

ESPIGREINING

Valgarður Stefánsson



ORKUSTOFNUN
JARÐHITAEILD

ESPIGREINING

Valgarður Stefánsson

OS-JHD-7505

JANÚAR 1975

E F N I

1. Inngangur
2. Undirstöðuatriði
3. Framleiðsla nifteinda
 - 3.1 Nifteindalindir
 - 3.2 Nifteindavakar
 - 3.3 Kjarnaofnar
4. Gammanemar
 - 4.1 NaI (Tl) sindurnemar
 - 4.2 Ge (Li) torleiðninemar
5. Greining
6. Not espigreiningar
 - 6.1 Málmiðnaður
 - 6.2 Efnafraði
 - 6.3 Líffraði
 - 6.4 Jarðvísindi
 - 6.5 Önnur notkunarsvið
7. Espigreining á Íslandi
8. Lokaorð

Heimildir

Viðauki

1. INNGANGUR

Nifteindaespigreining (neutron activation analysis) er efnagreiningaraðferð, byggð á eiginleikum atómkjarnans. Espigreining er líklega þekktust í sambandi við ákvörðun á súrefnismagni, en er nothæf við ákvörðun á magni flestra efna. Helstu kostir espigreiningar eru: a) greining hvers sýnis tekur yfirleitt skamman tíma (ákvörðun súrefnismagns tekur t.d. fáeinar mínútur); b) unnt er að greina mörg efni í sama sýni samtímis. Verulegur tímasparnaður er því yfirleitt að nota espigreiningu, miðað við aðrar efnagreiningaaðferðir. Helsti galli espigreiningar er hár stofn- og rekstrarkostnaður.

Skilyrði fyrir byggingu og rekstri espigreiningarstöðvar héraendis eru:

- þörf
- þekking
- fjármagn

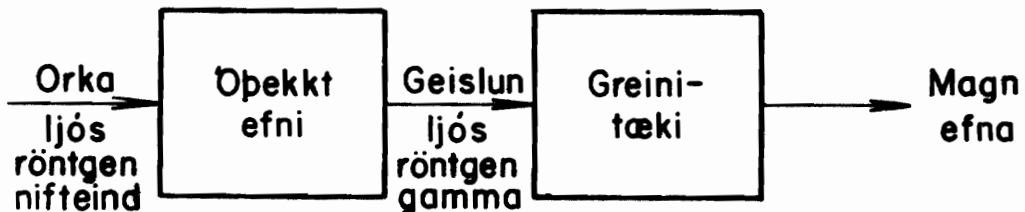
Svo virðist sem þessum skilyrðum sé fullnægt.

Hvað varðar þörf slíkrar stöðvar héraendis má geta þess, að íslenskir jarðefnafræðingar greina erlendis snefilefni með espigreiningu. Efnafræðistofa Raunvísindastofnunar Háskólans tekur nú þátt í alþjóðlegri samvinnu um greiningu snefilefna í vefjum spendýra. Við þessar rannsóknir var mælt með espigreiningu, en hér er notast við aðrar aðferðir, þar sem aðstaða til espigreiningar er ekki fyrir hendi. Orkustofnun mun innan tíðar nota nifteindir til þess að ákvarða poruhlutfall bergs í veggjum borhola. Beint framhald slíkra rannsókna er að nota espigreiningu við efnagreiningu bergs í holuveggjum.

Tilgangur þessarar greinargerðar er að kynna espigreiningu og jafnframt að sýna fram á, að mögulegt er að koma á fót espigreiningastöð héraendis.

2. UNDIRSTÖÐUATRÍÐI

Í megindráttum er espigreining framkvæmd eins og "atomic absorption" og "röntgenfluoresence". Fyrst er orku í einhverri mynd (ljós, röntgengeislar, nifteindir) veitt inn í hið óþekkta efni, en eiginleikar þeirrar geislunar, sem út kemur, eru notaðir til þess að ákvarða efnasamsetninguna. Sameiginlegt heiti á þessum þrem aðferðum við efnagreiningu er tækjagreining. Mynd 1 sýnir aðalþættina við slíka efnagreiningu.



Mynd 1

Einföld skýring á tækjagreiningu

Allar þessar aðferðir eru sambærilegar, hvað snertir næmi og áreiðanleika.

En aðferðirnar byggjast á mismunandi eiginleikum efnisins. Þannig eru það eiginleikar ystu rafeindanna í atóminu, sem ákvarða mælistærðir í "atomic absorption" aðferðinni. Við "röntgenfluoresence" koma eiginleikar innstu rafeindanna að notum, en espigreining byggir á eiginleikum atómkjarnans.

Við nifteindaespigreiningu er nifteindum skotið á hið óþekkta sýni. Við það verða kjarnabreytingar í sýninu og myndast kjarnar, sem yfirleitt eru geislavirkir. Þessir dótturkjarnar geta sent út bæði beta og gamma geislun, en yfirleitt er aðeins gammageislun notuð við espigreiningu.

Hver geislavirkur kjarni hefur ákveðið gammaróf (gamma-spektrum) og ákveðinn helmingunartíma. Með því að mæla báðar þessar stærðir, fæst örugg vitneskja um vissar samsætur í sýninu.

Kjarnabreytingar eru yfirleitt einfaldar og eru á forminu

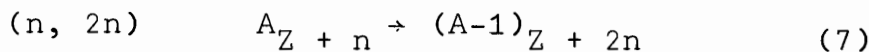
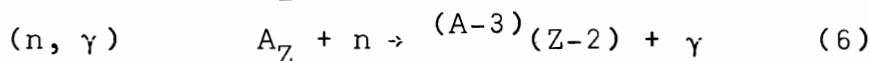
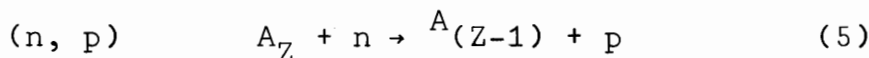
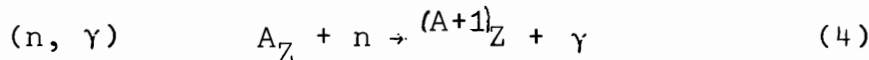
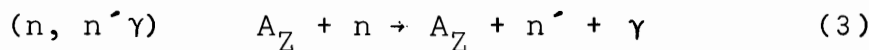


sem táknar, að ef ögninni a er skotið á kjarnann X , þá myndist kjarninn Y og ögnin b sendist út. Venja er að skrifa breytinguna þannig:



sem táknar nákvæmlega það sama og (1).

