



AZ ATOMENERGIA- ÉS MAGKUTATÁS ÚJABB EREDMÉNYEI

Kísérleti és ipari gamma-besugárzó- berendezések és alkalmazásuk

FÖLDIÁK GÁBOR - STENGER VILMOS



AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST

Az atomenergia- és magkutató újabb eredményei 2.

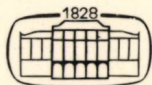
Szerkeszti
Koltay Ede

Kísérleti és ipari gamma-besugárzóberendezések és alkalmazásuk

Földiák Gábor és Stenger Vilmos

A könyv általános tájékoztatást ad a radioaktív sugárforrások előállításáról, ellenőrzéséről, szállításáról és a biztonságtechnikai feladatokról. Ismerteti mindazokat a kísérleti, félüzemi és nagyüzemi besugárzóberendezéseket, amelyeket — többek között — elméleti (fizikai, kémiai, biológiai) vizsgálatokra, mezőgazdasági és élelmiszeripari besugárzásokra, gyógyászati segédeszközök sugársterilizálására használnak. Közli azokat a fizikai és kémiai módszereket is, amelyek a dózis (dózisteljesítmény) meghatározására szolgálnak, és amelyek a besugárzás mértékének ellenőrzéséhez nélkülözhetetlenek. A tervezést segíti a dózisterek ellenőrzését és a technológiai vizsgálatot szolgáló módszerek leírása.

A szerzők a kézikönyv és a tudományos publikáció igényeit egyaránt kielégítik, ezért a kötet a sugártechnika elméleti és gyakorlati kérdéseivel foglalkozó valamennyi szakember figyelmébe ajánlható.



Akadémiai Kiadó · Budapest

**Az atomenergia- és magkutató
újabb eredményei**

2

**Az atomenergia- és magkutatás
újabb eredményei**

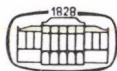
2. kötet

Szerkeszti

KOLTAY EDE

A szerkesztő bizottság tagjai

**Berényi Dénes, Csikai Gyula, Csom Gyula, Gyimesi Zoltán,
Keszthelyi Lajos, Korecz László, Dörnyeié Németh Judit,
Pócs Lajos, Szathmári Zoltán, Szabó Ferenc, Veres Árpád**



Akadémiai Kiadó · Budapest 1983

Az atomenergia- és magkutató újabb eredményei

2

Kísérleti és ipari
gamma-besugárzóberendezések
és alkalmazásuk

Földiák Gábor—Stenger Vilmos



Akadémiai Kiadó · Budapest 1983

ISBN 963 05 3098 8

© Akadémiai Kiadó, Budapest 1983

Printed in Hungary

Az ipar és az élelmiszergazdaság technikai forradalma, valamint az atomenergia békés felhasználásának fejlődése szerencsés házasságából alakultak ki a sugártechnológiák. Ezek olyan eljárások, melyek elektron- vagy γ -sugárzás segítségével a céltárgy gyakorlati szempontból előnyös maradandó változását okozzák.

A sugártechnikai eljárások nemcsak külföldön nyertek polgárjogot, hanem Magyarországon is: 1976 óta a Medicor Művek Debreceni Orvosi Műszergyárában nagyüzemi γ -sugársterilizáló, 1978 óta pedig a Villamosszigetelő- és Műanyaggyárban elektronbesugárzáson alapuló műanyag-feldolgozó berendezés működik. Ezekhez az eljárásokhoz — a külföldi tapasztalatok és berendezések átvétele mellett — a hazai kutatás sok eredményének hasznosítására is szükség volt.

A γ -sugártechnikák tudományos-műszaki háttéréről kíván ez a könyv általános képet adni, azonban nem foglalkozik a sugárzásnak — az utóbbi időben szintén jelentősen fejlődött — gyógyászati alkalmazásával.

The first part of the paper deals with the general theory of the subject. It is divided into two main sections: the first section deals with the general theory of the subject, and the second section deals with the special theory of the subject. The first section is divided into three parts: the first part deals with the general theory of the subject, the second part deals with the special theory of the subject, and the third part deals with the special theory of the subject. The second section is divided into two parts: the first part deals with the special theory of the subject, and the second part deals with the special theory of the subject.

Tartalom

Bevezetés	9
1. A besugárzás eszközei	12
1.1 A radioaktív sugárforrások	12
1.1.1 Radioaktív kobalt (^{60}Co)	12
1.1.2 Radioaktív cézium (^{137}Cs)	20
1.1.3 Atomreaktor és kiégett fűtőelem	23
1.2 A besugárzóberendezések	24
1.2.1 Laboratóriumi berendezések	24
1.2.2 Panoráma típusú berendezések	28
1.2.3 Több célú berendezések	31
1.2.4 Félüzemi berendezések	35
1.2.5 Nagyüzemi berendezések	41
1.2.6 Mobilis berendezések	45
1.3 A dózistér modellezése	47
1.3.1 Modellezés számítással	47
1.3.2 Modellezés fénycsővel	54
2. A dózis és dózisteljesítmény mérése	56
2.1 Fizikai dozimetria	60
2.1.1 Kalorimetria	61
2.1.2 Gázionizációs detektorok	62
2.1.3 Szcintillációs detektorok	63
2.1.4 Termolumineszcens (TL) doziméterek	64
2.1.5 Üvegdoziméterek	64
2.1.6 Dózisteljesítmény mérése félvezető sugárzásdetektorokkal	65
2.2 Kémiai doziméterek	68
2.2.1 Vas-szulfátos Fricke-féle doziméter	68

2.2.2 Vas-szulfát—réz-szulfátos, módosított Fricke-féle doziméter	71
2.2.3 Cérium-szulfátos doziméter	72
2.2.4 Klór-benzolos dozimetria	74
2.2.5 Liolumineszcens (LL)doziméterek	77
2.2.6 Poli(metil-metakrilát) (PMMA, Perspex, Lucite, Plexiüveg) doziméterek	78
2.2.7 Színezék (Radiochromic) doziméterek	78
2.2.8 Poli(vinil-klorid) (PVC) doziméterek és dózisindikátorok	79
3. Ellenőrzés és üzemeltetés	81
3.1 A sugárforráselemek ellenőrzése	81
3.2 A besugárzótér ellenőrzése	82
3.3 A besugárzandó anyagot is tartalmazó tér ellenőrzése	88
3.4 A dóziseloszlás ellenőrzése a besugárzott anyagban (áruban, dobozban)	97
3.5 Dózisellenőrzés félüzemi besugárzáskor	101
4. Sugárvédelmi, biztonsági és gazdasági kérdések	102
4.1 Védekezés külső sugárzás ellen	102
4.2 Védekezés belső sugárzás ellen	109
4.3 Munkavédelem és biztonságtechnika	110
4.4 Sugárforrások szállítása, cseréje és temetése	113
4.5 Gazdasági kérdések	116
Összefoglalás	117
Irodalom	118
Függelék: Mértékegységek átszámítása	124

Bevezetés

Az elmúlt évtizedben a sugártechnikák egy része a termelés eszközüvé vált: nagyüzemileg gyártanak speciális műanyagkészítményeket, lassan egyeduralkodóvá válik az egyszer használatos gyógyászati eszközök sugársterilizációja [1—3] és — átmeneti megtorpanás után — az élelmiszerek sugárkezelése [4] is kezd betörni a gyakorlati életbe. Ma már világviszonylatban 2—3 milliárd dollárra tehető a sugártechnikát alkalmazó termelés évi értéke [5].

Míg a műanyagok sugárkezelésére a gyakorlatban szinte kizárólag az elektrongyorsítók használatosak sugárforrásként [2], a többi területen a γ -besugárzók — ha nem is gyorsan, de egyértelműen — folytatják térhódításukat [1—3].

Ennek megfelelően — az élenjáró országok mellett — fokozódik a fejlődő országok igyekezete is a γ -sugárforrásokat alkalmazó módszereknek a népgazdaságba, a népélelmezésbe, a környezetvédelemben történő bevezetésére.

A vegyipar területén ojtott polimerek előállításával javítják egyes textiliák tulajdonságait (pl. biztosítják poliészterek és poliolefinok színezhetőségét) [6, 7], térhálósítással kedvezőbbé teszik egyes gumifélék és polimerek (pl. polietilén) mechanikai tulajdonságait [8, 9], értékes fa-műanyag kombinációkat állítanak elő [10], szerves és szervetlen szintéziseket végeznek [11] stb.

Az élelmiszergazdaságban is sok kutatás-fejlesztés folyik, melyek részint a közvetlen termelés fokozását, részint a már megtermelt termékek megőrzését, illetve minőségjavítását tűzik ki célul. Egyes

növények kis (1 Gy körüli) dózissal történő besugárzása növeli a termőképességet, anélkül azonban, hogy ez a tulajdonság (akárcsak a hibridek esetén) öröklődne (stimulálás) [12, 13], míg nagyobb dózisu (10 – 500 Gy) besugárzással már kedvező öröklődő tulajdonságok is elérhetők (mutációk) [14, 15]. Közvetve növeli a mezőgazdaság termelékenységét a növényvédelem: az ún. steril hím módszerrel zárt földrajzi egységekben növényi és állati kártevő rovarok irtásával (50—200 Gy) értek el szép eredményeket [16, 17].

A mezőgazdasági termékek tárolhatóságának javítására, a burgonya és hagyma csírázásának lassítása (50—100 Gy) [18, 19], a gabona féregtelenítése (25—1000 Gy) [16], a hal és állati termékek hosszabb ideig történő tárolhatósága (2—6 kGy) érdekében [20] lehet félüzemi kísérleteket végezni. Mód van a sugárzás és egyéb fizikai és/vagy kémiai módszerek kombinálására is, a dózis csökkentésére [21]. Környezetvédelmi célokat szolgál a háztartási és mezőgazdasági szennyvíziszap sugárkezelése, melynek révén az szerves trágyaként használható anélkül, hogy a mezőgazdasági termékeket megfertőzhetné [16].

A termelés gazdaságosságához és a használati érték növeléséhez olyan sugártechnikai módszerek járulnak hozzá, amelyek pl. gyorsítják a konyak érését (5—10 kGy) [16], javítják egyes gyümölcsök és főzelékek színét (5—8 kGy), vagy segítve a szárítmány rehidratálását, 20—35%-ára csökkentik a szükséges főzési időt (5—40 kGy) [22].

A sugársterilizálás főként az orvosi segédeszköz előállító iparban (pl. egyszer használatos injekciós tűk, fecskendők, vérvételi szerelvények gyártása) lett jelentős [23, 24], kibővítve az e célra használható műanyagok körét az olyan, viszonylag olcsóbb műanyagokkal (pl. PVC), melyek nem lévén hőállóak, nem hősterilizálhatók [9]. Bizonyos gyógyszerek és kozmetikai cikkek sugárkezelése is fontossá vált (kb. 25 kGy) [25, 26]. Az élelmiszerek hosszú tárolhatóságára irányuló sugársterilizálás felhasználási köre korlátozott (pl. úrkutatás, katonai utánpótlás) [27].

Szélesedik a sugárhatás-kémiai és sugárbiológiai kutatás-fejlesztési tevékenység köre is: sok laboratóriumban vizsgálják az atomerőművek és az úrkutatás szempontjából fontos szerkezeti

anyagok sugárállóságát, foglalkoznak célszerű hibridek és mután-
sok előállításával, környezetvédelmi technológiákkal stb.

Ez az igyekezet természetesen sarkallja és gyorsítja a gyengén fejlett és fejlődő országokban is az ilyen munkákat: ezekben a szellemi és anyagi igények egyidejűleg teszik szükségessé a tudás növelését szolgáló kutatást és a bevezetésre irányuló félüzemi fejlesztőtevékenységet. Ha pedig ezek sikeresek, nem lehet várni a gyakorlati megvalósítással a célberendezések beszerzéséig, hanem égetően fontos lehetőséget teremteni a rutinszerű, gyakorlati célú sugárkezelésre (sugársterilizálás, sugártartósítás stb.). Ezért nő a kísérleti-fejlesztő munkára szolgáló több célú besugárzóberendezésekkel végzett munkák jelentősége.

1. A besugárzás eszközei

1.1 A radioaktív sugárforrások

A kísérleti, félüzemi és nagyüzemi besugárzóberendezések szerkezetét és alkalmazásának módját alapvetően az jellemzi, hogy milyen radioaktív izotópot tartalmaznak. A jelenleg működő létesítmények aktivitásának több mint 95%-a radioaktív kobalt, a fennmaradó hányad pedig radioaktív cézium [28]. Tudomásunk szerint ma már — a kezdeti nagy remények ellenére — csak kiégett fűtőelemekkel egy berendezés sem működik [29].

Míg a ^{60}Co és a ^{137}Cs előállításának magfizikája természetesen alapvetően eltér, e zárt sugárforrások gyártási technológiája (lezárása, kezelése és ellenőrzése) nagyon hasonló.

1.1.1 Radioaktív kobalt (^{60}Co)

A radioaktív kobaltot inaktív fémkobalt célananyagnak atomreaktorban történő besugárzásával állítják elő [30]. A céltárgy alakját elsősorban annak megfelelően kell megválasztani, hogy az atomreaktor fluxussűrűség-változását figyelembe véve minél egyenletesebb aktivitáseloszlást és minél nagyobb fajlagos aktivitást tegyen lehetővé. A felhasználási technológia céljára az elsődlegesen előállított sugárforrássegységekből — valamint az önabszorpció csökkentésére kis sűrűségű fémből (pl. alumíniumból), — tetszés szerinti alakú sugárforrás kombinálható.

A fémkobalt elemek általában 1 mm átmérőjű, 1 mm magas hengertől körülbelül 25 mm átmérőjű, 1—2 mm vastag korongig, illetve 10—20 mm magasságú hengeres alakig változhatnak, de —

főleg ipari célra — gyakoriak az 5—8 mm átmérőjű és 20—200 mm hosszú hengerek, „ceruzák” is.

Az aktiválás előtt a fémkobalt felületét — a későbbi szennyezésveszély csökkentésére — először fényesítik (mivel az oxidált, érdes kobalt felületszennyezés szempontjából sokkal veszélyesebb), majd általában pl. nikkel felületvédelemmel látják el, és a céltárgyat alkalmas (pl. alumínium vagy cirkónium-ötvözet) tubusba helyezik [30]. Közvetlen felületvédelemre olyan inaktív anyagok alkalmasak, melyek a reaktorban nem aktiválódnak, vagy belőlük csak rövid felezési idejű, tehát aktivitásukat gyorsan elvesztő nuklidok képződnek.

Főleg kisebb aktivitás esetén (40 MBq nagyságrendig) jól alkalmazhatók egyes műanyag (pl. epoxi) bevonatok is, melyek a végleges felületvédelem szerepét is betölthetik, de csak viszonylag rövid ideig (5—6 hónapig, esetleg évekig) használhatók [31]. Ampullában történő aktiváláshoz a kvarc vagy alumínium a legalkalmasabb, mivel ezek — kellő tisztaság esetén — nem válnak tartósan radioaktívvá [32].

A ^{60}Co -izotópot a természetes ^{59}Co -izotóp atomreaktorban történő besugárzásával, (n, γ) magreakcióval kapjuk, mely utóbbi γ -emisszió révén erősen gerjesztett ^{60}Ni -ná alakul, egy 1,17 MeV és egy 1,33 MeV energiájú γ -kvantum kibocsátása mellett. A 0,31 MeV energiájú β -részecske magában a sugárforrásban és a védőtokban elnyelődik, így az sugártechnológiai szempontból figyelmen kívül hagyható [30].

Az aktiválás alapképlete figyelembe veszi, hogy az aktiválással egyidejűleg a képződött nuklid bomlása is lejátsszódik:

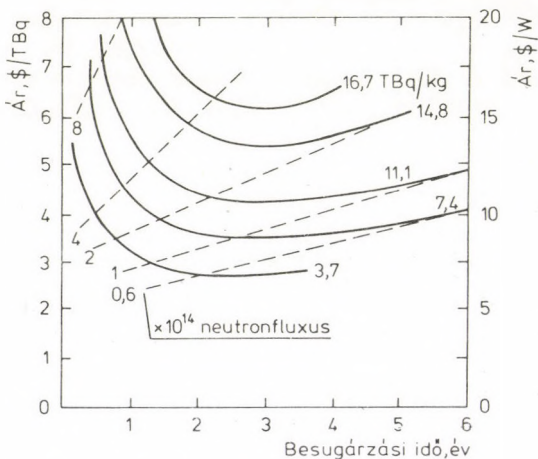
$$A_T = 6,02 \cdot 10^{24} \frac{1}{\mathcal{A}} \alpha \sigma m \Phi \left[1 - \exp\left(-0,69 \frac{T}{T_{1/2}}\right) \right], \quad (1)$$

ahol A_T az adott aktiválási időhöz (T , s) tartozó radioaktivitás, Bq; \mathcal{A} a célelem tömegszáma (atomszáma); α a célnuklid (izotóp) relatív gyakorisága a természetes célelemben, atom-százalék; σ a mikroszkópikus aktiválási hatáskeresztmetszet, m^2 ; m a célelem tömege, kg; Φ a neutronfluxus-sűrűség, $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$; $T_{1/2}$ az előállított nuklid felezési ideje, s.

Az (1) képletből látható, hogy amikor a bomlás bruttó sebessége eléri az aktiválását, az aktivitás (fajlagos aktivitás) további növelésére már nincs lehetőség, és nagyobb fajlagos aktivitást csak nagyobb fluxussűrűségű atomreaktorral lehet biztosítani.

Ha valamennyi ^{59}Co -atomot ^{60}Co -atommá alakítanánk át, ez $42,6 \text{ PBq kg}^{-1}$ fajlagos aktivitásnak felelne meg: 4 PBq kg^{-1} fajlagos aktivitás esetén tehát a kobaltatomok 9%-a ^{60}Co , a többi pedig a stabilis célanyag, illetve a bomlás leányelemei. A tudomásunk szerint az eddig elért legnagyobb fajlagos aktivitás $\sim 25 \text{ PBq kg}^{-1}$ [33].

A gyakorlatban azonban a fajlagos aktivitás lényegesen kisebb, általában mindössze $0,1\text{--}12 \text{ PBq kg}^{-1}$. Míg ui. sugárterápiára,



I. ábra. ^{60}Co előállítás költségeinek alakulása

valamint radiografiai és kutatási célokra igen fontos lehet a nagy ($2\text{--}12 \text{ PBq kg}^{-1}$) fajlagos aktivitás [30], addig sugársterilizálás vagy más sugártechnikák esetén a $0,2\text{--}5 \text{ PBq kg}^{-1}$ elegendő, és a nagyobb fajlagos aktivitásból adódó költségtöbbletet a technológia nem viseli el (1. ábra). Ha a céltárgy helyén a reaktorban a neutronfluxus-sűrűség $10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, úgy kobaltból havonta

1. táblázat. A ^{60}Co és ^{137}Cs főbb sugárfizikai adatai

Nuklid	Felezési idő, év	A sugárzás fajtája	A sugárzás energiája és relatív gyakorisága				Dózis- állandó, $\mu\text{Gy}_{\text{lev}} \text{m}^2$ GBq h	Kisugár- zott ener- gia, W/PBq
			β		γ			
			MeV	%	MeV	%		
^{60}Co	5,27	β^- , γ	0,312	99,0	0,059	99	305	400
			1,48	0,15	1,172	99		
			1,478	0,01	1,133	99		
			0,630	0,004	0,825	0,003		
					2,158	0,001		
^{137}Cs	30	β^-	0,514	82,9			76	99,6
		$^{137}\text{Ba}^m$	1,18	7,6	0,661	89,2		

körülbelül $0,4 \text{ PBq kg}^{-1}$ fajlagos aktivitásnövelés érhető el, természetesen a telítési fajlagos aktivitásig. A ^{60}Co legfontosabb adatait az 1. táblázat tartalmazza.

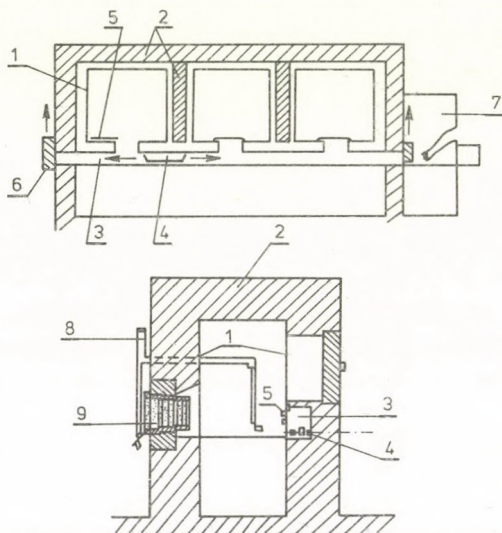
A bomlás során képződő stabilis nikkelt a fémkobaltot folyamatosan hígítja; bár minden koncentrációarányánál szilárd az oldat, az összetétel a fémtövezt keménységét és sűrűségét befolyásolja [30].

Az atomreaktorból érkező radioaktív anyag először a vizesaknába kerül, ahol a szállítókonténerből kiemelik és tárolják (Atomic Energy of Canada, Ltd., AECL [33]). A tárolás alapvető célja az első védőburkolat anyagában képződött izotópok lecsengésének kivárása, valamint a tok felületének dekontaminálása. A tároló, pihentető vizesaknát folyamatos ioncserével dekontaminálják. Az aknából jut az aktivált kobalt a további manipulációkra szolgáló forrófülkébe [33].

A vizes módszerrel szemben pl. a szovjet sugárforrások „száraz eljárással” a reaktorból közvetlenül a forrófülkébe, illetve az első tokba kerülnek, amely rozsdamentes acél. Olyan sugárforrásokat, amelyeket aktiválásuk előtt alumíniumburkolattal láttak el, fokozott korrózióveszélyük miatt csak száraz eljárással lehet feldolgozni.

A forrókamra vastag (általában 1,5—2,0 m) betonvédőfalakkal körülvett, kb. $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ -es tér, mely speciális sugárnyékolású ólomablakkal van ellátva (2. ábra). Ajtaja ezzel sugárvédelmileg

egyenértékű acél. A kamrán belüli műveletekre manipulátorokkal kerül sor [34]. A forrókamrák egyes kutatási feladatok ellátására, pl. besugárzások végzésére is alkalmasak. Sugárforrás-feldolgozásra azonban nem minden forrófülke felel meg, csak azok, amelyek az adott technológiát minden szempontból kielégítik.



2. ábra. Forrófülke

1. légmentesen záró belső burkolat; 2. védelem; 3. alagút; 4. szállítószalag; 5. ajtó; 6. konténer beadó; 7. inaktív anyagok részére beadótér; 8. manipulátor; 9. ólomablak

A dekontaminált felületű sugárforrások surrantón át jutnak újabb tokozásra a második forrófülkébe. A második tokozás (kapszulázás) alapvető célja, hogy — az első tokozás kiegészítésére — tartósan biztosítsa a környezet védelmét, tehát a szennyezés elkerülését. Mivel a sugárforrás felületi hőmérséklete 100°C hőmérsékletet is meghaladhat, oxidációval és diffúzióval is számolnunk kell. Ezért a második sugárforrástok (kapszula) kizárólag korrózióálló acélból készülhet. A hegesztést argon védőgázzal és olyan volfrámelektrodával kell végezni, mely a hegesztés során nem épül be a varratba, ezáltal csökkentve a korrózió veszélyét. A

hegesztés minőségét — általában automatikus módszerrel — minden esetben ellenőrzik [33].

Az így kialakított sugárforrások zártsága legalább 10—15 évig megfelelő, de a jövő várhatóan hosszabb ideig történő felhasználhatóságot fog igazolni, még vizesaknás tárolás esetén is. Ugyanakkor a fokozott gondosság megkívánja, hogy vizesaknás tárolásnál a tárolóvíz, radioaktivitását folyamatosan ellenőrizzük, és ioncserélő gyantán keresztül történő áramoltatással biztosítsuk a víz szennyezettségmentességét [35].

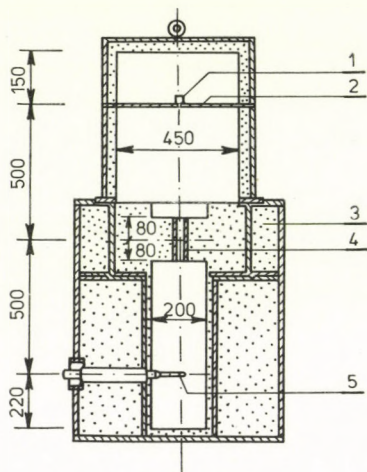
A sugárforrásoknak zártságvizsgálatuk során ki kell elégíteniük az — általában az International Organization for Standardisation (ISO) 2919 jelű szabványa alapján kialakított — nemzeti szabványok vagy előírások határértékeit; ezt a körülményt a sugárforrás szállítólevelén mindig fel kell tüntetni. A szabványos zártságvizsgálat legtöbbször több fázisú száraz és nedves dörzsmintavétel révén történik, és nem enged meg 200 Bq-nél nagyobb aktivitást.

A sugárforráselemeket újabban ultrahanggal 1,5 M-os ($1\text{M} = = 1\text{ mol/dm}^3$) salétromsavban tisztítják (dekontaminálják), majd a sugárforrás eltávolítása után az oldat aktivitásmérése révén ellenőrzik a tokozás zártságát [36]. Bár ez a módszer legalább olyan megbízható, mint a szabványos zártságvizsgálati eljárások, nem helyettesíti, csak kiegészíti az előírás szerinti módszereket.

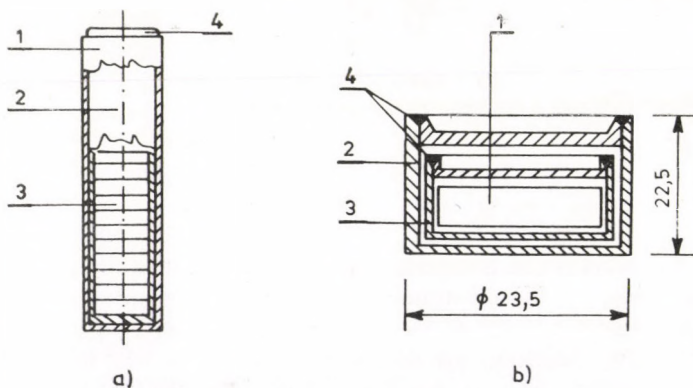
A sugárforráselemek aktivitásának ellenőrzését általában kisméretű, levegőekvivalens ionizációs kamrával, forrókamrában végzik. Az International Commission on Radiation Units and Measurement (ICRU) 18 számú ajánlása szerinti mérőberendezéssel (3. ábra) 1% pontossággal határozható meg 1 m távolságból a gömbhöz közelálló alakú (terápiás célú) ^{60}Co -sugárforrások aktivitása [37].

A 4. ábrán néhány fontosabb ^{60}Co -sugárforrás típust mutatunk be: hasonló felépítésű sugárforrásokat állítanak elő kanadai, szovjet, angol, indiai és francia intézetek. A teleterápiás, gömbhöz közelálló alakú sugárforrások (4b. ábra) aktivitása 18—400 TBq-ig terjed, az ipari célú, általában kb. 11,5 mm átmérőjű és 81,5 mm hosszú, ceruza alakú forrásoké (4a. ábra) pedig 70—400 TBq.

A tapasztalat szerint technikai okok miatt az egyes sugárforrások aktivitását nem célszerű 100 TBq nagyságrend fölé növelni; az aktivitás további fokozása több sugárforrás egy-egy kazettába

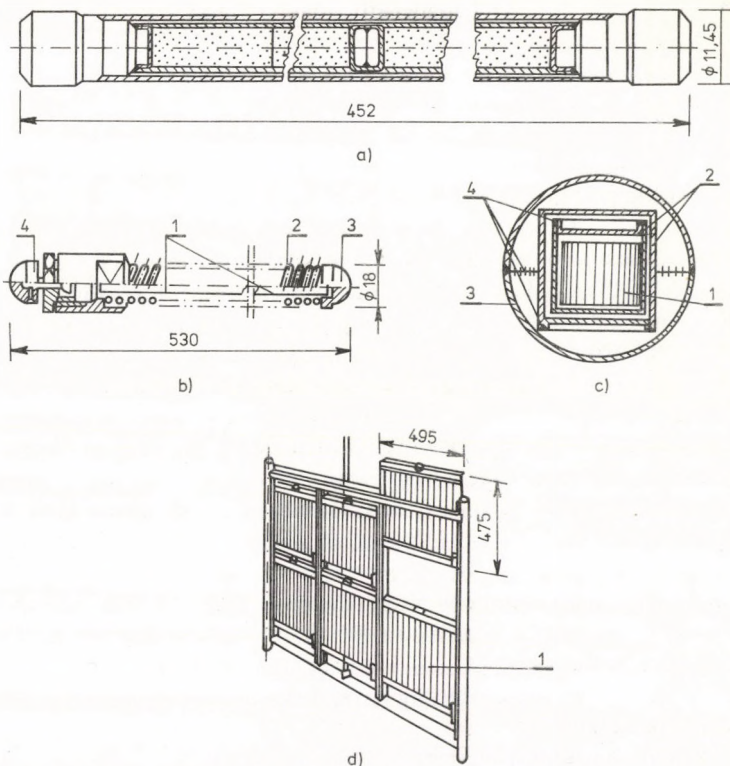


3. ábra. ICRU előírása szerinti aktivitásmérő
1. sugárforrás; 2. alumíniumlap; 3. ólom; 4. volfrám; 5. detektor



4. ábra. ^{60}Co -sugárforrások

a) VII. típusú szovjet sugárforrás: 1. külső rozsdamentes tok; 2. belső rozsdamentes tok; 3. aktív kobalt fém; 4. hegesztés; b) VIII. típusú szovjet sugárforrás: 1. aktív kobalt fém; 2. külső rozsdamentes tok; 3. belső rozsdamentes tok; 4. hegesztés



5. ábra. ^{60}Co -sugárforrás-torpedó, kazetta

a) Az AECL merev, C-188 típusú sugárforrás-torpedója (Kanada); b) Szovjet K-120 típusú univerzális besugárzó flexibilis torpedója: 1. VII. típusú szovjet sugárforrás, 2. rozsdamentes acélrugó, 3. kazettavégződés, 4. kazettafej; c) Szovjet típusú gömbkazetta: 1. ^{60}Co sugárforrás, 2. rozsdamentes acélburkolat, 4. hegesztés; d) AECL típusú sugárforrástartó keret: 1. C-188 típusú sugárforrás-torpedók

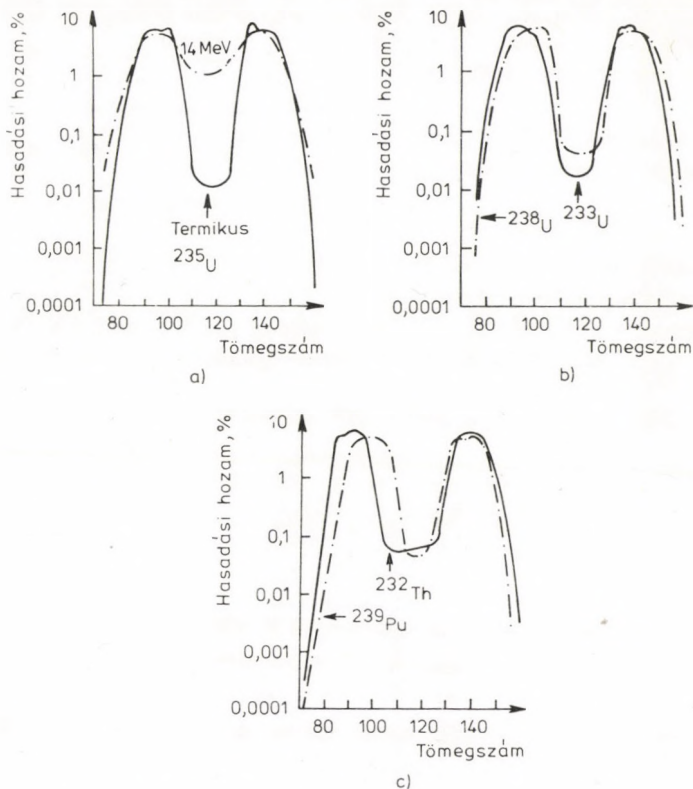
(torpedóba) történő elhelyezésével érhető el. A kazetták lehetnek merev „torpedócsövek” (5a. ábra) [38, 39] vagy flexibilis kazetták (5b. ábra) [40]. Újabbán gömbkazetták is készülnek (5c. ábra) [41]: ezeket nem csúsztatással vagy surrantással (vö. pl. 1.2.3 szakaszt), hanem nagy menetemelkedésű csigával juttatják a kívánt besugárzási pozícióba, illetve tároló helyzetbe [41].

1.1.2 Radioaktív cézium (^{137}Cs)

Az atomenergia gyors térhódítása révén a kiégett fűtőelemekben hatalmas és rohamosan növekvő mennyiségű radioaktivitás halmozódik fel: ez az aktivitás sok nagyságrenddel meghaladja a világ évi 10^{18} Bq-re tehető ^{60}Co -sugárforrás termelését [42]. A sugártechnológiák bevezetésekor, negyed évszázaddal ezelőtt éppen azzal indokolták a kutatók és technológusok a sugártechnikák várható jelentőségét, hogy ennek a hatalmas „aktivitás-mellékterméknek” a célszerű felhasználása voltaképpen ingyen energiaforráshoz, illetve technológiai adottsághoz juttatja pl. a vegyipart [42, 43]. Az eddigi tapasztalatok a reményeket nem igazolták, mivel mind a kiégett fűtőelemek, mind azok egyik legfontosabb komponense, a ^{137}Cs — $^{137}\text{Ba}^m$ -rendszer, hosszú felezési ideje ellenére, több szempontból hátrányos a ^{60}Co -hoz viszonyítva. Hátránya pl., hogy a fűtőelem aktivitása és spektruma igen gyorsan változik, a ^{137}Cs -ból — kisebb dózisszállandója (1. táblázat) következtében — az adott célra nagyobb aktivitást kell alkalmazni, és kisebb energiája miatt inhomogénebben sugároz be. Ezzel szemben egyszerűbb, olcsóbb és könnyebb sugárvédelmet tesz lehetővé, mely utóbbi szempont főként a rendszeres szállításra tervezett, mobilis berendezéseknél fontos (1.2.6 szakasz). (A másik két legfontosabb hasadványtermék, a ^{85}Kr és a ^{90}Sr , gyakorlatilag tiszta β -sugárzó lévén, nem tartozik e könyv keretébe.)

A neutronokkal kiváltott hasadási magreakciók közül a ^{137}Cs gyártása szempontjából a ^{235}U (n, f), a ^{233}U (n, f) és a ^{232}Th (n, f) a legfontosabb (6. ábra) [44, 45].

A hasadványtermékek természetesen együtt képződnek a fűtőelemekben, mialatt azok energiát termelnek. A szétválasztásukra alkalmas különféle reprocesszáló módszerek közül leginkább az extrakciós módszerek váltak be, melyek legjellegzetesebbje a Purex-eljárás [46]. A kiégett fűtőelemet salétromsavval oldatba viszik, majd az uránt és plutóniumot kerozinban oldott tributil-foszfáttal extrahálják. Ezt követően a 4-vegyértékű formában jelenlevő plutóniumot 3-vegyértékűvé redukálják, mely vizes oldatban reextrahálható, és így elválasztható az urántól.



