 1 bomlást jelent másodpercenként, azaz: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$.

A gyakorlatban előforduló aktivitások megadásakor gyakran használjuk az SI előtagokat: k [kilo] = 10^3 , M [mega] = 10^6 , G [giga] = 10^9 , T [tera] = 10^{12} .

A [2] és [3] egyenlet összevonásával kapjuk az aktivitás időbeli változását leíró exponenciális bomlástörvényt:

$$A(t) = A_0 * \exp(-\lambda * t), \quad [4]$$

ahol A_0 jelöli az aktivitást egy kezdeti időpontban,

$A(t)$ pedig az aktivitást az előzőhöz képest t idő múlva.

Mivel a λ bomlási állandó értéke minden radionuklid esetében más és más, a bomlástörvényt minden nuklidra külön-külön kell alkalmazni.

A gyakorlatban kényelmesebb és szemléletesebb a felezési idő ($t_{1/2}$) használata. Felezési időnek azt az időtartamot nevezzük, amely alatt az adott radionuklid aktivitása a felére csökken.

$$A_0 / 2 = A(t_{1/2}) = A_0 * \exp(-\lambda * t_{1/2}) \quad [5]$$

Az [5] egyenletet $t_{1/2}$ -re megoldva:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad [6]$$

Ezt visszahelyettesítve a bomlástörvénybe azt kapjuk, hogy

¹ Korábbi, többnyire Zagyvai Péter nevéhez fűződő mérésleírások átszerkesztett változata.

$$A(t) = A_0 \cdot \exp\left(-\frac{\ln(2) \cdot t}{t_{1/2}}\right) = A_0 \cdot 2^{\left(-\frac{t}{t_{1/2}}\right)} \quad [7]$$

Ha helyes eredményt akarunk kapni, akkor fontos, hogy az egyenletbe t -t és $t_{1/2}$ -et ugyanabban a mértékegységben helyettesítsük be; ekkor $A(t)$ -t ugyanabban a mértékegységben kapjuk, mint amelyikben A_0 -t behelyettesítettük.

2. A radioaktív sugárzások, detektálásuk és az alapvető dóziszfogalmak

Elmélet

Környezetünkben számos radionuklid fordul elő. Ezek egy része *természetes*, más része *mesterséges* eredetű. A radionuklidok bomlásukkor **3-féle sugárzást** bocsáthatnak ki:

- α -sugárzás: kétszeres pozitív töltéssel rendelkező He ionok (He atommagok). Bár kinetikus energiájuk viszonylag nagy, (3-8 MeV), hatótávolságuk – nagy tömegük és töltésük miatt – kicsi, akár egy papírlap, vagy néhány cm vastag levegőréteg is elnyeli őket;
- β -sugárzás: elektronok vagy pozitronok, melyek szintén az atommag átalakulása során keletkeznek. Hatótávolságuk nagyobb, pl. levegőben energiájuktól függően 1-2 m-t is elérhet, szilárd vagy folyékony közegben azonban nem több mint 1-2 cm;
- γ -sugárzás: nagy energiájú elektromágneses sugárzás (fotonok), melyek megjelenése az előző két bomlási mód valamelyikét kísérheti. Áthatolóképessége még szilárd közegben is nagy (több méter), intenzitásának gyengítésére nagy rendszámú és sűrűségű anyagokat (Pb, beton) használnak.

A radioaktív sugárzások detektálása az emittált sugárzás és az anyag (detektor) közötti kölcsönhatáson alapszik. A kölcsönhatás formája a sugárzás fajtájától, energiájától ill. az anyag tulajdonságaitól (rendszám, sűrűség) függ. A detektorok nagy része az ionizációt és gerjesztést „hasznosítja” és elektromos impulzusokat szolgáltat (elektromos detektorok).

Az anyagban elnyelt ionizáló sugárzási energia fizikai, az élő anyagban, az emberi test szöveteiben emellett kémiai, biokémiai és biológiai hatást fejt ki. A hatás mértékeként a tömegegységben elnyelt és jelentős részben ionizációra fordított összes sugárzási energiát, a **dózist** választották. A három legfontosabb dóziszfogalom az elnyelt dózis, az egyenérték dózis és az effektív dózis.

