

 **AZ ATOMENERGIA-
ÉS MAGKUTATÁS
ÚJABB EREDMÉNYEI**

**Gyorsítóberendezések
népgazdasági
alkalmazásai**

**A munkaközösség vezetője
MAHUNKA IMRE**



AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST

Az atomenergia- és magkutató- újabb eredményei 1.

Szerkeszti
Koltay Ede

Gyorsítóberendezések népgazdasági alkalmazásai

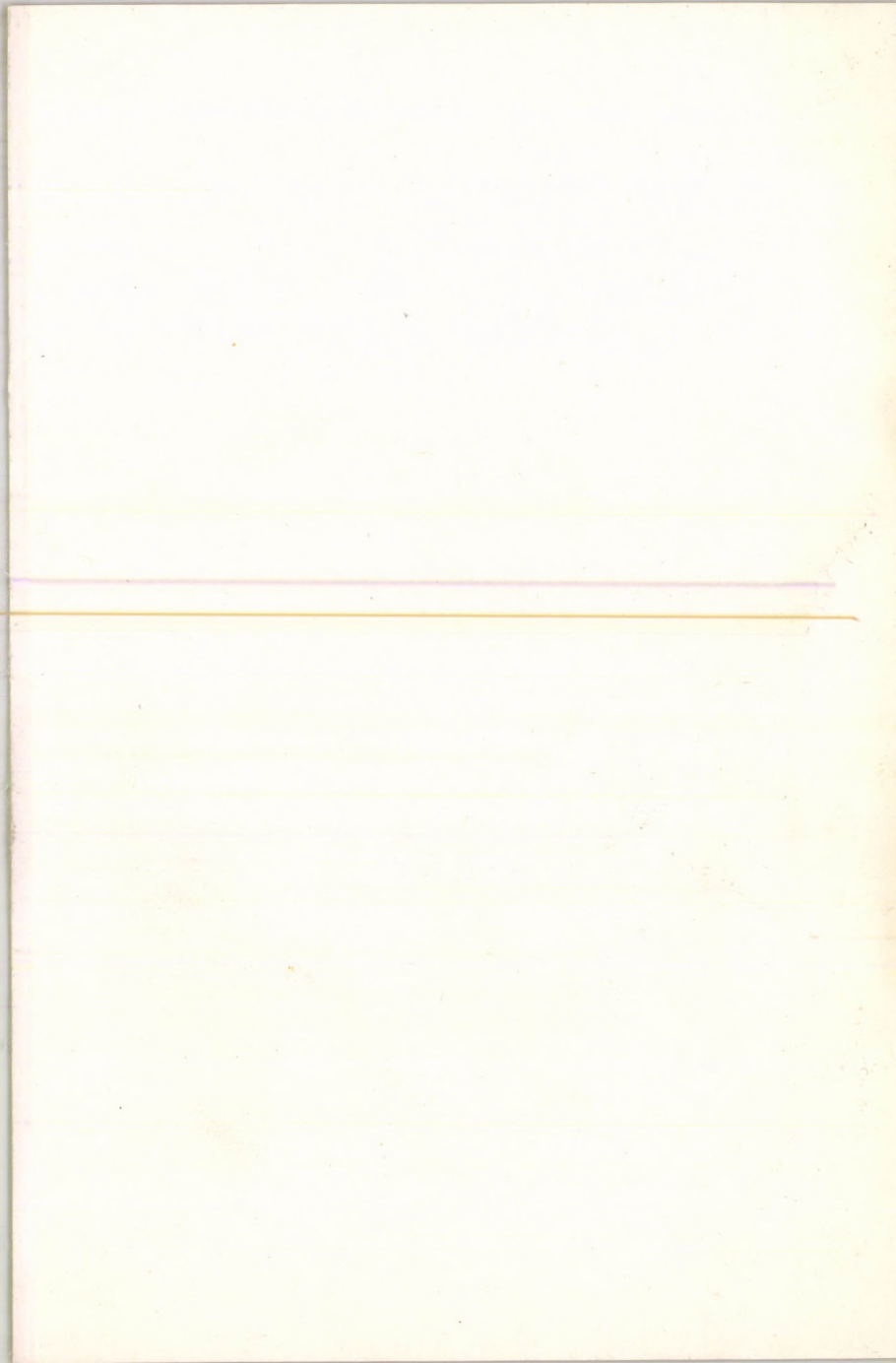
A munkaközösség vezetője
Mahunka Imre

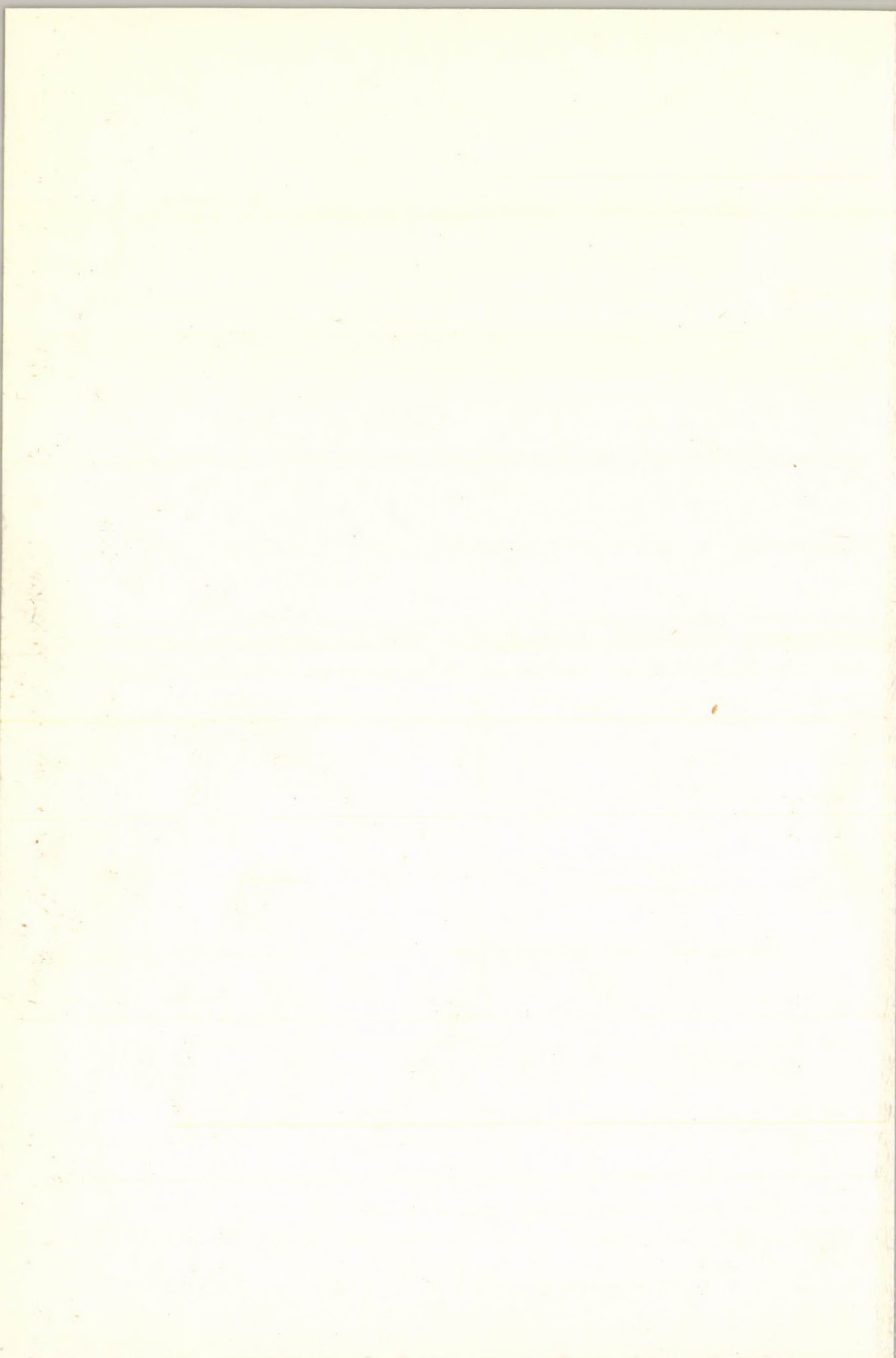
A különböző típusú elektron- és iongyorsítókat egyre nagyobb számban alkalmazzák gyakorlati feladatok megoldására. Ahhoz, hogy a gyorsítóberendezések a népgazdaság fejlődését elősegítsék, a termelők és kutatók szoros kapcsolatának kialakítása, az információcsere gyorsabbá tétele szükséges.

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





Az atomenergia- és magkutató
újabb eredményei

I

**Az atomenergia- és magkutatás
újabb eredményei
1. kötet**

Szerkeszti

KOLTAY EDE

A szerkesztő bizottság tagjai

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



Akadémiai Kiadó · Budapest 1983

Az atomenergia- és magkutató újabb eredményei

1

Gyorsítóberendezések népgazdasági alkalmazásai

A munkaközösség vezetője:

Mahunka Imre



Akadémiai Kiadó · Budapest 1983

ISBN 963 05 3066 X

© Akadémiai Kiadó, Budapest 1983

Printed in Hungary

Tartalom

Berényi Dénes	
Az új sorozat elé	7
Berényi Dénes	
Gyorsítók a népgazdaságban	9
Pásztor Károly	
Gyorsítók alkalmazási lehetősége a növénynevelésben	12
Baranovics Pál—Szöcs Gyula	
Lineáris elektronyorsító-berendezés alkalmazása a szigetelőanyag-gyártásban	32
Simon József—di Gleria Márta—Klopper Ervin	
Elektronyorsítók és különféle sugárforrások környezetvédelmi célú alkalmazása a szennyvizek és a fertőzött takarmányok fertőtlenítésére	38
Vas Károly	
Élelmiszertartósítás és minőségfejlesztés ionizáló sugárzással	52
Dobó János	
Elektronsugárzás a műanyagiparban	57
Bujdosó Ernő—Tóth Lajos	
Részecskegyorsítók ipari és analitikai alkalmazása	64

Hegedüs Zoltán	
A kohászat gyorsítók felhasználásával megoldható analitikai igényei	105
Gyulai József	
Gyorsítókkal megoldható analitikai feladatok a félvezetőiparban	113
Helmeczi Balázs	
A gyorsítók alkalmazásának lehetőségei a talajmikrobiológiában	129
Lengyel Tamás	
Izotóptermeles gyorsítókkal	139
Fenyvesi Ede—Hegedüs Zoltán	
Gyorsítókkal termelt izotópok az iparban	146
Valek Aladár	
Ciklotronlaboratórium interdiszciplináris és gyakorlati kutatásokra	156
Mahunka Imre	
Az U-103 ciklotron alkalmazási lehetőségeinek áttekintése	183

Az új sorozat elé

Az atommagfizika, a nukleáris kutatás már régen kilépett a nagy kutatóintézetek és az egyetemi kutatólaboratóriumok viszonylag szűk köréből. Hazánkban több mint ezer munkahelyen alkalmaznak radioaktív izotópokat, jelentős részben ipari és mezőgazdasági feladatok megoldására. Épül a paksi atomerőmű, a megfelelő szakemberek százait foglalkoztatva. De alig van olyan tudományág, sőt iparág ma, amelyik közvetlenül vagy közvetve ne lenne kapcsolatban az atommagfizikával, az izotópkalkulációval vagy valamilyen ezekből származó ismerettel, módszerrel vagy technikával.

Az új sorozat a szakembereknek ehhez a széles rétegéhez kíván szólni. Hozzá akar járulni továbbképzésükhöz, szélesíteni akarja látókörüket. Lesznek kötetek, mint ez az első is, amelyek a gyakorlati feladatokhoz és problémákhoz egészen közel állnak, mások talán az elvi, alaptudományos kérdéseket helyezik előtérbe.

Őszintén reméljük, hogy a kötetek ott fognak sorakozni az atomenergetikai vagy izotópot alkalmazó gyakorlati szakemberek könyvespolcán éppúgy, mint az érdeklődő egyetemi hallgatók és középiskolai tanárok segéd- és kézikönyvei között. Ehhez kérjük a legszélesebb értelemben vett magfizikus kollektíva segítségét és támogatását mind most az indulásnál, mind majd a következő évek során.

Berényi Dénes

1980. május

az MTA Magfizikai Albizottság Elnöke



Gyorsítók a népgazdaságban

Berényi Dénes

MTA Atommag Kutató Intézet, Debrecen

A magfizikai részecskegyorsító olyan berendezés, amely nagy sebességű töltött részecske-nyalábokat (elektronokat, protonokat, nehéz ionokat) állít elő. Közvetve, megfelelő töltött részecskéket megfelelő célanyagokba ütköztetve, gyorsítókkal neutron- és elektromágneses sugárnyalábokat is előállíthatunk.

A gyorsítókat többféle szempontból lehet osztályozni.

Vannak gyorsítók, amelyekkel csak egyik (pl. elektron) vagy másik (pl. nehéz ion) fajta nyalábot lehet gyorsítani. Gyorsítási elv és elrendezés szerint pedig vannak direkt és ciklikus gyorsítók, aszerint, hogy egy adott potenciálkülönbséget egyszer vagy többször futnak-e be a gyorsított részecskék.

Az osztályozást különböző szempontok szerint lehet tovább folytatni és finomítani. Még talán annyit, hogy a gyakorlati alkalmazások szempontjából elsősorban az ún. kisgyorsítók érdekelnek bennünket. Kisgyorsítóknak a 15 MeV-nél kisebb energiájú nyalábot szolgáltató gyorsítót tekintik (az alsó határ kb. 100 keV körül van, az alatt inkább elektron- vagy ionágyúról beszélünk). Ez természetesen nem jelenti azt, hogy a közepes vagy nagy energiájú gyorsítók egyáltalán ne lennének érdekesek az alkalmazások szempontjából.

1979 novemberében egynapos műszaki-tudományos tanácskozást tartottak Debrecenben, az MTA Atommag Kutató Intézetben, a nukleáris gyorsítók népgazdasági alkalmazásáról, kutatók és ipari szakemberek részvételével.

Ennek a tanácskozásnak az összehívását több ok is időszerűvé tette.

Először is azokat a világszerte jelentkező tendenciákat kell említenünk, amelyek előtt nem lehet és nem szabad szemet hunynunk. Ezek szerint rohamosan terjed a részecskegyorsító berendezések felhasználása kifejezetten gyakorlati: ipari, mezőgazdasági, orvosi célokra. Tudjuk, ez az alkalmazási spektrum igen széles, a nagy tisztaságú anyagok előállításánál alkalmazott nyomanalitikától a modern csomagolóstechnikán át a rákterápia legújabb útjaiig. Ha pl. a két legutóbbi ún. kisgyorsítókkal foglalkozó konferenciát vesszük (mindkettőt a texasi Dentonban tartották 1976-ban, ill. 1978-ban [1], [2]), megállapíthatjuk, hogy a kifejezetten gyakorlati problémákkal foglalkozó előadások száma megközelíti az 50%-ot. De más, gyorsítókkal foglalkozó konferenciákon (pl. a 8. Nemzetközi Ciklotron Konferencián [3] vagy a világ működő és tervezett legnagyobb gyorsítóinak szentelt San Francisco-i konferencián [4]) is igen nagy teret kapnak ma az alkalmazások.

Pedig ismeretes, hogy a konferenciákon előadott beszámolók a gyakorlati alkalmazásokról csak a „jéghegy” csúcsát jelentik. Az 1976-os Kisgyorsító Konferencián pl. a következőket mondta Baird, a Grace and Co. képviselője: „Nagyon kevés részletes beszámoló jelent meg ezekről az ipari folyamatokról, mivel a besugárzás ilyen értelmű alkalmazása viszonylag titkos jellegű az üzleti érdekek sarkallta nagyfokú verseny miatt”. A vállalat különben, amelynél Baird dolgozik, fagyasztott élelmiszerek plasztikfóliába történő vákuumcsomagolásakor alkalmazza a nagy energiájú elektronbesugárzást megdöbbenően nagy méretekben; összes nyalábteljesítményük erre a célra — az információk szerint — több, mint fél megawatt [5].

Ezek a világtendenciák hazánkban és a KGST közösségében is jelentkeznek. Hogy realisan felmérjük a következő 10—15 évre a magyar igényeket ezen a téren és lássuk, hogy mennyi az az indokolt és nélkülözhetetlen gyorsítószükséglet, amelyet a közeljövőben hazánkban biztosítanunk kell gyakorlati célokra, — ez egy másik ok, amiért szükség volt a szóban forgó tanácskozásra.

Ismeretes, hogy folyamatban van az első magyar ciklotronlaboratórium beruházása is. Ez több vonatkozásban egyedülálló lehetőséget fog teremteni a legkülönbözőbb alkalmazások szem-

pontjából. A tervek összkapacitásának legalább felét inter- és multidiszciplináris kutatásra és kifejezetten gyakorlati — ipari-mezőgazdasági — alkalmazásokra szánják.

Ezért került sor 1978 őszén egy, a ciklotron orvosi alkalmazásainak (diagnosztika, terápia, kutatás) szentelt [6] tudományos ülésre, az 1979-es tanácskozással pedig — a már említett problémák megvitatásán túlmenően — a ciklotron ipari-mezőgazdasági feladataira is megkezdődött a felkészülés.

Irodalom

1. Proc. 4th Conf. Scientific and Industrial Application of Small Accelerators, Denton, Texas, USA, 27—29. October 1976. Eds.: J. L. DUGGAN—I. L. MORGAN. IEEE, New York, 1976.
2. 1978 Conference on the Applications of Small Accelerators in Research and Industry, North Texas State University, Denton, Texas, November 6—8, 1978. IEEE Transactions on Nuclear Science **NS-26** (1979) No. 1. Part 1—2.
3. Eighth International Conference on Cyclotrons and their Applications, Bloomington, Indiana, USA, 18—21. September 1978. IEEE Transactions on Nuclear Science **NS-26** (1979) No. 2. Part 1—2.
4. 1979 Particle Accelerator Conference. IEEE Transactions on Nuclear Science **NS-26** (1979) No. 3. Part 1—2.
5. W. G. BAIRD, JR.: lásd [1]-ben, p. 30.
6. Felkészülés a debreceni U-103 ciklotron orvosi célú alkalmazására. **ATOMKI Közlemények** **21** (1979) 49.

Gyorsítók alkalmazási lehetősége a növénynemesítésben

Pásztor Károly

Debreceni Agrártudományi Egyetem
Növénytermesztési és Ökológiai Intézet, Debrecen

Bevezetés

A mezőgazdaság gyors iramú fejlődése egyre nagyobb követelményeket támaszt a nemesített fajtákkal szemben. Ez érthető is, mert az élelmezés gondjainak a megoldásához nagyobb termőképességű, biztonságosan termeszthető s egyes speciális igényeket is kielégítő növényfajtákra van szükség.

Ma — a zöldség-, gyümölcsfajtákat is beleértve — majdnem 500 hazai és körülbelül 300 külföldi növényfajta szolgálja a köztermesztést. De ez a szám az utóbbi időben a fajtaváltás felgyorsulásával állandóan változik.

Ha a jövő irányvonalait figyelembe vesszük, nem kisszámú új növényfajtára lesz szükség, amelyeknek termőképességben, beltartalomban, minőségben, valamint a termesztés, feldolgozás és más technológiai tulajdonságok tekintetében lényegesen jobbnak kell lenniük a jelenlegieknél.

Ahhoz, hogy a nemesítők a jelentkező igényeknek eleget tudjanak tenni, megfelelő nemesítési alapanyagokra van szükség. Ezeket olyan változatos formában kell előállítani, hogy az egyedekben megtalálhatók legyenek mindazok a tulajdonságok, amelyeket a nemesítő a nemesítő munka során az új fajtákba tud egyesíteni.

A nemesítői alapanyagok biztosításának különböző módszerei alakultak ki.

Az eddigi klasszikus módszerek mellett új lehetőséget kínál a radiomutációs nemesítési eljárás alkalmazása. E módszer alkalmazásának — a fajok formagazdagságában beállott elszegényedés miatt — napjainkban fokozottabb a jelentősége.

A mutációs kutatások célja többek között a termelési igényeket jobban kielégítő típusok előállítására (pl. korán érő, bőtermő, magas fehérjetartalmú, betegségellenálló, szárszilárd). Besugárzással elősegíthetjük a genetikailag távoli növényfajok keresztezhetőségét és sok más olyan tulajdonság kiváltását, amelyeket hagyományos nemesítési eljárásokkal nem tudnak megvalósítani [14, 15].

Az indukált mutációk egyrészt megváltoztatják a recesszív és a domináns géneket eddig még ismeretlen mechanizmusokon keresztül, másrészt a variáció szélesítésével a növények formagazdagsága gyarapodik [4, 6, 25] és harmadrészt olyan új mutációk fellépését, izolálását és genetikai, hibridnemesítési technológiát tesz lehetővé (pl. citoplazmatikus mutációk izolálása), amelyek közvetve is értékesülnek a növénynemesítésben.

Indukált mutációk felhasználása a növénynemesítésben

A sugárzás élettani hatását már nagyon régen ismerik. Kezdetben élettanosok, citológusok, genetikusok foglalkoztak a sugárzás által kiváltott hatások elemzésével. A mutagén befolyás növénynemesítési felhasználásának jelentőségét csak a harmincas években ismerték fel. Ekkor kezdik a genetikusok által értékesnek talált pozitív mutációkat felhasználni a nemesítésben. Az ötvenes évek után, de különösen a hatvanas években nagyon sok mutációt izoláltak, amelyek közül a növénynemesítés során többet fel is használtak. Így a mutáció alapanyagok felhasználásával a hetvenes években nagyon sok új produktív fajta került a köztermesztésbe. A radiomutációs módszerek további fejlődésével az elkövetkező években több nagy termőképességű, betegségekkel szemben ellenálló és beltartalmi minőség szempontjából kiváló fajta nemesítése várható.

A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (International Atomic Energy Agency: IAEA) nyilvántartásában 1978 májusában 130 növényfajhoz tartozó mutációstörzs szerepelt. Kukoricából 2200 mutációt regisztráltak, Triticum aestivumból 9500-at, Triticum durumtól 1580-at, rizsből 1580-at, borsóból 1850-et stb. Dísnövényekből és a vegetatív úton szaporítható kertészeti

növényekből 199 mutánst jelez a statisztika, amelyek már kereskedelmi forgalomba kerültek és üzemi szaporítás alatt állnak.

A mutánsok előállítására jelenleg ultraibolya-sugarakat, gamma-sugarakat, röntgensugarakat, gyors és lassú neutronokat, protonokat, radioaktív izotópokat, pi-mezonokat, valamint vegyszereket használnak fel [11, 31]. A besugárzás módjai különbözőek lehetnek. Legáltalánosabb módszer a vetőmagminták besugárzása [7, 13, 17]. Alkalmaztak olyan eljárást is, amikor a vetőmagmintákat radioaktív oldatban duzzasztották [16, 22, 23, 24]. Másik lehetőség az, amikor a radioaktív anyagokat a növényvel szivatják fel [8, 17], vagy a fejlődő növényeket különböző besugárzásnak teszik ki pl. sugárkertben [2]. Újabban kezd teret hódítani a pollenszemek besugárzásos kezelése is [9, 11]. Bármilyen legyen az alkalmazás, nagyon fontos az, hogy a kezelt magvakból kikelt növényeket tiszta tenyészetben tartsuk, és így végezzük az utódszarmazékok szelekcióját. Hazánkban és a különböző országokban a korábbi években folyó radiomutációs kutatásokról, ill. a mutációs nemesítésben alkalmazott eljárásokról, azok eredményeiről Simon [29] közöl irodalmi összefoglalót, valamint Bálint [2] ad részletesebb áttekintést.

Az ötvenes évek közepéig elsősorban röntgen- és gamma-sugarakat alkalmaztak a növénynemesítők mutációk kiváltására.

A röntgensugarak mutációkiváltó hatását Müller 1927-ben fedezte fel. A harmincas évektől ezt használják mutációk kiváltására. Energiája 0,05—0,3 MeV, ami viszonylag alacsony a különböző gamma-forrásokhoz képest.

A gamma-sugárzás energiája sugárforrásonként változik (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{198}Au); energia tekintetében keményebb, mint a röntgen-sugárzás. Emiatt az effektivitásban is mutatkozik bizonyos eltérés. Mind a két sugárzás jellegét tekintve elektromágneses sugárzás. Az ötvenes évek közepéig a növénynemesítők elsősorban röntgen- és gamma-sugarakat alkalmaztak mutációk kiváltására.

A Debreceni Agrártudományi Egyetemen kukoricapollent Co-60 gamma-sugarakkal kezelve, rendkívül széles variációs spektrumú mutánsokat sikerült nyerni [25, 26]. Az izolált mutánsok között előfordulnak nagy produktivitású (4—5, sőt 10-nél több csövet fejlesztő) típusok (1. ábra) is. Izoláltunk bokros növésű, dús- és



1. ábra. Nagy produktívású, sok csövet (13 db) fejlesztő kukoricamutáns
(Debrecen, 1979; foto: Dr. Pásztor)

felálló levélzetű (2. ábra), valamint uniszexuális női típusokat is. A mutánsok között vannak keskenylevelű, „fűszerű”, ún. „corn grass” jellegű mutánsok, amelyek sikeresen alkalmazhatók a silókukorica nemesítésében.

Az utóbbi években egyre inkább rátérnek a neutron- és proton-sugárzások gyakorlati alkalmazására [1, 14].

A mesterséges neutronforrások energiatartománya néhány tized MeV-től 14,7 MeV-ig terjed (ciklotronnal ennél nagyobb energiájú neutronok is előállíthatók). Radiomutációs effektivitása a nagy energiájú neutronoknak a legnagyobb.



2. ábra. Alacsony és magas, valamint bokros növésű, keskeny-, és dús levélzetű kukoricamutánsok (Debrecen, 1979; foto: Dr. Pásztor)

A neutronok iránti érdeklődést Caldecott [8, 31] azzal magyarázza, hogy a neutronsugárzással kétszeresen, ill. négyszeresen nagyobb genetikai hatást lehet elérni, mint más sugárforrásokkal. Állítása szerint a termikus neutronok alkalmasabbak mutációk kiváltására, mint a gamma-sugarak. Több kutató [21, 23, 27, 28, 30] vizsgálataiból az is kitűnik, hogy a gyors neutronok mutagén hatása sokkal nagyobb, mint a röntgen- és gamma-sugaraké. A növények gyors neutronokkal történő besugárzásakor, egységnyi dózis esetén

— ugyanolyan biológiai károsodás mellett — nagyobb a mutációs hatás, valamint a mutációk gyakorisága. Újabb kutatások [10, 20, 27] szerint a neutronok hatása kevésbé függ a növényi magvak besugárzási körülményeitől (nedvesség, oxigéntartalom, hőmérséklet, frakcionált dózis, magvak tárolási ideje), mint a röntgen- vagy gamma-sugárzás alkalmazása esetén. A neutronbesugárzásnak genetikai és növénynemesítési célokra való felhasználásával több mint 600 tudományos közlemény foglalkozik [17].

A korábbi években megjelent közleményekben a reaktorból származó és így különböző energiájú neutronok dózisének mérési nehézségei, valamint a reaktorban fellépő erős gamma-sugárzás miatt a különböző szerzők eredményeit nehéz összehasonlítani. Főleg Konzak és Smith valamint munkatársaik [20, 24, 33] vizsgálatai nyomán nyílt lehetőség a besugárzási körülmények összehasonlítására és standardizálására.

A gyors neutronok által kiváltott mutációk elemzése

A mutációs lehetőségek gyakorlati célokra való kihasználása előtt számos elméleti és módszertani kérdést kell tisztázni. Pl. a mutagén kezeléssel indukált mutációk milyen módosulást eredményeznek a populáció génösszetételében, s a változás milyen hatással van a mennyiségi tulajdonságok fenotípusos megjelenésére [3].

A mutagén hatások lemerésére az egyes növényeknél különböző módszerek alakultak ki. Egyes gabonaféléknél a besugárzás utáni M_1 növények magasságának csökkenéséből következtetnek az alkalmazható dózis nagyságára. Kukoricánál a sugárzások hatását a magvak endospermiumának színeződésével lehet lemérni. Az endospermium bronz színét meghatározó *Bz* gén a IX. kromoszómán van lokalizálva. Ha az egész endospermiumnak megváltozik a színe, akkor *teljes a mutáció*, ha csak egy elhatárolt részen jelentkezik a színváltozás, akkor *részleges a mutáció*.

Fujii japán kutató [10] a kukorica *Bz* vonalának virágporszemét 14 MeV-es neutronsugárzásnak tette ki és ezzel beporozta a

recesszív (*bz*) állományt. A betakarítás után az F_1 növények szemtermésén — az endospermium színeződésének változása alapján *Bz*-től *bz*-ig — határozták meg a mutáció gyakoriságát, figyelmen kívül hagyva a fenotípusbeli megnyilvánulást.

A módszer használhatóságát végezetül az dönti el, hogy a mutáns populáció milyen alapanyagot szolgáltat a nemesítési munkához és mekkora előrehaladást biztosít.

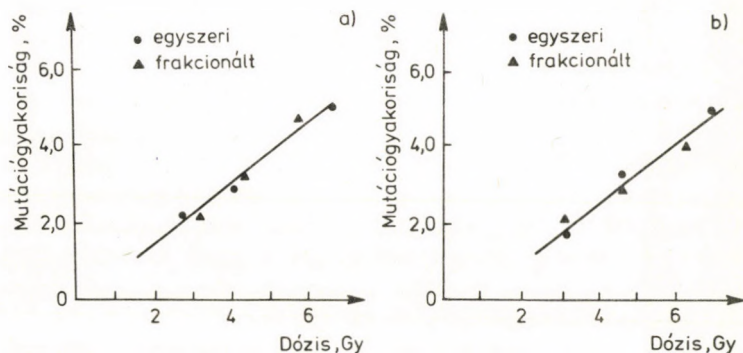
A virágporszemek (pollen) esetén neutronsugárzás hatására nem tapasztalt különbséget az egyszeri azonos dózisú és a frakcionált kezelés között, szemben a gamma-sugárzás esetével (1. táblázat). Az 1. táblázat eredményeiből megállapítható, hogy gamma-besugárzás esetén 12,6 Gy-nél (1260 rd) 2,25% volt a mutációs gyakoriság, és hasonló volt a két adagban 30 perces időközben adott 6,30 Gy-nél (630 rd). Viszont csökkent a gyakoriság akkor, ha a megszakítási időközöket 60 és 120 percre növelték.

A gyors neutronos kezeléseknél a mutációs gyakoriság lényegében nem változott az egyszer adagolt 6 Gy (600 rd) dózis és a két részletben 30, 60 és 120 perces időközökben adagolt 3—3 Gy (300 rd) dózis esetében sem. A gyors neutronokkal megismételt kísérletekben frakcionált sugárzással, 120 perces szünetek közbeik-

1. táblázat. Összefüggés a mutációgyakoriság és a frakcionáltan alkalmazott gamma- és 14 MeV-es gyorsneutron-sugárzás között, kukoricapollenek kezelése esetén (Fujii, 1978)

Első dózis, Gy	Szünet, min	Második dózis, Gy	Mutációgyakoriság, %
Kontroll	—	—	0
Gamma-sugárzás			
12,6	—	—	2,25
6,3	30	6,3	2,30
6,3	60	6,3	1,99
6,3	120	6,3	1,62
Neutronsugárzás			
6,0	—	—	3,34
3,0	30	3,0	3,01
3,0	60	3,0	3,13
3,0	120	3,0	3,04

atásával három különböző dózist alkalmaztak 2,50 és 6,41 Gy (250—641 rd) között. A mutáció gyakorisága a kezelt kukoricapollen esetében lineárisan emelkedett az alkalmazott dózissal megfelelően, mind az egyszeri, mind a frakcionált kezelések esetén.



3. ábra. A dózis és a mutáció gyakorisága közötti kapcsolat a kukoricapollenek 14 MeV-es neutronokkal történt egyszeri és frakcionált besugárzása esetén (T. Fujii, 1968)

a) 120 perces szünettel, b) 180 perces szünettel

Szignifikáns különbség a mutáció gyakoriságát illetően a frakcionált és állandó kezelés között nem fordult elő (3. ábra a és b része). Nagyon érdekes megjegyezni, hogy a pollenkezelés esetén gyors neutronok hatására sokkal magasabb a mutációs gyakoriság, mint a magkezelések esetén.

Ugyancsak Fujii [9] száraz (13% nedvességtartalmú) kukoricaszemeket, valamint 24 óráig szobahőmérsékleten vízben duzzasztott kukoricaszemeket sugárzott be 14 MeV-es neutronokkal és ^{137}Cs forrásból származó gamma-sugarakkal. Ötven szem képezett egy kísérleti csoportot. A kezelt kukoricaszemek Yg_2/yg_2 allélokra heterozigóták voltak. Az ezekből kifejlődött növényeket keresztezte az yg_2 génre homozigótákkal. Az Yg_2 gének a csíranövények leveleinek a zöld színét, az yg_2 gének a sárgászöld színét határozzák meg. A sugárzások hatása az Yg_2 allél recesszív alakulása alapján pontosan mérhető. Ha egy levél primordium sejtjében mutáció

következik be, ez a belőle fejlődő sáv zöld színének az elvesztését okozza. A sárgászöld sáv változásából megállapítható az egyes mutagének hatása.

A kezelések után a magvakat steril talajba vetették. A mutáció gyakoriságát Yg_2 -től yg_2 -ig a gének által okozott színváltozás alapján mutatták ki a fiatal növények levelein, amelyek a zöldtől a sárgászöldig változtak. A szomatikus mutáció csíkokban jelentkezik a levél felszínén. *Ahol a sárgászöld sávok átlagban a levélke negyedrészen jelentkeztek, ott ezt a fenotípusos bélyeget használták a mutációs gyakoriság meghatározására.* A gamma-sugárral kezelt duzzasztott magvaknál a mutáció gyakorisága kb. másfélszer nagyobb volt, mint a száraz magvaknál. A neutronsugárzásnál nem volt kimutatható különbség a nedvesített és száraz magvak kezelése között. Különböző gabonaféléknél (árpa, búza, rizs, kukorica) eltérő feltételek mellett vizsgálták a gyors neutronok által előidézett sugárzás hatékonyságát [10, 17, 18, 19, 32].

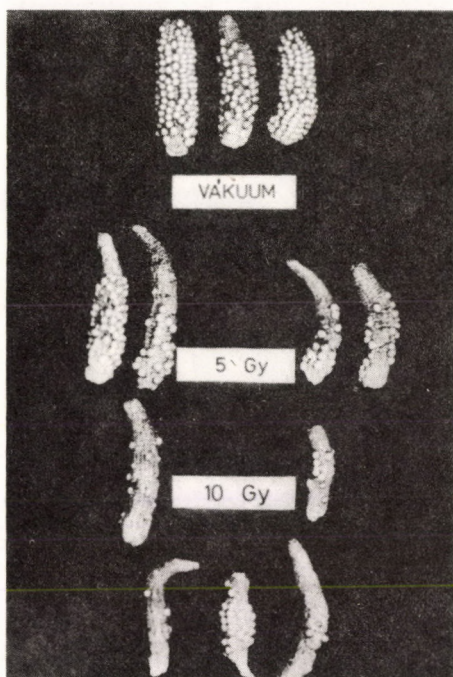
Számos kísérlet alapján megállapítható, hogy a neutronsugárzás hatása kevésbé befolyásolható a besugárzás körülményeivel, vagy a környezeti hatásokkal.

Itthoni tapasztalatok szerzése céljából 1979. évben különböző beltenyésztett kukoricavonalak pollenjét 500—600 keV-es elektronokkal 5—15 Gy (500—1500 rd) dózissal, ill. 14 MeV-es neutronokkal 5—20 Gy (500—2000 rd) dózissal kezeltük az ATOMKI-ban Bornemisza Györgyné és Schlenk Bálint közreműködésével.

A kapott terméseredmények alapján megállapítható, hogy azonos dózis esetén a 14 MeV-es neutronokkal kezelt pollennel megtermékenyített növények csövein több kukoricaszem képződött. Pl. az RDS-3712-es jelzésű vonalunk 500—600 keV-es elektronok esetén 10 Gy dózissal kezelt pollenjeitől a csöveken átlagban 4—21 szem, a 14 MeV-es neutronokkal ugyancsak 10 Gy dózissal kezeltéknél 110—124 szem képződött. A 15 Gy dózissal kezeltéknél a képződött szemek száma a kétféle kezelés hatására 18—32, ill. 86—137 volt. Hasonlót tapasztaltunk a C-103-es beltenyésztett vonalnál is. Az 500—600 keV-es 5 Gy dózis esetén a képződött szemek száma 20—30, a 14 MeV-es neutronokkal kezeltéknél 194—320 volt. A 10 Gy dózissal megfelelő elektronokkal kezelt pollenekkel megtermékenyített növények csövein 75—145

szem, ugyanolyan dózisu neutronokkal kezeltéknél 116—290 szem képződött.

Mivel a gyors elektronokkal történő besugárzásnál a target vákuumkamrájában kellett a pollent elhelyezni, megvizsgáltuk, hogy a vákuumtérben elhelyezett kezletlen pollenek termékenyítő-

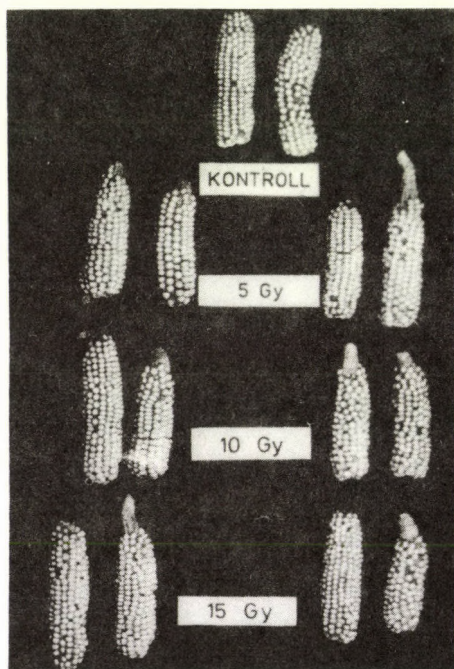


4. ábra. N-6-os kukoricatörzs elektronokkal és vákuumkamrában kezelt pollennel megtermékenyített növény csövei a kezelés évében (Debrecen, 1979)

képességét néhány perces vákuumos kezelés mennyiben befolyásolja. A kísérletek során azt tapasztaltuk, hogy a vákuumos kezelés nem volt káros hatással a pollenszemek megtermékenyítő-képességére. Az utóbbi esetben a gyors elektronok hőhatását is vizsgáltuk, de ezt elhanyagolhatónak találtuk.

A két ismertetett kukoricavonalhoz hasonló eredményeket mutattak más azonos kezelésű kukoricavonalak is. A 4. ábrán az

N-6-os beltenyésztett kukoricavonal elektronokkal besugárzott, ill. vákuumkamrában kezelt pollenjével megtermékenyített növényeiről származó csöveket mutatjuk be. Az 5. ábrán a gyors neutronokkal kezelt pollennel megtermékenyített N-6-os beltenyész-



5. ábra. N-6-os kukoricatörzs gyors neutronokkal kezelt pollennel megtermékenyített növény csövei a kezelés évében (Debrecen, 1979)

tett kukoricavonal csöveit láthatjuk. A 4. és 5. ábrán bemutatott csövek megtermékenyültségi foka is a fentiekben közölt számszerű adatokkal megegyező értéket mutat.

A *protonsugárzás* is sikeresen alkalmazható mutációk kiváltása céljából, nagy biológiai effektivitása miatt. A protonsugárzás rendkívül nagy százalékban idézett elő pontmutációkat, amelyekből progresszív mutánsokat tudtak izolálni. Várható, hogy

ennek a sugárzásnak egyre bővülő alkalmazása újabb sikereket eredményezhet a közeli jövőben.

A *pi-mezonsugárzást* is alkalmazzák. Biológiai hatékonysága valamivel meghaladja a röntgensugárzásét, s viszonylag nagyszámú kromoszómaaberráció gyakoriságát idézi elő. Ciklotronban kukoricamagvakat pi-mezonok hatásának tettek ki [24, 32]. Ha a röntgensugárzás relatív biológiai hatékonyságát egynek tekintjük, a pi-mezonok hatékonysága 3,2-szeres értéket adott.

A mutánsok nemesítési célra való felhasználásánál az első lépés a progresszív mutánsok felismerése, izolálása és nemesítésbe vonása. Az indukált mutánsok szelektálását általában a kezelés utáni második évben (M_2) kell elkezdni, mivel akkor már felfokozódott a jellegek variabilitása. Vannak akik a poligén jellegek mutabilitása miatt a harmadik évet (M_3) sikeresebbnek tartják, mint a másodikat. A szelektált mutáns növényeket az M_3 -ban, valamint a későbbi nemzedékekben utódellenőrzés céljából tovább kell tenyészteni.

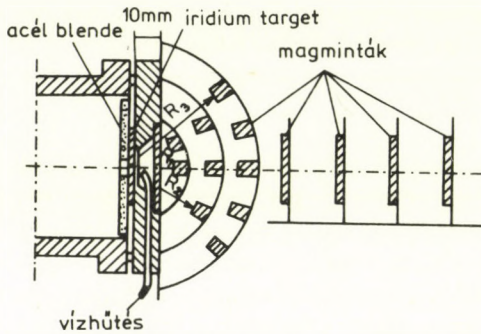
A mutációk során keletkező új formák közül mindig a nemesítési célkitűzésekkel összhangban álló tulajdonsággal rendelkező típusokat kell izolálni. Ezek közül is elsőbbséget kell biztosítani a termőképességgel, termésbiztonsággal összefüggő jellegeknek. Ezek módszertani tanulmányozásával újabban behatóbban kezdenek foglalkozni [6].

A ciklotron alkalmazási lehetőségei a radiomutációs nemesítésben

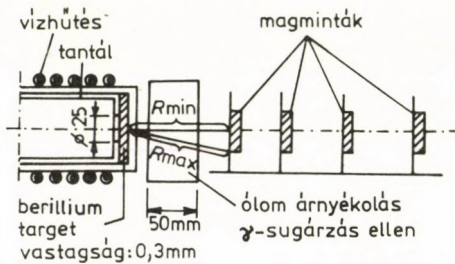
Az 1985-re Debrecenben felépülő U-103-as ciklotron mezőgazdasági vonatkozású alkalmazási lehetőségeire jó példával szolgálhatnak a krakkói U-120-as ciklotronban végzett kutatások eddig elért eredményei, tekintve, hogy e kutatások az ATOMKI-ével azonosnak mondható ciklotronnal és neutrongenerátorral történtek [17, 18, 19, 30, 35]. Ezek az eredmények alapul szolgálhatnak a következő évek hazai kutatásainak további megalapozásához is.

Az újabban végzett vizsgálatokhoz kontrollként a sugárérzékenység szempontjából jól ismert *Himalája* árpafajtát használták, amelyet a *Damaz* lengyel árpafajtaival hasonlítottak össze.

A magvakat besugárzás előtt két hétig *glicerol 60%-os vizes oldatában* tartották azért, hogy a mag nedvességtartalma optimális szintű legyen. Ezt a módszert az IAEA ajánlja, mivel a 13%-os



6. ábra. Magminták elhelyezése a neutrongenerátornál



7. ábra. A magminták elhelyezése a Be-targetnél az U-120-as ciklotronban

nedvességtartalmú szintre beállt magvak kevésbé érzékenyek az oxigéneffektusra.

A neutronos kezelésre szánt magvakat a neutrongenerátornál a 6. ábrán, a ciklotron Be-targetjénél a 7. ábrán feltüntetett séma szerint helyezték el.

A Be-target felülete, ahova a deuteronnyaláb beütközik, pontszerű neutronforrásnak tekinthető, így a gyors neutronok leadott

dózisa ezen ponttól mért távolsággal négyzetesen csökken. Ennek megfelelően a teljes dózis, adott távolságban, az ionnyaláb intenzitásától és a besugárzás időtartamától függ. A targetre eső iontöltés ismerete elegendő volt a dózis meghatározására. *A besugárzásnál esetleg fellépő hibaforrásokat aktivációs módszerrel tudták ellenőrizni, mégpedig úgy, hogy a mintákkal együtt réz- és kénlemezeket is besugároztak* [17].

Azért, hogy más szerzők reaktorban nyert eredményeivel összehasonlítsa alapjuk legyen, felhasználták a *biológiai dóziskontrollt*, amelyre standardként a *Himalája* árpat alkalmazták. Ennek besugárzási érzékenységét gyors neutronokra reaktorban a FAO/IAEA program keretében korábban megvizsgálták [32, 33].

A krakkói U-120 ciklotronban a ${}^9\text{Be}(\text{d}, \text{n}){}^{10}\text{B}$ magreakcióból származó neutronokkal két sorozat *Himalája* árpat és három sorozat *Damaz* lengyel árpaajtát, továbbá egy sorozat *Ciano* búzajtát, a ${}^9\text{Be}(\alpha, \text{n}){}^{12}\text{C}$ neutronokkal *Himalája* árpat, egy sorozat *Damaz* árpat továbbá egy sorozat *Ciano* búzát, a 14 MeV-es neutronokkal egy sorozat *Himalája* árpat sugároztak be. (Megjegyezzük, hogy a 12,5 MeV-es neutronok esetében a 0° -ban kilépő neutronok közepes energiája 5,5 MeV volt.)

Összesen hat különböző besugárzást végeztek a ciklotronnal, és egyet neutrongenerátorral. *A mezőgazdasági hasznosság szempontjából a FAO/IAEA ajánlását elfogadva a hatást a besugárzott magokból kikelt növények első levelének méretcsökkenésével mérték, összehasonlítva ezt a be nem sugárzott kontrollnövényekével.*

A magvakat csíráztató papíron helyezték el desztillált vízben, vegetációs kamrában $24 \pm 1^\circ\text{C}$ -on, 100%-os nedvességtartalmú levegőben. A méréseket az árpamagvak esetében 6 és 9, a búza esetében 7 és 10 nap után végezték. A *Himalája* és a *Damaz* árpaajtánál a növekedés csökkenése azonos neutrodózis esetében majdnem azonos volt. A *Ciano* búzajtánál megállapítható volt, hogy az árpaéhoz viszonyítva a besugárzási érzékenység kb. kétszer kisebb. Az U-120 ciklotron, ill. neutrongenerátor használhatóságát növényi magvak besugárzására az a körülmény határozza meg, hogy milyen dózisonál érhető el az 50%-os növekedéscsökkenés. Ez az a maximális növekedési dózis, ami még a növény nemesítés céljára hasznos mutánsok kiváltására használható. Ezt a maximális dózist

alkalmazva, Gaul [11, 12] szerint, röntgenbesugárzásnál 50%-os növekedéscsökkenéskor a magvaknak csak 20%-a maradt életképes. Sok szerző egybehangzó megállapítása szerint ez tekinthető optimális dózissnak a mutációk létrehozásához.

A lengyel *Damaz* árpa ugyanazt az érzékenységet mutatta, mint az IAEA által kontrollált *Himalája* árpa. A későbbi vizsgálatok során a lengyel kutatók a *Damaz* árpát használták kontrollként.

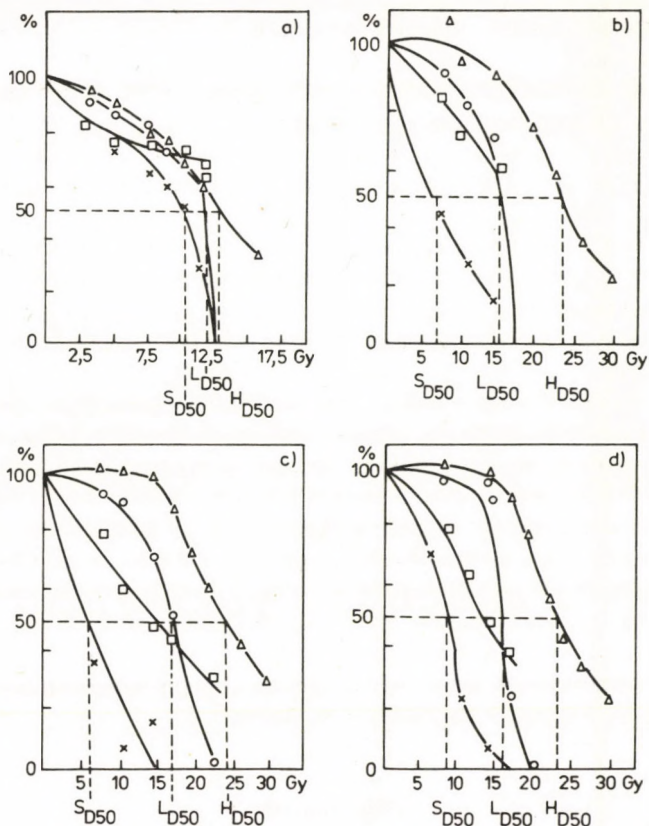
A 8. ábrán négy árpafajtának a sugárérzékenységét mutatjuk be. Az ábra igen jól szemlélteti a gabonafajták viselkedését a neutronbesugárzás hatására.

A kísérletek alapján megállapították, hogy 50%-os növekedéscsökkenés az árpa esetében a ${}^9\text{Be} (d, n) {}^{10}\text{B}$ reakcióval az U-120-nál besugározva, 20 cm-rel a targettól, $3 \mu\text{A}$ -es ionárammal 120 perc alatt érhető el. Ez 10 Gy-nak (1000 rd) felel meg hasadási neutronokra vonatkozóan, amit a FAO/IAEA programon belül mértek. Előkísérletek szerint, amelyek arra irányulnak, hogy a ${}^9\text{Be} (d, n) {}^{10}\text{B}$ reakcióból származó neutronok hozamát növeljék, arra lehet következtetni, hogy a besugárzási időt 5-ös faktorial csökkenti lehet, azaz 2, ill. 4 perc besugárzási idő elegendő ugyanolyan hatás elérésére.

Ha a magmintákat 6 cm-re helyezték a targettól, elérhető volt, hogy az U-120-al ${}^9\text{Be} (d, n) {}^{10}\text{B}$ reakció esetében a neutrondózis erőssége 0,04 Gy (4 rd) legyen. A ${}^9\text{Be} (\alpha, n) {}^{12}\text{C}$ reakció esetében a maximális dózis az előbbieknél csak az egyharmada. A háttér gamma-sugárzást termolumineszcens doziméterrel mérték. Általában 1,3 Gy (130 rd) volt abban a pontban, ahol a gyorsneutron-dózist 10 Gy (1000 rd)-nak találták, tehát elhanyagolhatónak tekinthető a gamma-háttér. A minta és target közé 5 cm-es ólomárnyékolást is alkalmaztak.

Ahhoz, hogy a neutrongenerátornál olyan dózist érjenek el, ami mellett a *Himalája* árpa növekedéscsökkenése 50%-os legyen, a targettól 2,5 cm távolságra, 8 órás besugárzás volt szükséges, ami alatt a T-target teljesen elhasználódott.

Az atomreaktorokban és ciklotronnal történő besugárzások eredményeit összehasonlítva, az utóbbi látszik előnyösebbnek [17]. A ciklotronnál a neutronok közepes energiája háromszor olyan nagy, mint a reaktorneutronoké. Továbbá figyelembe kell venni azt



8. ábra. Gyors neutronnal besugárzott négy gabonafajta sugárérzékenysége a kontroll %-ban viszonyítva (Huczkowski, 1974)

a) Damazy árpa, b) Sante Cathalina búza, c) Ciano búza, d) Inia búza

Δ növekedési magasság csökkenése, \circ a betakarítás előtti növények magassága, \times a megtermékenyülés nagysága, \square a növénymagasság csökkenése

is, hogy reaktoroknál 10 Gy (1000 rd) neutron dózis esetén sokkal nagyobb háttér gamma-dózissal kell számolni.

Az irodalmi adatok alapján [10, 17, 18, 30, 35] megállapítható, hogy a mezőgazdasági hasznosítás céljából a ciklotron segítségével előállított neutronokkal sokkal kedvezőbb körülmények között

lehet besugározni — még nagy kiterjedésű növényeket is —, mint a reaktortban.

Az U-120 deuteronnalábuját vákuumban egy kb. 50 m² target-helyiség közepébe vezetve, olyan neutronteret tudtak létrehozni, mint egy ⁶⁰Co-forrás körüli gamma-tér. Ebben 2 m-re a targettől 0,12 Gy/h (12 rd/h) gyorsneutron-dózisintenzitás volt elérhető [17].

Az egyéb külföldi tapasztalatok, valamint a krakkói ciklotronnal végzett mezőgazdasági vonatkozású kísérletek és saját előzetes vizsgálataink is jól tájékoztatnak arról, hogy radiomutációk kiváltásával összefüggésben milyen irányban érdemes a kutatásokat folytatni.

Az ATOMKI-ban jelenleg is működő neutrongenerátort célszerű mezőgazdasági, biológiai vonatkozású előkísérletek és alapkutató-sok (növényi magvak, pollen, sperma besugárzása, stimulációs, mutációs dózisok meghatározása stb.) végzésére felhasználni. Az így kapott eredmények alapul szolgálhatnak a felépülő ciklotron mezőgazdasági célokra történő hasznosításához is. Az ATOMKI-ban felépülő U-103-as ciklotron — nagy energiájú és intenzitású neutronforrásként használva — új távlatokat nyit a nukleáris módszerek és technika hazai mezőgazdasági és élelmiszeripari hasznosításához is. Ez népgazdaságilag nagyon fontos kutatási és fejlesztési feladatok megoldásához vezethet.

Összefoglalás

A gyorsítók alkalmazási lehetőségeit vizsgálva a radiomutációs nemesítésben — a rendelkezésre álló irodalmi és saját kutatási tapasztalataink alapján — a következők állapíthatók meg:

1. A növénynemesítő munka sikerét a nemesítési alapanyagok jelentős mértékben befolyásolják. A hagyományos alapanyagokon kívül a génkészletek gazdagításának egyik jelentős eszköze a mutációk indukálása, amelynek feltételei a Debrecenben felépülő U-103-as ciklotronnál megteremtődnek.

2. A radiomutációs kutatások a termesztési igényeket jobban kielégítő típusok (pl. korán érő, bőtermő, magas fehérjetartalmú,

szárszilárd, betegségellenálló) előállításában új lehetőséget kínálnak a növénytermesztés különböző irányú fajtaigényének a kielégítéséhez.