6. ábra. Neutronokkal kiváltott hasadási reakciók hozama

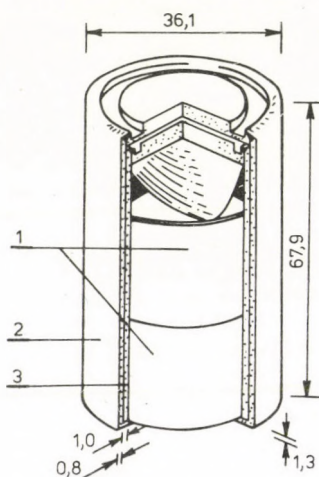
a) $^{235}\text{U}(n, f)$ reakció hasadási hozama a tömegszám függvényében; b) $^{233}\text{U}(n, f)$ és $^{238}\text{U}(n, f)$ reakciók hasadási hozama a tömegszám függvényében; c) $^{232}\text{Th}(n, f)$ és $^{239}\text{Pu}(n, f)$ reakciók hasadási hozama a tömegszám függvényében

A salétromsavas oldatban maradó hasadványterméket általában hosszabb ideig tárolják: mindaddig, amíg a rövid felezési idejű nuklidok le nem bomlanak. Megfelelő idő elteltével a hosszabb felezési idejű nemesgázok (elsősorban a ^{85}Kr) eltávolítása után az aktivitás zömét ritkaföldfémek, ^{89}Sr , ^{90}Sr , $^{99}\text{Tc}^m$, valamint ^{137}Cs teszi ki. A ritkaföldfémek együttes kinyerésére rendszerint 100%-os

tributil-foszfátos, a radioaktív stronciuméra tenoil-trifluoro-acetónos, a technéciuméra pedig kloroformos extrakció szolgál. A visszamaradó — gyakorlatilag kizárólag radioaktív céziumot tartalmazó — salétromsavas oldat további feldolgozása a felhasználás céljától függ: rendszerint cézium-kloridként vagy cézium-oxidként kerül forgalomba.

A kis és közepes aktivitású ^{137}Cs -sugárforrásokban a céziumot általában üvegbe építik, míg a nagy aktivitású források préselt $^{137}\text{CsCl}$ tablettákat tartalmaznak. A $^{137}\text{CsCl}$ vízdíthatósága miatt fokozottan sugárveszélyes.

Mind az üveg, mind a CsCl formájában előállított radioaktív anyag tokozása többé-kevésbé hasonló módon történik, mint azt a



7. ábra. Angol gyártmányú, X. 66/1 típusú ^{137}Cs -sugárforrás
1. aktív céziumsó; 2. külső rozsdamentes tok; 3. belső rozsdamentes tok

^{60}Co -nál leírtuk. Az üvegbe épített ^{137}Cs -forrásokat 100 MBq-ig csak egyszeres rozsdamentes tokozással látják el (Amersham) [47, 48], míg 1 GBq felett a préselt CsCl sugárforrások mindig kettős tokozással készülnek (Szovjetunió, Amersham) [48, 49].

A nagy aktivitású ^{137}Cs -sugárforrások átmérője nagyobb (7. ábra), maximális aktivitása pedig kisebb (50—100 TBq/db) a

kobalt-forrásokénál (11,5 mm átmérő, illetve 100 TBq/db) [48, 49], ami az önabszorpció növekedésével jár. E nem kívánatos körülmény hatását tovább rontja, hogy a sugárzás viszonylag kis energiája miatt az önabszorpció fajlagosan is nagyobb (50—60%), mint kobalt esetén (10—20%). A ^{137}Cs -sugárforrások általában 60—150 °C hőmérsékletig használhatók mind tiszta víz, mind levegő közegben.

1.1.3 Atomreaktor és kiégett fűtőelem

Az atomreaktor mint sugárforrás igen régóta kínálkozik vegy- és rokonipari (pl. petrokémiai) hasznosításra. A jobb sugártechnikai hatások és az egyenletes dózisteljesítmény érdekében speciális besugárzó („kémiai”) reaktorokat terveztek [50]. A vegyitermék neutron okozta aktiválásának elkerülésére az atomreaktorokba $n-\gamma$ átalakító hurkokat építenek: pl. a viszonylag alacsony hőmérsékleten (60 °C) folyékony indium-gallium ötvözetrel töltött hurkokban a folyékony fémötvözet az aktív zónán áthaladva (n, γ) reakcióval γ -sugárforrássá alakul, majd az imént képződött ^{70}Ga a reaktorzónából kijutva (21,1 min-os rövid felezési idejű lévén), a besugárzóterben közel 1 MeV átlagos energiájú γ -energiájának jelentős részét nagy intenzitással leadja sugárhatás-kémiai célokra [51].

Hasonló lehetőség kínálkozik a nátriumhűtésű reaktorban is: a nagy aktiválási hatáskeresztmetszetű fémnátrium (n, γ) magreakció révén biztosít γ -sugárzási energiát.

E módszerek közös hátránya, hogy a kémiai reaktor és az atomreaktor gyakorlatilag összeépítendő, ami a besugárzandó termék helyszínre szállítása miatt, főként biztonsági szempontból előnytelen, hiszen az atomreaktorok esetleges meghibásodása a kémiai-technológiát is veszélyeztetheti és viszont. Ugyanakkor előnye a közös telepítésnek az önálló sugárvédelem egy részének megtakaríthatósága.

E nehézségek egy részén kívánt segíteni az előző szakaszban már érintett, kiégett fűtőelemekkel történő besugárzás: a reaktorzónából kiemelt fűtőelemekben felhalmozódott hasadványok sugárzási energiáját közvetlenül használták besugárzási célra. A fűtőelem-

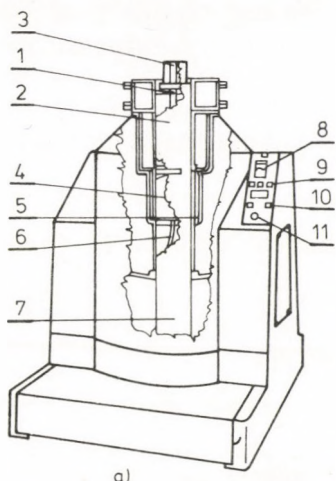
sugárforrások méretét, tulajdonságait az atomreaktor konstrukciója határozza meg, az átlagos aktivitás pedig az urán dúsítási fokától és a kiégés szintjétől (az energiatermelés időtartamától), valamint a „pihentetés” időtartamától függ, igen széles határok között. A már tárgyalt szempontok mellett az üzemeltetési hátrány abból adódik, hogy a fűtőelemeknek az atom- és a kémiai reaktor közötti mozgatása nem egyszerű, és veszélyessége sem hanyagolható el, különösen nagy aktivitások esetén (pl. a sugárvédelemhez használt víz kontaminációja állandó veszélyforrás). A tapasztalat szerint az „ingyen” sugárforrásból adódó gazdasági előnyök nem érik el a beruházási és üzemfenntartási többletköltségeket, még akkor sem, ha a kiégett fűtőelemtárolót és pihentetőt — az atomreaktor kizárólag energetikai célra történő használata esetén is — meg kell építeni.

1.2 A besugárzóberendezések

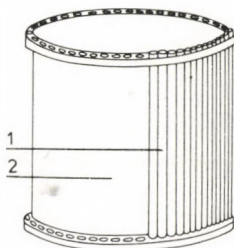
1.2.1 Laboratóriumi berendezések

Jelenleg több ezer laboratóriumi γ -besugárzóberendezést használnak, berendezésenként 5—1000 TBq aktivitású töltettel. E berendezések többsége néhány alaptípusba sorolható.

Az AECL által kifejlesztett „Gammacell-család” önárnyékolt, konténer típusú, a töltet aktivitása: 200—800 TBq (8. ábra) [52]. Az ólomvért a sugárforrások szállítására alkalmazott konténerekhez (4.4 alfejezet) hasonló (a). A konténer belsejében, koszorú alakú elrendezésben (b), adott átmérőjű hengerpalást mentén helyezkednek el a ceruza alakú ^{60}Co -sugárforrások (1.1.1 szakasz). A besugárzandó anyag függőlegesen elmozdítható dugattyúüregben jut le a források által közrezárt besugárzótérbe, majd (időszabályozón előre beállított időpontban, automatikusan) a besugárzás befejeztével vissza fel, a sugárvédett térbe. Míg a ^{60}Co -töltetű Gammacell-200 és 220 típusa közel két évtizede jól kielégíti a kémiai kutatás igényeit, a ^{137}Cs -ot tartalmazó Gammacell-20 és 40 típus nem annyira sugárhatás-kémiai, mint inkább kis dóziszigényű biológiai célokra, pl. állatkísérletekre alkalmas (9. ábra).



a)



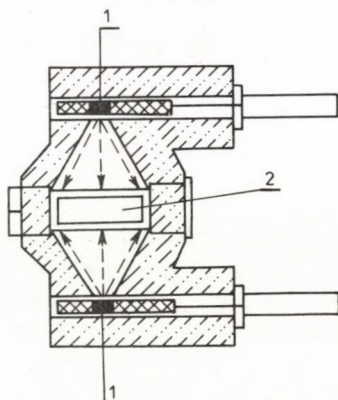
b)

8. ábra. a) az AECL Gammacell 220 típusú laboratóriumi besugárzója (Kanada)

1. csatlakozó cső; 2. dugattyú felső rész; 3. árnyékoló tömb; 4. sugártér; 5. ^{60}Co sugárforrások; 6. lefolyócső; 7. dugattyú alsó rész; 8. óra; 9. besugárzási időkiválasztó kapcsoló; 10. dugattyú le- és felvezérlő kapcsoló; 11. kulcsos kapcsoló;

b) Gammacell 220 típusú berendezés radioaktív töltetének koszorúelrendezése

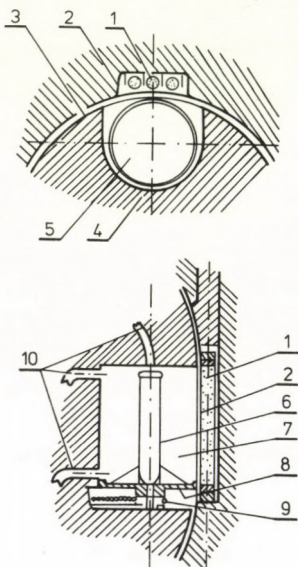
1. sugárforrás-torpedók; 2. sugárforrástartó keret



9. ábra. Az AECL Gammacell 40 típusú laboratóriumi besugárzója (Kanada)

1. ^{137}Cs sugárforrás; 2. besugárzóter

Hasonló készülékeket gyárt az USA-beli Isomedix is. Az utóbbinak azonban alapvetően más a ^{137}Cs -sugárforrás elrendezése, hiszen mindössze 1—3 rúdforrást tartalmaz (10. ábra) [53]. Érdekes a minta elhelyezése is, és különleges megoldás, hogy a céltárgy forog a besugárzás során, ami javítja az elnyelt dózis egyenletességét (3.3



10. ábra. Isomedix „M” típusú laboratóriumi besugárzója (USA)

1. ^{137}Cs -sugárforrás; 2. sugárforrástartó; 3. ólomvédelem váza; 4. ólomvédelem; 5—7. sugártér; 6. besugárzott anyag; 8. forgóasztal; 9. forgató szerkezet; 10. csővezetékek

alfejezet). Az Isomedix rovarbesugárzó berendezését Gammator néven hozzák forgalomba: a 15-90 TBq aktivitású ^{137}Cs -töltetű berendezésben $100\text{—}300\text{ mGy s}^{-1}$ dózisteljesítmény biztosítható a 75 mm átmérőjű, legfeljebb 200 mm magas térben történő besugárzásra.

Az indiai Bhabha Atomic Research Center (BARC) Gamma-chamber-900 és 4000 típusú berendezése a Gammacell szerkezetéhez hasonló, de az aktivitás felső határa 200 TBq ^{60}Co , maximális

2. táblázat. Szovjet laboratóriumi besugárzók főbb adatai

Típus	RHM- γ -20	MRH-25m	LMB- γ -1	„Sterilizátor”
Sugárforrás	^{60}Co	^{60}Co	^{137}Cs	^{60}Co
A források száma		36	24	
Összes aktivitás, TBq	463	600	97	3 180
Maximális dózis- teljesítmény, mA/kg	14,65	93	14	122
	200,900	1300	200	1 700
A besugárzótér inhomogenitása, %	-25...+15	10...25	± 15	-20...+15
A besugárzótér térfogata, cm^3	6700+ 4400	1200	100	25 000
Külső méret:				
hosszúság, mm	150	205	580	1 600
szélesség, mm	150	135	580	1 500
magasság, mm	320	315	1215	1 100
Teljes tömeg, t	6,5	0,8	5,8	15

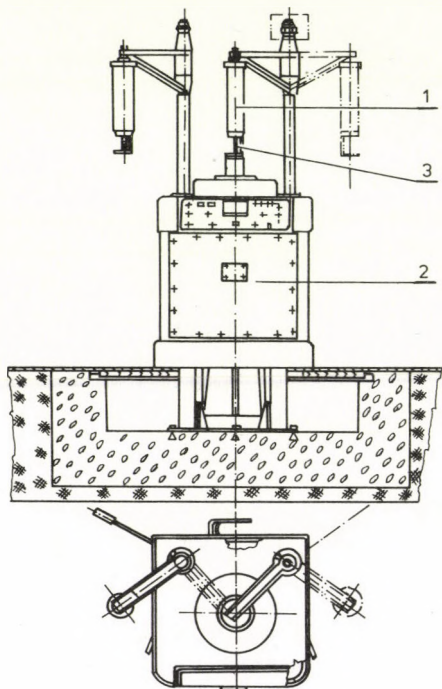
dózis- teljesítménye pedig $1,5 \text{ mGy s}^{-1}$ [54]. Előnye, hogy a készülék munkadugattyúját kézierővel is lehet mozgatni, ami feszültségkima-radás esetén fontos.

A Szovjetunióban számos laboratóriumi besugárzóberendezést fejlesztettek ki (2. táblázat; 11. ábra) [55]. E készülékek folyamatos környezetellenőrzést igényelnek.

Laboratóriumi besugárzási célokra is alkalmas az ugyancsak ^{60}Co -tal töltött kórházi sterilizáló besugárzóberendezés is, melyet a Szovjetunióban Sterilizátor néven hoztak forgalomba a hagyományos kórházi hősterilizáló-berendezések helyettesítésére [56].

Mint már arra utaltunk, laboratóriumi besugárzásra az 1.1.1 szakaszban tárgyalt forrófülkék is alkalmasak: a jelentős, 100 TBq nagyságrendű ^{60}Co -aktivitásra tervezett forrófülkékben sok sugár-hatás-fizikai, -kémiai és -biológiai kísérlet elvégezhető, a sugárforrás és a céltárgy egymás közelébe helyezésével [34].

Hasonló célra vízárnyékolású rendszerek is beváltak: 4–5 m mély vízárnyékolás alatt [57], szintén egymás mellé helyezik a



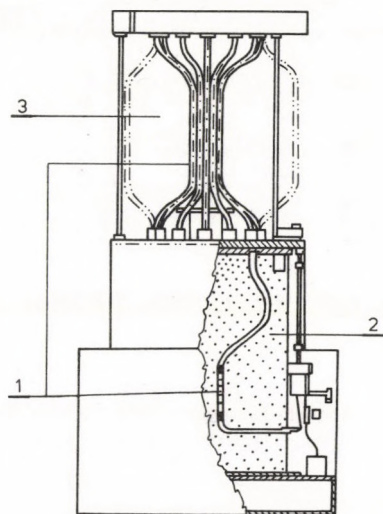
11. ábra. Iszledovatyel típusú laboratóriumi besugárzó (Szovjetunió)
 1. munkadugattyú; 2. ólomvédelmű sugárforrástartó; 3. mintatartó

sugárforrásokot és a besugárzandó rendszert. A vízvédelmű (water-pool rendszerű) besugárzókról a 1.2.4 szakaszban, a félüzemi sugárforrások keretében, részletesebben lesz szó, hiszen arra a célra jobban beváltak, mint a laboratóriumira. Ezek a berendezések sugárforrások átszerelésére is használhatók.

1.2.2 Panoráma típusú berendezések

Nagy előnyük, hogy a dózisteljesítmény igen széles határok között változik, és a viszonylag nagy besugárzóhelyiségben egyszerre többféle anyag besugárzása is végezhető.

E sugárforrások általában ^{60}Co -töltetűek. A radioaktív anyag a megfelelő biológiai védelemmel ellátott helyiség közepébe, esetleg a középpont közelébe kerül, és a besugárzást a körülötte kialakuló dózistérben végzik. A sugárforrások aktivitása 0,05—5 PBq között van [58], 2 PBq aktivitásig általában száraz [33], felette pedig vizes rendszerű a sugárforrás-tároló védelme [33]. E berendezéstípus hátránya, hogy sokkal drágább az 1.2.1 szakaszban tárgyaltnál, mivel megfelelő sugárvédelemmel ellátott épületrész építését teszi szükségessé.

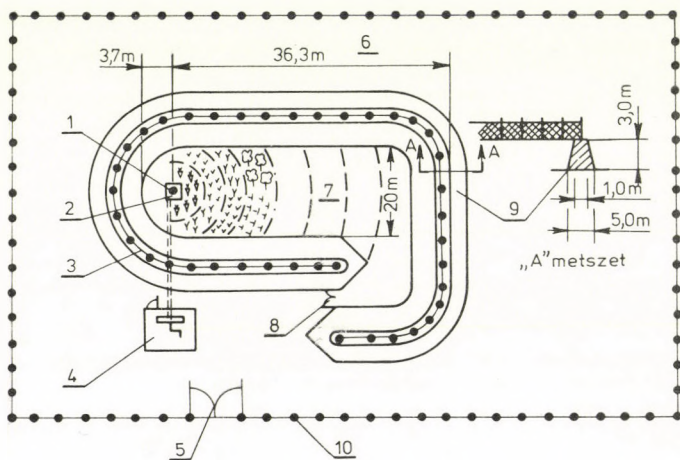


12. ábra. Az AECL Gammabeam 650 típusú panorámis besugárzója (Kanada)
1. sugárforrás; 2. ólomvédelem; 3. sugártér

Az AECL által kifejlesztett Gammabeam-650 típusú panoráma-besugárzó (12. ábra) [39] előnye, hogy beépítés nélkül beállítható a besugározóhelyiségbe, hiszen tároló helyzetben önárnyékoló típus, mint az AECL már hivatkozott Gammacell-családjá (amely azonban besugárzó helyzetben is az!).

Ugyancsak kifejezetten kísérleti feladatokat látnak el az ún. sugárkertek, melyeket mezőgazdasági célú (stimulációs, mutációs)

kutatásokra használnak: 10—100 TBq aktivitású ^{60}Co -sugárforrást helyeznek egy 50—100 m körüli átmérőjű kör, vagy ennek megfelelő területű ellipszis középpontja, illetve egyik fókuszra közelébe (13. ábra) [59]. A besugárzóterület kívülről részint távolságvédelemmel (kerítéssel) védik, részint 2—3 m magas földgáttal és alkalmas



13. ábra. Sugárkert

1. sugárforrás; 2. sugárforrástartó konténer; 3. kerítés; 4. kezelőhelyiség; 5. külső kerítés bejárata; 6. távolsági védőzóna; 7. sugárkert; 8. sugárkert ajtaja; 9. földvédelem; 10. külső kerítés

bejárattal akadályozzák meg a sugárzás oldalirányba történő kijutását. Egyes esetekben a sugárforrást felülről és/vagy a nem hasznosított oldalirányokból is árnyékolják. A sugárforrás vezérlése (természetesen a védelem külső oldaláról) kis kapcsolóhelyiségből (hábzból) történik. E berendezéseket a mezőgazdaság főleg az elmúlt évtizedben használta, jelentőségük az utóbbi időben csökkent.

A panoráma típusú ^{60}Co -sugárforrások egy része ún. több célú sugárforrásokként használható (lásd 1.2.3 szakasz), tehát egyaránt lehetővé teszi mind a laboratóriumi, mind a gyakorlati célú besugárzásokat.

1.2.3 Több célú berendezések

Az általában 3—5 PBq aktivitású ^{60}Co -tal töltött több célú (multipurpose) sugárforrások egyidejűleg alkalmazhatók kísérleti és félüzemi kutatásokra, valamint fejlesztési és rutintevékenységre. Az 5 PBq névleges aktivitásra számított besugárzási kapacitásadatokat (24 órás besugárzási időt feltételezve) a 3. táblázat tartalmazza.

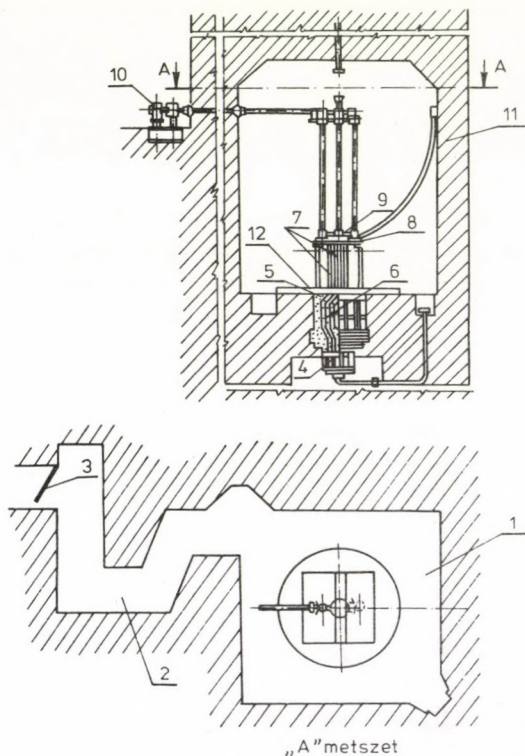
Kifejezetten több célú besugárzóberendezés az a GBL-típus, amely az MTA Izotóp Intézetében működik [40, 60]: ezt 1968-ban a moszkvai Karpov Intézet tervei alapján [9, 61, 62] építették, de azóta jelentős mértékben továbbfejlesztették. Mind laboratóriumi, mind félüzemi kísérletekre bevált 1 Gy s^{-1} és — a labirintust is kihasználva — a háttérrel alig meghaladó dózisteljesítmény között.

A rozsdamentes acélból készült GBL besugárzóberendezés $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ -es helyiség közepén áll (14. ábra). A készülék működtetését, illetve a sugárforrások mechanikus mozgatását a szomszédos gépházban elhelyezett hajtómű biztosítja. A besugárzóhelyiség alatti száraz tárolótérből — 4000 kg m^{-3} látszólagos

3. táblázat. 5 PBq aktivitású ^{60}Co besugárzóberendezés kapacitása

Kezelés	Dózis	Kapacitás, t/24 h
Hagyma és burgonya csirázásgátlása	50–100 Gy	200–100
Friss gyümölcs tárolási idejének meghosszabbítása	0,5–2,5 kGy	75–30
Gabona féregtelenítése	1–2 kGy	85–50
Hús és húskészítmény radurizálása	2,5–3 kGy	40
Zöldségszáritmány főzési idejének csökkentése	5–30 kGy	7,5–2
Fűszer radiczálása	10 kGy	6
Műanyaggal impregnált fatermékek előállítás	10–15 kGy	12–10
Orvosi segédeszközök sterilizése	25–30 kGy	1
Polietilén térhálósítása	150–300 kGy	0,1–0,2

sűrűségű vassöréttel 1,2 m vastagon töltött zónán átvezetett, többszörösen meghajlított csővezetékeken (munkacsatornákon) keresztül — jut az 1—20 sugárforrás a besugárzóhelyiségbe, melyet 1,6 m vastag normál beton védőfal határol. A készülék megközelítése csak a sugárforrások tárolóhelyzeti pozíciója esetén lehetséges a labirintus folyosón keresztül (14. ábra). A reteszelő- és jelzőrendszer



14. ábra. A MTA Izotóp Intézete GBL típusú több célú (multipurpose, univerzális) besugárzója

1. besugárzóterem; 2. labirintus; 3. ajtó; 4. sugárforrás-tároló; 5. vassörét védelem; 6. tárolócsatornák; 7. munkacsatornák; 8. rögzítő állvány; 9. elektromágnes emelőlap; 10. hajtómű; 11. vasbetonvédelem; 12. saválló acéllemez

az illetéktelen bejutást azonos elveknek megfelelően akadályozza, mint az a fél- és nagyüzemi besugárzóberendezések esetén szokásos („sluszkulcsos” indítás; több, egymástól független, részint a háttérnél nagyobb megengedhető dózisteljesítmény által az ajtót reteszelő automatika stb.).

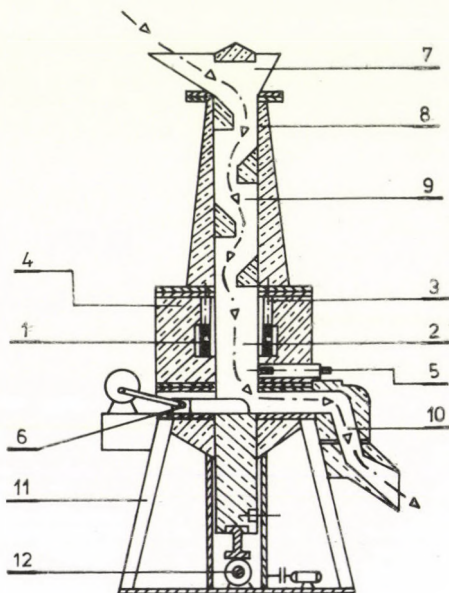
Az egyes sugárforrások (1.1.1 szakasz) 20 spirálrugó alakú kazettában vannak: minden kazetta alsó részén fix dugó, felső részén pedig félgömbfejű, mágnesezhető záró csavar van. A kazetták rozsdamentes acélhuzalból készültek, rugós megoldásuk pedig a sugárvédelmi okok miatt (a sugárzás közvetlen kijutását megakadályozó) többszörösen meghajlított munkacsatornák hajlatain történő átjutást teszi lehetővé. Minden egyes kazettában 6, egyenként 40 TBq névleges aktivitású, VII. típusú szovjet ^{60}Co -sugárforrás van (lásd. 1.1.1 szakasz).

A sugárforrások emelése, illetve süllyesztése mechanikus úton történik; ehhez a flexibilis kazetták elektromágnesekkel csatlakoznak. A megfelelő csatornához tartozó elektromágnes gerjesztésével lehet meghatározni, hogy a 20 csatorna közül hányban és melyikben kerüljön a radioaktív anyag besugárzó helyzetbe; így a térben a dózisteljesítmény — a sugárforrás és a besugárzandó tárgy távolságának változtatásából adódó lehetőségen túlmenően — további 1/1- és 1/20-ad rész között változtatható.

A berendezés biztonságának fokozását szolgálja az elektromágnes-rendszernek az a tulajdonsága, hogy feszültségkimaradás esetén a besugárzó helyzetben fent levő elektromágnesek „elengedik” a sugárforrásokat, melyek gravitáció révén tároló helyzetbe esnek. Rendeltetésszerű üzemeltetés során azonban lehetőleg el kell kerülni a gravitációs úton történő ejtést, mivel az — ha kis valószínűséggel is — de károsíthatja a sugárforrásokat: ehelyett lassú ütemben, kb. 1 perc alatt az emelőmechanika fordított (lefelé) irányú mozgásával juttatja vissza a sugárforrásokat a tárolóhelyre.

A sugárforrások általában — 100—600 mm között változtatható átmérőjű — koszorú elrendezésűek (vö. 8b. ábra); lehetőség van mind a koszorún belül (elsősorban nagy dózisteljesítményt igénylő kísérletek céljára), mind a koszorún kívül (elsősorban félüzemi besugárzások alkalmából) besugárzandó anyagok elhelyezésére. A sugárforrás-elrendezés átalakítható egyszeres vagy párhuzamos

lap alakúra is, de ez utóbbiak kevésbé használatosak. A lapforrások (4.4 alfejezet) lehetővé teszik a folyamatos üzemű anyagszállítást is (akárcsak az 1.2.3 szakaszban tárgyalt félüzemi sugárforrásokban), de 4 PBq ^{60}Co -töltetet nem jelentősen meghaladó aktivitásokig ez



15. ábra. Szállítható univerzális mezőgazdasági besugárzóberendezés (MTA Izotóp Intézete, Budapest)

1. sugárforrás; 2. sugártér; 3. záródugó; 4, 8. ólomvédelem; 5. biztosító retesz; 6. áramlásszabályozó; 7. garat; 9. sugárvédett garat; 10. kiadagoló labirintus; 11. tartóállvány; 12. emelő-szerkezet

nem gazdaságos és — a 3.4 alfejezetben tárgyalandóknak megfelelően — a dózisegyenletesség biztosításához nem is indokolt.

Kísérlettechnikai okok miatt (pl. a sugárforrások felfelé és lefelé mozgatásának követésére, a besugárzott rendszer szemmel tartására) folyamatos TV-megfigyelés szükséges. A sugárzás üvegre gyakorolt káros hatásának csökkentésére azonban — távvezérlésű

megoldással — a TV-kamerák optikáját a holtidőben ólomárnyékolással védjük, tehát az optikát csak akkor tesszük ki a sugárzás hatásának, amikor a megfigyelésre valóban szükség van [40].

Átmeneti megtorpanás után az elmúlt években gyorsan terebélyesednek az élelmiszer-gazdaság (mezőgazdaság, élelmiszeripar) területén a sugártechnikai kutatások. Burgonya, hagyma, kukorica, mák, állattáp stb. sugárkezelésére alkalmas, könnyen szállítható félüzemi berendezés vázlatát mutatja a 15. ábra.

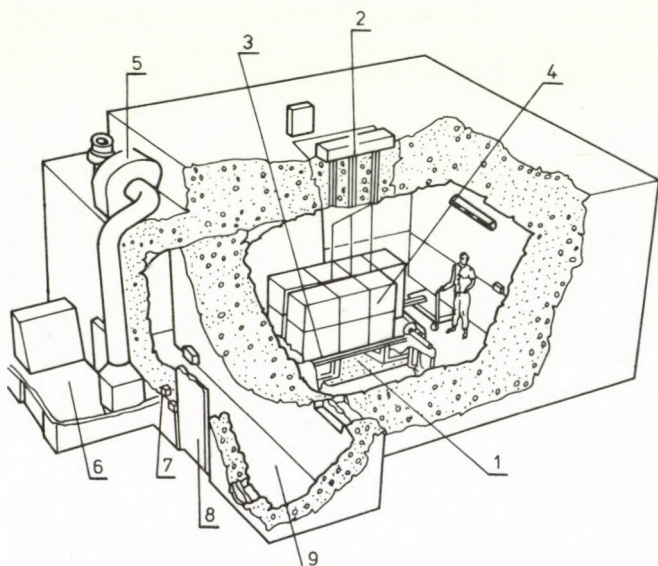
A berendezés adagoló garata labirintus-rendszerű és önárnyékoló. A termékiadagolás és az áramlásszabályozás tolórudas adagolással történik. A sugárforrást kombinált szállító- és munkatartóban helyezük el, tehát ugyanabban a berendezésben történik a szállítása, mint besugárzása során a tárolása. A berendezés 2—5 t tömegű részegységekben könnyen szállítható a helyszínre, ahol összeszerelhető; ezáltal elkerülhető a termékek idő- és költségigényes szállítása, mely a törődés révén a minőségnek is árt. A maximális ^{60}Co -töltet 2 PBq , a dózisegységtelenség — 50 Gy átlagos dózis esetén — mintegy $\pm 40\%$, a kapacitás pedig 10 t h^{-1} .

1.2.4 Félüzemi berendezések

Azt az 1960—65-ös években kialakult koncepciót, mely szerint csak nagy kapacitású besugárzókészülékek üzemeltetése gazdaságos [63, 64, 65], az utóbbi időben kezdik felülvizsgálni. A besugárzás gazdaságosságát ui. ronthatja a nagy távolságra történő szállítás költsége és a besugárzási kamrában történő hosszú áthaladási időből eredő késedelem. Ezért a félüzemi jellegű, közepes kapacitású, folyamatos üzemű besugárzókészülékek száma az elmúlt években jelentősen nőtt, bár ezek fokozódó mértékben nem elsősorban félüzemi, hanem ipari célú besugárzásokat végeznek, szinte minden szempontból elmosva a határt a nagyüzemi folyamatos besugárzó felé (pl. a 16. ábra szerint az AECL JS-6200 típusa kísérleti célú, illetve a 17. ábrának és a 18. ábrának megfelelő JS-6500 és JS-6900 típusa között) [66, 67].

Az AECL Batch típusú [64] és az indiai BARC félüzemi besugárzója [68] hasonló felépítésű (19. és 20. ábra). A készülékekben legfeljebb 4 PBq aktivitású ^{60}Co -sugárforrást lehet elhelyezni,

ólomvédelmű, konténer típusú tárolóban. A sugárforrás utánpótlását és cseréjét az indiai berendezésben magának a konténernek a cseréjével végzik: az adott berendezéshez szerkesztett típuskonténerben szállított új töltetet a konténerrel együtt cserélik ki, a régit pedig visszajuttatják a gyártóműbe. A besugárzóhelyiség védelme

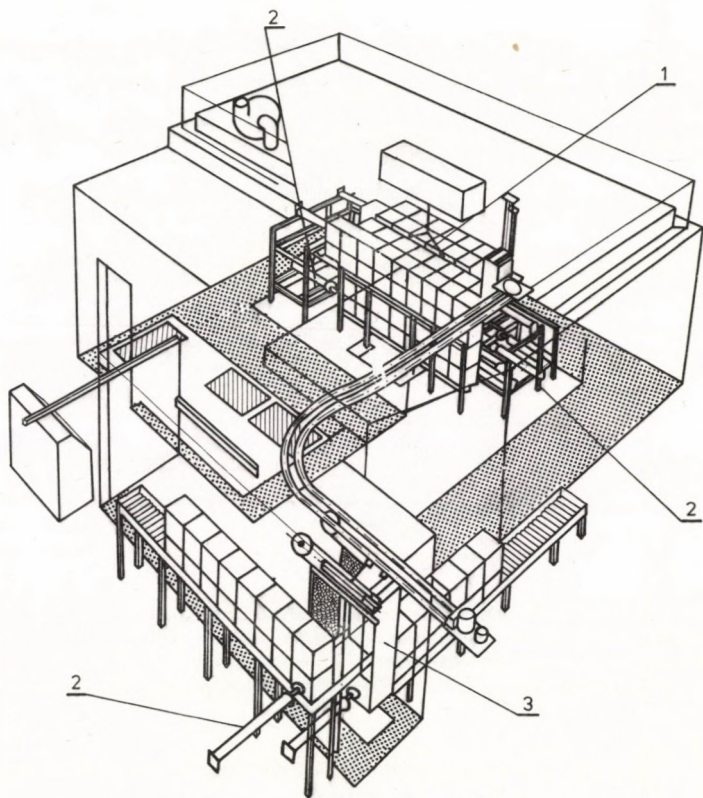


16. ábra. Az AECL JS-6200 típusú besugárzója (Kanada)

1. sugárforrás-tároló vizesakna; 2. sugárforrás-mozgató; 3. belső anyagmozgató; 4. terméktartó dobozok; 5. szellőzőventillátor; 6. gépház; 7. vezérlődoboz; 8. labirintus bejárati ajtó; 9. labirintus

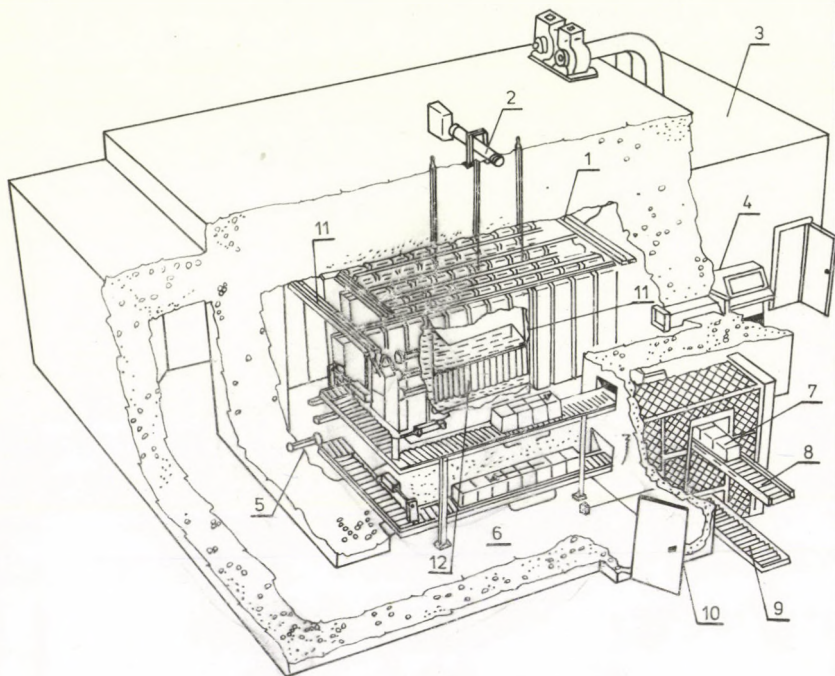
betontéglából épül. A berendezéshez rendszeresített alumínium egységdobozokban mind a kísérleti, mind a félüzemi célra szükséges mennyiségű áruk besugárzása tetszőleges dózissal végezhető. A kisebb üzemek által hozott, változó alakú és csomagolású áruk (gyümölcs, fa, gyógyszer, kötszer stb.) sugárkezelésére is az említett egységdobozokban kerül sor. Gépi anyagmozgatás csak a besugárzón belül van.