Az elnyelt dózis pusztán a sugárzás fizikai hatására vonatkozik:

$$D = \frac{dE}{dm} \approx \frac{\Delta E}{m} \left[\frac{J}{kg}, Gray, Gy \right] \quad [8]$$

A sugárzás biológiai kártétele, pontosabban annak általános, küszöbdózishoz nem kötött, tehát bármilyen kis dózisonál is lehetséges, véletlenszerű (sztochasztikus) biológiai hatása az egyenérték dózissal lesz arányos:

$$H = D \times w_R [Sievert, Sv] \quad [9]$$

w_R a sugárzás károsító képességére jellemző relatív szám, a *sugárzási tényező* (R = radiation = sugárzás). w_R értéke α -sugárzásra 20, β -, γ - és Röntgen-sugárzásra 1, neutronsugárzásra pedig – a neutronok igen különböző, erősen neutronenergia-függő kölcsönhatásainak megfelelően – változó (a nemzetközi ajánlásokban a legutóbbi évek kutatásai alapján 2,5 és 20 közötti értékek, a hatályos magyar jogszabályban még 5 és 20 közöttiek szerepelnek).

Az egyes emberi szövetek nem egyformán érzékenyek az ionizáló sugárzás sztochasztikus hatására, azaz a sugárzás dózisa által okozott génmutációk nyomán a rosszindulatú daganatok kialakulására. A gyors életciklusú, relatíve nagy sejtmagot tartalmazó sejtekből felépülő szövetek esetében a legnagyobb a *kockázat*. A szövetek relatív érzékenysége szerint súlyozni kell a szerveket érő, adott esetben (pl. belső sugárterhelés, azaz

a sugárforrások inkorporációja esetén) különböző egyenérték-dózisokat, ez az *effektív dózis*.

$$H_E = \sum_T H_T w_T [Sv] \quad [10]$$

$$\sum_T w_T = 1 \quad [11]$$

w_T a szövetek érzékenységét jellemző relatív szám, a *szöveti tényező* (T = tissue = szövet). A jelenleg alkalmazott w_T értékek: 0,2: nemi szervek; 0,12: vörös csontvelő, tüdő, gyomor, bélrendszer; 0,05: hólyag, emlő, máj, nyelöcső, pajzsmirigy; 0,01: bőr, csontfelszín; a további „maradék” összesen 0,05. A jelenleg hivatalosan még nem alkalmazott, de a nemzetközi sugárvédelmi ajánlásokban már közzétett új w_T értékek: 0,08: nemi szervek; 0,12: vörös csontvelő, tüdő, emlő, gyomor, bélrendszer; 0,04: hólyag, máj, nyelöcső, pajzsmirigy; 0,01: bőr, csontfelszín, agykörnyéki szövetek, nyálmirigyek; a további „maradék” összesen 0,12.

Az említett dóziszfogalmaknak értelmezhető a teljesítményük (idő szerinti deriváltjuk) is. Az egyes dózisteljesítmények mértékegysége Gy/h illetve Sv/h.

3. A mérés célja és az alkalmazott berendezés bemutatása

Elmélet

Nyitott radioaktív sugárforrásokkal való munka során, valamint környezeti szennyezés esetén az emberi szervezetbe mesterséges eredetű radionuklidok juthatnak (*inkorporáció*). A gamma-sugárzást is kibocsátó komponensek minőségének és mennyiségének a becslésére alkalmas mérési eljárás az egésztetszámlálás. Ha feltételezhető, hogy a radioaktív anyag bevitele a kiürüléshez képest rövid idő alatt következett be, akkor az így elszenvedett dózist egyszerűnek (*akut*) tekintjük.

Az élő szervezet jelentős (és gyakorlatilag változatlan) mennyiségben tartalmaz káliumot és ebből adódóan ^{40}K radionuklidot is. A ^{40}K béta- gamma- és röntgensugárzása állandó (*krónikus*) dózist eredményez. A felnőtt szervezet átlagos K-tartalma $p=0,2$ tömeg % (férfiaknál 0,17–0,27%; nőknél 0,13–0,23% között). A ^{40}K az összes kálium $\Theta=0,0117\%$ -a. Ez a mennyiség egy 70 kg-os embernél mintegy 4200 Bq aktivitást eredményez. Ez az aktivitás a gammasugárzás révén mérésrel meghatározható, de az elméletileg várható értéket a testsúly ismeretében ki is számíthatjuk, a fenti adatok valamint a [3] egyenlet felhasználásával. N , a bomlásra képes ^{40}K -magok száma a kálium, illetve a vizsgált személy tömegéből a következőképpen számítható:

$$N = \Theta \times p \times m \times N_A / M \quad [12]$$

ahol m a vizsgált személy testtömege [g],

M a ^{40}K relatív atomtömege (40 g/mol),

N_A pedig az Avogadro-szám (6×10^{23} atom/mol).