3. A mutánsok kiváltásához különböző sugárforrásokat használnak. A magvak, ill. növények kezelése is különböző módon történhet. Az utóbbi években egyre inkább rátérnek a neutron- és proton-sugárzások gyakorlati alkalmazására.

4. Az újabb kutatások szerint a neutronok hatása kevésbé függ a növényi magvak, pollenek besugárzási körülményeitől (nedvesség, oxigéntartalom, hőmérséklet, frakcionált dózis stb.), mint a röntgen- vagy gamma-sugárzás alkalmazása esetén.

5. A mutagén hatások le mérésére is különböző módszerek alakultak ki. Egyes gabonaféléknél (búza, árpa) a besugárzás utáni M_1 növények magasságának a csökkenéséből következtetnek az alkalmazható dózis nagyságára. Kukoricánál a sugárzás hatását a magvak endospermiumának színeződéséből, ill. a csíranövények levelének színéből állapítják meg jelző gének felhasználásával.

6. Irodalmi források szerint a ciklotron mint gyorsneutron-forrás az atomreaktorral összehasonlítva előnyösebbnek látszik, mert a ciklotronban a neutronok közepes energiája háromszor olyan nagy, mint a reaktorneutronoké. A növényi magvakat, polleneket kedvezőbb körülmények között lehet besugározni.

7. Célszerűnek látszik, hogy az ATOMKI-ban a ciklotron felépültéig a mezőgazdasági és élelmiszeripari hasznosítás vonatkozásában is folyjanak előkísérletek a rendelkezésre álló neutronforrással és más eszközökkel.

Irodalom

1. BARADJANEGARA, A. A.—FUJII, T.—AMANO, E.: Radioisotopes **25** (1976) 210—214.
2. BÁLINT A.: Heterózis és mutáció a kukoricában. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1967, p. 182.
3. BÁLINT A.—DUDITS D.—SUTKA J.: Növénytermelés **17** (1968) 187—196.
4. BACQ, Z. M.—ALEXANDER, D.: Fundamentals of radiobiology. Academic Press, New York, 1955, p. 389.
5. BRIGGS, R. W.: in Manual on Mutation Breeding. IAEA, Vienna, 1970, p. 9.

6. BROERTJES, C.: in *Application of Mutation Breeding Methods in the Improvement of Vegetatively Propagated Crops*. Elsevier, Amsterdam and New York, 1978, p. 296.
7. BRUNNER, H.—MIKAELSEN, K.—LUSE, R. A.: in *Proceedings of a Panel on Radiobiological Applications of Neutron Irradiations*, Vienna, 6—10. December 1971. IAEA, Vienna, 1971, p. 81.
8. CALDECOTT, R. S.: in *Ionizing radiation as a tool for plant breeders*. A. (Conf. 8./P) 101. Proc. **12** (1955) 40—45.
9. EHRENBERG, L.: Mutation studies with radioactive isotopes. In *Radioisotope Techniques*. Her Majesty's Stat, London, 1953, Off. / 452—461.
10. FUJII, T.: *Radioisotopes* **27** (1978) 642—647.
11. GAUL, H.—FRIMMEL G.—GICHNER, T.—ULONSCA E.: Efficiency of Mutagenesis. in *Induced Mutations and Plant Improvement*. IAEA, Vienna 1972, p. 75.
12. GAUL, H.: *Radiation Botany* **4** (1964) 155—232.
13. GLUBRECHT, H.—HAMMAN, H. J.: *Neutron Irradiations of Seeds II*. Report IAEA, Vienna, 1968, p. 131.
14. GREEN, C. E.—PHILLIPS, R. L.: *Crop Science* **14** (1974) 827—830.
15. GREGORY, W. C.: The comparative Effects of Radiation and Hybridization in Plant Breeding. (Proc. 1st. Intern. Conf. Peaceful Uses.) *Atomic Energy* **12** (1955) 48—51.
16. HENTRICH, W.: *Atompraxis*. (Jena) **VII** (1964) 314—323.
17. HUCZKOWSKI, J.: *Hodowla Roslin Aklimatyzacja i nasiennictwo* **17** (1973) 146—159.
18. HUCZKOWSKI, J.—GACEK, E.—WOJCIECHOWSKI, H.: Use of Cyclotron as a Fast Neutron source in Plant Breeding and Genetics. (Repr. from *Biological Effects of Neutron Irradiation*.) IAEA, Vienna, 1974, p. 49.
19. HUCZKOWSKI, J.—KRASNIWOLSKI, S.—LAZARSKA, B.—PROCHNICKA, A.—WOJCIECHOWSKI, H.: *Newsletter* **6** (1976) 15—20.
20. KONZAK, C. F.—WISKMAN, M. IRENE.—DEKOCK, M. J.: in *Advances in Methods of Mutagen treatment. (Induced Mutations and Plant Improvement)*. IAEA, Vienna, 1972, p. 95.
21. KONZAK, C. F.—MIKAELSEN, K.—SIGURJÖRNSSON, B.—BURTSCHER, A.: in *Neutron Irradiation of Seeds*. Report IAEA, Vienna, 1967, p. 103.
22. MIKAELSEN, K.—KRAMER, J.: Effects of Water Content, Oxygen and Metabolic State on Genetic Effects of Fast Neutrons and Gamma Radiation of Barley Seeds. IAEA, Vienna, 1969.
23. MICKE, A.: in *Manual on Mutation Breeding*. IAEA, Vienna, 1970, p. 126.
24. MICKE, A.—SMITH, H. H.—WOODLEY, R. G.—MASCHK, A.: *Rad. Research* **33** (1964) 537.
25. PÁSZTOR, K.: *Acta Agronomica Academiae Sci. Hungaricae* **27** (1978) 481—488.
26. PÁSZTOR, K.: *Acta Agronomica Academiae Sci. Hungaricae* **28** (1979) 452—458.
27. PAWAR, S. E.—THAKARE, R. G.—JOSHUA, D. C.: *Indian Journal of Experimental Biology* **16** (1978) 656—659.
28. PARNEL, C. J.: *Neutron Dosimetry in Biology and Medicine*. (Proc. Symp. Neuberger, 1972) Rep. EUR-4896 afe (1972) 783.

29. SIMON J.: Sugárforrások alkalmazása a mezőgazdasági kutatásban és termelésben. Irodalmi összefoglaló. Országos Atomenergia Bizottság. Izotóp Intézet (1965) 25. kiadás 55. old.
30. PRZYBYLA, A.—HUCZKOWSKI, J.: Studies on the use of Fast Neutrons in Apple Mutational Breeding. *Fruits Science Reports* 5 (1978) 2—6.
31. SACRASCIA-MUGNOZZA, G. T.: Induced mutations in breeding for lodging resistance. Comitato Nazionale Energia Nucleare, Roma, Casaccia, 1964.
32. SMITH, H.: in *Mechanism of mutation and inducing factors*. Ed.: LENGEROVA, A. Prague 1966, 179—182.
33. SMITH, H. H.: in *Induced Mutations and Plant Improvement*. IAEA, Vienna, 1972, p. 75.
34. TROICKI, N. A.: *Sovremennye Problemy Radiocionnoj Genetiki*. Atomizdat, Moszkva, 1969.
35. WOJCIECHOWSKI, H.—HUCZKOWSKI, J.—GACEK, E.—KRASNIWOLSKI, ST.—SZYMUSIK, B.—KASPER, E.: The Ú-120 Cyclotron as a Fast Neutron Source for Irradiations of Biological Objects. (Sec. Symp. on Neutr. Dosym. in Biol. and Med., Eds.: BURGER, G. et al., Neuherberg, Sept. 30—Oct. 4. 1974) 389—396.

Lineáris elektrongyorsító-berendezés alkalmazása a szigetelőanyag-gyártásban

Baranovics Pál—Szócs Gyula

Villamosszigetelő- és Műanyaggyár, Budapest

A Villamosszigetelő- és Műanyaggyár a magyar népgazdaság egyik legnagyobb és legrégebb műanyagfeldolgozó vállalata.

1883-ban alakult és 1928-ig kábeltermékek gyártásával foglalkozott. 1928-tól egyéb villamosipari és közszükségleti cikkek, 1934-től hanglemezek gyártásával bővült a gyártmányválaszték. A vállalat jelenleg az ipar műanyagfeldolgozó bázisa, három gyárában — a budapesti gyár mellett Kiskunfélegyházán és Kisvárdán — közel 3000 ember dolgozik. A Villamosszigetelő- és Műanyaggyár az Ipari Minisztérium alá tartozó vállalatok műanyagalkatrész-igényének kielégítése mellett bekapcsolódott a gépjárműgyártási programba is, fék- és kapcsolótárcsák, valamint akkumulátortartozékok gyártásával. A lakásépítési programban különféle extrudált és fröccsöntött villamosszerelési anyagok gyártásával vesz részt. A vállalat fejlesztési célkitűzéseit a Magyar Szocialista Munkáspárt Központi Bizottsága 1977. októberi határozatában rögzített irányelvekkel összhangban dolgozta ki, melynek fő célkitűzései a következők:

- a termelékenység növelése az automatizálás széles körű kiterjesztésével,
- új, eddig nem alkalmazott technológiák bevezetése,
- exportálható termékek alkatrészeiként a gyártmányok választékának bővítése,
- a műanyagalkatrészek felhasználási körét bővítő alkalmazás-technikai munka fejlesztése.

E fejlesztési célkitűzéseknek megfelelően a vállalat a hőre zsugorodó kábelszerelvény-gyártás bevezetésére vállalkozott. A feladat megoldásának jelentős állomásaként 1979. január 31-én elkészült Magyarországon az első, gyorsítóra alapozott, ipari jellegű besugárzó üzem, melyben a leningrádi Jefremov Intézet LUE-8-5 V típusú elektrongyorsító-berendezése került felállításra.

Mi tette szükségessé az üzem létrehozását?

A villamosiparban évek óta megoldásra váró feladat a kábelszerelési munkák korszerűsítése. Ezért a Magyar Kábel Művek megbízásából a Műanyagipari Kutató Intézet (MŰKI) már közel 10 évvel ezelőtt széleskörű kutatómunkába kezdett, a kizárólag tőkés importból beszerezhető, hőre zsugorodó szerelési anyagok gyártási technológiájának kifejlesztésére. A Műanyagipari Kutató Intézet javaslata alapján 1975 szeptemberében a Villamosszigetelő- és Műanyaggyár a hőre zsugorodó kábelszerelvények ipari gyártásának megvalósítására műszaki-fejlesztési szerződést kötött az akkori Kohó- és Gépipari Minisztériummal.

A Villamosszigetelő- és Műanyaggyár műszaki fejlesztési feladata — a piaci igények részletes felmérése alapján — a gyártmánycsalád kialakítása, a különleges gyártóeszközök és üzemi technológiák kifejlesztése volt, különös tekintettel a legkorszerűbb technológia, az elektronbesugárzás nagyüzemi alkalmazására.

A hőre zsugorodó tulajdonság speciális szerkezetű műanyagok ún. emlékező effektusán alapszik. Ennek lényege, hogy a gyártáskor „befagyasztott” nagymértékű deformációhoz tartozó feszültségeket felhasználáskor melegítéssel felszabadítva, a műanyag tárgy a deformáció előtti (eredeti) alakját igyekszik visszanyerni. Az effektust adó speciális anyagszerkezet fő jellemzője: meghatározott mértékű térhálóság és kristályos fázis egyidejű jelenléte. Ennek megfelelően a kiindulási alapanyagok elsősorban polietilén és kopolimerjei, valamint különféle elasztomerek, PVC, ill. ezek változatos kombinációi.

Az anyagszerkezet módosítása során — amelynek lényege tehát a térhálósítás — az eredetileg hőre lágyuló műanyagok olyan alapvető tulajdonságai is nagymértékben megjavulnak, mint pl. a hőállóság, hidegállóság, feszültséghorrózióval szembeni ellenállás. Így végeredményben a normál műanyagok magas használati értékű

anyagokká válnak. Műszaki értéküket igazolja, hogy kifejlesztésüket eredetileg a repülőgép-, a haditechnikai ipar és az űrhajózás serkentette, és még ma is ezek a legnagyobb felhasználási területek. Ugyancsak jellemző mutató, hogy a polietilén-alapú zsugorodó termékek világpiaci árai 30—70 \$/kg körül vannak.

A jelenleg ismert hőre zsugorodó termékek szinte minden esetben burkolatként kerülnek alkalmazásra, amelyek feladatai a következők lehetnek:

- villamosszigetelés,
- mechanikai védelem,
- folyadék, ill. gázáthatolás elleni védelem (tömítés, korrózió és más kémiai behatások elleni védelem).

Megjelenési formájuk szerint a zsugortermékek lehetnek:

- csövek,
- idomok (sajtolt vagy fröccsöntött),
- extrudált profilok,
- fóliák.

Az eltérő megjelenési formák természetesen eltérő gyártástechnológiát is jelentenek.

A hőre zsugorodó gyártmányok jelenlegi fő felhasználási területei hazánkban:

- villamosszigetelés a műszer- és híradástechnikai iparban, a háztartási és ipari villamos berendezésekben,
- erősáramú kábelek kötése, végelzárása és javítása 0,6—1 kV, ill. 6—35 kV-os tartományokban,
- csővezetékek, csőkötések, valamint egyéb fémtárgyak korrózió elleni védelme,
- légtechnikai vezetékek kötése.

Vállalatunk 1979 októberében megkezdte az általános villamosszigetelési célokra használható ún. vékonyfalú, 1980-ban az ún. közepes falvastagságú zsugorcsövek sorozatgyártását. 1981-ben a vastagfalú csőcsalád és a fröccsöntött idomokat is tartalmazó, 0,6—1 kV-os kábelkötő és végelzáró garnitúrák sorozatgyártását tervezzük. Fejlesztés alatt áll a csőkötések védelmére szolgáló nagy

átmérőjű karmantyúk, valamint speciális hírközlő kábelszerelvények gyártása.

A gyártmányok minőségének tervezésekor minden esetben a legjobb nyugati termékeket vettük alapul. Gyártmányaink a felhasználók részére ugyanazokat a szolgáltatásokat nyújtják, mint a hasonló import termékek.

A gyártmányok alapanyaga, mint már említettük, kis sűrűségű polietilén, amelyet a kívánt tulajdonságok biztosítására különféle más polimerekkel, stabilizátorokkal, égésgátlókkal és színezékekkel kell módosítani.

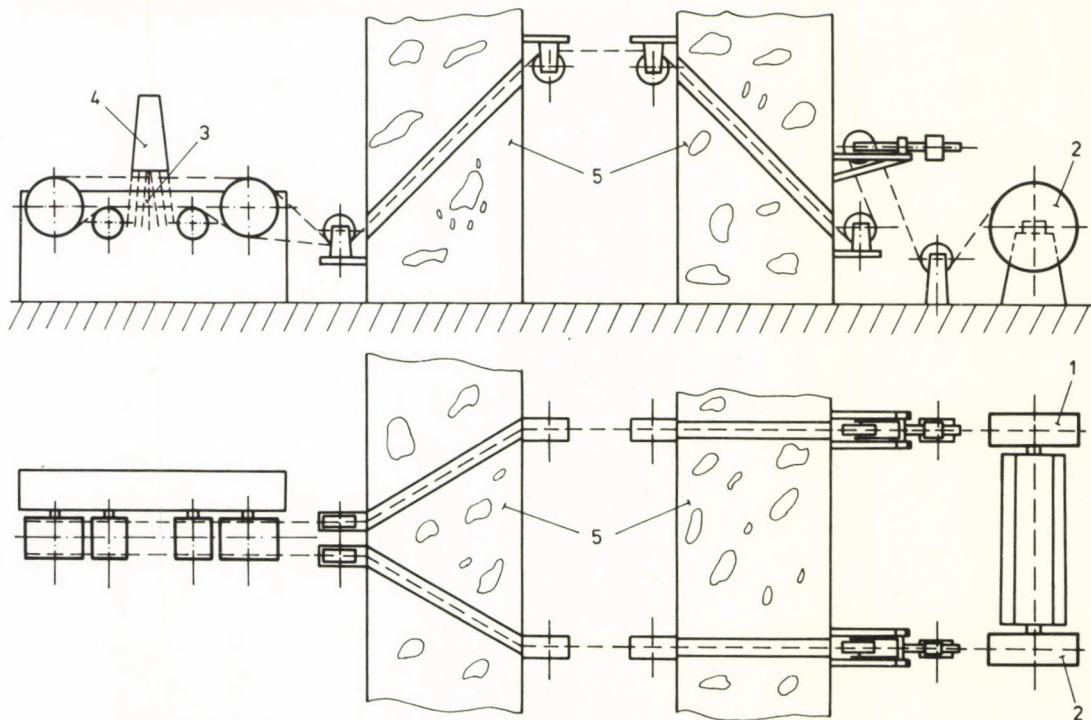
A gyártási technológiából ezen a helyen csak a besugárzásos térhálósítást emeljük ki.

Arra a kérdésre, hogy miért választottuk az elektronbesugárzást, a válasz nagyon egyszerű: az adott feladat megoldására már ténylegesen megvalósított, gazdaságos ipari eljárást nem ismerünk. A gyakorlat által is egyértelműen bizonyított érvek a szakirodalomból jól ismertek [1, 2].

Alternatívaként a klasszikus peroxidos kémiai térhálósítás kínálkozik, ennek gyakorlati megvalósítása azonban csövek esetében technikailag szinte alig megoldható és a besugárzáshoz mérhető egzakt folyamatvezetés sem érhető el. Mindemellett vannak olyan bonyolult geometriájú fröccsöntött vagy sajtolt idomok, amelyek térhálósítása kémiai úton gazdaságosabb.

Az alkalmazott sugárforrás, mint már említettük, egy szovjet gyártmányú LUE-8-5 V típusú, impulzusüzemű, lineáris elektrongyorsító, amelyet a hazai és nemzetközi sugárvédelmi előírásoknak és a technológiai igényeknek megfelelően tervezett épületben helyeztünk el (1. ábra). A berendezés kimenő nyalábteljesítménye 8 MeV mellett 5 kW.

A besugárzandó anyagok sugártéren való átszállítására jelenleg kétféle, saját fejlesztésű berendezés szolgál. Az egyik a megfelelően hajlékony csöveket automatikusan szabályozott, állandó húzóerővel az előkészítő térből és ugyanide visszatérően, a sugárkibocsátó ablak hossz tengelyével párhuzamosan, folyamatosan mozgatja. Többszörös körbefuttatással a kb. 0,25 m × 1 m-es besugárzott területet a két sorban futó csőszálak maximálisan kitöltik.



1. ábra. Folyamatos csöbesugárzás elrendezési vázlata

1. leadó dob; 2. felcsévlő dob; 3. sugártér; 4. besugárzó fej; 5. sugárvédő fal

A másik berendezés egy önjáró kocsi, amely az ablak hosszten-gelyére merőlegesen alternáló mozgást végez. A kocsin elhelyezhető maximálisan 1 m × 3 m-es tálcán a darabos jellegű anyagok széles köre szakaszos módszerrel besugározható. Ezenkívül a besugárzó épületblokk kialakítása lehetővé teszi egy konvektor-sor esetleges kiépítését is.

Az anyagelhelyezés jelenlegi síkjában a ténylegesen hasznosítható felületi dózisteljesítmény 2—3 MGy/h, ami lényegesen alacsonyabb, mint az a hatékonyság szempontjából kívánatos lenne. A LUE-8-5 V elektrongyorsító elsősorban kutatási célokra készült, ezért átlagos termelékenysége jelentősen elmarad a világszínvonalat jelentő ipari célberendezésektől. Kiválasztását elsősorban az univerzalitás indokolta: bár a kívánatosnál alacsonyabb hatékonysággal, de végeredményben valamennyi fejlesztési és gyártási feladatunkat megoldhatjuk vele.

Középtávú terveinkben viszont már olyan 2—3 MeV-es 15—30 kW-os további gyorsítók beszerzése szerepel, amelyekkel mind kapacitásunkat, mind a besugárzás átlagos hatékonyságát a jelenleginek többszörösére emelhetjük, miközben a LUE-8-5 V gyorsítót fokozott mértékben a kutatás-fejlesztés szolgálatába állíthatjuk.

Ismeretes, hogy az elektrongyorsítók viszonylag bonyolult berendezések, amelyek üzemeltetése csak jól kvalifikált szakembergárdával lehetséges, ezért nagy súlyt helyezünk a személyzet kiképzésére, a személyi állomány fejlesztésére is.

A jelenlegi besugárzókapacitásunkat ugyan a hőre zsugorodó termékek gyártása lényegében leköti, de adott esetben nem zárkozunk el más célú besugárzási munkák elvégzésétől sem. Úgy véljük, hogy középtávú terveink végrehajtásával megalapozhatjuk azt a távlati célkitűzésünket, hogy létrehozzuk a polimerbesugárzási műveletek hazai ipari bázisát.

Irodalom

1. WUCKEL, L.: Gegenüberstellung chemischer und strahlungschemischer Vernetzungsverfahren. (Wissenschaftliche Berichte Nr. 4. 1975) Akademie der Wissenschaften der DDR, Dresden, 1976, pp. 20—28.
2. DOBÓ J.: Magyar Kémikusok Lapja 34 (1979) 247.

Elektrongyorsítók és különféle sugárforrások környezetvédelmi célú alkalmazása a szennyvizek és a fertőzött takarmányok fertőtlenítésére

Simon József—di Gleria Márta

PHYLAXIA Oltóanyag- és Tápszertermelő Vállalat, Budapest

Klopper Ervin

MTA Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest

Bevezetés

A *besugárzástechnikának* a mezőgazdasági, ipari és kommunális eredetű fertőzött szennyvizek és a fertőzött takarmányok fertőtlenítésével kapcsolatos környezetvédelmi alkalmazásánál — a hagyományos radioaktív gamma-besugárzók, mint a ^{60}Co és ^{137}Cs mellett — egyre fokozódó jelentőségre tesznek szert a *gépi sugárforrások*; ezek közül is elsősorban az *elektrongyorsítók*. E berendezések előnye kompaktságuk, tág tartományban változtatható energiájuk és intenzitásuk, jól fókuszálható nyalábjuk, egyszerű kezelhetőségük és kikapcsolhatóságuk. A működési paraméterek megfelelő beállításával a *besugárzási dózis széles tartományban változtatható*, a nyaláb a besugárzandó térrészre koncentrálható. Ilyen típusú berendezések a nemzetközi piacon beszerezhetők, beruházási és üzemeltetési *költségeik* számos alkalmazási területen *lényegesen alacsonyabbak* a hasonló teljesítményű gamma-besugárzókéknál.

Az elektrongyorsító felépítése

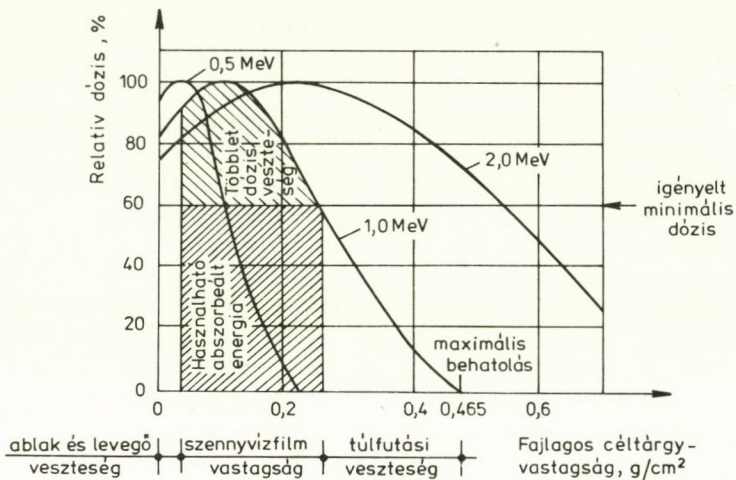
Jelen cikkben vázolt célokra leginkább a 0,7—1,5 MeV energia-tartományban működő, folytonos üzemű elektrongyorsítók alkalmasak. Egy ilyen gyorsító általános felépítése a következő lehet: A gyorsító egyenfeszültséget háromfázisú, szigetelt törzsű transzformátoros (Insulating Core Transformer, ICT) hálózati tápegység állítja elő. A nagyfeszültség kábelén, vagy feszültségátvezetőn át kapcsolódik a gyorsító nagyfeszültségű termináljára, ahonnan poten-

ciázó ellenálláslánc osztja le a föld felé. A fűtött katódból emittált elektronokat elektronágyú és fókuszáló lencse lövi be az evakuált, homogénterű gyorsítócsőbe, amelyen végiggyorsulnak és a cső — mint vastag elektrosztatikus lencse — képsíkjaiban 50—100 mA intenzitású, kb. 10—15 mm átmérőjű nyalábfoltot hoznak létre. A feszültségforrás és a gyorsító acéltankban foglal helyet, amelyet kb. 0,7 MPa nyomású SF₆ (kén-hexafluorid) szigetelőgáz tölt ki. A gyorsított elektronok két, egymásra merőleges, szaporán változó mágneses tér segítségével szétteríthetők egy viszonylag nagy területű, jól hűtött, vékony titánfólia-ablak felületére (scanner). Az ablakon áthatoló nagy energiájú elektronok a szabad levegőre jutnak és ráirányíthatók a besugárzandó anyagra. Az elektronágyú, gyorsítócső és scanner kb. 10⁻¹⁰ bar üzemi nyomáson tartandó, amelyet e célra kialakított vákuumrendszer biztosít.

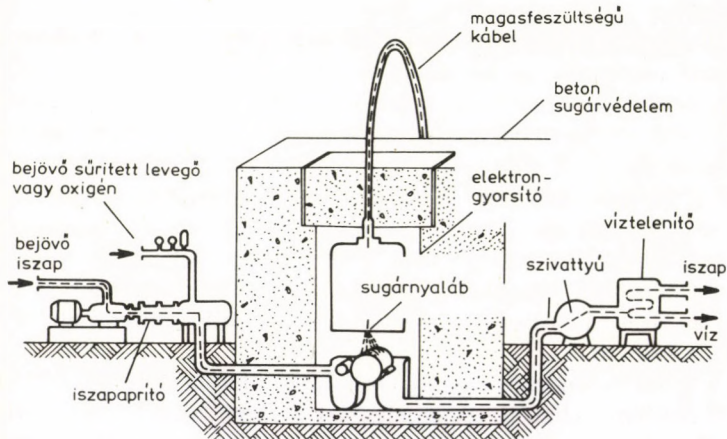
A nagy energiájú elektronok aktivációs *küszöbenergiája* a legtöbb elem esetén *5 MeV felett* van, így a szennyvizek és iszapok, valamint a takarmányok 0,7—1,5 MeV-es elektronokkal való besugárzása a besugárzott anyagban *maradandó aktivitást gyakorlatilag nem kelt*.

A High Voltage Engineering Corporation (HVEC) és a Massachusetts Institute of Technology (MIT) tervezésében és kivitelezésében a Boston melletti *Deer Islandon 1976. május 19-e óta üzemel* egy kísérleti elektrongyorsító berendezés, amely a fenti elvek szerint épült fel, és alkalmas a bostoni kommunális és ipari szennyvíz és szennyiszap egy részének, valamint esetenként odaszállított szennyvízmintáknak besugárzásos fertőtlenítésére. A berendezés *50 kW teljesítményű, 850 keV energiájú elektronokat állít elő* 1220 mm × 100 mm felületű ablakon szétterítve, *kapacitása 4 kGy besugárzási dózis esetén 378 m³/24 h*. A besugárzott szennyvízréteg vastagsága max. 3 mm, EUE = 35% (EUE = Electron Utilization Efficiency = elektronszamosítási hatásfok). A 0,5, 1,0 és 2,0 MeV energiájú elektronok behatolási profilgörbéje az 1. ábrán látható.

A teljes berendezés egy 18,3 m × 7,3 m alapterületű, előregyártott fémbarakkban nyert elhelyezést a Deer Island-i szennyvíztisztító-telep területén. A berendezés sematikus vázlatát a 2. ábra mutatja.



1. ábra. 0,5 MeV, 1,0 MeV és 2,0 MeV energiájú elektronok behatolási profilgörbéje. Az ábrán a relatív dóziseloszlás mint a fajlagos céltárgyvastagság függvénye látható, feltüntetve a különböző típusú veszteségeket 1,0 MeV energiájú elektronok 60% igényelt minimális dózisa esetén



2. ábra. A Deer Island-i elektronbesugárzásos szennyiszap-fertőtlenítő berendezés elvi felépítése

Elektrongyorsító felhasználásával kapcsolatos hazai tervek

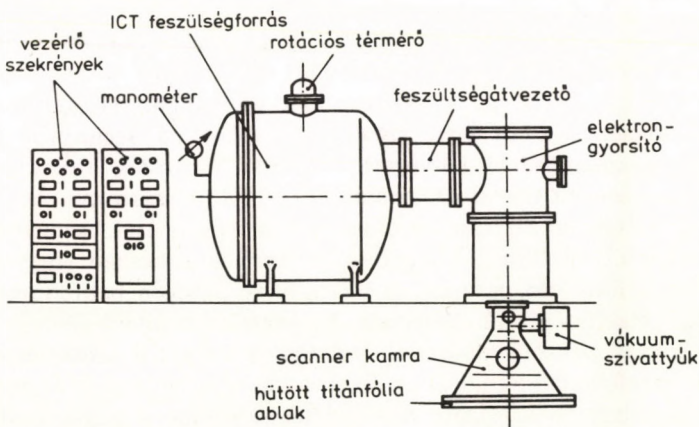
A MÉM megbízásából 1978 nyarán munkacsoport alakult, amely részletes *tanulmánytervet* készített mezőgazdasági, valamint ipari és kommunális eredetű szennyvizek nagy energiájú elektrongyorsítóval való besugárzásos fertőtlenítésére. A tervben javasolt elektrongyorsító a HVEC (Burlington, USA) cég 1 MeV, 75 mA, 75 kW-os Transmission Line Type (Integral „T” System) típusa, amelynek vázlatja a 3. ábrán látható. A készülék besugárzási kapacitása EUE=42,5% esetén 114750 kGy kg/h, vagyis szennyvizekre:

4 kGy esetén 28,70 m³/h, ill. 688,8 m³/24 h;

8 kGy esetén 14,35 m³/h, ill. 344,4 m³/24 h;

10 kGy esetén 11,50 m³/h, ill. 276,0 m³/24 h.

A maximális besugárzási dózis 10 kGy, a vízrétegvastagság 3,0—3,5 mm, az áramló víz sebessége 0,67 m/s. A scannerkamra mérete 1830 mm × 100 mm, a titánablak vastagsága 0,05 mm. A szennyvíz a scannerablak alatt 10—15 cm-re folyik át. A szükséges



3. ábra. A HVEC 1 MeV, 75 kW teljesítményű, Transmission Line Type elrendezésű elektrongyorsítójának elvi vázlatja

sugárvédelmi betonfal vastagsága (normál beton esetén) kb. 1,1 m. A berendezés összes villamosteljesítmény-igénye 4 kGy besugárzási dózissal kb. 80 kW.

A munkacsoport vizsgálatai szerint — járványveszély-helyzete-
ket kivéve — kb. 4 kGy besugárzási dózis alkalmas pl. a sertésrágya
hígfázisában általában jelenlévő fertőző mikroorganizmusok haté-
kony csökkentésére, ill. elpusztítására. A fertőtlenített hígfázis
mezőgazdasági célú *újrafelhasználása* így lehetővé válik (öntözés,
talajerő növelés stb.). Járványveszély esetén a radiorezisztensebb
mikroorganizmusok letális dóziséigénye nagyobb; a javasolt beren-
dezés 10 kGy maximális besugárzási dózisa e kórokozókat is képes
elpusztítani. A tervezett berendezés besugárzási kapacitása akkora,
hogy 4 kGy alkalmazása esetén *megnyugtató módon képes megoldani
egy 50 ezres állományú sertéstelep (pl. Nagytétény) hígtrágya-
fertőtlenítésének problémáját.*

Hazai mikrobiológiai kísérletek

Szennyvizek, szennyiszapok, hígtrágya sugárkezelése

A Phylaxiában 1975-ben kezdtük meg az első mikrobiológiai
jellegű szennyvíz-besugárzási kísérletet az Országos Atomenergia
Bizottság segítségével. Az azóta eltelt időszakban vizsgáltuk a
kecskeméti és a délpesti szennyvíztisztító-telep szennyvíz- és
szennyiszapmintáit (1. táblázat), valamint az ország különböző
sertéstelepeiről (Agárdi ÁG, Bajai ÁG, Hajdúböszörményi ÁG és
Fertői ÁG) vett hígtrágyaminták csíraszámváltozását, besugárzás
hatására (2. táblázat). Vizsgáltuk továbbá a sertésben leggyak-
rabban előforduló patogén, ill. fakultatíve patogén baktériumok
sugárérzékenységét (3. táblázat). Kísérleteinket kiterjesztettük a
besugárzás vírusölő hatásának tanulmányozására is szövettenyé-
szeti vírusfolyadékokban és azokkal mesterségesen fertőzött sertés-
hígtrágyában (4. táblázat). A kísérletekbe azokat a legfontosabb
vírusokat vontuk be, amelyek terjesztésében a sertéshígtrágya
szerepet játszhat.

1. táblázat. Sugárkezelés hatása a szennyiszap mikrobiológiai paramétereire

Vizsgálat	Nyers iszap			Kirohasztott iszap		
	Kontroll	4 kGy	8 kGy	Kontroll	4 kGy	8 kGy
20 °C-on mért baktériumszám/ml	$6,0 \cdot 10^7$	$8,0 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^7$	$3,0 \cdot 10^4$	$8,0 \cdot 10^3$
37 °C-on mért baktériumszám/ml	$8,0 \cdot 10^7$	$3,0 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^4$
Clostridium szám/40 ml	$6,0 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^6$	$6,0 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^4$
Fekál coliform szám/100 ml	$7,0 \cdot 10^8$	$2,0 \cdot 10^3$	22 alatt	$4,0 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^3$	$5,0 \cdot 10^2$
Fekál streptococcus szám/100 ml	$5,2 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^3$
Pseudomonas aeruginosa szám/100 ml	$1,0 \cdot 10^5$	22 alatt	22 alatt	$1,6 \cdot 10^4$	22 alatt	22 alatt
Enterális fájerősség 10 ml-ben	90/3	14/3	8/3	60/2	4/2	1/1
Salmonella pozitivitás 100 ml-ben	pozitív	negatív	negatív	pozitív	negatív	negatív

2. táblázat. Gamma-besugárzás hatása a hígtrágya csíraszennyezettségére (csíraszám/ml-hígtrágya)

Mikroorganizmus	Sugárdózis, kGy				
	0	1	2	4	8
Összcóra (aerob)	$7,0 \cdot 10^7$	$2,4 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^5$	10^3
Összcóra (anaerob)	$2,0 \cdot 10^8$	$5,0 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^4$	10^4
Coliform	$4,6 \cdot 10^4$	—	—	—	—
Staphylococcus	$1,1 \cdot 10^3$	—	—	—	—
Enterococcus	$1,8 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^2$	—	—
Lactobacillus	$2,3 \cdot 10^7$	$6,0 \cdot 10^4$	$4,0 \cdot 10^3$	—	—
Aerob spórás	10^4	$8,0 \cdot 10^2$	$4,0 \cdot 10^2$	—	—
Clostridium (vegetatív)	$1,6 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^5$	$8,4 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$5,4 \cdot 10^3$
Clostridium (spórás)	$1,6 \cdot 10^5$	$6,0 \cdot 10^3$	$3,8 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^2$
Gomba	$4,5 \cdot 10^3$	$7,0 \cdot 10^2$	$3,0 \cdot 10^2$	—	—

— negatív tenyésztési eredmény

3. táblázat. Sugárkezelés hatása a sertéshigtrágyában előforduló pathogén, ill. fakultatíve pathogén mikroorganizmusokra

Mikroorganizmus	Kontroll csíraszám	Sugárdózis, kGy				
		1	2	3	4	7
<i>Erysipelothrix rhusiopathiae</i>	$3,0 \cdot 10^4$	—	—	—	—	—
<i>Staphylococcus aureus</i>	$5,0 \cdot 10^{12}$	$3,5 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^1$	—	—	—
<i>Str. pyogenes animalis</i>	$1,0 \cdot 10^{12}$	$2,3 \cdot 10^3$	—	—	—	—
<i>Salmonella cholerae suis</i>	$4,0 \cdot 10^{13}$	$3,2 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^2$	—	—	—
<i>Escherichia coli</i>	$3,5 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^1$	—	—
<i>Pasteurella haemolytica</i>	$2,0 \cdot 10^{12}$	$2,7 \cdot 10^2$	—	—	—	—
<i>Pasteurella multocida</i>	$5,0 \cdot 10^{10}$	$3,4 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^1$	—	—	—
<i>Listeria monocitogenes</i>	$5,0 \cdot 10^3$	$5,0 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^2$	—	—	—
<i>Brucella suis</i>	$1,9 \cdot 10^5$	—	—	—	—	—
<i>Corynebacterium pyogenes</i>	$7,0 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^1$	—	—	—	—
<i>Bac. anthracis</i>	$5,0 \cdot 10^8$	$3,0 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^2$	—	—
<i>Mycopl. hyorhinis</i>	$3,0 \cdot 10^4$	—	—	—	—	—
<i>Clostridium perfringens</i>	$5,0 \cdot 10^9$	$4,0 \cdot 10^8$	$2,8 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^3$	$3,8 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^2$
<i>Actinomyces bovis</i>	$3,0 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^2$	—	—
<i>Asp. fumigatus</i>	$3,0 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^2$	—	—
<i>Mycobacterium fortuitum</i>	20—30	+++	++	+	0	—
<i>Mycobacterium avium</i>	20—30	(+++)	++	+	0	—
<i>Mycobacterium bovis</i>	(+++)	+++	++	++	0	—

+ látóterenkénti csíraszám

0 sem antigén hatást, sem növekedést nem tapasztaltunk a szerológiai és biológiai vizsgálatok során

4. táblázat. Sugárkezelés hatása a vírusok infektivitására
($10g_{10}TCID_{50}/0,1\text{ ml}$)

Vizsgált vírusok		Kontroll	Sugárdózis, kGy		
			10	20	30
PEV-1	Extracelluláris vírus	7,5	2,5	0,5	0,5
	Intracelluláris vírus	7,5	2,5	0,5	0,5
SVDV	Extracelluláris vírus	8,5	—	3,0	1,25
	Intracelluláris vírus	8,5	—	4,0	1,25
	Sertéshigtrágyában vizsgált vírus	8,0	—	6,0	1,0
FMDV	Extracelluláris vírus	6,0	—	2,0	0,5
	Intracelluláris vírus	5,5	—	0,5	0,5
	Sertéshigtrágyában vizsgált vírus	5,0	—	0,5	0,5
ADV	Szövettenyésztési vírus	7,0	—	0,5	0,5
	Sertéshigtrágyában vizsgált vírus	6,5	—	0,5	0,5
TGEV	Szövettenyésztési vírus	6,5	—	0,5	0,5
	Sertéshigtrágyában vizsgált vírus	5,0	—	0,5	0,5
BVDV	Szövettenyésztési vírus	5,5	—	0,5	0,5
	Sertéshigtrágyában vizsgált vírus	6,5	—	0,5	0,5

Mivel a higtrágyában baktériumokon és vírusokon kívül igen nagy számban fordulnak elő a különféle paraziták fertőző stádiumai is, ezért a paraziták sugárérzékenységét is tanulmányoztuk. Vizsgálatainkhoz *Ascaris suum* petéket és lárvákat alkalmaztunk.

A mikrobiológiai és parazitológiai vizsgálatok elvégzésében — kutatási szerződések keretében — a Fővárosi KÖJÁL, az Állatorvostudományi Egyetem Állathigiéniai Tanszéke, valamint az Országos Állategészségügyi Intézet szakemberei vettek részt. Az eredmények röviden az alábbiakban foglalhatók össze: A kommunális eredetű szennyvízben és szennyiszapban megtalálható *enterális kórokozók* (*Salmonella shigella*, entero-patogén *E. coli* és egyéb bélbaktériumok) már 4 kGy dózis hatására elpusztulnak. A sugárkezelés ugyancsak hatásos a humán- és állategészségügyi szempontból egyaránt veszélyes *Pseudomonas aeruginosa* eltávolításában. A *sugárrezisztens baktériumok* (*Clostridium* és fekálstreptococcusok), valamint a vírus természetű enterális fágok azonban még 8 kGy dózis mellett is kimutathatók.

A hígtrágyaminták besugárzása során kapott eredményekből azt a fő következtetést vonhatjuk le, hogy már 4 kGy sugárdózis elpusztítja (Clostridiumok kivételével) az étel- és takarmánymérgezésben szerepet játszó mikroorganizmusokat. A vírusokkal végzett vizsgálataink arra utalnak, hogy csak 30 kGy sugárdózis biztosítja a vírusokkal (SVD-vírus, FMD-vírus) fertőzött sertés-hígtrágya biztonságos fertőtlenítését.

A *parazitológiai vizsgálatok* során megállapítottuk, hogy már 3 kGy dózisú sugárkezelés hatására is mind a lárvatartalmú, mind pedig a barázdálatlan orsóféreg peték egyaránt elpusztulnak a hígtrágyában.

Takarmányok és takarmány-alapanyagok sugárkezelése

A takarmányok és takarmány-alapanyagok sugárkezelésével kapcsolatos kutató munkánk két fő irányában folyt; egyrészt vizsgáltuk különböző toxintermelő gombákat tartalmazó takarmánygabonák gamma-besugárzással történő fertőtlenítésének lehetőségét, ill. a toxintermelődés alakulását besugárzás hatására, másrészt különböző raktári rovarkártevő fajok sugárérzékenységét tanulmányoztuk.

A minták vizsgálatát és a sugárhatás értékelését az Országos Állategészségügyi Intézet, a MÉM Növényvédelmi és Agrokémiai Központ, valamint a Borsod megyei Növényvédelmi és Agrokémiai Állomás szakembereivel közösen végeztük el.

Toxintermelő gombákkal fertőzött takarmánygabonák sugárkezelése

Gabonaféléink, így elsősorban a búza és kukorica szemtermését különféle gombafajok károsítják, amelyek részben elhasználják a takarmányok tápanyagainak jelentős részét, rontva azok tápértékét, másrészt különböző toxinokat termelnek, amelyek a takarmánnyal az állatok szervezetébe kerülnek és ott mérgezéseket, mikrotoxikózisokat okoznak. Fusarium fajok, így elsősorban a Fusarium graminearum és a Fusarium culmorum — a kukorica csöpenészesedés fő okozója — fusariotoxikózist váltanak ki a

tenyészállatoknál. A gazdasági kár csökkentésére a mezőgazdasági üzemek különféle módszereket alkalmaznak, de ezek nem bizonyultak eléggé hatékonyaknak, sőt egyes esetekben csökkentették a takarmányok vitamintartalmát és a fehérjék emészthetőségét. A toxintermelő gombák elleni védekezés megoldatlansága vetette fel az ionizáló gamma-sugárzás gombaölő hatásának kipróbálását fertőzött takarmánygabonákon.

Fusarium gombákkal mesterségesen befertőzött szemeskukoricamintákat kezeltünk gamma-sugarakkal. Meghatároztuk a gomba előléséhez szükséges sugárdózisokat, valamint a minták F-2 toxin-tartalmát. A besugárzás hatását a takarmány tápértékére takarmány-analízissel ellenőriztük.

Vizsgálati eredményeink szerint a *fusarium gombák* előléséhez 10 kGy sugárdózis szükséges. Az F-2 toxin változatlan mennyiségben kimutatható volt sugárkezelés után is, sőt nagy dózisintenzitás (5 kGy/h) alkalmazásakor az F-2 toxin mennyisége megnőtt a sugárkezelt mintákban.

A raktározás során jelentkező gombakártevők közül az ochratoxint termelő *Aspergillus ochraceus* és a patulin toxint termelő *Penicillium urticae* gombák sugárérzékenységét és a termelt toxin mennyiségét vizsgáltuk. A vizsgálati adatokból az alábbi következtetések vonhatók le:

Sugárkezelés hatására a *Penicillium urticae* gombaspórák száma, az alkalmazott dózisok nagyságától függően (5, 10, 15 kGy), 2—4 nagyságrenddel csökkent. Az *Aspergillus ochraceus* spórákat már 5 kGy dózissal történt besugárzás után sem lehetett visszatenyészteni; úgy tűnik, hogy ez a gomba rendkívül sugárérzékeny.

A besugárzott minták toxintartalma az alkalmazott dózisintenzitások (2,5 kGy/h, 4 kGy/h, 5 kGy/h) függvényében változott. A patulin toxin mennyisége a kezeletlen kontrollmintához viszonyítva megnőtt, a növekedés mértéke 5 kGy/h dózisintenzitás esetében volt a legnagyobb. Az *Aspergillus ochraceus* gomba által termelt ochratoxin-A mennyiségét besugárzás után nem tudtuk meghatározni, mivel a sugárzás a gombaspórákat teljesen előlte.

Összegezve a toxintermelő gombaféleségek sugárkezelése során szerzett tapasztalatainkat megállapíthatjuk, hogy a vizsgált gombák érzékenysége gamma-sugárzásra tág határok között

változik. Általában 10—15 kGy sugárdózis szükséges a gombák biztonságos elöléséhez, de egyes gombafajok (mint pl. az *Aspergillus ochraceus*) már 5 kGy dózis hatására is elpusztulnak.

A besugárzott minták toxintartalma elsősorban a dózisintenzitás függvényében változott. 5 kGy/h dózisintenzitást alkalmazva még a csekélyszámú túlélő gombák is intenzíven termelnek toxint. Irodalmi adatok szerint az egészen nagy dózisok kivételével besugárzás hatására az élelmiszerek, takarmányok tápértéke nem változik meg kedvezőtlen irányban. Kísérleteinkben elvégeztük a 10 kGy dózissal kezelt kukoricaminták analizisét. A kapott mérési eredmények azt mutatják, hogy a besugárzás nem okoz tápértékcsökkenést, így várható, hogy üzemi eljárás esetén sem kell értékcsökkenő hatással számolnunk.

Raktári rovarkártévek sugárkezelése

Mezőgazdasági terményeinket a raktározás és tárolás során a raktári kártevők jelentős mértékben károsítják. A kár mértéke 5—20% között változhat, ezért a szántóföldi aktív védekezés mellett a tárolt anyagokban élőködő raktári kártevők elpusztítása igen fontos népgazdasági feladat. A rovarkártévek ellen jelenleg is alkalmazott eljárásnak, a mérgező anyagokkal való kezelésnek több hátránya van; szennyezi a környezetet, káros vegyi anyagok maradnak vissza, veszélyt jelent a kezelő személyzetre stb. Emellett nem is mindig hatékony a magvak belsejében élő kártevőkre. Ezek a körülmények indokolják azt a hatalmas munkát, amelyet az utóbbi 10—15 évben több országban (köztük elsősorban a Szovjetunióban) a gabona besugárzással való rovartalanításába fektettek. Ez az új technika alkalmas arra, hogy a raktározott termény és a környezet szennyezése nélkül fertőtlenítsen.

1978-tól vizsgáljuk a gamma-sugárzás hatását különféle raktári kártevőkön. Vizsgálatainkhoz szakszerűen fenntartott rovartenyészeteket alkalmaztunk és a rovarok különböző fejlődési alakjain végeztük el a sugárkezelést. A vizsgált kártevők jelentős része besugárzás után 16—20 nappal elpusztult. A rovarok különböző fejlődési stádiumai eltérően viselkednek besugárzás hatására, általában a fejlődés korai szakaszában a sugárzásnak jobban

ellenállnak, mint kifejtett korokban. Az irodalmi adatokkal megegyezően azt tapasztaltuk, hogy 100—200 Gy dózis alkalmas a gabona rovarirtására. Összehasonlítottuk az elektrongyorsítóval és ^{60}Co -izotóppal történő besugárzás biológiai hatását. A gyorsított elektronok rovarkártévkre gyakorolt hatása a vizsgálatok szerint megegyezik az azonos dózisu gamma-sugárzás hatásával.

Irodalom

1. SIMONYI K.: Elektronfizika. Tankönyvkiadó, Budapest, 1965.
2. JÁNOSSY L. és mtsai: Atommaglexikon. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1963.
3. DR. GONDÁR J.: Sugárenergiák élelmiszeripari alkalmazása. Műszaki Fejlesztés, OMFB tanulmány.
4. KLOPPER E.: Útjelentés az Amerikai Egyesült Államokba való kiküldetéséről. Budapest, 1978.
5. R. C. WEAST.: CRC Handbook of Chemistry and Physics. 53th Edition. CRC Press, Cleveland, Ohio, USA, 1972—73.
6. Radioizotópok sugárzása elleni védelem. Magyar Népköztársasági Országos Szabvány, MSz 62-69 (1969. júl. 10).
7. Az alapvető fizikai állandók számértékei. A IUPAP „Comission on Nuclidic Masses and Related Atomic Constants” Bizottság 1962. június 24-i jelentés, E. R. COHEN és J. W. DUMOND számításai alapján.
8. Átszámítási tényezők. Az Atomtechnikai Tájékoztató 5/9 számának melléklete.
9. SI Nemzetközi Mértékegység Rendszer (Système International d’Unités). Országos Mérésügyi Hivatal kiadványa, Budapest, 1978.
10. High Voltage Engineering Corporation, Burlington, Mass.: The Place of the Particle Accelerator in Research.
11. High Voltage Engineering Corporation, Burlington, Mass.: The Handbook of High Voltage Electron Beam Processing.
12. High Voltage Engineering: The Industrial Electron Processing System.
13. High Voltage Bulletin: Fast Electrons, what can they do for you?
14. High Voltage Engineering Europe B. V.: The Handbook of Electron Beam Processing by P.J.C.A. Simonis, Vol. IND-001 (HVE Europa B.V.)
15. High Voltage Engineering Europa B.V.: Condensed Catalogue.
16. High Energy Electron Radiation of Wastewater Liquid Residuals. A Report to the U.S. National Science Foundation by the M.I.T., Cambridge, Mass. 02139, USA (Dec. 31. 1977).
17. R. ELIASSEN: Sludge Management by High-Energy Electron Irradiation Priorer Land Application State of the Art. Reprinted from the Journal of the Boston Society of Civil Engineers Section American Society of Civil Engineers 64 (1977).
18. It may be sludge to you. . . , The American City and Country, July 1978. pp. 49—51.

19. Sewage Sludge Could Someday Help to Put Dinner on Your Table. The Advocate (Conn. Newspaper Inc.) 150th Year No. 121. August 29, 1978. Stanford, Conn., USA.
20. Sludge Management by Subsurface Injection. Engineered Systems for Disposal or Beneficial Use. Briscoe Maphis Environmental, Boulder, Colorado 80302, USA.
21. BBC Brown Boveri et Cie.: Verfahrensvorschlag und Angebot NR. 8009. Abwasser Nachbehandlung, Hygienisierung von Schweineguelle mit Elektronenstrahlen (Project Fertoed), 1978.
22. BBC Brown Boveri et Cie.: Water and Environmental Pollution Control. Hygienization of Sewage Sludge by Electron Irradiation, Publication No. CH-XW 040013 E.
23. J. LENSCHOW—J. MEIER: Betriebsanalysen mit BBC-drainocar in Kläranlagen. BBC-Nachrichten, No. 2 1978. Jahrgang 60, pp. 73—80.
24. J. SIMON—F. GÁCSI—A. URBÁN: The waste water and sludge reuse project by gamma irradiation at Kecskemét, Hungary IAEM-SM-194/603. IAEA Proceedings, 1975 pp. 411—417.
25. J. SIMON—G. TAMÁSI: Data on the disinfection of liquid manure by gamma irradiation at Baja, Hungary IAEA-SM-194/306. IAEA Proceedings, 1975, pp. 209—216.
26. J. SIMON—E. SÓLYOM—V. FELKAI—P. OROSZLÁNY: ESNA Proceedings Radiati-on for pollution abatement, 1976, pp. 39—42.
27. A szennyvíz sugárkezelése és a környezetvédelem. Magyar Mezőgazdaság, XXX (1975) 15—16.
28. A sugármutációtól a szennyvíztisztításig. Delta 1977, 6. szám, 12—15.
29. J. SIMON—M. DI GLERIA: Radiation for control of environmental pollution. Proceedings of the third international conference of ESNA Working Group on „Waste Irradiation”, Brno, Czechoslovakia, Sept. 4—9, 1978.
30. J. SIMON—M. DI GLERIA—GY. SZEMERÉDI: Irradiation of liquid manure for the purpose of utilization in agriculture. Proceedings of an international workshop of ESNA Working Group on „Waste Irradiation”, Hannover, 2—4 May, 1979.
31. DI GLERIA M.—BECÁSSY GY.-né—SZEMERÉDY GY.: „A besugárzástechnika gyakorlati alkalmazásának lehetőségei a mezőgazdaságban és az élelmiszeriparban” c. szimpózium, Budapest, 1979. Szimpózium Közlemény, Budapest, 1979, pp. 97—104.
32. BÁNKI GY.—VARGA GY.—DI GLERIA M.: „A besugárzástechnika gyakorlati alkalmazásának lehetőségei a mezőgazdaságban és az élelmiszeriparban” c. szimpózium, Budapest, 1979. Szimpózium Közlemény, Budapest, 1979, pp. 74—79.
33. SIMON J.—DI GLERIA M.—KLOPPER E.: ATOMKI Közlemények 22 (1980) melléklet. Gyorsítók népgazdasági alkalmazása. MTA Atommagkutató Intézete, Debrecen, 1980, pp. 28—37.
34. FÉSŰS I.—DI GLERIA M.—KIENITZ K.-né—MELIS M.: „A besugárzástechnika gyakorlati alkalmazásának lehetőségei a mezőgazdaságban és az élelmiszeriparban” c. szimpózium, Budapest, 1979. Szimpózium Közlemény, Budapest, 1979, pp. 57—64.