Ef nifteind n er skotið á kjarnann A_Z geta eftirfarandi breytingar átt sér stað:



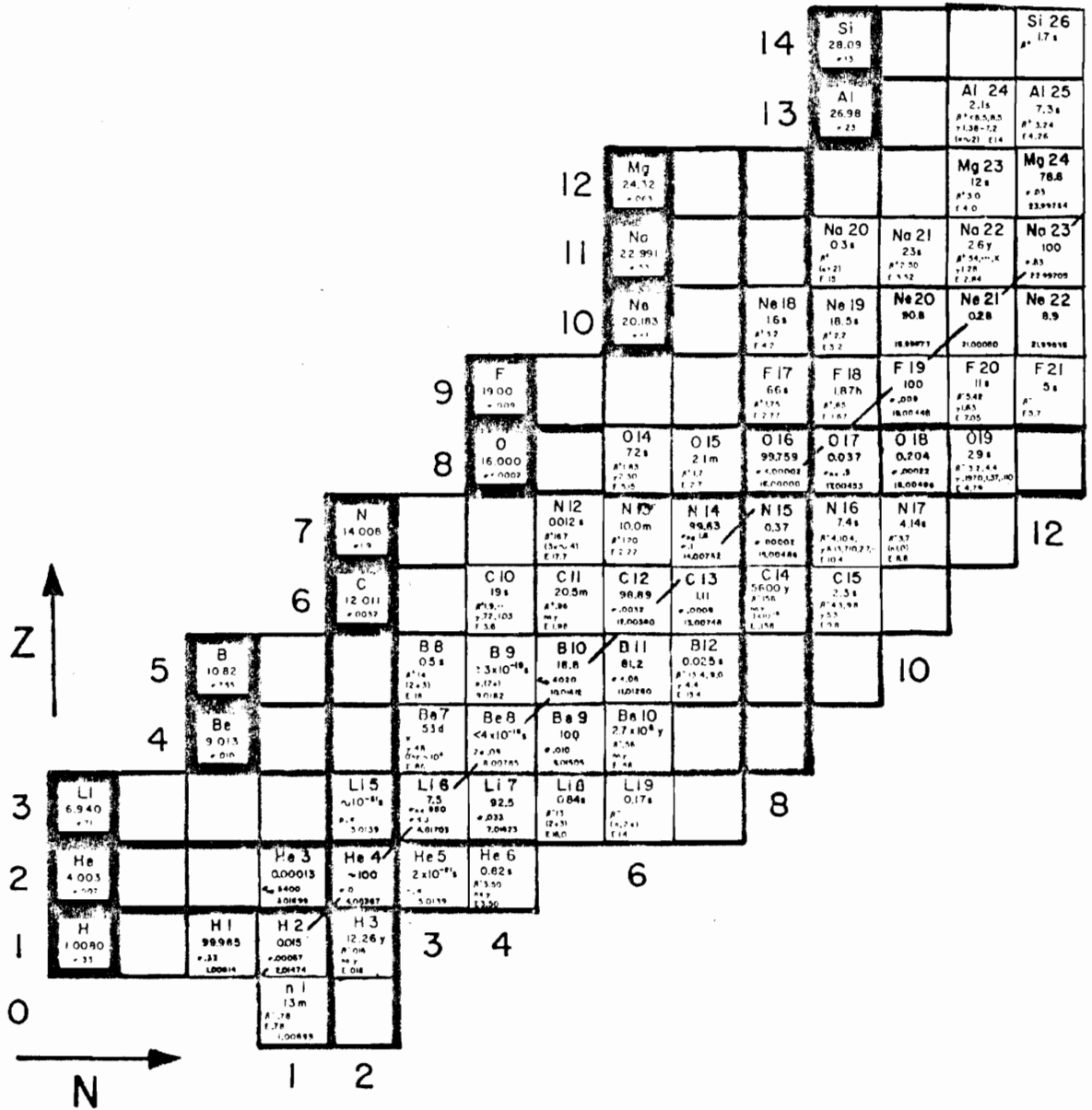
Fyrsta breytingin (3) sýnir, að upphaflegi kjarninn breytist ekki, heldur fer viss hluti af hreyfiorku nifteindarinnar í að lyfta kjarnanum upp í herra orkustig. Kjarninn dettur síðan niður á grunnstigið og sendir frá sér gamma-skammt, sem unnt er að mæla.

Í næstu breytingu (4) gleypir kjarninn nifteindina, en við það myndast ný samsæta ${}^{(A+1)}_Z$, sem hefur sömu hleðslu (þ.e. sama efni), en er einni einingu þyngri. Dótturkjarninn er oftast á exiteruðu orkustigi og geislavirkur.

Í breytingum (5), (6) og (7) er ekki sýnd nein gammageislun. Til þess að skýra, hvernig þessar breytingar koma að gagni við espigreiningu, er rétt að líta á dæmi um (n,p) kjarnabreytingu.



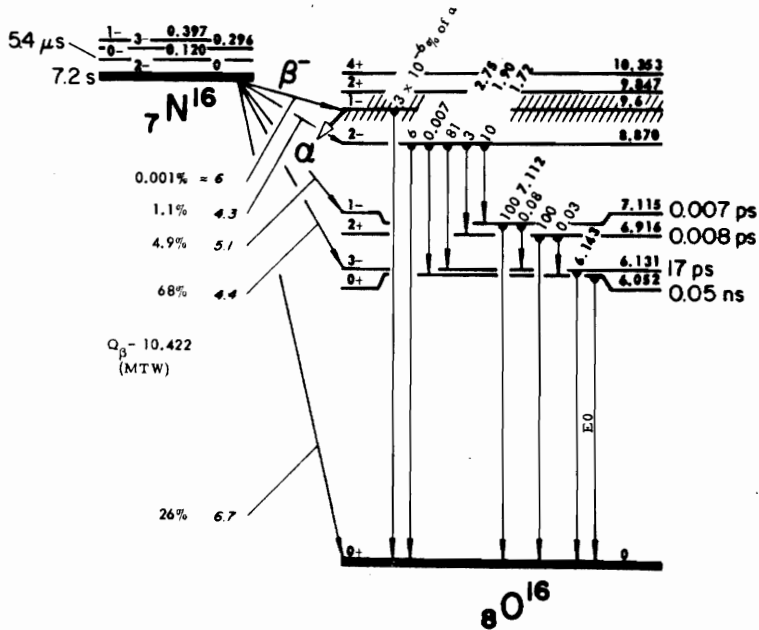
Þessi breyting er notuð við ákvörðun á súrefni. Við nifteindaskothríðina hefur samsæta af köfnunarefni ${}^{16}\text{N}$ myndast. Til glöggvunar er byrjunin á samsætukortinu sýnd á mynd 2.



Mynd 2

Byrjunin á samsætukorti.

Kjarninn ^{16}N er geislavirkur og klofnar með betageislun í ^{16}O , eins og sýnt er á mynd 3.