Az egésztetszámláló módszer a bevitel módjától, illetve a dózis akut vagy krónikus jellegétől függetlenül az adott pillanatnyi helyzet, azaz a szervezetben éppen a mérés alatt jelenlévő gammasugárzó radionuklidok észlelésére alkalmas. A mérés során detektált radioaktivitás általában közvetlenül nem vezethet el a lekötött dózis meghatározásához, mert ehhez az egyszerre bevitt aktivitás teljes mennyiségét kellene ismernünk, de több, egymás után végzett egésztetszámlálással már a dózist is lehet becsülni. (A lekötött dózis lényegében azonos a [10] egyenlettel definiált effektív dózissal. A fogalom olyan esetekre vonatkozik, amikor az inkorporált radioaktivitás 1 évnél hosszabb ideig tartózkodik a szervezetben.)

Akut inkorporáció esetén az egyes szöveteket (a „cél-szövetet”) érő dózis arányos a radioaktív anyagot tartalmazó szövetekben (a „forrás”-szövetekben) bekövetkező radioaktív bomlások számával, tehát a bomlás és a metabolizmus folyamatai miatt időben változó aktivitás (A) integráljával:

$$u_s = \int_0^t A_s(t) dt \quad [13]$$

ahol u_s a sugárforrást tartalmazó (S = source = forrás) szövetekben bekövetkező bomlások száma a sugárzó anyagnak a szervezetben való tartózkodási ideje (t) alatt. Az inkorporációtól származó effektív dózis becsléséhez ismernünk kell a [13] egyenletben alkalmazandó kiürülési függvényt mindegyik érintett szervünkre nézve, valamint a sugárzás elnyelődését leíró összefüggéseket.

A legegyszerűbb esetben a radioaktív nuklid mennyisége a szervezetben két ok miatt fogy: egyrészt bomlik (ahogy azt a szervezetten kívül is tenné), másrészt azonban az illető kémiai elem sajátosságainak megfelelően az anyagcserével, kiválasztással ki is ürül. Abban az esetben, ha feltehetjük, hogy dt idő alatt az összes bent lévő anyag mennyiségével egyenesen arányos mennyiség ürül ki, akkor a szervezetben bent lévő radioaktív atommagok számának a megváltozása:

$$dN = -\lambda * N * dt - \lambda_b * N * dt = -(\lambda + \lambda_b) * N * dt \quad [13/A]$$

Itt λ változatlanul a bomlási állandó (melyet tévedések elkerülése érdekében *fizikai* bomlási állandónak is nevezhetünk), λ_b pedig a biológiai kiürülést jellemző biológiai bomlási állandó. Ennek a differenciálegyenletnek a megoldása nagyon hasonló az [1] egyenlet megoldásához, csak az ott szereplő λ helyére a $\lambda_{\text{eff}} = \lambda + \lambda_b$ „effektív” bomlási állandót kell írni.

Az aktivitás időfüggvénye ilyenkor is leírható a tisztán nukleáris bomlást leíró [4] egyenlettel; az eltérés csak annyi, hogy λ helyére ekkor az „effektív” bomlási állandó (λ_{eff}) kerül, melynek reciproka a biológiai és fizikai fogyást egyesítő „effektív felezési idővel”

$$(T_{\text{eff}} = \frac{\ln(2)}{\lambda_{\text{eff}}}) \text{ arányos.}$$

Gyakorlat

A gyakorlat során a feladat egy személy ^{40}K -tartalmának, valamint egy feltételezett ^{137}Cs -szennyezésre vonatkozó kimutatási érzékenységnak a meghatározása egésztetszámláló mérőberendezés segítségével.

Az egésztetszámláló egy árnyékoló acélfalak között elhelyezett ágyból és egy föléje pozicionált, oldalról szintén árnyékoló, nagyméretű, γ -fotonok detektálására alkalmas NaI(Tl) szcintillációs detektorból, a detektor jeleit feldolgozó elektronikus egységekből (tápegység, erősítő, analízátor, stb.) tevődik össze, ami egy számítógéphez kapcsolódik a mért adatok feldolgozása és tárolása érdekében. A számítógépen futó, spektrumfelvevő és spektrumkiértékelő szoftver működtetését a gyakorlat folyamán mutatjuk be, a részletekről angol nyelvű gépkönyv áll rendelkezésre. A detektor egy elektromotorral mozgatható. Ez azért előnyös, mert így részben kiküszöbölhetjük a radionuklidok esetleges inhomogén eloszlásából fakadó mérési hibát; a detektor ugyanis így kb. azonos ideig tartózkodik mindegyik testtáj felett, és ha a radioaktív anyag nem egyenletesen oszlik el a szervezetben, egyenlő valószínűséggel állhat elő „kedvező” és „kedvezőtlen” mérési geometria.