35. J. SIMON—M. DI GLERIA—E. SZILÁGYI—Á. SZALMA: Gamma radiation effects on some insect species of stored products. ESNA Proceedings of the ESNA Conference 1980. 25—29. Aug. Debrecen, Hungary.
36. JU. ANDRJUNYIN: Problemü Vet. Szan. 1973. VNIIVSZ.
37. E. HESS: Zbl. Bakt. Hyg. I. Abt. Orig. B. **161** (1976) 54.
38. G. A. ZAKLADNOJ—F. SZ. PERCOVSKIJ—SZ. M. SZAVCSENKO: Izotóptechnika **21** (1978) 275.
39. SIMON J.—AUXNER E.—SZIGETI F.—SZEMERÉDI GY.—ABELOVSZKY L.—KLOPPER E.: TANULMÁNYTERV (Feasibility Study) mezőgazdasági, valamint ipari és kommunális eredetű szennyvizek nagyenergiájú elektrongyorsítóval való besugárzásos fertőtlenítésére. MÉM megbízás alapján készítette a PHYLAXIA Oltóanyag- és Tápszertermelő Vállalat, Budapest, 1978.
40. KLOPPER E.: „A besugárzástechnika gyakorlati alkalmazásának lehetőségei a mezőgazdaságban és az élelmiszeriparban” c. szimpózium, Budapest 1979. Szimpózium Közlemény, Budapest 1979, pp. 113—123.

Élelmiszertartósítás és minőségfejlesztés ionizáló sugárzással

Vas Károly

Központi Élelmiszeripari Kutató Intézet, Budapest

Az emberiség két fő problémája manapság az energia- és az élelmiszerprobléma. A kettő közül nyilván az élelmiszerkérdés a primer, mert ha az életben maradás nem oldható meg, a többi problémával már nem is kell és nem is lehet foglalkozni. Világszerte éhínséggel találkozunk, sok száz millió éhező, ill. rosszul táplált ember tengeti életét főleg az ún. fejlődő országokban, és — ezzel párhuzamosan — hatalmas mennyiségű élelmiszer megy tönkre minden államban rossz készletgazdálkodás, tárolás, elosztás, fogyasztói szokások miatt. A helyzeten rendszerint a mezőgazdasági termelés növelésével igyekeznek változtatni az illetékesek, és ritkán, ill. másodlagosan gondolnak arra, hogy nagyobb erőfeszítést kellene kifejteni az egyszer már nagy anyagi, emberi munka- és energia-ráfordítással megtermelt élelmianyag hosszabb ideig való eltarthatóságának biztosítására. Pedig kézenfekvő, hogy a tárolás és tartósítás javításával csökkenteni lehetne azt a veszteséget, mely a romlásból eredő közvetlen energiapazarlásból és a termelésbe fektetett, felesleges energiainvesztícióból adódik.

Az élelmiszertárolás és -tartósítás világméretű fontosságára újabban az ENSZ-Egyetem (United Nations University) oktatási-kutatási programkijelölése is felhívta a figyelmet. E felismerés terjedése természetesen magával hozza a megoldás módozatainak vizsgálatát is. A feladat megközelítése főleg két úton képzelhető el: kémiai vagy fizikai módszerekkel. Az előbbi, a vegyszerek, tartósítószeres adagolása újabban egyre népszerűtlenebb lesz, miután egyre több vegyszerről derül ki, hogy rákkeltő, vagy egyéb, egészségre

káros hatást fejt ki. Ideálisabbnak tűnik a fizikai tartósítás elve. E téren eddig a hőközlés (főzés, sütés) és a hőelvonás (hűtés, fagyasztás, gyorsfagyasztás) módszerei voltak elterjedve.

Újtípusú fizikai tartósítási eljárás a most induló új módszer, mely ionizáló sugárzásokkal tartósítja az élelmiszert fiziológiai változások (pl. burgonya-, hagymakihajtás), mikrobiológiai romlás (pl. rothadás, penészesedés), valamint egészségügyi károsodást létrehozó mikroorganizmusok megtelepedése és elszaporodása ellen.

Az élelmiszerbesugárzás előnyei:

- a) nem növeli számottevően az élelmiszer hőmérsékletét és ezzel megkíméli a káros érzékszervi elváltozásoktól (túlfőzés, puhulás stb.), és lehetővé teszi vizskózus anyagok (pl. datolya, sűrítmények, szárított gyümölcsök stb.) kezelését;
- b) nagyobb egyedekből álló termények belsejébe is behatol, és ott el tudja ölni a károsító szervezeteket (mint pl. egy nagyobb gyümölcsben levő rovar);
- c) csomagolt termék is kezelhető vele, s így elkerülhető a kezelés utáni újrafertőződés;
- d) energiaszükséglete kicsi;
- e) nem hagy a terméken vegyszermaradványt.

Az élelmiszerbesugárzás hátrányos vonása, hogy — mint minden fizikai eljárás — ez is beruházásigényes, és így csak egy bizonyos termelésivolumen-küszöbérték fölött lehet gazdaságos. Elterjedésének másik gátja az a tény, hogy olyan időben született, amikor minden új eljárás csak nagyon alapos egészségügyi kivizsgálás után kerülhet bevezetésre. Ez a kivizsgálás nemcsak igen költséges, hanem igen időigényes is.

Néhány fontosabb alkalmazási lehetőség a következőkben sorolható fel:

Burgonya, hagyma kihajtása („csírázása”), gabona csírázása kis dózissal (0,02—0,08 kGy ~ 2—8 krd) irreverzibilisen megakadályozható. Gyümölcsök érése lassítható, gombák kalapkinyílása megakadályozható viszonylag kis, vagy közepes dózisokkal (0,5—3,0 kGy ~ 50—300 krd).

Gabona (búza, rizs, kukorica stb.), borsó, bab, kakaó, zöldség-, gyümölcs-szárítmányok rovarfertőzése elpusztítható (0,2—1,0 kGy

~20—100 krd) a silókba töltést közvetlenül megelőzően vagy rovarbiztos zsákokba, csomagokba zárás után. Friss gyümölcsök, zöldségek rovarfertőzésének tovaterjedése megakadályozható (0,2—1,0 kGy ~20—100 krd) a termény belsejében levő peték vagy a felületén levő rovarok inaktiválásával, aminek különösen a nemzetközi kereskedelmi növényvédelmi zárszolgálat (karantén) szempontjából volna igen nagy jelentősége. Húsokon élő paraziták (pl. trichinella ~ borsóka) hasonló dózistartományban életképtelenné tehetők.

Fűszerek és más természetes ételadalékok mikrobás szennyezettsége jelentősen csökkenthető közepes dózisokkal (3—10 kGy ~300—1000 krd), s ezzel az érintett alapélelmiszerek romlása redukálható, ill. sterilizációs hőszükséglete leoszorítható.

Romlékony, nagy víztartalmú élelmiszer-alapanyagok, félkész- és késztermékek (nyers hús, darált hús, hal, készételek stb.) eltarthatósági ideje jelentősen növelhető (1—10 kGy ~100—1000 krd).

Élelmiszerek ételmérgezést okozó mikroflórája (*Salmonella* baktériumok stb.) kiküszöbölhető (1—5 kGy ~100—500 krd), és így azok higiénés állapota javítható még akkor is, ha a termék fagyasztott állapotban van (pl. fagyasztott tojáslevegő, baromfiús).

Nagyobb dózisokkal (3—20 kGy ~300—2000 krd) szárítmányok főzhetősége javul, ami a főzési energiaszükséglet csökkenéséhez vezethet.

A gyümölcsökből (pl. szőlő) préselhető lé aránya növelhető közepes dózisokkal.

Maga az eljárás abból áll, hogy a csomagolt (vagy csomagolatlan) élelmiszert az ionizáló sugárzást kibocsátó sugárforrások hatásának tesszük ki. A gyakorlatban ez a sugárforrás lehet radioaktív izotóp (^{60}Co vagy ^{137}Cs), vagy 3—10 MeV-os elektronokat termelő gépi sugárforrás, esetleg nagy energiájú röntgenkészülék. Egészségügyi szempontból a 10 MeV energiaszint alatti sugárzásokat lehet csak engedélyezni, miután ebben a tartományban másodlagos sugárzást kibocsátó anyag nem keletkezhet észrevehető mértékben az élelmiszerben.

A sugárzásnak való egyenletes kitétel az, ami a berendezés komplikáltságát involválja. Rendszerint kétoldalról egyszerre vagy egymás után történő sugárexpozíciót kell megvalósítani. Izotópos

sugárforrás esetén ez eléggé bonyolult szisztémák szerint történhet, folytonos vagy ugrásszerű (lépteteses) mozgattal. Elektron-gyorsítóknál futószalaggal oldható meg a dolog, vagy vékony rétegben, függönyszerűen áramoltatható besugárzandó anyag (pl. gabonafélék, lisztek) esetén a haladási irányra merőlegesen egy vagy két oldalról történő sugáralkalmazással. A besugárzásnál fontos, hogy az élelmiszertétel különböző pontjai közel azonos dózist nyeljenek el, ezért a technológiai berendezés kialakításának egyik alapvető szempontja a dózisegyenletesség (uniformity ratio: $U = \bar{D}_{\max} / \bar{D}_{\min}$) biztosítása (\bar{D}_{\max} és \bar{D}_{\min} azoknak a maximális és minimális dózisértékeknek a középértékei, melyeket egy-egy gyártási tétel rendszeres dózismérése során a tétel különböző részein elhelyezett doziméterek mutatnak). Az elektronsugarak viszonylag gyenge behatolóképeségére tekintettel, gyorsító sugárforrás esetén az U minél kisebb értéken tartására különös gonddal kell ügyelni.

Bár a világ sok intézetében működik elektrongyorsító élelmiszerbesugárzási célokra kísérleti (laboratóriumi) szinten, ipari alkalmazásra eddig még csak ^{60}Co -töltetű besugárzó került: Japánban burgonyát kezelnek vele. Olaszországban burgonya, hagyma és fokhagyma besugárzására szolgáló üzem létesítése folyik.

Nagyobb arányú élelmiszerbesugárzásra készülnek Mexikóban, ahol egy Radiation Dynamics gyorsító felszerelése folyik kukoricarovartalanítás céljaira. 200 t/h kapacitással (0,2—1,0 kGy ~20—100 krd dózis szinten, azaz 111—556 kGy kg/s ~40—200 kGy t/h ~4—20 Mrd t/h besugárzási kapacitással).

Nagyméretű kísérletezés folyik a gabonabesugárzás terén a Szovjetunióban, ahol a novoszibirszki Akagyemgorodok-ban a SZUTA Szibériai Részlegének Magfizikai Intézetében készült ELV-3 jelű gyorsítóval 1977-ben az Össz-Szövetségi Gabonaiipari Tudományos Kutató Intézet novoszibirszki fiókinézete 1200 t gabonát mentesített raktári kártevő rovaroktól, és ahol 1978-ban létrehoztak egy 200 t/h kapacitású gabonabesugárzó telepet. Az ELV-sorozat tagjai kedvező méretűek (2,8 m magasság, 1,6 m átmérő), az ELV-3 energiatartománya 0,4—0,7 MeV, az elektronnaláb 50 kW-os.

Gyakran tárgyalja az irodalom a két fő sugárforrás, az izotópos (gamma-sugaras) és az elektrongyorsító berendezések élelmiszerkezelésre való alkalmasságának kérdését. Általánosságban az állapítható meg, hogy kisebb kapacitásigény esetén (gabonánál pl. 20 t/h) a gamma-sugárzás alkalmazása célszerű, nagyobb üzemnél (pl. 200—400 t/h) viszont az elektronsugaras berendezés a gazdaságosabb. Az igénynek megfelelő berendezéssel dolgozva, a besugárzási költségek kb. azonosak a kétféle készüléktípusnál, és mindkét esetben a kezelt termék kereskedelmi értékének néhány %-át teszik ki, ami a 10—50%-os romlás lehetőségével szembe állítva, feltétlenül pozitív mérleggel záruló kezelésre vall.

Figyelembe véve azt a hatalmas élelmiszer mennyiséget, melynek tartósítására és minőségjavítására besugárzást lehetne és kellene alkalmazni, megállapítható, hogy a gyorsítók élelmiszeripari alkalmazása valóban érdekes, népgazdasági szempontból igen jelentős kutatási és fejlesztési feladat.

Elektronsugárzás a műanyagiparban

Dobó János

Műanyagipari Kutató Intézet, Budapest

A sugárkezelt termékek összértéke világpiaci viszonylatban megközelíti az évi 2 milliárd dollárt. Ennek a termékmennyiségnek legalább 75%-a a műanyagok előállítására és módosítására esik, ideértve a műkaucsukot, a műanyagfelhasználó lakk- és textilipart is. A maradék 25% túlnyomó része sugársterilizált műanyag. Az ipari sugárkémia tehát még mindig lényegében műanyagipari sugárkémiai jellegt. A mintegy 1,5 milliárd dollárt több száz sugárkémiai üzemegység termeli meg úgyszólván kizárólag elektromos sugárforrással, közel százféle technológiával [1, 2].

Mivel magyarázható a műanyagipar kiváltságos helyzete a sugárkémiaiában? Nézzük a dózisszükségletet. Az ismert képlet szerint a kémiai reakciók dózisszükséglete:

$$D = \frac{6 \cdot 10^{23} \cdot 100}{G \cdot M} \text{ eV/g} \sim \frac{10^7}{G \cdot M} \text{ kGy},$$

ahol G a sugárkémiai hozam, M a molekulatömeg. Ha egy egyszerű szerveskémiai reakcióban $G=1$ és $M=100$, úgy

$$D = 10^5 \text{ kGy}.$$

A polimerkémiaiában kétféle reakcióval van dolgunk:

1. *Polimerek átalakítása.* A polimerek, mint ismeretes, nagymolekulájú anyagok; pl. $M = 10^5$, így

$$D = 100 \text{ kGy}.$$

2. *Polimerizáció.* A polimerizáció láncreakció, tehát $G = 10^4$ és így

$$D = 10 \text{ kGy.}$$

Korszerű elektrongyorsítók alkalmazása esetén 1 kWh sugárenergia költsége 1 \$ körül van. Miután $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ kGy kg}$, 50%-os sugárhasznosítással számolva az egyszerű szerveskémiai reakciókhoz szükséges 10^5 kGy dózis költsége 56 \$/kg, amit a legtöbb kémiai szintézis nem bír el. A fenti szemléltető számítás szerint a polimerek átalakításához szükséges 100 kGy és a polimerizációhoz szükséges 10 kGy költsége viszont 6 cent/kg, ill. 0,6 cent/kg, ami nem haladja meg a szokásos kémiai vagy feldolgozási műveletek költségigényét.

A kis dózisigény és az ezzel együttjáró kis költség természetesen csak szükséges, de nem elégséges feltétele a sikernek; a konkrét lehetőséget a műanyagok alkalmazásának sokfélesége nyújtja, ami a tulajdonságok vagy a technológia egyedi sajátosságai útján használható ki. Nézzük meg ezért a probléma másik oldalát: milyen előnyt jelenthet az elektronsugárzás alkalmazása a műanyagipar számára?

A nagy energiájú sugárzás és az anyag kölcsönhatásában, mint ismeretes, elsődlegesen ionok, a rekombináció és gerjesztés nyomán pedig másodlagosan szabad gyökök keletkeznek. Kémiai reakciót kiválthatnak mind az elsődleges ionok, mind pedig a másodlagos szabad gyökök, ipari jelentőségre azonban eddig kizárólag a szabad gyökös reakciók tettek szert. A műanyagkémiaiában is a szabad gyökös iniciátorokhoz — például peroxidokhoz — hasonló szerepet játszik a sugárzás.

Az etilénpolimerek peroxidokkal történő térhálósítása nagy jelentőségű ipari eljárás: elsősorban azért alkalmazzák, mert a térhálósítás következtében a hőre lágyuló műanyag nem olvadó, magas hőmérsékleten is jelentős szilárdságú háromdimenziós óriásmolekulává válik. A térhálósítandó műanyagok megalakítását rendszerint összekötik a peroxidok termikus elbontásával. Ez egyes esetekben, például formadarabok fröccsöntésénél előnyös is lehet, miután a műanyag megömlésztéséhez szükséges hő egészében vagy nagyobb részben fedezi a peroxid elbontásához szükséges hőt is. Vékony fóliák, csövek és habok térhálósításánál

viszont rendkívül kényes feladat a peroxid bomlásának és ezzel a térhálósodás folyamatának egy rövid időközre való korlátozása. Ha a bomlás túl korán, már az extrudáló gépben végbemegy, az anyag a gépbe beáll; ha viszont késik a térhálósodás, akkor deformálódik a vékonyfalú, még nem térhálós termék. A sugárzásos térhálósításnál ezzel szemben különválasztható a formázás és a térhálósítás, miután az utóbbi hidegen történik; a sugárzás kontrollálhatósága, automatizálhatósága egyenletes termékminőséget biztosít. Egyes termékek, pl. igen vékony fóliák és csövek nem is térhálósíthatók másképpen, csak elektrongyorsítóval.

A másik reakciótypus, a polimerizáció témaköréből itt csupán azzal a kérdéssel foglalkozunk, hogy miért érhető el jelentős sebességnövelés, ha peroxidok helyett sugárzásos iniciálást alkalmazunk.

Mindenekelőtt az elektrongyorsítóval 4—5 nagyságrenddel nagyobb gyökkoncentráció valósítható meg, mint a kémiai iniciátorokkal. Ez a reakció jellegétől függően 2—5 nagyságrenddel nagyobb sebességet jelent. De vajon alkalmazható-e ez a nagy sebesség az ipari gyakorlatban?

A polimerizációs folyamatok sebességkorlátozó tényezője többnyire a reakcióhő elvezetése. Nem egyszerűen arról van szó, hogy az el nem vezetett reakcióhő következtében a reakció az előírtnál magasabb hőmérsékleten játszódik le, hanem a kémiailag, pl. peroxidokkal iniciált polimerizációs reakciók lényegéből következő labilitásról. A polimerizációs reakciók ugyanis egyrészt nagy hőfejlődéssel járnak — adiabatikus körülmények között többszáz fokkal emelkedhet a hőmérséklet — másrészt sebességük gyorsan nő a hőmérséklettel, miután a peroxidok gyökképződéshez vezető bomlása erősen hőmérsékletfüggő. Más szóval nagy a reakcióhő is, az aktiválási energia is. A túlmelegedés következtében gyorsul a polimerizáció, ezért még több hő fejlődik: így a polimerizáció könnyen megszalad, rossz körbe kerül. Az eredmény lehet termikus robbanás, a termék elszenesedése vagy egyszerűen az iniciátor hatástalan elpuffanása.

Amennyiben peroxidok helyett elektrongyorsítóval iniciáljuk a polimerizációt, a bruttó reakcióhő természetesen ugyanannyi. Miután azonban a sugárzásos gyökképződés sebessége nem függ a hőmérséklettől, nem alakulhat ki az öngyorsulás, megszakad a rossz

kör: elektrongyorsítós iniciálással a polimerizáció sokkal nagyobb sebességen is biztonságosan vezethető [3].

Amint látjuk, az elektrongyorsító lehetőséget ad mind a térhálósítás, mind a polimerizáció alkalmazási körének kiszélesítésére.

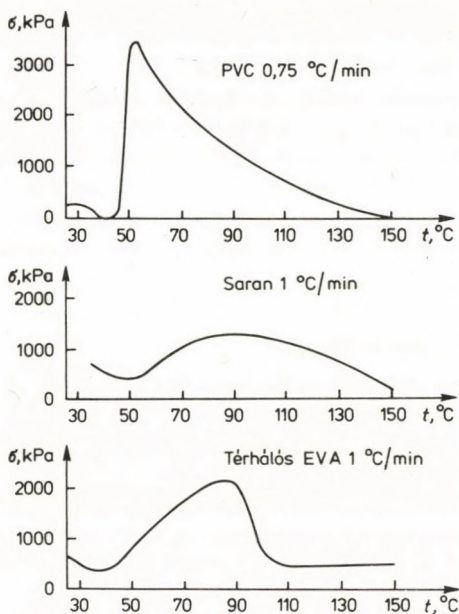
A fenti két alapvető reakciótypust a Műanyagipari Kutató Intézet két kutatási feladatához kapcsolva szeretném bemutatni.

1. *Polimerek átalakítása.* A sugárzásos térhálósítás alapvetően megváltoztatja a polimerek bizonyos tulajdonságait. Az eddigi ipari alkalmazásokban főleg a zsugortulajdonságokat használták ki.

A térhálós etilénpolimerek zsugoranyagként való alkalmazásával foglalkozik e kötetben Baranovics Pál és Szőcs Gyula munkája. A villamosipari zsugorcsonvek mellett a legnagyobb felhasználási terület a vékony csomagoló zsugorfólia előállítás. Zsugorfólia sokféle létezik: a legegyszerűbbek és legolcsóbbak a különféle PVC alapú fóliák. Zsugorerő, hidegállóság és egyéb vonatkozásokban igényesebb zsugorcsonmokolást kíván a mélyhűtött baromfi és egyes országokban a nyers hús. A baromfi és húscsonmokoló zsugorfóliák és tasakok összértéke mintegy 1 milliárd dollár; ennek kétharmada ún. „Saran” típusú, egyharmada pedig a korszerűbb, sugárzással térhálósított termék. Az 1. ábrán a zsugorerőt mutatjuk be, amely háromféle, állandó hosszra befogott zsugorfóliában a hőmérséklet emelésekor ébred. A zsugorerő mérése a hőmérséklet függvényében egyike azoknak a vizsgálatoknak, amelyeket a Műanyagipari Kutató Intézet a zsugortermekek karakterizálása céljából kidolgozott [4].

Amint látható, a PVC-ben igen nagy zsugorerő tárolható: ez azonban már 50 °C körül, sőt tartós tárolás esetén ennél is alacsonyabb hőmérsékleten felszabadul. Továbbá, mind a PVC, mind a Saran 100 °C körül megolvad, irreverzibilisen alakját veszti. A sugárzással térhálósított etilén—vinilacetát kopolimerben viszont a térhálós kötések még igen magas hőmérsékleten is jelentős zsugorerőt biztosítanak.

A hazai baromfiipar évi 1,5 millió \$ értékben használ Saran és térhálós polietilén zsugorcsonmokolást. Intézetünk a Papíriipari Vállalat és a Baromfiipari Tröszt közös megbízásából és velük együttműködve hozzákezdett a térhálós polietilén csomagoló-zsugorfóliák kidolgozásához.



1. ábra. Zsugorfóliákban melegítéskor ébredő zsugorfeszültség

A kutatás főbb fázisai:

- Az alapanyag megválasztása. Az alapanyagtól függ például a csomagolóüzemben a zsugorítófűrdő előírt hőmérséklete.
- Receptúra kidolgozása, az élelmiszeripari előírások figyelembevételével.
- Kompaundálás, tömlőkészítés.
- Besugárzási és tágítási technológia. A tágítási követelmény ellentétes a zsugorcsovakkal: míg ott radiális zsugorodás mellett axiális mérettartásra van szükség, addig a csomagolóanyagoknak minden irányban egyenletesen kell zsugorodnia.
- Nyomtatás, konfekcionálás.

Míg 1 kg polietilén világpiaci ára 70 cent, 1 kg zsugorzacsckóé 10–15 \$. Így a fenti műveletek során a termék piaci értéke mintegy 15–20-szorosra nő.

Mennyi ebből a besugárzás költsége? A csomagolófólia térhálósítható viszonylag kis feszültségű, olcsó üzemű elektrongyorsítókkal. Ha, mint láttuk, 1 kg fólia sugárzásos térhálósítása mintegy 6 cent, ez az alapanyag árának 10%-a, a késztermék árának pedig kevesebb, mint 1%-a. Ez természetesen csak igen nagy teljesítményű, 1—1,5 MeV energiájú gyorsítókra igaz, egyben azonban arra is mutat, hogy a sugárzásos térhálósítás előnyei ma már kihasználhatók a zsugortermékekénél nagyobb volumenű termékek előállításában is: pl. vastag fóliáknál sugárkezeléssel növelhető a szilárdság, csővezetékekénél javítható a hőállóság és a feszültségi repedezésállóság.

2. *Sugárzásos polimerizáció.* A legnagyobb jelentősége a lakkok, festékek, ragasztók sugárzásos keményítésének van. Ez az alkalmazási terület sok iparágat érint: a fémtekericsbevonat-készítést, a textilipart, papíripart, elektronikát stb.

A jelenleg használatos felületbevonó anyagok, festékek és lakkok többnyire oldószeresek. Keményítésük az oldószer elpárologtatásával történik, ehhez pedig nagy mennyiségű hőre és a termelési sebességgel arányos hosszúságú — néha 50 métert is elérő — kemencére van szükség. A hő egy része elkerülhetetlenül a bevonandó anyag fűtésére fordítódik; az elpárologtatott oldószer szennyezi a környezetet; a hosszú kemencék indítási ideje nagy és egyidejűleg nagy anyagmennyiség tartózkodik bennük, ami nehezíti a termékváltást; a leállás vagy egyéb üzemzavar okozta szenesedés pedig körülményes tisztítást igényel — hogy csak néhány hátrányos körülményt említsünk.

A sugárzásos keményítéshez oldószermentes, polimerizációs festékeket és lakkokat használnak. Ezek ára magasabb a hagyományosakénál, egyéb vonatkozásokban azonban előnyökkel jár a sugárzásos technológia: a hatalmas kemencék helyett néhány négyzetméter helyigényű, egyszerűen kezelhető sugárforrásokra van szükség, a bruttó energiamegtakarítás tízszeres-százszoros stb. A korszerű elektrongyorsító felületkezelő üzemben a helyigényes klasszikus kemencét helyettesítő elektrongyorsító a gyártó vonalnak talán legkisebb része. Vékony ólomlemez-burkolata védi a dolgozót a sugárzástól. Nem túl kis kapacitású üzemben az elektrongyorsítónak, a közhiedelemmel ellentétben, még a be-

ruházási igénye is kisebb a kemencénél. Elterjedésének legnagyobb akadálya, hogy a polimerizációs lakkok, ragasztók még drágák és a választékuk sem kielégítő.

A Pestvidéki Gépgyár értékelése szerint a zománchuzalgyártásban is alapvető változásokra lesz szükség a következő évtizedben. A jelenlegi technológia, a 60—70% oldószer tartalmú lakkok több réteges felvitele, hely- és energiaigényes, környezet-szennyező, drága és a legnagyobb elérhető sebesség is elmarad a dróthúzás sebességétől, úgyhogy a két technológiai lépés csak termelékenységsökkenéssel kapcsolható össze. Az olvasztásos vagy emulziós lakk-képzés sem látszik kielégítőnek. A gyár és a Műanyagipari Kutató Intézet jelenleg közös kísérleteket végez sugárzásos huzalzománcozási technológia kidolgozására. Ehhez mindenekelőtt olyan lakkokra van szükség, amelyek nem az oldószer elpárologtatásával, hanem polimerizáció útján, teljes tömegükben keményednek ki. Ebből következik, hogy a feladat nem oldható meg a technológia módosításával, csupán teljes átalakításával. Az oldószeres lakkok öt-hét rétegben való felvitele helyett például a polimerizációs lakk, kísérleteink szerint, egy vagy két rétegben kielégítő vastagságban felvihető; a keményedési út 8—12 méter helyett 1 méter vagy kevesebb. A kísérleti munkának még az elején vagyunk, az elektronsugaras keményítés néhány potenciális előnye azonban már nyilvánvaló:

- csökkent robbanásveszély és minimális környezetszennyeződés;
- tízszer-ötvenszer kisebb energiafelhasználás és helyigény;
- nagyobb elhúzási sebesség, amely alig függ a színezéktől;
- pillanatszerű indulás és leállítás, gyors termékváltás;
- a huzalok kisebb mechanikai igénybevétele, ami különösen vékony huzaloknál fontos.

Irodalom

1. DOBÓ J.: Izotóptechnika **15** (1972) 79.
2. DOBÓ J.: Magyar Kémikusok Lapja **34** (1979) 747.
3. J. DOBÓ: Radiat. Phys. Chem. **11** (1978) 151.
4. P. FORGÁCS—J. DOBÓ: Radiat. Phys. Chem. **11** (1978) 123.

Részecskegyorsítók ipari és analitikai alkalmazása

Bujdosó Ernő

MTA Könyvtára

Informatikai és Tudományelemzési Kutatási Főosztály, Budapest

Tóth Lajos

ALUTERV-FKI Alumíniumipari Tervező és Kutató Intézet, Budapest

Bevezetés

Ipari analitikán a köznapi értelemben mindazon analitikai módszereket értik, amelyek a nyersanyagtól a késztermékig terjedő igen különböző anyagok elemzését lehetővé teszik. Az ehhez szükséges analitikai eszközök egy része az üzemek laboratóriumainak szokásos tartozéka. Tágabb értelemben azonban az ipari analitikához tartozik az alkalmazott kutatás és fejlesztés mindazon része is, amely az ipari kutatás analitikai problémáinak megoldását szolgálja. A technológia kialakítása során számos olyan vizsgálatra szükség lehet, amit az üzemi laboratóriumok eszközeivel nem lehet megoldani, azoknál nagyobb műszaki és tudományos apparátust igényelnek. Az ilyen módszerek és eszközök fegyvertárát egészítik ki, és ma már nélkülözhetetlenek a gyorsítókkal megvalósítható analitikai vizsgálatok is. Ezek az eljárások valószínűleg még a távolabbi jövőben is csak a tudományos centrumokban lesznek alkalmazhatók, nem pedig az ipari laboratóriumokban [1].

A gyorsítók ipari alkalmazásának — éppúgy, mint egyéb anyagtudományi eljárásoknak — a célja a vizsgált minta egészének, ill. a minta felületének analitikai jellemzése. Az elemzésekkel általában a minta alábbi paramétereit kell meghatározni:

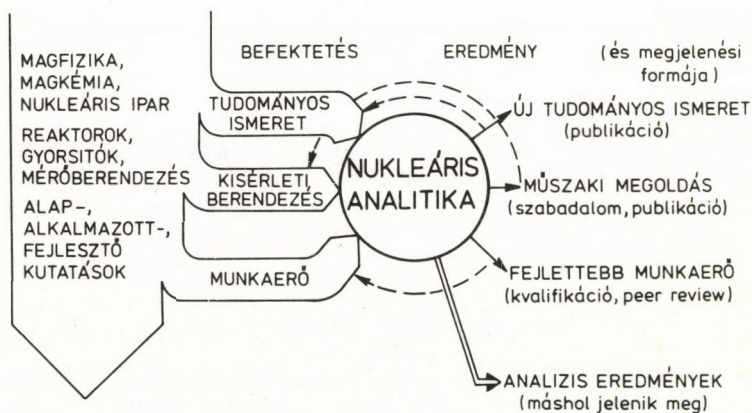
- elemi összetétel.
- a térfogati koncentráció,
- a koncentrációeloszlás (mélységi és laterális),
- rétegvastagság,
- sztöchiometria.

A tudományos eredmények és a technológia közötti szoros kölcsönhatások eredményeképpen a felületi, ill. a vékony és vastag rétegek analitikájának fejlődésével párhuzamosan folyik az előírt tulajdonságú rétegek, ezek ipari alkalmazásának kifejlesztése. Elég, ha itt a kopásálló, korrózióálló felületekre, katalizátorokra, diffúzióval, hőkezeléssel, vagy ionimplantációval létrehozott különleges összetételű rétegekre utalunk.

Az itt alkalmazott analitikai eljárásoknak jelentős része a nukleáris analitikán alapszik, amely a magfizikai ismeretek és berendezések széles körét és az e területen dolgozó kutatók szakismeretét használja fel [2].

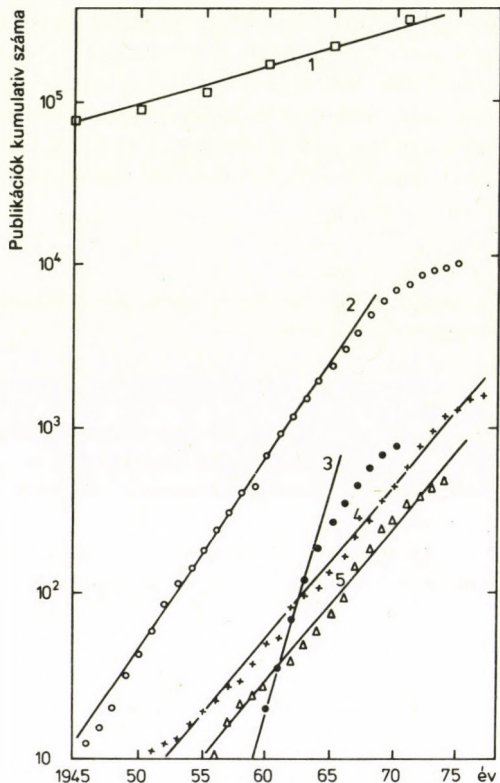
A nukleáris analitika kialakulása során az alap kutatásból alkalmazott kutatás, majd kísérleti fejlesztés lett. Az út a jelenségek belső összefüggéseinek, törvényszerűségeinek feltárására irányuló kutatástól a konkrét technológiák kidolgozásán át az eredmények gyakorlati hasznosításáig, konkrét termelési cél elérésére irányuló tevékenységhez vezetett.

A nukleáris analitikai K + F működési mechanizmusát az 1. ábrán kíséreltük meg felvázolni. Az input, azaz az ismeret, a kísérleti



1. ábra. A nukleáris analitika K + F működési mechanizmusa.

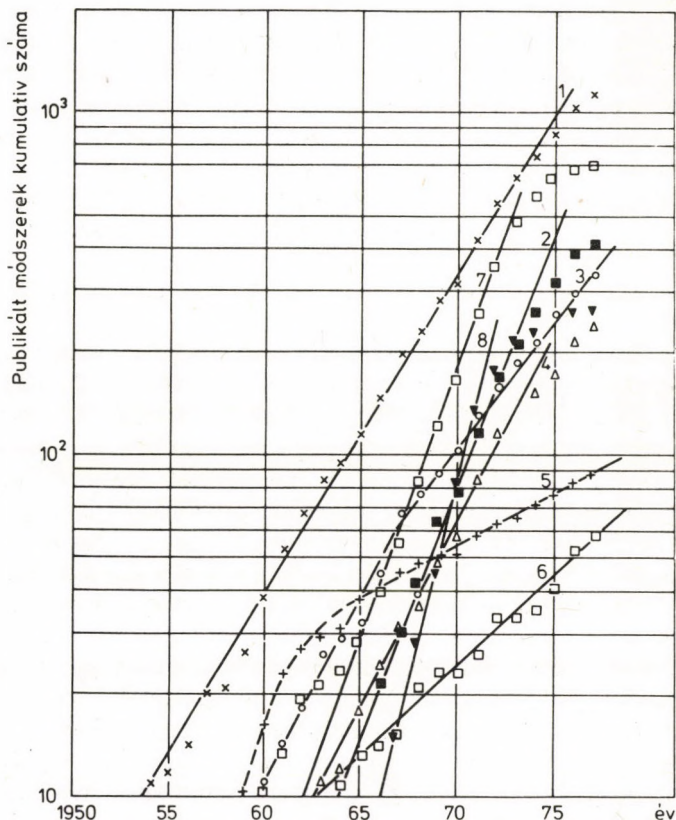
(A „peer review” fogalma az azonos területen dolgozó szakmai tudományos közösség, a „haszonszörűek” elismerését jelenti.)



2. ábra. Az analitika és a nukleáris analitika egyes területeinek fejlődése a megjelent közlemények tükrében, a kétszerezési időikkel

1. analitikai kémia: 13,9 év; 2. aktivációs analízis: 2,2 év; 3. aktiváció 14 MeV-os elektronokkal: 1,1 év; 4. prompt reakciók: 3,3 év; 5. aktiváció töltött részekkel: 3,2 év

berendezések és a munkaerő, egy fő ágak, a nukleáris alapkutatásnak különböző leágazásai. A tudományos gépezet produktuma — az új ismeretanyag, új műszaki megoldás és a fejlettebb munkaerő — visszacsatolódnak a gépezet működésébe. A folyamat fő hajtóereje a főág balról jobbra ható nyomása [17], továbbá a különböző tudományágokban, valamint kutató-fejlesztő tevékenység típusokban felhasználható analitikai eredmények iránti szívóhatás.



3. ábra. Analitikai célokra használt magreakciók számának növekedése és az egyes módszerek publikációkban való előfordulási számának kétszerezési ideje

1. prompt reakciók: 3,2 év; 2. (töltött részecske, töltött részecske): 1,7 év; 3. (n , X): 4,1 év;
4. (töltött részecske, γ): 2,8 év; 5. (γ , X): 9,7 év; 6. (töltött részecske, n): 5,8 év; 7. Rutherford-szórás: 1,7 év; 8. csatornahatás: 1,3 év

A hajtóerő hatásának, vagyis a tudományág fejlődésének mérésére lényegében bármelyik input vagy output adat felhasználható lenne. A gyakorlati alkalmazás fejlődését éppen az „analízis eredmények” ág jellemezné a legjobban, ez azonban önállóan a

kísérleti fejlesztés miatt egyáltalán nem jelenik meg. Ezért az analitikai eredmények szolgáltatása és a publikált új tudományos ismeretek között kell valamilyen arányosságot feltételeznünk. Ha a közleményeket a tudományos információ elemi kvantumainak tekintjük, akkor ezek számának növekedése tükrözheti az illető tudományág fejlődését [3, 4]. Ha egy tudományos feladat megoldása több kérdést vet föl, mint amennyit megválaszol, ezen kérdések száma nagy átlagban állandó, továbbá rendelkezésre áll ezen kérdések megválaszolásához szükséges anyagi eszköz és munkaerő, akkor a tudományterület növekedése exponenciális lesz [5, 6].

Ezekről a bonyolult kapcsolatokról és kölcsönhatásokról vall a dolgozatok számának alakulása. A 2. ábrán bemutatjuk a gyorsítókkal végezhető töltött részecske aktivációval, prompt módszerekkel és a 14 MeV energiájú neutronokkal kapcsolatos analitikai közlemények számának növekedését. Feltüntettük az aktivációs analitika területén megjelent, az előzőeket is magában foglaló közlemények számának, valamint a teljes analitikai kémiai irodalom növekedését is. A világ analitikai igénye közel háromnegyed évszázada az összes analitikai témájú publikációk számát 14 évenként megduplázza. A fiatal nukleáris analitika területein jelenleg a fejlődés ennél sokkal dinamikusabb (3. ábra). Így a prompt magreakciókat felhasználó analitikai módszereknél, mint pl. a töltött részecske—töltött részecske reakciók alkalmazásáról, 1,7 év alatt, a töltött részecske—gamma-foton reakciókkal végezhető analitikáról 2,8 év alatt, a részecskék szórásának területén a Rutherford-visszaszóráson alapuló technikáról 1,7 év alatt, a csatornahatás révén az atomok lokalizációjáról 1,3 év alatt manapság annyi módszert használtak és írtak le, mint amennyit összesen a korábbi években.

A következőkben az ipari alkalmazás szemszögéből áttekintjük a gyorsítókkal végezhető nukleáris analitikai lehetőségeket, ahol főként az újabb irodalmakra hivatkozunk. A tárgyban az utóbbi időben számos kongresszust tartottak [7—14], ill. összefoglaló műveket írtak [15—26].

Gyorsított részecskék analitikai célokra használható kölcsönhatásai

Héjkölcsönhatások

A gyorsított ionok pályájuk mentén atomi kölcsönhatásokat hoznak létre. A külső héjak ionizációja a céltárgy rendszámától függő optikai emissziót eredményez, a belső héjak ionizációját követően karakterisztikus röntgensugárzás lép ki. A könnyű elemek és az ionok kölcsönhatása Auger-elektronok kilépésére is vezet.

Az ionizációs hatáskeresztmetszetet leggyakrabban a Born-féle hullámfüggvény-közelítéssel számítják ki. Kellően nagy sebességű bombázóionok esetén a következő fő szabályok érvényesek a hatáskeresztmetszetre:

- az ionizációs hatáskeresztmetszet arányos a bombázóion rendszámának négyzetével, nő az energiájával;
- azonos sebességű és azonos elektromos töltésű ionok ionizációs hatáskeresztmetszete megegyezik;
- magasabb ionizációs potenciálú héjak gerjesztési hatáskeresztmetszete kisebb.

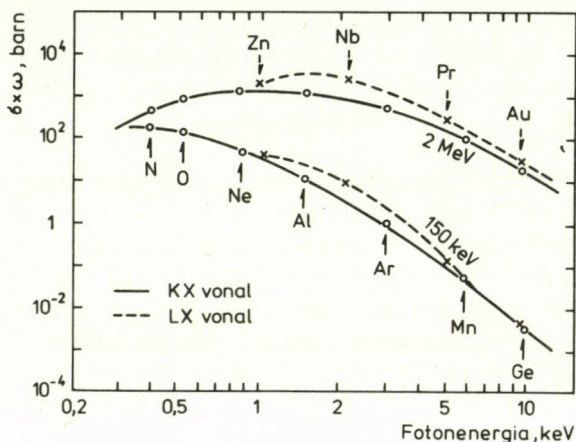
A röntgensugárzás emissziójának hatáskeresztmetszete az alábbi formulával írható le:

$$\sigma_x = \omega \sigma_e, \quad (1)$$

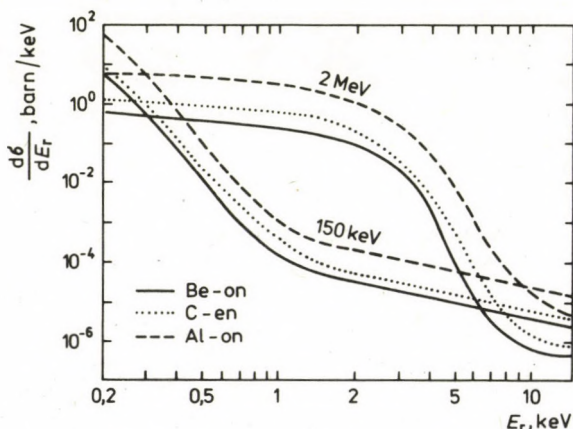
ahol σ_e az ionizációs hatáskeresztmetszet, ω a fluoreszcenciaparaméter (a röntgensugár-emisszió valószínűsége), amely a rendszámmal nő és gyakorlatilag független a gerjesztés módjától. A karakterisztikus röntgensugárzás emissziója izotrop.

A keltett fotonspektrum a céltárgyban meglökött elektronok fékezési sugárzási háttérére szuperponálódik. E kölcsönhatás valószínűsége is az energiának és a céltárgy atomok rendszámának függvénye, így az optimális jel/háttér viszony a gyorsítási energia helyes megválasztásával érhető el.

A 4. és 5. ábrán példaként a protonnal gerjesztett karakterisztikus röntgensugárzás, ill. a fékezési sugárzás keltésének hatáskeresztmetszete van ábrázolva a fotonenergia függvényében, különböző bombázórészecske-energiáknál.



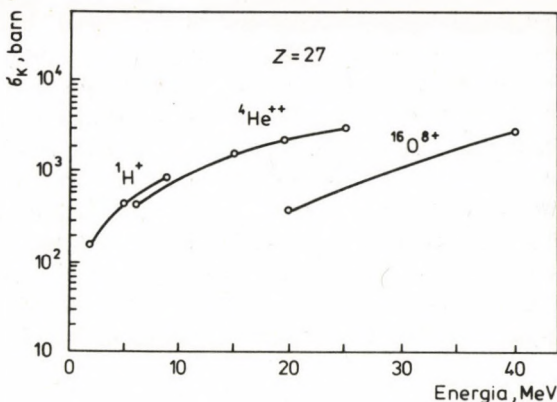
4. ábra. A karakterisztikus röntgensugárzás keltésének hatáskeresztmetszete a bombázófoton energiájának függvényében [91]



5. ábra. A fékezési sugárzás keltésének hatáskeresztmetszete [91]

A 6. ábra a nikkell K-héja gerjesztési hatáskeresztmetszetének energiafüggését mutatja különböző ionokra.

A héjkölcsönhatás analitikai felhasználása a karakterisztikus sugárzás energiaszelektív mérését igényli.



6. ábra. Nikkel K-héja ionizációs hatáskeresztmetszetének energiafüggése protonokra, alfa-részekre és ^{16}O -ionokra [118]

Magkölsönhatások

A 0,5—2 MeV energiatarományban, azaz a Coulomb-gáthoz képest alacsony bombázóenergiáknál a gyors ionoknak az atomgokkal való domináns kölcsönhatása a Rutherford-szórás. Ennek differenciális hatáskeresztmetszetét — bizonyos megkötések mellett — a Rutherford-formula írja le:

$$\sigma_{\psi} = \left(\frac{Z_a Z_A e^2}{2E_0} \right)^2 \frac{\left[\cos \psi \pm \left\{ 1 - \left(\frac{m}{M} \right)^2 \sin 2\psi \right\} \right]^2}{\sin^4 \psi \left\{ 1 - \left(\frac{m}{M} \right)^2 \sin^2 \psi \right\}^{\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

ahol Z_a a bombázóion rendszáma, m a tömege, Z_A a céltárgy rendszáma, M a tömege, E_0 az ion energiája, ψ a szórási szög.

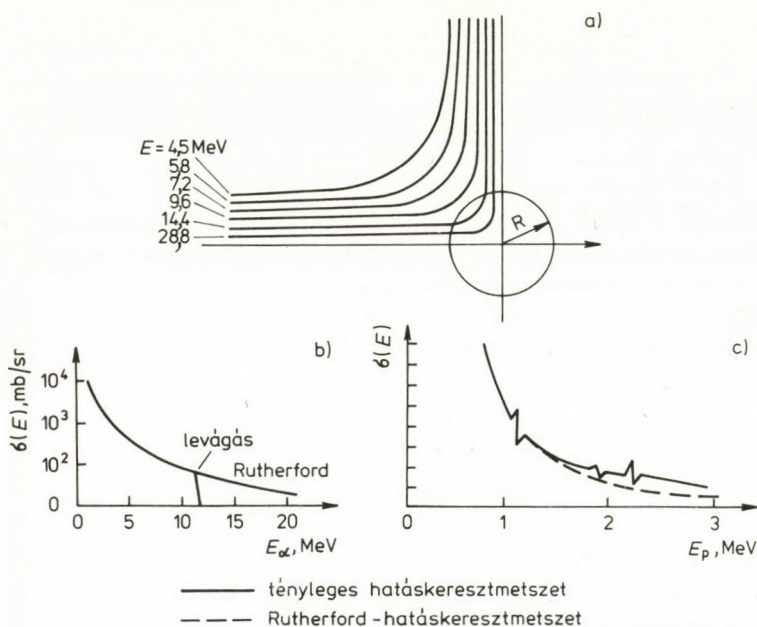
A formula érvényességi feltételei:

$m < M$ esetén a pozitív előjel érvényes a második tört számlálójában,

$m > M$ esetén a pozitív előjel felel meg a nagy energiájú részecskéknek, a negatív előjel a kis energiájúaknak.

A Rutherford-törvény protonokra 0,05 MeV fölött, ^4He -ionokra 0,2 MeV fölött érvényes. Kisebb energiáknál a számítás alapjául szolgáló Coulomb-potenciál helyett az ún. árnyékolt Coulomb-potenciállal számítható ki a helyes hatáskeresztmetszet-adat.

Égésen alacsony energiák tartományában (1—3 keV), amely kimondottan a felületi (monomolekulás) rétegek vizsgálatára használható fel, az atom elektronfelhője már nem hanyagolható el a potenciál kifejezésében, és lényegesen megváltoztatja a hatáskeresztmetszetet. A hatáskeresztmetszet-függvénynek elvben éles levágása van annál az energiánál, amelynél az ion már legyőzi a Coulomb-gátat és bejuthat a céltárgyatommagba (7. ábra). A



7. ábra. Alfa-részecskék Rutherford-pályái 90° -os szórás esetén ^{40}Ca szóróatómmagnál (a) és a megfelelő hatáskeresztmetszet-görbe (b). Magreakciók esetén (szaggatott görbe) a hatáskeresztmetszet éles levágást mutat. A (c) görbe tipikus hatáskeresztmetszet-lefutást mutat be protonoknak könnyű magokon történő szórásánál. Rezonanciák eltérést okoznak a Rutherford-hatáskeresztmetszettől [22]

hullámfüggvény kiszélesedése és a magerők hatótávolsága következtében már a Coulomb-gát alatt is nagy eltérések vannak a Rutherford-formulától. A praktikus felső érvényességi határ:

$$E_0 \leq \frac{Z_a Z_A e^2}{4R} \left(1 + \frac{m}{M}\right) \left(1 + \frac{1}{\sin \frac{\Theta}{2}}\right), \quad (3)$$

ahol R a kölcsönhatási sugár és

$$\Theta = \psi + \frac{1}{\sin \left(\frac{\sin \psi}{R}\right)}.$$

E határ felett a hatáskeresztmetszet exponenciálisan csökken.

Protonokkal való bombázáskor $Z_A \leq 20$ rendszámú céltárgyban, nagyobb rendszámú bombázórészecskénél $Z_a \leq 10$ esetén a Coulomb-gát alatt rezonanciák lépnek fel [22]. Protonbombázáskor, ha $Z_A > 20$, gyakorlatilag 2 MeV energiáig érvényes a Rutherford-formula.

A rugalmas szórás miatt a bombázórészecske energiája lecsökken. A nem relativisztikus mozgásegyenlet megoldásával adódik a kinetikai faktor:

$$k = \frac{E_2}{E_1} = \frac{2 \cos^2 \psi + \left(\frac{M}{m}\right)^2 - 1 \pm 2 \cos \psi \left[\left(\frac{M}{m}\right)^2 + \cos^2 \psi - 1 \right]^{\frac{1}{2}}}{1 + \left(\frac{M}{m}\right)^2}, \quad (4)$$

ahol E_2 az ion kölcsönhatás utáni energiája, E_1 a kölcsönhatás előtti energia.

$m \leq M$ esetén a számláló utolsó tagja előjeleként a negatív jelet kell venni. Ilyenkor k monoton csökkenő függvénye az M/m tömegarányoknak és a szórási szög koszinuszának,

$m > M$ esetén k kétértékű függvény, emiatt ψ -nek maximuma van a

$$\psi_{\max} = \frac{1}{\sin \frac{M}{m}} \quad (5)$$

szögnél. Minden szórási szöghöz a szórt részecske energiájának két értéke tartozik, kivéve a $\psi = \psi_{\max}$ -ot, ahol az energia egyértékű:

$$E_2 = \frac{m - M}{m + M} E_1. \quad (6)$$

Eszerint egy-egy adott szórási szög esetén a szórt részecske energiaeloszlásának mérésével a céltárgy különböző tömegű atommagjain szóródott ionok száma határozható meg. Ez az analitikai információ.

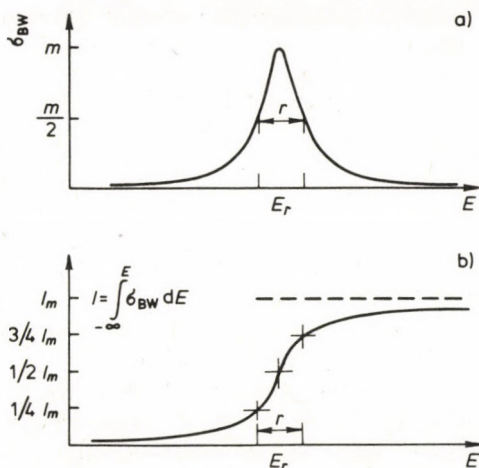
A tömegfelbontás csökken a céltárgymag tömegének növelésével, viszont nő a bombázóion energiájának és tömegének növelésével. A legjobb felbontás $\psi = 180^\circ$ -nál adódik.

Rugalmatlan szórásnál a kölcsönhatás után a céltárgy — és esetleg a bombázóion is — gerjesztett állapotban marad vissza. Az állapot élettartamától függően a céltárgyatommag prompt vagy késleltetett gamma-foton emissziójával bomlik el. A rugalmatlan szórás jellemző rezonancia-hatáskeresztmetszet függvényét izolált rezonanciák esetén a Breit—Wigner-formula írja le. Laboratóriumi koordináta-rendszerre:

$$\sigma(E) = \frac{1}{(E - E_r)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}, \quad (7)$$

ahol E_r a rezonanciaenergia, Γ a hatáskeresztmetszet-görbe félérték szélessége, ami a gerjesztett állapot élettartalmával fordítottan arányos (8. ábra).

A reakciótermékek szögeloszlása mindig szimmetrikus 90° körül a tömegközépponti koordináta-rendszerben. Nagyobb gerjesztési energiáknál a hatáskeresztmetszet-görbe kiszélesedik, így több közeli rezonancia összeolvadhat, majd gyakorlatilag gerjesztési kontinuum jelentkezik. Nehéz ($Z > 20$) céltárgymagokon csak



8. ábra. A rugalmatlan szórás (a) differenciális Breit—Wigner-hatáskeresztmetszete, (b) integrális hatáskeresztmetszete izolált rezonanciák esetén [22]

kivételesen lép fel rezonancia, a hatáskeresztmetszetet viszont csökkenti a Coulomb-visszalökés.

Ha a töltött részecskék által indukált magreakciók olyan nagy energiájú bombázóionok hatására lépnek fel, amelyeknél a mag gerjesztése eléri a kontinuumtartományt, ilyenkor a hatáskeresztmetszet optikai modell alapján határozható meg. A Coulomb-gát fölött érvényes hatáskeresztmetszet-formula:

$$\sigma_r \approx \pi(R + \lambda_a)^2 \left[1 - \frac{Z_a Z_A e^2}{E'_a (R + \lambda_a)} \right], \quad (8)$$

ahol E_a a gyorsított energia és

$$\lambda_a = \frac{\hbar}{(2m_0 E'_a)^{1/2}}.$$

A magreakció termékeként kilépő neutronok és protonok energiaeloszlása a kis energiák tartományában tipikus Maxwell-eloszlás (párolgás), és csak nagy energiájú gerjesztésnél lépnek ki diszkrét energiájú részecskék.

Analitikai célra a magreakciók prompt gamma-sugárzását, valamint az indukált radioaktivitás elbomlásakor keletkező gamma-fotonok spektrumát lehet mérni.

Különleges atommag-reakció az ún. stripping reakció. Ez a direkt kölcsönhatás csak néhány céltárgymag esetén jelentkezik és csak akkor, ha a bombázóion olyan komplex atommag, amelyben kicsi a részecskék kötési energiája. Deuteronnal létrehozott direkt reakcióban a céltárgy csupán a neutronot fogja be, a proton pedig a kezdeti energiánál sokkal nagyobb energiával repül tovább (nagy Q érték). Ismertek a (d, α) ; (t, p) ; $({}^3\text{He}, n)$ és a $({}^3\text{He}, p)$ direkt reakciók is. Hatáskeresztmetszetük viszonylag kicsi, $10^{-28} - 10^{-26} \text{ m}^2$ (1–100 mb) körüli.