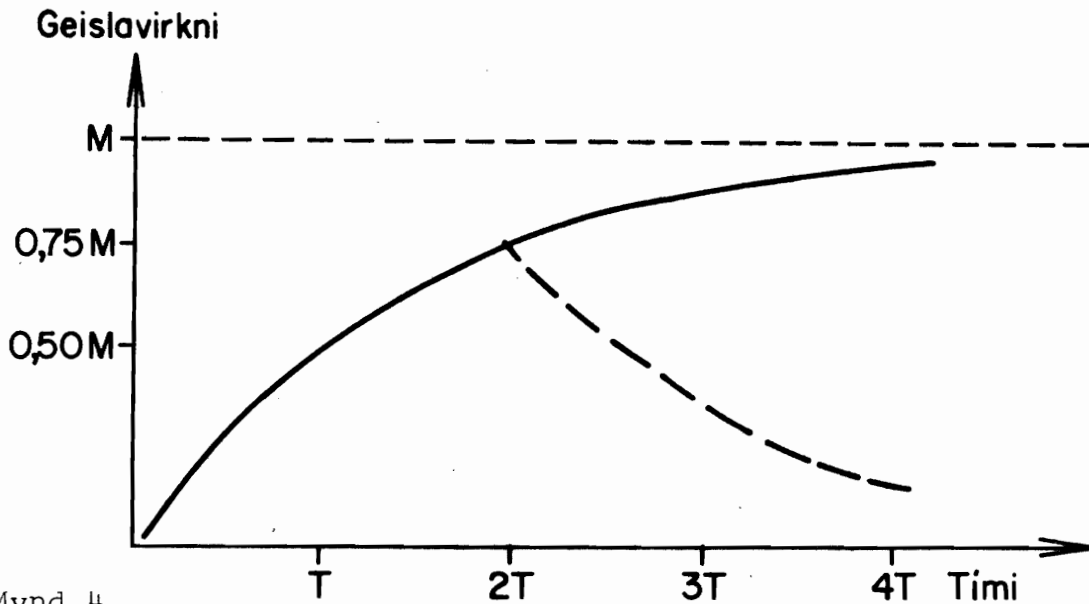
Mynd 3

Klofnun ^{16}N
í ^{16}O

Við þessa klofnun myndast í 68% af tilfellunum exiterað orkustig í dótturkjarnanum ^{16}O . Þetta orkustig er 6.143 MeV fyrir ofan grunnstigið. Með því að senda út 6.143 MeV gamma skammta, kemst kjarninn í ró á grunnstiginu. Súr-efnismagnið í sýninu er ákveðið með því að telja þessa 6.143 MeV gammaskammta.

Rétt er að benda á í þessu sambandi, að helmingunartími ^{16}N er 7.2 sek. Það hefur í för með sér, að talning gammaskammtanna verður að fara fram samstundis eftir espum. Helmingunartími hinnar geislavirku samsætu skiptir einnig máli í sambandi við espunartímann. en er þó viss takmörk sett. Þar sem geislavirkunin er í beinu hlutfalli við

fjölda geislavirkra kjarna kemur að því, að jafnmargir kjarnar klofna á tímaeiningu, eins og það myndast margir á tímaeiningu. Þá er metnun náð. Á mynd 4 er sýnt, hvernig geislavirkunin eykst með espunartímanum. Helmingur þeirrar geislavirkni, sem unnt er að fá, fæst eftir tímann.



Mynd 4.

Heildregni ferillinn sýnir samband milli metnunargildis M og helmingunartíma geislavirka kjarnans T . Ef espitími er $2T$ sýnir brotni ferillinn, hvernig geislavirkni minnkar eftir að espun lýkur.

T , þar sem T táknar helmingunartíma geislavirka kjarnans. Eftir tvo helmingunartíma ($2T$), er búið að ná 75% af metnunargildinu. Lítið er unnið við að espa lengur en $2-3 T$. Brotni ferillinn á mynd 4 sýnir, hvernig geislavirknin minnkar sem fall af tíma, ef espun er hætt eftir tvo helmingunartíma ($2T$). Í dæminu hér að framan um súrefnisgreiningu, væri 15-20 sek hæfilegur espunartími. Þegar mörg efni eru greind samtímis, er espunartími valinn eftir lengsta helmingunartímanum.

Líkurnar fyrir því, að nifteindir komi af stað vissri kjarnabreytingu eru kallaðar þversnið (cross section) kjarnabreytingar og er táknað σ . Þessar líkur eru misstórar, og yfirleitt nægir að skoða þá breytingu, sem framleiðir mesta gammageislun. Þversnið eru mælanleg og eru til töflur um slíkt.

Til espigreiningar sýnis þarf eftirfarandi:

- 1) Tæki, sem framleiðir nifteindir.
- 2) Tæki, sem greinir orku og magn gammageisla.
- 3) Þekking á þeim kjarnabreytingum, sem fara fram.

Í næstu þrem köflum verður fjallað nánar um þessi atriði.

3. FRAMLEIÐSLA NIFTEINDA

Lausar nifteindir má fá á þrennan hátt, þ.e. frá náttúrulegum nifteindalindum, nifteindavökum og úr kjarnaofnum. Greint verður frá hverri aðferð fyrir sig.

3.1 Nifteindalindir

Einfaldasta aðferðin við framleiðslu nifteinda er að nota eitthvert geislavirkt efni, sem sendir út nifteindir. Slík efni eða efnablöndur eru hér kallaðar nifteindalindir. Aðalgallinn við slíkar lindir er sá, að nifteindaflæðið er tiltölulega lítið.

Algengast er að nota nifteindalindir, þar sem kjarnabreytingin



fer fram. Geislavirku efni, sem sendir frá sé α -agnir, er blandað saman við berylliun. Oft er ${}^{241}\text{Am}$ með helm-ingunartímann 458 ár notað sem alfavaki. Með slíkri lind

má fá ca. 10^7 n/s, en nýtanlegt flæði er varla meira en ca. $10^5 - 10^6$ n · cm⁻² · s⁻¹. Með því að nota blöndu af ²⁴¹Am og ²⁴²Cm (ABC-lind) má fá flæði um 10^8 n · cm⁻² · s⁻¹.

Fyrir ca. tveim árum kom á markaðinn ný nifteindalind ²⁵²Cf. Þessi samsæta af califorminu klofnar sumpart sem fission, og myndast þá margar nifteindir. Kostur við þessa lind er, að henni má þjappa meir saman en hinum lindunum. Reikna má með, að hægt sé að fá 10^9 n · cm⁻² · s⁻¹ nothæft nifteindaflæði frá ²⁵²Cf - e.t.v. meira.

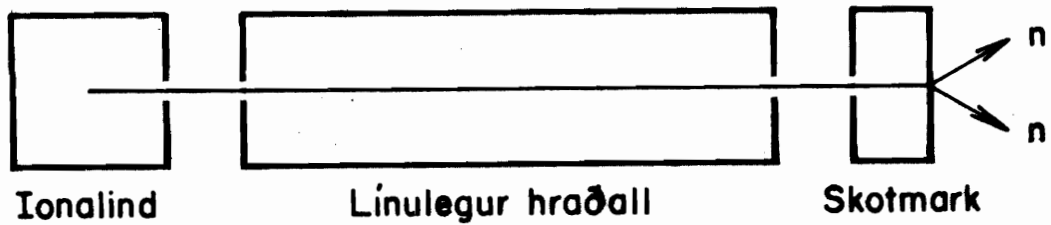
Allar nifteindalindir senda út mikla gammageislun auk nifteinda. Helstu eiginleikar ofangreindra nifteindalinda eru:

Lind	T _{1/2} ár	Orka MeV	Flæði n · cm ⁻² · s ⁻¹
AmBe	458	4.5	10 ⁵
AmBeCm	0.44	5	10 ⁸
²⁵² Cf	2.6	2.3	10 ⁹

Lindirnar eru fyrirferðalitlar. Þær gefa tiltölulega lítið flæði og eru alltaf virkar. Yfirleitt lítill stofnkostnaður.