A mérés főszereplőjének (a vizsgálandó személynek) a testtömegéből a [12] és [3] egyenletek segítségével meg kell becsülni az ő ^{40}K -aktivitását, melyet össze kell vetni a mérés eredményével.

4. A mérés menete

Elmélet

Spektrum alatt a detektált részecskék energia szerinti eloszlását értjük. Az energiaszelektív sugárzásdetektor a benne elnyelt energiával arányos nagyságú feszültségimpulzusokat generál. A spektrum grafikonjának vízszintes tengelyén a detektor

feszültségimpulzusainak amplitúdójával arányos digitális szám szerepel. (Az amplitúdókat egy analóg-digitál átalakító - ADC - méri meg és alakítja digitális számokká.) Ezeket a digitális egységeket „csatornák”-nak nevezzük. Mivel a feszültségimpulzusok amplitúdója arányos a detektorban leadott energiával, így - energiakalibráció után - a csatornaszámból a detektorban leadott energiára is lehet következtetni. A csatornaszám- energia összefüggés gyakorlatilag lineárisnak tekinthető. A függőleges tengely lineáris vagy logaritmikus skáláján ábrázoljuk, hogy az adott energiájú részecskéből hány darabot detektáltunk a mérés ideje alatt.

Gyakorlat

A gyakorlat során 4 spektrumot kell felvenni:

- (1) Kalibrációs spektrum: ehhez két (ismert radionuklidot tartalmazó, ismert aktivitású) sugárforrást helyezünk az ágyra. A gyakorlatvezető ellenkező értelmű intézkedése hiányában az egyik sugárforrás a 85004 gyári számú ^{137}Cs , amelynek aktivitása 1985. X. 1-jén 40 kBq vagy 43,34 kBq volt²; a másik sugárforrás pedig a 75224 gyári számú ^{60}Co , amelynek aktivitása 1975. X. 2-án 370 kBq volt.
- (2) Háttérpektrum: ekkor mindenki elhagyja a helyiséget (hogy a résztvevők testében lévő ^{40}K ne jelenjék meg a spektrumban).
- (3) Fantomspektrum: ehhez egy emberforma lényt kell összerakni vizes oldatot tartalmazó flakonokból. A feladathoz 45 db másfél literes és 5 db fél literes flakon áll rendelkezésre. Ezek összesen 70 l oldatot tartalmaznak, amiben 923,1 g KCl-ot oldottak fel (ez 14499 Bq ^{40}K -et jelent). A spektrum felvételének idejére mindenki elhagyja a helyiséget.
- (4) Mintaspektrum: ehhez a vizsgálandó személy fekszik az ágyra, a többiek elhagyják a helyiséget.

A (3) fantomspektrum és (4) mintaspektrum felvételének időtartamát úgy kell megválasztani, hogy megegyezzenek a detektormozgás egy teljes ciklusának időtartamával. A felvett spektrumokat azonnal el kell menteni (és a fájlnevet fel kell jegyezni).

Az (1) kalibrációs spektrum felvétele (és mentése) után végezzük el a csatornaszám—energia-kalibrációt, ehhez legalább két csatornaszámhoz hozzárendeljük az energiájukat, a következőképpen:

- A kalibrációs (1) spektrumban kijelöljük a csúcsokat, lehetőleg úgy, hogy a csúcs előtt és mögött (a csúcstól jobbra és balra) néhány csatorna szélességben az alapvonal is a kijelölt tartományba essék. (Ezt a tartományt ROI-nak (region of interest) is nevezik.) A mérőprogram megadja a csúcs centrumának helyét csatornaszámban.

- Mivel a csatornaszám—energia függvény lineáris, az

$$E = a \cdot Cs + b \quad [14]$$

egyenlet paramétereit (a -t és b -t) kell meghatároznunk, ez két adatpár segítségével elvégezhető. (E jelöli az energiát, melynek mértékegysége is van, Cs pedig a csatornaszámot.) A feladatot egyébként a mérőprogram is el tudja végezni.

Ez után már azonosítani tudjuk a ^{40}K csúcsát is, és felvehetjük a többi spektrumot.