A francia Conservatoire által a Commissariat à l'Énergie Atomique segítségével kialakított berendezés [69] is emlékeztet az AECL Batch típusára, mert itt is fémdobozokban kerül sor a besugárzásra. Mivel a sugárforrások magassága meghaladja a dobozokét, a függőleges irányú dózisteljesítmény-homogenitás jobb (vö. 3.2 és 3.3 alfejezet), de a sugárhasznosítási tényező (lásd 4.5 alfejezet) szükségszerűen romlik.



17. ábra. Az AECL JS-6500 típusú közepes kapacitású üzemi besugárzója (Kanada)
1. lapforrás; 2. dobozmozgató pneumatikus dugattyúk; 3. függesztő keret

A Szovjetunióban, Bogucsarovóban élelmiszerbesugárzási célokra összesen 4 PBq nagyságrendű aktivitású ^{60}Co -sugárforrással töltött, folyamatos besugárzóberendezés működik [70]; a besugárzást láncokra függesztett kasokban végzik.

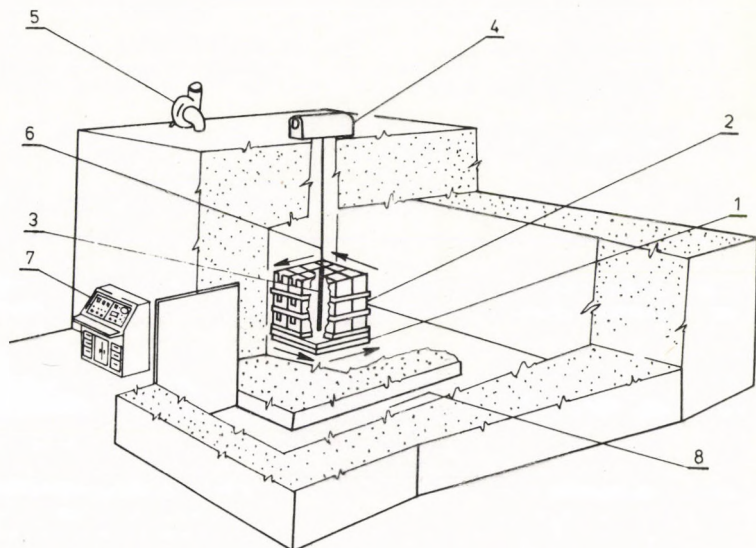


18. ábra. Az AECL JS-6900 típusú nagykapacitású üzemi besugárzója (Kanada)
 1. belső anyagmozgató; 2. sugárforrás-mozgató; 3. gépház; 4. vezérlőpult; 5. töltő-ürítő pozíció;
 6. labirintus; 7. besugárzott termékdobozok; 8. leadó szállítószalag; 9. feladó szállítószalag;
 10. labirintus bejárati ajtó; 11. töltő-ürítő keretmozgató; 12. sugárforrás

Ugyancsak a Szovjetunióban, Moszkva mellett van az a félüzem, amely kb. $0,5\text{ m}^3$ -s ládáknak sugározza be folyamatos üzemben [71]. Hasonló egy japán félüzemi burgonyabesugárzó is (21. ábra).

A UNDP támogatásával Venezuelában az AECL tervei szerint létesített félüzemi fa—műanyag-rendszer besugárzóban 2 PBq aktivitású ^{60}Co van. Ez a berendezés vizesakna típusú; a monomerrel átítatott fát zárt konténerben víz alatt sugározzák be [10].

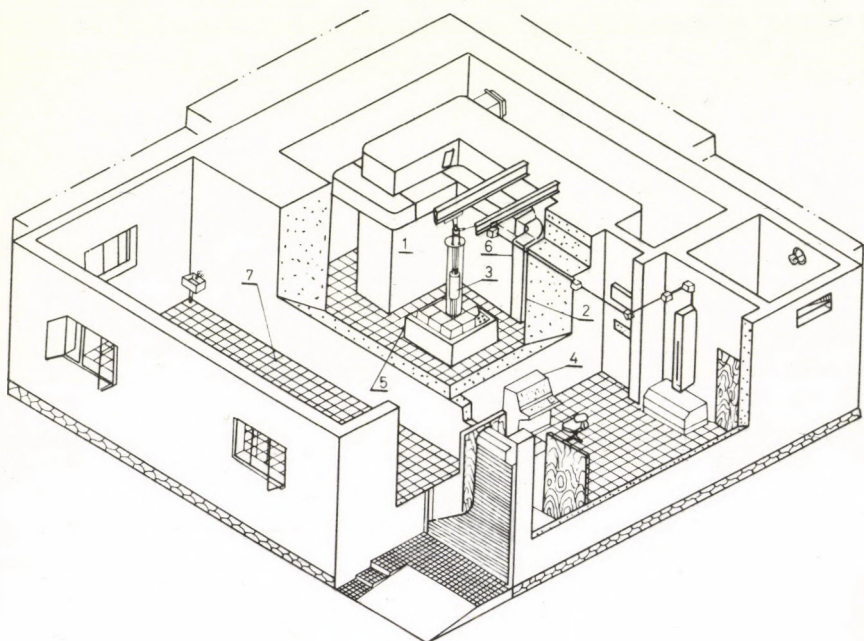
Új besugárzó típusok vannak kialakulóban hulladékvizek kísérleti célú besugárzására: ilyen készülékek fejlesztésével foglalkozik az AECL mellett a Szovjetunió, az Egyesült Államok és az NSZK néhány intézete, illetve vállalata is [42, 72—74].



19. ábra. Az AECL Batch típusú alacsony kapacitású besugárzója (Kanada)
 1. belső anyagmozgató; 2. termékdobozok; 3. ^{60}Co sugárforrás; 4. sugárforrás-mozgató;
 5. szellőzőventillátor; 6. sugárforrás-mozgató drótkötél; 7. vezérlőpult; 8. labirintus

Egyelőre még nem ítéhető meg a technológia életképessége, és az sem, hogy erre a célra valamely radioaktív izotóp, vagy az elektrongyorsítók [42] gazdaságosabbak-e? A kanadai Geodel Systems és az AECL által közösen kialakított, ^{60}Co -tal működő

hulladékvíz-besugárzó berendezéssel végzett, Corad Process szerinti hulladékvíz-kezelésnél az ipari sugárkezelés várható költsége: 250 Gy dózissal számolva, 1976. évi árakon kb. $0,1 \$ m^{-3}$, ami egy nagyságrenddel meghaladta a kémiai eljárások költségét (22. ábra).



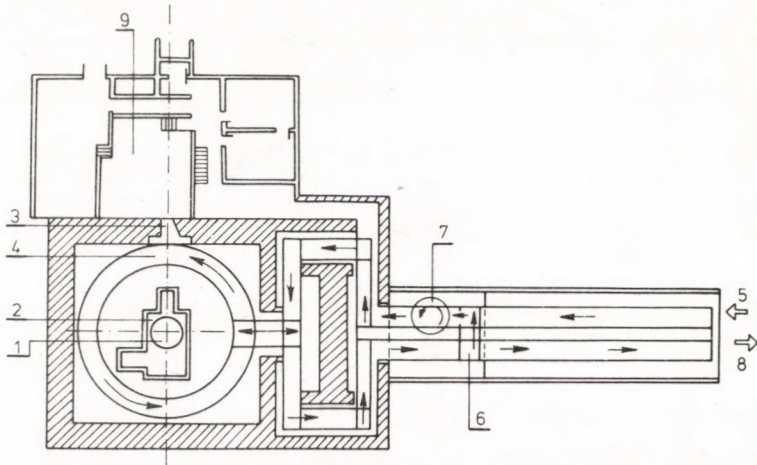
20. ábra. A Bhabha Atomic Energy Research Establishment félüzemi besugárzója (India)

1. besugárzótér; 2. betonból készült védelem; 3. sugárforrás; 4. vezérlőpult; 5. belső anyagmozgató-berendezés; 6. szellőzőberendezés; 7. laboratórium és előkészítő helyiség

1.2.5 Nagyüzemi berendezések

Valamennyi nagyüzemi berendezés folyamatos rendszerű, és a technológia biztosítja, hogy a besugárzott termék — a dózishányados adta pontosságon belül — az előírt dózist kapja.

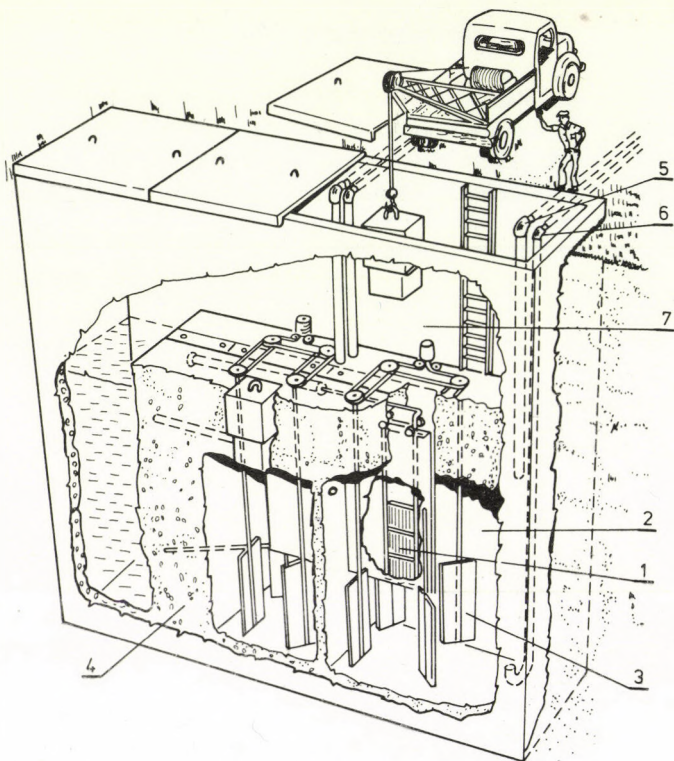
Mivel a γ -sugártechnológiák közül eddig leginkább a gyógyászati eszközök sugársterilizése terjedt el, az erre a célra tervezett berendezések száma a legnagyobb.



21. ábra. Shihoro Szövetkezeti Társulás üzemi burgonyabesugárzója (Japán)

1. sugárforrás; 2. vizesakna; 3. ólomüvegablak; 4. belső anyagmozgató; 5. beadó szállítószalag; 6. átadó szállítószalag; 7. forgatószerkezet; 8. árukiadó szállítószalag; 9. kiszolgálóhelyiség

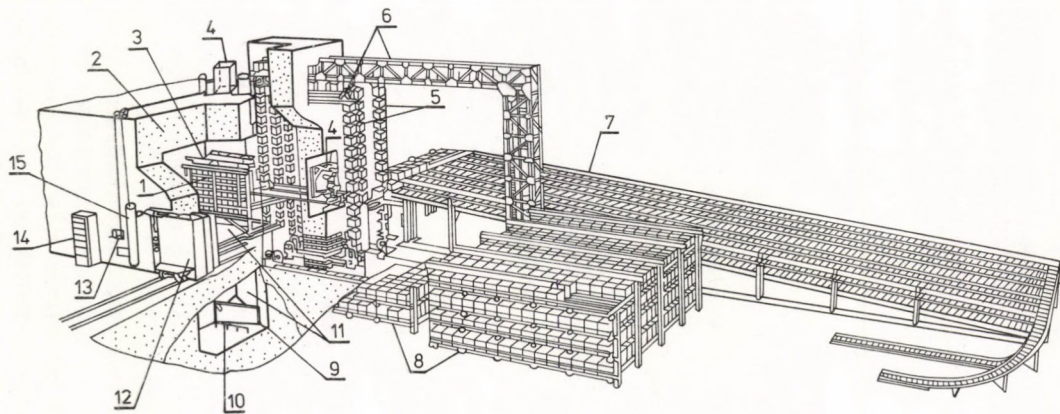
A sugársterilizők közül legtöbb típust és legtöbb egységet (berendezést) az AECL (Ottawa, Canada) gyártotta, valamennyit vízvédellel. Míg a kisebb kapacitásúak 10 PBq (250 kCi) ^{60}Co -töltet, illetve 25 kGy esetén 7000 m³/év (300 nap) kapacitásúak, és lényegükben megfelelnek az 1.2.3 szakaszban tárgyalt AECL JS-6500 típusú folyamatos félüzemi berendezésnek (17. ábra), addig pl. az AECL JS-6900 típus, mely a Medicor Debreceni Orvosi



22. ábra. GEODEL-AECL típusú, a Corad eljárásához tervezett kísérleti szennyvízbesugárzó berendezés
 1. sugárforrás; 2. besugárzóakna; 3. keverőlapát; 4. betonvédelem; 5. szennyvíz betáplálás; 6. szennyvíz elvezetés; 7. kezelőtér

Műszergyárában működik — már évi $30\,000\text{ m}^3$ (200 kg m^{-3} látszólagos sűrűségű) áru sugársterilizésére alkalmas $40\text{ PBq }^{60}\text{Co}$ -töltet esetén (18. ábra).

Bár az utóbbi években az angol Marsh Ltd. cég is áttért a vízvédelemre, ők gyártották a legfontosabb száraz (beton+vas) védelmű sugársterilizőket, pl. az Isomed BARC (India) és a Radona (Svédország) berendezését, melyek kapacitása hasonló a AECL JC-6900 típusáéhoz [67].

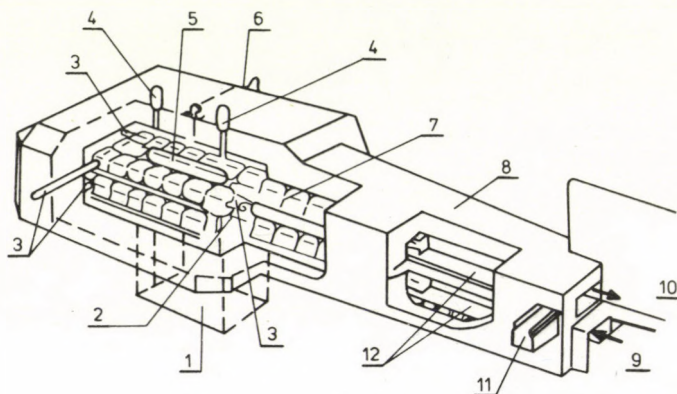


23. ábra. Automatikus működésű csomagbesugárzó üzem (Wantage Research Laboratory, AERE, Anglia)

1. besugárzószervezet; 2. beton védőfal; 3. sugárforrás (munkahelyzetben); 4. besugárzószervezet hidraulikus emelője; 5. kimenő szállítószalagok; 6. bemenő szállítószalagok; 7. besugárzás utáni tároló; 8. besugárzás előtti tároló; 9. sugárforrás-tartókeret (nyugalmi helyzetben); 10. sugárforrás-behelyező készülék; 11. vízmedence (a nyugalmi helyzetű forrás sugárárnyékolására); 12. többlépcsős ajtó (a forrás helyzetével vezérelt biztonsági reteszelő); 13. forrásemelő szerkezet vezérműve; 14. központi vezérlőszekrény; 15. forrásemelő henger

Ugyancsak ez a cég tervezte Anglia első nagykapacitású kísérleti sugársterilező berendezését (23. ábra) [9].

Élelmiszer-sugárkezelésre is tervezett ugyan az AECL különféle, minden esetben vízvédelmű berendezéseket, de nem tudunk arról, hogy ezek közül valamelyiket is nagyüzemi célokra már használnák.



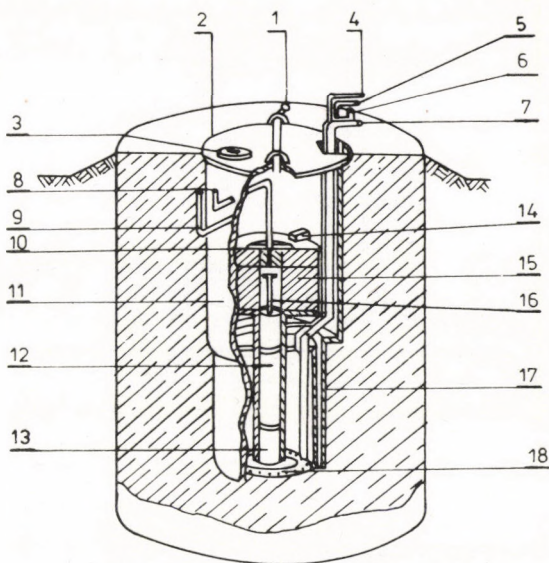
24. ábra. Kecskeszórt sugársterilező berendezés (Ausztrália)

1. vizesakna; 2. emelő; 3. dugattyú; 4. vezető cső; 5. sugárforrás; 6. emelő drótkötél; 7. bálák; 8. alagút; 9. szennyezett termék bemenet; 10. steril termék kimenet; 11. ajtó; 12. szállítószalag

A 21. ábra szerinti burgonyabesugárzó 20 PBq és 80—100 Gy dózis esetén óránként 40 t burgonya csírátlanítására alkalmas: az 1,5 m³-es, kb 1 t burgonyát tároló ládák 1,5 percenként lépnek be a kamrába, illetve hagyják azt el [75].

Kecskeszőr zárszolgálati (karantén) fertőtlenítésére Ausztráliában alakítottak ki, ugyancsak vízvédelmű folyamatos besugárzóberendezést (24. ábra), mely egy évtizede működik üzemszerűen [76].

Az Egyesült Államokban etilénből és hidrogén-bromidból történő etilén-bromid szintézisre szolgáló, 100 TBq ⁶⁰Co-töltetű berendezés betonvédelmű, és — a föld alá helyezve — kiegészítő sugárvédelme a talaj (25. ábra).

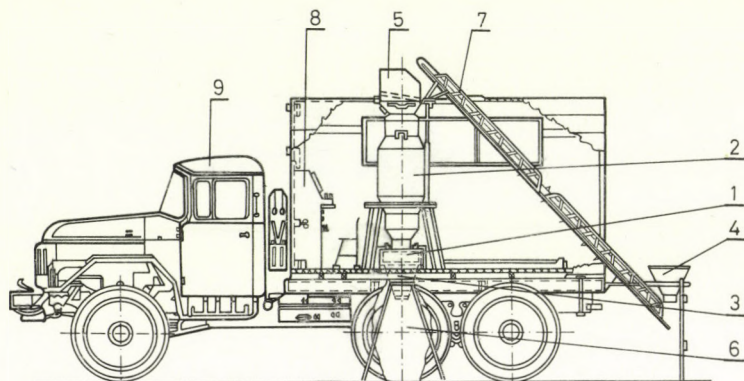


25. ábra. Reaktor etil-bromid sugárszintézisére

1. zárópánt; 2. fedőlemez; 3. nedvességmegfigyelő ablak; 4. külső öblítő N_2 bevezetése; 5. belső öblítő N_2 kivezetése; 6. nyersanyagok bevezetése; 7. termék kivezetése; 8. belső öblítő N_2 bevezetése; 9. külső öblítő N_2 kivezetése; 10. záródugó N_2 vezetékkel; 11. acéltartály-burkolat; 12. tokozott sugárforrás; 13. sugárforrás-emelő szerkezet; 14. zárásrögzítő; 15. árnyékolólemezek; 16. emelőrúd; 17. reaktoredény; 18. elosztógyűrű

1.2.6 Mobilis berendezések

A több célú besugárzók sajátos típusát képviselik azok a mobilis berendezések, melyeket — ahelyett, hogy (az előző szakaszokban tárgyaltaknak megfelelően) az anyagot szállítanak oda — a mindenkor besugárzandó áru helyére juttatnak: pl. a mezőgazdasági termékek (burgonya, hagyma, gabona stb.) besugárzása esetén tehergépkocsival (esetleg vonattal) az adott mezőgazdasági területre, míg tengeri halfeldolgozásnál hajóra telepítve. E módszer előnye — a nagy tömeg szállításának elmaradásából adódó gazdasági haszon mellett — az, hogy a kényes áru mozgatás miatt nem károsodik.

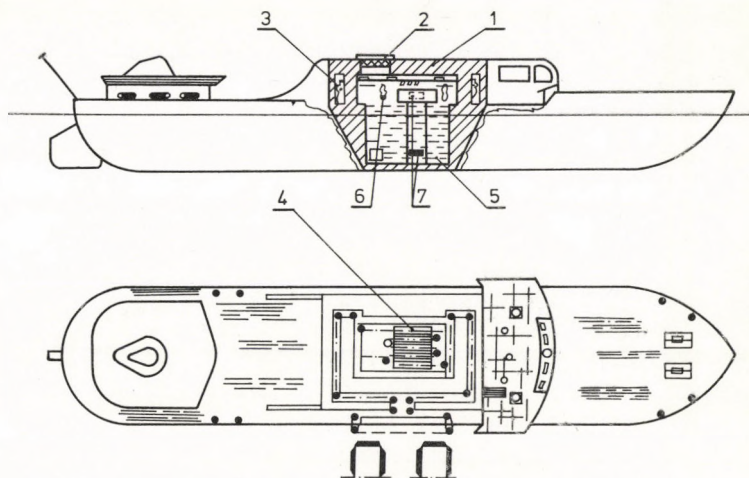


26. ábra. KOLOSZ típusú mozgó besugárzó (Szovjetunió)

1. szállítószalag; 2. besugárzó; 3. szállítószalag; 4. töltőtölcsér; 5. adagoló; 6. zsák; 7. kanalas szállítószalag; 8. vezérlő; 9. ZIL-131 tehergépkocsi

E berendezések elvükben nem térnek el a már tárgyalt kísérleti berendezésektől, legfeljebb annyiban, hogy általában nem ^{60}Co -, hanem ^{137}Cs -töltetűek [77]. A ^{137}Cs γ -sugárzása ui. — mint arra az 1.1.2 szakaszban utaltunk — kisebb energiája révén kisebb tömegű sugárvédelmet tesz szükségessé, ami a gyakori szállítás miatt jelentős műszaki és gazdasági előnyökkel jár (pl. rövidebb úton szállítható, mert kisebb teherbírású hidak is igénybevehetők).

A 26. ábra szerinti, Kolosz típusú mobilis besugárzót a Szovjetunióban már egy évtizede sorozatban állítják elő [78]. Hasonló berendezések utánfutó kivitelben is készülnek [79]. E berendezéseket max. 15 mm átmérőjű szemestermékek 1 Gy körüli stimulációs besugárzásra tervezték. A töltet 130 TBq aktivitású ^{137}Cs -sugárforrás, mely — 2 mGy s^{-1} dózisteljesítmény esetén — óránként kb. 1 t szemestakarmány sugárkezelését teszi lehetővé. A termék kanalas feladószalaggal a konténerbesugárzó tetején lép be, majd a besugárzóterén át jut ki alul a zsákolócsatornákhöz. A sugárhasznosítási tényező (4.4 alfejezet) 15—20%, a dózisegyenletesség, tehát a termékben abszorbeálódó maximális és minimális dózis hányadosa (3.4 alfejezet) pedig 1,5 (10—12% nedvesség, illetve 700 kg m^{-3} látszólagos sűrűség esetén). Az egész berendezés tömege kb. 10 t.



27. ábra. Hajóra telepített mobilis besugárzó hal, burgonya, hagyma, gabona stb. sugárkezelésére

1. védelem; 2. nyitható fődém; 3. labirintus; 4. belső anyagmozgató rendszer; 5. vizesakna; 6. termékfüggesztő keret; 7. sugárforrás

A francia Conservatome is mintegy 15 évvel ezelőtt fejlesztette ki Irma megnevezésű hasonló berendezését [69].

A 27. ábrán vázolt, hajóra telepített mobilis besugárzó állomás elsősorban tengeri halak tárolhatóságának javítására, de a kikötőben gabona, burgonya és hagyma sugárkezelésére is szolgálhat [80].

1.3 A dózistér modellezése

1.3.1 Modellezés számítással

A nagy teljesítményű sugárforrásoknak mind a sugárzó energia minél jobb hasznosítását, mind pedig a termék lehetőleg egyenletes besugárzását biztosítaniuk kell. Az optimális sugárforrás-elrendezés kialakítását segítő irodalmi adatok (algoritmusok, programok) nagyon hiányosak és nehezen hozzáférhetők, valószínűleg azért, mert ezeket technológiai, tervezési know-how titokként kezelik.

Valamely nagyüzemi vagy félüzemi berendezés sugárhasznosításának mértéke, és a besugárzott termék által abszorbeált dózis homogenitása alapvetően már a tervezés során eldől. Az, hogy a tervezett és a megvalósult berendezés paramétereit között mekkora az eltérés, a tervezési bázisadatok és a számítási módszerek helyességétől függ.

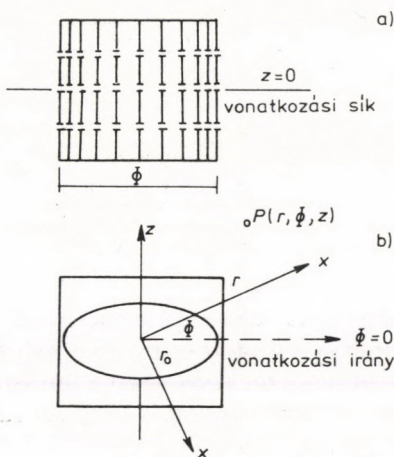
A legfontosabb információk közé tartozik az egyes sugárforrások és a sugárforrás-rendszerek térbeli felépítése, a fajlagos aktivitás és annak térbeli eloszlása az egyes sugárforrásokban (az egyes sugárforrások dózisteljesítmény-eloszlásának ismerete), a besugárzandó termékek adatai (méret, sűrűség, látszólagos sűrűség), a biztosítandó dózisegyenletesség és a többé-kevésbé inhomogén dózisteljesítményű besugárzóterben az anyagmozgatás iránya lehetőségeinek ismerete. Ezek birtokában lehet megalapozottan dönteni a sugárforrások célszerű elrendezése és az anyagmozgatás módja (szakaszos, félfolytonos, folytonos) felől.

Döntő tervezési szempont, hogy a sugárforrást, a maximális sugárhasznosítás (4.4 alfejezet) érdekében, lehetőleg a besugárzóter közepébe, illetve annak közelébe koncentráljuk, hogy ezáltal a teret minden irányában kihasználhassuk. Elvileg pontszerű, abszorpciómentes sugárforrás lenne az ideális, de a gyakorlatban szükséges nagy — 1—100 PBq nagyságrendű — aktivitásoknál a korlátozott fajlagos aktivitás és a túl nagy önabszorpció elkerülésének igénye hasonló típusnak a használatát eleve kizárja. További korlátozó tényező a nagy fajlagos aktivitású sugárforrások rendkívül magas felületi hőmérséklete, mely üzemzavart és gyulladást okozhat. A sugárforrások optimális fajlagos aktivitását (és így számát) technológiai és gazdaságossági szempontok döntenek el.

A tervezésnél ezért több (sok), 50—100 cm hosszúságú, torpedóban (kazettában) elhelyezett, ceruza alakú sugárforrás-kombinációból felépített, kiterjedt koszorú (8b. ábra) vagy (egyszeres vagy párhuzamos kétsoros) lap alakú elrendezések (pl. 5d. ábra) jöhetnek számításba. Szakaszos panoráma és több célú besugárzásokhoz a koszorú, folyamatos fél- és nagyüzemi sugártechnikákhoz pedig a lap alakú elrendezések előnyösebbek.

Komplikált sugárforrás-elrendezések esetén a besugárzóter különböző pontjaiban uralkodó dózisteljesítmény-értékek kiszámí-

tása csak elektronikus számítógép alkalmazásával gazdaságos [31]. Még ilyen esetben is bizonyos tényezők elhanyagolásával kell számolnunk: ilyen pl. a sugárzás spektrális eloszlása, az önabszorpció, a források közelében elhelyezkedő különféle elnyelő közegek által okozott abszorpció, valamint a besugárzóhelyiség falainak szórása okozta hatások. Ebben az egyszerűsített modellben azonban nincs korlátozva a forráselemek száma, geometriai elrendezése, és a számítógépi program minden elemet a rá jellemző aktivitással vesz figyelembe; pl. a 28. ábrán látható séma alapján számítható a nagy aktivitású GBL típusú több célú besugárzóberendezés részletes dózisteljesítmény-eloszlása.

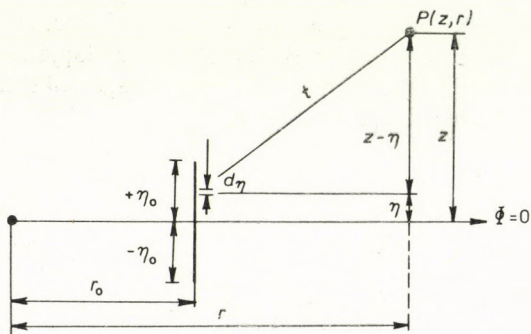


28. ábra. A dózisteljesítmény számításának sémája koszorú alakú forráselrendezés esetén

a) a sugárforráselemek koszorúszerű elhelyezkedése; b) a sugárforrások geometriai középpontjában elhelyezett koordináta-rendszer

A számítás könnyen elvégezhető az egyes síkokra és szektorokra, ha a sugárteret nem zavarja a berendezések mechanikus részének árnyékoló hatása. Ebben a besugárzóberendezésben a sugárforrás-elemek koszorú alakban vannak elhelyezve: a függőleges kötegek

száma azonos az egyes kazettákban levő sugárforráselemkével (feltéve, hogy az utóbbiak magassága egyezik). A hengerkoordináta-rendszer középpontját a sugárforrások geometriai középpontjába helyezve (29. ábra) a dózisteljesítmény önkényes egységekben számítható.



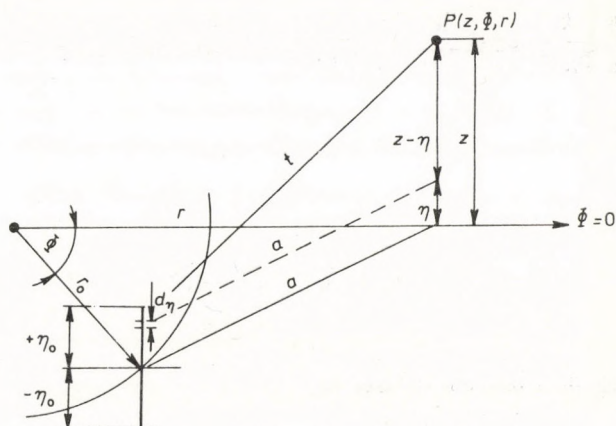
29. ábra. A helyi dózisteljesítmény számításának sémája: I. pozíció

Vegyünk példaképpen egy sugárforráselemet, és számítsuk ki tetszőleges P pontban a leadott dózist [82, 83]. Ha a forráshoz a kiválasztott P pont nincs túl közel, tehát a forrástól való távolsága nem kisebb, mint a forrás hossza, a sugárforrást vonalszerűnek tekinthetjük.

Először az önkényesen kiválasztott $\Phi = 0$ referenci irányban végezzük el a számítást. A $P(z, \eta)$ pontban a sugárforrás $d\eta$ elem által létrehozott dózisteljesítmény (28. ábra):

$$dD = \frac{k}{t^2} \frac{d\eta}{2\eta_0}, \quad (2)$$

ahol k a relatív aktivitás, azaz az elem aktivitásának és az adott izotóp dózisállandójának szorzata (értéke ^{60}Co -ra: $k_\gamma = = 2,51 \text{ aA m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ Bq}^{-1} = 305 \mu\text{Gy}_{\text{lev}} \text{ m}^2 \text{ GBq}^{-1} \text{ h}^{-1}$).



30. ábra. A helyi dózisteljesítmény számításának sémája: II. pozíció

A teljes dózisteljesítményt a (2) kifejezés $-\eta_0$ és $+\eta_0$ határok között történő integrálásával kaphatjuk meg:

$$\begin{aligned}
 D &= \int_{-\eta_0}^{+\eta_0} \frac{k}{2\eta_0 t^2} d\eta = \frac{k}{2\eta_0} \int_{-\eta_0}^{+\eta_0} \frac{d\eta}{(r-r_0)^2 + (z-\eta)^2} = \\
 &= \frac{k}{2\eta_0(r-r_0)^2} \int_{-\eta_0}^{+\eta_0} \frac{d\eta}{1 + \left[\frac{(z-\eta)}{(r-r_0)} \right]^2}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Az integrálást helyettesítéssel végezve a végeredmény:

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{k}{2\eta_0(r-r_0)} \left[\text{arc tg} \left(\frac{z+\eta_0}{r-r_0} \right) - \right. \\
 &\quad \left. - \text{arc tg} \left(\frac{z-\eta_0}{r-r_0} \right) \right]. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Tetszőleges Φ értékhez tartozó forrás esetén az előbbiekhöz hasonlóan (30. ábra):

$$D = \int_{-\eta_0}^{+\eta_0} \frac{k}{2\eta_0 t^2} d\eta = \frac{k}{2\eta_0} \int_{-\eta_0}^{+\eta_0} \frac{d\eta}{r^2 + r_0^2 + (z - \eta)^2 - 2rr_0 \cos \Phi}. \quad (5)$$

Legyen

$$A = r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \Phi, \quad (6)$$

ekkor

$$D = \frac{k}{2\eta_0 A} \int_{-\eta_0}^{+\eta_0} \frac{d\eta}{1 + \left[\frac{z - \eta}{\sqrt{A}} \right]^2}. \quad (7)$$

Az integrálást helyettesítéssel végezve:

$$D = \frac{k}{2\eta_0 \sqrt{A}} \left[\operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{z + \eta_0}{\sqrt{A}} \right) - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{z - \eta_0}{\sqrt{A}} \right) \right]. \quad (8)$$

A (8) eredmény alapján az egy vízszintes síkban, azaz egy kötegben levő, pl. 20 sugárforráselem dózisteljesítményét a besugárzótér P pontjára vonatkozóan úgy számítjuk ki, hogy a megfelelő Φ szögekhez tartozó dózisokat a (8) integrál alapján külön-külön kiszámítjuk, majd összegezzük.