3.2 Nifteindavakar

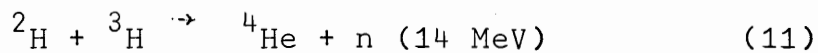
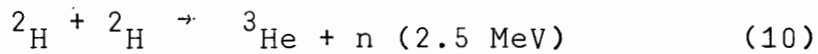
Nifteindavaki er þýðing á enska orðinu neutrongenerator. Þessi tæki framleiða meira nifteindaflæði en nifteindalindir og eru dýrari en þær. Hins vegar eru vakar mun ódýrari en kjarnaofnar. Nifteindavakar verða því flokkaðir sem millistærð, bæði hvað varðar framleiðslugetu og verð. Á mynd 5 eru sýndar aðaleiningar nifteindavaka.



Mynd 5.

Einfölduð mynd af nifteindavaka.

Yfirleitt eru notaðar (d,n) kjarnabreytingar í nifteindavökum.



Í fyrri kjarnabreytingunni myndast 2.5 MeV nifteindir, þegar tvívetni, er skotið á tvívetni. Í seinni breytingunni (11) myndast nifteindir með 14 MeV hreyfiorku, þegar tvívetni er skotið á þrívetni. Til þess að koma af stað kjarnabreytingunum (10) og (11), þarf litla hreyfiorku skotagnanna (d). Vanaleg spenna í nifteindavökum er 100-400 kV.

Kjarnabreyting (11) er mjög heppileg við nifteindaframleiðslu. Ókostur hennar er að nota verður þrívætti í skotmark. En þrívætti er óþverri (betageislun, $T 1/2 = 12$ ár). Til þess að minnka þrívættishættuna er nú farið að framleiða nifteindavaka í einni þétttri einingu (sealed tube). Þessi eining er að mörgu leyti áþekk röntgenlampa. Enn sem komið er, er lífslengd nifteindalampa aðeins nokkur hundruð vinnustundir, en kostirnir við að nota þéttar einingar eru miklir, bæði frá heilsufarslegu og framkvæmdarlegu sjónarmiði. Hraðlar hafa ekki verið reknir hérlandis ennþá, og eru því vakar með þéttum nifteindalampa heppilegastir fyrir íslenskar aðstæður.

Í stuttu máli:

Nifteindavakar eru meðalstór tæki og framleiða í meðal-lagi stórt nifteindaflæði. Frá tækni-, öryggis- og fjárhagslegu sjónarmiði ætti að vera hægt að reka slíkt tæki á Íslandi.

3.3 Kjarnaofnar

Kjarnaofnar (reactor) eru notaðir til orkuframleiðslu og við rannsóknir - einkum í kjarneðlisfræði. Orkumálum Íslendinga, svo og rannsóknastarfsemi er þannig háttað, að varla er við því að búast, að reistur verði hér kjarnaofn í náninni framtíð. Er því ekki ástæða til að fjalla neitt að ráði um kjarnaofna.

Þess skal einungis getið, að inni í kjarnaherðinum er mikið nifteindaflæði, $10^{13} - 10^{15} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Þetta eru því öflugustu nifteindagjafir, sem völ er á. Nifteindir í vanalegum kjarnaofni eru termiskar 0.025 eV. Öryggisráðstafanir við rekstur kjarnaofna eru af annarri stærðargráðu en tíðkast hér á landi.

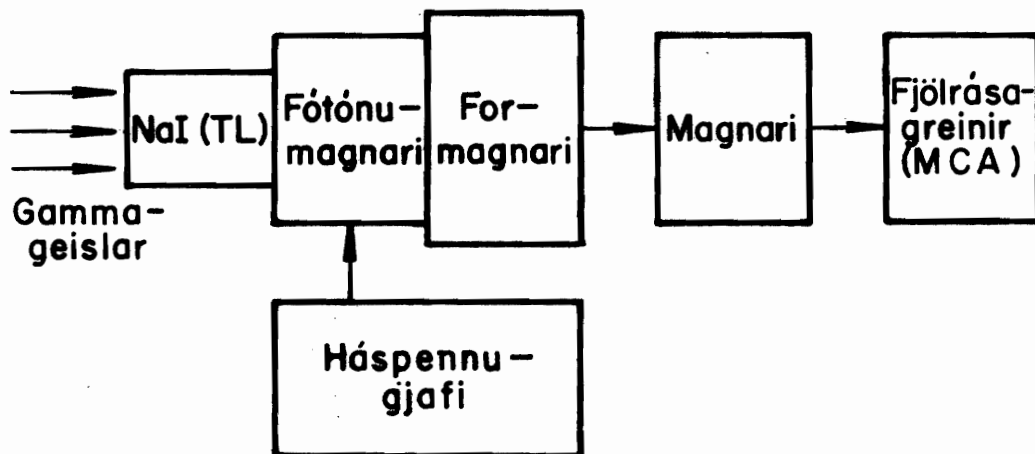
4. GAMMANEMAR

Þau tæki, sem eru næm fyrir gammageislun, eru kölluð gammanemar (detektor). Hér verður greint frá NaI (Tl), sindurnema og Ge(Li) torleiðninema.

4.1 NaI(Tl) sindurnemi

Aðaleiningar í greiningaætki með NaI (Tl) sindurnema eru sýndar á mynd 6.