5. A detektálási hatások

Elmélet

A detektor általában nem mindegyiket érzékeli a mintát elhagyó γ -fotonok közül, csak egy bizonyos hányadukat. Ennek több oka van. Egyrészt a sugárforrásból kilépő részecskék, γ -fotonok a bomlás természeténél fogva izotróp eloszlásúak, vagyis nemcsak a detektor felé,

² A 40 kBq az Országos Atomenergia Hivataltól származik (ez a hivatalos adat), a 43,34 kBq az Országos Mérésügyi Hivataltól származik (valószínűleg ez felel meg a valóságnak).

hanem bármely irányba elhagyhatják a mintát. Másrészt a detektor érzékeny térfogatába bejutó fotonok sem feltétlenül lépnek kölcsönhatásba a detektorral, azaz eredményeznek jelet a detektor kimenetén. A részletek ismertetése nélkül megjegyezzük, hogy a fotonok és a detektor között létrejehető kölcsönhatások közül sem mindegyik kedvező a számunkra, azaz a beütéseknek csak egy része esik a keresett radionuklidtól származó, felismerhető és a többi csúcstól elkülöníthető úgynevezett teljesenergia-csúcs területére.

A detektálási hatásfok (η) azt adja meg, hogy a sugárforrásból kilépő, adott energiájú fotonok mekkora hányada nyelődik el a detektor érzékeny térfogatában úgy, hogy azokat a többi fotontól elkülönítve érzékeljük. Vagyis

$$\eta(E) = \frac{N_{reg}(E)}{N_{forr}(E)}, \quad [15]$$

ahol az E energiájú részecskéből N_{forr} darab hagyta el a sugárforrást és ezek közül N_{reg} -et regisztrált a mérőberendezés.

A hatásfok logaritmus (a bennünket érdeklő energiatartományban) első közelítésben az energia logaritmusának lineáris függvénye:

$$\log(\eta(E)) = c \cdot \log(E) + d \quad [16]$$

A [16] egyenlet aktuális paramétereinek (c -nek és d -nek) értéke természetesen függ a detektor anyagától, alakjától, a mérési elrendezéstől, valamint attól is, hogy milyen alapú logaritmust alkalmazunk, illetve milyen mértékegységet rendelünk az energiákhoz. Megjegyezzük, hogy a hatásfok és a sugárzási energia közti összefüggést pontosabban írhatnánk le, ha másod- vagy harmadfokú kétszer logaritmikus polinomot alkalmaznánk, de ebben az esetben több etalonforrásra lenne szükség.

6. Csúcsok kiértékelése

Elmélet

Ha egy radionuklid valamely gamma-energiájához tartozó teljesenergia-csúcs megjelenik egy spektrumban, akkor a nuklid aktivitása (A), a csúcs nettó területe (N), a spektrum felvételének időtartama (t), az adott energiához tartozó detektálási hatásfok (η) és a gamma-átmenet gyakorisága (f_γ) között az alábbi kapcsolat áll fenn:

$$A = \frac{N}{t \cdot \eta \cdot f_\gamma} \quad [17]$$

Egy csúcs nettó területe alatt – az egyszerű kiértékelési eljárásokban – általában a csúcs előtti és utáni pontokra illesztett egyenes (az úgynevezett alapvonal) feletti beütésszámok összegét értjük; ezt a számítási módszert „trapéz módszernek” nevezik

Ha a nuklid nemcsak a mintában, hanem azon kívül (pl. a berendezés árnyékolásában, a helyiség falában) is jelen van, akkor az aktivitás számítása kissé bonyolultabb; ekkor a

számlálóba N helyett $N - \frac{t}{t_H} \cdot H$ írandó, ahol H a csúcs nettó területe a háttér spektrumban, t_H

pedig a háttér spektrum felvételének időtartama.³

³ A helyzetet egyszerűsíti, ha a minta és a háttér között az egyetlen különbség a ^{40}K csúcsának nagysága. Ebben az esetben a nettó csúcsterületek különbsége elvileg azonos a bruttó (a trapéz alapvonal levonása nélkül kapott) területek különbségével, azaz a [17] egyenletben szereplő N értékéhez egy egyszerű kivonással eljuthatunk.

6. Hatásfok-kalibráció és a spektrumok kiértékelése

Gyakorlat

A [7] egyenlet segítségével számítsuk ki a kalibrációhoz használt sugárforrások aktuális aktivitását!

A kalibrációs (1) spektrumban jelöljük ki a kalibráló nuklidok csúcsait, a mérőprogram és a gyakorlatvezető segítségével határozzuk meg azok nettó területét!

A [17] egyenlet (átrendeztet alakjának) segítségével határozzuk meg a kalibrációs sugárforrások γ -energiáihoz tartozó detektálási hatásfokokat!⁴

A [16] egyenlet alapján határozzuk meg a c és d konstansok értékét, majd a ^{40}K γ -energiájához tartozó detektálási hatásfokot! A csúcsok energiáját [keV]-ben kell behelyettesíteni, és természetes alapú logaritmust kell használni.