Ha egy-egy kazettában több sugárforrás van egymás felett, a dózisteljesítmény hasonló megfontolások alapján számítható ki a többi kötegre is. Pl. 80 elemet tartalmazó, 4 síkban elhelyezett forráselrendezés esetében a vizsgált P pontban a dózisteljesítmény értéke:

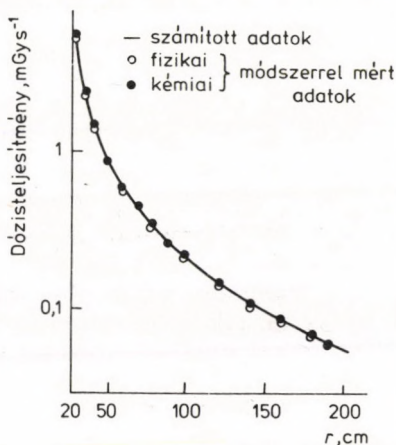
$$D(r, \Phi, z) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{20} \frac{k_{ij}}{2\eta_0 \sqrt{A_j}} \times \left\{ \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left[\frac{z + (2i - 5)\eta_0 + \eta_0}{\sqrt{A_j}} \right] - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left[\frac{z + (2i - 5)\eta_0 - \eta_0}{\sqrt{A_j}} \right] \right\}, \quad (9)$$

ahol

$$A_j = r^2 + r_0^2 - 2r_0 r \cos \left[(j-1) \cdot \frac{2\pi}{20} \right] \quad (10)$$

és k_{ij} az egyes forráselemek relatív aktivitása.

Az így kapott eredmény az alkalmazott elhanyagolások miatt csak fizikai vagy kémiai módszerrel történő, elvileg mindössze egy, a gyakorlatban azonban jó néhány jellemző pontban végzett mérés révén számítható át abszolút dózisteljesítmény-adatokra [84]. A fizikai és kémiai dózismérések alapján a matematikai módszerrel kapott dózisteljesítmény-adatok a besugárzótér nagy részében általában 1–5%-on belül jól egyeznek (31. ábra). A sugárforrás



31. ábra. Dózisteljesítmény meghatározása a sugárforrástól való távolság függvényében

közeliében azonban mind a számított, mind pedig a mért adatok hibája nagyobb.

Az ismertetett számítási módszert jól fel lehet használni lapforrások dózisteljesítmény terének számításához is, mivel a lapforrások is gyakorlatilag síkban elrendezett rúdforrásokból épülnek fel [84].

Ilyen esetben a tér egy P pontjában a dózisteljesítményt a (8) kifejezéshez hasonlóan számítjuk:

$$D(x, y, z) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{k_{ij}}{2\eta_0 \sqrt{A_j}} \times \left\{ \operatorname{arc\,tg} \left[\frac{z + [2i - (n+1)]\eta_0 + \eta_0}{\sqrt{A_j}} \right] - \operatorname{arc\,tg} \left[\frac{z + [2i - (n+1)]\eta_0 - \eta_0}{\sqrt{A_j}} \right] \right\}, \quad (11)$$

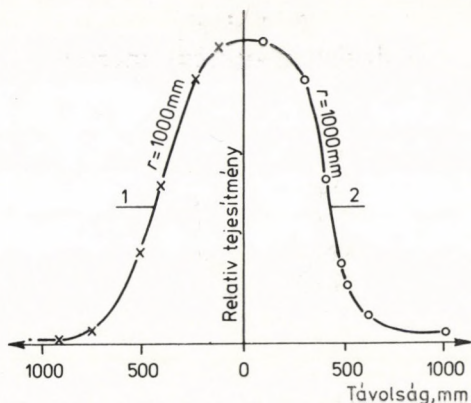
ahol n a rúdforrások száma, m egy rúdforrás forráselemeinek száma és

$$A_j = r_0 - r_{0,j}.$$

Tényleges lapforrások esetében a számítások olyan több változós integrálra vezetnek, melyek gépi megoldása célszerűtlen. Ilyen esetekben vagy az irodalomban található nomogramokat kell felhasználni [85, 86], vagy a lapforrásokat rúdforrásokként a (10) összefüggés szerint kell számítani, éspedig oly módon, hogy az n és m értékeit növelve addig finomítjuk a felosztást, míg az eredmény változása az általunk kívánt pontosságot nem biztosítja.

1.3.2 Modellezés fénycsóvel

Ha a besugárzótér dózisteljesítmény-eloszlása számítással nem határozható meg, vagy közvetett mérésekkel ellenőrizendő, célszerű a modellezést fénycsóvekkal végezni, mivel a fény intenzitása a távolsággal hasonló törvények szerint változik, mint a γ -sugárzásé [83], ugyanakkor fénycsóvekből könnyen összeállíthatók tetszőleges alakok, illetve elrendezések. Így fényelemekkel vagy más fényintenzitás-mérési módszerrel egyszerűen sok, méréseken alapuló információhoz lehet jutni, hiszen a fénycsóvek be- és kikap-



32. ábra. ^{60}Co -forrás és fénycső teljesítményeloszlásának összehasonlítása
 1. $\varnothing 11 \times 800$ mm méretű ^{60}Co sugárforrás; 2. $\varnothing 35 \times 800$ mm méretű, 60 W teljesítményű fénycső

csolása széleskörű variációs lehetőséget kínál, kiterjedt lap vagy koszorú alakú sugárforrás-elrendezésre egyaránt.

A mérési eredmények hasonlóságának bizonyítására a 32. ábra egyrészt 80 cm hosszú, 60 W teljesítményű fénycsővel, másrészt 80 cm hosszú, 400 TBq aktivitású sugárforrással kapott méréseink eredményeit mutatja [83].

2. A dózis és dózisteljesítmény mérése

A dozimetria célja mind a rendszer kalibrációja (bemérése), mind a rutinszerű besugárzás alkalmával annak megállapítása, hogy a kezelt anyag a sugárzásból mennyi energiát nyelt el.

A fizikai dozimetria leghatásosabb eszköze a kalorimetria, mely közvetlen adatokat ad a rendszer által elnyelt sugárzási energia nagyságáról [87]. Ebbe a csoportba tartozik még pl. az üvegdozimetria [88], a termo- [89] és liolumineszcens dozimetria és a félvezetőkkel végzett dózisteljesítmény-mérés is [90].

A kémiai dozimetria eljárásai a besugárzás hatására végbemenő kémiai változások meghatározásán alapulnak, tehát az elnyelt energia mértékére a rendszerben bekövetkezett sugárhatás-kémiai átalakulás mennyiségéből következtetünk. E módszerek ugyan csak másodlagosak, tehát kalometrián alapuló fizikai dozimetriával hitelesítendőek, de jól reprodukálhatók, és viszonylag egyszerűek. A technológiai célra használt legismertebb kémiai doziméter a Fricke-féle vas(II)-szulfátos [91], a módosított Fricke-féle vas(II) + réz(II)-szulfátos [92], a cérium(IV)-szulfátos [93], a klór-benzolos [94, 95] és a PMMA (Perspex) [96] módszer. A PVC doziméterek tárgyalásakor röviden foglalkozunk a közelítő kémiai doziméterekkel, a dózisindikátorokkal (dózismonitorokkal) is [97, 98].

A biológiai dozimetria baktérium- stb. tenyészetek sugárkárosodásának mértékéből következtet az elnyelt dózisra (biológiai dózisindikátor). Általában tesztmódszerként használjuk, tehát a sterilizendő tárgy (áruval) azonos körülmények között sugárzásálló baktériumokat (pl. *Bacillus Pumilus* E 601) is besugár-

zunk: ha ezek a besugárzás során maradéktalanul elpusztulnak, a vizsgált rendszert is sterilnek tekintjük. E metodikák tárgyalása meghaladja ennek az összefoglalásnak a kereteit, így csak az irodalomra utalunk [99, 100].

A fizikai és kémiai doziméterekről a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség IAEA Technical Reports Series No 178 jelű kiadványa részletes összefoglalást ad [101].

Egyes, általában sugárhatás-kémiai jellegű sugártechnológiáknál nem szükséges a rutinszerű dozimetria, mert a termék hozamának, illetve minőségének (pl. a térhálósított polimer lágyuláspontjának) ismerete helyettesíti azt.

A folyamatos nagyüzemi besugárzóberendezésekben — az üres tér és az egységcsomagok pontos dozimetriáján (3.2, illetve 3.4 alfejezet) túlmenően — csak időszakonként, és/vagy szűrőpróbaszerűen kell néhány doboznál (a próbamérések szerinti maximális és minimális dózisnak megfelelő helyeken) dozimetriai ellenőrző mérést végezni. A próbadozimetriára — kizárólag megfelelő dózistartományja miatt — leginkább a cérium(IV)-szulfát doziméter terjedt el, de ezt ma már a PMMA (Perspex) és a klór-benzolos dozimetria egyre inkább kiszorítja. A folyamatos besugárzóberendezések rutindozimetriai méréseihez a műanyag lap- és filmdoziméterek — a 2.2.6—2.2.8 szakaszban felsorolt korlátaik ellenére — kis méretüknél fogva az egyéb kémiai doziméterekkel szemben jelentős előnnyel rendelkeznek, mivel a pneumatikus szállítórendszerben a dobozok szorosan egymáshoz préselve (17., 18. ábra) haladnak végig a besugárzóban [102], és ez a reprodukálhatóság és a stabilitás szempontjából előnyösebb. Az általában 2—5 cm³ térfogatú, folyékony doziméteroldatot tartalmazó ampullák elhelyezése a kiválasztott dobozok felületén esetenként technikai problémát és törésveszélyt jelent.

Szakaszos vagy félfolytonos félüzemi besugárzáskor alapvetően más a helyzet, mivel a kézi anyagmozgatás a gyűjtődobozok véletlen felcserélésének veszélyét elkerülhetetlenül magában rejt, és így — a próbadozimetrián felül — feltétlenül szükség van a rendszeres, minden egyes gyűjtődobozra kiterjedő (és ezen túlmenően egy-egy dobozon több helyen végzett) dózismérésre. Ugyanakkor viszont nem érvényesül a folytonos berendezéseknél említett azon kikötés,

hogy a dobozok külső felületén ne legyen olyan kiálló, pl. folyadékot tartalmazó doziméter, mely a gépi anyagmozgatás biztonságát és/vagy az áru épségét veszélyezteti.

A féلزemi sugártechnológiák dozimetriájának — a műszeres ellenőrzésekkel szemben támasztott követelmények keretén belül, illetve ezeken túlmenően — az alábbi főbb igényeket kell kielégítenie:

— az elnyelt (abszorbeált) dózis minél szélesebb dózishatáron belül $\pm 1-5\%$ pontossággal egyértelműen és lehetőleg lineárisan függjön a közvetlenül mért értéktől: kalibrálásakor és a rendszer bemérésekor $1-2\%$, rutinellenőrzésnél $3-5\%$ pontosság szükséges;

— a várható dózisteljesítmény-tartományon belül a dózisteljesítmény ne befolyásolja az eredményeket;

— a dozimetriai rendszer, illetve összetétele besugárzás előtt, alatt és után legalább 40°C -ig (trópuson $50-60^\circ\text{C}$ -ig) ne legyen hőmérsékletfüggő;

— a környezet (fény, nedvesség) ne hasson a doziméterre;

— a besugárzás és a kiértékelés közötti idő (esetleg 24 óra) ne módosítsa a mérés eredményét;

— a dozimetriai minták a besugárzási technológia folyamán semmilyen körülmények között ne szennyezzék a terméket;

— a besugárzott minták analitikai kiértékelése sok minta (500 minta/nap) esetén is gyorsan, rutinszerűen, megfelelő pontossággal és ne túl költséges eszközökkel történjék;

— főleg sugársterilizés, de célszerűen az élelmiszer-besugárzás során is a kémiai doziméter-rendszer legyen alkalmas az elnyelt dózisinformáció tárolására az egészségügyi előírásoknak megfelelő ideig, sugársterilizésnél általában legalább 1 évig, hogy a dokumentumot, illetve magát a dozimétert ezen időszak alatt vitás kérdésekben bármikor elő lehessen venni, és ismételt méréssel az abszorbeált dózist ellenőrizni lehessen. Ezért a dozimétereknek egyértelmű, eltávolíthatatlan jelzést (sorszámot) kell viselniük.

A $1-50\text{ kGy}$ közötti dózis megbízható, viszonylag pontos ellenőrzésére nincs olyan rutindozimetriai módszer, amely valamennyi követelményt maradéktalanul kielégítené, és az összes

sugártechnológiai folyamatnál egyaránt jól használható lenne. Nehezíti a helyzetet, hogy az egyes dozimetriai rendszerek megítélése rendkívül szubjektív: kidolgozójuk természetesen az előnyeit hangsúlyozza, a többi eljárás hátrányainak említése mellett.

Még ha egy-egy üzemben, intézetben jól megismételhetők is a dozimetriai mérések, nem zárható ki a módszeres hiba előfordulása. Ennek elkerülésére több lehetőség kínálkozik:

— a dozimetria összehasonlítása az abszolút mérés, tehát a kalorimetria (2.1.1 szakasz) eredményével: ez az alternatíva elvileg kifogástalan, de költségessége és bonyolultsága miatt csak kifejezetten metrológiára berendezett laboratóriumokban reális;

— összehasonlítás több, az adott méréshatárra elfogadott fizikai és kémiai doziméterrel (4. táblázat), melyek között lehetőleg szerepelnie kell a másodlagos etalonnak elfogadott Fricke-féle doziméternek (2.2.1 szakasz). Ennél a módszernél néhány, különféle dózisteljesítménynek megfelelő pontban meghatározzuk a dózist, illetve dózisteljesítményt: ha az adatok (az irodalomban közölt G-értékek alapján) 1—2%-on belül egyeznek, az így adódó dózisérték, tehát közvetve valamennyi alkalmazott rutindozimetriai módszer

4. táblázat. Különböző doziméterrendszerek alkalmazhatósági dózishatára

Dózis, Gy	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
Kaloriméter										
Üveg										
Termolumineszcens										
Fricke										
Rezes Fricke										
Cérium-szulfátos										
Oxálsavas										
Klór-benzolos										
PMMA (Perspex)										
Radiokrom										
Liolumineszcens										
PVC										

elfogadható: ha azonban nem, addig kell keresni az eltérés okát, míg az adatok nem egyeznek;

— más laboratóriummal (célszerűen körminta-rendszerben több laboratóriummal) összehasonlító méréseket kell végezni, és a bázislaboratórium adatait kell elfogadni, hacsak azok hibás voltáról teljes biztonsággal nem győződünk meg. Míg rutindozimetriára a szilárd, illetve fóliarendszerű anyagok a legáltalánosabbak, körminták céljára és hitelesítésére a kémiaileg ellenálló zárt üvegben levő folyadékok (esetleg, de nem feltétlenül a fémfóliába zárt lapocskák) a megbízhatóbbak, mivel ezeknek a szállításuk során történő szennyeződése valószínűtlen.

2.1 Fizikai dozimetria

Az elektromágneses sugárzások dozimetriáját a tudományág kialakulásának időszakában a levegőben keltett töltésmennyiségre, tehát az ionizációk számára vezették vissza: ennek mérésén alapul a „besugárzási dózis”, melynek történelmi egysége, a röntgen, ma is a legszélesebb körű nemzetközi összehasonlításban pontosított dózisalapegység. A felhasználható sugárzások fajtája és energiája körének kiszélesedése, valamint a sugárzás technikai alkalmazásának előtérbe kerülése azonban szükségessé tette az „elnyelt dózis” fogalmának és egységeinek bevezetését. E dozimetria közvetlen és legszabatosabb meghatározási módszere a kalorimetria; így ma már általában ehhez kalibrálják a nagy dózisok mérésére szolgáló kémiai, sőt egyes fizikai változások mérésén alapuló dózis-meghatározási eljárásokat is. Ezzel egyidejűleg csökken a „besugárzási dózis” gyakorlati használati köre, amire az is utal, hogy külön elnevezésű SI-mértékegységet már nem is állapítottak rá meg.

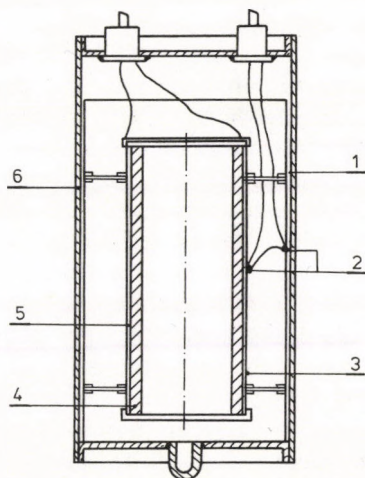
A gyakorlatban a dózist meghatározó eszközökön kívül sokszor használnak az izotópalkalmazásban is szokásos dózisteljesítménymérőket, pl. félvezető, gázionizációs (Geiger—Müller vagy proporcionális) és szcintillációs számlálókat is. Ezek valójában vagy a részecskeszámmal, vagy a részecske átadott energiájával közel arányos, de a szerkezettől függő kijelzést adó detektorok, amelyek

tehát általában csak jól meghatározott viszonyok között (adott foton vagy részecskefajta, energia, intenzitás) és némi fenntartással tekinthetők többé-kevésbé pontos dózisteljesítmény-mérőnek.

2.1.1 Kalorimetria

Lényege a kalorimetria általános elvéből következik: adiabatikus rendszerben levő, ismert tömegű anyag (általában víz) hőmérséklet-növekedéséből a fajhő ismeretében következtethetünk az elnyelt sugárzási energia mennyiségére (33. ábra) [103, 104].

A szabatos módszer leírása — lévén, hogy elsősorban metrológiai jelentőségű — meghaladja e könyv keretét. Ugyanakkor utal-



33. ábra. Kaloriméter keresztmetszete

1. rozsdamentes acélköpeny; 2. termoelem; 3. alumíniumtok; 4. grafit; 5. fűtőtest; 6. alumínium henger

nunk kell a közelítőleg adiabatikus rendszerrel végzett kalorimetria lehetőségére, amely már sokkal egyszerűbb, de csak $\pm 10\%$ pontosságot biztosít [87, 105]. Bár a γ -besugárzóberendezések hitelesítésére ezek a módszerek alkalmasak, mégis főleg az elektron-

besugárzóknál terjedtek el, mivel a későbbiekben tárgyalandó Fricke-féle és más kémiai dozimetria az igényeket gyakorlatilag ugyanúgy kielégíti, de sokkal egyszerűbb.

2.1.2 Gázionizációs detektorok

Az ionizációs detektorok (kamrák) dozimetriai célra történő használata magyar kutató nevéhez fűződik: 1914-ben Szilárd Leó ajánlotta a besugárzásidózis-mérés alapműszerének; ezt a funkcióját a közepes energiájú, kis és közepes dózisú elektromágneses sugárzások mérésére mind a mai napig meg is tartotta.

Az ionizációs kamra alkalmas elrendezésű elektródpárral és kellő szigeteléssel ellátott zárt tér, mely utóbbiban pl. a sugárzástól bekövetkező ionizáció mennyiségileg mérhető. Az elektródákra megfelelő, általában néhány száz volt feszültségkülönbséget kapcsolva, a töltéshordozó-párok az ellenkező előjelű elektród felé elmozdulva villamos jelet hoznak létre. A mért ionizációs áram arányos a sugárzás során időegység alatt létrehozott töltéshordozók számával, tehát a besugárzás dózisteljesítményével [16]. Ha a kamrán átfolyt összes töltésmennyiséget állapítjuk meg a kamrafeszültség csökkenésének mérésével, akkor a dózissal arányos mennyiséget kapunk. Az egyik elektróda általában maga a kamrafal, a másik pedig egy, ebbe koaxiálisan benyúló rúd. A szerkezeti anyag célszerűen „levegőegyenértékű” (rendszáma azonos a levegő átlagos értékével): ez esetben a kamrafalba stb. belépő és onnan kilépő másodlagos elektronok száma azonos időszakban egyenlő lévén, a mérési eredményeket nem hamisítja meg. A technológiai célokra szükséges jelentős dózisek azonban már károsíthatják a kamrafalat. Az ipari és mezőgazdasági termékek, valamint a biológiai anyagok által elnyelt dózissal ionizációs kamrával végzett besugárzásidózis-mérés alapján történő megállapítása csak megfelelő korrekcióval kellően pontos. Hibát okozhat még az energiafüggő detektálás, a hőmérséklet, a légnyomás és a sugárzás irányának befolyása is.

A kamra térfogata az érzékenységi igénytől függően néhány mm^3 -tól dm^3 nagyságrendig, nyomása pedig 1—10 bar között változhat. Az áramerősség galvanométerrel, egyenáramú erősítővel vagy

elektrométerrel határozható meg. Az ionizációs kamrák 7 keV és 40 MeV közötti energiatartományban, $2 \cdot 10^{-9}$ — 2 Gy s^{-1} dózisteljesítmény között, általában $\pm 20\%$ pontossággal mérnek [106].

A proporcionális detektorok felépítése hasonló a gázionizációs kamrákéhoz, de az elektródák közé kapcsolt feszültség növelésével olyan nagy térerősséget hozunk létre, mely a töltéshordozó ionpárokat 10^3 — 10^6 sokszorozási tényezővel teszi detektálhatóvá, tehát az érzékenység jelentősen megnő, de a létrejövő ionizációs áram arányos marad a sugárzás intenzitásával, illetve dózisteljesítményével [106].

Ha a kamra elektródái közé kapcsolt feszültséget tovább növeljük, a proporcionális tartományból kikerülve a nagy térerősség miatt az ionizáció már lavinaszerű kisülést hoz létre a gáztöltetben (Geiger—Müller- (GM) tartomány). Az elnyelt sugárzás által keltett lavinakisülések száma néhány száz voltos (kb. 400—700 V) tartományban, az ún. platón belül közel független az elektródák feszültségétől, valamint a mért sugárzás energiájától. A lavinakisülés állandósulásának megakadályozására a detektor nemesgáztöltetbe kioltó gázt (általában etil-alkohol vagy halogén gőzt) elegyítenek. A detektor γ -sugárzást kb. 1% hatásfokkal mér.

Mind a proporcionális, mind a GM-detektor megfelelő szerkezet esetén a γ -sugárzás dózisteljesítményének mérésére is alkalmassá tehető, bár csak korlátozott kvantumenergia-tartományban.

Sugártechnikai mérésekre e detektortípus csak nagy körültekintéssel alkalmazható, mert már nem túl nagy dózisteljesítményektől is „lefulladás”, tehát dózisteljesítmény-mentes vagyis sugárzásmentes helyre utal, és így katasztrofális következményekre vezető fordított információt adhat.

2.1.3 Szcintillációs detektorok

A szilárd-, folyékony- vagy gázhalmazállapotú szcintillációs detektorok anyagában a sugárzással való kölcsönhatás során olyan gerjesztett atomok vagy molekulák keletkeznek, melyek röviddel a kölcsönhatás bekövetkezése után látható vagy ultraibolya fény kibocsátásával térnek vissza alapállapotukba [16, 107]. A kibocsátott fény intenzitása igen csekély, ezért a szcintillációs detektorhoz

(pl. NaI(Tl) kristály) fotoelektron-sokszorozót illesztnek, ami a jelfeldolgozáshoz kellő erősítést biztosít.

E detektortípus legnagyobb előnye viszonylag nagy (10—15%) mérési hatásfoka. A jelzés energiafüggése elsősorban spektroszkópi-ai célra hasznosítható, dozimetriai alkalmazása nem jellemző. A sugártechnikában elterjedtségük alárendelt, főként viszonylagos költségességük és amiatt, hogy esetünkben a nagy dózisteljesítmények miatt a nagy hatásfok alárendelt szempont.

2.1.4 Termolumineszcens doziméterek (TLD)

Egyes szervesetlen kristályok a sugárzás során bizonyos helyeken elektronokat fognak be, ugyanakkor pedig a kristály más pontjain (az onnan kiütött elektronok helyén) pozitívan töltött lyukak képződnek. Hevítés hatására az elektronok visszatérnek a kristályrács megfelelő helyére, mialatt fény (lumineszcencia) keletkezik. Az így kibocsátott fény mennyisége arányos a rendellenes helyre befogott elektronok mennyiségével, tehát lényegében az elnyelt dózissal [89, 108]. A kibocsátott fényt — a 2.1.3-ban tárgyalt szcintillációs technikához hasonlóan — fotoelektron-sokszorozóval alakítjuk át villamos jellé.

Legáltalánosabban használt TLD-anyag a lítium-fluorid (LiF), de használjuk a $\text{CaF}_2\text{—Mn}$, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, a $\text{CaSO}_4\text{—Dy}$, BeO és Al_2O_3 TL-anyagokat is [88]. A TL-doziméterek alkalmazása a kisebb dózistartományok mérésére terjedt el: kb 10 μGy dózistól 200 Gy, esetleg 10 kGy dóziséig alkalmazhatók.

A módszer jelenleg terjed: technológiai használhatósága még nem ítéltető meg egyértelműen.

2.1.5 Üvegdoziméterek

Az üvegdoziméterek alkalmazásának alapja, hogy az ionizáló sugárzások az üveg fizikai szerkezetében változásokat hoznak létre, melyek az üveg sötétedésével járnak [88]. E sötétedés azonban reverzibilis: pl. magas hőmérséklet hatására többé-kevésbé visszaáll az eredeti állapot (abszorbanancia), tehát az üveg színtelensége [109].

Az üvegdoziméterek értékelésére alapvetően két eljárástípust használnak. Ezek közül a „klasszikus” éppen az elsötétedés mértékéből, tehát az abszorbancia (400 nm hullámhossz körüli) növekedéséből következtet az elnyelt dóziszra [110]. Erre a célra az ezüsttel aktivált foszfátüvegek a legalkalmasabbak, mivel ezekben a színcentrumok képződésének valószínűsége viszonylag nagy, de pl. a kobalttal aktivált bór-szilikát vagy a bizmut-ólom-borát, vagy az ezüsttel aktivált lítium-borát üvegek is jók.

A mérési határ 100 Gy-tól 100 kGy dózishatárig változik, részben az üveg összetételétől függően. A módszer kb. 1 Gy s^{-1} dózisteljesítményig használható, de a spektrum (a sugárzás átlagos és tényleges energiatartománya) is befolyást gyakorol a méréshatárra.

Az utóbbi évtizedben az üvegdoziméterek értékelésére is terjed a lumineszcens módszer, melynek lényegét az előbbieken írtuk le [89]. Erre a célra is az ezüsttel aktivált foszfát üvegek terjedtek el a legjobban. Az értékeléshez általában ultraibolya-stimulációt alkalmaznak (PLD), amelynek az az előnye a TLD-vel (2.1.4 szakasz) szemben, hogy a mérés többször ismételhető az információ elvesztése nélkül, ugyanakkor azonban hátránya, hogy csak viszonylag kis dóziszok (0,05—100 Gy) mérésére, tehát elsősorban sugárvédelmi célra használható.

2.1.6 Dózisteljesítmény mérése félvezető sugárzásdetektorokkal

Az ionizáló sugárzások és a félvezető anyagok kölcsönhatásakor lejátszódó fizikai folyamatok is lehetőséget nyújtanak a sugárzások detektálására. Ezek során többlet elektromos töltéshordozók (elektron-lyuk párok) és különféle kristályrács hibák keletkeznek. Az előbbi effektus lehetőséget ad a sugárzás dózisteljesítménye és energiája, az utóbbi pedig az elnyelt dózis mérésére [90, 111].

A félvezető anyagokban nem csak az elektronok elektromos töltéshordozók, hanem mozgékony pozitív töltésű részecskéként viselkedő „lyukak” is keletkeznek. Ha egy félvezetőben a töltéshordozók többsége elektron, akkor n típusú, ha „lyuk”, akkor p típusú, ha pedig az elektronok és lyukak egyenlő számban fordulnak elő, akkor sajátvezetésű (intrinsic, i) típusú az anyag. Az n típusú

félvezetőket donor atomokkal, a p típusúakat pedig akceptor atomokkal történő szennyezéssel lehet előállítani: pl. a Si-ban és Ge-ban donor az As, Li, P és Sb, akceptor pedig az Al, B, Ga és In.

A γ -besugárzás hatására a félvezetők és félvezető detektorok villamos jellemzői (ellenállás, áram, a dióda nyitófeszültsége stb.) megváltoznak, és ez teszi lehetővé a sugárzás detektálását.

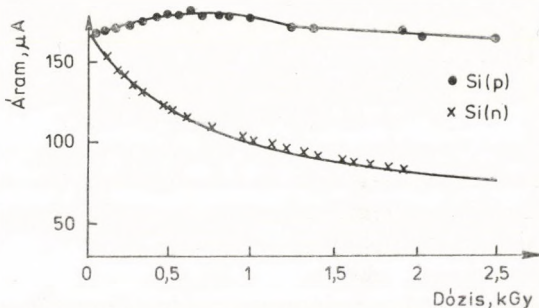
A ma használt félvezető sugárzásdetektorok többsége p-n vagy p-i-n átmenettel rendelkező dióda. Ha a félvezető egykristályt úgy alakítjuk ki, hogy a kristály egyik részébe akceptor, másik részébe pedig donor szennyezőket viszünk be, a p- és az n-réteg közötti átmeneti réteg tulajdonságai sugárzásdetektálási szempontból hasonlóak a gáztöltésű ionizációs kamrához.

A félvezető diódák az ionizáló sugárzás dózisteljesítményének mérésére a záróirányban előfeszített dióda áramának, vagy — a fényelemként használt félvezető diódákhoz hasonlóan — a külső előfeszítés nélkül átfolyó áram mérésével használatosak [90, 112]. Az előfeszített üzemmód előnye az áram—intenzitás összefüggés nagyfokú linearitása, hátránya viszont az erősen hőmérsékletfüggő háttéráram (visszáram). A „fényelem üzemmódban” besugárzatlan állapotban nem folyik áram, így a detektor gyakorlatilag zérus háttérjelű. Az áram és a dózisteljesítmény között az összefüggés — alkalmas belső ellenállású műszert választva — lineáris. A sugártechnológiában gyakorlatilag a mérési módszer egyszerűségéből, a tápfeszültség mellőzhetőségéből adódó nagy előny miatt alkalmazzák.

A félvezető diódákat integrál doziméterként is lehet használni, mert a besugárzás hatására sugárzáskárosodás következtében a működési karakterisztikák irreverzibilisen is változnak. Rétegdiódáknál ily módon 10 kGy—10 MGy között lehet dózist mérni.

A sugárkárosodás szempontjából nem mindegy, hogy n- vagy p-bázisú detektorról van-e szó. A 34. ábrán bemutatjuk egy-egy azonosan érzékeny térfogatú (0,25 mm vastag, 2 cm² aktív felületű) n- és p-bázisú Si dióda jeláramának változását, 5 Gy s⁻¹ dózisteljesítményű γ -sugárzással besugározva, 2,5 kGy dóziséig [111]. Látható, hogy a p-bázisú dióda sugárállósága jóval nagyobb, mint az n-bázisúaké. A szilícium félvezetők kb. 80 kGy dózissal előbesugározva kb. 800 kGy dóziséig változatlan a karakterisztiká-

juk [112]. Így kb. 10 éves élettartam biztosítható, ha a diódákat 100 mGy s^{-1} körüli dózisteljesítményű helyekre (pl. a besugárzóhelyiség falára) rögzítik. A detektor helyének megváltoztatásakor a karakterisztikát mindig ellenőrizni kell, mert arra a záróréteg helyzete (pl. a sugárzással bezárt szöge) befolyást gyakorolhat (bár ez utóbbi 180° eltérés esetén sem nagyobb 20%-nál). Biztosítani kell a közel állandó hőmérsékletet is: kb. $0,4\%/^\circ\text{C}$ hőmérsékletfüggés a tipikus.



34. ábra. Si(p) és Si(n) típusú p-n átmenetek sugárkárosodása

Galvanométerként nagy érzékenységű kompenzográfot, illetve 8 nA/skr érzékenységű műszert használunk: nem megfelelő terhelő ellenállás azonban eltorzíthatja a fotoáram és a besugárzási dózisteljesítmény közötti lineáris összefüggést.

A sugártechnika dozimetriai céljaira használt félvezető detektorok főbb előnyei a következők:

- mechanikailag szilárd és olcsó konstrukciók készíthetők;
- feszültség nélkül üzemeltethetők, és így víz alatti mérések végzésére rendkívül alkalmasak;
- a detektorok áramának méréséhez nem szükséges különleges követelményeknek eleget tevő drága mérőműszer, és a detektor és árammérő között több tíz méter hosszú csatlakozó vezeték is alkalmazható;

— kis méretüknél fogva alkalmasak a sugárzási tér inhomogenitásainak gyors és igen részletes meghatározására, még a sugárforrások közvetlen közelében is.

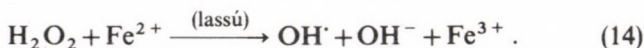
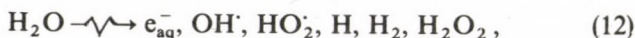
2.2 Kémiai doziméterek

A gyakorlati célokra kellő pontosságú kémiai dozimetriai módszerekre viszonylagos eszközigenytelenségük, tehát a fizikai módszerekhez képest olcsóságuk jellemző. Ugyancsak előnyös, hogy az általában tömegesen végzendő mérésekre a dolgozók könnyen betaníthatók.

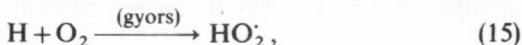
2.2.1 Vas-szulfátos Fricke-féle doziméter

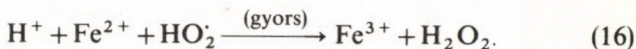
A nemzetközi gyakorlatban általánosan elfogadott másodlagos dozimetriai etalon, melynek széleskörű üzemellenőrzési használatát azonban viszonylag szűk méréstartományja korlátozza. A módszert sok anyag részletesen leírja (pl. az ASTM-D 1671-72 szabvány és a már hivatkozott IAEA Technical Reports Series 178. kiadványa) [101, 113].

A módszer lényege az [91, 101], hogy az ionizáló sugárzás hatására a savas kémhatású, levegővel telített vas(II)-szulfát vizes oldatában a vas(II)ionok vas(III)ionokká oxidálódnak:



Ha a vízben oldott oxigén van, jó hatásfokkal HO_2^\cdot is keletkezik. Az oldatban levő oxigén a H-atomokkal reakcióba lép:





A (13) és a (16) egyenletből látható, hogy döntően fontos a Fricke-doziméter oldatának megfelelő oxigénellátása: ezért pl. a később tárgyalandó „szuper Fricke-doziméter” módszernél — a mérési határ kiterjesztésére — a dozimetriai oldatot oxigénnel telítik [114].