A fotonukleáris reakciókat nagy energiájú elektronok fékezési sugárzásával lehet létrehozni. A céltárgy rezonanciájának gerjesztése a széles fékezési spektrum megfelelő energiájú részével, tehát aránylag kis hányadával valósul meg. A prompt gamma-fotonok leválasztása nehéz a gerjesztő fékezési kontinuumról, ezért a gerjesztési állapot elbomlásakor keletkező gamma-sugárzás mérése analitikai célra főleg akkor használható, ha hosszú élettartamú izomér állapotról van szó, és így késleltetett mérés valósítható meg.

A foton indukálta magreakciók során a foton és a céltárgymag elektromos kölcsönhatása révén léphetnek ki a céltárgymagból protonok, neutronok és alfa-részecskék. E kölcsönhatásnak stabil atommagok esetén negatív Q értéke van. Megfelelő energiájú elektromos dipólussugárzás rezonanciaabszorpciója az óriásrezonanciának megfelelő félértékszélességgel gerjeszti a céltárgyat. Közepes és nehéz atommagok esetén leggyakoribb a (γ, n) és a $(\gamma, 2n)$ reakció. Kis rendszámú magoknál, ahol közel vannak a rezonanciák, a teljes rezonanciatartomány gerjeszthető a fékezési sugárzással, így a bomlásakor a jellemző rezonanciacsoportok segítik az azonosítást. Különösen a (γ, n) reakcióknak van analitikai fontossága, mert jól elkülöníthető a magasabb küszöbenergiájú (γ, t) és (γ, α) reakcióktól.

A gyorsítókkal előállított nagy energiájú neutronok leggyakoribb reakciói az $(n, 2n)$; (n, p) és az (n, α) reakciók. Egyéb neutronforrásokhoz képest a gyorsítók általában jóval nagyobb gyorsneutronfluxusa nagyobb érzékenységet biztosít. További előny, hogy a

gyorsítással szabályozható a neutronspektrum, így egy-egy problémához beállítható az optimális spektrum.

Analitikai fontosságúak az (n, γ) reakciók is. Ezeknél a prompt sugárzás mérésével, az előzőeknél pedig az indukált radioaktivitás mérésével, esetenként a prompt neutronok spektrometriájával történhet elemzés.

A kölcsönhatási folyamatok gyakorlati analitikai alkalmazásai

A besugárzás és a mérés között eltelt idő alapján a gyorsítókkal megvalósítható analitikai eljárásokat két nagy csoportba oszthatjuk; késleltetett és prompt mérési módszerekre (1. táblázat).

Az aktivációs, ill. prompt analízisre való szétválasztás természetesen nem éles, hiszen a rövid felezési idejű radioizotópok esetén a

1. táblázat. A gyorsítók analitikai alkalmazásának módszerei

Aktivációs analízis	Prompt analízis
1. Gyors neutronokkal (FNAA, Fast Neutron Activation Analysis)	1. Magreakciókkal (NRA, Nuclear Reaction Analysis)
2. Töltött részecskékkel (CPAA, Charged Particle Activation Analysis)	2. Protonindukált röntgennel (PIXE, Proton Induced X-ray Emission)
3. Nehéz ionokkal (HIAA, Heavy Ion Activation Analysis)	3. Ionindukált röntgennel (IIXE, Ion Induced X-ray Emission, ill. HEHIX, High Energy Heavy Ion Induced X-ray Emission)
4. Fotonokkal (PAA vagy PNA, Photon Activation Analysis, ill. Photonuclear Reactions) a) Fotonukleáris reakciók b) Metastabil izomér állapotok gerjesztése	4. Részecskék szórásával a) Nagyszögű Rutherford-szórás (RBS, Rutherford Backscattering) b) Rezonanciaszórás c) Előreszórás (ERD, Elastic Recoil Detection)

prompt technikát kell alkalmazni, viszont a hosszú élettartamú metastabil állapotok mérése az aktivációs analízisnél használatos módszerekkel oldható meg.

Aktivációs analízis

A gyors neutronokkal létrehozott magreakciók több könnyű és számos közepes rendszámú elemnél vezetnek radioaktív izotóphoz. Ezek közül néhány interferenciától mentesen mérhető.

A módszert főként az oxigéntartalom meghatározására használják az $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ atommag-reakció által indukált radio-

2. táblázat. 14 MeV-es neutronaktiváció meghatározási küszöbadatai [70]

Elem	Magreakció	σ , mb	Felezési idő	Gamma-energia, MeV	Besugárzási és mérési idő, s	Meghatározás érzékenysége, μg
Al	$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	81	9,48 min	0,844	600	80
As	$^{78}\text{As}(n,p)^{78\text{m}}\text{Ge}$	16	46 s	0,140	200	1300
Ba	$^{138}\text{Ba}(n,2n)^{137\text{m}}\text{Ba}$	1200	2,55 min	0,662	600	30
Br	$^{79}\text{Br}(n,2n)^{78}\text{Br}$	770	6,40 min	0,511	600	10
				0,614		170
	$^{79}\text{Br}(n,n')^{79\text{m}}\text{Br}$	450	4,8 s	0,208	20	550
Ce	$^{140}\text{Ce}(n,2n)^{139\text{m}}\text{Ce}$	630	54 s	0,754	200	140
Cl	$^{35}\text{Cl}(n,2n)^{34\text{m}}\text{Cl}$	4	32 min	0,146	600	2100
				0,511		1300
Co	$^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn}$	29	2,58 h	0,847	600	3000
Cr	$^{52}\text{Cr}(n,p)^{52}\text{V}$	115	3,75 min	1,434	600	140
Cu	$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$	470	9,73 min	0,511	600	10
F	$^{19}\text{F}(n,p)^{19}\text{O}$	19	28,9 s	0,197	100	280
	$^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$	48	1,83 h	0,511	600	140
Fe	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	113	2,58 h	0,847	600	780
K	$^{39}\text{K}(n,2n)^{38}\text{K}$	1,6	7,71 min	0,511	600	1300
Mg	$^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$	190	15,0 h	1,369	600	2100
Mn	$^{55}\text{Mn}(n,\alpha)^{52}\text{V}$	35	3,75 min	1,434	600	410
Na	$^{23}\text{Na}(n,p)^{23}\text{Ne}$	43	37,6 s	0,439	200	640
P	$^{31}\text{P}(n,\alpha)^{28}\text{Al}$	125	2,31 min	1,779	600	100
Sb	$^{121}\text{Sb}(n,2n)^{120}\text{Sb}$	1030	15,9 min	0,511	600	30
Si	$^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al}$	200	2,31 min	1,779	600	60
V	$^{51}\text{V}(n,p)^{51}\text{Ti}$	36	5,79 min	0,320	600	90
Zn	$^{64}\text{Zn}(n,2n)^{63}\text{Zn}$	125	38,4 min	0,511	600	150

aktivitás mérésével. Ez a technika 14 MeV-es neutronokkal az acél és az alumínium $\mu\text{g/g}$ szintű oxigénelemzésének ipari eljárásává fejlődött [27—32]. A neutrongenerátorokat további szennyező elemek [34—38], valamint makrokomponensek meghatározására is használják [39, 40, 70]. A meghatározási küszöbmennyiségek erősen függenek a mátrix kémiai összetételétől, a lehetséges interferenciáktól és természetesen a besugárzó-mérő rendszertől. $2,7 \cdot 10^{10}$ neutron/s neutronhozam, Ge(Li) koaxiális félvezető detektor, sokcsatornás analizátor, mikrokomputer alkalmazásakor a háttér- és interferenciamentes esetre a 14 MeV-es neutronaktivációval legalkalmasabban elemezhető atomokra vonatkozó érzékenységi adatokat a 2. táblázat foglalja össze.

A neutronenergia növelésével, pl. izokrón ciklotron alkalmazásával kb. két nagyságrend érzékenységnövekedést értek el az oxigén és más elemek meghatározásában [33], viszont a mátrixok felaktiválódása miatt az interferencia is megnövekedett. A 3. táblázat néhány elem gyorsneutron-aktivációs meghatározási érzékenységét mutatja be ciklotronnal, ill. neutrongenerátorral előállított neutronokra, egy felezési ideig, de legfeljebb két óráig tartó aktiválás után mérve.

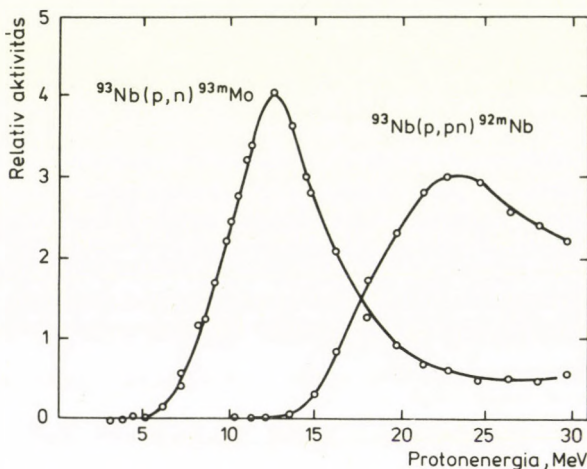
Nagy energiájú töltött részecskékkel elvben minden elem aktiválható, a módszert mégis akkor érdemes használni, ha az egyszerűbb

3. táblázat. Mg, Al, Si, P, Zr és Mo elemek ciklotronnal és neutrongenerátorral történő meghatározásának analitikai érzékenysége [23]

Analitikai magreakció	Érzékenység, dpm/ μg			14 MeV-es neutronokkal
	Ciklotronnal gyorsított deuteronenergia			
	15 MeV	30 MeV	45 MeV	
$\text{Mg} + n \rightarrow {}^{24}\text{Na}$	205	2 000	5 800	20,7
${}^{27}\text{Al}(n, p){}^{27}\text{Mg}$	1 000	6 600	19 000	52
$\text{Si} + n \rightarrow {}^{28}\text{Al}$	2 300	16 000	50 000	148
${}^{31}\text{P}(n, \alpha){}^{28}\text{Al}$	800	8 000	24 000	69
$\text{Zr} + n \rightarrow {}^{98\text{m}}\text{Zr}$	20	1 300	6 600	13
$\text{Mo} + n \rightarrow {}^{97}\text{Nb}$	2	95	750	0,3

Deuteronáram: $10 \mu\text{A}$; 14 MeV-es neutronfluxus: 10^9 neutron $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

neutronaktivációval nem oldható meg [41]. A bombázórészecskék optimális energiáját a reakció hatáskeresztmetszete szabja meg, ami általában maximummal rendelkezik (9. ábra). Alkalmazásuk általában azt használja ki, hogy adott energiaküszöb alatt bizonyos elemek interferencia nélkül aktiválódnak, emiatt a töltött részecske-aktiváció a könnyű elemek ($3 \leq Z \leq 9$) analizésének leghatékonyabb módszere [42–46a]. Viszont éppen ezek az elemek befolyásolják



9. ábra. Aktiválási görbék a $^{93}\text{Nb}(p, n)^{93\text{m}}\text{Mo}$ és $^{93}\text{Nb}(p, pn)^{92\text{m}}\text{Nb}$ reakciókra [23]

legnagyobb mértékben a fémek és a félvezetők tulajdonságait, ezért a töltött részecske-aktiválás alkalmazásának egyik legkiterjedtebb területe a nagy tisztaságú referenciaanyagokban és a félvezetőkben a B, C, N és O nyomszennyezők analizése [41]. A fontosabb reakciókat ezen elemek meghatározására a 4. táblázat tartalmazza.

A minták sokelemes, roncsolásmentes analizéséhez általában protonnal indukált reakciók használhatók. A $16 \leq Z \leq 82$ tartományban 24 elem $0,1 \mu\text{g/g}$ érzékenységgű elemzését végezték Co, Ag, Ir, Au stb. mátrixokban roncsolásmentesen. Ugyanezek az elemek reaktorban aktiválva csak kémiai elválasztással határozhatók meg [45, 46b].

A deuteronaktivációs analízist a Be, B, C, N, O, F, Na, Mg, Al és Fe meghatározására használják [42, 43, 47, 48].

A tríciummal való aktiválással az előző elemeken kívül a S, Cl, V és a Mn analízise is zavarmentesen végezhető el [42, 49, 50]. 3,5 MeV energiájú tríciumokkal Si, Ti és Mo; 3 MeV energiájú nyalábbal pedig a Ge és a GaAs roncsolásmentes elemzését valósították meg [45].

4. táblázat. B, C, N, O, P és S elemzés reakciói [41]

Elem	Reakció	Előnyös energia-tartomány, MeV
B	$^{10}\text{B}(\text{d}, \text{n})^{11}\text{C}$	5—10
C	$^{12}\text{C}(\text{d}, \text{n})^{13}\text{N}$	3—10
N	$^{14}\text{N}(\text{d}, \text{n})^{15}\text{O}$	5—10
O	$^{16}\text{O}(\text{t}, \text{n})^{18}\text{F}$	3—10
	$^{16}\text{O}(\text{}^3\text{He}, \text{p})^{18}\text{F}$	10—20
	$^{16}\text{O}(\text{}^4\text{He}, \text{d})^{18}\text{F}$	30—45
P	$^{31}\text{P}(\alpha, \text{n})^{34\text{m}}\text{Cl}$	10—20
S	$^{34}\text{S}(\text{p}, \text{n})^{34\text{m}}\text{Cl}$	10—15
	$^{32}\text{S}(\text{t}, \text{n})^{34\text{m}}\text{Cl}$	5—10

A legelőnyösebb bombázó töltött részecske a ^3He -ion, amely már kis energia esetén is nagy hatáskeresztmetszettel hoz létre magreakciókat az alacsony rendszámú elemeken. A Be és a Ca közötti elemeket [44, 51—53, 118], továbbá a Fe, Pb [54a], a V, Fe, Ni, Zn, Nb és a Mo koncentrációját határozták meg ^3He -ionnyalábbal.

A gyorsított alfa-részek által indukált reakciók szintén főleg a könnyű elemek meghatározására alkalmasak [43]. Újabbán foszfor méréséről számoltak be Al—Si ötvözetekben [54b, 55].

A töltött részecske-aktivációs analízis belépése a többi analitikai módszer közé szépen példázza, hogy egy új módszer új ismeretekre vezethet korábban jól ismert, ill. ismertnek vélt anyagokra vonatkozóan is. Az alumínium oxigénkoncentrációjának elemzése fontos ipari probléma. A mérhető térfogati koncentráció az utóbbi 10 év alatt kb. 200-ad részére csökkent [32, 41]. A módszerek általános finomodásán kívül ezt az is okozta, hogy a töltött részecske-aktivációval elérhető érzékenység 0,05 $\mu\text{g/g}$, szemben a korábbi legérzékenyebb 14 MeV neutronaktivációs módszer 0,5 $\mu\text{g/g}$

érzékenységeivel. Az érzékenység növelése módot ad a minta mennyiségének csökkentésére is. Az European Bureau for Reference Materials által szervezett körmérés alkalmával egy Ti—Al—V ötvözet oxigénkoncentrációját (kb. 1750 $\mu\text{g/g}$) 14 MeV neutronokkal 20 g anyagmintából, a redukáló izzítás módszerével 0,2 g-ból, a töltött részecske aktivációs analízissel pedig 0,7 mg mennyiségből tudták kb. azonos szórással meghatározni [41].

Aktivációs analízis nehéz ionokkal. Az a technikai lehetőség, hogy egyes reakciók megfordítva is létrehozhatók, vezetett el a legkönnyebb elemek: a H, D és T, valamint a S aktivációs analitikai meghatározásához ciklotronokból nyert nehéz ionok révén. A $^{10}\text{B}(\text{p}, \alpha)^7\text{Be}$ reakció inverzével, a $^1\text{H}(^{10}\text{B}, \alpha)^7\text{Be}$ reakcióval, nagy energiájú ^{10}B -ionnyalábbal, hidrogéntartalom határozható meg [56, 57]. Ciklotronból nyert ^7Li - és ^{10}B -nyalábbal hidrogént, ^8Li - és ^{12}B -nyalábbal szintén hidrogént és ként elemeztek [58]. Titánfém-ben 30—100 ng/g oxigént találtak a Li és a B indukálta magreakciókkal. A fontosabb nehézion-reakciók az 5. táblázatban vannak felsorolva.

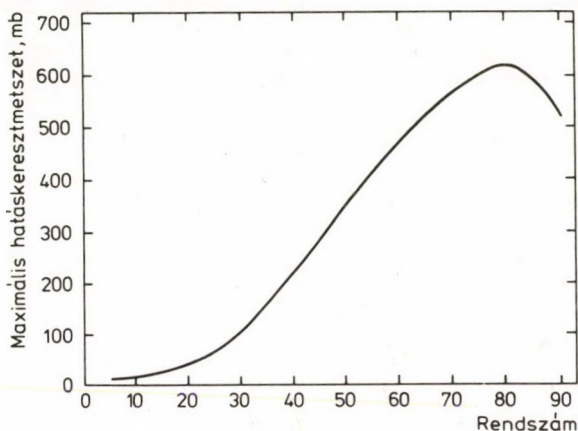
5. táblázat. H, D és Be elemzés reakciói [41]

Elem	Reakció	Előnyös energia-tartomány, MeV
H	$^1\text{H}(^7\text{Li}, \text{n})^7\text{Be}$	60—75
	$^1\text{H}(^{10}\text{B}, \alpha)^7\text{Be}$	50—60
D	$^2\text{H}(^7\text{Li}, \text{p})^8\text{Li}$	60—70
	$^2\text{H}(^{11}\text{B}, \text{p})^{12}\text{B}$	50—60
	$^2\text{H}(^{19}\text{F}, \text{p})^{20}\text{F}$	80—100
Be	$^9\text{Be}(^{14}\text{N}, \alpha\text{n})^{18}\text{F}$	15—20

A töltött részecske- és a nehézion-aktivációs analízis a mintának csupán vékony felületi rétegéről ad felvilágosítást a bombázó részecske kis behatolási mélysége miatt. A szennyezők azonosítása és koncentrációjuk meghatározása a keletkezett radioaktív atommagok bomlásakor ezek gamma-spektrumának mérésével történik, a legtöbbször összehasonlító etalonok segítségével. Az elemzéseket vetélkedő reakciók zavarják, amelyek a szomszédos izotópokkal

ugyanazon radioaktív atommaghoz vezetnek [43]. E zavaró hatások csökkenthetők az elektronbefogással bomló izotópoknál, ha a gamma-spektrum helyett az alacsonyabb energiájú karakterisztikus röntgenvonalat mérjük (LEPS=Low Energy Photon Spectroscopy). A 70 keV alatti KX sugárzás spektruma aránylag egyszerű és egyértelműen függ a rendszámtól. E módszer a 34 és a 82 közötti rendszámok esetén alkalmazható [65].

A *fotonaktivációs analízisnél* a minta teljes tömegében egyenletes gerjesztés valósítható meg. A legtöbb elem a (γ, n) reakcióval határozható meg. A gerjesztési függvény (óriásrezonancia) a küszöbenergiával, a maximális hatáskeresztmetszettel és a félértékszélességgel jellemezhető.



10. ábra. A (γ, n) reakciók maximális hatáskeresztmetszetének változása a rendszám függvényében [23]

A küszöbenergia a nehéz magoktól a könnyű magokig 7 és 19 MeV között, a maximális hatáskeresztmetszet helye pedig 12 és 23 MeV között van. A maximális hatáskeresztmetszet menete a rendszám függvényében a 10. ábrán látható. A könnyű magok aktiválására előnyösebb a (γ, p) reakció. Kiseb analitikai fontossága van a $(\gamma, 2n)$, (γ, pn) , $(\gamma, 2p)$ és a (γ, α) reakcióknak [59—61].

A fotonukleáris reakciókat elsősorban a könnyű elemek, így a C, N és az O meghatározására használják, kémiai elválasztással [62—64].

A (γ, n) reakció hozama nő a tömegszámmal, sok elem analizésére alkalmas. A $(\gamma, 2n)$ reakció kb. két nagyságrenddel kisebb hozamú és a (γ, n) reakció hatáskeresztmetszetével párhuzamosan halad [60], de lehetővé teszi további 20 elem [129] és a ritkaföldfémek analizését [22, 84].

Az alacsony energiájú röntgenvonalak spektroszkópiája (LEPS) e módszernél is sikeresen alkalmazható, nemesfémeknél [66, 67], a $Z = 22—83$ közötti elemek elektronbefogással bomló izotópjainál és

6. táblázat. Metastabil izomér állapotba gerjeszthető magok aktivációs adatai (γ, γ') reakcióval [22]

Elem	Izomér állapot	Természetes gyakoriság, %	Felezési idő	Bomlási gamma-energia, MeV
Ge	^{73m} Ge	7,76	0,53 s	0,054; 0,014
Se	^{77m} Se	7,58	17,5 s	0,16
Br	^{79m} Br	50,54	4,8 s	0,208
Sr	^{87m} Sr	7,02	2,8 h	0,39
Y	^{89m} Y	100	16 s	0,92
Zr	^{90m} Zr	51,46	0,83 s	2,3
Rh	^{103m} Rh	100	57 min	0,040
Ag	^{107m} Ag	51,35	44 s	0,094
	^{109m} Ag	48,65	40 s	0,088
Cd	^{111m} Cd	12,75	49 min	0,25; 0,15
In	^{113m} In	4,28	1,7 h	0,393
	^{115m} In	95,72	4,5 h	0,335
Ba	^{135m} Ba	6,59	28,7 h	0,27
	^{137m} Ba	11,32	2,6 min	0,66
Hf	^{178m} Hf	27,14	4,8 s	0,43; 0,33; 0,21; 0,089
	^{179m} Hf	13,75	19 s	0,22; 0,16
	^{180m} Hf	35,24	5,5 h	0,44; 0,33; 0,22
W	^{183m} W	14,40	5,5 s	0,16; 0,11; 0,06
Ir	^{191m} Ir	37,3	4,9 s	0,13; 0,04
Pt	^{195m} Pt	33,8	3,5 a	0,13; 0,03
Au	^{197m} Au	100	7,2 s	0,28; 0,13
Hg	^{199m} Hg	16,84	42 min	0,37; 0,16
Pb	^{204m} Pb	1,48	67 min	0,91; 0,29
	^{207m} Pb	22,6	0,8 s	1,06; 0,57

a hosszú élettartamú izomér állapotoknál. A könnyű elemeknél a pozitront emittáló izotópok okozzák az interferenciát, a nehezebb elemeknél a (γ, t) és a (γ, α) folyamatokból erednek a zavaró hatások. Ezek küszöbenergiája a (γ, n) reakcióé fölött van, így zavarásuk a fékezési sugárzás energiájának helyes megválasztásával csökkenthető.

A metastabil izomér állapotok gerjesztésére a bombázó fotonok energiáját általában 7 MeV alatt tartják, hogy csak a (γ, γ') rugalmatlan szórás jöjjön létre, a zavaró (γ, n) reakció pedig ne léphessen fel. E módszer mintegy 18 elem zavarásmentes mérését teszi lehetővé az elbomláskor keletkező egyetlen, vagy néhány gamma-vonal mérésével [22, 42, 68]. A jól mérhető metastabil izomérek adatait a 6. táblázat tartalmazza.

A fotonukleáris reakciókkal végzett elemzések érzékenysége 1 $\mu\text{g/g}$ körül van. Sokelemes fotonukleáris aktivációs elemzés végezhető 30—65 MeV energiatarományban [85].

A fotonaktivációs analízisnek különös jelentősége van olyan geológiai és technológiai minták analízisének, amelyek összetétele miatt erős felaktiválódás, vagy önárnyékolás lépne fel neutronaktiváció esetén.

Prompt analízis

A gyorsítókkal előállított nagy energiájú részecskékkel megvalósított prompt analízisnél a besugárzással egyidőben jelentkeznek az összes kölcsönhatási folyamatok, a magreakciók, a röntgensugárkeltés és a szóródás révén keletkező termékek. A bombázórészek azonosak az aktivációs módszernél használtakkal. Analitikai célokra közülük azok a reakciók használhatók fel előnyösen, amelyeknél a bombázórészecske energiája és tömege, a keltett részecske típusa, hozama és energiája egyértelműen meghatározzák a céltárgymagot és annak koncentrációját.

Analízis prompt magreakciókkal. Az atommagreakciókat általában jellemzi, hogy specifikus küszöbenergiát meghaladó energiájú bombázás hatására jönnek létre, mert a reakciók nagy részénél a Q érték negatív. A reakciók, ill. a nuklidok azonosítását megkönnyíti néhány általában érvényes szabály.

Adott magreakcióból származó részecske energiája csökken az emisszió szögének növekedésével. Az energiacsökkenés mértéke függ a Q -tól és a részecske tömegétől, így pl. ha két reakció adott szögben azonos fajtájú és energiájú részecske emissziójára vezetne, lehet olyan másik szöveget keresni, ahol a két reakció már megkülönböztethető.

A céltárgy gerjesztésére vezető magreakció esetén a kilépő részecske energiáját csökkenti a gerjesztésre felhasznált energia. Ilyenkor tehát az emittált részecskék és fotonok spektruma a végmagra jellemző.

A küszöbenergiával létrehozott magreakciók emittált terméke 0° szög alatt távozik. Növelve a bombázórészecske energiáját, az emisszió egyre nagyobb térszögben észlelhető lesz és a (4) egyenletnek megfelelően két különböző energiájú emittált részecske jelentkezik.

A bombázórészecskék a minta anyagába való behatolásakor, az emittált részek a kilépéskor energiaveszteséget szenvednek. Vékony mintának azt tekintjük, amelyben a részecske energiavesztesége kisebb, mint a detektor energiafelbontása. Ha ilyen vékony minták vastag szubsztrátumon helyezkednek el, ennek energiaspektruma, ill. mátrixhatása is jelentkezik. A vastag mintákban keletkezett töltött részecskék energiaspektrumában minden csúcs kiszélesedik, a minta vastagságától és fékezőképességétől függően.

Az analitikai célokra használt legfontosabb töltött részecske reakciók Q értékeit a 7. táblázat sorolja fel.

A töltött részecskével indukált magreakciókkal végzett prompt analízishez alkalmas elrendezést mutat be a 11. ábra, amelyen a detektor elé helyezett fólia a szóródott részecskék elnyelését, a háttér csökkentését szolgálja. A háttér csökkentésére egyéb módszereket, pl. elektrosztatikus eltérítést is alkalmaznak [69]. A legjobban ismert és legegyszerűbb töltött részecske magreakciók a p-, d-, t-, ^3He - és a ^4He -nyalábbal történő besugárzásakor lépnek fel. A nehéz ionokkal létrejövő magreakciók analitikai alkalmazását a sokkal nagyobb gyorsítási igény gátolja.

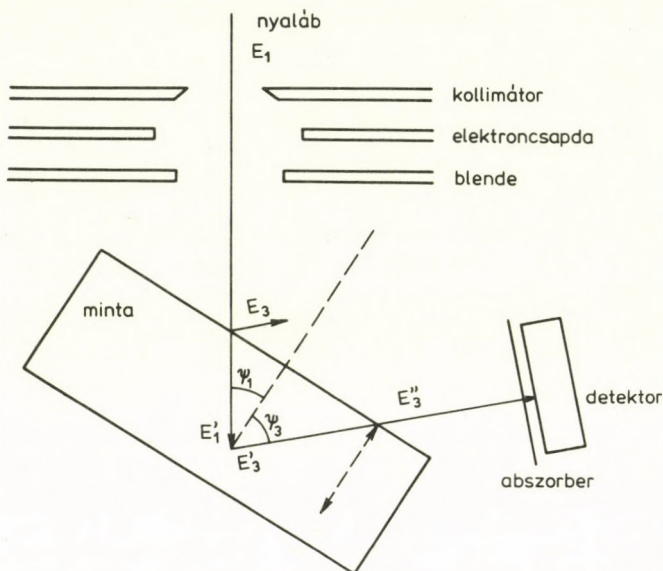
Vékony minták esetén egyes magreakcióknál ($Z < 20$) kihasználható az éles rezonanciák fellépése. Azonos elemhez tartozó rezonanciacsoportok felismerésével több elemes analízis is elvégez-

7. táblázat. Reakciók Q -értékei [15]

Nuklid	(n, γ)	(p, α)	(p, n)	(p, γ)	(d, p)	(d, α)	(d, n)	(^3He , γ)	(^4He , γ)
^1H	2225								
^2H	6258			5494	4033	23848	3269	16390	1474
^3He	20578			-2910	18353	18354	-5135	11489	1586
^4He	-890			-1960	-3115		-4185	1586	-92
^6Li	7251	4021	-5070	5606	5026	22374	3384	16604	4460
^7Li	2033	17347	-1644	17256	-192	14230	15028	17788	8666
^9Be	6812	2125	-1850	6585	4587	7151	4361	26280	10648
^{10}B	11456	1146	-4433	8691	9231	17822	6467	21638	11613
^{11}B	3369	8590	-2765	15957	1145	8031	13733	20736	10991
^{12}C	4946	-7551	-18126	1943	2722	-1341	-281	12071	7162
^{13}C	8177	-4063	-3003	7551	5952	5169	5326	22794	6358
^{14}N	10834	-2922	-5927	7292	8609	13575	5067	15844	4416
^{15}N	2490	4966	-3542	12128	265	7688	9903	14161	4013
^{16}O	4143	-5218	-16205	600	1918	3111	-1624	8443	4730
^{17}O	8046	1193	-3542	5609	5822	9802	3384	21166	7349
^{18}O	3957	3980	-2438	7993	1732	4245	5768	19880	9668
^{19}F	6601	8115	-4020	12845	4377	10033	10620	18628	10468
^{20}Ne	6761	-4129	-14670	2431	4536	2797	206	13362	9314
^{21}Ne	10366	-1738	-4331	6741	8141	6466	4516	23132	9885
^{22}Ne	5197	-1675	-3625	8793	2972	2702	6568	20098	10613
^{23}Na	6959	2377	-4839	11691	4735	6913	9467	17611	10091
^{24}Mg	7332	-6884	-14665	2270	5107	1963	46	13386	9985
^{25}Mg	11094	-3144	-5062	6306	8869	7049	4082	23231	11127
^{26}Mg	6443	-1820	-4787	8271	4218	2915	6046	20612	10643
^{27}Al	7725	1600	-5592	11585	5501	6708	9361	17941	9669
^{28}Si	8474	-7715	-15120	2748	6249	1429	523	12439	6948
^{29}Si	10610	-4820	-5726	5600	8385	6013	3375	19053	7118
^{30}Si	6588	-2372	-5010	7297	4364	3129	5073	17086	7923
^{31}P	7936	1916	-6224	8864	5712	8165	6639	14931	6998
^{32}S	8643	-4200	-13534	2277	6419	4901	53	11967	6641
^{35}Cl	8580	1866	-6746	8507	6356	8284	6282	14710	7217
^{37}Cl	6110	3032	-1596	10242	3886	7795	8017	16704	6222

hető és jobb elválasztás érhető el, mint amit az energiafelbontás biztosít.

A keletkezett neutronok detektálásával és energiámérésével a (p, n) és a (d, n) típusú reakciók is felhasználhatók analízisre. A T, Li, Be és C [71], valamint C, N és O elemeket [72] a neutronok repülési idejének (energiájának) mérésével határozták meg. E



11. ábra. A kísérleti elrendezés vázlatja a rugalmas szórással és a töltött részecske-reakciókkal végzett analitikai vizsgálatokhoz [15]

E_1 a gyorsítási energia, E'_1 a gyorsított részecske energiája d mélységben, E_3 a felületről szórt, E'_3 a d mélységben keltett vagy szórt, E''_3 az anyagból kilépő részecskék energiája

módszernél is van lehetőség az elemek mélységeloszlásának mérésére.

A (p, γ) és a $(p, \alpha\gamma)$ rezonanciák a prompt gamma-fotonok mérésével használhatók elemanalízisre, ill. a B, C, N, O és a F [73], valamint az Al [74] és Ne [107] elemek mélységi eloszlásának meghatározására [120, 121]. A mélységi felbontás, amit a rezonancia szélessége és a részecskék energiaszórása limitál [22], 1–10 μm vastagságú rétegben 0,1 μm nagyságrendű.

A (d, p) rezonanciareakció ^{12}C és ^{16}O meghatározására alkalmas [75, 122]. A rezonanciareakciókkal végezhető mélységeloszlás-vizsgálatok lehetőségeit mutatja a 8. táblázat, ahol a felbontás értéke Si mátrixban 1 μm mélységre van számítva.

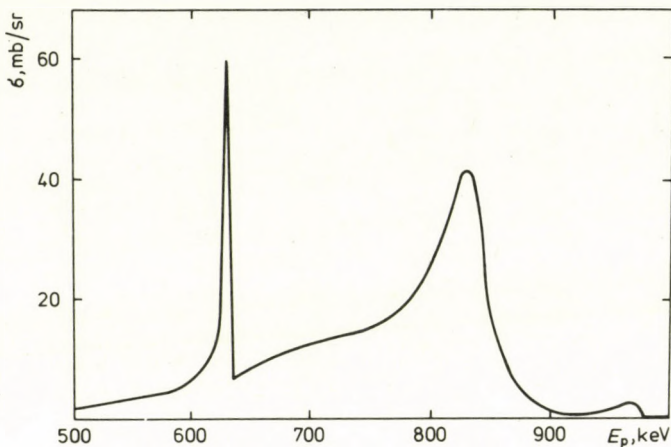
8. táblázat. Mélységi profil meghatározás rezonancia-gamma-fotonokkal [22]

Elem	Reakció	E_r , keV	E_γ , MeV	Γ , keV	Felbontás, μm
^7Li	(p, γ)	441	14,7—17,6	12	0,22
^9Be	(p, γ)	991	7,5	89	2,27
^{11}B	(p, γ)	163	4,430	5,5	0,13
^{12}C	(p, γ)	459	2,363	39,5	0,65
^{13}C	(p, γ)	1748	9,170	0,075	0,33
^{15}N	(p, α γ)	429	4,433	0,9	0,15
		898	4,433	2,2	0,22
		1210	4,433	22,5	0,62
^{19}F	(p, α γ)	672	6,131	6	0,21
		872	6,131	4,5	0,23
		1375	6,131	11	0,39
^{23}Na	(p, γ)	676,7	1,368	≤ 1	0,16
		872,4	1,368	7,5	0,42
		986	1,368	4,6	0,26
		1283,6	0,439	5,2	0,29
^{27}Al	(p, α γ)	1327,5	1,63	12,7	0,28
		632,6	1,778	≤ 1	0,18
^{31}P	(p, γ)	991,8	1,778	0,1	0,24
		541,5	2,237	≤ 1	0,16
		811,3	2,237	0,45	0,23

A töltött részecskét emittáló magreakciókkal a mélységi eloszlás mérése lényegében négy különböző eljárás valamelyikével oldható meg [15]:

1. a részecskespektrum alapján, a mélység miatt csökkentett energiájú rezonanciacsoportok hozamából;
2. az emittált részecskék egy kiválasztott csoportja energiaspektrumának alakjából;
3. a bombázórészecske energiájának változtatása során a hozam változásából;
4. az ismert rétegvastagságok eltávolítása során ismételt mérésekkel.

A megvalósuló magreakció gyakran determinálja, hogy a fenti változatok közül melyik használható fel. Így pl. a $^{18}\text{O}(p, \alpha)^{15}\text{N}$ reakció 630 keV-nél jelentkező nagyon keskeny (2,5 keV) rezonanciájánál (12. ábra) a 3. módszer előnyös, míg olyan magreakciók,



12. ábra. Az $^{18}\text{O}(p, \alpha)^{15}\text{N}$ reakció differenciális hatáskeresztmetszete 165° -nál [15]

amelyek hatáskeresztmetszete alig függ az energiától és nagy a Q értéke is, — a nagy szög alatt emittált nagy energiájú részek energiaspektruma jellemzi a szennyező koncentrációeloszlását [25, 75—80] — a 2. változatnak felelnek meg.

Alfa-sugarakkal való Coulomb-gerjesztés, vagy a magreakciók révén keltett gamma-sugárzás mérése lehetőséget nyújt számos könnyű, középnehéz és nehéz elem meghatározására [81, 82].

Nagy alkalmazási területe van a neutronok indukálta (n, γ) reakcióknak, ezeknél a nagy energiájú prompt gamma-fotonokat mérik [21, 22].

A gamma-foton keltette reakciók közül a (γ, n) reakció használható prompt analízisre. A fotoneutron-keltésnek minden stabil atommagnál küszöbenergiája van. A legalacsonyabb küszöbenergiájú nuklidok a 9. táblázatban vannak felsorolva. A fotoneutront keltő reakciók elsősorban a ^9Be és a ^2H nagyon érzékeny specifikus meghatározására alkalmasak [16], de nagyon érzékeny nemesfém- [83] és ritkaföldfém-analízist is lehetővé tesznek [22, 84]. A 10. táblázat a ritkaföldfémek fotonukleáris reakcióinak adatait tartalmazza.

A prompt sugárzásokkal megvalósított mélységi profil számításához szükség van a bombázó és az emittált részecskére vonatkozó fékezőképesség adataira, az adott céltárgy esetén [86, 87]. A fékezés

9. táblázat. A legkisebb Q -értékek a fotonutron reakcióknál [15]

Nuklid	Q , keV	Nuklid	Q , keV
^9Be	-1665,1	^{239}Pu	-5656
^2H	-2224,6	^6Li	-5660
^{17}O	-4142,4	^{145}Nd	-5760
^{13}C	-4946,4	^{149}Sm	-5873
^{235}U	-5306		

10. táblázat. Ritkaföldfémek analízise fotonukleáris reakcióval [22]

Elem	Izotóp	Reakció	Felezési idő	Érzékenység $E_\gamma < 30 \text{ MeV}$
La	^{136}La	(γ , 2n)	9,5 min	10^{-6}
Ce	^{139}Ce	(γ , n)	140 a	10^{-7}
Pr	^{140}Pr	(γ , n)	3,4 min	$6 \cdot 10^{-9}$
Nd	^{149}Nd	(γ , n)	1,8 h	10^{-7}
Sm	^{143}Sm	(γ , n)	9 min	10^{-6}
Eu	^{152}Eu	(γ , n)	9,3 h	10^{-7}
Gd	^{159}Gd	(γ , n)	18 h	10^{-7}
Dy	^{155}Dy	(γ , n)	10 h	10^{-6}
Ho	^{164}Ho	(γ , n)	37 min	10^{-7}
Er	^{161}Er	(γ , n)	3,1 h	10^{-6}
Tm	^{168}Tm	(γ , n)	85 a	$2 \cdot 10^{-8}$
Yb	^{167}Yb	(γ , n)	18 min	10^{-6}
Lu	^{174}Lu	(γ , n)	165 a	$6 \cdot 10^{-7}$
Y	^{88}Y	(γ , n)	108 a	$6 \cdot 10^{-8}$

számítására használt formulák hibái miatt dolgozták ki a „kétreakciós” módszert [88], amely a formulahibákat minimumra csökkenti.

Prompt elemzés töltött részecskék és nehéz ionok által létrehozott röntgenemisszióval. A hullámhossz-diszperzív röntgenfluoreszcens eljárást az analitikusok gyakran csupán kvalitatív módszernek minősítik a szükséges számos korrekció miatt. A protonok indukálta röntgenemissziós módszer (PIXE) sok ilyen korrekciótól mentesíthető [89].

A $13 \leq Z \leq 30$ rendszámú elemek karakterisztikus KX-, valamint a $49 \leq Z < 83$ rendszámú elemek LX-sugarainak gerjesztése általában 2–3 MeV energiájú protonokkal történik, ami ezen elemek 1–100 $\mu\text{g/g}$ érzékenységgű mérését teszi lehetővé [22, 46, 90–91]. A bombázó energia alkalmas megválasztása lényeges a háttérszint miatt [91]. A közbülső rendszám tartományra 4–22 MeV energiájú protonokat, vagy 10–30 MeV energiájú alfa-részeket célszerű használni a KX-sugárzás gerjesztésére. A K-sugárzás felhasználása azért is javasolt, mert kísérletileg kimért gerjesztési függvényeik jól egyeznek az elméleti adatokkal, szemben az LX-sugárzásokéival [92, 119].

A PIXE módszert a bombázó részek energiájának változtatásával mélységeloszlás mérésére is használják [93–94].

Nyomszennyezők abszolút súlykoncentrációjának mérésére ad lehetőséget az a felismerés, hogy alacsony rendszámú targetekben a keletkező fékezési sugárzási kontinuum intenzitása arányos a target vastagságával és átlagos tömegszámával, így a vizsgált szennyező karakterisztikus csúcsának és a fékezési kontinuumnak az aránya az abszolút koncentrációtól függ [95].

A könnyű elemek PIXE mérését a kis energiájú fluoreszcens sugárzás és a háttér nehézkessé teszi [96], a $Z \geq 15$ rendszámú elemeket tartalmazó minták esetén azonban teljes elemzés is végezhető 30 MeV energiájú alfa-nyalábbal, kb. 0,5–1% hibával [97].

Az ionindukált röntgenemisszió, valamint a nagy energiájú nehéz ionok indukálta röntgenemisszió mérésénél azt használják ki, hogy a karakterisztikus sugárzás keltésének határfoka nő a bombázó részecske tömegével, töltésével és energiájával [9–14, 20, 98, 99].

Az ionbombázáskor keletkező optikai emisszió a látható és az infravörös színekélemzéssel a felületek legfelső rétegének szennyezettségére ad információt [48, 128].

Analízis a részecskék szórásának mérésével

A részecskeszóráson alapuló analitikai módszerek három csoportba sorolhatók:

1. nagyszögű Rutherford-szórás,

2. rezonancia- és anomális szórás,
3. előreszórás.

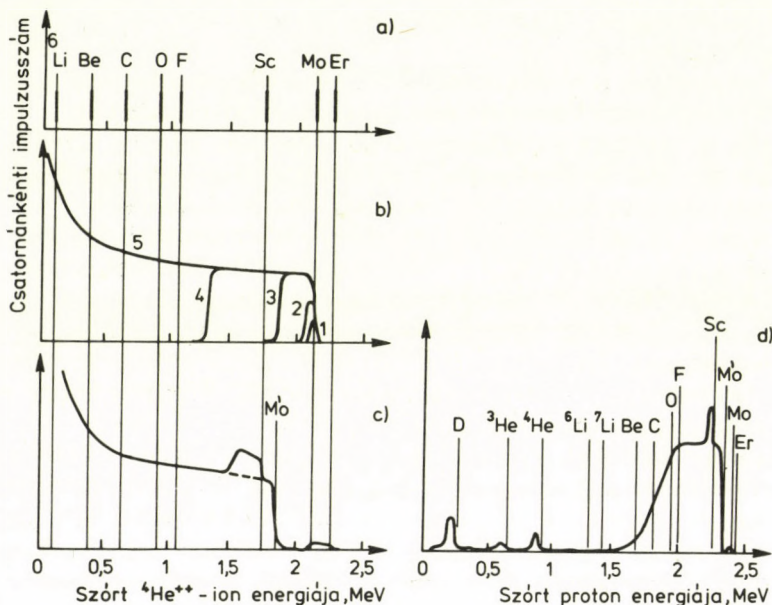
Nagyszögű Rutherford-szórásnál egyértelmű összefüggés áll fenn a szórt részecske energiája és a szóró atommag tömege között. A töltött részecske aktiváláskor a Coulomb-gát miatt a könnyű atommagok meghatározása volt előnyös nagyobb rendszámú mátrixban. Itt viszont, mivel a szórás hatáskeresztmetszete Z^2 -tel arányos, a magasabb rendszámú elemek mutathatók ki előnyösen könnyű mátrixban [18, 21, 25]. Megjegyzendő, hogy a hatáskeresztmetszet-adatok mérésekor (1–4 MeV energiájú α -részecskéknél krómon és nikkelen való szórásakor) eltérést találtak a Rutherford-formulától [103].

A nagyszögű szórás részecskehozama közvetlenül arányos a szórócentrumok mintabeli koncentrációival. Az energiaspektrum értelmezéséhez itt is ismernünk kell a közeg fékezőképességét, és számolnunk kell rezonanciák fellépésével is. Protonok, deuteronok és nehéz ionok rugalmas szóródása a szennyezők mélységeloszlásának felületi rétegekben való meghatározására, valamint a csatornahatás révén rácslokalizációjuk vizsgálatára alkalmas [21–22, 25, 106].

A szórt részecskék energiaspektrumának mérésénél a kiértékelés elvben egyszerű, mert egyértelmű összefüggések vannak a bombázóion és a céltárgyion tömege, az energia és a szórási szög között. A 13. ábrán 164° -os szögben visszaszórt 2,5 MeV energiájú ^4He -nyalábra és protonnyalábra vonatkozó energiaspektrum látható.

A 13a. ábra a ^4He -bombázás esetére a „tömegspektrum” skáláját mutatja, a lineáris energiaskálához rendelve. A (4) egyenletnek megfelelően ez a skála a növekvő atomsúly irányában összenyomott. A kinematikai viszonyoknak megfelelően a bombázóion tömegével megegyező, vagy annál kisebb tömegű részecskénél visszaszórás nem jön létre, ezek a tömegszámok, így már a ^4He is, a tömegskálán nem szerepelhetnek.

A 13b. ábra különböző rétegvastagságú Mo-fóliáról visszaszórt ^4He -ionok energiaspektrumát mutatja. Az 1. görbe az előzőekben definiált vékony rétegnek megfelelő vastagságú fóliáról visszaszórt monoenergiás csúcs, amely a Mo-nek megfelelő tömegszámánál jelentkezik. A 2. és a nagyobb sorszámú görbék egyre növekvő



13. ábra. 2,5 MeV energiájú alfa-részecskék (c) és protonok (d) visszاسzórási spektruma, (a) a tömegskála alfa-részecskékkel végzett szórási kísérletnél különböző rétegvastagságú molibdénfóliáról (b), ill. vastag molibdénfólián elhelyezkedő ^4He -ionnal implantált ScD_2 -réteg esetén (c) [124]

fóliavastagságoknak felelnek meg. Ezeknél a fólia vastagságával egyrészt nő a céltárgyatomok száma, így nő a csúcs intenzitása, másrészt ezek a rétegek már egyre kevésbé felelnek meg a vékony réteg kritériumának. A mélyebb rétegeket elérő ^4He -ionok fékezési energiavesztése ekkor már nem hanyagolható el, így a (4) formula a kezdetinél kisebb energiájú részecskékkel való bombázásra vonatkozik, megváltozik a tömegskála, vagyis a Mo-magokról való szórás utáni energia kisebb lesz. A spektrumcsúcs kiszélesedésének mértékéből a fólia vastagsága kiszámítható. Az 5. görbe a ^4He -ionokra vonatkozó végtelen vastagságú fólia esetén jelentkezik.

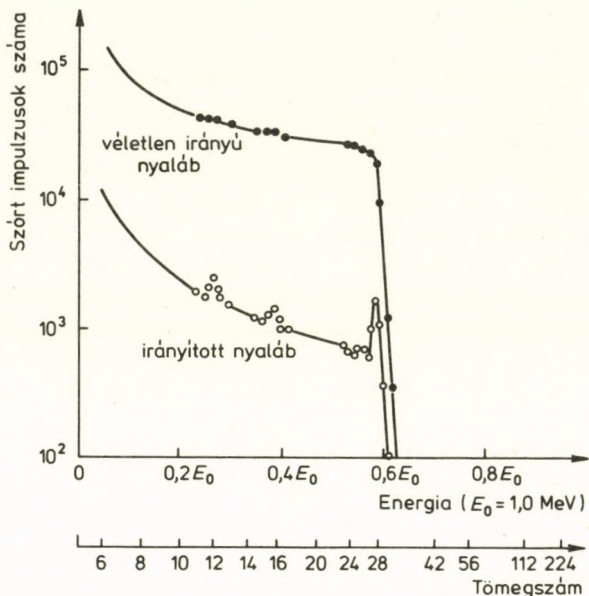
A 13c. ábrán látható spektrum vastag Mo-fólián elhelyezkedő, ^4He -ionokkal implantált ScD_2 -réteg esetén mérhető. A kinematikai

viszonyok miatt sem a D-, sem a ^4He -csúcs nem jelentkezik a spektrumon. A vastag Mo-fóliának megfelelő széles csúcs a Mo-vonal eredeti helyénél alacsonyabb energiánál jelentkezik, mert a szendvics szerkezet első rétegében, a ScD_2 -rétegben már fékeződés van, így a Mo-fólia frontfelületét már 2,5 MeV-nél kisebb energiájú ionok érik el. A Sc-csúcs is széles, jelezve, hogy e réteg vastagsága már meghaladta a vékony réteg definícióját. A spektrum nagyenergiás részén egy alacsony, de széles Er-csúcs látható. A szélesség azt jelenti, hogy az Er-szennyezés a ScD_2 -rétegben, annak teljes vastagságában van. A Mo és a Mo' közötti energiakülönbség a ^4He -ionoknak a ScD_2 -rétegben bekövetkezett energiaveszteségét méri.

A 13d. ábra ugyanennek a szendvicsszerkezetnek 2,5 MeV-es protonokkal való bombázásakor mérhető protonenergia-spektrumot mutat. A tömegskála természetesen más, mint az előző ábrákon. A kis energiáknál nagyobb a tömegfelbontó képesség, a nagyobb energiáknál a skála még nyomottabb. A kinematika itt nem akadályozza a D- és a ^4He -csúcsok jelentkezését, az anomális szórás biztosította nagy hatáskeresztmetszet miatt ezek valóban meg is jelennek a spektrumon. A vastag hordozó Mo-fóliának mélyebb rétegeit elérő kisebb energiájú protonokra a Rutherford-szórás hatáskeresztmetszete rohamosan csökken, így a kontinuum nem terjed a kis energiáig, hanem laposan zérusra csökken.

A szórás egyik speciális alkalmazása a csatornahatás felhasználása, amely alkalmas a szennyezők rácslokalizációjának vizsgálatára [15, 22, 25, 106] azáltal, hogy míg az amorf anyagokban a fékeződés izotrop, az egykristályok rácssíkjaik irányában kisebb az elektronsűrűség és így a fékeződés is kisebb, mint a többi irányokban. Azok a bombázóionok, amelyek trajektóriái e kitüntetett irányokkal egybeesnek, anomálishan kis energiaveszteséget szenvednek, ezáltal mód nyílik a nagyobb mélységekben, ill. a rácssíkokban elhelyezkedő szennyezők nagy érzékenységgű mérésére (14. ábra).

Rezonanciaszórás. A töltött részecskéknek az atommagokkal való kölcsönhatásakor a Coulomb-gát alatt is léphetnek fel rezonanciák. Több rezonancia átfedése ún. anomális szórást eredményez. Ez a módszer, a nagyszögű Rutherford-szórással ellentétben a könnyű elemek tartományában is alkalmazható. A Li és a Ca között mintegy 14 elem izotópján mértek rezonanciákat, ill.



14. ábra. A csatornaeffektus háttérredukáló hatása alfa-részecskék esetén szilíciumkristályon lévő szén és oxigén szennyezők jelenlétében [22]

anomáliákat proton és ^4He rugalmas szórásakor [22]. A módszert felhasználták pirolitikusan előállított krómréteg oxigéntartalmának mérésére [127].

A Coulomb-gerjesztés révén létrejövő ($p, p'\gamma$) rezonanciaszórás az 1—7 MeV közé eső gamma-sugarak mérésével (GRALE = Gamma-Ray Analysis of Light Elements) módot nyújt a C, O, N, S, Si [123], továbbá a $Z=23$ —78 közötti elemek meghatározására [108]. A deutérium és a ^4He mélységeloszlása $10\ \mu\text{m}$ mélységig $75\ \text{nm}$ felbontással mérhető $2,5\ \text{MeV}$ energiájú protonok anomális szórásával [124]. Az ($\alpha, \alpha'\gamma$) rezonanciaszórással F határozható meg [125]. Az (α, α') rezonanciaszórást $3,045\ \text{MeV}$ energiájú bombázó ^4He -részecskék a szórt részecskék detektálásával ^{16}O eloszlásának mérésére alkalmazták felületi oxidrétegekben [103, 106, 126].

Az anomális szórás, amely pl. $2,5\ \text{MeV}$ -os protonokkal való bombázáskor a könnyű magokon (D, ^3He , ^4He , ^9Be , ^{12}C és ^{16}O) lép

fel, a Rutherford-szóráshoz képest 1—2 nagyságrenddel nagyobb hatáskeresztmetszettel, ezek érzékeny analizisét teszi lehetővé [18, 22, 100—103].

A (γ, γ') szórási reakciót 6—8 MeV-os elektronok fékezési sugárzásával 23 elem analizisére használták fel [109].

Előreszórásnál a nehéz ionok által kiváltott, a targetból Θ szögben kilökött részecskék energiája:

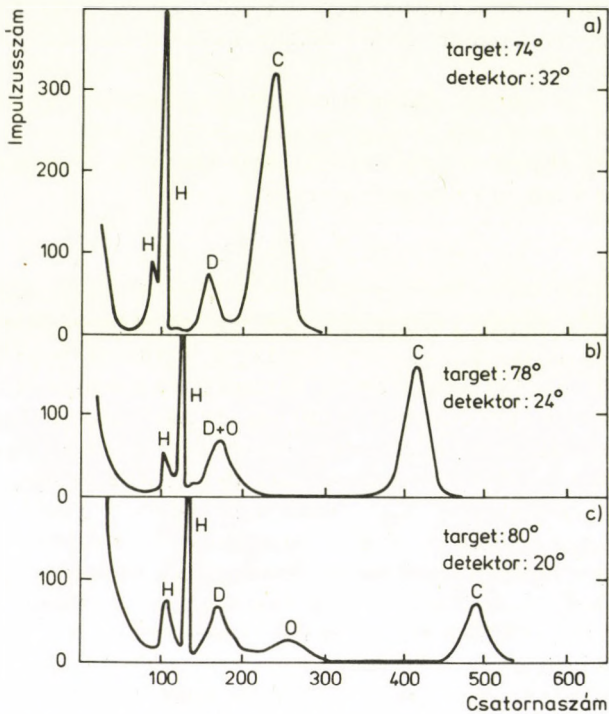
$$E_2 = kE_1 = E_1 \left[\frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} \cos^2 \Theta \right]. \quad (9)$$

A formula alapján a tömegszám—energia összefüggés maximumot mutat. Legnagyobb az energiaátadás a bombázó és a kilökött részecske azonos tömege esetén. A transzmissziós mérési módszer miatt a nem szóródott bombázóionok elnyeletésére a detektor elé elnyelő fóliát kell helyezni, ami azonban a mérendő részecskék energiáját is csökkenti, és egyidejűleg úgy torzítja a tömegszám—energia összefüggést, hogy annak maximuma a kisebb tömegszámokhoz tolódik el. 30 MeV energiájú ^{35}Cl bombázóionokkal Si-filmből kilökött ionok energia (tömeg)-spektrumát mutatja a 15. ábra [104], a detektor elé — abszorbensként — helyezett $10\mu\text{m}$ vastag Mylar-fólia esetén, különböző beeső és szórási szögekben történő mérésekre. A Si-target kb. 10^{16} atom/ cm^2 mennyiségű ^1H , ^2D , ^{12}C és ^{16}O szennyezést tartalmazott. A kettős hidrogéncsúcs azt jelzi, hogy a hidrogénkontamináció a Si-fólia első és hátsó határfelületén koncentrált. A c görbén legjobban a felbontás, itt jól szétválik a D és az O csúcs is.