Gammageislunin ioniserar atómin í NaI(Tl) kristalnum. Ljós myndast og fer inn í fótómagnara. Þaðan kemur straumeða spennupúls. Stærð púlsanna er í réttu hlutfalli við

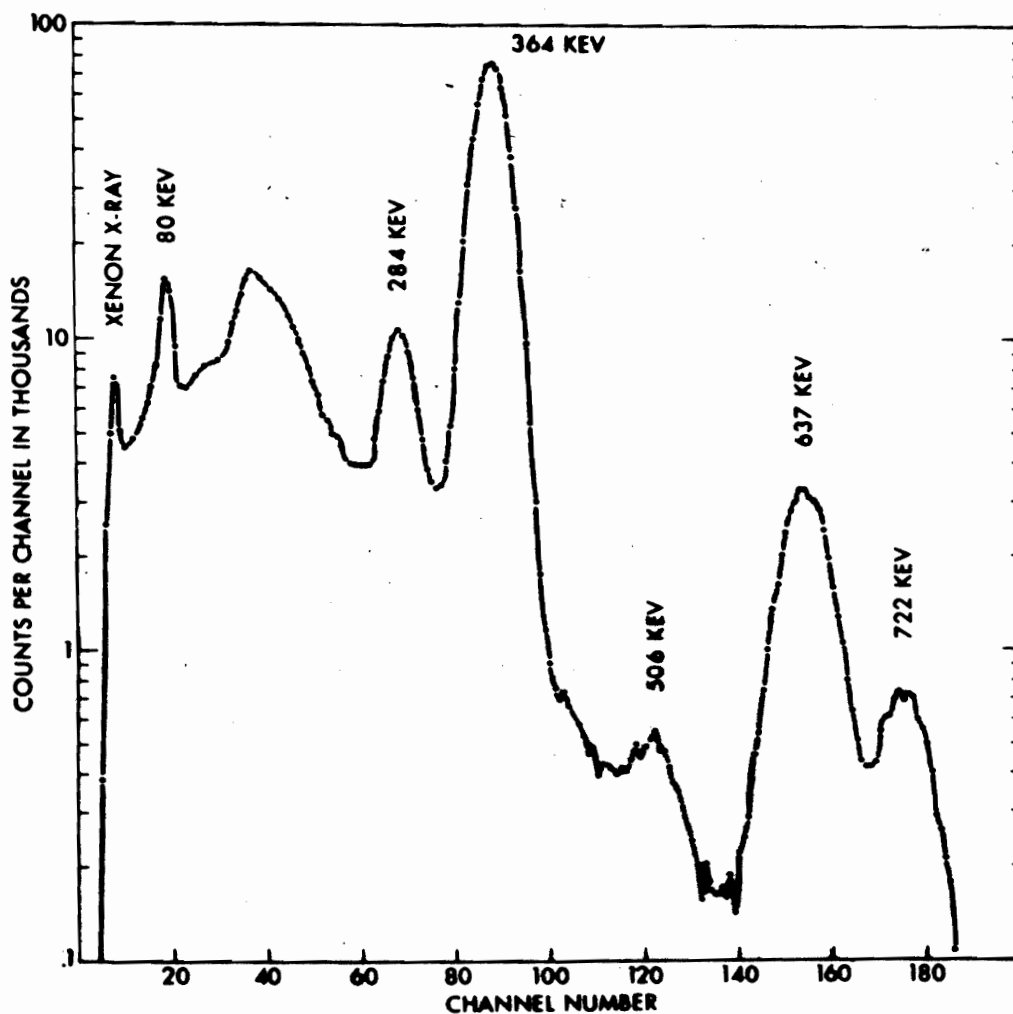


Mynd 6.

Greiningatæki með NaI (Tl) sindurnema.

orku gammageislunarinnar. Með því að magna upp þessa púlsa í formagnara og magnara, má greina stærð og fjölda púlssanna í fjölrásagreini (multichannelanalyzer, MCA). Við fáum þannig fram orkuróf gammageislunarinnar. Á mynd 7 er sýnt gammaspektrum frá ^{131}I tekið með NaI(Tl) nema.

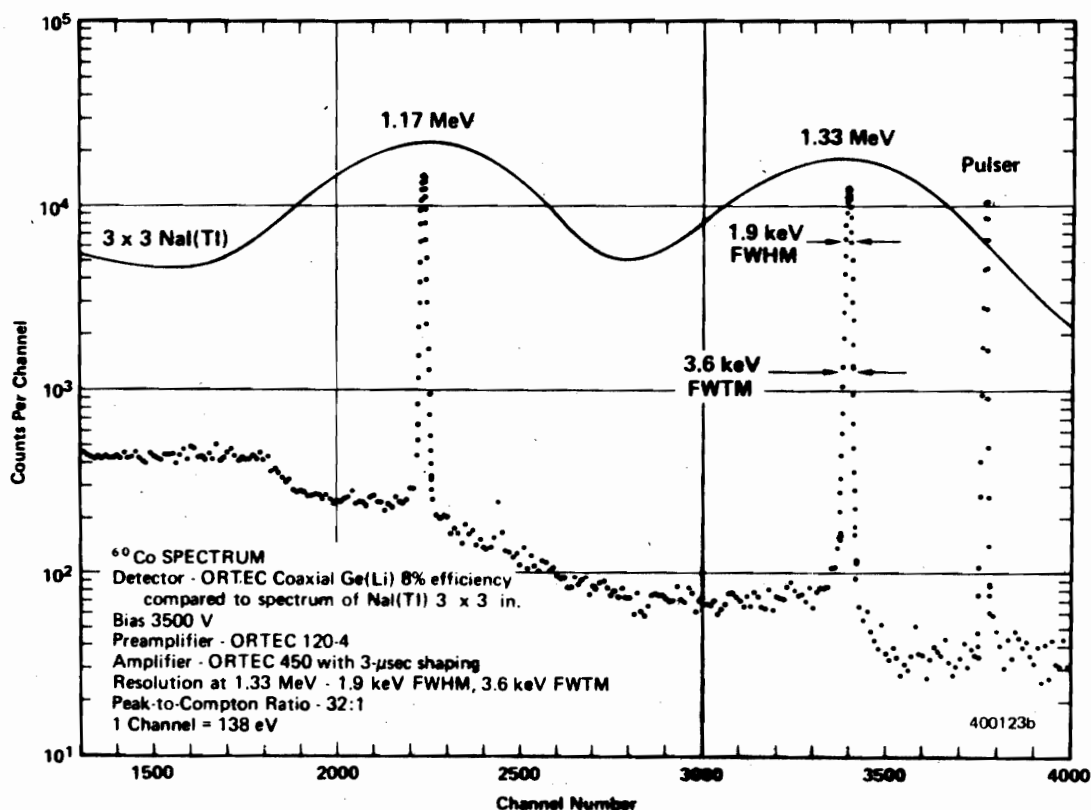
Mynd 7



Bæði nýtni (effektivitet) og orkuupplausn NaI (Tl) kristals eru háð gammaorkunni. Reikna má með, að nýtnin sé 10-20%, en orkuupplausn 5-15%. Með NaI(Tl) nemum þarf fjölrásagreini með nokkur hundruð rásum.