A rendszerben jelenlevő szerves vegyületek megváltoztatják a Fe^{3+} -ionok hozamát [115], mert az

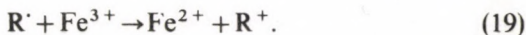


folyamat is végbemegy, amely az $\text{OH} \cdot$ -nak a vas(II)iont oxidáló folyamatával verseng. A keletkező $\text{R} \cdot$ szerves gyök

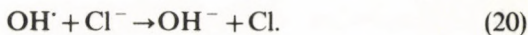
— vagy reagál az oxigénnel, és $\text{RO}_2 \cdot$ gyököt ad, amely a vas(II)ionokat oxidálja, tehát a $G(\text{Fe}^{3+})$ értéke nő, pl.:



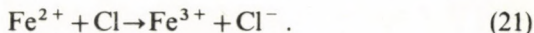
— vagy redukálja a Fe^{3+} -t, és ekkor a $G(\text{Fe}^{3+})$ értéke csökken:



A szerves szennyezések jelenlétét klóridion hozzáadásával (pl. kb. 1 mM NaCl-oldattal) lehet ellenőrizni [116]; ilyenkor a következő reakció is végbemegy:



A keletkezett klóratom a $\text{OH} \cdot$ -gyökhöz hasonlóan egy Fe^{2+} -iont oxidál, és ennek megfelelően a $G(\text{Fe}^{3+})$ értéke változatlan marad:



Mivel a klóratomok a Fe^{2+} -ionokkal gyorsabban reagálnak, mint a szerves gyökök, ezért a klóridion hozzáadásával előidézett $G(\text{Fe}^{3+})$ -változás szerves szennyezések jelenlétére utal.

A sugárhatás-kémiai hozam: $G(\text{Fe}^{3+}) = 9,74 \cdot 10^{17}$ ion/J (15,6 ion/100 eV).

Az alkalmazhatósági határok a következők:

— a dózis, amelyben az elnyelt dózis és a kémiai átalakulás között lineáris az összefüggés: 40—400 Gy;

— a γ -sugárzás dózismeghatározási pontossága 30 Gy/s, tehát 100 kGy/h dózisteljesítményig nem változik;

— 10 és 50 °C között a besugárzás hőmérséklete nincs hatással a mérés pontosságára;

— a módszer 0,1 és 1,6 MeV között nem függ a sugárzás energiájától.

A méréshez ioncserélt, majd kálium-permanganátról és kálium-bikromátról desztillált vízzel olyan oldatot készítünk, amely vas(II)-szulfátra 1 mM, nátrium-kloridra 1 mM és kénsavra 400 mM töménységű. Az oldatok napfénytől elzártnan, sötét üvegben több hónapig tárolhatók. Lényeges az edényzet, a kémszerek és a víz maradéktalan (analitikai) tisztasága. Az ampulláknak nyitottaknak és legalább 8 mm belső átmérőjűeknek kell lenniük, hogy az oxigén megfelelő sebességű diffúzióját lehetővé tegyék; ha ui. az oldatban az oxigén elhasználódott, hibás adatokhoz jutunk.

A sugárhatás-kémiai reakciók során keletkezett Fe^{3+} -ionok koncentrációját spektrofotométerrel határozzuk meg. Az oldat abszorbanciáját (optikai sűrűségét) 0,4 M-os kénsavoldattal szemben 304 nm hullámhosszon, 1 cm vastagságú kvarcküvetében mérjük.

A kiértékelésre a Lambert—Beer-törvény

$$A = \epsilon cd$$

összefüggésén alapuló

$$D = \frac{\Delta A_{25} N}{\rho G \epsilon d} = 275 \Delta A \quad (22)$$

képlet szerint kerül sor, ahol c az oldat koncentrációja, M; D az abszorbeált dózis, Gy; ΔA_{25} az abszorbanciaváltozás 25 °C-on; N az

Avogadro-féle szám, $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$; ρ az oldat sűrűsége, 1024 kg m^{-3} ; G a Fe^{3+} sugárhatás-kémiai hozama, $9,74 \cdot 10^{17} \text{ ion J}^{-1} = 15,6 \text{ ion}/100 \text{ eV}$; ε a moláris extinkciós tényező (305 nm , 25°C) $219,5 \text{ m}^2 \text{ mol}^{-1}$; d az optikai úthossz, m.

Ha a spektrofotométeres mérés 25°C -től eltérő hőmérsékleten történik, akkor $0,7\%/^\circ\text{C}$ értéknek megfelelő korrekciót kell figyelembe venni, és az alábbiaknak megfelelően kell számolni:

$$D = \frac{275 \Delta A_t}{1 + 0,007(t - 25)}, \quad (23)$$

ahol t a mérési hőmérséklet, $^\circ\text{C}$.

A már említett ún. „super Fricke-féle doziméter” [101, 114] némileg kiterjeszti a Fricke-féle módszer méréshatárát: ebben a rendszerben a vas(II)-szulfátoldat koncentrációja 10 mM , az ampullában levő oldatot pedig oxigénnel teitjük. Az értékelés módja egyezik az alapeljáráséval.

Ellenőrzésként a besugárzóhelyiség egy kiválasztott pontjában több különböző expozíciós időhöz tartozó mérést végzünk. A dózisadatok akkor bizonyulnak helyesnek, ha a dózisértékeket az expozíciós idő függvényében ábrázolva olyan egyenest kapunk, amely átmegy a koordináta-rendszer kezdőpontján. A dózisteljesítmény megfelel az egyenes iránytangensének. A dózis—idő függvény akkor is egyenest adhat, ha a dozimetriai oldatban szerves szennyezők vannak, de ez nem halad át az origón, hanem az ordinátangelyt valamely pozitív értéknél metszi: ilyenkor azonban a dózisteljesítményt szintén az iránytangensből számítva, hibás eredményt kapunk.

A mérési pontosság: $\pm 1\text{—}2\%$.

2.2.2 Vas-szulfát—réz-szulfátos, módosított Fricke-féle doziméter

A módszerhez használt 10 mM kénsavat tartalmazó oldatban 5 mM töménységű $\text{Fe}(\text{HN}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$ formájában, tehát Mohr-sóban adagolt vas(II)-szulfát és 10 mM réz(II)-szulfát van [92, 101]. Ebben az összetett rendszerben a réz(II)-szulfát kompetícióba

lép a vízből képződött oxidáló gyökökkel, illetve molekulákkal, és ezáltal csökkenti a vas(III)ionok képződésére vonatkozó sugárhatás-kémiai hozamot, annak 1/24-ed részére (ez esetben $G = 4,12 \cdot 10^{16} \text{ ion J}^{-1} = 0,66 \text{ ion/100 eV}$).

Az eljárás tisztaságával szemben azonos feltételek vannak, mint a Fricke-féle doziméternél.

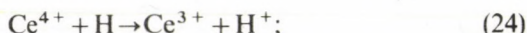
Az értékelés a 2.2.1 szakaszban foglaltak szerint történik.

A méréshatár szélesebb: 2—8 kGy, de csökkent pontossággal 0,6 kGy meghatározására is lehetőség nyílik. A méréshatárok egyébként: 0,4— 10^7 Gy s^{-1} dózisteljesítmény, 20—60 °C hőmérséklet és 0,5—10 MeV sugárzási energia.

2.2.3 Cérium-szulfátos doziméter

A módszer lényege a cérium(IV)ion savanyú, vizes oldatban sugárzás hatására cérium(III)ionná történő redukciója, amelynek mértékét a cérium(III)ionoknak 320 nm hullámhosszon spektrofotométerrel követjük [93, 101]. A módszer egyik alternatíváját az ANSI/ASTM D 3001-71 (felülvizsgálva 1977) írja le [117].

Az eljárás kémiai alapja, hogy cérium(IV)—cérium(III)-ionos vízoldatban az ionizáló sugárzások, illetve a hatásukra a (24) egyenlet szerint a vízből képződő átmeneti termékek a cérium(IV)ionokat cérium(III)-má redukálják [118]:



A kémiai folyamatból kitűnik, hogy a reakcióhoz nincs szükség oxigénre.

A különféle, elsősorban — igen kis mennyiségben jelenlevő — szerves szennyezések rendkívül nagy mértékben befolyásolják a kémiai reakciókat és G -értéküket [119]. Ezért e dozimetriai módszerrel reprodukálható eredményeket csak szigorúan meghatározott körülmények mellett és kizárólag nagy gyakoralattal, hosszadalmas előkészítési munkával lehet elérni. Olyan eljárással kell dolgozni, amely kizárja annak lehetőségét, hogy akár a levegőből,

akár a használt mérőeszközökből, pl. üvegedényekből szerves szennyeződés kerülhessen a rendszerbe.

A módszer alkalmazásának feltétele a felhasznált víz tökéletes tisztasága is: ennek ellenőrzése külön mintából a Fricke-dozimetriánál említett NaCl-os módszerrel történhet (lásd 2.2.1 szakaszt).

A $G(\text{Ce}^{3+})$ hozamokat az irodalom $(1,24-2,12) \cdot 10^{17}$ ion J^{-1} $(2,0-3,4$ ion/100 eV) között adja meg. A nagy szórást a szerves szennyezések extrém nagy hatásával magyarázzák: még $10^{-5}\%$ koncentrációban jelenlevő szerves anyagok is jelentős mértékben növelik a redukció sugárhatás-kémiai hozamát. A későbbiekben részletezendő módszer, tehát maradéktalanul tiszta rendszer alkalmazásakor $G(\text{Ce}^{3+}) = 1,27 \cdot 10^{17}$ ion J^{-1} $(2,04$ ion/100 eV) értékkel számolunk.

Alkalmazhatóság határok:

- dózis: 0,5—40 kGy;
- dózisteljesítmény: $1 \text{ MGy s}^{-1} \approx 4 \cdot 10^9 \text{ Gy h}^{-1}$ dózisteljesítményig nem változik a mérési pontosság;
- hőmérséklet: 5—50 °C között a hőmérséklet hatása a mérési hibán belül van;
- energiafüggés: 0,1—10 MeV között a pontosság nem függ a sugárzási energiától.

Az általunk javasolt eljárás szerint [120] a dozimetriai oldat 400 mM koncentrációjú kénsavban 2—3 mM cérium(IV)iont és közelítőleg azonos koncentrációjú cérium(III)iont tartalmaz. Ajánlatos, ha a cérium(III)iont a kb. 5—6 mM-os cérium(IV)oldat 10 kGy dózissal történő besugárzása során lejátszódó redukciójával állítjuk elő, egyidejűleg biztosítva az oldat egészének a módszer alkalmazhatósága szempontjából döntően szükséges maradéktalan tisztaságát. Ennek érdekében célszerű az alkalmazott edényeket felhasználásuk előtt szárítószekrényben, izzítókemencében 300—400 °C-on, 1—2 órán át hevíteni.

A dózist (25 °C hőmérsékleten) $561 \text{ m}^2 \text{ mol}^{-1}$ moláris extinkciós tényezővel, $\rho = 1030 \text{ kg m}^{-3}$ sűrűséggel és a már említett $G(\text{Ce}^{3+}) = 1,27 \cdot 10^{17}$ ion $\text{J}^{-1} = 2,04$ ion/100 eV értékkel a (22) képlet alapján kell kiszámítani.

Az eljárás 0,5—100 kGy dózis, 200 mGy s^{-1} — 1 MGy s^{-1} dózisteljesítmény, 5—50 °C hőmérséklet és 0,1—10 MeV sugárzási energiahatárok között nem függ a körülményektől.

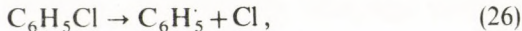
A módszer előnye a széles mérés határ, ugyanakkor rendkívül nagy hátránya fokozott érzékenysége a szennyezésekkel szemben, ezért besugárzó berendezések hitelesítésére alkalmas, de rutindoziméterként nem ajánlható.

A mérési pontosság $\pm 3\%$, feltéve, hogy a dozimetriai oldat szerves szennyezésektől maradéktalanul mentes.

2.2.4 Klór-benzolos dozimetria

Az alkoholos klór-benzol doziméter [94, 101] pontossága ugyan nem éri el sem a Fricke-féle, sem pedig a cérium(IV)-szulfátos doziméterét, de egyszerűsége, a szennyezések iránti viszonylagos érzéketlensége, széles mérés határa és megőrizhetősége miatt sorozatmérésekre mindkettőnél sokkal alkalmasabb.

A meghatározás alapjának tekinthető sugárhatás-kémiai folyamat mechanizmusa még nem tisztázott. Jelenleg klór-benzolra a következő reakciókat tételezik fel:



A módszer lényege, hogy az etil-alkoholban 25% koncentrációban oldott klór-benzolból besugárzás hatására, $G = 3,11 \cdot 10^{17}$ ion J^{-1} (5,00 ion/100 eV) hozammal, klóratomok válnak szabaddá, amelyek sósav formájában stabilizálódnak. A rendszerhez 0,04—0,04%-ban adagolt benzol és aceton, valamint 4% víz a gyökös folyamatban képződött klóratomokat segíti kloridionná történő átalakulásukban. Ugyanakkor az etil-alkohol inhibálja a láncreakciószerű oxidációt, és hozzájárul a sósav oldhatóságának javításához is. A felhasználandó vegyületeknek analitikai tisztaságúaknak kell lenniük.

Alkalmazási határok:

— a dózis, amelyben az elnyelt dózis és a kémiai átalakulás között lineáris az összefüggés: $500 - 4 \cdot 10^5 \text{ Gy}$;

- a dózismeghatározás pontossága $0,04 \text{ Gy s}^{-1}$ és 25 Gy s^{-1} (140 Gy h^{-1} és $9 \cdot 10^4 \text{ Gy h}^{-1}$) dózisteljesítmény között azonos;
- 20 és $90 \text{ }^\circ\text{C}$ között a mérés pontossága nem függ a besugárzás hőmérsékletétől.

Helyes dózisadatokat kapunk akkor is, ha a besugárzott minták zárt ampullákban három évig sötétben való tárolása után végezzük el a mérést.

Az adatok értékelése két elvnek megfelelően történhet:

— difenil-karbazon indikátor jelenlétében $[\text{Hg}(\text{NO}_3)_2]$ -oldattal végzett titrálás alapján Gy-ben számítjuk ki az elnyelt dózist [94]:

$$D = 2,195 \cdot 10^6 c_{\text{Cl}^-}, \quad (28)$$

ahol a c_{Cl^-} a mintában levő kloridion-koncentráció;

— oszcillometriás méréskor [95, 121] a rendszer nagy frekvenciával végzett „váltakozó áramú vezetését” oszcillotitrálással mérjük (35. ábra), és az így kapott értékekből következtetünk az elnyelt dóziszra, a titrálással vagy más módon meghatározott dózis és a „vezetés” közötti kapcsolatot rögzítő kalibrációs görbe vagy táblázat ismeretében (36. ábra). A kalibrációs görbe, illetve táblázat — alkalmasan választott tartományon belül — évekig változatlanak tekinthető.

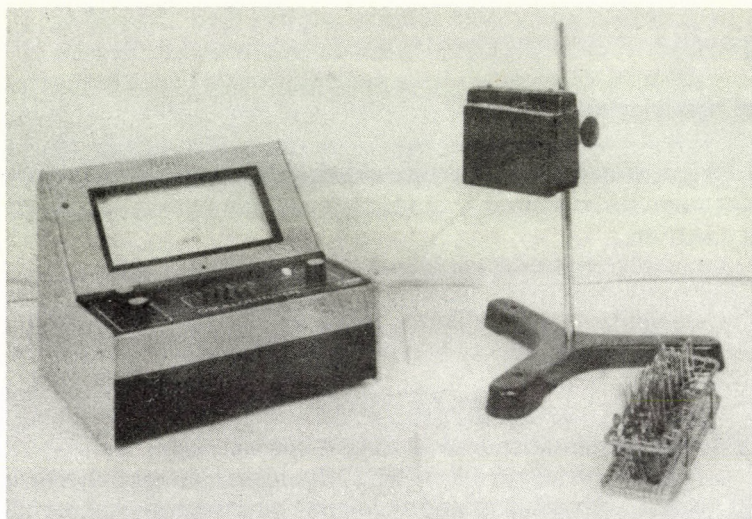
A módszer $0,5$ — 100 kGy dózis, $0,04$ — 25 Gy s^{-1} dózisteljesítmény és 20 — $90 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérséklet méréshatárok között 2 — 5% pontosságú.

Az eltérő elektronsűrűségű rendszereknek a γ -sugárzás elnyelése szempontjából más-más jellemzőik vannak. Ezért a különböző rendszerekkel mért elnyelt dózisadatokat közös alapra, pl. vízre kell átszámítanunk. Alkoholos klór-benzolos dozimetriával végzett mérés (D_{CB}) esetén esetleg a Fricke-féle másodlagos etalon dozimetriára (D_{F}) vonatkoztatunk:

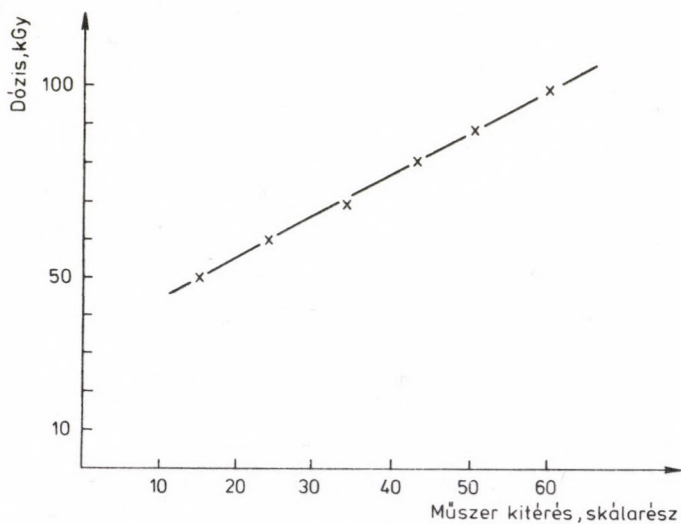
$$D_{\text{viz}} = 1,002 D_{\text{F}}, \quad (29)$$

$$D_{\text{CB}} = 1,011 D_{\text{viz}}, \quad (30)$$

$$D_{\text{F}} = 1,01 D_{\text{CB}}. \quad (31)$$



35. ábra. Oszcillotitrátor OK-302/1 típus (RADELKIS, Budapest)

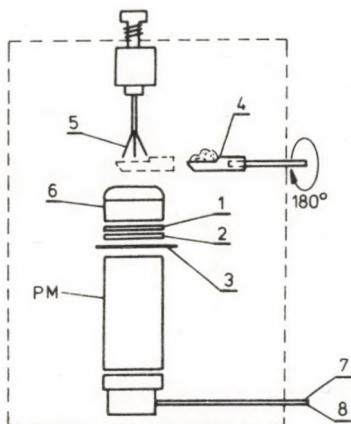


36. ábra. Oszcillotitrátor kalibrációs ábrája („4” érzékenységi tartomány)

2.2.5 Liolumineszcens (LL) doziméterek

E módszerek jelenleg még csak kialakulófélben vannak, de szép reményekre jogosítanak [101, 122, 123].

A liolumineszcencia (LL) lényege, hogy bizonyos, előzetesen besugárzott szilárd testek (pl. alkáli-halogenidek, szénhidrátok, más szerves vegyületek) vízben vagy egyéb oldószerben történő oldódá-



37. ábra. Liolumineszcens doziméter-kiértékelő elvi vázlata

1. kvarclemez; 2. szűrő; 3. fényzár; 4. adagoló; 5. keverő; 6. mérőedény; 7. nagyfeszültségű tápegység; 8. erősítő

sukkor fény emittálnak. A LL — bizonyos feltételek esetén — a képződött szabadgyökök számával arányos, de az arányosság közel sem annyira egyértelmű és szigorú, mint pl. az ESR-rel történő mérés esetén észlelhető [101, 124].

A méréskor vagy az oldószerbe (pl. vízbe, NaOH vagy Luminol (3-amino-ftálsav-hidrazid) vízoldatába) öntik az oldandó anyagot (pl. mannózt, glutamint), vagy a szilárd anyagra fecskendezik az oldószert (37. ábra). Bialkáli fotokatódos fotoelektron-sokszorozóval 10—50 mg LL anyaggal 10 mGy—30 kGy dózis mintegy 5% pontossággal állapítható meg, 10 s körüli idő alatt. Baleseti dozimetria (pl. a haj vagy bőr nátrium-szulfid vizes oldatában történő oldása) mellett főleg élelmiszer sugárkezelés rutinszerű ellenőrzésére kívánják a módszert alkalmassá tenni [125].

2.2.6 Poli(metil-metakrilát) (PMMA, Perspex, Lucite, Plexiüveg) doziméterek

Ezek az eljárások azon alapulnak, hogy az említett polimerek besugárzás hatására jellemzően változtatják abszorbanciájukat, melynek mérése lehetővé teszi a dózis kellő pontosságú meghatározását [96, 101, 126]. Az említettek közül adódóan a méréshez kiválasztott hullámhossz, illetve a moláris extinkciós együttható az összetételtől függ, de még egy-egy típuson belül is jelentős lehet a gyártási körülmények befolyása.

A nem dozimetriai célra gyártott, nem adalékolt szintelen ún. Clear Perspex-doziméter [127] optimális hullámhossza 314, míg a vörös Red Perspex-doziméter 640 [128], a borostyán színű Amber Perspex-doziméter pedig 651 nm hullámhosszon értékelhető legjobban [128]. A dózis és az abszorbanciaváltozás összefüggésére hasonló módon kell kalibrációs görbét készíteni, mint azt a klórbenzolos módszernél leírtuk.

A doziméter — a fólia vastagságától is függően — 3—100 kGy dózishatárok között kb. 1 MGy s^{-1} dózisteljesítményig használható, nemcsak γ -, hanem elektronbesugárzás esetén is. A hőmérséklet különösen 25°C fölött gyakorol hatást a mérésekre, és a környezet (pl. az oxigén és a nedvesség) befolyása sem elhanyagolható. Ezért szükség lehet a minta besugárzás előtti és utáni hűtésére, de az értékelés 5 nap után még így sem ajánlható.

A PMMA módszerek alkalmazhatóságának fő előnye, hogy kis méretük révén könnyen és törésveszély nélkül helyezhetők el a folyamatos besugárzóberendezésen áthaladó árura, ugyanakkor jelentős hátrányuk nem egyértelműen ismert kémiai összetételük, valamint — a fólia vastagságának nem mindig egyenletes volta és öregedési hajlamuk miatt — a gyakran szükséges ellenőrzés, illetve kalibrálás.

2.2.7 Színezék (Radiochromic) doziméterek

A γ -, de főleg elektronsugárzás mérésére most kialakulófélben levő módszer azon alapul, hogy a szokványos körülmények között szintelen trifenil-metil-cianid vagy trifenil-metil-metoxid színezékek oldatában a sugárzás hatására maradandó színeződés lép fel [101,

110, 129]. Az abszorbanciamérés szempontjából optimális hullámhossz természetesen a rendszer (az oldószer és a színezék) kémiai összetételétől függ. Lényegében azonos elven alapulnak a folyadék- és szilárdfázisú rendszerek.

A folyadékfázisú rendszerek — a klór-benzolos eljáráshoz hasonlóan — kb. 5 cm^3 -es zárt ampullát használnak, melyben pl. hexahidroxidietil-anilinvörös-cianid van szerves oldószerben oldva. Ezt a rendszert 601 nm hullámhosszon értékelik, és 10 – 10^4 Gy dózishatáron belül 3% pontosságúra teszik. A G -érték, tehát a hozam és a dózis kapcsolata igen érzékeny az összetételre, ezért minden egyes rendszernél önálló kalibrálás szükséges. Ugyancsak gondot okoz a napfény hatása is, amely befolyásolhatja a mérési eredményeket.

Egyszerűbb, bár sok esetben kevésbé pontos mérést tesz lehetővé a 20 – $100\ \mu\text{m}$ vastagságú színtelen műanyagfilmbe vagy fehér papírba 10% töménységben épített sugárérzékeny színezék (pl. trifenil-metán-cianid) [101, 130]. A műanyagfilmek összetétele nylon, poli(vinil-butirál), poli(vinil-acetát), PVC stb., de cellulóz és zselatin alapú rendszerekkel is kísérleteznek.

Az általában 600 nm-en végzett mérés pontossága az összetételtől függ, és 1 – 100 kGy dózishatáron belül kb. 3%. Nagyobb dózis esetén (300 kGy-ig) 510 vagy 540 nm-en végzik a mérést. A módszer előnye, hogy rendkívül alacsony hőmérséklettől ($-78\text{ }^\circ\text{C}$ -tól) magas ($100\text{ }^\circ\text{C}$ körüli) hőmérsékletig használható, bár ezekben az esetekben hőmérséklet-korrekciót is kell végezni.

A tárgyaltakhoz hasonlóan a malachitzöld—trifenil-metán-metoxid—poli(klór-sztirol) rendszerrel is jó eredményeket értek el [110]. A mérést 5 – 30 kGy dózis esetén 630 nm, 10 – 200 kGy dózisonál pedig kb. 400 nm hullámhosszon végzik. Az eljárás nagy előnye, hogy a már besugárzott rendszer is stabilis.

2.2.8 Poli(vinil-klorid) (PVC) doziméterek és dózisindikátorok

Ezek a rendszerek azon alapulnak, hogy a sugárzás hatására a PVC színét a közel színtelentől a zöldön át sárgásbarnáig, illetve sötétbarnáig változtatja. A kiértékelés általában 395 nm-en végzett

spektrofotometriával célszerű [101]. Hátrányos tulajdonság, hogy a besugárzott PVC-t melegítéssel kell kiértékelhetővé tenni: 50 °C hőmérsékleten 1 órán, vagy 80 °C-on 5—10 percen át kell a színt „előhívni” [110]. További negatívum, hogy a rendszer igen erősen dózisteljesítmény-függő.

Míg az említettek miatt a PVC-dozimetria kvantitatív dozimetriai célokra nem terjedt el, kiválóan alkalmasnak bizonyult dózisindikátorként, tehát „go/no-go” monitorként [97, 131]. Ezek alkalmazásának az a célja, hogy jelentős (20—30%-os) hibával ugyan, de szemrevételezéssel teszi lehetővé a besugárzás tényének, illetve a besugárzás dózisa nagyságrendjének követését. Általában 2—30 kGy dózishatárok között, szintelen vagy világos olyan adalékolt PVC-rendszereket alakítanak ki, amelyek — esetleg alkalmas színskálával történő összehasonlítás révén — biztosítják a tájékoztatást.

A dózismonitoroknak elsősorban folyamatos besugárzásnál van jelentőségük, amely esetben kis vagy közepes hibát nem lehet elkövetni, hiszen vagy áthalad a rendszeren az előírt sebességgel a besugárzandó áru, vagy nem: ha pedig áthalad, akkor a tervezett dózis biztosított (vö. 1.2.5 szakaszt).

Ennek ellenére részben a nagyüzemi módszer analógiájára, részben a többszöri ellenőrzés, valamint a megrendelő közvetlen tájékoztatásának szükségessége miatt, a szakaszos félüzemi besugárzásoknál is általánosan alkalmaznak dózismonitorokat: így a kezelőszemélyzetnek munka közben is van információja arról, hogy véletlen folytán nem került-e a besugárzott termékek közé nem besugárzott, vagy a besugárzandó közé besugárzott áru.

3. Ellenőrzés és üzemeltetés

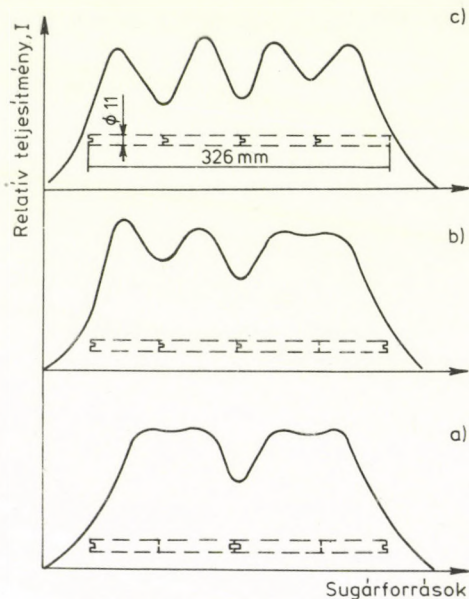
3.1 A sugárforráselemek ellenőrzése

Az egyes, általában ceruza alakú sugárforrások dózisteljesítményterét a betöltés előtt félvezető dózisteljesítmény-mérő műszerrel (2.1.4 szakasz) célszerű meghatározni. A 38. ábra szerinti eredményekre vezető méréseket víz alatti modellezéssel végeztük.

A GBL-típusú besugárzóberendezés első feltöltése alkalmával a négy, egyenként 40 TBq aktivitású sugárforrást tartalmazó kazettáról felvett ábrán (38. ábra) a sugárforrások hegesztési varratai is észlelhetők [60]. A sugárforrások elhelyezkedésének ismeretében, megfelelő válogatással, a betöltés sorrendjének és irányának helyes megválasztásával jelentősen javítani lehet a dózishomogenitást, még a sugárforrások közvetlen közelében végzett besugárzásoknál is.

A 39. ábrán a GBL rekonstrukciója utáni négy 20 TBq és két 40 TBq aktivitású sugárforrást tartalmazó kazetta belső elrendezése és dózisteljesítmény-eloszlása látható. A 39a. ábrán a kazetta felületére, a 39b. ábrán pedig a kazettától 160 mm távolságra vonatkozó számított relatív dózisteljesítmény-adatok vannak feltüntetve [90]. Mind a számított, mind pedig a mért adatok arra utalnak, hogy a dózisteljesítmény abban az esetben homogén nagyobb magasságban, ha a nagyobb aktivitású sugárforráselemeket a kazetta két végének közelében helyezzük el. A dózistér homogenitása egyébként természetesen javul a távolsággal.

A sugárforrások zártságának és felületi szennyezésének ellenőrzését az 1.1.1 szakaszban tárgyaltuk.



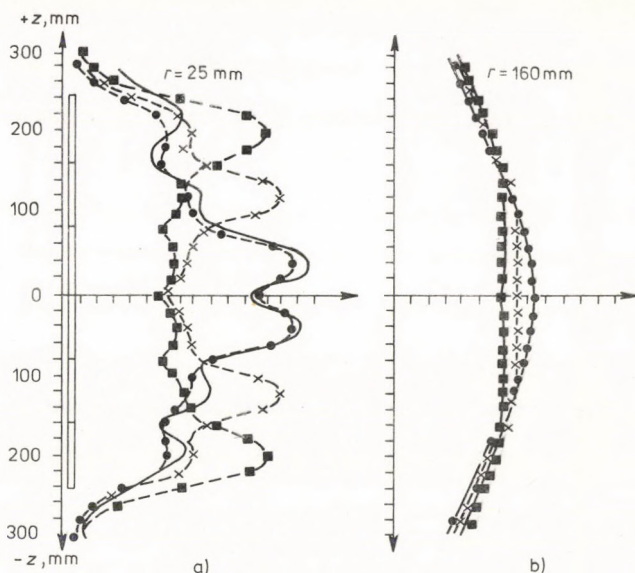
38. ábra. A dózisteljesítmény változása 4 sugárforráselemet tartalmazó kazetta mentén (szovjet VII. típus)

a) a sugárforrások varrata váltakozó irányú elrendezésnél; b) a sugárforrások varrata vegyes irányú elrendezésnél; c) a sugárforrások varrata egyirányú elrendezésnél

3.2 A besugárzótér ellenőrzése

Az előzőekben említett sugárforrásokból (rúdforrásokból) leggyakrabban koszorú (hengerpalást) alakjában csoportosított vagy egyszeres, vagy párhuzamos kétszeres sík- (lap-) forrás elrendezéseket állítanak össze.

A legegyszerűbb esetben — amikor a sugárforrások koszorúszerűen vannak rögzítve, pl. önárnyékolt konténer típusú besugárzókból (1.2.1 szakasz) — a céltárgy homogén sugártérbe kerül, és a dózisteljesítmény a viszonylag kis térfogatban egyenletes (40. ábra) [132].



39. ábra. Számított és mért dózisteljesítmény-görbék 6 sugárforráselemet tartalmazó kazettánál (szovjet VII. típus)

a) - - - számított;

●	20	20	40	40	20	20	TBq
×	20	40	20	20	40	20	TBq
■	40	20	20	20	20	40	TBq

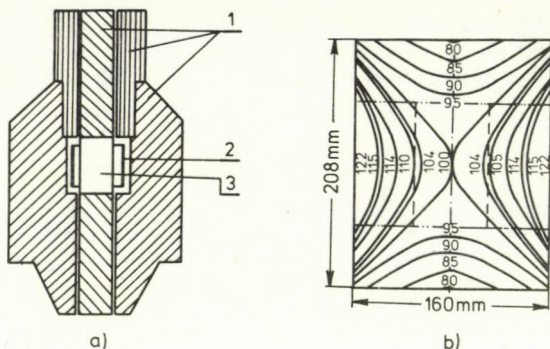
— mért:

20	20	40	40	20	20	TBq
----	----	----	----	----	----	-----

a sugárforrások sorrendje aktivitásuk szerint

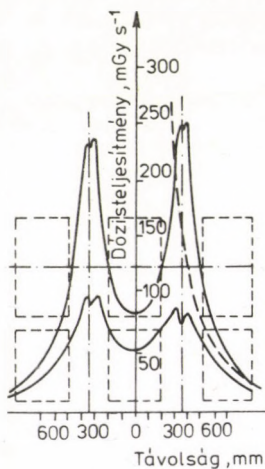
b) $r = 160$ mm távolságra számított dózisteljesítmény-görbék

A panorámarendszerű, illetve több célú besugárzóberendezés rendszeres üzemelését megelőzően, a besugárzóter dózisteljesítmény-eloszlását a jellemző irányokban, célszerűen a 2.1.6 szakaszban tárgyalt rövidzáras üzemmódban alkalmazott félvezető detektorral [90], illetve műszerrel néhány órás méréssel meg lehet

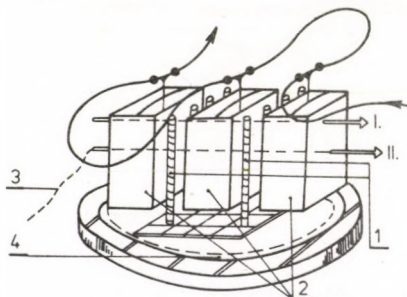


40. ábra. Laboratóriumi ^{60}Co -besugárzó

a) laboratóriumi ^{60}Co -besugárzó metszete; 1. ólomvédelem; 2. koszorúba rendezett sugárforrások; 3. besugárzótér; b) relatív izodózis teljesítmény-görbék. A Gamma Chamber 4000 (India) besugárzóterének magassága 208 mm; átmérője 160 mm



a)



b)

41. ábra. Kísérleti élelmiszer-besugárzó berendezés (Központi Élelmiszeripari Kutató Intézet — Agroster) félvezető dóziméterrel mért dózisteljesítmény eloszlása a) félvezető berendezés dózisteljesítményének eloszlása; b) a terméktartó kosarak mozgása a sugárforrások között, valamint a dózisteljesítmény-eloszlást mérő detektorok vezető csövei (I. és II) 1. sugárforrás torpedók; 2. terméktartó kosarak; 3. félvezető detektor csatlakozó vezetéke; 4. vizesakna

határozni. Az adatokból következtetni lehet a besugárzott termék várható dózis homogenitására (3.4 alfejezet), a berendezés sugárhasználási tényezőjére és termelékenységre (4.4 alfejezet) stb.