Határozzuk meg a ^{40}K γ -energiájához tartozó detektálási hatásfokot a (3) fantomspektrum segítségével is! A (3) fantomspektrumban jelöljük ki a ^{40}K csúcsát, majd a mérőprogram segítségével határozzuk meg a bruttó és nettó területét! A (2) háttérpektrumban is jelöljük ki a ^{40}K csúcsát (a ROI ugyanaz legyen, mint a (3) spektrum esetében), majd a mérőprogram segítségével határozzuk meg ennek is a bruttó és nettó területét! A [17] egyenlet módosított alakjának átrendeztetésével számítsuk ki a ^{40}K γ -energiájához tartozó detektálási hatásfokot! Az eredményt vessük össze a [16] egyenlet alapján számolt detektálási hatásfokkal!

Végül értékeljük ki a (4) mintaspektrumot is! Ebben is jelöljük ki a ^{40}K csúcsát (a ROI ugyanaz legyen, mint az eddigi spektrumok esetében), majd a mérőprogram segítségével határozzuk meg a bruttó és nettó területét! A [17] egyenlet módosított alakját használva számítsuk ki a „mintadiák” ^{40}K -aktivitását! Az eredményt diszkutáljuk a 3. fejezetben foglaltak figyelembe vételével!

7. A ^{40}K -tól származó belső sugárterhelés

Elmélet

Ismerve a ^{40}K bomlására jellemző adatokat, az aktivitásból a belső sugárterhelés [18] általános számítási egyenletével kiszámítható az egy évre jutó „krónikus” egyenérték dózis.

$$H_T = \left(\sum_S u_s * \sum_R f_R * E_R * Q_{S \rightarrow T} * w_R \right) * \frac{1}{m_T}, \quad [18]$$

ahol u_s a sugárforrást (radioaktív anyagot) tartalmazó szövetekben ($S = \text{source} = \text{forrás}$) t idő alatt bekövetkező bomlások száma, amit a korábban már tárgyalt [13] integrálegyenlettel határozzunk meg.

A [18] egyenletben A_S az „ S ” szövetben lévő aktivitás, E_R a sugárzás energiája, f_R a bomlási gyakoriság, $Q_{S \rightarrow T}$ az abszorpciós hányad, m a „ T ” (target, cél) szövet tömege. Q értékét – itt nem részletezendő levezetéssel – β -sugárzásra 1-nek, a ^{40}K γ -energiájára 0,34-nek becsüljük, ami azt jelenti, hogy a β -részecskék energiájának 100%-a, a γ -részecskék energiájának 34%-a marad a testszövetekben. Mivel a ^{40}K egyenletesen oszlik el a szervezetben, elegendő egy „ S ” forrás-szövetet és ugyanazt az egy „ T ” cél-szövetet (az egész testet) feltételezni. Így H_T azonos lesz H_E -vel, az egész test effektív dóziséval. Az R szerinti összegzés azt jelenti, hogy a kifejezés értékét össze kell adni minden olyan sugárzásra, melyet a vizsgált nuklid kibocsát (^{40}K esetén β - és γ -sugárzásra).

⁴ Tájékoztató eláruljuk, hogy nagyságrendileg 10^{-3} -os értékeket kell kapnunk.

Gyakorlat

A ^{40}K bomlására jellemző (a mérésleírás végén, a 9. szakaszban található) adatok és a [13] és [18] egyenletek segítségével számítsuk ki a megmért személy által, a saját testében lévő ^{40}K -tól egy év alatt elszenvedett dózist! ($1 \text{ keV} = 1,602 \times 10^{-16} \text{ J}$)

8. A ^{137}Cs -től származó belső sugárterhelés és a detektálási határ*Elmélet*

Az inkorporáció biológiai mechanizmusát, illetve a környezetből való hozzáférés „forgatókönyvét” tanulmányozva a kutatók minden jelentős radionuklidra meghatározták az egységnyi aktivitás felvételétől származó effektív dózis értékét. Ezeket az értékeket, melyek tulajdonképpen „veszélyességi mutatók”, dóziskonverziós tényezőnek (*DCF*) nevezik, mértékegységük Sv/Bq. A DCF-adatbázis szinte napról napra fejlődik, alakul. Mivel célunk, hogy a ^{40}K -tartalom mellett a spektrumokból meghatározzuk a szervezetben normális körülmények között nem megtalálható ^{137}Cs -re vonatkozó kimutatási érzékenységet, az ahhoz rendelhető aktivitást (*A*), valamint az ahhoz tartozó effektív dózist (H_E) is, szükségünk van a ^{137}Cs lenyeléssel történő inkorporációjára vonatkozó DCF-értékre is. Ekkor tehát nem szükséges a [18] egyenlet használata, elegendő az abból levezethető, egy-egy adott inkorporációs és kiürülési „forgatókönyvnek” megfelelő összefüggés, amely az effektív dózis és az azt okozó, inkorporált radioaktivitás (A_{BE}) közötti arányosságot fejezi ki:

$$H_E = A_{BE} \times DCF \quad [19]$$

A sugárvédelemben általában „konzervatív” megközelítést alkalmazunk. Ez olyan becslési eljárást jelent, melyben a kedvezőtlen kimenetel(ek) hangsúlyosabb(ak), mint a kedvező(k). (Magyarul „óvatos” megközelítést is emlegethetnénk, de a sugárvédelmi szaknyelvben már kipusztíthatatlanul meggyökeresedett az angol eredetű szó.)

A konzervatív közelítés érdekében feltételezzük, hogy a kimutatási határ értékének megfelelő aktivitás korábban *már többször, például négyszer feleződött*. (Lásd a 3. fejezetben írottakat az effektív felezési idővel kapcsolatban.) A kimutatási érzékenység számításának részleteit itt nem ismertetjük, elegendő azt leszögezni, hogy a számítások alapja annak az elképzelt csúcsnak a területe, amelyet az adott alapvonalon jól felismerhetnénk ott, ahol jelenleg nincsen felismerhető csúcs. Ezt a csúcsterületet (beütésszámot) az aktuális alapszint értékének statisztikus szórásából határozhatjuk meg, az alábbi összefüggések segítségével.

Tegyük fel, hogy egy mérésnél (a minta mérésénél) a csúcs várható tartományában *S* beütést detektáltunk, a korábbi alapszintmérésnél pedig *B*-t, a „háttérrel” mértük. A nukleáris alapmennyiségek, így a beütésszámok természetüknél fogva statisztikus bizonytalansággal terheltek. Ez a variancia ismert, *B* beütésszám varianciája [szórásnégyzete] is *B*, tehát szórása \sqrt{B} . A felismerhető csúcsként detektálható legkisebb beütésszám, az úgynevezett **kritikus szint**, L_C definíció-egyenlete az alábbi:

$$L_C = k_\alpha \cdot \sigma_0, \quad [20]$$

ahol k_α a felismerés biztonságára jellemző szignifikancia-tényező, σ_0 pedig az *S*–*B* mennyiségnek, azaz a nettó csúcsterület értékének statisztikus szórása. Ha *S* közelítőleg azonos *B*-vel, tehát a csúcs még nem felismerhető, akkor – amennyiben a háttérrel is csak egyetlen mérésből tudtuk meghatározni – a mintaméréssel kapott nettó beütésszám szórása az alábbi:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_B^2} \cong \sqrt{B + B} \quad [21]$$

A „**detektálási szint**” (L_D) az a „valódi” jel = nettó beütésszám, amely, ha jelen lenne a mintában, β biztonsággal eredményezne detektálható csúcsot. A detektálási határ levezetését mellőzve, és a biztonsági szintet az előzővel (a [20] egyenletben alkalmazott α -val) azonosnak véve (tehát $k_\beta = k_\alpha = k$), az alábbi összefüggést kapjuk:

$$L_D = 2 \cdot L_C + k^2 \quad [22]$$

Az így kapott beütésszámot a [17] egyenlettel aktivitássá átszámolva megkaphatjuk a [19] egyenlettel a legkisebb, még detektálható effektív dózist, amit az adott sugárforrás okozhat. Összevetésképpen: a természetes eredetű éves lakossági sugárterhelés mintegy 2,5 mSv; a lakosságra vonatkozó, mesterséges forrásokból származó dóziskorlát pedig 1 mSv effektív dózis évente.

Gyakorlat

Ha (amit őszintén remélünk) a vizsgált személyben nincsen kimutatható mennyiségű ^{137}Cs , a róla felvett (4) spektrum háttérnek számít egy olyan spektrumhoz képest, amelyből kimutatható a ^{137}Cs (például egy jelentős mennyiségű ^{137}Cs -ot tartalmazó személy spektrumához képest). Ezért a (4) spektrumban jelöljük ki a ^{137}Cs csúcsának a helyét. (Használjuk a kalibráló (1) spektrumnál használt ^{137}Cs -ROI-t!) A mérőprogram és a gyakorlatvezető segítségével határozzuk meg a csúcs teljes (bruttó) területét!