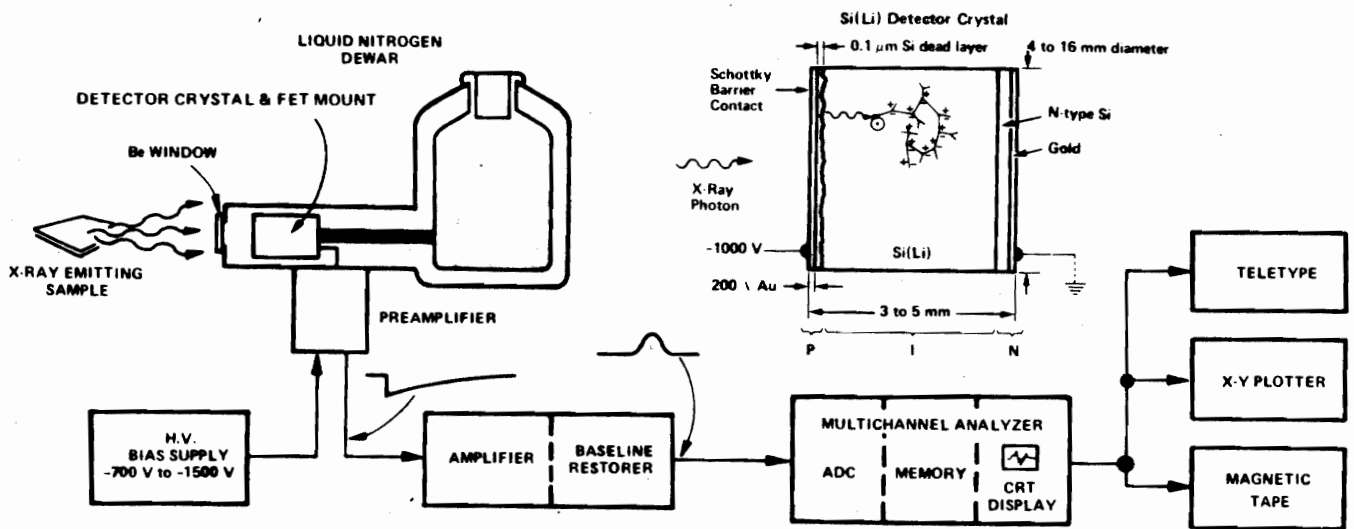
4.2 Ge(Li) torleiðninemar

Torleiðninemar skila orkurófi á svipaðan hátt og sindurnemar. Aðalmunurinn liggur í því, að orkuupplausn Ge(Li) nema er stærðargráða betri en hjá NaI(Tl) nemum. Sést þessi munur vel á mynd 8.



Mynd 8. ⁶⁰Co Spectrum Showing Resolutions and Peak-to-Compton Ratios for Custom Series Detector and NaI(Tl) Detector.

Helstu einingar í torleiðninema eru sýndar á mynd 9. Sú mynd er að vísu gerð fyrir Si(Li) nema, sem er næmur fyrir röntgengæslun, en uppbygging kerfisins er alveg eins fyrir Ge(Li) nema.



Mynd 9.

Helstu einingar í torleiðnigreiningartæki.

Í torleiðnikristalnum er svolítið af litium á vissum stöðum. Til þess að Li-atómin haldist kyrr, er nauðsynlegt, að kristalnum sé ávallt haldið við mjög lágt hitastig. Kristallinn er kældur með fljótandi köfnunarefni, og má aldrei hitna, því að þá verður hann ónýtur.

Orkuupplausn Ge(Li) nema, sem vinnur á sviðinu 100 keV - 2 MeV er um 2 keV, eða 0.1-2%. Er það stærðargráðu betra en hjá NaI(Tl) sindurnema. Hins vegar er nýtni torleiðni-nema um stærðargráðu minni en fyrir NaI(Tl) nema. Við torleiðninema þarf fjölrásagreini með nokkur þúsund rásam.

5. GREINING

Markmið espigreiningar er að ákvarða, hve mörg atóm ákveðinnar samsætu eru í sýninu. Þessi fjöldi er kallaður N . Skotið er nifteindum á sýni í ákveðinn tíma, t_i . Geislavirkni sýnisins A_c má þá tákna með jöfnunni:

$$A_c = N \cdot \phi \cdot \sigma \cdot (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (12)$$

ϕ = nifteindaflæði

σ = þversnið

λ = klofnunarstuðull

Geislavirknin A_c eða viss hluti af henni er mæld með gammanema. Nifteindaflæði ϕ er ákvarðað óbeint, með því að espá þekkt efni samtímis sýninu. Þversnið og klofnunarstuðull eru yfirleitt vel þekktar stærðir og eru til í töflum. Af þessu sést, að það er einfalt samband milli fjölda þeirra púlsa, sem taldir eru í fjölrásagreininum og magn þeirrar samsætu, sem verið er að athuga. Þær hjálparstærðir, sem notast er við, eru annaðhvort auðmældar, eða vel þekktar frá kjarneðlisfræði.

6. NOT ESPIGREININGAR

Hér verður lítillega dregið á, hvernig espigreining hefur verið notuð. Búast má við, að notkunarsvið espigreiningar sé mun víðáttumeira en hér verður upp talið. Einkum verður tekið til meðferðar espigreining, þar sem 14 MeV nifteindir eru notaðar við espun, en eins og fram kemur síðar, virðast slíkar tækjasamstæður heppilegastar fyrir íslenskar aðstæður. Rétt er þá að geta þess í byrjun, að algengast er að nota kjarnaofna við espun. Oft er stefnt að því að ákvarða sem flest efni í sýni. Er sýnið þá espáð nokkrum sinnum í mismunandi langan tíma eftir því hvaða efni á að ákvarða. Sem dæmi um slíka aðferð má

nefna aðferð, sem lýst er í heimild { 2} en þar er sýnt fram á, að unnt er að ákvarða 37 efni í tunglgrjóti með því að espa sýnin sjö sinnum í kjarnaofni. Efnin eru:

Með 1-2% nákvæmni-

Na, Al, Si, Cr, Mn, Fe, La

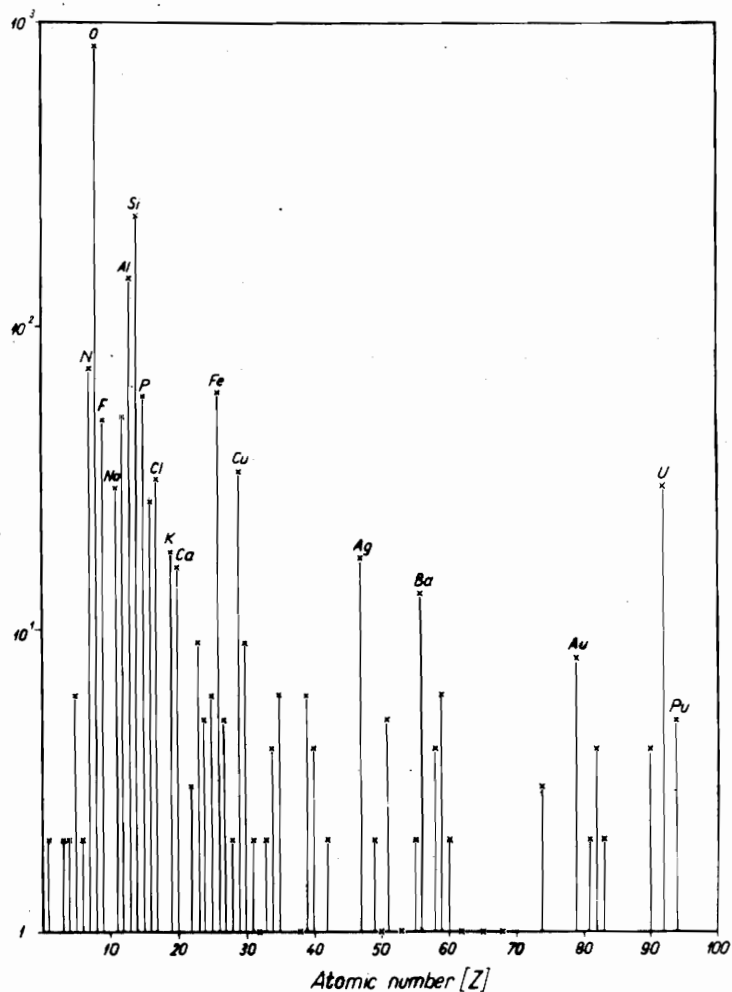
með 2-5% nákvæmni-

K, Ti, Co, Cu, Ga, Se, Cs, Sm, Eu, Tb, Dy, Yb, Lu, Hf, Ta, Th, U

með 5-10% nákvæmni-

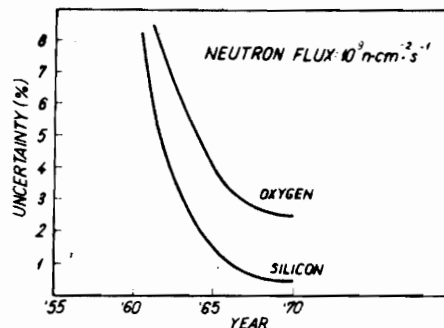
Cl, Ca, V, Zn, Rb, Ag, In, Ba, Ce, Ho, Er, W, Au

Espigreining með 14 MeV nifteindum er í framför. Sem dæmi má nefna, að frá 1956 og fram til 1971 birtust 820 greinar um espigreiningu með 14 MeV nifteindum. Á mynd 10 er sýnt, hvernig greiningin skiptist á frumefni.



Mynd 10 Frequency of 14-MeV NAA determinations for various elements.

Áreiðanleiki espigreiningar hefur einnig batnað á síðustu árum, og sýnir mynd 11, hvernig þróunin hefur verið fyrri súrefni og kísil.



Improvement in reliability of 14 MeV N.F.

Mynd 11

Súrefni og kísill eru þau efni, sem auðveldast virðist að greina með 14 MeV espigreiningu. Af mynd 10 má auk þess álykta, að tiltölulega auðvelt sé að greina:

N, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Fe, Cu, Ag, Ba, Cl

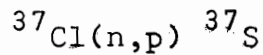
6.1 Málmiðnaður

Notkun espigreiningar við ákvörðun á súrefni í málmum, einkum þó í stáli, er nú allvel þróuð mæliaðferð og er víða notuð. Munu aðrar efnagreiningaaðferðir vera erfiðar, þar sem súrefnismagn er lítið í stáli.

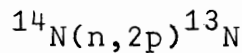
Kísill í málmum er einnig ákvarðaður með espigreiningu. Er talið, að næmnismörk séu 0.02-0.05%. Nákvæmnin er um 5%.

6.2 Efnafraði

Í ljósmyndaiðnaði hefur espigreining verið notuð til ákvörðunar á klórinnihaldi ljósmyndafilma. Er þá notuð kjarnabreytingin

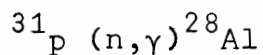
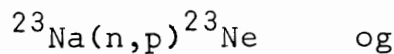


Í sprengjuiðnaði er köfnunarefni í sprengjuefni ákvarðað með



kjarnabreytingu. Nákvæmnin er 0.1%.

Í lífrænum samböndum hefur espigreining verið notuð við ákvörðun á Na og P. Eru þá breytingarnar



notaðar. Næmnin er $6 \cdot 10^{-4}$ g fyrir Na og $4 \cdot 10^{-5}$ fyrir P.

Síespigreining er þýðing á "continuous neutron activation analysis". Sú aðferð hefur mikla þýðingu í efnaiðnaði. Á mynd 12 er sýnd tafla um takmarkanir þessarar aðferðar.

TABLE III. DETECTION LIMIT FOR CNA

Limit (ng/litre)	Elements	
	Thermal neutrons	Fast neutrons
below 1	Sc, In, Eu, Rh, Mn, Dy, Hf, Sm, Ag, V, I, Br, Ho, Lu, Au	P, Pr, Br, Sb
1 - 10	W, Se, Co, Cu	Ce, Si, Cu, Cr, Zr
10 - 100	Y, Ga, Al, Cl	F
100-1000	Ce, Pd, Ir, Te, Yb, As, Mg, Ba, Re, Nb, La	I, Mg, Mn, Zn, Cl, Na, Ge, Ir, Ag, V

6.3 Líffræði

Í lífrænum samböndum hafa m.a. efnin O, N, Na, Mg, Si, P, S, Cl, K, Ca og Ti verið ákvörðuð með espigreiningu. Espigreining á eggjahvítuæfnum og aminosýrum kemur vel heim við aðrar greiningaaðferðir. Reynt hefur verið að ákvarða magn Ca, Na, Cl, N og P í mannlíkama með nifteindaespun, en því fylgir allmikil geislunarhætta. Tekist hefur þó að ákvarða heildarmagn kalsium í mannlíkama með því að nota aðeins 0.001 rad við espunina.

Unnt er að nota stutta nifteindapúlsta til að espa blóð og fylgjast síðan með, hvernig blóðið streymir um líffærin. Er þá notuð gammageislun frá geislavirkni ^{16}N .

Í plöntum hafa O, N, K, Cl, Ca, Fe, Ca, Zn, V, Mn, Mo og Co verið ákvörðuð með espigreiningu.

Í umhverfisvísindum er nú farið að nota espigreiningu, til dæmis er ákvarðað magn F og Si í ryki og Br í vatni. Einkum virðist heppilegt að nota espigreiningu við ákvörðun á Si í lofti. Greiningartíminn er 5 mín. og eftir 30 mín. söfnunartíma má greina allt niður í 5 mg Si/m^3 .

6.4 Jarðvísindi

Flest aðalefni jarðar, nema Ca, má greina með espigreiningu. Þannig er unnt að greina O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti og Fe. Sýnishorn frá tunglinu hafa gjarnan verið greind með espigreiningu, og stafar það eflaust af því að um lítið efnismagn er að ræða.

Espigreining niðri í borholum er skammt á veg komin, en búast má við byltingu á því sviði, þegar farið verður að senda torleiðninema niður í borholur. Nú er espigreining aðeins notuð við leit að þauxíti, manganíti og kopar.

Notkun nifteinda við að greina milli vatns og olíu í borholum hefur gefist vel. Er þá athugað, hversu langan tíma nifteindirnar lifa í berginu, en eiginleg espigreining er ekki notuð. Tekist hefur að fá svörun frá Si, Ca, Cl, H, Mg, C, O, Fe og S niðri í borholu, en ennþá virðist ekki vera nægilega góð kvörðun fyrir hendi, svo að unnt sé að ákvarða magn efnanna.