A 41. ábrán egy kísérleti élelmiszerbesugárzó-berendezés dózisteljesítmény-eloszlását mutatjuk be, a függesztő kosarakban elhelyezett termékre adott maximális és minimális dózissnak megfelelő szimmetriatengely mentén [90]. Az adatokat a berendezés újratöltése után, kb. egy óras munkával kaptuk meg.

Mivel — főleg új berendezés és rekonstrukció (töltéscsere és újratöltés) esetén — több, egymástól független dózisteljesítmény-ellenőrzés szükséges a tér több pontjában, a dózist kémiai (általában Fricke-féle és klór-benzolos) doziméterrel is meg kell mérni (2.2.1 és 2.2.4 szakasz), és az így meghatározott pontokra, mint abszolút értékekre kell a számítógéppel kapott dózisteljesítmény-adatokat normálni (1.3.1 szakasz). A 42. ábrán a különféle elrendezésű, összesen 3,7 PBq aktivitású ^{60}Co -ot tartalmazó rendszerre vonatkoztatott dózisteljesítmény-eloszlást hasonlítottuk össze [83]. A 43. ábra példaképpen koszorú elrendezésű ^{60}Co -sugárforrás függőleges és vízszintes irányú dózisteljesítmény-változását szemlélteti [83].

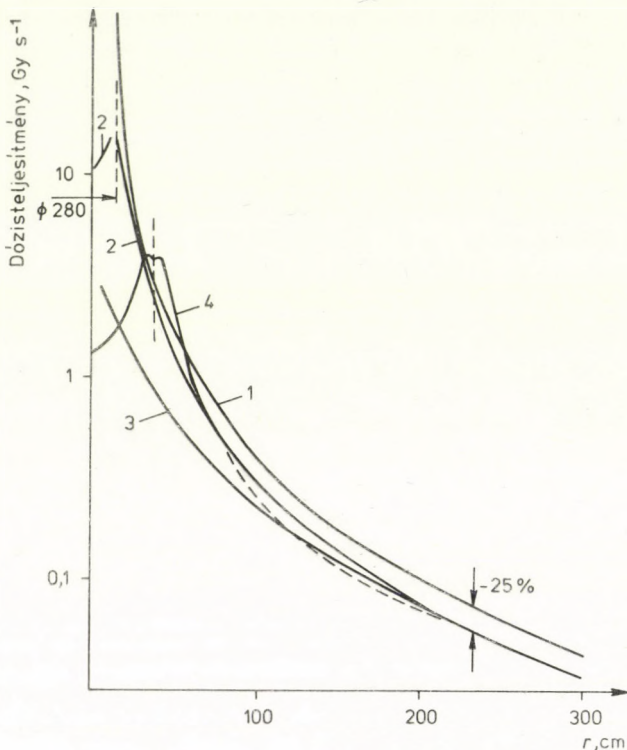
A kapott dózisteljesítmény-értékek alapján a 42. ábrából az alábbi általános következtetések vonhatók le:

— a kiterjedt és a pontszerű sugárforrás dózisteljesítmény-eloszlása nagyon eltér, különösen a források közelében;

— a gyakorlatban megvalósított bármely sugárforrás-kombináció dózisteljesítmény-eloszlása egy adott távolságon túl jó közelítéssel számítható az r^{-2} összefüggés alapján, tehát a dózisteljesítmény-görbék párhuzamosak a pontszerű sugárforrásokéval. A 42. ábrán látható, hogy a koszorú alakú elrendezésnél (2.görbe) ez a távolság 1 m, míg az egyszeres és a párhuzamos síkforrásoknál (3. és 4. görbe) 1,5 m;

— a sugárforrás közelében függőleges irányban jelentős dózisteljesítmény-eltéréssel kell számolni, de ez 1,5—1,8 m távolságban még 1,5 m magasságkülönbség sem okoz 10—15%-nál nagyobb eltérést;

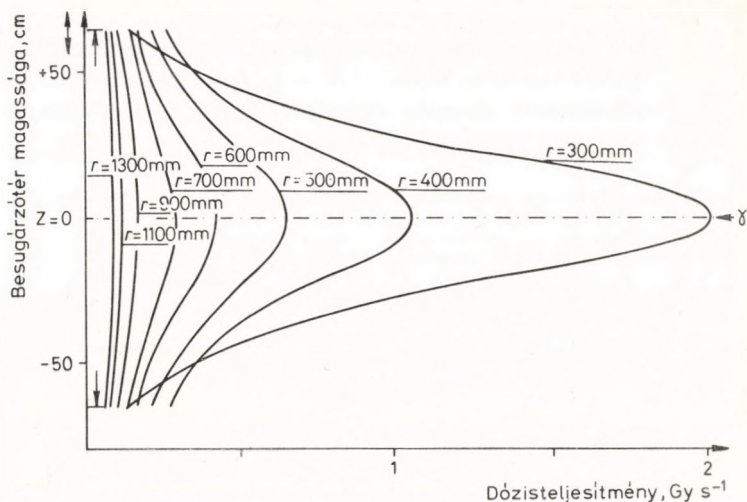
— a sugárforrások dózisteljesítménye — a sugárforráselemek önabszorpciója miatt — a számítottnál kisebb. A sugárforrások és a



42. ábra. Különbéféle geometriájú 3,7 TBq aktivitású ^{60}Co -sugárforrások dózisteljesítmény-eloszlása a források vízszintes szimmetriatengelye mentén
 1. pontszerű sugárforrás; 2. koszorú elrendezésű sugárforrás (magassága 320 mm; átmérője 280 mm); 3. egyszeres síkforrás (2 m × 1 m); 4. párhuzamos síkforrás (magassága 820 mm; hosszúsága 600 mm; távolsága 700 mm)

berendezés szerkezeti elemeinek abszorpciója közvetlenül becsülhető, illetve mérhető: az eddig létesített üzemi berendezéseknél ez 20—25% körül van;

— a besugárzóteret függőleges irányban a sugárforrás teteje felett és alja alatt, a hosszú rúdforrások önabszorpciója miatt nem, vagy csak igen korlátozottan lehet kihasználni;



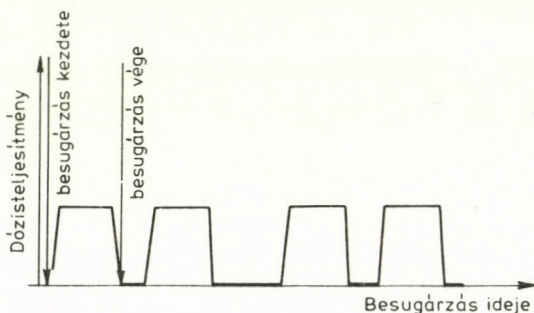
43. ábra. 1,8 PBq aktivitású ^{60}Co -koszorúforrás (átmérője 280 mm; magassága 320 mm) dózisteljesítmény-eloszlása a forrás függőleges szimmetriasíkjában

— a sugárforrás közelében kb. 1,0—1,2 m sugarú térben a sugárzó energia 30—40%-át lehet hasznosítani.

Az így meghatározott (számított és dózismérések alapján normált) dózisteljesítmény-adatok azonban nem veszik figyelembe a besugárzóhelyiségben levő (beépített) elnyelő és szóró közegek abszorpcióját, holott a sugárforrások mozgatására vagy rögzítésére, továbbá a besugárzandó anyag továbbítására szolgáló szerkezetek egyes térirányokban jelentősen megváltoztatják, „torzítják” a dózisteljesítmény-eloszlást. Ezekben az irányokban a számítógépi adatok alapján összeállított dózistérképet közvetlenül mért adatokkal kell helyesbiteni. A méréseket általában több nagyságrendet átfogó dózistartományban (kb. $10 - 10^5$ Gy) kell elvégezni; ezért a kellő pontossághoz több, fizikai és kémiai doziméterrendszer kombinált alkalmazására van szükség (lásd a 2. fejezet bevezetését is).

Rendkívül fontos az üzemmenet során a dózisteljesítmény folyamatos ellenőrzése. Sok ország folyamatos fél- és nagyüzemi

besugárzóberendezéseiben (a hét 168 óráján át) a besugárzótér viszonylag kis dózisteljesítményű helyén rögzített félvezetővel (2.1.6 szakasz) vezérelt vonalíró rögzíti a „besugárzási szintet” (44. ábra) [90]. Ez a hatóságok számára dokumentálja, hogy a besugárzás



44. ábra. A besugárzó berendezés üzemmenetének folyamatos ellenőrzése félvezető doziméterrel

során a sugárforrások mikor kerültek tároló helyzetbe, tehát valamennyi sugárkezelt termék folyamatosan, azonos dózisu besugárzást kapott-e (amennyit a sugársterilizációra előírtak).

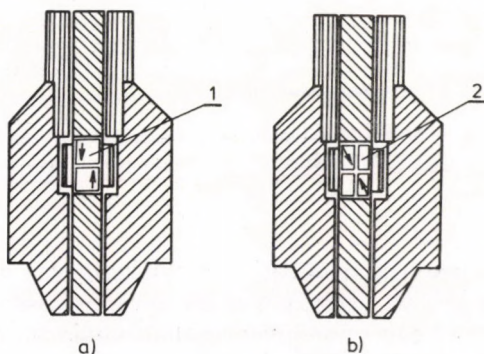
3.3 A besugárzandó anyagot is tartalmazó tér ellenőrzése

A 3.2 alfejezetben a 40. ábrából kitűnik, hogy az adott konténer-típusú, üres laboratóriumi besugárzóban a dózisteljesítmény maximális eltérése, tehát a maximális és minimális dózis aránya 1,5:1 értéknek felel meg [61]. Besugárzás esetén azonban ez az arány romlik a céltárgy abszorpciója miatt.

Míg a dózishomogenitás nem kívánatos hatását folyadékok kísérleti besugárzásakor keveréssel, áramoltatással vagy recirkulálással lehet kiküszöbölni, szilárd anyagoknál ennél bonyolultabb megoldásokat kell alkalmazni. Sok esetben elegendő, ha a besugárzandó áru (konténer) magasságánál hosszabb sugárforrást

használnak, és ezáltal annak függőleges irányban viszonylag homogén dózisteljesítmény-terét hasznosítják besugárzásra, természetesen rontva az elnyelt sugárzás határfokát (39. ábra). Gyakran a dobozok, csomagok, konténerek tengelye körül forgatják az árut, ami a vízszintes irányú dózishomogenitást segíti elő [133].

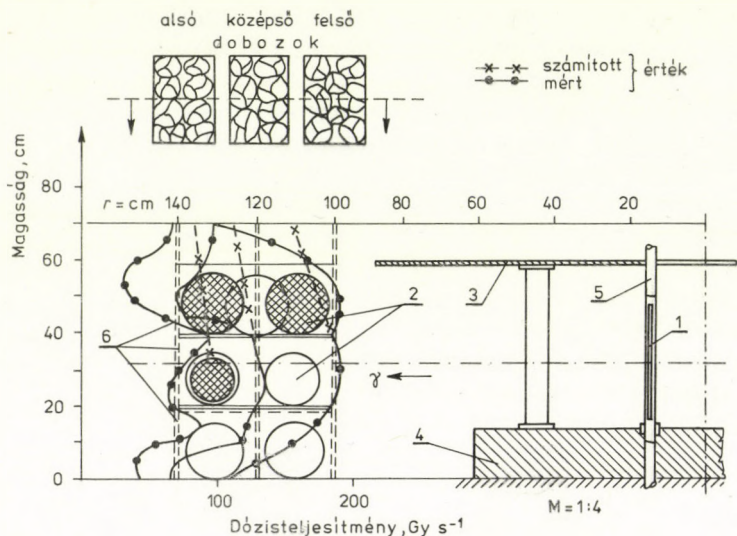
Félüzemi besugárzás esetén az a feladat, hogy az egyes áruelemek által elnyelt dózis — az ilyen esetben alkalmazott kézi árumozgatás ellenére — hasonlóan egyenletes legyen, mint a nagyüzemi eljárásoknál folyamatos árumozgatás esetén, ugyanakkor a besugárzás határfoka is viszonylag nagy maradjon. Erre a célra bevált módszer, hogy a besugárzandó anyagot két, azonos térfogatú edénybe helyezzük, és a két edényt a besugárzási idő felénél függőleges irányban felcseréljük (45a. ábra) [61].



45. ábra. A besugárzott anyag elhelyezése és helycseréje kísérleti ^{60}Co -besugárzóban
 a) egyszeres csere; 1. besugárzott anyag; b) kétszeres csere; 2. besugárzott anyag

Tovább javítható a dózisegyenletesség, ha a besugárzandó anyagot négy egyforma edénybe helyezzük, és félidőben átlósan felcseréljük (45b. ábra): így kompenzálni lehet a dózisteljesítménynek függőleges és vízszintes irányú változását [134].

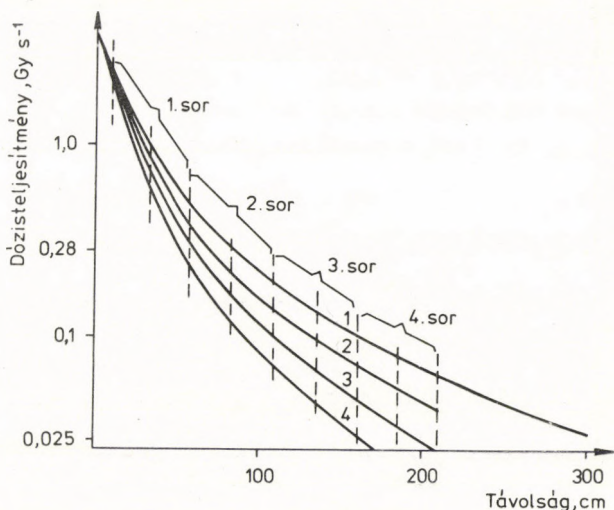
A besugárzóberendezés dózisteljesítmény-eloszlásának részletes ismerete lehetővé teszi, hogy félüzemi besugárzás esetén is megfelelő technikát alkalmazva a gyűjtődobozokban kellően homogén legyen a dóziseloszlás. Az egyenetlen csomagolás azonban nagyon káros,



46. ábra. A dózisteljesítmény eloszlása káposzta besugárzásakor
 1. sugárforrás; 2. káposzta; 3. fémasztal; 4. sugárforrás-tároló; 5. sugárforrás-határoló cső;
 6. fadóboz

mivel a kitüntetett irányokban a dózisteljesítmény annyira megváltozhat, hogy csak jelentős átlagos túlexponálással érhető el a rendszer minden egyes pontjában az előírt minimális dózis, ami — különösen érzékeny anyagoknál, pl. élelmiszereknél — elkerülendő.

A 46. ábrán példaként bemutatjuk, hogy milyen inhomogenitás alakult ki kereskedelmi méretű ládákban, a viszonylag nagy térfogatú és sűrűségű (látszólagos sűrűségű) káposzta besugárzásakor [61]. A méréseket a sugárforrás középvonalától számított 100, 120 és 140 cm távolságban, az ábrán bejelölt síkok mentén, félvezető doziméterekkel végeztük. Feltüntettük az üres besugárzóterre vonatkozó számított dózisadatokat is: látható, hogy a számított adatokhoz képest jelentősek az eltérések. A besugárzott anyag abszorpciója okozta dózisteljesítmény-deformáción túl az acél asztallap magassága szerinti szórása és árnyékoló hatása, valamint a sugárforrások tárolójának abszorpciója is jól észlelhető.



47. ábra. A besugárzott anyag sűrűségének és vastagságának számított hatása 3,7 TBq névleges aktivitású, $2\text{ m} \times 1\text{ m}$ -es ^{60}Co -lapforrás vízszintes tengelye mentén kialakult dózisteljesítmény-eloszlására

A kérdés megvilágítására a 47. ábrán lapforrás-elrendezésre számítással kapott dózisteljesítmény-görbéket mutatunk be. Kiténik, hogy a sugárforrásokon kívüli térben elhelyezett termékben a dózisteljesítmény eloszlása egyenlőtlen. Az adatokból az is leolvasható, hogy 1,0—1,2 m-en túl nem célszerű a teret kihasználni, mivel a sugárhasznosítási tényező legfeljebb 3—5 abszolút %-kal javul, ha kb. 20—30%-kal több terméket helyezünk a besugárzóterbe. Ez esetben azonban indokolatlanul sok félkésztermék lenne a besugárzóhelyiségben, ami tűzveszély és gazdasági szempontok miatt nem kívánatos. Ha azonban egy adott szélességű dobozt függőleges tengelye mentén 180° -kal elforgatunk, a doboz különböző vízszintes síkjai mentén a függőleges térkompenzációhoz hasonlóan, közel egyenes dózisteljesítményű síkokat kapunk.

A tárgyaltak szerint a fél- és nagyüzemi berendezésekben végzett félüzemi besugárzásokor a dózis egyenletességét legalább a tér két

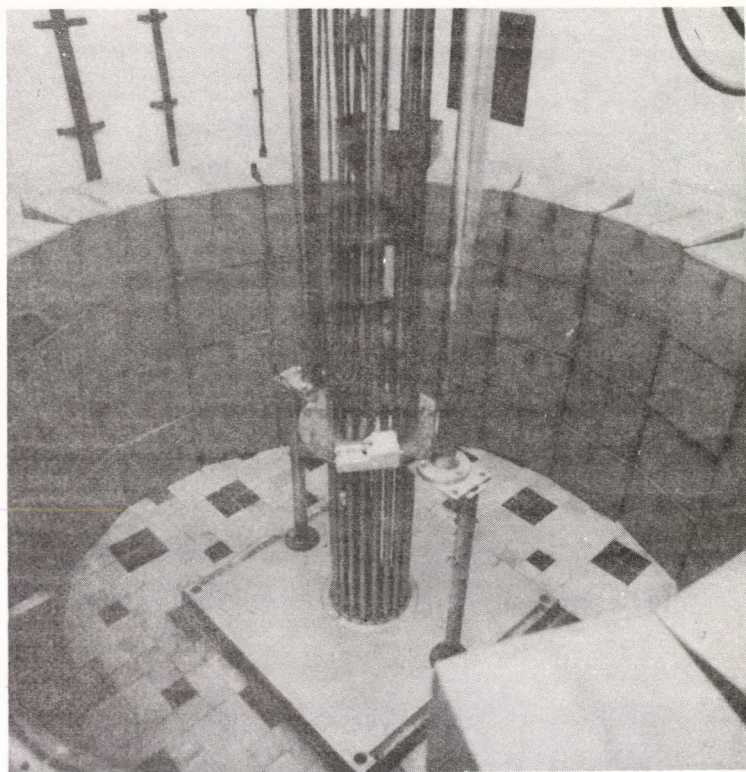
irányában végrehajtott helyváltoztatással és/vagy szakaszos, illetve folyamatos forgatással, esetleg (általában automatikával szabályozott) folyamatos vagy „léptetéses” árutovábbítással kell javítani. Míg nagyüzemi besugárzás esetén ez utóbbi megoldást használják, több célú berendezésben az előzőek az általánosabbak [67, 68].

A következőkben példaképpen a budapesti GBL-típusú panorámaberendezésre kidolgozott besugárzási eljárást ismertetjük, amely kereskedelmi szállítási méretű gyűjtődobozok alkalmazásával mind a besugárzótér jó kihasználását (4.5 alfejezet), mind a folyamatos nagyüzemi berendezéseknél elért dózisegyenletességet (3.4 alfejezet) biztosítja (48. ábra) [135].

A dózistér vizsgálata során megállapítottuk, hogy a besugárzást megrendelő vállalat által megadott dobozméret ($40\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 65\text{ cm}$) mellett — amint azt a 49. ábra I. görbéje mutatja — a forrás középpontjától számítva még 1,1 m távolságban is kb. 200—300%-os dózisteljesítmény-különbség adódik a gyűjtődobozokban, illetve az annak megfelelő térben, ha nem hajtunk végre kompenzálást.

A térkompenzálást sematikusan szemléltetjük (50. ábra). A teljes besugárzási időt négy azonos negyedre osztottuk fel. A besugárzási időtartam első negyede (a) után a dobozokat 180° -kal kell elforgatni (b), a második negyed befejezése után pedig fel kell cserélni az alsó és felső dobozt (c). Ezt követően a harmadik negyed végén a gyűjtődobozokat ismét 180° -kal kell elforgatni (d), majd a negyedik negyed után a dobozt eltávolítjuk a besugárzó térből.

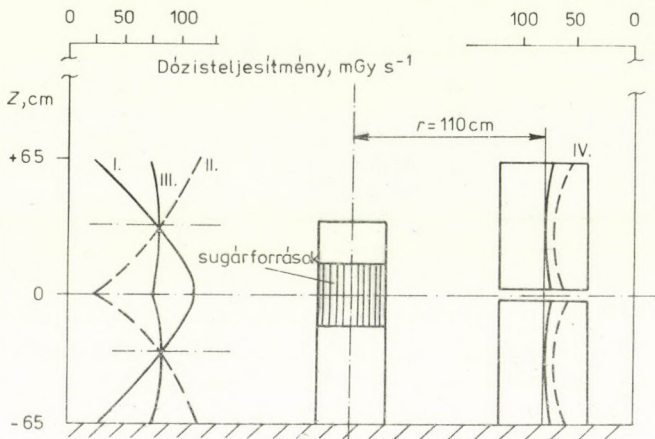
A 49. ábra jobb oldalán a besugárzótérben, a források geometriai középpontjától 1,1 m-re elhelyezett két gyűjtődoboz méretarányos vázlata látható. Az ábra a gyűjtődobozok helycseréjével (III. görbe) kialakult dózisteljesítmény-viszonyokat is szemlélteti. (A dobozon belül a szaggatott vonallal jelölt görbe tükrözi az abszorbens hatását.) A dobozok felcserélésével kialakuló dózisteljesítmény-viszonyokat az I. görbéből elméletileg a következőképpen kapjuk meg: az I. dózisteljesítmény-görbét a vízszintes szimmetriasíkban ($z=0$) elmetsszük, és az így kapott két félgörbe helyét felcseréljük (II. görbe), majd megrajzoljuk a két görbepár eredőjét (III. görbe). Jól látható, hogy az eredő görbe elfogadható



48. ábra. Kereskedelmi méretű gyűjtődobozok főlüzemszerű sugársterilizése (MTA Izotóp Intézete, Budapest)

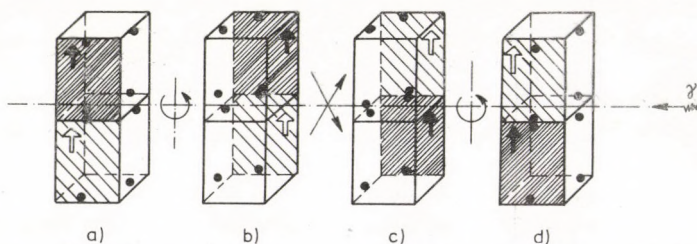
hibán (10%) belül egyenletes dózisteljesítmény-eloszlásra utal. Az így kapott görbe a dózistér vízszintes szimmetriasíkjának a padlószinttől mért magasságától is függ: minél nagyobb a magasság, annál nagyobb a viszonylag egyenletes dózisteljesítményű, tehát a függőlegesen kihasználható tér. Ez a mi esetünkben 1,3 m-nek adódott, nagyüzemi berendezésnél pedig általában 2 m.

Az 51. ábrán a besugárzótérben a források geometriai közép-pontjától 1,1 m-re elhelyezett 40 cm × 40 cm × 65 cm méretű gyűj-



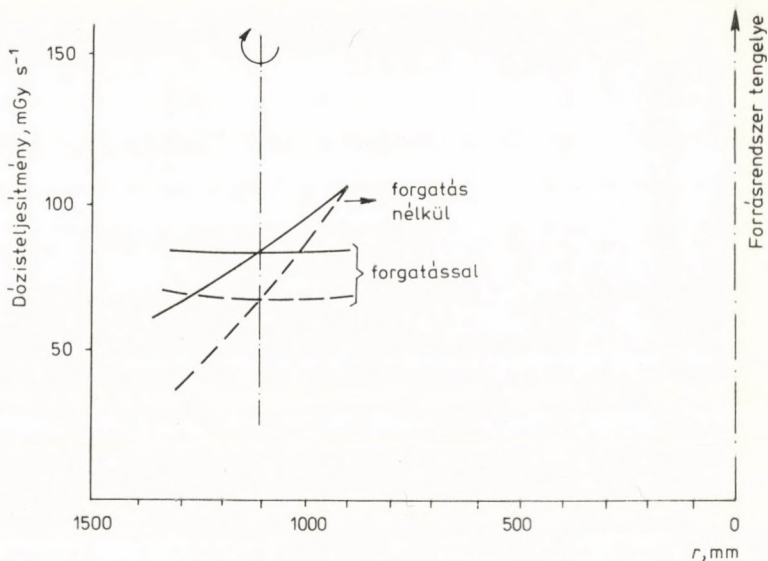
49. ábra. A dóziskompenzálás hatása a gyűjtődobozokban elnyelt dózisegyenlenségekre

I. levegőben mért dózisteljesítmény $r = x$ távolságban; II. a dóziseloszlás alakulása a termékdoboz függőleges helyesréje révén $t/2$ besugárzási időpontban; III. a dóziseloszlás alakulása a termékdoboz függőleges helyesréje révén t besugárzási időpontban; IV. a 200 kg m^{-3} látszólagos sűrűségű termék hatása a dóziseloszlásra



50. ábra. Térkompenzálás menete besugárzási blokkon ábrázolva

tődoboz félmagasságában (32,5 cm) mért dózisteljesítmény-viszonyokat mutatjuk be a forgatás során (vö. 49. ábrával). A folyamatos vonal a levegőre, míg az eredményvonal 300 kg m^{-3} átlagos sűrűségű (látszólagos sűrűségű) besugárzott árura ábrázolja a dózisteljesítmény-eloszlást. Az így végrehajtott besugárzás során a



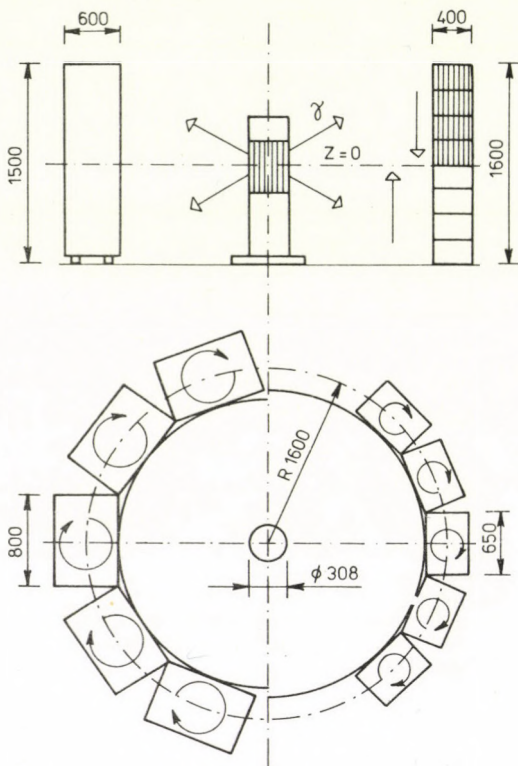
51. ábra. Félüzemi besugárzás során a vízszintes irányú dózishomogenitás kialakítása a dobozok forgatásával

————— levegőben mért dózisteljesítmény
 - - - - - 200 kg m^{-3} látszólagos sűrűségű termék hatása a dózisteljesítmény-, illetve a dóziseloszlásra

dózistér inhomogenitása mintegy $\pm 5\%$, a dózisegyenletességi hányados pedig 1,16.

Egyszerűsíti a módszert, és a dózishányadost nem rontja túlzottan, ha az egységdobozokat besugárzásuk során a sugárforrásoktól viszonylag távolabb, célszerűen egy 80—160 cm-es középponti kör mentén, tehát némileg egyenletesebb dózisteljesítményű térben helyezük el, és nem háromszor, csak egyszer változtatjuk meg a dobozok helyzetét [135]. Ebben az esetben a besugárzási idő felénél a sugárforrások vízszintes szimmetria síkja alatti, illetve feletti termékdobozok helyét függőlegesen megcseréljük, egyidejűleg 180° -kal elforgatva azokat.

A kereskedelembe és árumozgatásban használatos $80 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 130 \text{ cm}$ méretű kerek alumínium konténerben történő



52. ábra. A gyűjtőkonténerek, gyűjtőcsomagok elhelyezése egy panoráma besugárzóban

besugárzás során a konténert pl. 160 cm-re állítjuk a sugárforrás középpontjától, és csak egy 180°-os forgatást hajtunk végre félidőben, ezzel — ha nem is teljesen, de számos célra megfelelő mértékben — kompenzálva a sugárirányú dózisteljesítmény-inhomogenitást (52. ábra). A konténeres módszer nagyon alkalmas nagy mennyiségű pl. zsákolt vagy ömlesztett termék (élelmiszer) besugárzására, hiszen egyszerűsíti és gyorsítja az anyagmozgatást, egyszersmind segít az átmeneti tárolás problémáin is.

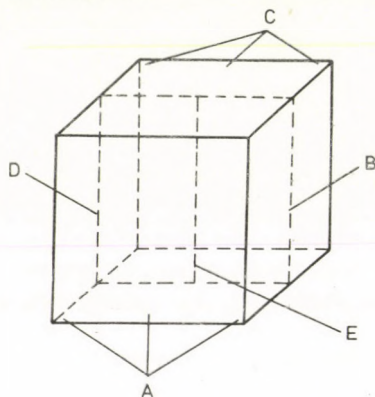
A folyamatos nagyüzemi és az ezzel analóg félüzemi besugárzás esetén az anyagot mindhárom dimenzióban mozgatjuk, és pedig a sugárforrás mindkét oldalán vízszintesen, függőlegesen, sőt a sugárforrás két oldala közötti helycserét is biztosítva [68, 69]. A 18. ábrán egy ilyen üzemi sugársterilizáló berendezés metszete látható: a helyiség közepén helyet foglaló sugárforrástartó keret (2 m × 1 m) két oldalán 3—3 sorban, 4 szinten helyezkednek el a gyűjtődobozok. A bemenő szállítoszalag az egységdobozokat a labirintuson keresztül a dobozemelő szerkezetig viszi, majd az emelő a dobozokat felemeli, és a függesztett keretekben a belépő nem steril és „félkész” dobozokat függőleges irányban szakaszosan felcseréli. Ennek a helynek a közelében történik a kész steril dobozok kiadása a labirintuson át a visszavezető szállítoszalagra. A függesztett kereteket a lapforrással párhuzamosan — oda és vissza — pneumatikus dugattyúk mozgatják. Dugattyúk továbbítják a kereteket a következő sorba is.

3.4 A dóziseloszlás ellenőrzése a besugárzott anyagban (áruban, dobozban)

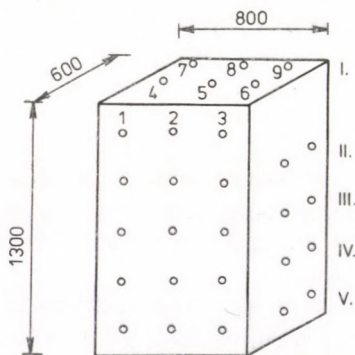
A besugárzásra kerülő egységdobozokba (konténerekbe) csomagolt termékek minden egyes fajtajánál próbadozimetriát kell végezni, mivel a feladattól függően figyelembe kell venni a minimális és a maximális dózis értékét, de elengedhetetlen ezek helyének ismerete is. A minimális dózist a besugárzandó (sterilizálandó) termék összetétele, előélete (szennyezettsége) és a sugárzás tulajdonságai (pl. LET-értéke), a maximálist pedig — a gazdasági szempontok mellett — elsősorban a termék kémiai sugárállósága és a sugárzás hatására keletkezett termékek toxicitása (pirogén bomlása) korlátozza. Mindkét adatot befolyásolják a sugárzás körülményei (pl. hőmérséklet, nedvességtartalom), valamint a rendszerben levő egyes anyagok (pl. oxigén, víz, sugárzásvédő vagy -érzékenyítő adalékok).

Az áruban, illetve az egységdobozokban elhelyezett termékek dózisének mérésére általunk használt módszer szerint [136] — annak érdekében, hogy egyrészt el lehessen kerülni a kezelendő

termék túlzott mértékű besugárzását, másrészt a besugárzandó rendszerrel közel azonos sűrűségű fantomanyag használatát — a próbadozimetriát magával a besugárzandó anyaggal, de az üzemszerű alkalmazandó dózist csak 1/100-ad vagy 1/10-ed részével végezzük. Így az üzemmenetet megelőzően kellő számú termékdoboz akár 5—10-szer is „áthajtható” a berendezésen anélkül, hogy a próbadozimetriához használt termék túl nagy dózist kapna. Ha a fantomanyagok használata elkerülhetetlen, az egységdobozba foszlatott papírt, fűrészport vagy műanyag-granulátumot, illetve keverékeket célszerű elhelyezni.



53. ábra. Egységdoboz próbadozimetriájának segédvázlata (lásd 5. táblázat)



54. ábra. Hagymabesugárzó konténer próbadozimetriájának segédvázlata (lásd 6. táblázat)

5. táblázat. Fricke-féle dozimetriával végzett próbadozimétria adatai (lásd 53. ábra)

	A			B	C			D	E
<i>D</i>	141,5	151	144	132	141,5	150	139,5	110	143,2
<i>D_h</i>	(10,9)	(11,6)	(10,11)	(10,2)	(10,9)	(11,6)	(10,8)	(10,0)	(11,0)
<i>S</i>	-0,632	+6,03	+1,14	-7,3	-0,632	+5,43	-2,04	-9,7	+0,56
<i>D</i>	139,5	144	150	132	148	156,5	138,2	129,5	146,1
<i>D_h</i>	(10,8)	(11,1)	(11,6)	(10,2)	(11,4)	(12,1)	(10,7)	(10,0)	(11,3)
<i>S</i>	-2,04	+1,12	+5,43	-7,3	+3,8	+9,9	-2,95	-9,05	+2,6
<i>D</i>	141,5	146	140	140	140,5	146,1	140,3	131,4	149
<i>D_h</i>	(10,9)	(11,6)	(11,3)	(10,8)	(10,8)	(11,2)	(11,0)	(10,1)	(11,5)
<i>S</i>	-0,632	+5,43	+2,52	-1,68	-1,33	+2,6	+0,42	-7,7	+4,63

D dózis, Gy; *D_h* helyi dózishányados (maximális dózis/helyi dózis); *S* standard deviáció, %

6. táblázat. A dózis (*D*) eloszlása hagymát tartalmazó gyűjtőkonténerekben (lásd 54. ábra)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I.	75,3	86,1	76,4	54,7**	63,9	57,0**	71,9	86,1	68,1
II.	79,2	91,7	77,8	68,9	69,6	66,7	83,0	80,9	91,7
III.	106,0*	108,4*	107,0*	92,0	75,0	97,3	98,1*	104,2	107,0*
IV.	81,0	91,7	82,0	71,5	69,5	93,1	82,7	90,3	88,9
V.	79,0	86,1	77,8	57,2**	55,6	61,0**	68,9	77,8	66,9

dózisátlag: 80,6 Gy;
dózishányados: 1,82;

dózismaximum: 105,1 Gy;
dózisminimum: 57,4 Gy;

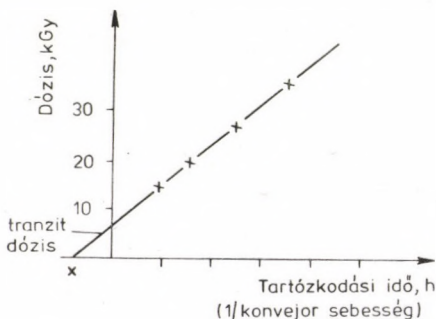
* dózismaximumhely;

** dózisminimumhely

Ezekhez a rutindozimetriai mérésekhez jellegüknél fogva igen jól alkalmazhatók kémiai doziméterek (2.2 alfejezet). Ha az árumozgatás sebességét növelni, vagy a besugárzás időtartamát, illetve a dózisteljesítményt kellő és ismert mértékben arányosan csökkenteni tudjuk, a mérésekhez a Fricke-féle módszer használata a legcélszerűbb (2.2.1 szakasz). Ha azonban — és ez a gyakoribb — a Fricke-doziméter viszonylag kis (max. 400 Gy) méréshatára miatt ez nem lehetséges, akkor pl. a PMMA (Perspex, 2.2.6 szakasz) vagy az oszcillometriás klór-benzolos (2.2.4 szakasz), esetleg a cérium-szulfátos (2.2.3 szakasz) dozimetria használata ajánlható.