Ezt az értéket B helyébe, k_a és k helyébe pedig az 5 %-os „első- és másodfajú hibának” megfelelő 1,645-t behelyettesítve [21] és [20] alapján számoljuk ki L_C -t, [22] alapján pedig L_D -t! Ennek az L_D -nek az értékét helyettesítsük N helyébe a [17] egyenletben, az így kapott A tizenhatszorosát pedig a [19] egyenletbe! (Ezzel a korábban már említett konzervatív becslést hajtjuk végre, azaz a felvett aktivitás négyszeres feleződését vesszük számításba.) A ^{137}Cs DCF-je lenyeléssel bekövetkezett inkorporáció és felnőtt személy esetére $1,3 \times 10^{-8}$ Sv/Bq.

9. A mérésleírásban szereplő nuklidok fontosabb nukleáris adatai

Radionuklid	Felezési idő	Gamma-energia	Gamma-gyakoriság (f_γ)
^{137}Cs	30,0 év	662 keV	0.85
^{60}Co	5,27 év	1173 keV	1.0
		1332 keV	1.0
^{40}K	$1,28 \times 10^9$ év	1461 keV	0.11

A ^{40}K bomlási állandója $\lambda = 1,73 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}$, moláris atomtömege $M_K = 40 \text{ g/mol}$; β -bomlása $f_\beta = 0,89$ gyakorisággal, $E_{\beta, \text{at}} = 455 \text{ keV}$ átlagos β -energiával történik.

10. Elvárások a jegyzőkönyvvel kapcsolatban

Elmélet

Mivel tudományos cikkekben is csak utalni, hivatkozni szoktak másutt már közzétett eljárásokra, és nem szokás teljes részletességgel megismételni azokat, továbbá mivel minden egyetemi hallgatóról feltételezhető, hogy ismeri a <Ctrl>-<c> és <Ctrl>-<v> billentyűkombinációkat, a jegyzőkönyvbe nem kell átmásolni az elméleti bevezetőt.

Gyakorlat

A jegyzőkönyvben nagyon tömören és lényegre törően szerepeljenek:

- a mérés címe, időpontja, helyszíne,
- a mérést végző hallgatók és oktató(k) nevei,
- a mérés célja, elve,
- a mintaspektrum felvételéhez használt személy neve és tömege,
- a használt berendezés ismertetése,
- a spektrumok nevei, felvételi idejük,
- a csúcsok integrálási határai, bruttó illetve nettó beütésszámok,

- a mérésleírásban kért összes számolás,
- a ^{40}K -tól és a ^{137}Cs -tól származó belső dózis diszkutálása,
- minden egyéb, amit a mérésvezető kért.

A jegyzőkönyv ideális terjedelme néhány A4-es oldal.

A jegyzőkönyvvel kapcsolatban a gyakorlatvezető természetesen a fentiektől eltérő igényeket is megfogalmazhat.

11. Ellenőrző kérdések

- Értelmezze az aktivitást, a bomlási állandót és a felezési időt, továbbá adja meg SI-alapegységüket!
- Írja fel az exponenciális bomlástörvényt! Adja meg a képletben szereplő betűk jelentését és SI-alapegységét!
- Ismertesse a fizikai és biológiai dóziszfogalmakat, továbbá a közöttük fennálló összefüggéseket!
- Állítsa sorba az alfa- béta- és gamma-sugárzást veszélyesség szempontjából (a) testen kívüli, és (b) testen belüli (inkorporált) radioaktív szennyezés esetén!
- Magyarázza meg az effektív bomlási állandó és az effektív felezési idő fogalmát! Miért nevezzük ezeket a mennyiségeket „effektív”-nek?
- Mit nevezünk spektrumnak?
- Mely mennyiségek vannak egy alfa- vagy gamma-spektrum grafikonjának tengelyein?
- A laborgyakorlat során 4 spektrumot veszünk fel. Melyek ezek és hogyan vesszük fel ezeket?
- Magyarázza meg, mi a detektálási határfok!
- Ismertesse az energia-kalibráció menetét!
- Ismertesse a határfok-kalibráció menetét!
- Mi az a „fantom”, és mi a szerepe a mérésben?
- Ismertesse a trapéz-módszert!
- Egy mintáról felvettünk egy spektrumot, és megtaláltuk benne egy nuklid csúcsát. Mely adatok segítségével és hogyan lehet kiszámolni az adott nuklid mintabeli aktivitását?
- Mit fejez ki a dóziskonverziós tényező?
- Magyarázza meg a különbséget az L_C és az L_D értékek között!
- Miért kell mozgatni a detektort az egésztest-számlálóban, és miért jó, ha ez a mozgás egyenletes?

A felkészülés ellenőrzésekor a gyakorlatvezető természetesen más kérdéseket is feltehet.