A nehéz ionokkal kiváltott előreszórás a hidrogén elemzését is lehetővé teszi [104, 105]. E módszernél a bombázórészecske energiacsökkenése helyett a kilökött, előretartó ion energiáját kell mérni. Ez a „transzmissziós” módszer az analizist csak vékony rétegeken teszi lehetővé.

A nukleáris mikroszkonda

A prompt módszerek összes változata alkalmazható vékony, eltéríthető ionnyaláb esetén is, ezt valósítja meg a nukleáris mikroszkonda. A keskeny proton- vagy héliumnyalábot a leggyak-



15. ábra. 10^{16} atom/cm² ¹H, ²D, ¹²C és ¹⁸O szennyezőket tartalmazó szilíciumtárgatból különböző szögek alatt visszashórt részecskék spektruma 30 MeV ³⁵Cl bombázóionok esetén [104]

rabban kisméretű elektrosztatikus gyorsítóval állítják elő, aminek 0,5–4 MeV között változtatható energiájú nyalábjaival, ill. az indukált részecskék mérésére szolgáló detektoraival igen sokféle vizsgálat végezhető el. A töltött részecskék miatt itt is csak a minta felületi rétegeire vonatkozik az információ. Vastagabb lemezek teljes mélységi koncentrációeloszlásának kimérése ferdén lemetsett felületek vizsgálatával oldható meg [110, 111]. A könnyű elemek vonalmenti eloszlásának mérésére az atommagreakciókat, a röntgenfluoreszcencia gerjesztést és a rugalmas szórást egyaránt

kihasználják [25, 112—117]. A vizsgált mélység, ill. vastagság a nyaláb energiájának változtatásával szabályozható.

Gyorsított nehéz ionok rezonanciareakcióit használják fel a legkönnyebb elemek (H, He, Li) mélységeloszlásának mérésére [38]. A kilépő részecskék energiájának mérésével a lítiumtól a fluorig terjedő elemek analizálhatók [38, 104].

Következtetés

Tanulmányunk igyekezett vázlatos áttekintést adni annak a rendkívül dinamikusan fejlődő területnek az ipari analitikában alkalmazott módszereiről, amelyet a gyorsított töltött részecskék analitikai felhasználása indított el. Úgy érezzük, hogy ezzel a nukleáris analitika teljesítőképességének a csúcára jutott el.

Végezetül, ha valamilyen időbeli mérleget is szeretnénk felállítani a nukleáris analitika által az utóbbi 10—12 évben elért jelentős eredményekről, azt Lyon és munkatársainak az Analytical Chemistry folyóiratban kétévenként „Nucleonics” címen megjelenő összefoglalóiból tehetjük leginkább [130—136]. Vegyük sorra a jelentősebb mérföldköveket [137]:

1968-ban a félvezető-detektorok új lehetőségeket tártak fel elsősorban a töltött részek és a fotonaktivációs analízis terén.

1970-ben kezd a töltött részekkel gerjesztett röntgenfluoreszcencia vizsgálatok irodalma növekedni.

1972-ben figyeltek fel először arra, hogy a kutatók, de különösen a fizikusok tömegesen kezdenek az alkalmazott és fejlesztési kutatásokban tevékenykedni.

1974-ben a röntgenfluoreszcenciás módszerek ragyogó ki-fejlődésével a nukleáris módszerek mintegy leülepedtek, elfoglalták helyüket, egyre nagyobb outputot szolgáltatva az 1. ábrán bemutatott „analízis eredmények” ágban.

Irodalom

1. BERÉNYI D.: Magyar Tudomány **24** (1979) 332.
2. BERÉNYI D.: ATOMKI Közlemények **19** (1977) 63.
3. T. BRAUN—W. S. LYON—E. BUJDOSÓ: Anal. Chem. **49** (1977) 682A.
4. T. BRAUN—E. BUJDOSÓ: J. Radioanal. Chem. **50** (1979) 9.
5. D. DE SOLLA PRICE: Science **149** (1965) 510.
6. CH. C. HOLT—W. E. SCHRANK: Amer. Docum., (1968) 18.
7. Proc. Conf. on Ion Implantation and Ion Beam Techniques in Corrosion Studies, Manchester, 1975.
8. Proc. of the Intern. Nuclear and Atomic Activation Analysis Conference and 19th Annual Meeting on Analytical Chemistry in Nuclear Technology, Oct. 14—16, 1975, Gatlinburg, Tennessee. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1976; lásd J. Radioanal. Chem. **32** (1976).
9. Proc. Intern. Conf. on Ion Beam Surface Analysis. (Eds: O. MEYER—G. LINKER—F. KÄPPELER) Plenum Press, London and New York, 1976.
10. Proc. 4th Conf. on the Scientific and Industrial Applications of Small Accelerators, Denton Tex., 25 Oct. 1976. Eds: J. L. DUGGAN—I. L. MORGAN. IEEE, New York, 1976.
11. Proc. of the 1976 Intern. Conf. on Modern Trends in Activation Analysis, Vol. 1—2, Sept. 13—17, 1976, München FRG. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1977; lásd J. Radioanal. Chem. **37**, **38**, **39** (1977).
12. Proc. Intern. Conf. on Particle Induced X-Ray Emission and Its Analytical Application. Ed.: S. A. E. JOHANSSON. Nucl. Instr. Meth. **142** (1977) No. 1—2.
13. Proc. 3rd Intern. Conf. on Ion Beam Analysis. Washington D. C., June 27—July 1 1977.
- 13a. A. CACHARD—J. P. THOMAS—E. LIGEON: in Material Characterisation Using Ion Beams. Eds: J. P. THOMAS—A. CACHARD, Plenum Press, London and New York, 1978.
14. Proc. Intern. Conf. on Proton Induced X-Ray Emission, Lund, Sweden, 1976. Nucl. Instr. Meth. **142** (1977).
15. J. R. BIRD—B. L. CAMPBELL—P. B. PRICE: At. Energy Rev. **12** (1974) 275.
16. BUJDOSÓ E.: ATOMKI Közlemények **17**, 1. melléklet (1975) 73.
17. BUJDOSÓ E.: Fizikai Szemle **25** (1975) 85.
18. Applications of ion beams to metals. Eds: S. T. PICRAUX—E. PEERNISSE—F. L. VOOK, Plenum Press, London and New York, 1972.
19. T. A. CAHILL: New Uses of Low Energy Accelerators, Ed.: J. ZEIGLER, Plenum Press, New York, 1975.
20. G. DECONNINCK,—F. BODART,—G. DEMORTIER: At. Energy Rev. **13** (1975) 367.
21. J. R. BIRD—B. L. CAMPBELL—R. J. CAWLEY: Prompt nuclear analysis bibliography 1976, AAEC/E-443, May 1978, p. 169.
22. G. DECONNINCK: Introduction to Radioanalytical Physics. Nuclear Methods Monographs No. 1. Akadémiai Kiadó, Budapest, Elsevier, Amsterdam, 1978, p. 242.
23. V. KRIVAN: Fresenius Z. Anal. Chem. **290** (1978) 193.

24. S. S. NARGOLWALLA: From idea to application. Some selected nuclear techniques in research and development. IAEA, Vienna, 1978, p. 81.
25. A. TUROS: *Nukleonika* (Warsaw) **23** (1978) 183.
26. E. A. WOLICKI—J. BUTLER—D. TREADO: *Ion Beam Analysis*. North Holland, Amsterdam, 1978.
27. G. J. LUTZ: 14-MeV Neutron Generators in Activation Analysis: A Bibliography. NBS Technical Note 533, June 1970.
28. R. VAN GRIEKEN—J. HOSTE: Annotated Bibliography on 14 MeV Neutrons. Eurisotop Office Information Booklet 65, Series: Bibliographies 8. Bureau Euroisotop, Brussels, 1972.
29. C. VANDECASTEELE—A. SPEECKE—J. HOSTE: The determination of Oxygen in Non Ferrous Metals by 14 MeV Neutron Analysis. Eurisotop Office Information Booklet 68, Series: Monographies 22. Bureau Euroisotop, Brussels, 1972.
30. S. S. NARGOLWALLA—E. P. PRZYBYLOWICZ: *Activation Analysis with Neutron Generators*. Chemical Analysis Series Vol. 39. Wiley, New York, 1973.
31. VÁRHALMI L.—BENCZE B.—GÁRDOS M.—VORSATZ B.—VARGA L.—TEMESI I.: *Izotóptechnika* **20** (1977) 339.
32. J. PAUWELS: *J. Radioanal. Chem.* **50** (1979) 115.
33. H. MÜNZEL—F. MICHEL—P. P. COETZE—V. KRIVAN: *J. Radioanal. Chem.* **37** (1977) 267.
34. T. BENNETT—D. CAVERS—J. M. D'AURIA: *J. Radioanal. Chem.* **13** (1973) 201.
35. V. KRIVAN—H. MÜNZEL: *J. Radioanal. Chem.* **15** (1973) 575.
36. BORNEMISZA—PAUSPERTL P.—KOVÁCS P.—URAY I.: *ATOMKI Közlemények* **18** (1976) 355.
37. C. VANDECASTEELE—R. KIEFER—J. HOSTE: *J. Radioanal. Chem.* **37** (1977) 255.
38. M. D. D'AGOSTINO—E. A. KAMYKOWSKI—F. J. KUEHNE—G. M. PADOWER—E. J. SCHNEID—R. L. SCHULTE—M. C. STAUBER—F. R. SWANSON: *J. Radioanal. Chem.* **43** (1978) 421.
39. J. MAYER—I. KAŠPAREC: *Radiochem. Radioanal. Letters* **38** (1979) 313.
40. D. KAFKA—J. TURÁN—P. SALZER: *Radiochem. Radioanal. Letters* **37** (1979) 141.
41. J. L. DEBRUN: *IEEE Trans. on Nucl. Science* **NS-26** No 2. (1979) 2229.
42. G. CABANE—CH. ENGELMANN: *Rev. Phys. Appl.* **3** (1968) 365.
43. CH. ENGELMANN: *J. Radioanal. Chem.* **7** (1971) 89 és **7** (1971) 281.
44. M. VALLADON—J. L. DEBRUN: *J. Radioanal. Chem.* **39** (1977) 385.
45. E. A. SCHWEIKERT: Advisory group meeting on applied nuclear physics, San Jose, Costa Rica, 9—13 May 1977. Panel Proceeding Series, 1978, p. 1.
- 46a. H. L. FINSTON—E. T. WILLIAMS—S. E. BAUMAN—S. H. JACOBSON—A. H. BOND, JR.: *J. Radioanal. Chem.* **43** (1978) 523.
- 46b. J. N. BARRANDON—J. L. DEBRUN—A. KOHN: *J. Radioanal. Chem.* **16** (1973) 617.
47. R. PRETORIUS—F. ODENDAAL—M. PEISACH: *J. Radioanal. Chem.* **12** (1972) 139.
48. YU. I. BONDARENKO—V. S. RUDENKO: *J. Radioanal. Chem.* **52** (1979) 127.
49. J. N. BARRANDON—L. QUAGLIA—J. L. DEBRUN: *J. Radioanal. Chem.* **4** (1970) 115.

50. B. BORDERIE—J. N. BARRANDON—J. L. DEBRUN: *J. Radioanal. Chem.* **37** (1977) 297.
51. E. RICCI—R. L. HAHN: *Anal. Chem.*, **39** (1967) 794.
52. D. M. LEE—S. S. MARKOWITZ: *J. Radioanal. Chem.* **19** (1974) 159.
53. V. A. MUMINOV—S. MUKHAMMEDOV—B. SULTANOV—A. RAKHMANOV: *Zh. Analit. Khim.* **33** (1978) 1137.
- 54a. H. PETRI—C. S. SASTRI: *Radiochem. Radioanal. Letters* **21** (1975) 225.
- 54b. C. S. SASTRI—H. PETRI—G. ERDTMANN: *J. Radioanal. Chem.* **38** (1977) 157.
55. P. GOETHALS—C. VANDECASTEELE—J. HOSTE: *Anal. Chim. Acta* **101** (1978) 63.
56. J. R. MCGINLEY—L. ŽIKOVSKY—E. A. SCHWEIKERT: *J. Radioanal. Chem.* **37** (1977) 275.
57. J. R. MCGINLEY—G. J. STOCK—E. A. SCHWEIKERT—J. B. CROSS—R. ZEISLER—L. ŽIKOVSKY: *J. Radioanal. Chem.* **43** (1978) 559.
58. C. FRIENDLY—B. D. LASS—E. A. SCHWEIKERT: *J. Radioanal. Chem.* **54** (1979) 281.
59. F. W. K. FIRK: *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **20** (1970) 39.
60. T. KATO: *J. Radioanal. Chem.* **16** (1973) 307.
61. B. L. BERMAN: Atlas of photonuclear cross sections obtained with monoenergetic photons. *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **15** (1975) 319.
62. CH. ENGELMANN: *J. Radioanal. Chem.* **6** (1970) 399.
63. P. BOCK—CH. ENGELMANN—A. HATTERER: *J. Radioanal. Chem.* **38** (1977) 97.
64. D. R. WILLIAMS—J. S. HISLOP—A. P. MEAD—T. W. SANDERS—D. A. WOOD: *J. Radioanal. Chem.* **48** (1979) 213.
65. J. R. MCGINLEY—E. A. SCHWEIKERT: *J. Radioanal. Chem.* **16** (1973) 385.
66. H. P. WEISE—CHR. SEGEBADE: *J. Radioanal. Chem.* **49** (1979) 95.
67. H. P. WEISE—CHR. SEGEBADE: *J. Radioanal. Chem.* **37** (1977) 195.
68. CH. ENGELMANN—D. Y. JEROME: Practical Aspects of Activation Analysis with Charged Particles. EURATOM Symp., Liège, 1967, EUR 3896, d—e—f, 119.
69. W. MOELLER: *Nucl. Instrum. Methods* **157** (1978) 223.
70. V. CERCASOV: *J. Radioanal. Chem.* **52** (1979) 397.
71. J. LORENSEN—D. BRUNE—S. MAMSKOG: *J. Radioanal. Chem.* **16** (1973) 483.
72. E. MÖLLER—L. NILSSON—N. STARFELD: *Nucl. Instrum. Methods* **50** (1967) 270.
73. I. GOLICHEFF—M. LOEUILLET—CH. ENGELMANN: *J. Radioanal. Chem.* (1972) 233.
74. K. L. DUNNING: *Nucl. Instr. Methods* **149** (1978) 317.
75. A. J. AVERY—E. E. BARRATT—J. A. GRIMSHAW—F. J. SPOONER—C. G. WILSON: *J. Radioanal. Chem.* **48** (1979) 253.
76. G. AMSEL—D. DAVID: *Rev. Phys. Appl.* **4** (1969) 383.
77. A. TUROS—L. WIELUNSKI—A. BARCZ: *Nucl. Instr. Methods* **111** (1973) 605.
78. J. BÖTTIGER—J. S. WILLIAMS—P. S. JENSEN: *Nucl. Instr. Methods* **151** (1978) 241.
79. L. GOENCZI—H. BERGGREN—R. DIDRIKSSON—B. SUNDQUIST: *Nucl. Instr. Methods* **149** (1978) 337.
80. R. S. BLEWER—R. BEHRISCH—B. M. U. SCHERZER—R. SCHULZ: *J. Nucl. Materials* **76—77** (1978) 305.
81. I. S. GILES—C. O. OLIVIER—M. PEISACH: *J. Radioanal. Chem.* **37** (1977) 141.

82. D. GIHWALA—I. S. GILES—M. PEISACH: *J. Radioanal. Chem.*, **46** (1978) 333.
83. C. SEGEBADE—B. F. SCHMITT—G. J. LUTZ: *Z. Anal. Chem.* **296** (1979) 263.
84. C. BERTHELOT—G. CARRARO—V. VERDINGH: *J. Radioanal. Chem.* **50** (1979) 185.
85. K. MASUMOTO—T. KATO—N. SUZUKI: *Nucl. Instrum. Methods* **157** (1978) 567.
86. K. ISHII—M. VALLADON—J. L. DEBRUN: *Nucl. Instr. Methods* **150** (1978) 213.
87. K. ISHII—M. VALLADON—C. S. SASTRI—J. L. DEBRUN: *Nucl. Instr. Methods* **153** (1978) 503.
88. K. ISHII—C. S. SASTRI—M. VALLADON—B. BORDERIE—J. L. DEBRUN: *Nucl. Instr. Methods* **153** (1978) 507.
89. T. A. CAHILL: *Nucl. Instr. Methods* **149** (1978) 431.
90. G. DECONNINCK—G. DEMORTIER: *J. Radioanal. Chem.* **24** (1975) 437.
91. Y. MORIYA—Y. ATO—S. MIYAGAWA: *Nucl. Instr. Methods* **150** (1978) 523.
92. M. PONCET—C. ENGELMANN: *Nucl. Instr. Methods* **149** (1978) 461.
93. VÉGH J.—BERÉNYI D.—KOLTAY E.—KISS I.—S. SEIF EL-NASR—SARKADI L.: *Nucl. Instr. Methods* **153** (1978) 553.
94. BERÉNYI D.—KISS I.—KOLTAY E.—S. SEIF-EL-NASR—SARKADI L.—VÉGH J.: *Izotóptechnika* **20** (1977) 386.
95. Y. J. UEMURA—Y. KUNO—H. KOYAMA—T. YAMAZAKI—P. KIEHLE: *Nucl. Instr. Methods* **153** (1978) 573.
96. K. M. BARFOOT—I. V. MITCHELL—H. L. ESCHBACH—P. I. MASON—W. B. GILBOY: *J. Radioanal. Chem.* **53** (1979) 263.
97. H. MOMMSEN—K. G. BAUER—O. FAZLY—T. MAYER—KUCKUK—P. SCHUERKES *Forschungsber. Landes North.—Westfalen*, No. 2686, 1977, p. 43.
98. R. ZEISLER—J. B. CROSS—A. SCHWEIKERT: *Anal. Chem.* **48** (1976) 2124.
99. G. J. STARK—J. B. CROSS—E. A. SCHWEIKERT: *J. Radioanal. Chem.* **54** (1979) 191.
100. R. S. BLEWER: *Appl. Phys. Lett.* **23** (1973) 593.
101. R. S. BLEWER—L. A. LANGLEY: *J. Nucl. Materials* **63** (1976) 337.
102. B. M. U. SCHERZER—H. L. BAY—R. BEHRISCH—P. BOERGESEN—J. ROTH: *Nucl. Instrum. Methods* **157** (1978) 75.
103. G. POSNERT—C. FAHLANDER—B. ORRE: *Phys. Scr. V.* **18** (1978) 353.
104. J. L'ECUYER—C. BRASSARD—C. CARDINAL: *Nucl. Instr. Methods* **149** (1978) 271.
105. J. F. ZIEGLER et al.: *IBM Research Report RC 6663*, 8 (1) 77.
106. LOHNER T.—MEZEY G.—KÓTAI E.—NAGY T.—MANUABA A.—GYULAI J.: *Izotóptechnika* **20** (1977) 368.
107. Z. E. SWITKOWSKI—J. C. OVERLAY—S. C. WU—C. A. BARNES—J. ROTH: *J. Nucl. Materials* **78** (1978) 64.
108. G. AMSEL—J. P. NADAI—E. D'ARTEMARE—D. DAVID—E. GIRARD—J. MOULIN: *Nucl. Instr. Methods* **92** (1971) 481.
109. P. BREBAN—G. BLONDIAUX—M. VALLADON—A. GIOVAGNOLH—M. DEVAUX—S. MICHEL—J. L. DEBRUN: *Nucl. Instrum. Methods* **158** (1979) 205.
110. J. W. McMILLAN—F. C. W. PUMMERY: *J. Radioanal. Chem.* **38** (1977) 51.
111. J. F. SINGLETON—N. E. W. HARTLEY: *J. Radioanal. Chem.* **48** (1979) 317.
112. T. B. PIERCE—J. W. McMILLAN—P. F. PECK—I. G. JONES: *Nucl. Instr. Methods* **118** (1974) 115.

113. C. OLIVIER—J. W. McMILLAN—T. B. PIERCE: Nucl. Instr. Methods **124** (1975) 289.
114. C. OLIVIER—M. PEISACH—T. B. PIERCE: J. Radioanal. Chem. **32** (1976) 71.
115. T. B. PIERCE: J. Radioanal. Chem. **37** (1977) 285.
116. H. R. WILDE—M. ROTH—C. D. UHLHORN—B. GONSIOR: Nucl. Instr. Methods **149** (1978) 675.
117. J. HUDDLESTON—T. B. PIERCE: 5. Symposium on the recent development in activation analysis, Oxford, 1978.
118. T. NOZAKI—M. IWAMOTO—K. USAMI—K. MUKAI—A. HIRAIWA: J. Radioanal. Chem., **52** (1979) 447.
119. R. A. JARJIS: Nucl. Instrum. Methods **160** (1979) 457.
120. E. LIGEON—A. BONTEMPS: J. Radioanal. Chem. **12** (1972) 335.
121. E. LIGEON—M. BRUEL—A. BONTEMPS—G. CHAMBERT—J. MONNIER: J. Radioanal. Chem. **16** (1973) 537.
122. J. A. BORDERS—J. M. HARRIS: Nucl. Instr. Methods **149** (1978) 279.
123. E. S. MACIAS—J. H. BARKER: J. Radioanal. Chem. **45** (1978) 387.
124. R. S. BLEWER: in Proc. Conf. on Radiation Effects on Solid Surfaces, Chicago, Ill. Aug. 25, 1975. Ed.: M. KAMINSKY, 1976, p. 262.
125. I. S. GILES—M. PEISACH: J. Radioanal. Chem. **32** (1976) 105.
126. L. O. NORLIN—B. ORRE—G. POSSNERT—K. JOHANSSON: Phys. Scr. V. **17** (1978) 439.
127. R. E. KAIM—P. W. PALMER: J. Radioanal. Chem. **48** (1979) 295.
128. C. W. WHITE: Nucl. Instr. Methods **149** (1978) 497.
129. T. KATO—K. MASAMUTO—N. SATO—N. SUZUKI: J. Radioanal. Chem. **32** (1976) 51.
130. W. S. LYON—E. RICCI—H. H. ROSS: Anal. Chem. **38** (1966) 251R.
131. W. S. LYON—E. RICCI—H. H. ROSS: Anal. Chem. **40** (1968) 168R.
132. W. S. LYON—E. RICCI—H. H. ROSS: Anal. Chem. **42** (1970) 123R.
133. W. S. LYON—E. RICCI—H. H. ROSS: Anal. Chem. **44** (1972) 438R.
134. W. S. LYON—E. RICCI—H. H. ROSS: Anal. Chem. **46** (1974) 431R.
135. W. S. LYON—H. H. ROSS: Anal. Chem. **48** (1976) 96R.
136. W. S. LYON—H. H. ROSS: Anal. Chem. **50** (1978) 80R.
137. W. S. LYON: Radiochem. Radioanal. Letters **24** (1976) 313.

A kohászat gyorsítók felhasználásával megoldható analitikai igényei

Hegedüs Zoltán

CSM Tervező és Kutató Intézet, Budapest

A nukleáris analitika különleges helyet foglal el a fém- és vaskohászatban. Alkalmazása nem általános. Gyakorlati jelentőségre elsősorban az aktivációs elemzési módszerek tettek szert. Az aktivációs elemzés elve jól ismert, részletes leírása magyar nyelvű közleményekben megtalálható, ezért lényegét csak vázlatosan mutatjuk be [1, 3].

Az elemezni kívánt fémmintát megfelelő sugárzásnak tesszük ki meghatározott körülmények között. A besugárzás hatására a minta atomjainak egy részéből sugárzó izotópok keletkeznek. A sugárzás energiaspektrumából meg lehet határozni a jelenlévő elemek minőségét és mennyiségét [2, 3].

Az eljárás jellemzője a nagy érzékenység, ami két előnnyel jár:

- nagyon kis, μg mennyiségű anyag elemzése is lehetővé válik,
- $0,002 \mu\text{g/g}$ koncentrációban jelenlévő egyes elemek is meghatározhatóvá válnak.

Kedvező esetben a meghatározás egyszerű, de a mátrix vagy valamely kísérő elem zavaró hatása miatt kémiai elválasztásra is szükség lehet. Erre a célra könnyen automatizálható, igen gyors elválasztási eljárásokat alkalmaznak, mert összetétel elemzésre főleg a rövid felezési idejű izotópok előnyösek. A kohászati elemzéskor több szennyezőt kell egyidejűleg és egymás mellett meghatározni. Ez közbeiktatott kémiai szétválasztással megbízhatóbban végezhető, nagyobb érzékenység és pontosság mellett. A felhasznált vegyszerekkel szemben nincs különösebb követelmény, mert ezek

alkotó elemei inaktívak, így a meghatározás szempontjából közömbösek, a vizsgálat pontosságát nem befolyásolják. Előfordulhat azonban olyan eset is, hogy az elválasztást az aktiválás előtt kell elvégezni, ilyenkor a vegyszerek tisztasága alapvető követelmény.

A kémiai elválasztási eljárások közül elsősorban a gyors és könnyen automatizálható módszereket lehet alkalmazni. A hazai és külföldi közlemények és gyakorlat tapasztalatai szerint az alábbi három kémiai elválasztás használatos:

- kation- vagy anioncserélő műgyantákkal,
- papírkromatográfiás úton,
- extrakcióval.

A kation-anion cserélő műgyanták jól beváltak Ta—Nb, ritkaföldfémek, a szilícium Cu, As, Cd szennyezőinek meghatározására.

A papírkromatográfia inkább csak speciális feladatok megoldására használatos, pl. szilícium nyomszennyezőinek meghatározására.

Az extrakció a leggyorsabb, és főleg rövid felezési idejű izotóp jelenlétében a fémelemzésben nélkülözhetetlen.

A besugárzás történhet

- az atomreaktorban rendelkezésre álló termikus neutronokkal,
- az atomreaktornál egyszerűbb és olcsóbb részecskegyorsítókkal (neutrongenerátorokkal) előállított gyors neutronokkal,
- gyorsítókkal (sztatikus, ciklikus, lineáris) előállított ionokkal, amely különösen a könnyű elemek (H, C, N, O) nagy érzékenységű meghatározásánál jelentős.

Az aktivációs elemzés hazai lehetőségei az 1960-as évek közepén kialakultak [1, 3, 4, 5], és szerencsés módon körülbelül ugyanezen időre jutott el a hazai fémkohászat is arra a szintre, hogy ezen vizsgálati módszerben rejlő lehetőségeket hasznosítani tudja.

1965-ben megindult a CSM Fémművében a nagy tisztaságú (min. 99,99%-os) réz és nikkell féltermékek üzemi gyártása. Rendelkezésre álltak a célnak megfelelő, korszerű vákuumindukációs és elektronsugaras olvasztóberendezések, és a féltermék előállításához nélkülözhetetlen nagy tisztaságú, szabályozott gázatmoszférájú,

illetve vákuumos hőkezelő kemencék. Megkezdődött a nagyon szigorú előírás szerinti nagy tisztaságú CuVNT, CuEOM, OFHC réz és NiVNT nikkel üzemi gyártása. A CuVNT, OFHC réz és NOO, NiVNT nikkel megengedett maximális szennyező koncentrációit, és a különböző mintákban különböző módszerekkel mért koncentrációkat az 1. és 2. táblázat mutatja.

Tömegspektrométerrel Häussler [7] rézben a következő nyomszennyezőket határozta meg: Ag, Al, As, B, Bi, Ca, Cl, Co, Cr, F, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Pb, S, Sb, Se, Si, Sn, Ta, Ti, V, W, Zn. A kimutatási határ néhány elemnél: Sb = 0,007 ppm, Sn = 0,003 ppm, Te = 0,004 ppm. Aktivációs elemzéssel ugyancsak Häussler határozta meg a réz Ag, Al, As, Au, Bi, Cl, Cr, Fe, Mg, Mn, Mo, P, S, Sb, Se, Te nyomszennyezőit.

1. táblázat. CuVNT és OFHC gyártmányokban megengedett, ill. a különböző mintákban különböző módszerekkel mért szennyezési koncentrációk (ppm)

Szennyező	Minta		Kétszer elektronizált réz*	Zónás olvasztás**	Cu-etalon***	Tiszta réz****
	CuVNT	OFHC				
S	1	12	1	0,5	—	3,5
P	0,5	1	—	—	10	0,7
As	1	2	0,5	As + P 0,1 – 0,5	27	1,1
Ag	0,3	14	1	1,5	2	8,9
Fe	5	6	6	1,5	4	—
Sb	1	4	0,5	0,1	1	6,7
Bi	1	4	0,1	0,1	1,4	—
Se	1	3	—	—	—	0,09
Te	1	1	—	—	9	—
Sn	0,5	1	0,1	—	0,75	—
Ni	1	5	1	0,8	2	—

* a meghatározás kémiai úton vagy szinképlelemzéssel történt [7]

** a meghatározást aktivációs elemzéssel és tömegspektrométerrel végezték [7]

*** a kereskedelemben kapható leg tisztább Cu-etalon szinképlelemzési adatai [2]

**** Vitryben végzett aktivációs elemzés adatai [2]

2. táblázat. NOO és NiVNT minőségű nikkelyártmányokban megengedett, ill. a különböző mintákban különböző módszerekkel mért szennyezési koncentrációk (ppm) [8]

Szennyező / Minta	NOO katód	NiVNT	Optikai szinképelemzés	Coulombmetriás titrálás	Polarográfias meghatározás	Spektrofotometria	Röntgenszinképelemzés
Co	40	40	2,5 – 10 000	10	—	1	25 – 10 000
C	30	150	—	—	—	—	—
Mg	3	10	0,6 – 1 000	—	—	—	—
Al	30	30	3 – 1 000	—	—	5	—
Si	10	10	3 – 50	—	—	—	—
P	1	1	—	—	—	1	—
Mn	3	10	0,4 – 4 000	—	—	—	10 – 4 000
Fe	20	50	2 – 5 000	—	—	4	10 – 12 000
Cu	7	10	1,5 – 2 560	—	5	5	25 – 2 500
Zn	2,5	10	10 – 800	—	—	1	—
As	4,4	10	—	—	—	1	—

Néhány elem esetében a kimutathatósági határról a 3. táblázat tájékoztat [1].

A nagy tisztaságú fémek ellenőrzésére az adott időben az analitikai kémia hazánkban még nem volt megfelelően felkészülve.

A nagy tisztaságú réz elemzésére sem a Coulomb-metria, sem a potenciometrikus titrálás vagy a polarográfia különböző eljárásai nem voltak kielégítőek.

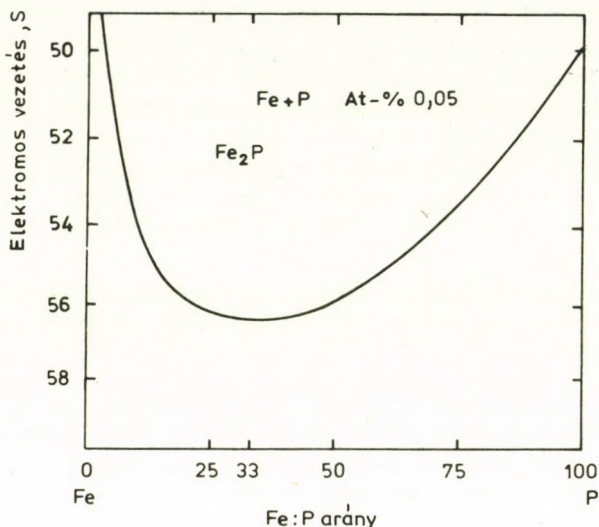
Egyedül az akkor még ritkaságszámba menő tömegspektrográf és az aktivációs elemzés volt alkalmas az előírásokban szereplő kis koncentrációk meghatározására. A Központi Fizikai Kutató Intézet a Csepel Művek Fémműve részére kidolgozta 1965-ben a réz Ag, Sb, Sn, Zn, As, Au, Se, O szennyezőinek aktivációs elemzését. A módszer segítséget nyújtott a nagy tisztaságú réz gyártásának megindításához, de végső megoldást nem hozott, mert az aktiváláshoz szükséges sugárforrás a Csepel Művektől távol levő, helyhez kötött nagyberendezés volt.

A kohászat a mintavételtől számított néhány percen belüli kész elemzési eredményt kíván, mert ellenkező esetben nem tud beavatkozni és nem tudja biztosítani a megfelelő gyártást. Így üzemi vizsgálatra az aktivációs elemzés már nem jöhetett számításba.

3. táblázat. Szennyezők legkisebb mérhető mennyisége (ppm) rézmintában különböző analitikai módszerek alkalmazása esetén

Szennyezők / Analitikai módszerek	Neutronaktiválás 10^{13} fluxus	Szinképelemzés	Lángfotometria	Kolorimetria
As	0,0001	5	—	0,1
Fe	0,45	0,5	2	0,5
Mn	0,0003	0,02	0,1	0,001
Au	0,0002	0,2	200	—
Ag	0,005	—	0,5	0,1

A nagy tisztaságú rézben az elemek bonyolult kölcsönhatása miatt nem elég az egyes szennyezők mennyiségének ismerete. Olyan vizsgálati módszerek is szükségesek, amelyek a kölcsönhatásokat is figyelembe véve, fontos használati tulajdonságra, elsősorban az elektromos vezetésre adnak pontos értéket. A bonyolult kölcsönhatásokkal az irodalom részletesen foglalkozik [9]. Az 1. ábrán csak példaként bemutatjuk a P—Fe viszonylag egyszerű kölcsönhatását és az ezzel járó elektromosvezetés-változást. Hasonló, vagy még ennél is bonyolultabb a Fe—O, Ag—Se, Fe—S kölcsönhatása. Sok kétalkotós, ill. három szennyezőből álló rendszer elektromos vezetésének alakulása, ill. változása nem ismeretes. Ezért az egyes alkotók elemzése helyett az elektromos vezetés, a termofeszültségkülönbség vagy a maradékellenállás mérésével ellenőrzik a gyártást. E fizikai vizsgálati eljárásokhoz szükséges etalonok elemzését a tömegspektrométerek mellett ma is aktivációs elemzéssel végzik.



1. ábra. Σ 0,05 At-% Fe + P összegben belül a Fe:P arány változásának hatása a réz elektromos vezetésére [9]

A nagy tisztaságú nikkelenek és nikkeltövezeteknek az elektroncsövek anyagaival szemben támasztott követelményeknek kellett eleget tenni, amiről a 2. táblázat ad tájékoztatást. A szinkép és spektrofotometriai eljárások ugyan ki tudják elégíteni az elemzési követelményeket, de az adott időben a feltételek erre nem voltak meg. Az olvasztási és hőkezelési technológia beállításához ezért szükséges volt az aktivációs elemzés.

A Központi Fizikai Kutató Intézet kidolgozta a Csepel Művek Fémműve részére a Zn, As, Cu, Sb, Bi aktivációs elemzését, ill. a szükséges kémiai elválasztási módszereket [5].

Az aktivációs elemzés nikkelenek és nikkeltövezetek, főleg etalonok elemzésére szinte nélkülözhetetlen.

Az eddig bemutatott nagy érzékenységgű vizsgálatok a kohászatban csak esetenként kerültek vagy kerülnek alkalmazásra.

Általánosan használatos az acélgártásban és az alumíniumöntészetben a neutronaktivációs elemzés az oxigén meghatározására. A

kifejlesztett kis méretű célberendezések általában 2 percen belüli vizsgálati idővel dolgoznak.

A berendezés működési elve: neutrongenerátorból származó gyors, 14 MeV energiájú neutronokkal való besugárzás hatására a mintában levő oxigénből rövid felezési idejű nitrogénizotópok keletkeznek. Ezen izotópok bomlásából származó nagy energiájú gamma-sugárzás jól mérhető, és intenzitása a minta oxigéntartalmával arányos.

Mai ismereteink szerint a jövőben a kohászatban az alábbi analitikai igények kielégítésére jönnek számításba a gyorsítók:

- tisztafém féltermék gyártásakor egyes különleges szennyezők és kis mennyiségű speciális mikroötvezők közvetlen meghatározására,
- más, nem közvetlen elemzési eljárásokhoz szükséges etalonpróbák elemzésére,
- rézkatód fizikai elven működő tisztaságvizsgáló berendezéseihez szükséges etalonok előállítására,
- ötvözetekben egyes alacsony rendszámú mikroötvezők mennyiségi kimutatására,
- a vaskohászatban az acéolvadék és salakminták oxigéntartalmának gyors meghatározására,
- rézfinomítás előrehaladásával a fém, továbbá a betétanyagok oxigéntartalmának ellenőrzésére,
- alumínium formaöntészeti ötvözetek oxigéntartalmának elemzésére,
- nagyon kis mennyiségű, μg nagyságrendű, réz, vas vagy más fémpróbák elemzése.

Irodalom

1. ÖRDÖGH M.—SZABÓ E.: Magyar Kémikusok Lapja **20** (1965) 153—163.
2. VORSATZ B.: Nagy tisztaságú réz elemzése neutronaktivációs módszerekkel. Különleges Rézötívözetek Ankét, 1965, 72—74.
3. SZABÓ E.—SIMONITS A.: Aktivációs analízis. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.
4. JUVÁTZNÉ UPOR V.—ÖRDÖGH M.: KFKI Közlemények **12** (1964) 365—376.
5. CSAJKA M.—ÖRDÖGH M.: KFKI Közlemények **12** (1964) 335—344.
6. TÓTH L.: Nagy tisztaságú fémek. Műszeripari, Híradástechnikai és Elektrotechnikai Fém Félgyártmányok Ankétja, 1964, 46—50.
7. G. HÄUSSLER: Neue Hütte **14** (1969) 12—17.
8. C. L. LEVIS—W. L. OTT—M. M. SINE: Analysis of Nickel. Pergamon Press, London 1966, p. 33.
9. HEGEDÜS Z.: Csepeli Műszaki Közgazdasági Szemle **7** (1969) 17—21.

Gyorsítókkal megoldható analitikai feladatok a félvezetőiparban

Gyulai József

MTA Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest

Bevezetés

A MeV-es energiatartományban működő részecskegyorsítók az anyagvizsgálatok rendkívül hasznos eszközeivé váltak. Segítségükkel, nem roncsoló módon, *mélységfüggő kémiai, nyomelem és — egykristályos anyagok esetén — szerkezeti analízis végezhető.* Kristályoknál a nyomelemanalízis során meghatározható az adalékok (szennyezők) *rácsbeli elhelyezkedése* is. Speciálisan érzékeny a módszer a felületi *oxigénborítottságra*, ill. a *rácsállandónak a felület közelében való megváltozására*. Kis atomi tömegű anyagnak nehéz elemekkel való *szubmonoréteges borítottságának* meghatározásában módszerünk versenytárs nélkül áll érzékenység tekintetében is.

Lényegében három módszer valósítható meg egymást kiegészítő módon az 1—5 MeV-es gyorsítók segítségével (e módszerek a gyorsító mellett szinte azonos elektronikai berendezéseket igényelnek, ezért valóban kiegészítik egymást!): a könnyű részecskék (proton, He^+ , B^+ , C^+ , N^+ ; leggyakrabban He^+) rugalmas visszaszórása, az ún. *visszaszórásos spektrometria (BS)*, az e részecskék által keltett *röntgenfluoreszcencia*, ill. a *magreakció*. A három módszer érzékenysége eltérő feladatokra eltérő lehet, ezért változtatva alkalmazhatók.

A BS különleges előnye, hogy *abszolút összetételt és mélységet ad*, ezért segítsége felbecsülhetetlen pl. olyan analitikai eljárások kalibrálására, amelyek érzékenységben általában felülmúlják (szekunder ion tömegspektrometriai, SIMS).

Szerkezetvizsgálatban, a rácshibák *kimutatásában viszonylag gyors a BS*, ezért alkalmas előzetes vizsgálatok végzésére a

transzmissziós elektronmikroszkópia mellett (ez utóbbi roncsoló és nehézkes mintaelőkészítést igényel, de részletesebb információt ad).

Az analízis során használt nyalábméretek a tized mm² nagyságrendjébe esnek. 10—20 μm nyalábátmérő könnyen elérhető, míg 1—2 μm ma a csúcsteljesítmény.

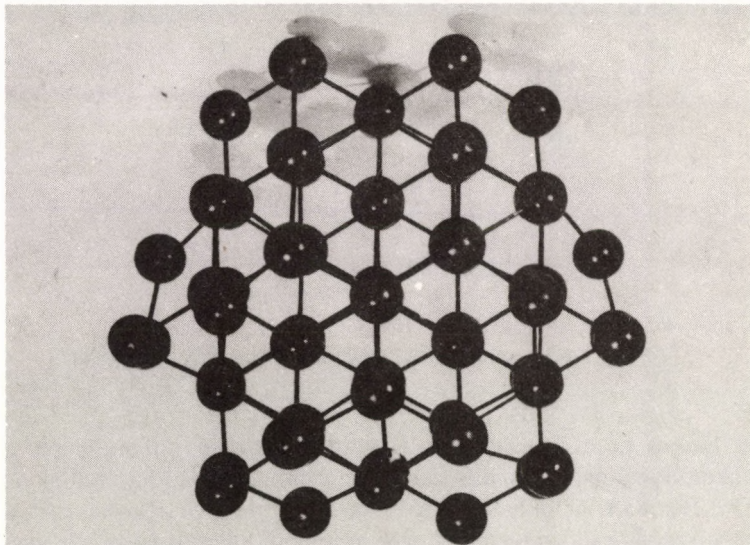
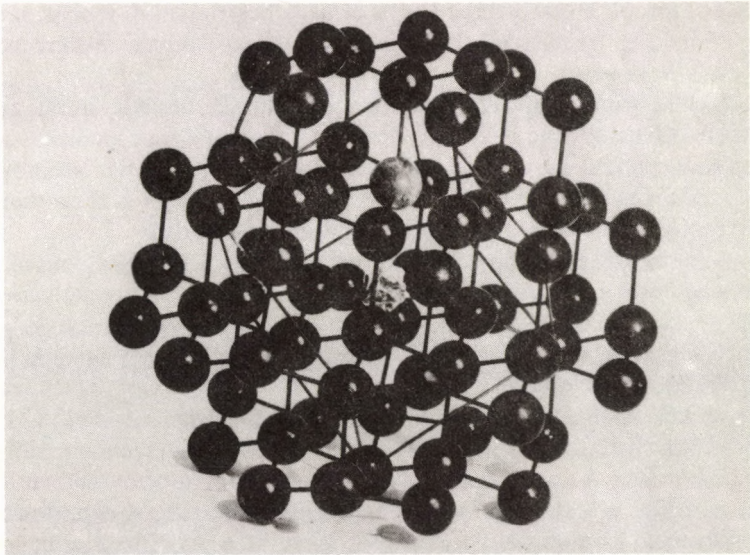
A sokféle információt nyújtó eljárás megvalósításának anyagi feltételei egy 2 MeV-es Van de Graaff esetén nem nagyobbak, mint egy egycélú, de sok feladatra speciálisan érzékeny módszeré (SIMS, Auger-elektronspektroszkópia stb.).

A módszer alapelve

Ha azonos energiájú részecskék csapódnak egy tárgy felületébe, akkor egy részük frontális, rugalmas ütközést szenved a tárgy atomjain. A (visszafelé) szóródó részecskék energiája a szóróatomok tömegétől függ. Ha tehát egy energiaérzékeny detektorba csapódnak a szórt ionok, és a különböző energiájú részecskéket „megszámláljuk”, a tárgy *tömegspektrumát* kapjuk. Példaként: a He⁺-ionok aranyról 96%-os, szilíciumról 56%-os, oxigénről 32%-os energiával szóródnak vissza.

Ha a vizsgált atomok nem a felszínen vannak, a szondázóionok befelé haladtukban, ill. az ütközést követően kifelé repülve is veszítenek az energiájukból. Ez az *energiavesztesség* közvetlenül a *mélységgel arányos*. Így a tömegspektrum kiegészül mélységskálával. Azaz, ha egy idegen anyag a felülettől befelé valamilyen eloszlással rendelkezik, a róla szórt részecskéknek megfelelő spektrumrészlet a kisebb He⁺-energiák felé elnyúlva, a valószínű eloszlás képét mutatja.

A szerkezeti információ abból adódik, hogy kristályos anyagokban a kristálytani tengelyekkel párhuzamosan belőtt ionok tartósan megmaradnak az atomsorok által alkotott „csatornák”-ban. Ekkor a visszaszórt részek száma — azonos mélységből — mintegy századrésze a nem kristályos anyagokból szóródó részecskék számának. A csatorna falát alkotó atomokat nem „látják” az ionok, így a szabályos atomsorban helyet foglaló idegen atomokat sem (1. ábra). A rácsközi térben ülő idegen atomok vagy rácshibák, — azaz

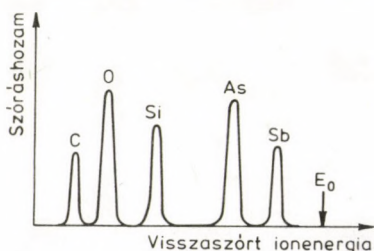


1. ábra. Gyémántrácsmodell képe „véletlen” és $\langle 111 \rangle$ irányból

saját atomok a csatornában — szórják a beeső nyaláb ionjait, sőt különbséget lehet tenni diszlokációk, torlódási hibák, ikerkristályok stb. között.

Közeli tömegszámok esetén a spektrumok átfedése miatt az analízis lehetetlenné is válhat. Általában főkomponens analízisre a módszer százalék — tized százalék érzékenységu. Nehéz atomok eloszlását mérve könnyebb mátrixban tized százalék érzékenység elérhető, kivételesen 100 ppm alsó határ is előfordul.

Azokban az esetekben, amikor kedvezőtlenek a tömegviszonyok, át lehet térni a részecskék által gerjesztett röntgensugárzás analízisére — bár ekkor elveszítjük az abszolút koncentrációs kálát és a mélységskála sem közvetlen — vagy keresünk egy alkalmas energián bekövetkezett (d, p), (p, γ) stb. magreakciót és ennek termékét analizálva következtetünk az ismeretlen atomokra. E pontban csatlakozunk egy hazai ciklotron potenciális felhasználói-nak köréhez. Az abszolút koncentrációs kálát ez utóbbi esetben is elveszítjük, a kalibráció elkerülhetetlen, a mélységre vonatkozó információ azonban nagyon pontos lehet, ha a gyorsító energiájának változtatásával megkeressük azt a mélységet, ahova a

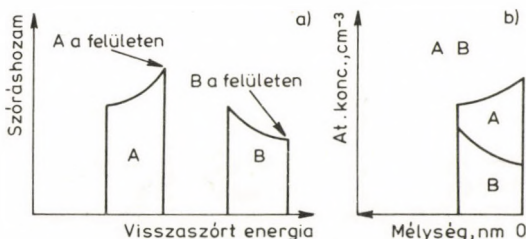


2. ábra. Különböféle atomokból álló réteg (monoréteg) spektruma. A csúcsok területéből a kérdéses elemek felületi sűrűsége (atom/cm²) kiszámítható

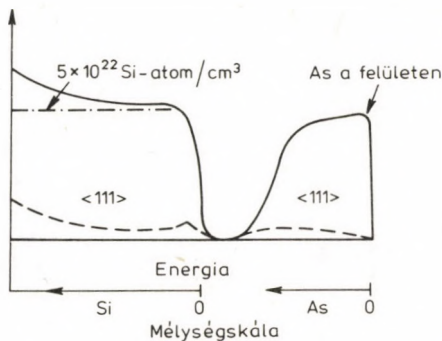
részecskék pontosan annyira lelassulva érkeznek, amennyire az a reakció kiváltásához szükséges. Speciálisan, gyakran használjuk az (α , α) rezonanciát oxigénre (3045 keV energián). A rezonancián a visszaszórás hatáskeresztmetszete, amelyből a kimutathatóság alsó határa következik, mintegy hússzorosára nő. Ilyen energián

kimutatható kb. ezred monorétegnyi oxigénbevonat, vagy 100 ppm koncentrációt meghaladó eloszlás.

A 2—4. ábrák példát mutatnak különböző visszaszórási spektrumok tipikus alakjára. A 2. ábrán egy különböző anyagokból álló monoréteg spektruma látható, a 3. ábrán kétkomponensű, mélységben változó összetételű, „öntartó” vékonyréteg spektrumát



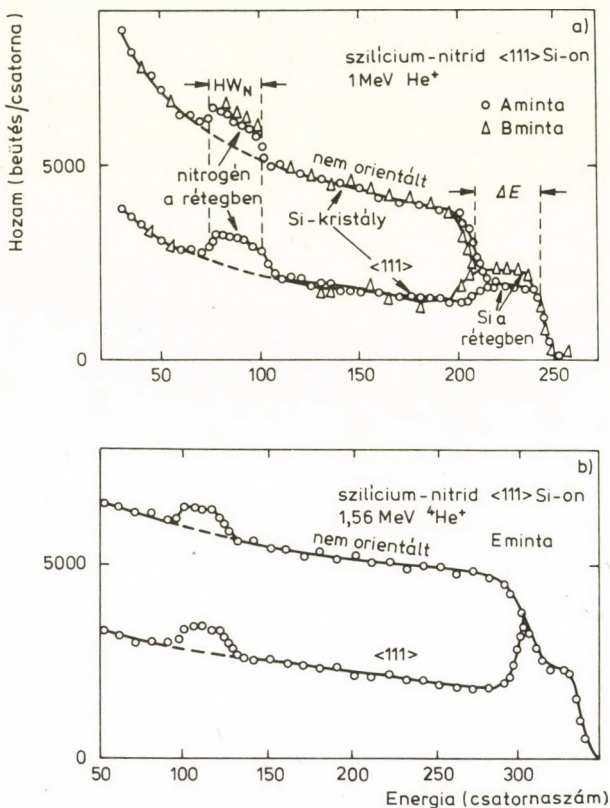
3. ábra. Kétkomponensű réteg spektruma (a) és annak kiértékelt alakja (b) már abszolút skálákkal



4. ábra. Arzén „emitter” szilíciumtranszisztorban, sematikus BS kép. Az $\langle 111 \rangle$ irányból nézve a rácspontokban ülő As-atomok nem „látszanak” (szaggatott vonal)

mutatjuk be. A 4. ábrán szilíciumban kialakított tranzisztor emitterének BS képét ábráztuk sematikusán. A spektrumok olvasásánál a különböző elemektől származó részeket összefektetve kell elképzelni, hiszen a mélységskála minden elemre külön

rajzolandó — ahogy ez az ábrán is látszik. Szaggatott vonallal a 4. ábrán olyan spektrumot mutatunk be, amelyet egy kristálytani tengellyel párhuzamosan beeső nyaláb hoz létre. Az arzén eloszlása is „eltűnik”, mivel ezek az atomok rácspontokban ülnek.

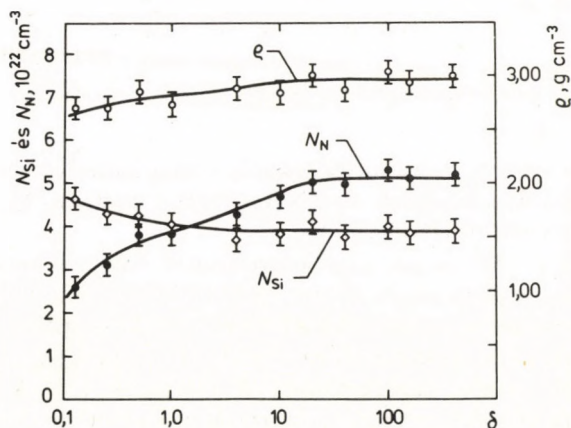


5. ábra. Si_3N_4 -réteg spektruma, véletlen és orientált irányból nézve. Pontról-pontra összehasonlítva a rétegben lévő Si-atomok számát az N-atomokéval, mélységfüggő kémiai összetétel számítható. A b) ábrán nyíljal jelölt csúcs kristályrácson kívüli Si-atomokat jelez: a réteg előállítását előtt nem távolították el a csiszolás által roncsolt réteget

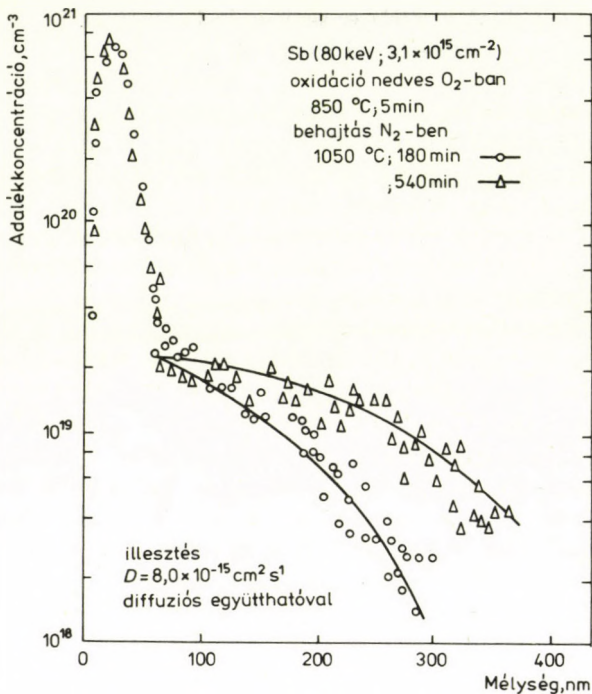
Példák a módszer segítségével megoldott technológiai feladatok köréből

Az egyetlen spektrumból nyerhető sokrétű információ miatt valamennyi analitikai módszer közül talán a BS az, amely az elmúlt évtizedben a legszélesebb körben segített korábban hozzáférhetetlen feladatok megoldásában. Különösen a félvezető eszközök kutatása, fejlesztése és a mikrometallurgia köszönhet sokat a módszernek, de a korróziós vizsgálatok terén is sok eredményt ért el e módszerrel.