Az 5. táblázat és az 53. ábra próbadozimetriai mérési sorozatot mutat be [137]. A 40 cm × 40 cm × 40 cm méretű egységdobozokra kb. 12—14 cm-es rétegenként 9—9 ampullát helyezünk el, és pedig úgy, hogy az ampullák a doboz csúcsaira és éleinek közepére, valamint a doboz középtengelyébe kerüljenek. Ezt a részletes mérést elegendő termékfajtánként 3—3 doboznál elvégezni.

Egy hagymabesugárzó konténerben adódó relatív dózisteljesítmény-eloszlást a 6. táblázat és az 54. ábra szemléltet.



55. ábra. Folyamatos nagyüzemi ^{60}Co γ -besugárzóberendezés tipikus kalibrációs görbéje

Az így mért dózisadatok átlagát — állandó dózisteljesítmény esetén — az idő függvényében ábrázolva lineáris összefüggés adódik (55. ábra). A berendezés kalibrációs egyenese nem mindig halad át a kezdőponton, mivel a „zéro” időnél a termék — pl. szakaszos

üzemben a sugárforrás felfelé és lefelé sugárzása miatt — bizonyos dózissal már be van sugározva („tranzit dózis”) [138]. A próbadozimetriával kapott adatok, illetve a kalibrációs összefüggés ismeretében a besugárzási idő pontosan számítható, és a garantált minimális dózis már az első besugárzáskor is biztosítható [102].

3.5 Dózisellenőrzés félüzemi besugárzáskor

Minden egyes besugárzás esetén egyértelműen igazolni kell azt a tényt, hogy a gyűjtődobozba csomagolt termék minden része megkapta az előírt dózist. Ezért rendkívül fontos az üzemenet során a dózisteljesítmény folyamatos regisztrálása (3.2 alfejezet, illetve 44. ábra), valamint a besugárzott áru által elnyelt dózissnak — a besugárzási technológiától függő gyakoriságú — ellenőrzése [90, 102].

Szakaszos sugárkezelés esetén minden egyes gyűjtődoboznak a próbadozimetria szerint minimális és maximális dózissú helyére 1 vagy 2 dózismérőt kell elhelyezni, és a besugárzás után azt értékelni. Döntő szempont, hogy félüzemi, szakaszos anyagmozgatással végzett besugárzásnál a besugárzási dózis ellenőrzésének sokkal nagyobb a jelentősége, mivel a kézi anyagmozgatás a gyűjtődobozok véletlen felcserélésének veszélyét rejti magában (lásd a 2. fejezet bevezetését is) [133].

Ezzel a veszéllyel a kényszerpályás, folyamatos fél- vagy nagyüzemi besugárzás során nem kell számolni. Ez utóbbi esetben ezért elegendő az illetékes hatóság által előírt időszakonként (naponta néhány alkalommal), valamint szűrőpróbaszerűen (mind a minimális, mind a maximális dózissnak megfelelő helyen) a besugárzás mértékét ellenőrizni.

4. Sugárvédelmi, biztonsági és gazdasági kérdések

A sugártechnológiák — akárcsak az ipar legtöbb technológiája — potenciális veszélyt jelentenek nemcsak a közvetlenül velük foglalkozókra, hanem a szélesebb környezetben élő lakosságra is. A veszély csökkentése, illetve kiküszöbölése technikai és adminisztratív intézkedéseket igényel, melyek gyakran költségesek, és így nem egyszer döntőek az eljárás gazdaságossága szempontjából.

A besugárzástechnikai berendezéseknek sugárvédelmi szempontból meg kell felelniök az összes biztonsági előírásoknak, amelyek — általában nemzetközi szervezetek (International Atomic Energy Agency, IAEA; International Commission on Radiation Units and Measurement, ICRP; International Labour Office, ILO; International Standardisation Organization, ISO; World Health Organization, WHO) ajánlásai alapján — az egyes országokban érvényben vannak. Ugyancsak legtöbbször jogszabályokkal rendezik a besugárzó berendezések építését, üzembehelyezését, a sugárforrások szállítását, szerelését stb. is.

4.1 Védekezés külső sugárzás ellen

A PBq nagyságrendű aktivitású ^{60}Co -besugárzóberendezések belső terében és annak esetleges nyitott közvetlen környezetében (a labirintusban) akkora lehet a sugárveszély, hogy a körülmények szerencsétlen találkozása esetén rövid idő alatt halált okozó károsodást okozhat az emberi szervezetben. Ezért meg kell

akadályozni egyrészt (megfelelően vastag falakkal) a sugárzásnak a besugárzótérből történő kijutását, másrészt az illetéktelen személyeknek a besugárzótérbe történő belépését.

A sugárvédelem eszközeinek és technológiájának feladata a személyi munkavédelmen kívül a szerkezeti anyagok és a technológiai berendezések védelme, üzembiztonságuk megteremtése. Ennek legfontosabb összetevője olyan vastag sugárelnyelő falazat, illetve vért építése, mely biztosítja, hogy a falon belül levő igen nagy aktivitások ellenére a falon kívül a dózisteljesítmény kicsi legyen.

A γ -sugárzás az anyagon áthaladva fotoelektromos, Compton- és párkeltő effektus során, ideális esetben közelítőleg az

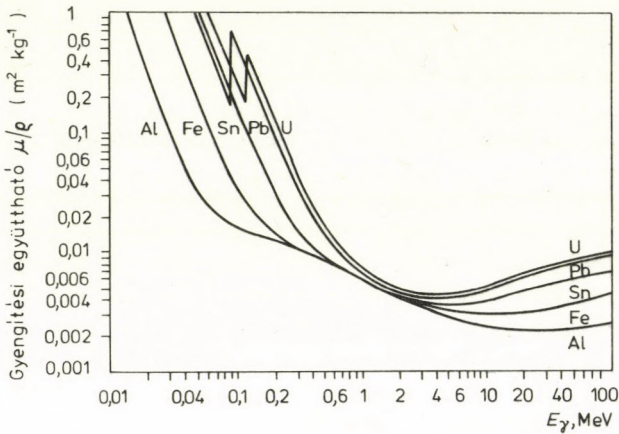
$$I_1 = I_0 \exp(-\mu d) \quad (32)$$

képletnek megfelelően veszt intenzitásából, ahol I_1 , illetve I_0 a sugárzás ki-, illetve belépő dózisteljesítménye, Gy s^{-1} ; μ a lineáris abszorpciós együttható, m^{-1} ; d az abszorbens vastagsága, m.

A számítások, illetve az adatok táblázatos és grafikus rögzítésének egyszerűsítése érdekében vezették be a $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ mértékegységű μ_m tömegabszorpciós együtthatót, amelyet úgy kapunk, hogy a μ lineáris abszorpciós együtthatót a kg m^{-3} mértékegységű sűrűséggel osztjuk. Ez a számérték, ha nem is független az árnyékoló anyagtól, de anyagonként csak sokkal kisebb mértékben tér el (7. táblázat). A táblázat a becsléseket könnyítő felezési rétegvastagságokat is közli [139].

7. táblázat. Sugárvédelemre használatos szerkezeti anyagok 1,25 MeV esetén

Anyag	Lineáris abszorpciós együttható, μ, m^{-1}	Sűrűség, kg m^{-3}	Tömegabszorpciós együttható, $\mu_m, \text{m}^2 \text{kg}^{-1}$	Első felezési rétegvastagság, cm	
				lineáris abszorpciós együtthatóval számolva	a „build-up” tényezővel számolva
Víz	6,3	1 000	0,0063	11,0	26,5
Beton	13,4	2 350	0,0057	5,17	13,5
Ólom	65	11 400	0,0057	1,1	1,55
Volfrám	105	19 000	0,0055	0,66	1,2
Urán	118	19 000	0,0062	0,55	0,9



56. ábra. Tömegabszorpciós együtthatók energiafüggése

A 56. ábra szerint a sugárzás kvantumenergiája jelentősen befolyásolja a védelem igényét.

Az abszorpcióval egyidejűleg azonban szóródás is bekövetkezik, amelynek során részint módosul a sugárzás iránya és (akárcsak az abszorpció révén) csökken a kvantumok energiája, változik az energiaspektruma is. Mindezek a változások együtt általában növelik a védelemmel szemben támasztott igényeket. Mivel a hatások együttese számíttással nem követhető, kialakult egy egyszerűsített fogalom, az ún. felhalmozási vagy build-up szorzótényező (B), amelynek számértéke a sugárzás energiáján kívül a védelemre felhasznált anyagtól, annak alakjától, illetve méretétől is függ [140], és amelyet az

$$I_2 = BI_1 \quad (33)$$

összefüggés alapján vesszünk figyelembe, ahol I_2 a build-up révén növelt dózisteljesítmény, az I_1 értékkel azonos mértékegységben. A ^{60}Co γ -sugárzása esetén a B faktor 5 cm vastag ólomban 3, míg 30 cm vastag betonban 7,5 körüli érték.

A sugárvédelem anyagának megválasztása nemcsak műszaki, hanem gazdasági feladat is. Mobilis berendezéseknél (pl. szállítókonténereknél, 4.4 alfejezet) döntő a minél kisebb tömeg a szállítás olcsóbbá tétele érdekében: ezért erre a célra általában különösen nagy sűrűségű anyagokat, régebben ólmot, ma pedig volfrámot vagy ún. szegényített uránt szoktak használni. Ez utóbbi a természetes uránban kb. 0,7%-ban jelenlevő, maghasadásra képes ^{235}U döntő többségének kivonása után visszamaradó, lényegében ^{238}U . A volfrámnak vagy a szegényített uránnak ólom helyett történő alkalmazása pl. 500 TBq aktivitású ^{60}Co szállítása esetén a szállítókonténernek kb. 1,8 t tömegről kb. 0,8 t, illetve 0,54 t tömegré történő könnyítését teszi lehetővé, ami 55—70% különbségnek felel meg!

Mivel azonban a nagyobb sűrűségű anyagok általában drágábbak (pl. a volfrám és a szegényített urán sugárvédelem már porkohászati eljárásokat tesz szükségessé), a stabilis berendezéseknél olcsóbb, bár nagyobb méretű (helyszűke esetén esetleg barittal vagy vassöréttel nehezített) betonvédelmet gazdaságos és célszerű alkalmazni.

A szükséges védelem vastagságánál tehát a feladat ismerete alapján először a sugárzás árnyékolására szolgáló anyagot kell megválasztanunk, majd a sugárforrás ismeretében a (32) képlet szerint kell a vastagságot kiszámítanunk, a (33) összefüggés alapján korrigálva azt a build-up faktorról. Sok esetben jelentős költségmegtakarításra vezethet előregyártott elemek (pl. ólomtéglák, betontéglák) alkalmazása, mivel ezekből viszonylag gyorsan átalakítható sugárvédelmi alakzatok formálhatók ki. A beruházási terhek csökkentésére célszerű a besugárzóberendezést bizonyos mélységig a talajszint alá építeni, és kihasználni a terepi adottságokat is (pl. a domboldalhoz telepíteni a besugárzókamrát, és ezáltal egy vagy két irányban megtakarítani a beton stb. sugárvédelem egy részét).

A besugárzóberendezésen kívül megengedhető maximális dózisteljesítményt a nemzetközi ajánlásokra (ICRP, IAEA, ISO stb.) alapozott nemzeti előírások határozzák meg: jelenleg a sugárvéde-

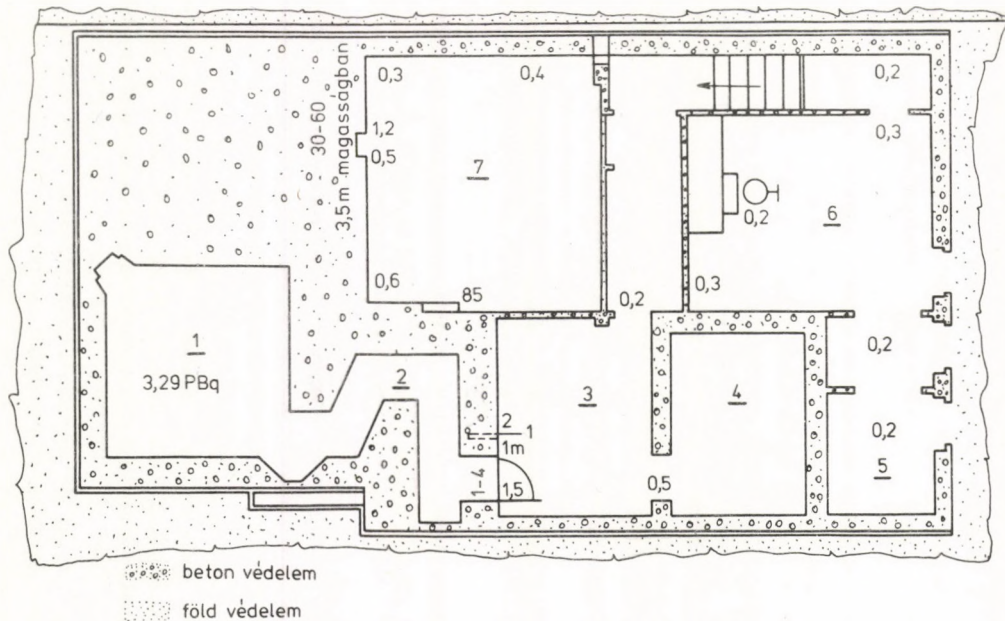
lem külső falánál megengedett maximális dózisteljesítmény $7 \text{ pC kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (300 pGy s^{-1}).

Külön gondot jelent a bejárat és a nyílászáró szerkezetek megfelelő tervezése. Erre a célra vagy a fallal azonos védelmi értékű acél stb. ajtó elhelyezése szükséges (a fal síkjával egyező kialakításban), vagy ún. labirintust építenek, amelyben (pl. 14. ábra) a sugárzás többszörös irányváltozást szenved, miáltal mind kvantumenergiája, mind pedig dózisteljesítménye csökken. Megfelelő alakú és méretű labirintus esetén a kijárat ajtónál már nem is szükséges sugárvédelem, tehát egyszerű fa vagy — tűzvédelmi okokból — vékony fémlemezajtóval is megakadályozható az illetéktelen személyeknek a besugárzóterbe történő bejutása. Különös gonddal kell eljárni a gyakran előforduló és a mind a kiszolgálás ergonómiáját, mind a beruházás gazdaságosságát veszélyeztető túltervezésekkel szemben.

A sugárvédelem megfelelő minőségét a létesítmény elkészülte után gondos mérésekkel minden irányban ellenőrizni kell (57. ábra). Erre a célra sok esetben az eredetihez képest 1—2 nagyságrenddel kisebb aktivitású ^{60}Co γ -sugárforrás használata is megfelelő, ha kellően érzékeny mérőberendezés áll rendelkezésre.

A besugárzóberendezéseket úgy kell építeni, hogy a radioaktív anyagok, amikor nincsenek besugárzó helyzetben (tehát a besugárzó-térben vagy azt körülvevő helyzetben), olyan tárolóban legyenek, melyből a sugárzás sem a besugárzóhelyiségben, sem más irányban nem haladja meg a megengedhető maximális dózisteljesítményt. Mivel a tárolóhelyzetben levő sugárforrás geometriailag közelebb van a besugárzóhelyiséghez, mint a besugárzó helyzetben levő sugárforrás a környezethez, többnyire hatékonyabb, tehát nagyobb sűrűségű árnyékoló anyagot igényel a besugárzóhelyiség falánál (legtöbbször vas- vagy baritbeton a normál beton helyett). A tárolóhelyiséget általában a besugárzóter alatt [60, 61], de néha felette vagy oldalirányban helyezik el [52].

A torpedókba, kazettákba helyezett sugárforrások mozgatása mechanikus, pneumatikus vagy elektromos úton, illetve ezek kombinációjával történik. Az 1.2.3 szakaszban tárgyalt több célú GBL besugárzóban pl. villamos árammal gerjesztett elektromágnesek rögzítik a kazettákat a mechanikus emelőszerkezethez, melynek



57. ábra. GBL-típusú, több célú besugárzó védelmének kialakítása (az aláhúzás nélküli számok a dózisteljesítményt adják meg $\mu\text{Gy h}^{-1}$ egységben, a sugárforrások besugárzó helyzetében)

1. besugárzóhelyiség; 2. labirintus; 3. előtér; 4. kis besugárzóhelyiség; 5. kapcsolótér; 6. vezérlő; 7. technológiai laboratórium

mozgatásával jutnak a sugárforrások tárolóhelyzetből besugárzó helyzetbe, és viszont.

Fontos az ún. szemafór elv alkalmazása is. Ennek lényege az, hogy üzemzavar esetén a berendezés önműködően a biztonságosabb állapotot állítja helyre, illetve tartja fenn, mint ahogyan a vasúti jelzők is tilosra állnak a biztonsági rendszer meghibásodásakor. Ez a sugártechnológiákban legtöbbször gravitációs alapon oldható meg: pl. a leggyakoribb üzemzavar, feszültségkimaradás esetén a sugárforrások a magasabban levő besugárzóhelyiségből az alatta levő tároló helyzetbe esnek (pl. a hivatkozott GBL esetén az elektromágnes feszültségkimaradáskor „elejti” a kazettát).

Nemcsak a laboratóriumi és félüzemi besugárzóknál, hanem pl. az izotóptemetőkben (4.4 alfejezet) is speciális sugárvédelmi célokat szolgálnak az ún. csöktutak, melyek a földben kb. 6 m mélyen beépített 40—100 mm átmérőjű korrózióálló acélcsövek, megfelelő betonvédelemmel. Besugárzóberendezésekben a csöktutat általában a helyiség közepébe építik. A csöktutaknak pl. földrengésveszélyes területen vagy polgári védelmi (katonai) szempontból nagy a jelentőségük, mivel rendkívüli helyzetben is biztosítják, hogy a sugárforrások tárolóhelyzetben ne veszélyeztessék a környezetet.

A sugárvédelmi árnyékolás jellegzetes megoldása az 1.1.1, 1.2.1 stb. szakaszban már említett vízvédlem, amelynek lényege, hogy kb. 4—5 m vastag vízréteg még 10—20 PBq aktivitású ^{60}Co γ -sugárforrás dózisteljesítményét is jelentősen a megengedhető maximális szint alá csökkenti, biztosítva egyszersmind azt az előnyt, hogy manipulálás közben a sugárforrást látjuk [35, 141]. A vízvédlem hátránya ugyanakkor, hogy a sugárforrás esetleges meghibásodása esetén a vízbe radioaktivitás juthat, amely nemcsak külső, hanem belső, tehát kedvezőtlen esetben a szervezetbe kerülő sugárzással (lásd 4.2 alfejezet) veszélyezteti a kezelőszemélyzet biztonságát. A korrózióveszély csökkentésére a víz elektromos vezetéseinek 10 kS m^{-3} értéknél kisebbnek kell lennie [142]. Vigyázni kell, hogy a vizesakna medencéjét földrengésbiztos kivitelben készítsék, nehogy annak megrepedése folytán a víz lefolyjon, és a sugárforrások a szabadba kerüljenek.

A besugárzóberendezések sugárvédelmét célszerű némileg túltervezni, hiszen az alig jár költségtöbblettel. 4 PBq aktivitású ^{60}Co

elhelyezésére mintegy 1,7 m betonvédelemre van szükség, melynek vastagságát azonban egy nagyságrenddel nagyobb aktivitáshoz is mindössze 15 cm-rel kell nagyobbítani. Az 1,7 m vastag betonnal azonos sugárvédelmet ad 3,5 m vastag vízvédelem, míg 40 PBq ^{60}Co -hoz mindössze 30 cm-rel vastagabb víréteg szükséges (a gyakorlatban amúgyis 1—2 méterrel a számítottnál mélyebb medencét építenek).

A jelenleg érvényes előírások szerint a kemény γ -sugarak esetére a külső felületen maximálisan megengedhető dózisteljesítmény 500 nGy s^{-1} .

4.2 Védekezés belső sugárzás ellen

A külső sugárveszélyekkel szemben a belső sugárzás során csak kBq nagyságrendű radioaktív anyag veszélyével kell számolni, de abban a formában, hogy az beépülhet az emberi szervezetbe, és lassan, de folyamatosan romboló hatást fejt ki. Fokozza a nehézségeket, hogy a rendeltetésellenesen a környezetbe került aktív anyagot a dolgozók testükön és ruházatukon magukkal is vihetik, tovább szennyezve a környezetüket (lakásukat, a közhasználatú járműveket stb.) is. Ezért a tárgyak rendszeres dörzsvizsgálatát és az egyes technológiai berendezések, pl. a szűrők időszakos aktivitásellenőrzését is elő kell írni.

Különös gondot kell fordítani a vizes berendezésekre, amelyekben — fokozott korróziójuk miatt — a radioaktivitás szabaddá válásának veszélye sokszorta nagyobb, mint a száraz rendszerekben. Az utóbbi évtized technikai fejlődésének eredményeként ma már általában a tökéletest megközelítően zárt sugárforrások készülnek (vö. 1.1.1 szakasz), melyeknél a kettős tokozás miatt rendkívül kicsi a tömítetlenség veszélye, ami nem jelenti azt, hogy ilyenre nem kell számítani, annál is inkább, mert néhány régen előállított, részben alumíniumtokozású sugárforrás is használatban van még.

Ezért a vizes rendszerekben a sugárvédelemre és a források hűtésére szolgáló vizet célszerű folyamatosan ioncserélő műgyantán keresztül vezetni, hogy az esetleg felszabadult radioaktivitás abban megkötődjék. E módszer lehetőséget ad:

— egyrészt a szennyeződés gyorsabb észlelésére, hiszen míg a vízoldatban még a 10^{-6} koncentrációnál több nagyságrenddel kisebb szennyezés egyáltalán nem, vagy nem kellő biztonsággal, és így esetleg csak túl későn észlelhető, az ioncserélő gyanta fajlagos aktivitása gyorsan eléri az észlelhetőségi szintet;

— másrészt biztosítja a víz folyamatos tisztántartását, ami jelentősen csökkenti a korrózióveszélyt.

A vizes rendszerű sugárforrás-tárolóknak általában nincs kifolyójuk, hogy ezáltal a víz véletlen lefolyásának lehetőségét eleve kizárjuk, egyrészt elkerülve a sugárforrások védelmének megszűnését (szabadba kerülésüket), másrészt megóvva a csatorna-rendszert az esetleges elszennyeződéstől. A medence vízének a javítások stb. alkalmából történő cseréjekor csak többszörös és szigorú ellenőrzés után szabad az ivóvízben megengedettnél nem nagyobb koncentrációjú és az előírások szerint korlátozott mennyiségű radioaktív anyagot a csatornába engedni [143].

4.3 Munkavédelem és biztonságtechnika

Bár besugárzórendszerekben a sugárvédelem műszaki szempontjai az alapvetően fontosak, de ezekhez más műszaki és adminisztratív biztonsági tennivalók is járulnak.

Megfelelő képzéssel és vizsgáztatással biztosítani kell, hogy a berendezés működtetését csak hozzáértő személy végezhesse. Gyakorlati takarékosági szempontból célszerű az operátori és a segédoperátori szint különválasztása; míg az előző csak felsőfokú végzettséggel rendelkező személy lehet, az utóbbinál a középfokú végzettség is elegendő. A szakmai hozzáértés mellett bizonyos pszichológiai tulajdonságok (pl. fokozott felelősségérzet) is megkövetelendők.

A besugárzó létesítmény egészének, ezen belül pedig a besugárzóhelyiségnek és a kapcsolóhelyiségnek külön-külön is jól zárhatónak kell lennie. Minden olyan esetben, amikor azt a kezelőszemélyzet elhagyja, a bezárásról gondoskodnia kell. Ezzel — a vagyonsvédelem biztosításán túlmenően — elkerülhető, hogy a berendezésben vagy

azzal illetéktelen vagy nem kellő tudással rendelkező személy bajt okozzon. Célszerű, ha a berendezés üzemeltetését legalább két, szakértelemmel rendelkező személy (operátor és segédoperátor) egyidejű jelenlétéhez kötjük.

Minden besugárzóhelyiségnek csak egyetlen bejárati ajtaja lehet. Ha az árumozgatás folyamatos (1.2.4 és 1.2.5 szakasz), akkor a folyamatos szállítórendszerhez szükséges nyílásokat lehetőleg a helyiség teteje közelébe kell építeni, egyidejűleg elérve, hogy illetéktelenek ne lépjenek be a besugárzókamrába, és a kamrán kívül a kezelőszemélyzet ne kapjon a megengedhetőnél nagyobb sugárzást.

Alkalmas reteszeléssel meg kell akadályozni, hogy figyelmetlenségből valaki a helyiségbe jusson. A reteszelőrendszer alapulhat olyan sugárzásmérő műszeren, melynek detektora a besugárzóhelyiségben vagy a labirintusban van, és/vagy olyan végállásjelzőkön, melyek a források tároló helyzetét jelzik. Leghelyesebb, ha a reteszelés mindkét rendszerre érzékeny. A reteszelőrendszertől függetlenül a besugárzóhelyiségbe mindig először az operátornak kell belépnie, külön telepés kézi dózisteljesítmény-mérő műszerrel, mely lehetőleg nemcsak mutatóval, hanem hangjelzéssel is tájékoztat a dózisteljesítményről.

Nemcsak a kezelőszemélyzetnek kell minden esetben megfelelő személyi dozimétert viselnie a besugárzóhelyiségbe történő belépéskor, hanem a látogatók azonos dózismérővel történő felszereléséről is gondoskodni kell. Ha ez nem oldható meg, akkor kényszerintézkedésként minden esetben legalább két olyan kezelőszemélynek kell a látogatókat kísérnie, akik viselnek egyéni dózismérőt, és helyzetük a sugárforráshoz képest egyezik a látogatókéval.

Biztosítani kell, hogy a biztonsági berendezések, illetve ajtajaik mindig biztonsági kulccsal bezárt állapotban legyenek, nehogy a biztonsági berendezéseket valaki figyelmetlenségből kiiktassa. Célszerű az ún. slusszkulcsos rendszer alkalmazása is: a besugárzóhelyiségnek az ajtótól legtávolabbi sarka közelében egy olyan, biztonsági kulccsal állítható kapcsolót kell elhelyezni, amelynek bekapcsolásától számított viszonylag rövid időn (kb. 30 s-on) belül csak ugyanazzal a kulccsal lehet a kezelőasztalt feszültség alá helyezni. Így el lehet érni, hogy az operátor szinte kényszerüljön a

besugárzóberendezés egészének áttekintésére mielőtt azt bekapcsolja, hogy a figyelmetlenségből adódó veszély valószínűsége minimálisra csökkenjen.

A besugárzás során, főleg PBq aktivitás felett, valamint elektrongyorsítók alkalmazásakor jelentős mennyiségű, a kezelőszemélyzet egészségét veszélyeztető és a szerkezeti anyagokat korrodáló ózon és nitrózus gáz képződik, melyek gyors eltávolításáról gondoskodnunk kell. Ezért legalább $15\text{--}30\text{ h}^{-1}$ hatékonyságú szellőzést kell biztosítani, és emellett elő kell írni azt a legrövidebb időtartamot (általában néhány percet) is, melynek eltelte előtt a besugárzást követően nem szabad a besugárzóhelyiségbe belépni.

Vízvédelem esetén a sugárzás hatására vízből robbanásveszélyes durranógáz keletkezik: ennek megfelelő ellenőrzéséről is gondoskodni kell.

Minthogy a besugárzóberendezésben félüzemi besugárzáskor esetleg rendkívül nagy értékű áru lehet, de maga a besugárzóberendezés is nagy értéket és veszélyt képvisel, fokozott gondot kell fordítani a tűzvédelmi előírásokra. A lehetőséghez képest biztosítani kell a folyamatos megfigyelést és/vagy a tűz automatikus jelzését (pl. a füstképződés vagy a gyors hőmérséklet-növekedés érzékelése alapján) [142]. E mellett, ha ennek gazdasági feltételei megteremthetők, a szellőzést automatikusan le kell állítani, és pl. a széndioxidos tűzoltóberendezést be kell indítani. Ugyanakkor vigyázni kell arra, hogy maga a tűzoltás minél kisebb kárt tegyen a sugárkezelt áruban.

Általában szigorúan tilos radioaktív izotópokkal működő sugárforrásokkal robbanás- és tűzveszélyes anyagokat besugározni, mivel a besugárzóberendezés létfontosságú részeinek kis károsítása is azok végleges megsemmisítését vonhatja maga után (ilyen kísérleteket célszerűen elektrongyorsítóval kell végezni).

Mérgező, toxikus anyagok besugárzásakor eleve biztosítani kell, hogy a besugárzóberendezés tisztítását, tehát a rendellenesen felkenődött mérge eltávolítását egyszerűen meg lehessen oldani.

Természetesen érvényesíteni kell a besugárzóberendezéseknél is valamennyi más, szokásos érintésvédelmi és biztonsági előírást, intézkedést is, fokozott figyelmet fordítva egyes szerkezetek és

szerkezeti anyagok (pl. villamos szigetelés) esetleges sugárkárosodására.

Rendkívüli szakértelmet igényel a sugárforrások be-, ki- és átszerelése, ezért ezt kizárólag gyakorlott szakemberekkel szabad elvégeztetni. A legkisebb figyelmetlenség, akár pillanatok alatt is katasztrofális sugárkárosodáshoz vezethet.

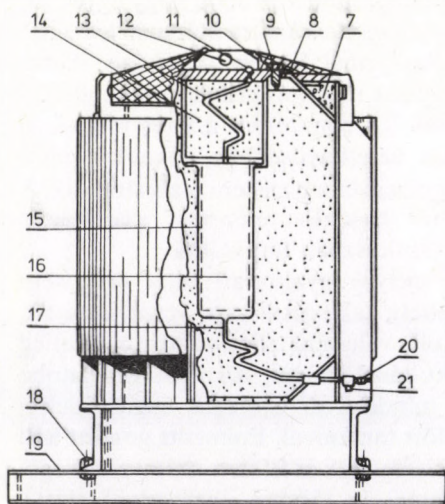
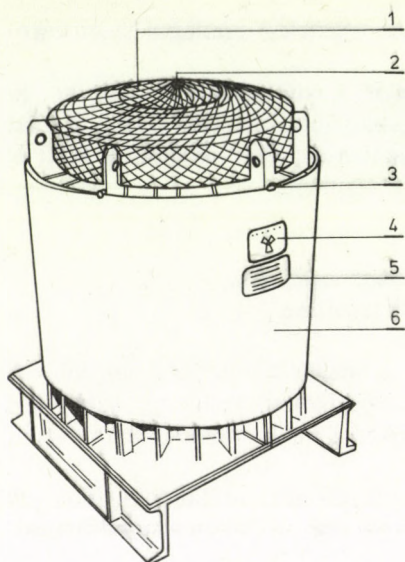
4.4 Sugárforrások szállítása, cseréje és temetése

A sugárforrások szállítása — a megfelelő hatósági engedélyek birtokában — a nemzetközi előírásokat kielégítő, szabályos sugárvédelemmel bíró zárt tárolókban, ún. konténerekben történik (pl. 58. és 59. ábra) [144, 145].

A felezési időtől függően, bizonyos idő, általában néhány év elteltével a besugárzóberendezésben vagy üzemben a sugárforrásokat ki kell egészíteni, esetleg ki kell cserélni.

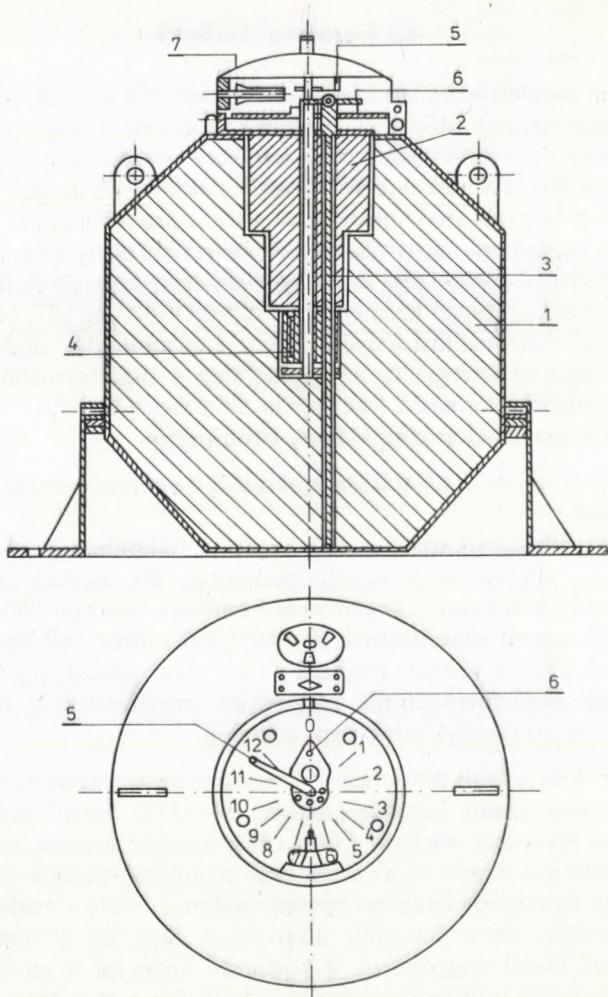
A felújítás alkalmával a kiszerelésnél fokozott gonddal kell eljárni a sugárforrás zártságának ellenőrzése, illetve az esetleges szennyezések észlelése érdekében. Sok esetben mód van arra, hogy egyes fél- vagy nagyüzemi besugárzóberendezések számára már nem kielégítő mértékben radioaktív (a kívánalomnál kisebb aktivitású, illetve fajlagos aktivitású) sugárforrásokat más (pl. kísérleti) berendezésben lehessen felhasználni. Ebből a szempontból a vizes rendszerű tárolóval működő berendezések az előnyösebbek, mivel különféle méretű, alakú sugárforrások egyidejű elhelyezésére is alkalmasak. A sugárforrások kiegészítésekor hasonló előzetes számítások szükségesek, mint azt az 1.3.1 szakaszban tárgyaltuk.