A félvezetőtechnológiában fontos szerepet játszik a Si-felületen létrehozott Si_3N_4 -réteg. Ezt általában SiH_4 és NH_3 reakciójával hozzák létre a melegített Si-lapkán. Fontos kérdés, hogy milyen keverékek mellett keletkezik stöchiometrikus nitridréteg. Az 5. ábrán [1] egy spektrum látható, mind „véletlen” irányból, mind csatornairányból felvéve. Az egykristályos Si-lapkának megfelelő spektrumrész érzi az orientálást. Ennek hasznát láthatjuk a nitrogénspektrum pontosabb leválasztásában. A 6. ábra a spekt-



6. ábra. A Si_3N_4 összetétele és sűrűsége az előállításakor használt gázkeverék összetételének függvényében (850°C , $\delta = [\text{NH}_3]/[\text{SiH}_4]$), $\delta \geq 20$ -ra a réteg stöchiometrikus és tömör



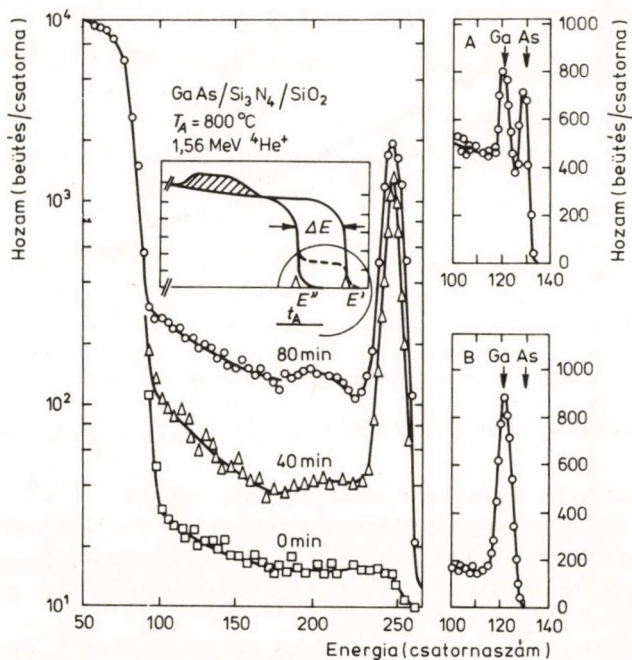
7. ábra. Diffúzió implantált rétegből kiindulva, erfc eloszlás

rumból számított atomi sűrűségeket és a réteg sűrűségét mutatja be a gázkeverék különböző $\delta = [\text{NH}_3]/[\text{SiH}_4]$ eseteire. $\delta \geq 20$ -ra a réteg pontosan stöchiometrikus.

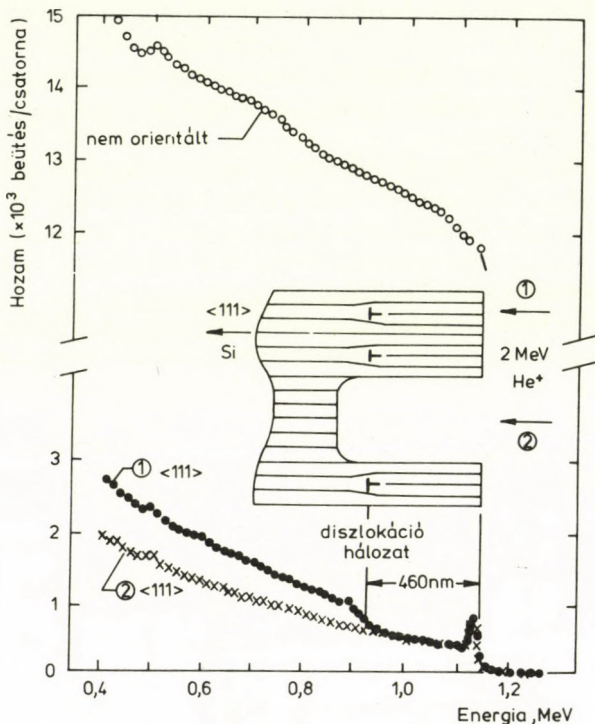
A diffúziós sebességek meghatározásakor a BS a konkrét profil kirajzolása mellett (a 7. ábrán implantált antimon diffundál a szilícium belsejébe; az ábra csak az Sb-re vonatkozó spektrumrészletet mutatja [2]) a spektrum Si-ra vonatkozó részének analizálásával a diffúzió okozta rácstorzulások is mérhetők [2]. A 7. ábra bemutatja az antimoneloszlás változását a hőkezeléssel. Pontosabban: szilíciumba implantált antimon diffúzióját. Érdemes megfigyelni, hogy míg az implantáció nem egyensúlyi helyzetet eredményez (nagy felületi koncentráció), addig a termikus diffúziót már

korlátozza az antimon szilárd oldékonysági határa a szilíciumban ($\approx 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$). (Az 5 perces oxidáció célja, hogy egy védőréteget hozzunk létre az antimon elszökése ellen.) A roncsolásmentesség előnye, hogy a kísérlet — esetleg más metodikával — ugyanazon a szeleten folytatható.

További példánkat a diffúzióra a ma egyre nagyobb jelentőségre szert tevő GaAs alapú félvezetőkutatásból vesszük: a GaAs védendő a technológiai hőkezelések során a termikus bomlástól. Ezt a dielektrikumrétegek segítségével érik el. A 8. ábra egy GaAs(Si_3N_4)- SiO_2 „szendvics” hőkezelési eredményeit mutatja [3]. Látható a lebomló komponens kifelé irányuló diffúziója és a felületen való feldúsulása. A Ga és az As közeli elemek, ezért BS módszerrel nehéz



8. ábra. GaAs hőbomlása és a komponensek diffúziója védőrétegeken keresztül. Az ábrabetét mutatja, hogy a SiO_2 felületén feldúsuló anyag a Ga



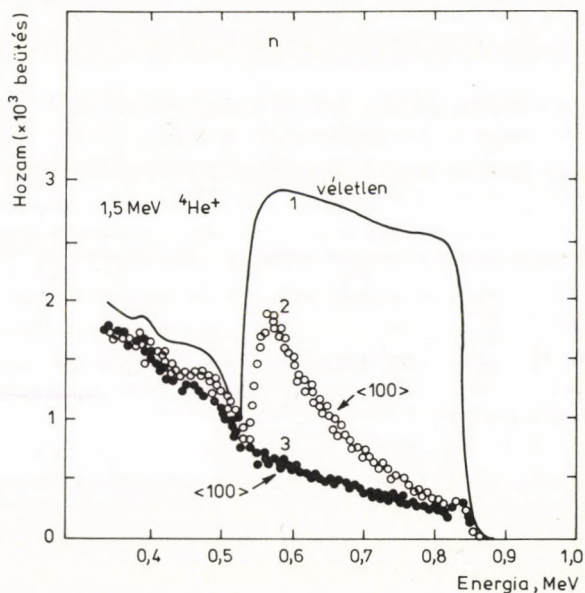
9. ábra. Foszforimplantáció és hőkezelés után illesztetlenségi diszlokációk keletkezhetnek Si-ban. A spektrumon ez ugrás képében jelentkezik. A diszlokációknál mélyebb marási gödörben mérve a jelenség nem lép fel

volt eldönteni, hogy a feldúsuló komponens melyik a kettő közül (Ga).

A rácshibák megnövelik a csatornából való kiszóródást, ezért jelenlétük az orientált spektrumból kiderül. A 9. ábrán 460 nm mélységben lévő illesztetlenségi diszlokációk okozták a lépcsőt a spektrumon. A marási gödörben mért spektrum nem mutat rácshibákat [4].

A rácshibák kimutatásában a BS értékes segítséget adott a kisműködésű elektronikus eszközök egyik fajtájának, a SOS-alapú (Silicon on Sapphire) integrált áramkörök egyik súlyos problémájá-

nak a megoldásában. Ennél az áramkörök kialakítására alkalmas kb. $0,5 \mu\text{m}$ vastag Si-egy kristály réteget gőzfázisú epitaxiával növesztik a zafir egy kristály hordozóra (ma már 75 mm átmérőjű, hibátlan zafir egy kristály is létezik). A zafir azért alkalmas anyag e célra, mert a rácsállandója jól egyezik a szilíciuméval — magas hőmérsékleten. A szendvicset lehűtve azonban a hőtágulási együtthatók különbözősége miatt a Si/ Al_2O_3 határfelületen tekintélyes mechanikai feszültségek keletkeznek, amelyek a Si-ban kialakított áramkörökben káros szivárgási áramokat okoznak. A BS a feszültséget úgy észleli, hogy a csatornában haladó He^+ -ionoknak nagyobb része szóródik ki, mint a tökéletes kristályrács esetén. A 10. ábra 1. görbéje a Si eloszlását mutatja véletlen irányból, míg a 2. görbe az $\langle 100 \rangle$ irányú beesés ellenére erősen emelkedő szakasza a



10. ábra. Epitaxiás Si zafíron; a zafir spektruma csak részben látszik. Az 1. görbe közvetlenül a növesztés után készült; a 2. görbe nagy meredeksége jelzi a rács hibák jelenlétét. Csatornairányban és mély hőmérsékleten végzett implantáció és 560°C -os hőkezelés után kiváló minőségű kristály áll elő (3. görbe)

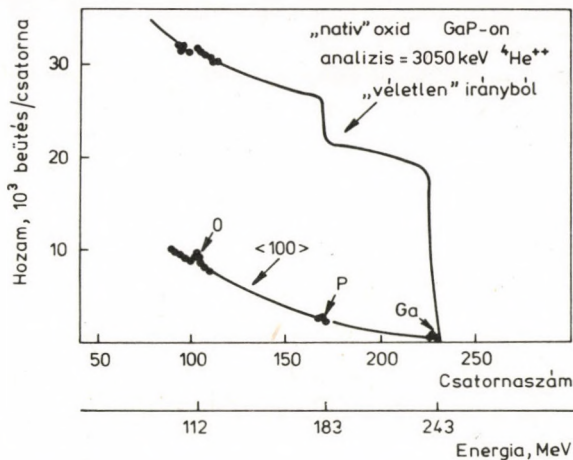
csatornából kiszóródó He^+ -ionok nagy számáról tanúskodik. A 3. görbe azt mutatja meg a BS nyelven, hogy miként lehet ionimplantációval és egy azt követő hőkezeléssel kifogástalan kristályt készíteni: csatornairányú implantációval (Si-ot löve a Si-ba!) amorfizáljuk a határfelületet úgy, hogy a Si felszíne jó kristály marad. Az 560°C -os hőkezelés révén ez a felszíni kristály epitaxiásan „lenő” a határfelületig jó minőségben. Az eredményt természetesen transzmissziós elektronmikroszkóppal is célszerű direkt módon megvizsgálni, a BS azonban hasznos a munka első fázisában: lényegesen egyszerűbb itt a mérés, mint a bonyolult és kockázatos is jelentő minta-előkészítést igénylő elektronmikroszkópiában. (E rétegben kialakított integrált áramkörökben az elektromos visszaáramok kb. egy nagyságrenddel csökkennek!)

Az eljárás teljesítőképességének növelése

A módszer érzékenysége többféleképpen növelhető. Az egyik fő hátránya az, hogy a szondázónyaláb általában néhány tized mm átmérőjű. A nyaláb fókuszálása $10\text{--}20\ \mu\text{m}$ -re nem jelent nagy gondot. Ennél kisebb ionfolt (pl. $1\text{--}2\ \mu\text{m}$) létrehozása már nagyobb berendezést igényel. A témával ennek ellenére többen is foglalkoznak, mivel más téren is előnyös felhasználás kínálkozik. A nagy bonyolultságú integrált áramkörök, ill. az ott felhasznált maszkok előállítására ugyanis litográfiai eljárást használnak, s a „fényérzékeny” lakk ionsugarakkal való exponálása rendkívül ígéretes (sok előnye van a ma terjedőben lévő elektronsugaras expozícióval szemben).

A BS további tartaléka a kísérlet geometriai elrendezésének optimalizálása. Ha az ionnyaláb súrlódó szögben esik a mintára, vagy a kilépő nyalábnak ilyen szögben észlelhető részét gyűjtjük össze a detektorunkkal, a felszíni réteget jóval hosszabb úton szondázzák a He^+ -ionok, ezzel lényegesen javítható a mélységfelbontás: $2\text{--}3\ \text{nm}$ -re a szokásos $10\text{--}20\ \text{nm}$ -rel szemben.

A magreakciók egy speciális típusa az ún. (α, α) reakció (ahol tehát He-mal bombázunk és He^+ - vagy α -részecskéket detektálunk), szintén felléphet meghatározott bombázóenergiákon. Mint emlí-



11. ábra. Vékony „nativ” oxid GaP-on, 3,050 MeV rezonanciaenergián mérve az oxigénkimutatás érzékenysége ≈ 20 -szorosára nő. A Ga, P és O csúcsok nagyságából az oxid összetétele számítható

tettük, az oxigénatomokon szóródó He^+ -ra pl. 3,05 MeV az az energia, amelynél ez a reakció rezonanciaszerűen létrejön és a hatáskeresztmetszet közel 20-szoros az egyéb energián végzett BS méréshez képest. Azaz az oxigénatomok jelenlétét és mélységi eloszlását nagyon érzékenyen jelzi a kísérlet (11. ábra). Mint írtuk: egy ezred monorétegnyi (10^{12} atom/cm²) borítottság már kimutatható.

Nagyobb energiák felhasználása

A 4–5 MeV-nél nagyobb energiájú iongyorsítók használata tovább bővíti az analitikai lehetőségeket azzal, hogy újabb magreakciók kapcsolhatók be.

Legkényelmesebben (azaz közel azonos detektorokkal, elektronikus eszközökkel) a (p, α), (d, α) vagy (d, p) típusú reakciók valósíthatók meg.

Az 1. táblázatban izelítőt adunk, hogy mely elemek jelenléte és eloszlása mutatható ki 5—25 MeV energiájú bombázással (a félvezető iparban fontos elemeket választottuk ki). Az éles rezonanciával rendelkező reakcióknál a mélységskálát úgy kapjuk meg, hogy fokozatosan növeljük a bombázórészecskék energiáját, így a

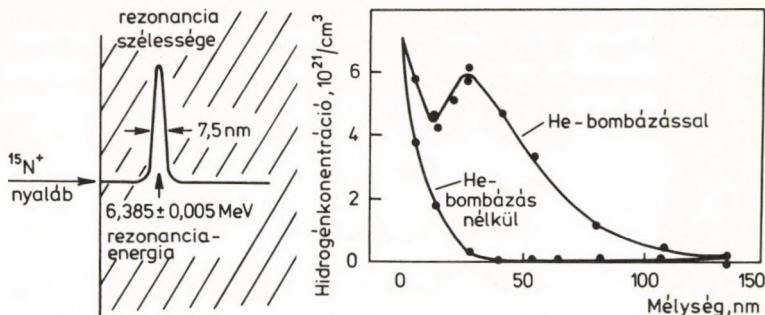
1. táblázat

Reakciók	Kimutatható elemek	A bombázórészecskék energiája, MeV
(p, α)	^7Li	17,34
	^{11}B	8,58
	^{19}F	8,11
	^{15}N	4,96
(d, α)	^6Li	22,36
	^{10}B	17,82
	^{14}N	13,58
	^{19}F	10,04
	^{14}N	9,15
	^{31}P	8,17
	^{23}Na	6,91
(d, p)	^{28}Si	6,2
	^{31}P	5,7

reakció egyre mélyebb rétegekben jön létre. Az energiavesztés ismeretében a mélységskála kiadódik.

Nehezebb ionok is felhasználhatók bombázórészecskéként. Ha pl. 6,38 MeV energiájú $^{15}\text{N}^+$ -ionokkal bombázunk, a $^{15}\text{N} + \text{p}$ reakció megfordítását kapjuk, azaz a reakciót a hidrogén kimutatására lehet használni. A 12. ábra felső részén a rezonancia elve, az alsó részén egy alkalmazása látható [6]. Itt a hidrogénmegkötőképességet vizsgálták egyrészt a fémfelület eredeti állapotában, ill. ha He-bombázással egy amorf felületi réteget hoznak létre. Számunkra most a mérés érzékenysége és kvantitatív volta lényeges.

Az oxigénkimutatás érzékenysége jól demonstrálható egy ún. natív (magától keletkező), mintegy 2—3 nm vastag oxidréteget



12. ábra. Fordított magreakció: ^{15}N -ionokkal bombázva egy hidrogént tartalmazó anyagot, a reakcióból származó γ -fotonokat detektálva a H-eloszlás mérhető. Példaként a volfrám hidrogénmegkötő képességét mutatjuk be. He-implantációval a megkötő képesség jelentősen növelhető [6]

bemutató spektrumon — ez esetben gallium-foszfid félvezetőn (12. ábra). Ezzel a méréssel kimutatható pl. az is, hogy a vékony oxidok esetleges összetételi eltérései a rétegvastagság mérésére egyébként szokásos ellipszometriás mérést meghamisíthatják [5].

Összefoglalás

A jelen rövid összefoglalás elsősorban az analitikai alkalmazások egy-két példáján próbálta bemutatni a BS módszer, s a gyorsítós eljárások hasznát a félvezetőiparban. Mivel ma egy 2 MeV-es Van de Graaff és arra telepített elrendezés ára kb. 200 000 \$, érthető, hogy újabban már félvezetőgyárak is vásárolnak gyorsítókat.

Nagyobb energiájú gyorsítók használnak egyes analitikailag hasznos magreakciók létrehozásában (pl. H vagy Na meghatározás) nyilvánul meg. Lehet magreakciókkal célzott atomkonvertálást is végezni.

A gyorsítók egy speciális alkalmazása említendő meg mint a legújabb felhasználás: elektron tárológyűrűk segítségével létrehozott röntgensugárzással vagy szinkrotronsugárzással nagy tömegben és hihetetlen pontossággal lehet exponálni a félvezető integrált

áramkörök előállítása során használt litográfiai lakkokat. Olyan hírekről hallani, hogy egyszerre néhány millió nagy bonyolultságú áramkör exponálható így módon.

Irodalom

Általános

- W. K. CHU—J. M. MAYER—M. A. NICOLET: Backscattering Spectrometry. Academic Press, New York, 1978.
- GYULAI J.—MEZEY G.: Szilárd testek vizsgálata MeV energiájú ionokkal. Szilárdtest-kutatás újabb eredményei. Szerk.: SIKLÓS T. Akadémiai Kiadó, Budapest, megjelenőben.

Felhasznált

1. J. GYULAI—O. MEYER—J. W. MAYER—V. RODRIGUEZ: J. Appl. Phys. **42** (1971) 451.
2. J. GYULAI—L. CSEPREGI—T. NAGY—J. W. MAYER—H. MÜLLER: Le Vide No. **184** (1974) 416.
3. J. GYULAI—J. W. MAYER—I. V. MITCHELL—V. RODRIGUEZ: Appl. Phys. Letters **17** (1970) 332.
4. W. F. TSENG—J. GYULAI—S. S. LAU—J. ROTH—T. KOJI—J. W. MAYER: Nucl. Instr. Meth. **149** (1978) 615.
5. G. MEZEY—E. KÓTAI—T. LOHNER—T. NAGY—J. GYULAI—A. MANUABA: Nucl. Instr. Meth. **149** (1978) 235.
6. W. A. LANFORD—H. P. TRAUTVETTER—J. F. ZIEGLER—J. KELLER: Appl. Phys. Letters **28** (1976) 566.

A gyorsítók alkalmazásának lehetőségei a talajmikrobiológiában

Helmeczi Balázs

Agrártudományi Egyetem, Debrecen

Bevezetés

A talajmikrobiológia tárgykörébe a talaj mikroszkópikus élővilága (a prokarióta; baktériumok, kéalgák, az eukarióta; algák, gombák, protozoák) tartozik. A talajmikroorganizmusok fiziológiai, biokémiai, genetikai stb. tulajdonságainak vizsgálata azért is nagy nehézségekbe ütközik, mert az említett élőlénycsoportok a talajban nemcsak egymással és a csoporton belül alkotnak meghatározott biocönózisokat (metabiózis, szimbiózis, antibiózis, parazitizmus), hanem az ott élő makroszkópikus növény- és állatvilággal is igen szoros kapcsolatban vannak. E szoros kapcsolat megbontása és a társulást alkotó egyes fajoknak a természetes biotópon kívüli elszigetelt vizsgálata azzal a veszéllyel jár, hogy a faj biocönózisban betöltött szerepe pontosan nem regisztrálható. A probléma másik oldalról is fennáll, mert a biocönózisban kapott vizsgálati eredmények az egyes fajokra nem általánosíthatók. (Kevert-, ill. tisztatényészetek problémája.)

Speciális problémaként jelentkezik, hogy amíg más területen (pl. orvosi, állatorvosi, növénykórtani mikrobiológiában) a patogén szervezetek pusztítására, addig a talajmikrobiológiában zömmel a hasznos mikroorganizmusok kedvező feltételeinek biztosítására, szaporítására kell törekedni. Nehézséget jelent az a körülmény is, hogy amíg a mikroorganizmusok alig 10%-át kitevő patogén szervezetekkel oly sokan és olyan eredményesen foglalkoznak, addig a nagy tömeget képviselő hasznos szervezetekre alig-alig figyelnek. Megítélésünk szerint, ennek okát nemcsak a talajmikrobiológia tudományának fiatalságában — amely Waksman

[1] szerint „aranykorát” a századfordulón élte — kell keresnünk, hanem abban is, hogy a nagy elődök megtanítottak bennünket a mikroorganizmusoktól való félelemre, miközben „megfeleledkeztünk” a barátokról és csak az ellenségekre figyeltünk. Még ma is elég erősen hat az a — Kochtól származó — megállapítás, amely szerint „... a baktériumok ellen nem segít a bátorság, csak az óvatosság”. Így aztán, „pusztán óvatosságból”, az emberiség védelme érdekében, általában pusztításukra szövetkeztünk. E helyen azonban a gyorsítók alkalmazásának lehetőségeit nem a mikroorganizmusok pusztítása, hanem védelme és szaporítása, tevékenységük elősegítése szempontjából vizsgáljuk.

Irodalmi áttekintés, saját vizsgálatok

Az utóbbi évtizedekben elterjedtek azok a vizsgálatok, amelyek révén egyes kutatók azt igyekeznek kideríteni, hogy a különböző mikroorganizmusok miként reagálnak olyan fizikai behatásokra, mint az ultrahang-, gamma-, röntgen-, ultrabolya-, és neutronbesugárzás. Ilyen vizsgálatok során vált ismeretessé, hogy szuszpenzióban a különböző baktériumtörzsek ultrahang-besugárzás hatására — 10 W/cm^2 felett — elpusztulnak, testük szétöredeznek. Az ide vonatkozó vizsgálatok első eredményeit Warnecke [2], Bergman [3], Stelter [4] foglalták össze. Kisebb intenzitás esetén viszont a baktériumokon — Synowiedzky, Topa és Boldok [5], ill. Knaysi és Curran [6] — megváltozott morfológiai és fiziológiai tulajdonságokat, fokozott növekedést és stimuláló hatást tapasztaltak. Gombák, ill. gombaszuszpenziók ultrahangos kezelése során Wolters [7] hasonló eredményre jutott; vagyis a kis dózis ($2\text{--}2,5 \text{ W/cm}^2$) és rövid (mindössze néhány perces) besugárzási idő a gombák szaporodását és növekedését serkentette. Nagy dózisosok (20 W/cm^2) és hosszabb (10—30 min) besugárzási idő viszont letalitást, ill. fungicid hatást váltottak ki. A sugárkezelésnek a gombák életképességére és toxintermelésére gyakorolt hatását Sellyey és munkatársai [8] is vizsgálták.

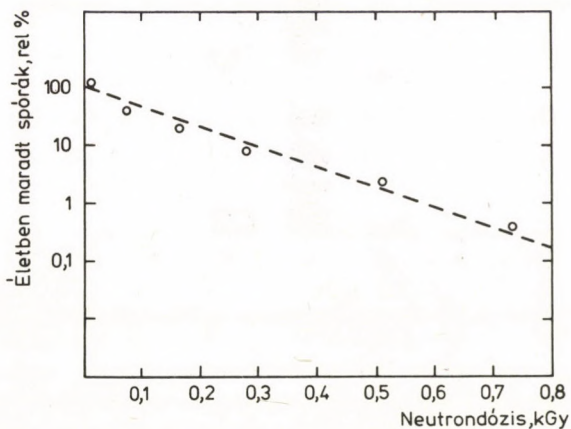
1. Az irodalmi adatok részletesebb felsorolása nélkül is megállapítható, hogy azok a címben foglalt feladat megoldásához

— az alábbi okok miatt — csak tájékoztató jellegű segítséget nyújtanak:

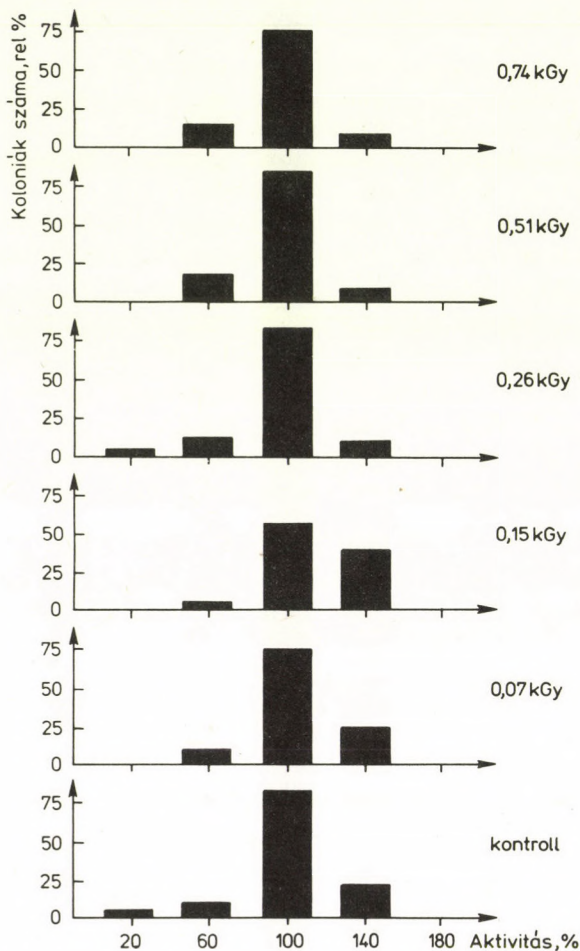
- a) a vizsgálatokat általában nem talajmikroorganizmusokkal (főleg *Escherichia coli*-val) végezték,
- b) a kísérleteknél nem gyorsítókat, hanem ultraibolya-, ultrahang- stb. besugárzást alkalmaztak,
- c) a vizsgálatok — mint azt Elking és Whitmore [9] is megállapítja — elsősorban a letális dózis (LD, illetve LD 50) megállapítására irányultak.

2. A témakörrel szorosabb összefüggést mutatnak Huczkowski és munkatársai [10], Wolf és munkatársai [11, 12], valamint Wojciechowski és munkatársai [13] közleményei. Utóbbi szerzők ciklotronban 0,065—0,75 kGy (6,5—75 krd) neutrondózissal, vizes szuszpenzióban sugároztak be *Streptomyces* spórákat, és a besugárzás dózisének függvényében a spórák szaporodását mérték (1. ábra).

A szaporodással egyidőben mérték a besugárzott spórákból nyert *Streptomyces* coloniák antibiotikus produkcióját is és megállapították, hogy az antibiotikum termelés a 0,16 kGy-vel (16 krd-



1. ábra. Neutronbesugárzás hatása *Streptomyces* spórákra



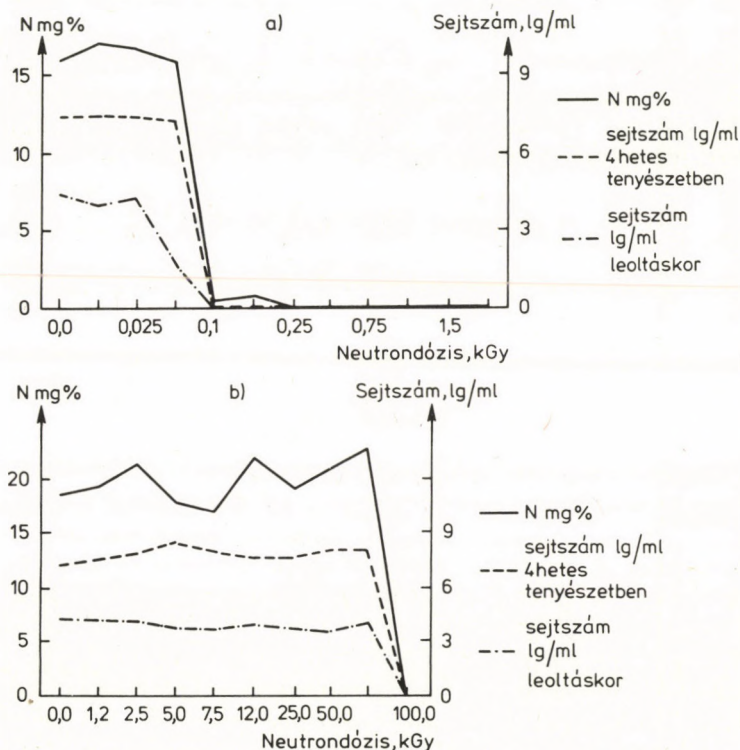
2. ábra. Neutronnal besugárzott *Streptomyces* spórák antibiotikum-termelése

dal) besugárzott spórákból nőtt coloniáknál volt a legnagyobb (2. ábra).

3. A kapcsolódó saját vizsgálati eredményeinkről az alábbiak szerint számolunk be. Az 1970-es évek elején vizsgálni kezdtük, hogy

különböző besugárzásokkal az aerob N_2 -kötő baktériumoknál (*Azotobacter chroococcum*) lehetséges-e a N_2 -kötést stimulálni.

Vizsgálataink szerint — Helmeczi és Nagy [14] —, az egyes fizikai hatások (ultrahang, diathermiás melegítés stb.) kedvezően befolyásolják a vizsgált talajbaktérium N_2 -kötő képességét. Az eredmények ismeretében vizsgáltuk a neutronbesugárzásnak az *Azotobacter chroococcum* szaporodására és N_2 -kötő képességére gyakorolt hatását is. A neutronbesugárzásokat a BME Tanreaktorában 1 kW teljesítmény mellett 0,012—2,0 kGy (1,2—200 krd) dózissal



3. ábra. Neutronbesugárzás hatása az *Azotobacter chroococcum* N_2 -kötő képességére és szaporodására

végeztük. A besugárzási időt 7—1200 s-ig változtattuk abból a célból, hogy az esetleges SD és LD értékeket is meghatározhassuk.

Eredményeink azt mutatták, hogy alacsony dózisértékeken gyengén növekvő N_2 -kötés érhető el. Az LD 50 értéket 0,05—0,1 kGy (5—10 krd) között, míg az LD értéket 0,1 kGy (10 krd) fölött találtuk (3. a—b. ábra).

Az említett méréseket — a kapott tájékoztató adatok alapján — kedvezőtlenül befolyásolta az a körülmény, hogy a reaktorban kb. ugyanolyan dózis mellett gamma-besugárzás is történt, amelytől a mintákat mentesíteni nem tudtuk. Kedvezőtlen tényezőként említhető, hogy a besugárzó neutronok nem monoenergetikusak, széles energiaspektrumot átfognak, és mint ismeretes, 1 MeV-nél van az átlagos energiaértékük. Éppen ezért — ha erre a ciklotronnal előállított neutronok segítségével lehetőségünk lenne — méréseinket „tisztább” körülmények között, zavaró gamma-háttér nélkül szeretnénk megismételni.

A problémák, lehetőségek felvetése

A teljesség igénye nélkül kívánunk néhány olyan problémát felvetni, amelynek megoldásában a gyorsítók esetleges alkalmazása segítségünkre lehetne.

Biológiai N_2 -kötés

Közismert, hogy a levegő N_2 -jét a magasabbrendű növények nem tudják hasznosítani. A természetes elektromos jelenségektől eltekintve, a levegő szinte kimeríthetetlen nitrogénkészlete alapvetően két úton válik a magasabbrendű növények számára is felvehető nitrogénvegyületekké. E két út egyike a ma már jól ismert *technikai* (kémiai) N_2 -kötés, amelynek elvi alapjait az említett természeti jelenségek képezik. A molekuláris N_2 megkötésének másik útja a *biológiai* N_2 -kötés, amely a talajban élő egyes mikroorganizmusok élettevékenységének eredménye. Ezek az élő „reagensok”, katalizáló berendezésük nagy teljesítőképessége folytán, másként kötik meg a molekuláris N_2 -t, mint az iparban használatos eszközök. A mikroorganizmusok a folyamat közben nem kopnak, sőt állandóan

„újratermelődnék” — szaporodnak —, s ez teszi őket e fontos „művelet” gazdaságos és hatékony tényezőivé. E folyamatnak a nitrogénvegyületek egyensúlya szempontjából általában a természetben, de különösen a mezőgazdasági termelésben van nagy jelentősége. Elgondolkodtató, hogy a N_2 -kötő mikroorganizmusok által megkötött N mennyisége Amarger és Langacherie [15] szerint, világviszonylatban még mindig ötször-tízszer akkora, mint a műtrágyákkal talajba juttatott N. Külön figyelmet érdemel, hogy a N_2 -kötő mikroorganizmusokban működő nitrogenáz enzim által katalizált folyamat energiaigénye — a felvehető N-re számítva — csak felét teszi ki annak az energiának, amit a műtrágyát előállító gyárak igényelnek. Az N_2 -kötő szervezetekkel foglalkozva Burris [16] Delwiche nyomán 100, Burria és Hardy alapján 200 millió tonnában jelöli meg az általuk világviszonylatban és évente megkötött N mennyiségét.

Ami pedig a problémát jelenti, bár a legfontosabb és legismertebb N_2 -kötő baktériumokat már Vinogradszkij — *Bakterium radicola*, mai néven *Rhizobium* (1893), *Clostridium* (1895) — és Beijerinck — *Azotobacter* (1901) — felfedezte, a rájuk vonatkozó ismeretek még jelenleg is hiányosak. A tisztázásra váró fontosabb kérdések:

- a) az N_2 -kötő szervezetek hogyan, milyen kémiai mechanizmus szerint kötik meg a levegő szabad nitrogénjét;
- b) az említett becslések 100%-os eltéréséből is látható, hogy még ma sem pontosan ismerjük, hogy évente és hektáronként (adott talajtípuson) a N_2 -kötők milyen mennyiségű N-termelésével számolhatunk;
- c) nem tudjuk, hogy milyen eljárásokkal lehetne jelentősen növelni a baktériumok N_2 -kötő képességét;
- d) nem ismerjük, hogy a megváltozott technológiák (pl. kemizáció; a peszticidek, műtrágyák) hogyan és milyen mértékben befolyásolják a N_2 -kötő baktériumok tevékenységét.

Cellulóz-bontás, mineralizáció és humifikáció

Nem tudjuk, hogy miként lehetne serkenteni a talaj cellulóz-bontó baktériumait, sugárgombáit és gombáit az intenzívebb cellulóz-bontásra, ami a mind nagyobb tömegben a talajba kerülő szárma-

radvány és egyéb melléktermékek miatt egyre sürgetőbb feladatot jelent. Vannak ugyan adatok, de nem pontosan ismertek a mineralizáció és humifikáció közötti arányok. Ezek a kérdések a talaj humuszgazdálkodása, a talaj termékenységének fenntartása és fokozása szempontjából gyors és pontos választ igényelnek.

Antibiotikumot termelő mikroorganizmusok

A talajmikroorganizmusok között számos olyat ismerünk, (sugárgombák, gombák, baktériumok) amely jelentős mennyiségű antibiotikum termelésére képes. A fajok antibiotikum termelése növelésének módszerei eléggé ismertek, mégis felmerül a kérdés, hogy újabb eljárásokkal (pl. gyorsítókkal) nem lehetne-e azokat eredményesebbé és gazdaságosabbá tenni. Ilyen jellegű kísérleteket néhány kutató már végzett és eredményeik biztatóak (lásd 1—2. ábra).

A mikroorganizmusok mikroelemigénye

Vannak adatok, amelyek azt igazolják, hogy a talajban előforduló mikroorganizmus csoportok és fajok, meghatározott mikroelemigénnyel rendelkeznek. Ezen igények kvantifikálása azonban még nem tekinthető megoldottnak. Nem ismeretes, hogy a különböző fajok milyen mikroelemeket, s azokból milyen mennyiséget igényelnek. Ebből következően azt sem tudjuk, hogy az egyoldalú műtrágyázás következtében egyes talajtípusokon már észlelt mikroelemhiány (esetleg relatív feldúsulás) milyen mértékben befolyásolja a mikroorganizmusok szaporodását, hogyan hat tevékenységükre.

Mycobacteriumok szerepe a talajban

A különböző fiziológiai csoportba tartozó baktériumok, gombák stb. szerepét az anyagok körforgalmában még jelenleg is csak hozzávetőlegesen ismerjük. Közismert például, hogy a talajban a *Mycobacterium tuberculosis* patogén szervezettel azonos genus-ba

tartozó számos szaprofita species él. Ezek közül több, mint 20 fajhoz tartozó, közel 400 törzset izoláltunk (Szelényi, Berencsi és Helmeczi) különböző talaj- és trágyamintákból, de azt bizonyítani, hogy ezek milyen szerepet játszanak a talajbiocönózisában, az anyagok körforgalmában, eddig nem sikerült.

**A mikroorganizmusok (főleg baktériumok)
számának meghatározása,
a különböző fajok izolálása, identifikálása**

A baktériumok számának meghatározására kialakult módszerek nem megbízhatóak. Felmerülhet a kérdés, hogy megfelelő szűrési eljárások kidolgozása után, miként lehetne a gyorsítókkal a szűrletben maradt sejtek számát (pl. a gyorsított részecske energia szintjének csökkenése alapján) az eddigi módszereknél gyorsabban, esetleg pontosabban meghatározni.

Az izolálási, ill. identifikálási módszerek ugyan megbízhatóak, de hosszadalmasak. Kérdés, hogy a különböző fajoknak nincs-e olyan specifikus érzékenyséjük a gyorsított részecskékkel szemben, amely elválasztásukat az LD, vagy az LD₅₀ alapján lehetővé tenné.

Az általánosság szintjén csupán felvetettünk néhány olyan problémát, amelyek megoldásához a gyorsítók alkalmazásával közelebb juthatnánk. A megoldásra javaslatot tenni nem tudunk, ez utóbbit csakis a különböző szakterületen dolgozó specialisták szoros együttműködésétől várhatjuk.

Összefoglalás

Közleményünkben érzékeltetni szeretnénk volna, hogy a gyorsítók alkalmazásának lehetőségei egészen másként merülnek fel a talaj-mikrobiológiában, mint más tudományok területén.

Az irodalmi adatok alapján látható, hogy a gyorsítók talaj-mikrobiológiai alkalmazásának gyakorlata még nem alakult ki. Az eddigi igen szerény tapasztalatok alapján úgy véljük, hogy alkalmazására elsősorban az alábbi területeken kerülhet sor, merülhet fel igény:

1. mutáció genetikai vizsgálatok,
2. stimulációs effektusok vizsgálata („tisztá” neutronnal vagy protonnal),
3. aktivációs analitika (gyors neutronokkal, talajbesugárzás).

A felvetett problémák talán lehetőséget adnak arra, hogy a gyorsítókhöz értő szakemberek elgondolkodjanak és ötletet, segítséget adjanak azok megoldásához.

Irodalom

1. A. S. WAKSMAN: Soil Microbiology. Wiley, New York, 1952.
2. B. WARNECKE: Bakteriologische Ultraschallstudien. **138** (1953) 17—55.
3. L. BERGMANN: Der Ultraschall. (6. Aufl.) Stuttgart 1954.
4. I. STELTER: Mikrobiologische US — Wirkungen. Westdeutscher Verlag, Köln — Opladen, 1956.
5. Z. SYNOWIEDZKY et al.: Application of Ultrasonic Waves in Biologic Research to Obtain Highly Effective Strains for the Production of Antibiotics **7** (1957) 289—293.
6. G. KNAYSI— H. R. CURRAN: Effects of some Mechanical Factors on the Endospores of *Bacillus subtilis* **82** (1961) 691—702.
7. K. WOLTERS: Zur Wirkung von Ultraschall. Westdeutscher Verlag, Köln—Opladen, 1958.
8. M. M. ELKIND—F. G. WHITMORE: The Radiobiology of Cultured Mammalian Cells. Gordon and Breach, New York, 1967.
9. J. HUCZKOWSKI— E. GACEK— H. WOJCIECHOWSKI: Biological Effects on Neutron Irradiation. IAEA, Vienna 1974, p. 49.
10. J. WOLF—J. HUCZKOWSKI—D. SIEJKO: The Effects of Fast Neutron Irradiation of *Actinomyces* Using the U-120 Cracow Cyclotron as a Neutron Source. Institute of Nuclear Physics. Rep., 1975.
11. J. WOLF et al.: The Use of Fast Neutron from the U-120 Cyclotron for Producing Mutations in Microorganisms to Improve the Yield of Metabolite, 1976.
12. J. WOJCIECHOWSKI et al.: Second Symposium on Neutron Dosimetry in Biology and Medicine Neuherberg, München, Sept. 30—Okt. 4. 1979.
13. HELMECZI B.—NAGY J.: Agrártudományi Közlemények **33** (1974) 91—100.
14. N. AMARGER—B. LANGACHERIE: La fixation biologique de l'azote Une ressource naturelle a mieux exploiter. C. R. Se' and Acad. Agric. Fr. Paris. **60**. **13**. (1974) 1072—1083.
15. R. H. BURRIS: Overview of nitrogen fixation. Basic Life Sciences. New York, Plenum **9**, 1977, 9—18.
16. SELLYEY GY.-NÉ—VÁNYI A.—PETRI Á.: Magyar Állatorvosok Lapja. **34** (CI) (1979) 412—416.
17. DARAB K.—GÁSPÁR L.—KISS L.—VARGA GY.: Izotópok alkalmazása a mezőgazdaságban és a biológiában. Tankönyvkiadó, Budapest, 1970, 189. old.

Izotóptermelés gyorsítókkal

Lengyel Tamás

MTA Izotóp Intézet, Budapest

Előljáróban legyen szabad a kissé általánosan megfogalmazott cím mögött sejthető ismeretanyagot valamelyest szűkíteni. E szűkítést azért tartom indokoltnak, mert négy esztendővel ezelőtt hasonló címmel az MTA Atommagkutató Intézetének (ATOMKI) rendezésében elhangzott, és az ATOMKI Közleményekben írásban is megjelent egy összefoglaló, egy évvel ezelőtt pedig az ATOMKI és a Debreceni Orvostudományi Egyetem az orvosi célú alkalmazásokról rendezett tudományos ülést e szűkebb szakma prominens képviselőinek bevonásával.

Mindezek alapján megkísérlem, hogy a témát leszűkítve, a Debrecenben létesítendő U-103 típusú ciklotron által biztosítható lehetőségek figyelembevételével tárgyaljam, mérlegelve a ciklotronhoz kapcsolódó laboratórium építésével kapcsolatos terveket is.

A termékválaszték kialakításánál a következő szempontok érvényesítése látszik célszerűnek:

- a ciklotron viszonylag drága üzeme miatt a reaktorban is termelhető izotópok (pl. ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{55}Fe) előállítására nem kívánatos;
- a ciklotrontermékek közül azokra célszerű koncentrálni, amelyek kedvező hozammal állíthatók elő, és amelyek iránt megalapozott igény nyilvánul meg;
- figyelembe kell venni a technikai adottságokat, elsősorban a terméknuklid felezési idejét, és — ezzel összefüggésben — a forgalmazás, ezen belül a processzálás, minőségellenőrzés stb. időszerűségét is;

— a ciklotron-program első közelítésben ne maximalista, hanem reális célkitűzések figyelembevételével induljon.

A beszerzés alatt álló ciklotron nyalábadatait az 1. táblázat foglalja össze. A táblázat adatai alapján a potenciálisan előállítható izotópok — felezési idejüknek megfelelően — három főbb csoportba sorolhatók.

1. táblázat. Az U-103 ciklotron nyalábadatai

Részecske	Nyalábenergia, MeV		Nyalábbintenzitás, μA	
	belső	külső	belső	külső
p	2–20	5–18	300	50
d	1–11	3–10	300	50
$^3\text{He}^{2+}$	4–28	8–28	50	25
$^4\text{He}^{2+}$	2–22	6–21	50	25

2. táblázat. Rövid felezési idejű izotópok adatai

Magreakció	Felezési idő, min	Hozam	
		kBq/ $(\mu\text{A s})$	mCi/ $(\mu\text{A h})$
$^{14}\text{N}(p, \alpha)^{11}\text{C}$	20,3	196	19,0
$^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$	10,0	330	3,2
$^{16}\text{O}(p, \alpha)^{13}\text{N}$	10,0	247	24,0
$^{14}\text{N}(d, n)^{15}\text{O}$	2,1	47	4,6

1. Rövid felezési idejű izotópok. E nuklidok közös jellemzője, hogy a rövid felezési idő folytán processzálási műveletre általában nem kerülhet sor, aminek következménye, hogy az előállított izotópok

- megfelelő radionuklidos tisztaságának biztosítása érdekében fokozott gondot kell fordítani a target tisztaságára és a besugárzási, technológiai fegyelem betartására;
- elemi vagy csak igen egyszerű vegyületek formájában alkalmazhatók.

Az e csoportba tartozó néhány fontosabb izotóp főbb adatait a 2. táblázat foglalja össze.

Az előállítás menetének főbb lépéseit és az alkalmazási területet illetően említésre érdemes, hogy a ^{11}C esetében nitrogéngázt

alkalmaznak céltárgyként és az előállított, jelzett szén-monoxid segítségével tüdőödéma diagnosztizálása, valamint a lép scannelése végezhető el, minimális sugárterhelés mellett [1].

A ^{13}N elemi formában a tüdő perfúziós viszonyainak, a levegőellátás elégtelenségeinek kimutatását [2], jelzett ammónia formájában pedig miokardiális vizsgálatok elvégzését teszi lehetővé. Céltárgyként szén-monoxid vagy desztillált víz szolgál.

A ^{15}O elemi formában az agy oxigénellátottságának felderítésére alkalmas. A céltárgy ebben az esetben nitrogéngáz, amelyet folyamatosan bocsátanak át a 6–7 MeV energiájú deuteronnyaláb útjába helyezett, alkalmasan kiképzett edényen [3].

2. *Közepes felezési idejű izotópok.* A közepes felezési idejű izotópok közül azok előállítása emelhető ki, amelyeknél a magreakció küszöbenergiája nem túlságosan nagy, ill. amelyek az adott paraméterű kompakt ciklotronban megfelelő hozammal nyerhetők.

E termékeknel már lehetséges, sőt szükséges a processzálás, ami történhet a ciklotronhoz telepített forrófülkékben, vagy más telephelyen, így az Izotóp Intézetben is. Az „in situ” feldolgozás mellett szól a kisebb időveszteség, ellene, hogy még minimális program esetén is több forrófülke beruházása szükséges. Az ebbe a csoportba tartozó néhány nuklid előállítására vonatkozó adatokat a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat. Közepes felezési idejű izotópok adatai

Magreakció	Felezési idő, h	Hozam	
		kBq/($\mu\text{A s}$)	mCi/($\mu\text{A h}$)
$^{122}\text{Te}(\text{d}, \text{n})^{123}\text{I}$	13	1,0	0,10
$^{122}\text{Te}(\text{}^3\text{He}, 2\text{n})^{123}\text{Xe} \xrightarrow{\beta^+} ^{123}\text{I}$	13	5,4	0,53
$^{123}\text{Te}(\text{p}, \text{n})^{123}\text{I}$	13	4,5	0,44
$^{124}\text{Te}(\text{p}, 2\text{n})^{123}\text{I}$	13	270	24
$^{67}\text{Zn}(\text{d}, 2\text{n})^{67}\text{Ga}$	78	1,3	0,12
$^{64}\text{Zn}(\alpha, \text{n})^{67}\text{Ge} \xrightarrow{\beta^+} ^{67}\text{Ga}$	78	0,7	0,07
$^{112}\text{Cd}(\text{p}, 2\text{n})^{111}\text{In}$	67	4,1	0,40

Külön kell szólnunk arról, hogy a ^{123}I előállításánál — a korlátozott protonenergiák miatt — az elterjedten alkalmazott $^{127}\text{I}(p, 5n)^{123}\text{Xe} \xrightarrow{\beta^+} ^{123}\text{I}$ magfolyamat nem jöhet számításba, ezért targetként dúsított tellúrizotópot célszerű használni, amelynek ára 2—15 \$/mg, de rubelelszámolásban is tetemes. A gazdaságosság biztosítása érdekében itt célszerű a target időről-időre történő regenerálása is.

A különben kedvező hozammal végbemenő $^{124}\text{Te}(p, 2n)^{123}\text{I}$ magreakció hátránya, hogy a $(p, 5n) \xrightarrow{\beta^+}$ reakcióval ellentétben nem lehet építeni a jódhurok alkalmazására, amely az utobbi esetben a célanyagként alkalmazott CH_2I_2 recirkulációjára épül [4, 5]. Ismeretes, hogy a ^{123}I világgpiaci ára akkor esett jelentős mértékben, amikor Chalk Riverben kidolgozták és bevezették a reaktorba épített xenonhurkon alapuló gyártását.

A ^{123}I előállítása kapcsán a Na^{123}I mellett elsősorban a jódjelzett hippurán, a ^{67}Ga -tel kapcsolatosan a vese- és májdiagnosztika területén alkalmazható gallium-citrát, az ^{111}In esetében pedig a megfelelő indiumkomplexek diagnosztikai alkalmazása lép előtérbe.

4. táblázat. Sugárterhelés különböző tömegszámú jódzotóppal jelzett hippurán intravénás adása esetén

Szerv	^{131}I		^{123}I	
	nGy/Bq	mrd/ μCi	nGy/Bq	mrd/ μCi
Pajzsmirigy	9,5	35	$8,1 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$
Vese	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$6,5 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$
Gonádok	$8,1 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
Egész test	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$

Visszatérve az e csoportba tartozó ^{123}I előállítására, a 4., 5., 6. és 7. táblázat bemutatásával kívánom érzékeltetni ennek a nuklidnak diagnosztikai előnyeit, de egyben a különféle szennyeződések eredményeképpen megmutatkozó alkalmazási korlátait is. A táblázatokból kitűnik, hogy a ^{123}I alkalmazásából adódó kedvező dózisterhelés előnyei teljesen háttérbe szorulnak, ha a termék tisztasága nem megfelelő [6, 7].

3. Hosszú felezési idejű izotópok. A hosszú felezési idejű izotópok közül azokra kívánok röviden utalni, amelyek előállításuk akkor kerülhet szóba, ha kellő automatizáltság folytán a ciklotron folyamatosan üzemeltethető, és a targetek hulladékidőben (éjszaka,

5. táblázat. Különböző radiojód-szennyezők mennyisége a ^{123}I mennyiségének %-ában a besugárzás befejezése után X órával a $^{123}\text{Te}(p, 2n)^{123}\text{I}$ reakció esetében, 20–25 MeV-es protonenergiánál, kb. 400 mg/cm² céltárgyvastagságnál

Nuklid	$X = 0$ h	$X = 24$ h	$X = 48$ h	$X = 72$ h
^{121}I	3	0,004	—	—
^{124}I	0,8	2,4	6,9	20,5
^{126}I	0,015	0,048	0,16	0,54

Megjegyzés: a ^{124}Te 91,9%-ra dúsított, a kísérő nuklidok %-os mennyisége:

^{122}Te	0,5	^{123}Te	0,1	^{125}Te	3,2
^{126}Te	1,8	^{128}Te	1,5	^{130}Te	1,0

6. táblázat. Különböző radiojód-szennyezők mennyisége a ^{123}I mennyiségének %-ában a besugárzás végén a

$^{127}\text{I}(p, 5n) \xrightarrow{\beta^+} ^{123}\text{I}$ reakció esetében,

58 MeV-es protonenergiánál

Nuklid	%
^{123}I	100
^{124}I	$2,25 \cdot 10^{-5}$
^{125}I	$1,15 \cdot 10^{-1}$
^{126}I	—

hétvége) besugározhatók. Néhány nuklid előállítására vonatkozó magreakciókat és a megfelelő hozamokat a 8. táblázat tartalmazza.

Az új besugárzási kapacitás megteremtésével szervezési, ill. rendeletmódosítási intézkedések is szükségessé válhatnak. Ismeretes, hogy a 10/1964. (V. 7.) sz. kormányrendelet értelmében a sugárzó anyagok forgalmazását hazánkban csak az Izotóp Intézet végezheti.

Az előzőekben felsorolt rövid felezési idejű nuklidok esetében a Budapestre való szállítás ésszerűtlen, egyben megoldhatatlan.

7. táblázat. Pajzsmirigyre leadott teljes dózis 15 MBq (400 μCi) ^{123}I intravénás adásánál, különféle előállítási reakciók és jellegzetes mértékű radionuklidos szennyezés esetén

Magreakció (nuklid)	Dózisterhelés, Gy				Teljes dózis
	^{123}I	^{124}I	^{125}I	^{126}I	
Tiszta ^{123}I	0,056	—	—	—	0,056
$^{127}\text{I}(\text{p}, 5\text{n})^{123}\text{I}$	0,056	—	0,048 (2%)	—	0,104
$^{121}\text{Sb}(\alpha, 2\text{n})^{123}\text{I}$	0,056	0,676 (13%)	0,024 (1%)	0,088 (0,9%)	0,844
^{131}I	—	—	—	—	7,710
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	—	—	—	—	0,002

Megjegyzés: a szokásos injektált aktivitás a ^{123}I -hoz képest ^{131}I esetében tizede, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ esetében pedig tízszerese a megadott értéknek

8. táblázat. Hosszú felezési idejű izotópok adatai

Magreakció	Felezési idő	Hozam	
		kBq/ $(\mu\text{A s})$	mCi/ $(\mu\text{A h})$
$^{24}\text{Mg}(\text{d}, \alpha)^{22}\text{Na}$	2,6 a	0,03	0,003
$^{58}\text{Ni}(\text{p}, 2\text{p})^{57}\text{Co}$	270 d	0,38	0,035
$^{109}\text{Ag}(\text{p}, \text{n})^{109}\text{Cd}$	1,3 a	0,06	0,005

Az ATOMKI és az Izotóp Intézet között évekkal ezelőtt megkötött szocialista szerződés, és a még ennél is hosszabb múltra visszatekintő jó kollágiális kapcsolat lehetővé teszi a szoros együttműködést, de ez a meglévő rendelkezések betartását illetően nem mentesítheti az Izotóp Intézetet.

Két megoldás képzelhető el: vagy a vonatkozó rendelet módosítása és a forgalmazás terén az ATOMKI pótlólagos kijelölése válik szükségessé, vagy pedig az Izotóp Intézet kis létszámú kihelyezett részlegét kell Debrecenben létrehozni.

A közepes és a hosszú felezési idejű nuklidok esetében a forgalmazás kérdése már kevésbé problematikus, akár Debrecen-

ben, akár Budapesten történne a processzálás. Láttuk azonban a ^{123}I példáján, hogy az idő múlásával nem csupán a gazdaságosságot megkérdőjelező aktivitáscsökkenéssel, hanem a hosszabb felezési idejű szennyezések dúsulásával, gyógyászati alkalmazás esetén tehát a dózisterhelés nem kívánatos növekedésével is számolni kell.

Összefoglalásképpen megállapítható, hogy a ciklotron üzembehelyezésével Debrecen és az egész ország nagyot lép előre a hazai magfizikai módszerek kiszélesítése terén. A beruházás azonban természetesen számos járulékos problémát is felvet, amelyek megoldásához megfontolt koordináció és kooperáció szükséges. Meggyőződésem, hogy az összehangolt együttműködés az e területen dolgozók közös érdeke, egyben elhatározott szándéka is, aminek eredményeképpen a hazai izotóptechnikai spektrum jelentős gazdagodásának nézhetünk elébe.

Irodalom

1. J. C. CLARK—P. D. BUCKINGHAM: Short-lived radioactive gases for clinical use. Butterworth, London, 1975.
2. R. RIVIÈRE—C. CROUZEL—M. CROUZEL—D. COMAR: 17e Colloque de Médecine Nucléaire, Paris, 1975.
3. R. SUBRAMANYAM—W. M. BUCELEWICZ—B. HOOP—S. C. JOUES: Int. J. Appl. Radiat. Isotopes **28** (1977) 21.
4. K. H. ASMUS—F. SCHULZ—R. SCHÜTZ—H. SCHWEIKER: KFK Rep. 2461, Karlsruhe, 1977.
5. F. CAUWE—J. P. DEUTSCH—D. FAVARAT—P. PRIEELS—M. COGNEAU: Int. J. Appl. Radiat. Isotopes **25** (1974) 189.
6. S. M. QUAIM—G. STÖCKLIN—R. WEINREICH: Proc. Panel Discussion on Iodine-123 (Jülich, 1976)
7. Proceedings of the Seventh International Conference on Cyclotrons and their Applications. Birkhauser Verlag, Basel and Stuttgart, 1975.

Gyorsítókkal termelt izotópok az iparban

Fenyvesi Ede—Hegedüs Zoltán

CSM Tervező és Kutató Intézet, Budapest

A kohászatban és gépgyártásban az izotóptechnikai vizsgálatokat mind az anyagvizsgálatban, mind a különböző technológiák, ill. azok részfolyamatainak ellenőrzésére alkalmazzák. Roncsolásmentes anyagvizsgálatként ma már nélkülözhetetlenné váltak a korszerű technológiák bevezetésében. Miután az ilyen vizsgálatok a helyszínen is elvégezhetők, alkalmazásuk ma és a jövőben is biztosított.

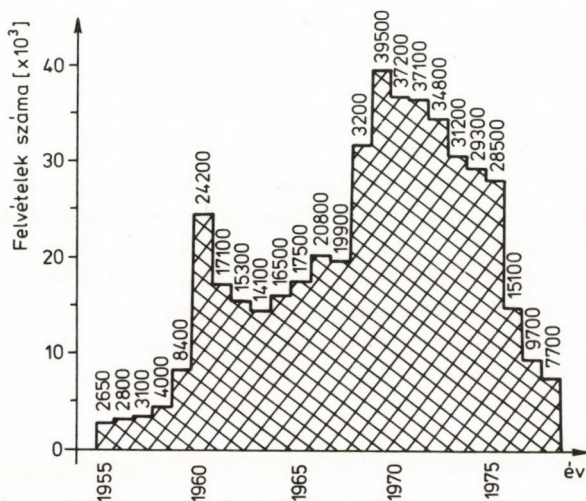
Hazánkban az első kohászati és egyben ipari izotóptechnikai laboratóriumot 1955-ben hozták létre a Csepel Vas- és Fémművekben. A laboratórium a kohászatban és gépgyártásban előforduló valamennyi iztóptechnikai vizsgálatra felkészült. A következőkben a radioaktív izotópok alkalmazásával kapcsolatban szerzett tapasztalatokból és a meglevő lehetőségekből mutatunk be néhány példát.

Az alkalmazásnak általában három fő területe különböztethető meg:

- a radiográfiai roncsolásmentes hibavizsgálat,
- a nyomjelzéses módszerek,
- a radiológiai mérés- és szabályozástechnika.

Fentiek közül a legnagyobb jelentőségű és legjobban elterjedt módszer a radiográfiai hibavizsgálat. Elve a jól ismert röntgenvizsgálathoz hasonló. A sugárforrástól meghatározott távolságra elhelyezzük a vizsgálandó darabot, mögé röntgenfilmet teszünk, amire leképződik a darab képe. Az eltérő feketedés alapján a hibák helye és mérete könnyen felismerhető.

Az elmúlt 25 év alatt laboratóriumunk több mint 460 ezer radiográfiai hibavizsgálatot végzett. 1960-ban már elértük a 24 ezer felvételi számot [1], majd ezt követően visszaesés mutatkozott, de a felvételek száma mégis mintegy kétszerese lett az 1960 előtti szintnek (1. ábra). A vizsgálati szám ilyen emelkedésének az volt az oka,



1. ábra. Radiográfiai vizsgálatok számának alakulása a CSM Izotóp Laboratórium fennállásától

hogy a vizsgálat eredménye megbízható, gyors tájékoztatást adott a gyártmányok minőségéről. A korszerű vegyi-, földgáz- és olajbányászati üzemek beruházása egyre nagyobb követelményeket támasztott a helyszíni izotópos vizsgálatokkal szemben. Ennek eredményeként közel 40 ezer felvételt készítettünk 1970-ben. Az ezt követő csökkenés magyarázata az, hogy országsszerte számos új izotóplaboratórium létesült, amelyek a vizsgálatok nagy hányadát elvégezték.

A radiográfiai vizsgálatainknál jelenleg ^{192}Ir és ^{60}Co zárt izotópot alkalmazunk, amelyekkel 8—200 mm acélfalvastagsá-

gok vizsgálhatók. A vizsgálatokat leginkább az acélok hegesztési varratainak ellenőrzésére és az öntvények belső durvaszerkezeti hibáinak kimutatására igénylik. Ezen túlmenően a vizsgálati módszer valamely termék gyártástechnológiai sorába is beépíthető, és mint automatikus minőségellenőrző a hibás darabok kiiktatását teszi lehetővé. Működésünk kezdeti szakaszában ^{137}Cs -forrást alkalmaztunk, amelyet ma már nem használunk, mivel kezelési problémákon túlmenően kis fajlagos aktivitású.

Kísérleteket végeztünk ^{75}Se - és ^{152}Eu -forrásokkal is [2], de ezek a gyakorlat számára nem bizonyultak megfelelőnek.

Próbálkoztunk még ^{170}Tm -sugárforrással is vékony fémlemez hegesztési varratának és vékonyfalú öntvényeknek a vizsgálatánál. E kis energiájú forrással pótolni lehet a röntgenberendezéseket, ha a helyszűke, vagy a vizsgálandó darab geometriája ezt megkívánja. Alkalmazása a gázipar területén, a polietilén szerkezeti anyagú csővezetékek vizsgálatánál jöhet számításba. A csővezetékeket a polidiffúziós kötési módszerrel illesztik egymáshoz. A kötések minőségével szemben támasztott fokozott biztonsági igény tette szükségessé a radiográfiai ellenőrzést. A ^{170}Tm -mel végzett hibakimutató némi, de nem kielégítő eredményt adott. Elfogadható legjobb hibakimutathatóságot az igen lágy röntgensugárzással sikerült elérni [3].

Sikeresen alkalmaztuk az izotópokat — elsősorban a ^{60}Co -t — nagyfokú biztonsági követelményeket kielégítő öntvények ellenőrzésére. Ezek közül említésre érdemes az Erzsébet-híd kábelsarujának, a kábelbilincseknek és kábelvégeknek; az olajbányászatban alkalmazott gázkitörésgátlóknak, a metróállomások oszlopsarujának, a dieselmozdonyok motorválaszfalainak vizsgálata.

A hegesztett kötések radiográfiai vizsgálatára legalkalmasabb sugárforrás a ^{192}Ir . Ilyen jellegű munkák közül a Borsodi és Tiszai Vegyikombinát, a Dunai Kőolajipari Vállalat és a Barátság kőolajvezeték csővezetékeinek, tartályainak, továbbá hídtartóknak, távközlési antennatornyoknak, vasúti és közúti járműalkatrészeknek a vizsgálatát emelnénk ki.

A hegesztési varratok radiográfiai vizsgálatán túl technológiai kísérletet végeztünk a varratok szemcsefinomítására. Ismeretes tény, hogy a hegesztéskor minél finomabb szemcséjű varrat

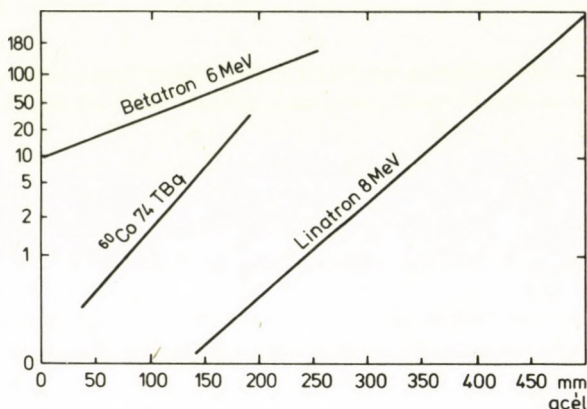
kialakítására törekednek. A szövetszerkezet finomítását a különböző hőkezelési eljárásokkal valósítják meg. Ezt a hőkezelési eljárást akartuk kiiktatni úgy, hogy a hegesztésnél keletkező folyékony fém sugárzás hatásának tettük ki. Feltételezésünk az volt, hogy a sugárzással a csíráképződést tudjuk előnyösen befolyásolni, ami által a szövetszerkezetet finomabbá lehet tenni. A kísérletet fedettívű automata hegesztésnél ^{60}Co -sugárforrással végeztük. A sugárzás hatására a felülettől mintegy 1,5 mm mélységben az alapanyag szerkezeténél finomabb szemcseméret keletkezett. Kísérleteink szerint a szemcsefinomító hatás a sugárforrás energiájától, s nem a dózisteljesítménytől függ, és általában vékony anyagoknál jöhet csak számításba.

A gyártástechnológiák fejlődése, különösen a hegesztés automatizálása a radiológiai vizsgálatok továbbfejlesztését, és főleg a gazdaságosság növelését követelték. Ennek hatására kezdték alkalmazni a kombinált ultrahangos és radiográfias vizsgálati eljárást, amire laboratóriumunk is berendezkedett. A hegesztési varratokat először ultrahanggal ellenőrzik. Radiográfiai felvételt csak azokról a helyekről készítenek, ahol az ultrahangos vizsgálat hibát jelez. Így jelentősen lehet csökkenteni a filmfelhasználást és a vizsgálati költségeket.

A továbbfejlesztés másik lehetősége a radiográfiai vizsgálatok beépítése a gyártástechnológiai sorba. Itt a kiértékelés TV képernyő segítségével történik és messzemenően automatizálható. A könnyűfém- és vas-acél formaöntészetben ma már több helyen találunk automatizált röntgenvizsgálatot végző berendezéseket a gyártósorokban. A jövőben várható a képernyős kiértékelés elterjedése — gyorsasága és olcsósága miatt — a radiográfiai vizsgálatok minden területén. Az eddig bevált és hasznosan alkalmazható sugárforrásokon túl újabbak bevezetése nem várható, és nem is célszerű, mivel a jelenlegiek a velük szemben támasztott követelményeket kielégítik. A gyakorlat számára az igény inkább e sugárforrások fajlagos aktivitásának növelése.

A radiográfiai vizsgálatok másik fejlődési iránya a nagy falvastagságú acélgyártmányok vizsgálatára — ezek általában a 200 mm feletti öntvények, és salakhegesztett kötések — a gyorsítók alkalmazása. Ezen a területen már történtek hazai

próbálkozások betatronok felhasználásával. Ezek a berendezések azonban elvesztették jelentőségüket, mivel viszonylag kis dózisteljesítményűek, és ezért gazdaságtalanok. A hazai igényeket figyelembe véve, egy vállalaton belüli üzemszerű alkalmazásuk — a nagy beruházási és üzemi költségek, valamint az igen kis kihasználtsági fok miatt — nem célszerű.



2. ábra. Összehasonlító megvilágítási értékek a nagy falvastagságú anyagok vizsgálatához használatos sugárforrások alkalmazása esetén

A nagy falvastagságú gyártmányok vizsgálatát ma már az 5–10 MeV-os lineáris gyorsítókkal végzik. A 2. ábrán egy 8 MeV-os lineáris gyorsító megvilágítási diagramja látható. Összehasonlításként egy 74 TBq aktivitású ^{60}Co -sugárforrás megvilágítási görbéjét is feltüntettük, amely — az alkalmazható falvastagságon belül — olyan rövid megvilágítási időket mutat, amivel egy 6 MeV-os betatron már nem tud versenyezni.

A hazai igények kielégítésére egyetlen gyár sem gyárt olyan mennyiségben nagy falvastagságú darabokat, amelyek egy lineáris gyorsító gazdaságos üzemeltetését biztosítanák. Célszerűnek az látszik, hogy egy központi helyen állomásozó és onnan irányított, hordozható berendezéssel elégsük ki az országos igényeket.

A kohászat szempontjából jelentős a nyomjelzéses vizsgálatok alkalmazása. A Csepel Művekben az elmúlt 25 év alatt mintegy 170 gyártástechnológiát ellenőriztünk ilyen módon. Az acél- és vasformaöntészetben, a hagyományos acéltuskó öntészetben, valamint a könnyűfémöntvények esetén sokszor nyomjelzéses technikával sikerült meghatározni a selejt okát, és megfelelő intézkedéssel kiküszöbölni a technológiai nehézségeket.

Az öntöttvas-formaöntészetben nagyon érdekes adatokat szolgáltatott a nyomjelzéses technika nagyméretű, bonyolult kiképzésű kokillaöntvények dermedési viszonyairól. Öntödénkben a MAN licenc alapján gyártott öntöttvas motorházaknál és hengerfejeknél, azok különböző helyein jelentkező mikroporozitások selejtet okoztak. A hiba eredetét nyomjelzéses módszerrel vizsgáltuk. Képet kaptunk a formákban végbemenő áramlási viszonyokról az öntéstől a dermedésig. Vizsgálatainknál ^{113}Sn -izotópot alkalmaztunk. A nagyon eltérő falvastagságú és erősen tagolt, 100 cm-nél hosszabb és mintegy 60 cm magas forgattyúház vizsgálatánál, az öntés végén bevitt nyomjelző izotóp a néhány perces dermedési idő alatt, bonyolult örvényléssel közel 90 cm távolságra eljutott.

Az öntészetben a selejtképződéstől függetlenül is érdekes lehet a formakitöltés mechanizmusa, a tápfejek működésének megismerése, a formán belüli örvénylés és áramlás megfigyelése. Ilyen méréseket végeztünk 1 m hosszú, 10–50 mm között változó falvastagságú Al—Si (12,5%) öntvényeken. A nyomjelzés sokkal realisabb és közvetlenül használható képet adott az öntés közben kialakuló fémmozgásról, mint a színes folyadékáramlást és golyóáramlást bemutató átlátszó formamodell.

Az öntöttvas-hengerfejek nyomjelzésére ^{32}P - és ^{99}Mo -izotópot használtunk, miután a statisztikus és számítógépes adatfeldolgozás arra utalt, hogy ezek abszolút mennyisége, ill. viszonya és az áteresztő porozitás között összefüggés van. A nyomjelzés az elképzeléseket igazolta, mivel P és Mo dúsulást ott észleltünk, ahol a későbbi megmunkálásnál a hibák jelentkeztek [4].

Nélkülözhetetlenek bizonyult a nyomjelzéses technika a korszerű olvasztási eljárások ellenőrzésénél és beállításánál. A leolvadó elektródás elektronsugaras olvasztásnál meg tudtuk határozni — az

olvasztás és főleg a tisztítóhatás szempontjából fontos — a kokillában levő fémolvadéktócsa alakját és mélységét. Ebből képet lehet nyerni a felületi hőmérséklet-eloszlásról. A vizsgálatot ^{198}Au -, valamint ^{110}Ag -izotóppal végeztük. A vizsgálati eredmények alapján többek között egy lineáris összefüggést határoztunk meg a tócsatérfogat és tócsamélység, valamint az olvasztásnál alkalmazott katódáram között.

Vízszintes, folyamatos öntőművekben, sárgaréz öntésekor a berendezés kokillájában bekövetkező dermedési folyamatokat vizsgáltuk olyan szempontból, hogy miképp alakul ki a dermedési szövetszerkezet. A nyomjelzőként használt ^{32}P -izotóp segítségével meg tudtuk határozni a dermedési viszonyokat, és módosítani lehetett a technológiát [5].

Védőgáz, függőleges, folyamatos öntőműben előállított nagy tisztaságú, nagy vezetőképességű réz (CuEOM) öntésekor, a tócsaalak és mélység nyomjelzéses meghatározására Cu— ^{32}P előötvözetet használtunk. Ez értékes adatokat szolgáltatott a gyártás szempontjából jelentős és a tuskó porozitásáért felelős H és O egyensúlyi viszonyokról, ami tudományos újdonságot is hozott [6].

A kohászati folyamatoknál alkalmazott nyomjelzéses technika alkalmas az acéolvasztó-kemencékben az olvadt betétsúly mérésére. Ennek ismerete a gyártó részére fontos, mivel így pontos képet kap a kemencében levő fém mennyiségéről, és ezáltal lehetőség van arra, hogy az ötvözők alsó határát kiszámítsa. Az ötvözők felhasználása így gazdaságosabbá válik, és kizárható az egyes adagok átminősítése alacsonyabb értékű acélfajtákra. A mérést izotóphígításos módszerrel oldottuk meg, amelynek lényege az, hogy az alkalmazott radioaktív izotópot előzetesen hígítjuk, és az így nyert ismert súlyú előötvözetből vett etalon aktivitását viszonyítjuk az olvasztókemencéből leöntött etalon aktivitásához. A kísérleteknél ^{193}Au -izotópot használtunk.

Az acélok alakíthatósága és minőségi követelményei miatt fontos a bennük levő, részben a tűzálló idomoktól származó zárványok mennyiségének és eloszlásának ismerete. A probléma vizsgálatát nyomjelzéses módszerrel végeztük. Az öntéskor használt tűzálló anyagból készült téglák és idomok acéllal érintkező felületét

radioaktív izotóppal nyomjelzett masszával kentük be, majd elvégeztük az öntést. Az öntecsből készült lemezeken aktivitásmérést végeztünk, és megállapítottuk, hogy a tűzálló idomok zárványokozó hatása nagymértékben függ a tűzálló anyag minőségétől és az acél oxigéntartalmától. A kísérleteinknél ^{65}Zn - és ^{140}Ba -izotópokat használtunk [7].

Hasonló módszerrel határoztuk meg bonyolult, nagyméretű vasöntvények durva, nemfémes zárványainak eredetét. Az aktív anyagot a forma különböző helyén levő tűzálló anyagra helyezve kiderült, hogy az kizárólag a beömlőtölcsér tűzállóanyag betetéből kerül az olvadt fémbe.

A nyomjelzéses technika alkalmazásának egyik területe a zárt rendszerekből történő szivárgás elfolyási helyeinek meghatározása, csatornarendszerek hibáinak felderítése, talajvízáramlás irányának megállapítása. Egy üzemben a mélyszinten húzódó elektromos kábelcsatornába víz áramlott be. Az üzemben ivó-, ipari- és nagynyomású vízvezeték-rendszer volt kiépítve. Az utóbbi rendszerrel — amelyre több gép volt kapcsolva — hirtelen tetemes túlfogyasztás jelentkezett. Az ok kiderítésére végzett vizsgálatnál ^{131}I -izotópot alkalmaztunk. E vizsgálat eredményeként megállapítottuk, hogy a nagynyomású vezetékrendszerből sem direkt, sem indirekt módon nem kerül víz a kábelcsatornába. Ezzel szemben az egyik munkagép megindításakor megindult a víz beáramlása a kábelcsatornába. Az ok, hogy a gép szennyvízlevezető csatornája eldugult, ezért a szennyvíz a géptől a mélyszintről függőlegesen vezető kábelcsatornán keresztül távozott [7].

A gépgyártás nehéz problémája a különféle acélféleségű és különböző hőkezelési állapotú alkatrészek kopásának meghatározása. Ez hozzáférhető szerszámélek és egyszerű alkatrészek esetében már megoldott, de tartósan súrlódó felületek vizsgálatára legalkalmasabb az izotóptechnikai kopásvizsgálat. A módszernek nagy előnye, hogy a kopás tényleges működés közben folyamatosan ellenőrizhető, így nemcsak mértéke, hanem a kinetikája is meghatározható. A Csepel Művekben végzett kopásvizsgálatok az új gépészeti megoldásokhoz adnak jelentős segítséget.

A radioaktív izotópok a kohászati szabályozástechnikában és az automatizálásban is jól hasznosíthatók. A Csepel Művekben a nagy

teljesítményű hengerállványokon a hengerelt anyag érintésmentes vastagságmérését, ill. a hengerállások automatikus szabályozását már évek óta hazai kifejlesztésű izotópos berendezések végzik. A gáz- és oxigénpalackok falvastagságát folyamatosan mérik hasonló elven működő műszerek.

Intézetünkben kifejlesztett izotópvezérlésű szintjelző berendezések nemcsak a hazai erőművek, mészművek, vegyigyárak és öntödék tartályainak, kemencéinek telítettségét mérik és szabályozzák, de távoli földrészekben is hirdetik az izotóptechnika hasznosságát.

Összefoglaló

A bemutatott konkrét példák és eredmények képet nyújtanak az izotóptechnika alkalmazásáról a kohászatban és gépészetben. Az ultrahangos vagy más villamosrendszerű roncsolásmentes eljárással kombinált radiográfiai vizsgálatok egymást szervesen kiegészítik és együttesen gazdaságos, hatékony minőségellenőrzést tesznek lehetővé.

A nyomjelzéses technika az acél- és színesfémgyártás, a formaöntészet terén nyújt jelentős segítséget. Bebizonyosodott, hogy a legkorszerűbb olvasztási és öntési eljárások (vákuumívfényes, elektrosalakos, elektronsugaras olvasztás, függőleges, vízszintes, folyamatos öntés, rákristályosító öntési eljárás, csökkentett nyomású, vagy túlnyomásos présöntés) nem nélkülözhetik — főleg a berendezések beállítási időszakában — az izotópos nyomjelzést.

Az izotópos mérés technika is egyre újabb és újabb területeken hoz jelentős eredményeket. Itt csak utalunk a radioizotópos gerjesztésű röntgenszínképelemző-berendezésekre, amelyekből hazai kohászati üzemekben már 2 db végez gyors elemzéseket.

Az érintés nélküli mérés- és szabályozástechnika lehetőségei hazánkban nincsenek még kellően kihasználva.

Irodalom

1. E. FENYVESI: *Isotopentechnik* **2** (1962) 56—57.
2. E. FENYVESI: *Isotopentechnik* **11** (1971) 351—353.
3. VIDA M.—BOGNÁR L.—FENYVESI E.: Kemény polietilén csövek polidiffúziós kötéseinek vizsgálata, *Anyagvizsgáló Konferencia, Budapest, 1974.*
4. SZEIMAN S.—MIHÁLY K.—FENYVESI E.: Eighth Symposium on Autoradiography, Visegrád, 5—9 May. 1975.
5. MODRÓCZKY J.: X. Kohászati Anyagvizsgáló Napok, Balatonaliga 1979, p. 222.
6. STEFÁN M.: *Műszaki Tudomány* **54** (1977) 358.
7. FODOR J.: *Radioizotópos nyomjelzőtechnika az iparban.* Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1962.

Ciklotronlaboratórium interdiszciplináris és gyakorlati kutatásokra

Valek Aladár

MTA Atommag Kutató Intézet, Debrecen

A létesítendő laboratórium leírása

Az utóbbi másfél évtized során a különböző gyorsítóberendezések, de különösen a ciklotronok és a nagy teljesítményű elektron-gyorsítók egyre szélesebb körben kerültek alkalmazásra gyakorlati problémák megoldásakor, sőt iparszerű felhasználásuk is megkezdődött (pl. izotóptermelés, elektronbesugárzásos technológiák). A gyorsítók ilyen jellegű felhasználása az előrejelzések szerint tovább szélesedik az elkövetkező években.

Az MTA Atommag Kutató Intézet — a ciklotronok jelentőségét felismerve — csaknem egy évtizede szorgalmazza egy ciklotronlaboratórium létrehozását. Ennek megvalósítása a múlt évben elkezdődött.

A laboratóriumban szovjet gyártmányú, középmeretű, MGC típusú kompakt izokróon ciklotron kerül elhelyezésre. A ciklotron legjellemzőbb paraméterei — az elérhető részecskeenergiák — az 1. táblázatban láthatóak. A ciklotront a leningrádi Jefremov Elektrofizikai Berendezések Tudományos Kutató Intézete gyártja. A táblázatban a gyártó cég által garantált nyalábadatokat tüntettük fel; a tényleges üzemi adatok — az eddigi tapasztalatok szerint — általában kedvezőbbek. A külső nyaláb intenzitását protonok és deuteronok esetén a nyalábkivonó rendszer terhelhetősége (max. 1,5 kW 40—60%-os kivonási hatások mellett) korlátozza.

A ciklotronnal felgyorsított részecskék bizonyos feladatokra felhasználhatók magában a ciklotronban is (pl. besugárzás belső nyalábon), de a felhasználás számára a külső nyaláb általában kedvezőbb és biztonságosabb feltételeket nyújt. A ciklotronból

1. táblázat. Az MGC izokrón ciklotron fontosabb adatai

Energiaátváltás tartománya, MeV	Nyaláb típusa	Külső nyaláb	Belső nyaláb
	p	8–18	2–20
	d	3–10	1–10
	$^3\text{He}^{++}$	8–24	4–26
	$^4\text{He}^{++}$	6–20	2–20
Nyalábintenzitás, μA	Nyaláb típusa	Külső nyaláb	Belső nyaláb
	p	50	200
	d	50	300
	$^3\text{He}^{++}$	25	50
	$^4\text{He}^{++}$		
Energiaszórás, %	≤ 1		
Emittancia, $\text{mm} \cdot \text{mrd}$	Függőleges $\leq 17\pi$		
	Vízszintes $\leq 50\pi$		

kihozott nyaláb vezetésére a ciklotronhoz csatlakozó nyalábvezető (nyalábtranszport) rendszer szolgál, amely nyalábvezető (vákuum) csatornákból és különböző nyalábkezelő és nyalábvizsgáló elemekből (mágneses eltérítő és fókuszáló elemek, nyalábintenzitás-mérő egységek stb.) épül fel. A nyalábtranszport-rendszer része egy ún. energiaanalizáló elektromágnes is, melynek segítségével $\Delta E/E = 10^{-3}$ energiaszórással rendelkező részecskenyaláb vágható ki; természetesen alacsony, max. $1 \mu\text{A}$ -es analizált nyalábintenzitás mellett. A nyalábtranszport-rendszert szintén a ciklotront gyártó leningrádi intézet készíti el. A kiépítésre tervezett rendszer 5 különböző felhasználási helyiségbe juttatja el a felgyorsított részecskéket. A felhasználók rendelkezésére álló lehetőségek a 2. táblázatban láthatók. A táblázattal kapcsolatban megjegyezzük, hogy egy nyalábcsatorna általában különböző vizsgálatok céljára is felhasználható, továbbá, hogy a nyalábcsatornák száma a későbbi igényeknek megfelelően növelhető.

A létesítendő épület csatlakozik az Intézet meglévő Van de Graaff-gyorsító épületéhez; annak egy sugárvédő falakkal rendelkező helyisége alacsonyhárterű helyiségként kerül felhasználásra. A

2. táblázat. A külső nyaláb felhasználási lehetőségei

Helyiség típusa		Alap- terület, m ²	Nyaláb csatorna, db	Felhasználás
Nagy intenzitású (teljes ciklotronnyaláb)	I.	120	4	besugárzás, izotóptermelés, aktivációs analízis, neutronfizika
	II.	50	1	neutronbesugárzás
	III.	80	1	izotóptermelés*
Alacsony háttérű (mérsékelt nyalábinszenzitás)		44	2	magfizika, atomfizika (neutronfizika)
Kis intenzitású (analizált nyaláb)		130	3	magfizika, atomfizika, analitika

*pincében, függőleges nyalábon

ciklotron és a nyalábtranszport-rendszer 410 m²-es sugárvédő betonfalakkal körülvett területen helyezkedik el. A sugárvédő falak egy része betontéglából, szétszedhetően készül; így lehetőség van a belső terület átépítésére, ill. bővítésére. A gyorsítóberendezés elhelyezésére szolgáló helyiségek körül a következő helyiségek, ill. helyiségcsoportok állnak majd a felhasználók rendelkezésére:

- számoló- és mérőközpont,
- mechanikai és vákuumtechnikai labor,
- komplett izotóplaboratórium,
- orvosi jellegű felhasználásra is alkalmas helyiségcsoport.

Egyes — megfelelő célú — nyalábcsatornák az izotóplaboratóriumból, az orvosi jellegű helyiségcsoportból, ill. az alacsonyháttérű mérőhelyiséghez csatlakozó laborból is megközelíthetőek. A közlekedés rendjét és a munkarendet a vonatkozó sugárvédelmi előírásoknak megfelelően szerveztük meg. Megjegyezzük még, hogy igény esetén lehetőség van egy izotópszeparátor elhelyezésére is, ill.

izotópszeparátor közvetlenül a ciklotron nyalábjához is csatlakoztatható.

A gyorsítóberendezés várható éves üzemideje kb. 4000 óra. A ciklotronnál folyó kutatási és egyéb tevékenységeket úgy tervezzük, hogy az összkapacitás egyharmad része alapkutatásra, egyharmad része alkalmazott kutatásokra és egyharmad része kifejezetten gyakorlati alkalmazásokra fordítódik.

Az izokrón ciklotronok

Áttekintés

A kötet előző tanulmányaitól eltérően, ebben a részben nem a szóban forgó gyorsító és az általa előállított radioaktív izotópok különböző felhasználási lehetőségeivel foglalkozunk, hanem magával a gyorsítóval, az izokrón ciklotronnal — más néven a szektorfókuszálású ciklotronnal (sector focusing cyclotron) —, annak működési elvével, valamint ismertetjük az MGC ciklotron néhány jellemző adatát.

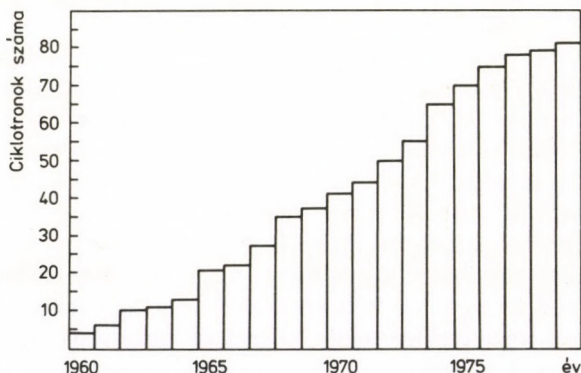
A töltött részecskék gyorsítására alkalmas első ciklotron megalkotása E. O. Lawrence nevéhez fűződik. A ciklotron gondolatát, működési elvét 1929-ben vetette fel, a modell példány 1931-ben készült el; az első kutatási célokra is alkalmas berendezés 1932-ben már 1 MeV energiájú protonokat szolgáltatott.

A ciklotron megszületése arra az időpontra esik, amikor az atommagok mesterséges átalakítása, magreakciók létrehozása a magfizikai kutatás központi kérdésévé vált. A magreakciók létrehozásához nagy sebességre és ennek megfelelően nagy energiára felgyorsított atommagokra, bombázórészecskékre volt szükség. Ilyen részecskék előállítására különböző irányban indultak gyorsítótechnikai kutatások, kétféle alapelvet követve. Az egyik koncepció szerint egy megfelelően nagy feszültségkülönbség előállítása volt a cél, és a töltött részecskék ezen egyszer áthaladva tesznek szert megfelelően nagy energiára (sztatikus gyorsítás: Cockcroft—Walton-generátor, Van de Graaff-generátor). A másik koncepció a ciklikus gyorsítás elve, itt a töltött részecske többször

halad át egy viszonylag kis feszültségű gyorsító szakaszon és fokozatosan nyeri el a megfelelő végenergiát (lineáris gyorsító, ciklotron). A sztatikus gyorsítóknál a megfelelően nagy feszültségekülönbség (több millió volt) előállítása kezdetben nagy technikai nehézségekbe ütközött, így az elérhető végenergiát tekintve a ciklikus gyorsító, elsősorban a ciklotron nagyobb perspektívát jelentett. Az 1930-as években megépített ciklotronoknál a végenergia gyorsan emelkedett; deuteronokra 1934-ben 5 MeV, 1936-ban 8 MeV, 1939-ben 16 MeV-et ért el.

A Lawrence-féle klasszikus ciklotronnal elérhető végenergiát a sebesség növekedésével együttjáró relativisztikus tömegnövekedés (lásd a 2.3. fejezetet) korlátozta. A számításba veendő relativisztikus effektusok protonoknál 10 MeV, deuteronoknál 20 MeV körüli energiáknál már jelentkeznek. Az energia további növelésére a frekvencia vagy a mágneses térintenzitás modulálása adott lehetőséget a klasszikus — ún. gyenge fókuszálású — ciklotronoknál. Forradalmi fejlődést indított egy új fókuszálási elvnek, az ún. erős fókuszálásnak az alkalmazása. Az ilyen elven működő ciklotronnak — az ún. szektorfókuszálású (SF) ciklotronnak — első leírása Thomas nevéhez fűződik (1938); az első nukleonokat gyorsító SF ciklotron beindítására 1957-ben került sor (Hollandia, Delft).

Az 1960-as évektől kezdődően, mint az [1] alatt idézett közlemény alapján összeállított 1. ábra is mutatja, a SF ciklotronok



1. ábra. A világon működő SF ciklotronok száma

száma gyorsan emelkedett. Különböző kutatóintézetek, ill. ciklotron gyártásával is foglalkozó ipari vállalkozások a legkülönbözőbb ciklotronokat építették fel a viszonylag kisméretű — protonenergiát tekintve 15—20 MeV végenergiájú — ún. kompakt ciklotronoktól (pl. MGC, CS-15, CV-28 stb.) a 600 MeV körüli energiájú protonokat szolgáltató „mezonyárakig” (Svájc: SIN Isochronous Ring Cyclotron; Kanada: TRIUMF) és szupravezető mágnesű nehézion-ciklotronok építése is megkezdődött (USA: Michigan State University K500, Kanada: Chalk River Superconducting Cyclotron).

A SF ciklotronok gyors elterjedését elsősorban számos előnyös tulajdonságuk magyarázza. A klasszikus ciklotronokkal szemben — túlmenően a relativisztikus energiájú részecskék előállításának már említett lehetőségén — a SF ciklotron kisebb légréssel építhető, így azonos végenergiát tekintve elektromágnesese kisebb, a mágnes és az üzemeltetés költsége alacsonyabb. Emellett itt a gyorsított ionok energiája változtatható és különböző könnyű és nehéz ionok gyorsítása is megoldható. A nyalábintenzitást a céltárgyak hűtésének technikai problémái korlátozzák; a SF ciklotron nyalábintenzitása nagyságrenddel felülmúlja a hasonló energiájú szinkrociklotronét. Ennek következtében a SF ciklotronhoz kapcsolt nagy feloldású (10^4) mágneses analizátor (monokromátor) után is elegendően nagy nyalábintenzitás és megfelelő nyalábminőség biztosítható és ebben a vonatkozásban a SF ciklotron teljesítőképessége a Van de Graaff-generátorokéval is összemérhető.

Az említett kedvező tulajdonságok — és nem utolsó sorban a kompakt ciklotron viszonylag alacsony ára és üzemeltetési költsége — következtében a SF ciklotronok nemcsak a — többnyire magfizikai — alap kutatás területén, hanem az alkalmazott kutatásban is egyre jelentősebb szerephez jutottak. A hatvanas évek közepétől kezdődően az alkalmazott kutatásokban részt vevő, ill. csak ilyen célra létrehozott ciklotronok száma gyorsan emelkedett, és számuk 1975-ben az üzemben levő ciklotronoknak kb. 30%-át tette ki [2]. A ciklotronok fő alkalmazási területeiként a rövid felezési idejű, reaktoral nem termelhető radioaktív izotópok előállítása, az egyre megalapozottabb és jelentős eredményeket

felmutató neutronterápia, a szilárdtest-fizika és az atomreaktorok szempontjából egyaránt fontos sugárkárosodási vizsgálatok, és a technikai, ill. technológiai fejlődés következtében egyre jelentősebbé váló különböző nyomanalitikai vizsgálatok említhetők meg.

A 3. táblázatban tájékoztatás végett ismertetjük az Európában üzemelő, ill. építés alatt levő SF ciklotronok telepítési helyét, a protonokra vonatkozó végenergiát, ill. ha nem protonok gyorsítására alkalmazzák, úgy a megfelelő részecskére vonatkozó végenergiát, a ciklotron típusát vagy gyártóját és az üzembehelyezés évét [1]. Megjegyezzük, hogy ezen kívül számos helyen működnek hagyományos ciklotronok is (pl. NDK-ban, Lengyelországban, Romániában, Jugoszláviában, Svédországban).

A klasszikus ciklotron

A ciklotron alapgondolata az, hogy a gyorsítandó részecske szabályos időközönként többször halad át ugyanazon elektródák közötti gyorsító szakaszon és fokozatosan, lépésenként gyorsul fel a végenergiára.

A ciklotron alapegyenletének levezetéséhez jelöljük m -el és q -val az ion tömegét és töltését, amely v sebességgel mozog egy homogén B mágneses tér irányára merőleges síkban és pályájának sugara r [3]. A Lorentz-erővel a centrifugális erő tart egyensúlyt:

$$qvB = \frac{mv^2}{r}, \quad (1)$$

ahonnan a körfrekvencia

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}. \quad (2)$$

A keringési frekvencia ebben az esetben független a részecske sebességétől. Amennyiben a B irányára merőleges síkban két D alakú elektródát, ún. duánst helyezünk el és azokra 180° -kal eltolt fázisban (amikor az egyik duáns pozitív polaritású, akkor a másik negatív) egy $U_D = U_{Dm} \cos \omega_D t$ alakú rádiófrekvenciás feszültséget kapcsolunk, akkor a középpontban megfelelő időpontban elinduló ion a két duáns között lépésenként felgyorsulva spirál alakú pályán

3. táblázat. SF ciklotronok Európában

	Maximális energia vagy K-érték*	Típus vagy gyártó cég	Üzembe- helyezés éve
<i>Anglia</i>			
Amersham, RCL	27 MeV p		1965
Birmingham, UB	24 MeV α		1961
Edinburgh, MRC-WGH	15 MeV d	CS-30	1976
Harwell, AERE	50 MeV p		1965
<i>Belgium</i>			
Ghent, INW	24 MeV p	CGR-MeV	1972
Louvain-la-Neuve, UCL	95 MeV p	CGR-MeV	1972
Liege, UL	22 MeV p	CGR-MeV	1975
<i>Csehszlovákia</i>			
Prága	41 MeV p	U-120 M	1976
<i>Finnország</i>			
Åbo, ÅA	19 MeV p	MGC	1974
Jyväskylä, UJ	20 MeV p	MC-20	1974
<i>Franciaország</i>			
Caen, GANIL	K = 400 NI		(1982)
Grenoble, ISN	60 MeV p	CGR-MeV	1968
Grenoble, ISN	K = 240 NI		(1980)
Orlaens, CNRS	33 MeV p	CGR-MeV	1974
Orsay, AEC-Biol	24 MeV p	CGR-MeV	1975
Orsay, IPN	K = 75 NI	ALICE-CEVILL	1965
<i>Hollandia</i>			
Amsterdam, VU	30 MeV p	Philips	1965
Delft, TUD	12 MeV p		1957
Eindhoven, EUT	30 MeV p	Philips	1963
Groningen, UG	140 MeV α	Philips	1970
Petten, Philips	30 MeV p	Philips	1964
<i>Lengyelország</i>			
Varsó, IEP	K = 180 NI	U-200 p	(1983)
<i>NSZK</i>			
Berlin, HMIKB	K = 128 NI	VICKSI	1977
Bonn, UB	30 MeV d		1968
Braunschweig, PTB	24 MeV p	CV-28	1974
Essen, KGE	24 MeV p	CV-28	1975
Hamburg, UH	30 MeV p	HAIZY	1968
Hannover, MH	30 MeV p	MC-30	1975
Heidelberg, INM	22 MeV p	AEG compact	1972
Jülich, IFK-KFA	90 MeV d	JULIC	1968
Jülich, IFF-KFA	24 MeV p	CV-28	1975

3. táblázat. SF ciklotronok Európában

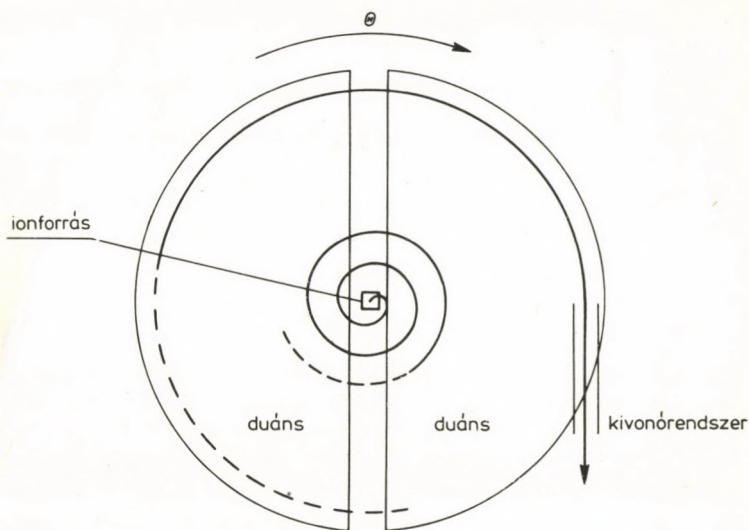
	Maximális energia vagy K-érték *	Típus vagy gyártó cég	Üzembe- helyezés éve
Karlsruhe, KFK	52 MeV d	AEG	1962
München, TU	22 MeV p	AEG compact	1973
<i>Olaszország</i>			
Miláno, UM	45 MeV p		1965
<i>Svájc</i>			
Villigen, SIN	72 MeV p		1973
Villigen, SIN	72 MeV csak p		(1982)
Villigen, SIN	590 MeV csak p		1974
<i>Svédország</i>			
Uppsala, AB Scand.	40 MeV p	MC-40	1976
<i>Szovjetunió</i>			
Alma Ata, INP	30 MeV p		1971
Dubna, EAI	K = 156 NI	U-200	1968
Dubna, EAI	K = 625 NI	U-400	1979
Moszkva, KI	30 MeV p K = 60 NI		1976
Kiev, INR	100 MeV p K = 140 NI	NIIEFA	1976

p=proton; d=deuteron; $\alpha=^4\text{He}^{2+}$; NI=nehéz ion;

*K-érték jelentését lásd a szövegben!

halad, miként az a 2. ábrán is látható. Az eddig tekintett ideális esetben — mivel az ion keringési frekvenciája független a sebességtől és ennek megfelelően a pályasugártól — a rádiófrekvenciás feszültség frekvenciája megegyezhet az ion keringési frekvenciájával $\omega_D = \omega$; azaz az ion a rádiófrekvenciás feszültségnek mindig ugyanabban a fázisában fog áthaladni a két duáns közötti gyorsító téren. A kinetikus energia növekedése a gyorsító rés egyszeri keresztezésekor $2qU_D$, egy körülfordulás alatt $4qU_D$. Az elérhető végenergia (a maximális pályasugarhoz tartozó kinetikus energia) az (1) alapegyenlet alapján a következő:

$$E_{\max} = \frac{q^2}{2m} (Br_{\max})^2.$$



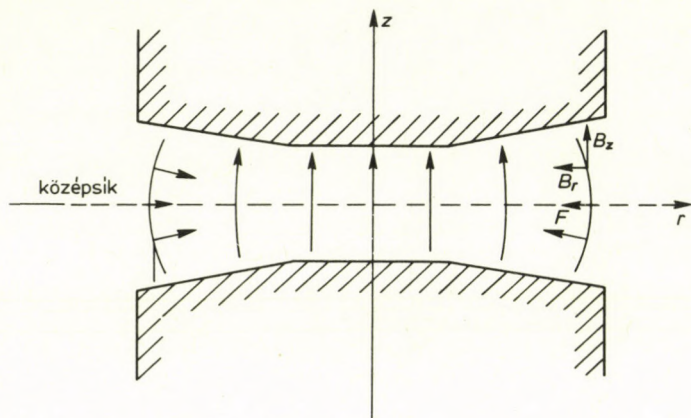
2. ábra. Az ion pályája a klasszikus ciklotronban. A **B** iránya az ábra síkjából kifelé mutat

A maximális pályasugáron az ion eljut a kivonó rendszerig és azon keresztül elhagyja a mágneses teret, a ciklotront.

Az ion a ciklotronon belül számos körfordulást tesz meg, így gondoskodni kell arról, hogy az ion pályája stabilis legyen, az ionok gyorsítás közben ne szóródjanak ki az egyensúlyi pályáról. Ennek érdekében a ciklotronban olyan erőhatást kell biztosítani, amelyik a középpályáról kilépett iont mind axiális mind radiális irányban visszatéríti az ideális pályára. A klasszikus ciklotronban ezt a fókuszáló erőt az átlagos térerősség sugárirányú csökkentésével hozzák létre. A térerő csökkenése folytán az erővonalak a 3. ábrán látható módon görbülnek és így, mivel a Lorentz-erő B -re és v -re egyaránt merőleges, egy az ideális pálya felé mutató, mindkét irányban fókuszálást eredményező erőkomponens is jelentkezik.

A mágneses tér sugárral való változását az ún. térindexszel definiálják:

$$n = - \frac{d \ln B}{d \ln r}$$



3. ábra. Mágneses tér a légrésben. A sugárral csökkenő térerősség radiális és függőleges fókuszálást eredményez

vagy

$$n = - \frac{\frac{dB}{B}}{\frac{dr}{r}} \quad (3)$$

n pozitív értéke a sugár növekedésével csökkenő térerősséget jelöl.

A következőkben részletesebben vizsgáljuk meg a töltött részecske mozgását a mágneses térben [4]. Amennyiben a részecske axiális vagy radiális irányban eltér az egyensúlyi pályáról, úgy a térindex által meghatározott stabil axiális és radiális oszcillációkat fog végezni az egyensúlyi pálya körül. Ezek az oszcillációk betatron-oszcillációk néven ismeretesek.

Először a függőleges irányú mozgást tekintsük. A mágnespofák közötti térrészre $\text{rot } \mathbf{B} = 0$, így

$$\frac{\partial B_r}{\partial z} = \frac{\partial B_z}{\partial r} \approx \frac{dB}{dr}, \quad (4)$$

ahol B_z , ill. B_r a \mathbf{B} axiális, ill. radiális komponensét jelöli. B_r

megadható egy z szerinti hatványsorral

$$B_r = z \left(\frac{\partial B_r}{\partial z} \right)_{z=0} + \frac{z^2}{2} \left(\frac{\partial^2 B_r}{\partial z^2} \right)_{z=0} + \dots$$

Csak az első tagnál maradva (kis eltéréseket tekintve) és (4)-et helyettesítve:

$$B_r = z \frac{dB}{dr}, \quad (5)$$

ill. (3)-ból $\frac{dB}{dr}$ -et helyettesítve:

$$B_r = - \frac{nBz}{r}.$$

Az axiális fókuszáló erő a részecskére $F_z = qvB_r$, így az axiális mozgásra a mozgásegyenlet:

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = - \frac{qvnBz}{r},$$

amely a (2) egyenlőséget figyelembe véve átírható

$$\frac{d^2z}{dt^2} = - \omega^2 n z \quad (6)$$

alakba. Pozitív n érték esetén a megoldás:

$$z = a_z \sin n^{\frac{1}{2}} \omega t,$$

azaz $n > 0$ -ra az axiális mozgás stabilis harmonikus mozgás a középsík körül. Az oszcilláció frekvenciája:

$$\omega_z = \omega n^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

A radiális irányú stabilitás hasonló módon vizsgálható. Az erőt az $mr\omega^2$ centrifugális erő és a Lorentz-erő közötti különbség határozza meg, így az egyenlet a radiális mozgásra:

$$m \frac{d^2r}{dt^2} = mr\omega^2 - qvB. \quad (8)$$

Az egyensúlyi pályát tekintsük r_e sugarú körpályának, a részecske sebessége v , a körfrekvencia ω a B_e térben, és vizsgáljuk egy x kisméretű sugárnövekedés hatását. Vegyük figyelembe, hogy v nem változott, így $r_e + x$ sugarhoz $\omega_x = \omega r_e / (r_e + x)$ körfrekvencia tartozik. A megfelelő mozgásegyenlet:

$$\frac{d^2(r_e + x)}{dt^2} = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{\omega^2 r_e^2}{r_e + x} - \frac{qvB_x}{m},$$

ahol B_x az $r_e + x$ helyen lévő térintenzitás, és x kis értékei esetén $B_x = B_e + x \frac{dB}{dr}$ formában megadható. Beírva ezt az egyenletbe és figyelembe véve (1) alapján, hogy $qvB_e/m = \omega^2 r_e$, kapjuk

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{\omega^2 r_e^2}{r_e + x} - \omega^2 r_e - \frac{\omega^2 r_e x}{B_e} \frac{dB}{dr}.$$

A térindex r_e közelében lévő értéket helyettesítve:

$$\frac{r_e}{B_e} \frac{dB}{dr} = -n,$$

és $r_e \gg x$ esetén sorfejtést alkalmazva:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \omega^2 x(n-1),$$

melynek megoldása

$$x = a_r \sin(1-n)^{\frac{1}{2}} \omega t,$$

azaz $n < 1$ -nél a részecske az egyensúlyi pálya körül oszcillál,

$$\omega_r = \omega(1-n)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

körfrekvenciával.

A radiális és axiális stabilitásra vonatkozó megfontolások tehát azt mutatják, hogy n értékének 0 és 1 közé kell esnie. Az axiális fókuszálás érdekében a mágneses térerőnek csökkennie kell a sugárral, így a klasszikus ciklotronnál az ion mozgására vonatkozó $\omega = qB(r)/m$ körfrekvencia nem állandó, függ a pályasugár értéké-

től. A gyorsítást a duánsra kapcsolt állandó ω_D körfrekvenciájú rádiófrekvenciás feszültséggel végzik, és az ω_D értékét a gyakorlatban úgy választják meg, hogy $\omega > \omega_D$ a központi tartományra és $\omega < \omega_D$ a külső sugarak esetén. Ennek megfelelően az ionmozgás fázisa időről-időre változik a rádiófrekvenciás feszültség fázisához képest. A fáziseltérés nem lehet tetszőlegesen nagy — a részecskének a gyorsító szakaszon való áthaladásakor gyorsító teret kell éreznie — így ez a fáziseltolódás, itt nem részletezett módon, a ciklotronnal elérhető végenergiát is korlátozza [4].

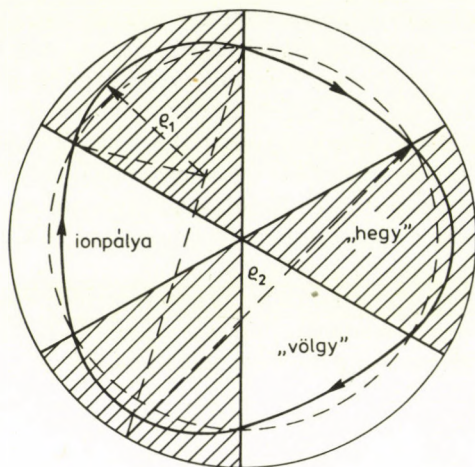
A klasszikus ciklotronnál a végenergia növelésének nem ez jelentette az igazi akadályát, hanem — mint már említettük — a tömeg relativisztikus növekedése az energiával:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{(1 - \beta^2)}}, \quad (10)$$

ahol m_0 a nyugalmi tömeg, $\beta = v/c$ és c a fénysebesség. Ahogy a gyorsítás folyamán az ion energiája növekszik, nő a tömege is és a (2) egyenletnek megfelelően a keringési frekvencia csökken, a részecske a gyorsító fázisból kiesik. Ahhoz, hogy a részecske mozgása szinkronban maradjon a gyorsítófeszültség frekvenciájával, a mágneses térerőt a tömeg növekedésének megfelelően növelni kellene a pályasugár mentén — ez viszont ellentétben áll az axiális fókuszáláshoz biztosítandó $n > 0$ követelménnyel.