Az olyan sugárforrásokat, melyek gyakorlati célra már nem alkalmasak, megfelelően telepített, talajvíztől nem veszélyeztetett, kellően vízszigetelt és árnyékolt, valamint adminisztratív (esetleg fegyveres) védelemmel ellátott tárolóhelyre, ún. izotóptemetőbe [146, 147] kell szállítani, a mindenkori országos sugárvédelmi előírások messzemenő szem előtt tartásával. Fokozott gondot kell fordítani pl. a sugárforrások zártságának és felületi szennyezettségének ellenőrzésére a szállítókonténerbe történő elhelyezésük előtt.



58. ábra. Az AECL „B” típusú sugárforrás szállítókonténer (Kanada)

1. védőháló; 2. csavar; 3. köpenycsavar; 4. sugárvesélyjelző tábla; 5. adattábla; 6. tűzvédőköpeny; 7. térkitöltő; 8. tömités; 9. csavar; 10. plomba; 11. csőzáró dugó; 12. záródugó emelő furat; 13. labirintuscső; 14. záródugó; 15. cserélhető betét; 16. belső tér; 17. kifolyócső; 18. csavar; 19. eltávolítható szállítókeret; 20. nyomóvezeték csatlakozó; 21. záródugó



59. ábra. KI-840 típusú sovjet szállítókonténer

1. ólomkonténer; 2. záródugó; 3. töltő-ürítő cső biztosító dugóval; 4. forgódob; 5. vezérlőkar; 6. csatornaválasztó kar; 7. zárósapka

4.5 Gazdasági kérdések

Mint minden termelési feladat, a sugártechnikák életképességét is gazdaságosságuk dönti el, melynek alapvető összetevője a jó sugárhasznosítási hatások. Ez a hatások természetesen egyrészt a technológiától és a besugárzott árutól (alakjától, sűrűségétől, látszólagos sűrűségétől stb.), másrészt az adott célra felhasznált dózistól, tehát a sugárforrás aktivitásától, ezen keresztül pedig a beruházás (a sugárforrások beszerzése és a sugárvédelem) összegétől, illetve az ezekből is következő üzemeltetési költségektől függ [27, 148, 149].

A sugárhasznosítási tényezőt tehát a technológiai célra abszorbeált sugárzó energia és az egyidejűleg a sugárforrásból kilépő összes sugárzási energia hányadosa adja meg [33, 67].

Értelemszerűen analóg módon számítható

— az aktivitás és a hatások ismeretében a berendezés kapacitása, valamint

— a szükséges kapacitás és a hatások tudatában a sugárforrás névleges, illetve beszerzendő aktivitása. Ez esetben azonban figyelembe kell venni a sugárforrás bomlását, tehát pl. ^{60}Co -ból az előzőek szerint számítottnál 50—80%-kal többet kell beszerezni, hogy a felezési időnek megfelelő ~ 5 éves időszakban, tehát a várható sugárforráspótlás időpontját megelőzően a tervezett átlagos teljesítményt biztosítani lehessen.

A 10 PBq körüli aktivitású ^{60}Co -sugárforrást tartalmazó folyamatos nagyüzemi berendezésekben 34—37% körüli sugárhasznosítási hatások várható [149], míg kisebb tárgyak szakaszos sugárkezelése esetén ez az érték csak a sugárzó energia tört %-át teszi ki. Szakaszos félüzemi besugárzáskor 2—15% a reális sugárhasznosítás, de a hatások alapvetően függ az alkalmazandó dózistól: minél nagyobb ui. a közlendő dózis (pl. sugársterilizálás esetén), annál jobban megközelíti a hatások a nagyüzemi berendezéseket, míg a gyakori manipulációt, és így a besugárzás gyakori megszakítását igénylő (pl. burgonya vagy hagyma csírázásgátló) eljárásoknál csak 5—10% érhető el, még ha a viszonylag gyors munkát biztosító konténeres módszert alkalmazzuk is.

Összefoglalás

A sugártechnológiák ma már kiléptek a „titokzatos” módszerek közül, és hasonló kutatás-fejlesztési, számítási, tervezési és üzemeltetési feladatokat jelentenek, mint az ipar és az élelmiszer-gazdaság más technológiái. A különféle kísérleti, félüzemi, több célú, illetve mobilis γ -besugárzóberendezések, dozimetriai-ellenőrzési módszerek és biztonsági rendszabályok ismerete gyorsítja ezeknek az eljárásoknak a gyakorlati bevezetését.

Irodalom

1. Radiosterilization of Medical Products (Proc. IAEA Symp., Bombay, 1974). IAEA, Vienna, 1975.
2. Sterilization by Ionizing Radiation (Proc. Johnson and Johnson Int. Conf., Vienna, 1974). Ed.: GAUGHRAN, E. R. L.—GOUDIE, A. J. Multiscience, Montreal, 1974.
3. Sterilization by Ionizing Radiation (Proc. Johnson and Johnson Int. Conf., Vienna, 1977). Ed.: GAUGHRAN, E. R. L.—GOUDIE, A. J. Multiscience, Montreal, 1978.
4. Radiation Preservation of Food (Proc. IAEA and FAO Conf. Bombay, 1972). IAEA, Vienna, 1973.
5. Advances in Radiation Processing. Ed.: SILVERMAN, J. Radiat. Phys. Chem. **14** 1, 2 (1979).
6. CHAPIRO, A.: Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Vol. 11. J. Wiley and Sons, New York, 1969.
7. MOLNÁR I.: Radioaktivitás alkalmazása a textiliparban. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1967.
8. CHARLESBY, A.: Atomic Radiation and Polymers. Pergamon Press, Oxford—London—New York—Paris, 1960.
9. DOBÓ J.: Gyakorlati sugárkémia. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1967.
10. CZVIKOVSKY, T.: in Symp. Radiation Chemistry, Keszthely, 1976. Hungarian Academy of Sciences, Budapest, 1976, p. 551.
11. BOLT, R. O.—CAROLL, J. G.: Radiation Effects on Organic Materials. Academic Press, New York—London, 1963.
12. TAVCAR, A.: Affects of Low Doses of Radiation on Crop Plants. Technical Reports Series No. 64. IAEA, Vienna, 1966, p. 16.
13. SPARROW, A. H.: Rad. Res. **1** (1956) 562.
14. The Use of Induced Mutations in Plant Breeding (Proc. FAO/IAEA Meeting, Rome, 1964). IAEA, Vienna, 1964.
15. THAI-CONG-TUNG—NGUYEN-VAN-MÚNG—CHAU-VAN-NANH: Rice Breeding with Induced Mutations III. Technical Reports Series No. 131. IAEA, Vienna, 1970, p. 189.

16. FÖLDIÁK G. és munkatársai: Az izotópok ipari alkalmazása. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1972.
17. BUSHLAND, R. C.: in Proc. Conf. Large Radiation Sources in Industry, Vol. 2. IAEA, Vienna, 1960, p. 273.
18. VAS K.: Atomtechnikai Tájékoztató **13** (1970) 297.
19. Training Manual on Food Irradiation Technology and Techniques. Technical Reports Series No. 114. IAEA, Vienna, 1970.
20. Preservation of Fish by Irradiation (Proc. Panel, Vienna, 1969). IAEA, Vienna, 1970.
21. INCZE, K.—FARKAS, J.—ZUKÁL, E.: Acta Alimentaria (Budapest) **2** (1973) 173.
22. KISS, I.—FARKAS, J.—FERENCZI, S.—BECZNER, J.: Improvement of Food Quality by Irradiation. IAEA, Vienna, 1974.
23. SZTANYIK, L. B.: in [4], p. 6.
24. Ionising Radiation and the Sterilization of Medical Products. Taylor and Francis, London, 1964.
25. ARTANDI, V.—VAN WINKLE, JR. W.: in Proc. Conf. Large Radiation Sources in Industry, Vol. 2. IAEA, Vienna, 1960, p. 249.
26. HANGAI, G.: in [3], p. 247.
27. MORGENSTERN, K. H.: in [3], p. 371.
28. MUKKERJEE, R. N.—YUAN, H. C.: in [1], p. 415.
29. SUCKOW, W.: Isotopenpraxis **5** (1969) 361.
30. ROSS, C. P.: Isotopes and Radiation Technology **5** (1968) 185.
31. LEHOCZKY GY.—CSERÉP GY.—BOZÓKY L.: Magyar Onkológia **3** (1962) 129.
32. CSERÉP GY.—STENGER V.: Energia és Atomtechnika **16** (1963) 140.
33. AECL Gamma-Radiation Processing Seminar, Ottawa, Canada, 1975. AECL Commercial Products, Ottawa, Canada, 1975.
34. Engineering Compendium on Radiation Shielding, Vol. 3. Ed.: JAEGER, R. G.—BLIZARD, E. P.—CLINTON, A. B.—GROTHENHUIS, M.—HÖNIG, A.—JAEGER, TH. A.—EISENLOHR, H. H. Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—New York, 1970, p. 95.
35. WARLAND, H. M. F.: in [33], p. 1.
36. ISO Technical Report 4826 (1975) E.
37. Report of the International Commission on Radiation and Measurement Units (ICRU) No. 18. ICRU Publications, USA, Washington.
38. FLEMMING, M. R.: személyes közlés.
39. WARLAND, H. M. F.: in [33], p. 19.
40. HIRLING J.—STENGER V.: Energia és Atomtechnika **22** (1969) 446.
41. Осипов, В. Б. и др.: в Сборник докладов конференции по вопросам внедрения радиационных установок и радиационной технологии, Будапешт, 1972. Институт изотопов ВАН, Будапешт, 1973, стр. 1.
42. BALLANTINE, D. S.: in Radiation for a Clean Environment (Proc. Symp. Munich, 1975). IAEA, Vienna, 1975, p. 309.
43. WOOD, P. M.—HARREL, H. A.: Potential Market for By-Product Cesium from Commercial Power Reactors, AECOP 754, AEC Combined Operations Planning, Oak Ridge, 1971.
44. EYMERY, R.: in [4], p. 173.

45. LENGYEL T.—JÁSZ Á.: Izotóplaboratóriumi zsebkönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1966.
46. ERTEL, D.: in Design and Equipment for Hot Laboratories (Proc. Symp. Otaniemi, 1976). IAEA, Vienna, 1976, p. 159.
47. Radiation Sources (industrial, laboratory). The Radiochemical Centre, Amersham, 1977—1978, p. 49.
48. Catalogue of Radioactive Products. The Radiochemical Centre, Amersham, 1967.
49. Ionizing Radiation Sources. Technabexport, Moscow, No. 36M 171, 25.
50. Radiation Chemistry and Its Applications. Technical Reports Series No. 84. IAEA, Vienna, 1981.
51. SWALLOW, A. J.: Radiation Chemistry of Organic Compounds. Pergamon Press, London, 1960.
52. in [34], p. 74.
53. K. S. E./RI's Gammator M Series. Kewaunee Scientific Equipment Corporation, Wood Furniture Division, Stateville, North Carolina, U.S.A.
54. STENGER, V.: Final Report of the Expert on Irradiation Techniques at the University of Singapore, 1974.
55. USSR LMB and RKL irradiators. Isotopes and Radiation Technology 9 (1972) 321.
56. Pilot and Industrial Gamma Unit "Sterilizator". Technabexport, Moscow, No 36M 343.
57. RAFF, R. A. V.—SUBRAMANIAN, R. V.—SCHECTER, D. J.—ADAMS, M. F.: Isotopes and Radiation Technology 9 (1971) 94.
58. DOBÓ J.: Magyar Kémikusok Lapja 22 (1967) 293.
59. in [34], p. 89.
60. ШТЕНГЕР, В.: в Сборник докладов конференции по вопросам внедрения радиационных установок и радиационной технологии, Будапешт, 1972. Институт изотопов ВАН, Будапешт, 1973, стр. 49.
61. БРЕГЕР, А. Х. и др.: Поглощение энергии гамма-излучения в макросистемах. Доклады АН СССР 150, 4 (1963).
62. БРЕГЕР, А. Х.—ОСИПОВ, В. Б.—ГОЛЬДИН, А.: Атомная энергия 8 (1960) 5.
63. ARMBURST, R. F.: Izotóptechnika 17 (1974) 1.
64. BROWN, M. G.: in Radiosterilization of Medical Products and Recommended Code of Practice (Proc. Symp. Budapest, 1967 and of a Panel Meeting, Vienna, 1966). IAEA, Vienna, 1967, p. 381.
65. SZTANYIK L.: Izotóptechnika 15 (1972) 110.
66. JEFFERSON, S.—CRAWFORD, C.: in [64], p. 361.
67. DARÓCZINÉ MOLNÁR E.—HEGYESI S.—STENGER V.—SIPOS M.: Izotóptechnika 20 (1977) 423.
68. KRISHNAMURTY, K.—AGGARWAL, K. S.: in [1], p. 331.
69. EYMERY, R.: in [1], p. 289.
70. Industrial Applications of Radioisotopes and Radioactivation in Czechoslovakia, France, Soviet Union, and United Kingdom. Report of a Study Tour, 1966. IAEA, Vienna, 1967, p. 32.

71. ZAGLODIN, G. F.: The Economics of Potatoe Processing Enterprises with Radiation Treatment of Potatoes. Atomizdat, Moszkva, 1971, p. 62.
72. MURPHY, K. L.: Gamma Radiation as an Effective Disinfectant. Water and Pollution Control (1974).
73. КОНЬКОВ, Н. Г.—БУАЛАЕВА, С. П.—ОСИПОВ, В. Б.—ПАНИН, Ю. А.—СОЛОДИХИНА, Л. Д.—УПАДЬШИЕВ, Л. В.—КАРПУХИН, В. Ф.—РАЙНГОЛЬД, З. Л.: in Radiation for a Clean Environment (Proc. Symp. Munich, 1975). IAEA, Vienna, 1975, p. 419.
74. LESSEL, T.—MÖRSCH, H.—HENNING, E.—SUESS, A.—ROSOPULO, A.—SCHUMANN, G.: in Radiation for a Clean Environment (Proc. Symp. Munich, 1975). IAEA, Vienna, 1975, p. 447.
75. UMEDA, K.: in Proc. IAEA Panel, Vienna, 1974. IAEA, Vienna, 1974, p. 113.
76. GERRARD, M.: Isotopes and Radiation Technology 5 (1968) 303.
77. GERRARD, M.: Isotopes and Radiation Technology 5 (1967—1968) 145.
78. «КОЛОС» передвижной гамма-облучатель. Техснабэкспорт, Москва, No. 36М 354.
79. «ШТЕБЕЛЬ-3А» Гамма-установка. Техснабэкспорт, Москва.
80. MANOWITZ, B.—KUHLE, O. A.—GALANTER, L.—ARMEL, J.—BLACK, K. M.—KLAASSEN, W. J.—PIGNATA, F. J.—SLAWIN, J. W.: Shipboard Co-60 Radiopasteurizer for Marine Products. Study report, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, BNL 808 (T-311) 1963.
81. STENGER, V.—FÖLDIÁK, G.—HORVÁTH, ZS.—NASZÓDI, L.: in [1], p. 323.
82. FEJES, P.—HORVÁTH, ZS.—STENGER, V.: Isotopenpraxis 6 (1978) 98.
83. ХОРВАТ, Ж.—ШТЕНГЕР, В.—ФЕЛЬДИАК, Г.: Дозиметрия мощных гамма-облучательных установок, Институт изотопов, Будапешт, 1976.
84. FEJES P.: Atomtechnikai Tájékoztató 13 (1970) 336.
85. GOUSSEV, N. G.—KOVALEV, E. E.—ПОПОВ, V. I.: in Peaceful Uses of Atomic Energy, Vol. 21. (Proc. Second Geneva Conf. 1958). UN, Geneva — IAEA, Vienna, 1958, p. 122.
86. in [34], p. 368.
87. LAUGHLIN, J. S.—GENNA, S.: in Radiation Dosimetry. Vol. 2. Chapter 16. Ed.: ATTIX, F. H.—ROESCH, W. C. Adamic Press, New York 1966.
88. Manual on Radiation Dosimetry. Ed.: HOLM, N. W.—BERRY, R. J. Marcel Dekker, New York, 1970.
89. Proc. 3rd Int. Conf. Luminescence Dosimetry. Rep. No 249, Danish Atomic Energy Commission, Risø, 1971.
90. STENGER, V.: in [4], p. 329.
91. HART, E. J.—FRICKE, H.: in Chemical Dosimetry-Radiation Dosimetry Vol. 2., Chapter IV. Ed.: ATTIX, F. H.—ROECK, W. C. Academic Press, New York, 1967.
92. BJERGBAKKE, E.—SEHESTED, K.: Advances in Chemistry Series No 81. Radiation Chemistry 1. Amer. Chem. Soc., Washington, 1968, p. 579.
93. MATTHEWS, R. W.: Int. J. Appl. Radiat. Isotopes 23 (1972) 179.
94. RAZEM, D.—DVORNIK, I.: in Dosimetry in Agriculture, Industry, Biology and Medicine (Proc. Symp. Vienna, 1972). IAEA, Vienna, 1973, p. 405.

95. FÖLDIÁK, G.—HORVÁTH, Zs.—STENGER, V.: in *Dosimetry in Agriculture, Industry, Biology and Medicine* (Proc. Symp. Vienna, 1972). IAEA, Vienna, 1973, p. 367.
96. ORTON, C. G.—BERRY, R. J.: *Phys. Med. Biol.* **11** (1966) 475.
97. SALOVEY, R.: in *The Radiation Chemistry of Macromolecules*, Vol. 2. Chapter 3. Ed.: DOLE, M. Academic Press, New York, 1973.
98. DOBÓ J.—SOMOGYI A.: *Atomtechnikai Tájékoztató* **13** (1970) 338.
99. LEY, F. S.: in *Manual on Radiation Sterilization of Medical and Biological Materials*. IAEA, Vienna, 1973, p. 37.
100. GAZSÓ L.—IGALI S.—KOVÁCS A.: *Izotóptechnika* **19** (1976) 113.
101. *Manual of Food Irradiation Dosimetry*. Technical Reports Series No 178. IAEA, Vienna, 1977.
102. STENGER, V.: *Unified Control Methods in Dosimetry for High Activity Irradiation Facilities in Hungary*, Advisory Group Meeting on Standardization and High Dose Intercomparison for Industrial Radiation Processing. IAEA, Vienna, 1978.
103. GENNA, S.—JAEGER, R. G.—NAGL, J.—SANIELEVICI, A.: *Atomic Energy Review* **1** (1963) 239.
104. MILLER, G. H.—LOCKWOOD, G. J.—HALBLEIB, J. A.: *Improved Calorimetric Method for Energy Deposition Measurement*, *IEEE Transact. Nucl. Sci.* **NS-21** (1974) 359.
105. RADAK, B.—MARKOVIC, V.: in [88], p. 45.
106. *National and International Standardization of Radiation Dosimetry*, Vol. 2. (Proc. Symp. Atlanta, 1977) IAEA, Vienna, 1978.
107. KESZTHELYI L.: *Szintillációs számlálók*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964.
108. FOWLER, J. F.—ATTIX, F. H.: in *Radiation Dosimetry*. Vol. 2. Chapter 13. Ed.: ATTIX, F. H.—ROESCH, W. C.: Academic Press. New York, 1966.
109. BECKER, K.: *Solid-State Dosimetry*. Chem. Rev. Press, Cleveland, 1973.
110. McLAUGHLIN, W. L.: in [4], p. 219.
111. FRANK, H.—SEDA, J.—TROUSIL, J.: in *Advances in Biomedical Dosimetric* (Proc. Int. Symp. Vienna, 1975). IAEA, Vienna, 1975, p. 623.
112. OSVAY, M.—TÁRCZY, K.: *Phys. Stat. Sol.* **27** (1975) 285.
113. American Society for Testing Materials: *Standard Test Method for Absorbed Gamma Radiation Dose in the Fricke Dosimeter*, Designation D 1671-72 (1972).
114. SEHESTED, K.—BJERGBAKKE, E.—HOLM, N. W.—FRICKE, H.: in *Dosimetry in Agriculture, Industry, Biology and Medicine* (Proc. Symp. Vienna, 1972). IAEA, Vienna, 1973, p. 397.
115. HART, R. J.: *J. Amer. Chem. Soc.* **74** (1952) 4174.
116. DEWHURST, H. A.: *J. Chem. Phys.* **19** (1951) 1329.
117. American Society for Testing Materials: *Standard Test Method for Absorbed Gamma Radiation Dose with the Ceric Sulphate Dosimeter*, Designation D 3001-71 (Revised 1977).
118. BOYLE, J. W.—MAHLMAN, H. A.: *Radiat. Res.* **17** (1962) 416.
119. BARR, N. F.—SCHULER, R. N.: *J. Phys. Chem.* **63** (1959) 808.

120. SAID, F. I. A.—FÖLDIÁK, G.—WOJNÁROVITS, L.: *Radiochem. Radioanal. Letters* **32** (1978) 223.
121. HORVÁTH, ZS.—BÁNYAI, É.—FÖLDIÁK, G.: *Radiochim. Acta* **13** (1970) 150.
122. ATARI, N. A.—ETTINGER, K. V.: *Nature (London)* **247** (1974) 193.
123. ETTINGER, K. V.—MALLARD, J. R.—SRIRATH, S.—ТАКАВАР, А.: *Phys. Med. Biol.* **22** (1977) 481.
124. BARTLETT, D. T.—BROWN, J. K.: *Radiat. Effects* **41** (1979) 43.
125. АЛЕХИН, И. А.—БАБЕНКО, С. П.—КЕИРИМ—МАРКУС, И. В.—КРАЙТОВ, С. Н.—КУШНЕРЕВА, К. К.: Новые методы индивидуальной дозиметрии, (Градец Кралове, ЧССР, 1977). Чехословацкая комиссия по атомной энергии, Прага, 1977, стр. 368.
126. CHADWICK, K. H.: *Atompraxis* **15** (1969) 181.
127. BERRY, R. J.—MARSCHALL, C. R.: *Phys. Med. Biol.* **14** (1969) 585.
128. WHITTAKER, B.: in [88], p. 363.
129. McLAUGHLIN, W. L.: in [88], p. 377.
130. McLAUGHLIN, W. L.—MILLER, A.—FIDAN, S.—PEJTERSEN, K.—BATSBERG PEDERSEN, W.: *Radiat. Phys. Chem.* **10** (1977) 119.
131. ILIČ-POPOVIČ, J.: Rep. No. 141 Danish Atomic Energy Commission, Risø 1966.
132. OSVAY, M.—STENGER, V.—FÖLDIÁK, G.: in *Proc. Symp. Biomedical Dosimetry*. IAEA, Vienna, 1975, p. 623.
133. HORVÁTH, ZS.: in [4], p. 335.
134. ХРИСТОВА, М. Г.—ПАНДЕВ, И. Н.—ХРИСТОВ, Х. Д.—СТЕФАНОВ, С. Д.—ГЕНОВ, Д. Т.—СТОЕВА, Л. Й.: *Ядрена энергия* **6** (1978) 100.
135. STENGER V.—FÖLDIÁK G.: *Izotóptechnika* **19** (1976) 52.
136. HORVÁTH ZS.: *Izotóptechnika* **20** (1977) 433.
137. CSERÉP GY.—FEJES P.—FÖLDIÁK G.—GYÖRGY I.—HORVÁTH ZS.—JAKAB A.—STENGER V.: *Kémiai dozimetria. Tanfolyami laboratóriumi segédlet*. MTA Izotóp Intézete, Budapest, 1970.
138. in [101], p. 70.
139. SAUERMAN, P. F.: *Radiation Protection by Shielding*. Thieme, München, 1976.
140. in [34], p. 210.
141. BRYNJOLFSON, A.: in [4], p. 145.
142. *Instruction Manual Cobalt-60 Irradiator, Type IR-80, Ed. No 1, 1975*. AECL Commercial Products, Ottawa, Canada, 1975.
143. ICRP Publication 2, *Recommendation of the International Commission on Radiological Protection*. Pergamon Press, London, 1959.
144. *Transport Packaging for Radioactive Materials (Proc. Seminar, Vienna, 1976)*. IAEA, Vienna, 1976.
145. *Regulations for the Safe of Radioactive Materials (1973 Rev. ed.)*. IAEA Safety Standards, Safety Series No 6. IAEA, Vienna, 1973.
146. FEHÉR L.—KASZA J.—PATAKY I.: *Izotóptechnika* **21** (1978) 396.
147. *Management of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes (Proc. Symp. Aix-en-Provence, 1970)*. IAEA, Vienna, 1970.
148. *Manual on Radiation Sterilization of Medical and Biological Materials*. Technical Reports Series No. 149. IAEA, Vienna, 1973, p. 167.
149. BRYNJOLFSON, A.: *Factors Influencing the Economical Application of Food Irradiation*. IAEA-PL-433/2, IAEA, Vienna, 1973, p. 13.

Függelék: Mértékegységek átszámítása

Mértékegységek

Nyomás

SI-mértékegysége a pascal (kiejtése paszkal, jele: Pa), amellyel egyenletesen eloszló 1 newton erő 1 négyzetméter felületre merőlegesen hat:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N m}^{-2}.$$

Folyadékok és gázok nyomásának meghatározására megengedett mértékegység a bar (jele: bar) is:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa},$$

$$1 \text{ Pa} = 10^{-5} \text{ bar}.$$

Korábbi mértékegységek:
az atmoszféra (at):

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kp cm}^{-2} = 98\,065,5 \text{ Pa} = 0,9807 \text{ bar},$$

$$1 \text{ Pa} = 1,0197 \cdot 10^{-5} \text{ at},$$

$$1 \text{ bar} = 1,0197 \text{ at}.$$

és a torr (Torr):

$$1 \text{ Torr} = 133,322 \text{ Pa} = 0,001\,333 \text{ bar},$$

$$1 \text{ Pa} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Torr},$$

$$1 \text{ bar} = 750 \text{ Torr}.$$

Munka, energia, hőmennyiség

SI-mértékegysége a joule (kiejtése dzsul, jele: J), amely az a munka, melyet 1 newton erő saját hatásának irányába eső 1 méter úton végez:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N m}.$$

Az atom- és magfizikában megengedett mértékegység az elektronvolt (jele: eV), mely az a kinetikus energia, amelyet egy elektron nyer, ha vákuumban 1 volt potenciálkülönbségen halad át:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

Radioaktív sugárforrás aktivitása

Mértékegysége a becquerel (kiejtése: bekerel, jele: Bq), amely olyan radioaktív sugárforrás aktivitása, amelyben 1 másodperc idő alatt 1 bomlás következik be:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}.$$

Korábbi mértékegysége a curie (Ci):

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq,}$$

$$1 \text{ Bq} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ci.}$$

Besugárzási dózis

Mértékegysége a coulomb per kilogramm (jele: C/kg vagy C kg^{-1}), amely olyan állandó intenzitású ionizáló sugárzás besugárzási dózisa, amely 1 kilogramm tömegű levegőben összesen 1 coulomb töltésű, azonos előjelű iont hoz létre.

Korábbi mértékegysége a röntgen (R):

$$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C kg}^{-1},$$

$$1 \text{ C kg}^{-1} = 3,876 \cdot 10^3 \text{ R.}$$

Elyelt dózis

Mértékegysége a gray (kiejtése gréj, jele Gy), amelyet 1 kilogramm tömegű anyag elnyel, ha vele, állandó intenzitású ionizáló sugárzás útján, 1 joule energiát közlünk:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}.$$

Korábbi mértékegysége a rad (rd):

$$1 \text{ rd} = 10^{-2} \text{ Gy,}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rd,}$$

$$1 \text{ eV g}^{-1} = 1,602 \cdot 10^{-16} \text{ J kg}^{-1} = 1,602 \cdot 10^{-16} \text{ Gy} =$$

$$= 1,602 \cdot 10^{-14} \text{ rd},$$

$$1 \text{ Gy} = 6,242 \cdot 10^{15} \text{ eV g}^{-1},$$

$$1 \text{ rd} = 6,242 \cdot 10^{13} \text{ eV g}^{-1}.$$

Dózisteljesítmény (elnyelt dózisra vonatkoztatva)

Mértékegysége a watt per kilogramm (jele: W/kg vagy W kg^{-1}), melyet 1 gray elnyelt dózis 1 másodperc alatt létrehoz:

$$1 \text{ W kg}^{-1} = 1 \text{ Gy s}^{-1} = 3,6 \text{ kGy h}^{-1} = 100 \text{ rd s}^{-1} =$$

$$= 0,36 \text{ Mrd h}^{-1} = 6,24 \cdot 10^{15} \text{ eV g}^{-1} \text{ s}^{-1} =$$

$$= 2,246 \cdot 10^{21} \text{ eV g}^{-1} \text{ h}^{-1},$$

$$1 \text{ rd s}^{-1} = 10^{-2} \text{ W kg}^{-1},$$

$$1 \text{ rd h}^{-1} = 2,778 \cdot 10^{-6} \text{ W kg}^{-1},$$

$$1 \text{ eV g}^{-1} \text{ s}^{-1} = 1,602 \cdot 10^{-16} \text{ W kg}^{-1},$$

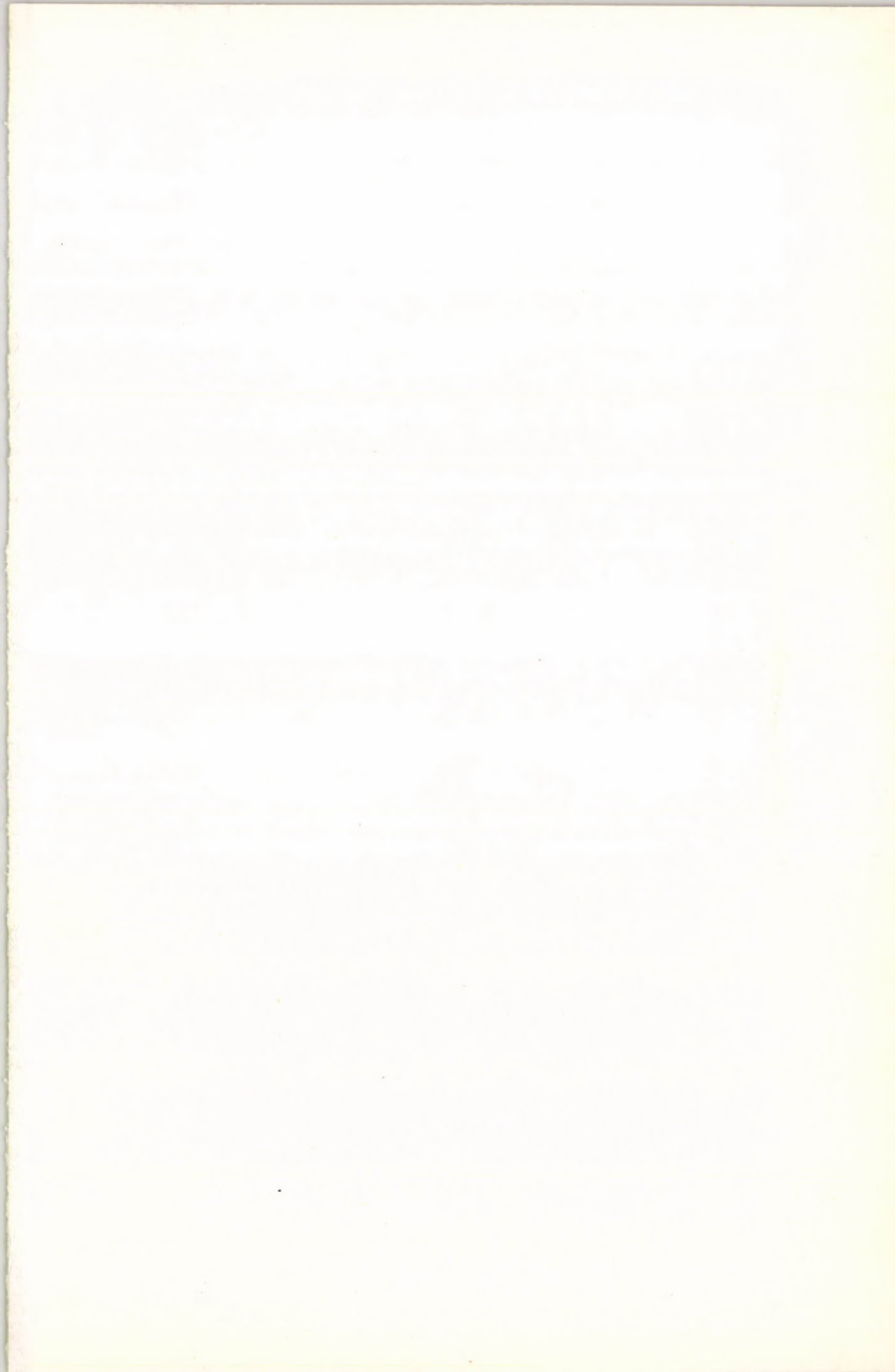
$$1 \text{ eV g}^{-1} \text{ h}^{-1} = 4,452 \cdot 10^{-22} \text{ W kg}^{-1},$$

A nagyságrendet meghatározó SI-prefixumok

A prefixum		Szorzó, mellyel a mértékegységet meg kell szorozni
megnevezése	jele	
exa	E	10^{18}
peta	P	10^{15}
tera	T	10^{12}
giga	G	10^9
mega	M	10^6
kilo	k	10^3
milli	m	10^{-3}
mikro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
piko	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
atto	a	10^{-18}

A kiadásért felelős az Akadémiai Kiadó igazgatója
Felelős szerkesztő: Sente László — Műszaki szerkesztő: Csákvári András
A borító és kötésterv Somlai Vilma munkája
Terjedelem: 6,4 (A/5) iv — AK J 348 k 8386
HU ISSN 0231—2700
83.10670 Akadémiai Nyomda, Budapest — Felelős vezető: Bernát György







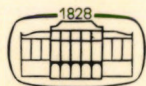
A sorozat előző kötete
**Az atomenergia- és magkutató-
újabb eredményei 1.**

Szerkeszti
Koltay Ede

**Gyorsítóberendezések
népgazdasági alkalmazásai**

A munkaközösség vezetője
Mahunka Imre

A különböző típusú elektron- és iongyorsítókat egyre nagyobb számban alkalmazzák gyakorlati feladatok megoldására. Ahhoz, hogy a gyorsítóberendezések a népgazdaság fejlődését elősegítsék, a termelők és kutatók szoros kapcsolatának kialakítása, az információcsere gyorsabbá tétele szükséges. E kötet a Debrecenben épülő ciklotronlaboratórium alkalmazási tematikájának előkészítésére összehívott műszaki-tudományos tanácskozás anyagát tartalmazza. Azokat a témákat fogja át, amelyek a gyorsítók felhasználásával a műszaki és tudományos kutatásban, az ipari, mezőgazdasági és orvosi gyakorlatban meghonosodtak. A tanulmányok anyaga a roncsolásmentes analitika, a szerkezeti elemek, műanyagok és biológiai minták sugárkezelése, valamint az izotópos nyomjelzés területén dolgozó szakemberek számára ad gyakorlati fontosságú ismereteket. Egyúttal áttekintést nyújt a felsorolt területek általános kérdései iránt érdeklődők számára is.



Akadémiai Kiadó · Budapest

Ára: 49,— Ft

ISBN 963 05 3098 8