A szektorfókuszálású ciklotron

Az ionnyaláb axiális stabilitása oly módon is biztosítható, hogy a mágnes pólusaira rögzített betétek ún. „hegyek” segítségével a mágneses tér azimutális változását hozzák létre a pályák fölött (Thomas-féle ciklotron). A részecske pálya (zárt pálya, gyorsítás nélküli egyszerűsített esetre) ebben a szektorokból álló ciklotronban a 4. ábrán látható. Mivel a mágneses tér erőssége változik az azimut szöggel (a hegyek között nagyobb), a részecske pályájának sugara különböző a hegy (hill), ill. a völgy (valley) tartományokban. A részecske pályájának iránya nem merőleges a szektor határára — azaz a sebességnek egy sugármenti komponense is van — és ennek



4. ábra. Az ion pályája a SF ciklotronban. A pálya sugara a hegy (ρ_1) és a völgy (ρ_2) tartományban eltérő

valamint a mágneses erővonalak görbülésének következtében, mint látni fogjuk, a szektorhatárokon axiális fókuszálás lép fel.

A mágneses térerősség azimutális változásának jellemzésére az ún. flutter (field flutter) paraméter szolgál, mely definíció szerint a következő:

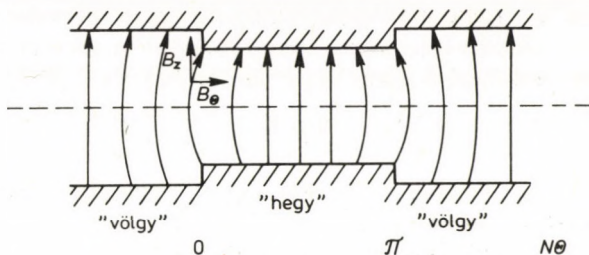
$$B_H = \bar{B}(1 + f) \quad \text{és} \quad B_V = \bar{B}(1 - f), \quad (11)$$

ahol B_H és B_V a hegyek és völgyek közötti térerősség és \bar{B} a teljes fordulatra átlagolt térerősség. Az egyszerűbb tárgyalás végett tételezzük fel, hogy a B_z axiális tér változása a Θ szöggel szinuszos [4, 5], azaz

$$B_z = \bar{B}_z(1 + f \sin N\Theta), \quad (12)$$

ahol N a szektorok (völgyek) száma. Mivel a térerősség változik a Θ szöggel, fellép egy azimutális B_θ térerősségkomponens is (lásd 5. ábra). A részecske sugárirányú v_r sebességkomponense merőleges a B_θ -ra, így a részecskére

$$F_1 = qv_r B_\theta \quad (13)$$



5. ábra. A mágneses tér azimutális változása

erő hat. B_Θ meghatározására fejtük sorba B_Θ -t z szerint. Csak az első rendű tagot tekintve kapjuk:

$$B_\Theta = z \left(\frac{dB_\Theta}{dz} \right)_{z=0}$$

A rot $\mathbf{B} = 0$ egyenlet szerint:

$$\frac{\partial B_\Theta}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial B_z}{\partial \Theta},$$

ahol \bar{r} az ekvivalens körpálya sugara, és

$$B_\Theta = \frac{z}{\bar{r}} \frac{\partial B_z}{\partial \Theta}.$$

A (12) egyenletből

$$\frac{\partial B_z}{\partial \Theta} = \bar{B}_z N f \cos N\Theta,$$

és \bar{B}_z értékét helyettesítve (2) alapján $m\omega/q$ -val, kapjuk:

$$B_\Theta = \frac{zm\omega f N}{\bar{r}q} \cos N\Theta. \quad (14)$$

A v_r sebességkomponens megadható

$$v_r = - \frac{\omega \bar{r} f}{N} \cos N\Theta \quad (15)$$

formában és értéke maximális, amikor a részecske keresztezi az ekvivalens körpályát (a szektor határán) és nulla, amikor legtávolabb van attól (lásd 4. ábra). Az axiális erőhatás a (13), (14) és (15) alapján

$$F_1 = -zm\omega^2 f^2 \cos^2 N\Theta, \quad (16)$$

amely mindig ellentétes a középsíktól való z eltéréssel, azaz axiális fókuszálást eredményez (Thomas-féle erő). A mozgásegyenlet felírásához vegyük figyelembe a következőket:

1. az F_1 erő változásának frekvenciája rendszerint nagy az általa létrehozott részecske oszcilláció frekvenciájához képest, így egy átlagos erőhatás a $\langle \cos^2 N\Theta \rangle = 1/2$ alapján megadható;

2. a térerősség SF ciklotronoknál radiálisan növekszik a relativisztikus energiáknál fellépő tömegnövekedés kompenzálására.

A mozgásegyenlet így (6) alapján:

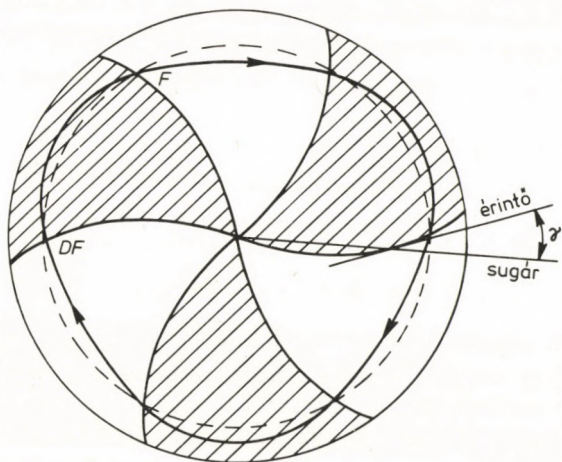
$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\omega^2 n z - \frac{1}{2} \omega^2 f^2 z. \quad (17)$$

Amennyiben $\omega^2 n + \frac{1}{2} \omega^2 f^2 > 0$, az eredő axiális mozgás szinuszos

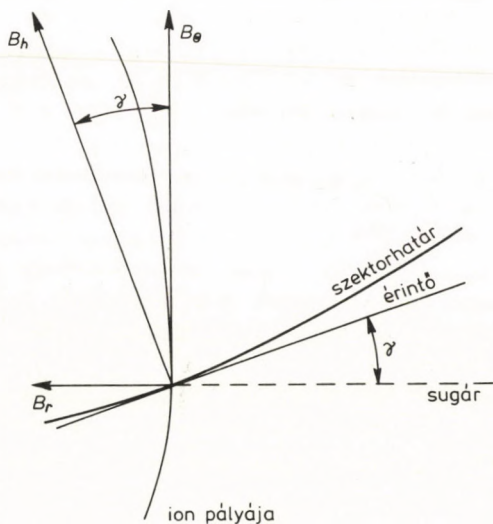
oszcilláció a középsík körül $\omega(n + f^2/2)^{1/2}$ körfrekvenciával. A térerősség sugárirányú növekedésekor az n értéke negatív, és nagysága a tömegnövekedésnek megfelelően nő a pályasugárral. A Thomas-erő egyedül csak egy bizonyos határenergiáig tudja kompenzálni a radiálisan növekvő erősségű mágneses tér defókuszáló hatását.

A szektorok kiképzésének módosításával — ún. spirál alakú szektorok alkalmazásával (lásd a 6. ábrán) — további fókuszáló erők is felhasználhatók a részecskepálya axiális stabilitásának biztosítására. A spirál alakú szektort az ún. spirálszöggel jellemzik, amely a spirál adott pontjához húzható érintő és a ponton áthaladó sugár közötti szög. Mivel a szektor határa nem merőleges a sugárra, a mágneses térerősség vízszintes komponense felbontható egy azimutális és egy erre merőleges sugárirányú komponensre. A 7. ábra alapján:

$$B_r = B_\theta \operatorname{tg} \gamma.$$



6. ábra. A szektorélek spirális kiképzése. F a fókuszáló, DF a defókuszáló él



7. ábra. A mágneses térerősség (B_h) vízszintes komponensének felbontása a szektor határánál

B_θ értékét a (14) kifejezéssel helyettesítve:

$$B_r = \frac{zm\omega f N}{\bar{r}q} \cos N\Theta \operatorname{tg} \gamma, \quad (18)$$

és az axiális irányba ható erő:

$$F_2 = qvB_r,$$

amelyben (18)-ból B_r értékét és a $v = \bar{r}\omega$ értéket helyettesítve kapjuk:

$$F_2 = zm\omega^2 f N \cos N\Theta \operatorname{tg} \gamma. \quad (19)$$

Az F_2 erő negatív és pozitív értéket is felvehet $\cos N\Theta$ előjelének megfelelően, azaz fókuszáló és defókuszáló hatást fejt ki. Az F_2 nagysága azonban függ a z értékétől, a részecskének a középsíktól való eltérésétől. Ha egy részecske egy adott z értékkel a fókuszálási tartományba érkezik, akkor a z értéke itt csökken és kisebb z értékkel lép be az ezt követő defókuszálási tartományba, és ennek megfelelően kisebb defókuszáló erő hat rá. Hasonlóképpen, ha a részecske előbb a defókuszáló tartományba érkezik, az eltérés nagysága megnövekszik, de ennek következtében a következő fókuszáló tartományban ható erő nagysága is megnő. Az egymás után ható fókuszáló és defókuszáló erők eredményeképpen a részecske mindig visszatér a középsík felé, tehát az F_2 erő (az ún. Kerst-féle erő) a részecske pályáját axiális irányban stabilizálja.

Egy harmadik fókuszáló erő, az ún. Laslett-féle erő is fellép a spirál alakú szektorok határánál annak következtében, hogy a részecske a szektor defókuszáló éléhez meredekebb szögben érkezik, mint a fókuszáló élhez (lásd 6. ábra), így a defókuszáló erő rövidebb pályaszakaszon fejt ki hatását. A mágneses tér geometriájának részletesebb analízise alapján ez az erőhatás a Kerst-féle erővel egyenlőnek adódik.

A spirál szektorú ciklotronban a részecske axiális oszcillációjának körfrekvenciája (a három fókuszáló erő együttes hatására, a térerősség radiális függésétől eltekintve):

$$\omega_z = \omega f \left(\frac{1 + 2 \operatorname{tg}^2 \gamma}{2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (20)$$

A pálya axiális stabilitását a SF ciklotronban a mágneses tér speciális geometriája biztosítja, így lehetőség van arra, hogy a mágneses térerősséget a sugár mentén úgy állítsák be, hogy az ion mozgásának körfrekvenciája ne függjön a sugártól, azaz egy teljes körülforduláshoz szükséges idő mindig ugyanaz legyen (izokron működés). A rádiófrekvenciás gyorsítófeszültség frekvenciája így megegyezik az ion körforgásának frekvenciájával; a gyorsító tér fázisa és a mozgás fázisa közötti különbség nem változik a sugár mentén.

Az átlagos térerősség kivánt sugárirányú növekedését a hegyek közötti mágneses tér kialakításával és kiegészítő ún. koncentrikus tekercspárok megfelelő gerjesztésével biztosítják. A kiegészítő gerjesztő tekercsek az elektromágneses póloin koncentrikusan vannak elhelyezve. A SF ciklotron mágneses terének radiális változását az átlagos térindex jellemzi:

$$\bar{n} = - \frac{d\bar{B}}{\frac{d\bar{r}}{\bar{r}}}, \quad (21)$$

ahol \bar{B} az az átlagos mágneses tér, amelyik egy \bar{r} sugarú pályát hozna létre. Az izokron tér definíciója a következő:

$$\bar{B}_r = \frac{m_r}{m_0} B_0 = B_0 \left(1 + \frac{E_{\text{kin}}}{E_0} \right), \quad (22)$$

ahol \bar{B}_r és m_r az átlagos térerősség és a részecske tömege az \bar{r} sugárnál, B_0 és m_0 ezen mennyiségek $r = 0$ -nál felvett értéke, E_{kin} és E_0 a részecske kinetikus és nyugalmi energiája ($E_0 = 940$ MeV protonokra, és pl. $E_{\text{kin}} = 20$ MeV energiához az átlagos térerősséget 2,1%-kal kell növelni).

A következőkben a részecske egyensúlyi pálya körüli oszcillációját vizsgáljuk meg. A radiális oszcillációk tárgyalása a SF ciklotronnál meglehetősen komplikált, de az oszcilláció körfrekvenciájára vonatkozó kifejezés hasonló (9)-hez [4]:

$$\omega_r = \omega(1 - \bar{n})^{\frac{1}{2}} + \dots \quad (23)$$

Vezessük be a $\gamma = m/m_0$ jelölést; a (21) és (22) egyenlőségek alapján:

$$\bar{n} = -\frac{\frac{d\gamma}{\gamma}}{\frac{d\bar{r}}{\bar{r}}} \quad (24)$$

A γ értéke a sugár mentén nő. A (2) egyenlőség alapján felírható $\bar{r} = v/\omega = \beta c/\omega$ összefüggésbe

$$\beta = \left(\frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

helyettesítésével kapjuk:

$$\frac{d\bar{r}}{\bar{r}} = \frac{d\gamma}{\gamma(\gamma^2 - 1)},$$

és így

$$\bar{n} = 1 - \gamma^2.$$

\bar{n} értékét helyettesítve (23)-ba, a radiális oszcilláció körfrekvenciája:

$$\omega_r = \gamma\omega. \quad (25)$$

A radiális betatronoszcillációk frekvenciája a ciklotron középpontjában megegyezik a részecske körforgásának frekvenciájával; lassan és lineárisan növekszik a részecske energiájával (pl. 20 MeV-os protonokra $\gamma \sim 1,02$).

Az eddigi tárgyalás során a részecske radiális és axiális mozgását egymástól függetlenül vizsgáltuk. Mivel az axiális térnek (az azimutális változáson túlmenően) van egy radiális változása is, kapcsolat van az axiális és a radiális oszcilláció között is, és rezonanciaszerű kapcsolódás esetén az egyik oszcillációs módban tárolt kinetikus energia átadódhat a másikba. Részletesebb vizsgálatok azt mutatták, hogy ilyen ún. kapcsolódó rezonanciák akkor jönnek létre, ha a radiális és axiális oszcillációk frekvenciái közötti kapcsolat egyszerű módon megadható. Szokásos definiálni a következő mennyiségeket:

$$v_z = \frac{\omega_z}{\omega} \quad v_r = \frac{\omega_r}{\omega}, \quad (26)$$

amelyek az egy fordulatra eső axiális, ill. radiális oszcillációk számát adják meg. Kapcsolódó rezonanciák fellépnek, ha $v_r = v_z$, $v_r = 2v_z$ stb. Ha a részecske a gyorsítás folyamán sokáig tartózkodik egy olyan tartományban, ahol ez a feltétel teljesül, akkor az oszcillációk amplitúdója káros mértékben megnő. Feltételezve, hogy a radiális oszcillációkban lévő teljes kinetikus energia átmegy az axiális rezgésbe: $z_{\max} = (v_r/v_z)x_{\max}$, azaz pl. $v_r = 2v_z$ esetén az axiális amplitúdó kétszerese lehet a radiális oszcillációk amplitúdójának. A klasszikus ciklotronoknál az axiális rezgés megengedett amplitúdója — a szűk duáns nyílás következtében — jóval kisebb volt, mint a radiális amplitúdóra vonatkozó korlátozás, így egy $v_r = 2v_z$ rezonancia felépülése jelentős nyalábvesztéshez vezetett. A SF ciklotronokban — a jó minőségű külső nyaláb előállítására érdekében — a radiális oszcillációk amplitúdóját is alacsony értéken tartják, így a rezonanciához közeleső tartományban fellépő amplitúdónövekedés, ill. nyalábvesztés minimalizálható.

A mágneses tér hibái — a tervezett térszerkezettől való lokális eltérések — további axiális, ill. radiális oszcillációkhoz vezethetnek. Ha a v_r vagy v_z értéke egész vagy valós tört, akkor az ion mindegyik fordulatban ugyanolyan fázisban halad át egy torzító téren és így káros mértékű amplitúdó növekedés léphet fel, ha a térhiba széles sugártartományon jelentkezik.

A SF ciklotronnál az adott részecskére vonatkozó végenergiát

$$E_{\max} = \frac{q^2}{2m} (\bar{B} \bar{r}_{\max})^2$$

adja meg; az energiaváltoztatás érdekében a \bar{B} értékét és annak megfelelően a gyorsító rádiófrekvenciás feszültségének frekvenciáját kell változtatni. A rádiófrekvenciás generátor általában nem tudja átfogni a teljes energiatartományhoz, ill. a különböző fajlagos töltésű ionok gyorsításához szükséges frekvenciatartományt, így gyorsításra az ún. felharmónikus üzemmódot (a rádiófrekvencia az ion keringési frekvenciájának többszöröse) is alkalmazni kell. Több részecske gyorsítására alkalmas ciklotronnál az egyes részecskékre vonatkozó végenergiát

$$E_{\max} = K \frac{Q^2}{A} \quad (27)$$

formulával szokásos megadni, ahol Q az ion töltése elemi töltésegységekben kifejezve, A a tömegszáma; K értéke a ciklotronra jellemző (a ciklotron paramétereiből számolt) faktor; az energiát MeV egységekben kapjuk meg.

Néhány jellemző paraméter különböző ionokra vonatkozó értékét a 4. táblázat tartalmazza [5]. Izokrón gyorsítás $\bar{B} = \gamma B_0$ feltételének biztosításához szükséges járulékos térerősséget a $\gamma - 1$ mennyiség méri; maximális értéke néhány ionra a táblázat negyedik sorában látható. Hogy a ciklotronnal különböző ionokat lehessen gyorsítani, a térerősség radiális függését megfelelően kell szabályozni a nehéz ionokhoz szükséges — sugárral alig változó — értéktől a protonokhoz szükséges $\gamma_m - 1$ alakú változásig. Ez megfelelő számú koncentrikus tekerccsel elvileg biztosítható, de a tekercek teljesítményfelvétele számottevő lehet (pl. a Berkeley-ben üzemelő 88 inches ciklotron megfelelő számú koncentrikus tekerccsel rendelkezik, a $(\bar{B}\bar{r})_{\max}$ -hoz tartozó protonenergia 130 MeV, de az elérhető végeenergia csak 50 MeV; a 130 MeV-hez tartozó izokrón tér beállításához ugyanis a koncentrikus tekercek gerjesztését — 50 MeV-nél 340 kW! — meg kellene ötszörözni).

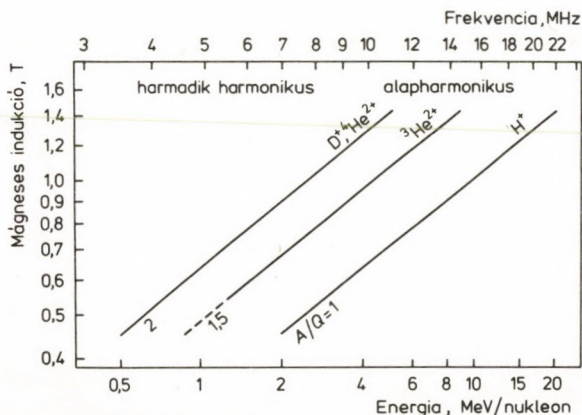
4. táblázat. Néhány paraméter értéke különböző ionokra

Paraméter	H ⁺	D ⁺	⁴ He ²⁺	¹² C ⁴⁺	²⁰ Ne ⁵⁺
B_{\max} -hoz tartozó végeenergia	E_{\max}	$\frac{1}{2} E_{\max}$	E_{\max}	$\frac{4}{3} E_{\max}$	$\frac{5}{4} E_{\max}$
RF frekvencia	f	$\frac{1}{2} f$	$\frac{1}{2} f$	$\frac{1}{3} f$	$\frac{1}{4} f$
β_{\max}	β_m	$\frac{1}{2} \beta_m$	$\frac{1}{2} \beta_m$	$\frac{1}{3} \beta_m$	$\frac{1}{4} \beta_m$
$(\gamma - 1)_{\max}$	$\gamma_m - 1$	$\frac{1}{4} (\gamma_m - 1)$	$\frac{1}{4} (\gamma_m - 1)$	$\frac{1}{9} (\gamma_m - 1)$	$\frac{1}{16} (\gamma_m - 1)$
v_z^2	0,04	$0,04 + \frac{3}{2} (\gamma_m - 1)$	$0,04 + \frac{3}{2} (\gamma_m - 1)$	$0,04 + \frac{16}{9} (\gamma_m - 1)$	$0,04 + \frac{15}{8} (\gamma_m - 1)$

A másik jelentős probléma, amely a több ion gyorsítására szolgáló ciklotron tervezésénél jelentkezik, a 4. táblázat negyedik és ötödik sora alapján érzékelhető. Tegyük fel, hogy a flutter és a spirálszög értékét úgy választották meg, hogy $v_z = 0,2$ protonokra; az ugyanahhoz a mágneses térhez tartozó v_z^2 különböző ionokra a táblázat ötödik sorában látható. Hogy nehéz ionok esetén ne jussanak közel a $v_r = 2v_z$ rezonanciához, a γ_m értéke az elérhető protonenergiát korlátozza (a táblázatban megadott számértékek alapján kb. 100 MeV-re).

Az MGC ciklotron néhány jellemzője

Az MGC ciklotron kompakt, izokrón ciklotron, melyet proton, deuteron, $^3\text{He}^{2+}$ és $^4\text{He}^{2+}$ gyorsítására terveztek. A különböző ionok gyorsításához szükséges rezonanciafeltételeket és az energiaváltoztatás tartományát a 8. ábrán mutatjuk be.



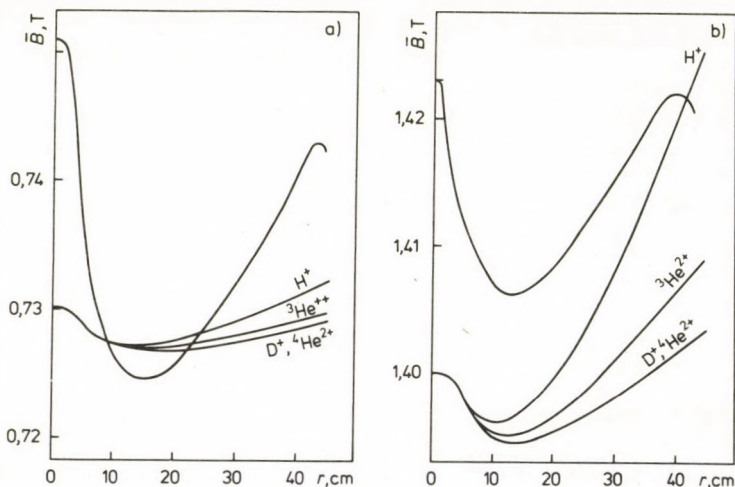
8. ábra. Rezonanciafeltételek az MGC ciklotronnál különböző ionok gyorsításakor

Az MGC ciklotron elektromágnesének fontosabb paraméterei az 5. táblázatban, az átlagos mágneses térerősség sugárirányú változása a 9. ábrán látható [6].

A mágneses tér konfigurációjának tervezésekor biztosították, hogy a flutter és a spirális szektor kiképzése megfelelő axiális

5. táblázat. Az MGC ciklotron elektromágnesének fontosabb paraméterei

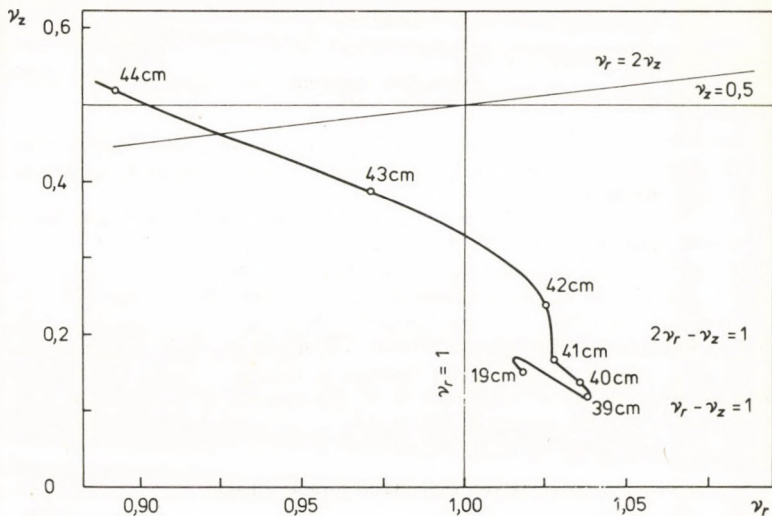
Pólusátmérő	103 cm
Maximális pályasugár	45 cm
Szektorok száma	3
Maximális spirálszög	38°
Légrés	
maximális	12 cm
minimális	7,2 cm
Flutter	0,24
Maximális átlagos indukció	1,45 T
Főtekerccs	
maximális gerjesztő áram	420 A
maximális teljesítmény	34 kW
Koncentrikus tekerccsek száma	4 pár
maximális gerjesztő áram	± 15 A
maximális teljesítmény	0,6 kW
Külső méretek	2,5 m × 1,5 m × 1,5 m
Tömeg	24 t



9. ábra. Az elektromágnes főtekerccsével előállított átlagos télerősség és az izokron gyorsításhoz tartozó télerősség változása a sugár mentén, az MGC ciklotronnál

a) $I = 170$ A, $E = 5,2$ Q²/A (MeV);

b) $I = 370$ A, $E = 19,8$ Q²/A (MeV)



10. ábra. A ν_r és ν_z értékének változása protonok 18 MeV-re gyorsításakor, az MGC ciklotronnál

fókuszálást biztosítson 20 MeV-os protonenergiáig, és a vertikális betatronoszilláció 0,1—0,3 tartományban legyen a különböző gyorsítási módokban. A 10. ábrán a különböző pályasugárhoz tartozó ν_r és ν_z értékeket mutatjuk be protonok 18 MeV végeenergiára való gyorsításakor. A gyorsítás folyamán a kritikus rezonancia-tartományoktól távol mozog a munkapont, és csak a maximális pályasugár közelében keresztezi a $\nu_r = 1$, $\nu_r = 2\nu_z$ és $\nu_z = 0,5$ rezonanciákat. Ez jellemző azokra a ciklotronokra, melyeknél az ionnyaláb kivonása a mágneses télerősség csökkenő szakaszán történik. Az említett tartományon a munkapont gyorsan áthalad, így káros rezonancia jelenség nem lép fel. Alacsonyabb protonenergiáknál és más ionok gyorsításakor ν_z értéke csak 0,2—0,24 értékig növekszik.

Irodalom

Felhasznált irodalom

1. J. A. MARTIN: Proc. 8th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Bloomington, Indiana, USA. Ed.: J. W. HICKS. IEEE Transaction on Nuclear Science NS-26 (1979) 2443.
2. F. G. RESMINI: in Proc. 7th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Zürich, Switzerland. Ed.: W. JOHO. Birkhäuser, Basel, 1975, p. 19.
3. FÉNYES T.: Magyar Fizikai Folyóirat XVIII. (1970) 109.
4. B. S. HARVEY: in Nuclear Spectroscopy and Reactions. Part A. Ed.: J. CERNY. Academic Press, New York and London, 1974, p. 36.
5. J. R. RICHARDSON: in Progress in Nuclear Techniques and Instrumentation. Ed.: F. J. M. FARLEY. North-Holland, Amsterdam, 1965, p. 1.
6. A. N. GALAJEV—A. V. GALCSUK—L. A. RJABOVA—A. V. SZTYEPANOV—J. I. SZTOGOV: NIIEFA preprint B-0347 (1978).

Témakörrel kapcsolatos további munkák

- D. J. CLARK: Reports on Progress in Physics **35** (1972) 1007.
- J. J. LIVINGOOD: Principles of Cyclic Particle Accelerators. van Nostrand, Princeton, New Jersey, 1961.
- Informal Conf. on Sector-focused Cyclotrons, Sea Island, GA, USA. Ed.: F. T. HOWARD. National Academy of Sciences — National Research Council, Washington, DC; NAS-NRC Publ. 656 (1959).
- Int. Conf. on Sector-focused Cyclotrons, Los Angeles, CA, USA. Eds.: K. SIEGBAHN—F. T. HOWARD. Nuclear Instruments and Methods **18, 19** (1962).
- Int. Conf. on Sector-focused Cyclotrons and Meson Factories, CERN, Geneva, Switzerland. Eds.: F. T. HOWARD—N. VOGT-NILSEN. CERN 63—19 (1963).
- Int. Conf. on Sector-Focused Cyclotrons, Gatlinburg, IN, USA. Ed.: F. HOWARD. IEEE Transactions on Nuclear Science NS-13 (1966).
- 5th Int. Cyclotron Conf. Oxford, UK. Ed.: R. W. McIBROY. Butterworths, London, 1971.
- Cyclotrons-1972. Proc. 6th Int. Cyclotron Conf., Vancouver, B. C. Canada. Eds.: J. J. BURGERJON—A. STRATHDEE. American Institute of Physics, New York, AIP Conf. Proc. no. 9., 1972.

Az U-103 ciklotron alkalmazási lehetőségeinek áttekintése

Mahunka Imre

MTA Atommag Kutató Intézet, Debrecen

A tudományos ülés sok résztvevője számára ismert, hogy a debreceni Atommag Kutató Intézetben már több mint egy évtizede foglalkozunk ciklotron telepítés gondolatával. Ennek megfelelően témafigyelést végeztünk a részünkre egyéb feltételek miatt számbajöhető kisméretű ciklotronok felhasználásával kapcsolatban. A témafigyelés eredményeként megállapítható, hogy a ciklotronokat ma már nemcsak a magfizika problémáinak megoldására használják, hanem szerepük és jelentőségük egyre nő a multidiszciplináris témákban, mind a kutatási célú, mind a tisztán gyakorlati feladatok megoldásában [1, 2, 3]. Figyelembe véve ezen felhasználási igényeket, anyagi lehetőségeinket, és azt a tényt, hogy Magyarországnak ez lesz az első ciklotronja, célszerűnek tűnt olyan ciklotronlaboratórium kialakítása, amely a magfizikai alapkutatósokon kívül lehetőséget ad sokféle, különböző összetételű multidiszciplináris igény kielégítésére is. A különböző célú vizsgálatok témakörök szerinti csoportosításának és időben elvégzett rangsorolásának az az előnye, hogy a kiválasztott témakörökben a vizsgálatok tárgyi feltételeit jelentő igények egy részét — pl. hely, nyálábmínőség, kapcsolódó létesítmények — már a tervezés során, a ciklotronlaboratórium szerkezetének kialakításánál figyelembe lehet venni. A rangsorolást irodalmi áttekintés, külföldi ciklotronlaboratóriumok munkatársaival és hazai szakemberekkel való konzultációk, valamint a hazai igények felmérése alapján végeztük. Az elmondottak szerint perspektívikus témaköröknek ítéltük az U-103 ciklotron besugárzásos és analitikai alkalmazását, valamint az izotóptermelést.

Ezek a témakörök a jelenlegi tudományos tanácskozásnak a gyorsítók egy széles bázisán vizsgált fő témáival esnek egybe.

A továbbiakban ezt a bázist az U-103 ciklotronra szeretném leszűkíteni, és irodalmi példák alapján bemutatni ezen ciklotron ipari, mezőgazdasági és orvosi alkalmazhatóságát.

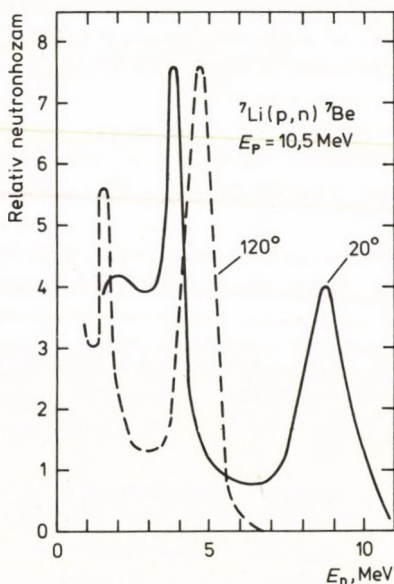
A gyorsítók *besugárzásos* alkalmazásának témakörében a ciklotronokat felhasználhatjuk elsődleges vagy másodlagos sugárforrásként. Elsődleges sugárforrásként való alkalmazásánál közvetlenül a gyorsított ionnyalábokat használjuk. Ilyen típusú alkalmazásokra jelentős felhasználási igény van ipari vonatkozásban, az erős radioaktív sugárzásokat jól tűrő szerkezeti anyagok előállításának kidolgozásánál. Az ionnyalábok által okozott sugárkárosodás vizsgálata elősegíti a károsodási alapjelenségek jobb megértését és elősegíti a kielégítő tulajdonságú szerkezeti anyagok, ötvözetek előállítását. Jelentős és elterjedt alkalmazási téma a kopásnak kitett szerkezeti anyagok ionnyalábokkal történő felaktiválása. Az aktivitásnak a kopás következtében történő csökkenése alapján a kopás nagy pontossággal mérhető. Ezt a módszert elsősorban vas alapanyagú alkatrészek kopásvizsgá-

1. táblázat. Neutronhozamok ($E_n > 0,3$ MeV) és átlagenergiák vastag céltárgyak alkalmazása esetén [7]

Reakció	E_{bomb} , MeV	$E_n(0^\circ)$, MeV	$I_{n\Omega}(0^\circ)$, $10^{16} \text{n}/(\text{sr} \cdot \text{s} \cdot \text{A})$	$\int I_{n\Omega} d\Omega$, $10^{16} \text{n}/(\text{s} \cdot \text{A})$
$^9\text{Be}(d, n)$	8,0	3,7	0,6	1,5
	14,8	5,1	3,8	8,6
	18,0	5,8	6,3	12,3
	23,0	7,5	11,8	19,6
$^7\text{Li}(d, n)$	8,0	3,7	0,4	1,0
	14,8	5,1	3,1	7,7
	18,0	6,1	4,9	12,1
	23,0	7,9	10,3	19,5
$^9\text{Be}(p, n)$	14,8	3,0	1,3	6,8
	18,0	3,4	1,9	10,2
	23,0	4,9	3,0	16,6
$^7\text{Li}(p, n)$	14,8	3,7	0,5	5,1
	18,0	4,4	0,9	8,1
	23,0	6,4	1,5	10,3

latánál használják, ahol az aktív anyag a $^{56}\text{Fe}(p, n)^{56}\text{Co}$ magreakcióban áll elő. Konkrét példaként említhető itt a vasúti sínek [4], fogaskerekek [5] és ágyúcsövek [6] vizsgálata. Az U-103 protonnyalábjával $\sim 600 \mu\text{m}$ mélységig végezhetünk aktiválást és $\pm 0,1 \mu\text{m}$ pontosságú méréseredményeket kaphatunk.

A ciklotronokat másodlagos sugárforrásként elsősorban neutronok termelésére használják a könnyű elemeken kiváltott nagy neutronhozamú magreakciókon keresztül. Az 1. táblázat kanadai szerzők [7] munkája alapján szemlélteti a vastag ^9Be és ^7Li céltárgyakon különböző energiájú deutériumokkal és protonokkal kiváltott magreakciókban keletkező neutronok átlagenergiáit és hozamait. Az U-103 nyalábadatai, valamint a neutron-átlagenergiák és a forráserekségek nagysága szerint a $^7\text{Li}(p, n)$ reakció tűnik a legkedvezőbbnek. Az 1. ábrán ezen magreakcióban keletkező neutronok energiaspektruma látható vékony céltárgy alkalmazása



1. ábra. $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ magreakcióban keletkező neutronok energiaspektruma vékony céltárgy alkalmazása esetén

esetén, 10,5 MeV bombázó energiánál 20°-os, ill. 120°-os irányban [8]. A spektrumból látható, hogy vékony céltárgy esetén előre irányban a neutronok egy jelentős része megközelíti a bombázórészek energiáját, azaz aránylag nagy energiájú neutronokat is kaphatunk.

Az U-103 ciklotronnal termelhető neutronok felhasználhatók orvosi vonatkozásban a rákkutatásban és terápiában, ipari vonatkozásban elsősorban analitikai problémák megoldására, a mezőgazdaságban pedig mutációs nemesítési célokra. Általánosan az várható, hogy 10^{12} – 10^{13} neutron/s forráserekségek érhetők el 10 MeV körüli átlagenergiákkal. Ezek a forrásadatok azt jelentik, hogy 0,1–0,2 Gy/min dózisteljesítményű kollimált neutronnyalábot kaphatunk terápiás célra.

A nukleáris *analitika* témakörében a ciklotronokat mind a „késleltetett”, mind a „prompt” analitikai módszerekben felhasználhatjuk. Késleltetett aktivációs analízis esetén a ciklotronok primer vagy szekunder nyalábjaival létrehozott radioaktív atommagok sugárzását mérjük, és azok intenzitása alapján következtetünk a céltárgyban jelenlévő elemek koncentrációira. A „prompt” módszereknél a mag-, ill. atomi kölcsönhatásokban közvetlenül keletkező ionokat, gamma-sugarakat vagy röntgensugarakat szokás mérni.

A ciklotronra alapozott minden analitikai módszer lényegében roncsolásmentesnek tekinthető és egyidejűleg sok elem koncentrációjának a meghatározására alkalmas. Az elmondottakból következően a felhasználás célját tekintve e módszerek alkalmasak mind standardok, mind ismeretlen összetételű anyagok vizsgálatára szervetlen és szerves minták esetében. Az ismeretlen összetételű anyagok vizsgálatánál szerepük különösen jelentős az energiahordozók analízisében és gazdaságos felhasználásuk kutatásában, a nyersanyag, ill. érckutatásban, kohászati eljárások kidolgozásában, nagy tisztaságú fémek és félvezetők előállításában.

A ciklotront igénylő analitikai módszerek között jelenleg talán az iongerjesztésű késleltetett aktivációs analízis a legelterjedtebb. E módszer hatékonyságát a következő példa illusztrálja. Franciaországban az Orleans-i kis ciklotront szinte teljes üzemidejében ipari megrendelésű aktivációs analitikai vizsgálatokra használják. Egyik témájuk pl. nagy tisztaságú Al-mintában a nyomelemek

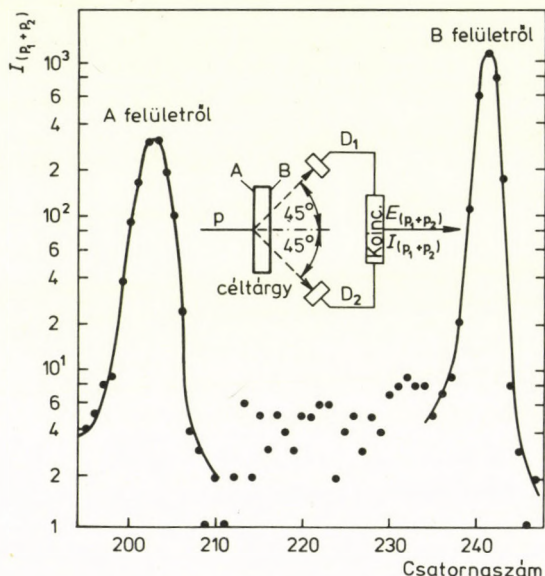
2. táblázat. Protonaktivációs analízissel elérhető érzékenységek nyom-
szennyezők vizsgálatánál Al-mintában

10 ⁻³ – 10 ⁻² ppm			10 ⁻² – 10 ⁻¹ ppm			10 ⁻¹ – 1 ppm			1 – 30 ppm		
Ca	Ti	Cr	Li	V	Fe	B	S	Re	In	Ba	W
Ni	Cu	Zn	As	Sr	Nb	Ir	Au	Tl	Eu	Rh	Tb
Ga	Ge	Se	Ag	Sb	I	Pb	La	Pr			
Br	Rb	Y	Pt	Hg	Nd	Sm	Gd	Dy			
Zr	Mo	Ru	Er			Yb					
Pd	Cd	Sn									
Te											

meghatározása. A 2. táblázat azt mutatja, hogy protonaktiválásal egyidejűleg milyen elemeket milyen érzékenységgel tudnak mérni [9].

A gyorsítókra alapozott analitikai módszerekkel nemcsak térfogati koncentrációk mérhetők, hanem mélység-, ill. felületi eloszlás is. Hidrogén-mélységeloszlás meghatározásának sematikus rajzát és egy konkrét esetben kapott méréseredményt mutat a 2. ábra [10]. A módszer lényege a következő: vékony fóliát protonokkal bombázva és koincidencia méréssel kiválogatva a rugalmasan szórt átmenő protonpárokat, ezek energiaösszegének spektruma a mintában lévő hidrogén mélységeloszlását tükrözi. A 2. ábra szerint ugyanis a céltárgy „A” frontfelületén történő ütközéskor 2 db felére csökkent energiájú proton fékeződik és veszít energiát, miközben a céltárgyon át a detektorok felé halad. A „B” felületen való ütközéskor az előző esethez viszonyítva 1 db nagy energiájú proton rövidebb úton halad át a céltárgyon, így kisebb lesz az energiaveszteség, és kisebb a szórás is az energia összességében. Az elmondottak alapján értelmezhető a feltüntetett spektrum. A céltárgy 125 μm vastag Al-fólia, amelynek mindkét felületén $\sim 0,3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ hidrogén van. A céltárgy belsejének hidrogéntartalma $\sim 0,7$ ppm.

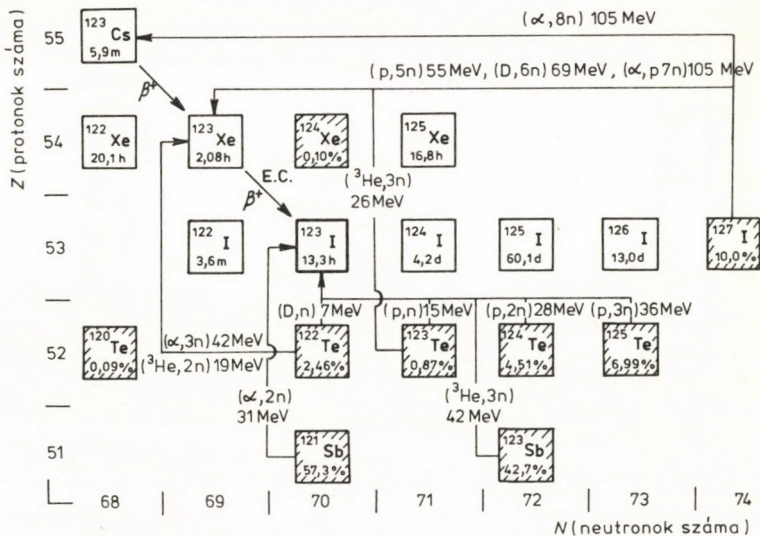
Az izotóptermelés témakörében a ciklotronok szerepe különösen jelentős a következő okok miatt. A ciklotron-ionnyalábok segítségével szinte minden elem néhány neutronhiányos radioaktív izotópja előállítható. A radioaktív anyag nagy fajlagos aktivitással, hordozómentesen, gyakran radiokémiai tisztaságban kapható. Hátrány, hogy a ciklotron-izotópok a reaktorokkal termelt izotó-



2. ábra. Hidrogénnel szennyezett felületű vékony alumínium-céltárgy vizsgálatánál a koincidenzában mért szórt protonok energiaösszegének spektruma

pokhoz viszonyítva drágák. A ciklotronnal termelhető izotópokat elsősorban az orvosi gyakorlatban alkalmazzák, de jelentős az igény a népgazdaság termelő ágazatainak részéről is. A radioaktív izotópokat leggyakrabban nyomjelzésre használják. E módszerben a kiválasztott élő vagy élettelen anyagba kis mennyiségben beviszik a vizsgálni kívánt elem radioaktív izotópját. Ezen izotóp sugárzását detektálva meghatározható a nyomjelzett elem helye, eloszlása, koncentrációja; fizikai és kémiai folyamatoknál az átalakulások mértéke és sebessége; biológiai mintákban pedig az anyagcsere különböző paramétereiktől való függése.

Az U-103 ciklotron alkalmas izotóptermelésre, ilyen célú felhasználását tervezzük is. A ciklotron kis mérete, és ennek megfelelően alacsony nyalábenergiái természetesen bizonyos korlátozást jelentenek. A korlátozás elsősorban az erősen neutronhiányos izotópok előállítására vonatkozik, másrészt azt jelenti, hogy néhány



3. ábra. ^{123}I termelése kis- és középmeretű ciklotronok segítségével

izotóp esetében nem valósítható meg az optimális, azaz a legolcsóbb termelési mód.

Az izotóptermelés problémái, annak elsősorban fizikai vonatkozásai a jód példáján keresztül illusztrálhatók. A ^{123}I -ra felhasználhatóságának sokrétűsége, jó detektálhatósága és kedvező sugárterhelési adatai miatt igen nagy az igény az orvosi gyakorlatban, ezért termelésére sok módszert dolgoztak ki [11]. A kis- és középmeretű gyorsítókkal megvalósítható termelési módokról a 3. ábra ad áttekintést, ahol a nyilak kezdőpontjai azon céltárgy izotópokat jelzik, amelyekből a feltüntetett magreakciókon keresztül ^{123}I -ot kaphatunk direkt termeléssel vagy ^{123}Cs , ill. ^{123}Xe generátoron keresztül. A feltüntetett termelési módok egy része az U-103 segítségével is megoldható, és előzetes számítások szerint $4 \cdot 10^8$ — $40 \cdot 10^8$ Bq aktivitás várható optimális besugárzási feltételek mellett attól függően, hogy milyen a tisztasági követelmény a nehezebb jód izotópok szennyezési koncentrációjára.

3. táblázat. Áttekintés a kisméretű ciklotronokkal termelhető izotópokról és előállításuk kísérletileg mért hozamairól

Izotóp	Felezési idő	Magreakció	Bombázó-energia, MeV	Céltárgy	Termelési hozam, $\mu\text{Ci}/(\mu\text{A h})$	Irodalom
⁷ Be	53 d	⁷ Li(p, n)	22	Li	170	a
¹¹ C	20 min	¹⁴ N(p, α)	15	N ₂ (gáz)	19 000	b
		¹⁰ B(d, n)	14	B ₂ O ₃	300 000	c
		¹² C(³ He, α)	15–18	CaC ₂	2 500	c
¹³ N	10 min	¹⁶ O(p, α)	18	H ₂ O	24 000	c
		¹² C(d, n)	8	CO ₂ (gáz)	3 200	b
		¹⁴ N(³ He, α)	30	N ₂ (gáz)	15 000	c
¹⁵ O	2 min	¹⁴ N(d, n)	8	N ₂ (gáz)	4 600	b
¹⁸ F	110 min	²⁰ Ne(d, α)	8	Ne (gáz)	10 000	c
		¹⁶ O(³ He, p)	22	H ₂ O	6 000	c
		¹⁶ O(α , d)	30	H ₂ O	1 100	c
²² Na	2,6 y	²⁵ Mg(p, α)	22	Mg	0,4	a
		²³ Na(p, pn)	22	Na	3,1	a
³⁰ P	2,5 min	²⁷ Al(α , n)	15	Al	10 000	b
⁴³ K	22 h	⁴⁰ Ar(α , p)	17	Ar (gáz)	57	c
⁵¹ Cr	28 d	⁵¹ V(p, n)	15	V	340	b
⁵² Mn	5,7 d	Cr(p, xn)	22	Cr	80	a
⁵² Fe	8,2 h	⁵² Cr(³ He, 3n)	23	Cr	0,7	b
		⁵⁰ Cr(α , 2n)	30	Cr	3,3	c
⁵⁶ Co	77 d	Fe(p, xn)	22	Fe	70	a
⁶⁵ Zn	244 d	⁶⁵ Cu(p, n)	22	Cu	9,3	a
⁶⁷ Ga	78 h	Zn(p, xn)	15	Zn	77	b
		Zn(p, xn)	22	Zn	430	c
		Zn(d, xn)	8	Zn	30–100	c
		Zn(d, xn)	16	Zn	340	c
		Zn(d, xn)	16	⁶⁶ Zn(90%)	946	c
		⁷² Ge(³ He, 2n)	15	Ge	250	b
⁷⁷ Br	56 h	⁷⁵ As(α , 2n)	28	As ₂ O ₅	160	c
				As ₂ O ₃	290	c
				As	170	c
⁸¹ Rb	4,7 h	⁸¹ Br(³ He, 3n)	22	NaBr	30	c
		⁷⁹ Br(α , 2n)	30	NaBr	2 000	c
⁸⁵ Sr	65 d	⁸⁵ Rb(d, 2n)	13	RbCl	15	c
⁸⁸ Y	108 d	⁸⁸ Sr(p, n)	22	SrO	20	a
¹¹¹ In	2,8 d	Cd(p, xn)	15	Cd	150	c
		¹¹¹ Cd(p, n)	16	¹¹¹ Cd (dúsított)	515	c
		Cd(p, xn)	22	Cd	1 035	c
		Cd(d, xn)	12	Cd	117	c
		¹⁰⁹ Ag(α , 2n)	30	Ag	200	c

3. táblázat (folytatás).

Izotóp	Felezési idő	Magreakció	Bombázó-energia, MeV	Céltárgy	Termelési hozam, $\mu\text{Ci}/(\mu\text{A h})$	Irodalom
^{123}I	13 h	$^{123}\text{Te}(p, n)$	15	^{123}Te (77%)	4 000	c
		$^{124}\text{Te}(p, 2n)$	30	^{124}Te (dúsított)	40 000	c
		$^{122}\text{Te}(d, n)$	6–9	^{122}Te (dúsított)	100	c
		$\text{Sb}(^3\text{He}, xn)$	23	Sb	24	c
		$^{123}\text{Te}(^3\text{He}, 3n)$	30	^{123}Te (dúsított)	750	c
^{123}Xe	2,1 h					
^{127}Cs	6,2 h	$^{127}\text{I}(^3\text{He}, 3n)$	22	NaI	500	c
^{167}Tm	9,7 d	$^{167}\text{Er}(p, n)$	15	^{167}Er (91%)	38	b
^{197}Hg	65 h	$^{197}\text{Au}(p, n)$	12	Au	14	c
			15	Au	36	b
			12	Au	15	c
^{197m}Hg	24 h		15	Au	23	b
^{203}Pb	52 h	$^{203}\text{Tl}(p, n)$	15	Tl	50	c
^{206}Bi	6,2 d	$\text{Pb}(p, xn)$	15	Pb	100	b
			22	Pb	700	c
^{208}Po	2,9 y	$^{209}\text{Bi}(p, 2n)$	22	Bi	10	a

a) J. A. MARTIN—R. S. LIVINGSTON—R. L. MURRAY—M. RANKIN: *Nucleonics* **13** (1955) 28.

b) R. S. TILBURY—R. E. BIGLER—L. ZEITZ—J. S. LAUGHLIN: *NBS (U.S) SP 425* (1975) 520.

c) M. A. CHAUDHRI: *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **NS-26** (1979) 2281.

Az U-103-hoz hasonló kisméretű ciklotronokkal termelt izotópokról a 3. táblázat ad áttekintést. A táblázatban a magreakcióval, a bombázó energiával és céltárggyal jellemzett termelési módok kísérletileg mért termelési hozamai vannak feltüntetve azért, hogy képet kapjunk az U-103-al is termelhető itt feltüntetett izotópok aktivitásában mért mennyiségéről.

Befejezésül e rövid áttekintés alapján is megállapítható, hogy a ciklotronnak jelentős szerepe lehet hazánkban is az ipari, mezőgazdasági és orvosi szempontból lényeges kutatási és gyakorlati feladatok megoldásában. E feladatok ellátásához azonban nemcsak a tárgyi feltételeket, azaz a ciklotronlaboratóriumot és felszerelését, hanem a személyi feltételeket is biztosítani kell. A személyi feltételek

olyan szakemberek kinevelését jelentik, akik a ciklotron beindításának idején képesek lesznek az itt tárgyalt témakörökben jelentkező konkrét multidiszciplináris feladatok megoldására. Az eredményes munka kettős feltételének teljesítése tehát nem rövid lejáratú, ami azt jelenti, hogy bár a ciklotron beindításának ideje távolinak tűnik, az alkalmazásokra való felkészülést már most meg kell kezdeni.

Irodalom

1. 1978 Conference on the Applications of Small Accelerators in Research and Industry. IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-26** (1979) No. 1. Part 1—2.
2. Eighth International Conference on Cyclotrons and their Application. IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-26** (1979) No. 2. Part 1—2.
3. Third International Conference on Ion Beam Analysis. Nucl. Instr. Meth. **149** (1978) No. 1—3.
4. H. D. GROHMAN: *ZfK-363* (1978) 84.
5. M. BURIANOVÁ—Z. FRYNTA: *ZfK-363* (1978) 88.
6. A. NIELER—R. BIRKMIRE: IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-26** (1979) 1815.
7. M. A. LONE—C. B. BIGHAM—J. S. FRASER—H. R. SCHNEIDER—T. K. ALEXANDER—A. J. FERGUSON—A. B. McDONALD: Nucl. Instr. Meth. **143** (1977) 331.
8. M. A. CHAUDHRI—J. TEMPLER—J. L. ROUSE: IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-26** (1979) 2287.
9. J. L. DEBRUN—J. N. BARRANDON: in Proc. 7th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications. Birkhäuser, Basel, 1975, p. 507.
10. B. L. COHEN—C. L. FINK—J. D. DEGNAN: J. Appl. Phys. **43** (1972) 19.
11. „Iodine-123 in Western Europe”, Panel Disc., Jül-CONF-20 (1976).

A kiadásért felelős az Akadémiai Kiadó igazgatója

Felelős szerkesztő: Szente László. Műszaki szerkesztő: Csákvári András

A borító és kötésterv Somlai Vilma munkája

Terjedelem: 9,6 (A/5) iv — AK 1341 k 8386

83.10538 Akadémiai Nyomda, Budapest — Felelős vezető: Bernát György

Magyar Fizikai Folyóirat

A Magyar Tudományos Akadémia III. Osztályának fizikai közleményei

Szerkeszti
Pál Lénárd

A folyóirat a Magyarországon folyó fizikai kutatások legújabb eredményeit ismerteti, tájékoztat a fizikai kutatások jelenlegi irányairól. Kandidátusi értekezéseket és doktori disszertációkat tesz közzé, ismerteti a magyar kutatók külföldi folyóiratokban megjelent publikációinak adatait, valamint a IUPAP híreit. „A klasszikus irodalomból” című rovatában a fizika témák szerint csoportosított mesterművei találhatóak.

Megjelenik évente 1 kötet 6 füzetben
Évi előfizetési díja 90,—Ft



Akadémiai Kiadó · Budapest

Ara: 57,—Ft

ISBN 963 05 3066 X