Vatnsmagn í bergi og jarðvegi má ákvarða með því að mæla þann tíma, sem það tekur fyrir nifteindir að verða termískar. Hér er um að ræða sams konar mæliaðferð og að greina vatn frá olíu í borholum.

6.5 Önnur notkunarvið

Hina tvo meginþætti espigreiningastöðvar, nifteindagjafa (lind eða vaka) og greiningartæki má auðvitað nota hvorn í sínu lagi. Þannig mætti eflaust nota nifteindagjafann við framleiðslu á geislavirkum efnum, sem notuð eru í lækisfræði og líffræði. Þá má einnig hugsa sér að nota nifteindagjafann beint við geislalækningar (radiotherapy), en notkun nifteinda í stað rafeinda eða röntgengeisla getur haft vissa kosti við krabbameinsaðgerðir. Nægileg reynsla á þessu sviði virðist þó ekki vera fengin.

Þá má geta þess, að espigreiningastöð má auðveldlega nota sem kennslutæki í kjarneðlisfræði, og jafnvel mætti nota slíka rækjasamstæðu til takmarkaðra rannsókna í kjarneðlisfræði.

Að lokum skal bent á töflu, er birt er hér sem viðauki. Er þar sýnt, hvaða næmni megri búast við í espigreiningu með 14 MeV nifteindum.

7. ESPIGREINING Á ÍSLANDI

Til þess að athuga nánar, hvort fjárhagslegur grundvöllur væri fyrir hendi til að koma hér upp stöð til espigreininga, hefur lítils háttar verið athugað framboð og verð á tækjum til þessara hluta. Þessa athugun ber ekki að taka sem markaðskönnun, heldur er ætlunin aðeins að fá fram stærðargráðu stofnkostnaðar.

Þeir þættir, sem athugaðir hafa verið, eru nifteindalindir, nifteindavakar og greinitæki, bæði með NaI(Tl) nema og Ge(Li) nema.

Í ljós kom, að eina nifteindalindin, sem gefur nægilegt nifteindaflæði, er ^{252}Cf . Til þess að fá ca. $10^9 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ þarf að minnsta kosti 5 mg af ^{252}Cf . Söluverð á því magni er núna 50.000 \$, en árlegur endurnýjunarkostnaður um 12.000 \$.

Nifteindavaka, sem framleiðir allt að $10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$, má fá frá Kaman Nuclear. Það er tæki með þéttan kjarna, en lífslengd lampans allt að hálfri framleiðslugetu er 100 vinnustundir. Slíkt tæki kostaði í maí 1974 19.500 \$. Aukalampi kostar 4.950 \$, svo að stofnkostnaður er um 25.000 \$. Endurnýjun lampa kostar 2.090 \$.

Greiningartæki með NaI (Tl) eða Ge(Li) gammanema má fá frá mörgum framleiðendum. Reikna má með, að fullkomin tækjasamstæða með NaI (Tl) nema og 400 rása fjölrásagreini kosti um 10.000-12.000 \$, en greinitæki með Ge(Li) nema og 4000 rása greinitæki kosti nálægt 30.000 \$. Þar sem dýrustu tækin í þessum samstæðum eru fjölrásagreininir og torleiðninemi, kostar tækjasamstæða, sem hefur bæði NaI(Tl) nema og Ge(Li) nema auk 4000 rása greini einnig um 30.000 \$.

Af ofanskráðu má sjá, að stofnkostnaður við stöð nifteindavaka og fullkominna greinitækja er um 55.000 \$, en ef notað yrði ^{252}Cf , væri stofnkostnaðarins 50.000 + 30.000 = 80.000 \$. Það er háð tollum og öðru, hversu mikið þessi tæki kosta hingað komin. En ef gert er ráð fyrir, að 1 \$ = 150 kr, verða stofnkostnaðartölur annars vegar 8.25 Mkr og hins vegar 12 Mkr.

Hvort sem notaður er nifteindavaki eða ^{252}Cf , má búast við, að gera þurfi sérstaka innréttingu til þess að forðast geislavirkni. Er sá kostnaður við húsnæði lauslega áætlaður 2 Mkr.

Möguleiki væri e.t.v. að koma hér upp einungis greinitækjum, en láta framkvæma espun í erlendum kjarnaofnum. Yrði stofnkostnaður þá aðeins 30.000 \$, eða nálægt 4.5 Mkr. Þessi lausn byggist þá á því, að unnt sé að fá espun framkvæmda á mjög niðursettu verði. Espun hvers sýnis í $10^{13} \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ flæði kostar á almennum markaði um 5.000-15.000 kr.

Reksturskostnaður yrði því fljótlega allmikill. Auk þess væri á þennan hátt aðeins hægt að greina samsætur með helmingunartíma, sem er meiri en nokkrir dagar.

Meginkostnaður við rekstur espigreiningastöðvar er viðhald nifteindagjafans og launakostnaður. Ef reiknað er með 500 stunda vinnutíma nifteindavaka, verður endurnýjunarkostnaður $5 \times 2100 = 10500$ \$, eða nálægt 1.6 Mkr á ári, en endurnýjunarkostnaður ^{252}Cf er um 12.000 \$, eða um 1.8 Mkr á ári.

Af öryggisástæðum verður að ráða fast starfslið við stöðina, og verður það að hafa mjög haldgóða þekkingu á geislavirkni. Þetta hefur í för með sér, að búast má við a.m.k. 2 Mkr í launakostnað á ári.

Ef tekið er tillit til annars kostnaðar við rekstur, má búast við, að reksturskostnaður stöðvarinnar verði 5-6 Mkr.

8. LOKAORÐ

Hér hefur nokkuð verið greint frá, hvað espigreining er, hvernig nota má þá aðferð og hver kostnaður er við að koma upp slíkri stöð hérlendis. Er þar gert ráð fyrir, að stofnkostnaður sé 10-15 Mkr, en árlegur reksturskostnaður 5-6 Mkr. Þess ber þó að geta, að valin hefur verið sérstök stærð stöðvar og möguleikar eru á bæði dýrari og ódýrari leiðum. Ekki hefur verið reynt að ákveða, hvaða stærð væri hentugust fyrir íslenskar aðstæður.

Mörg rök benda til, að það sé skynsamlegt að stefna að því að koma hér upp espigreiningastöð. Það verður þó hverju sinni að meta kosti og galla við fjárfestingar, sem þessa. Þessi greinargerð ætti að geta komið að gagni við slíka ákvörðun.

HEIMILDIR

1. Sam, S. Nargolwalla and Edwin P. Przybylowicz:
Activation Analysis with Neutron Generators,
John Wiley and Sons, N.Y. 1973.
2. Eiliv Steinnes: Some Neutron Activation Methods for
the Determination of Minor and Trace Elements in
Rocks, Institutt for atomenergi. Keller 1972.
3. D.E. Wood: Industrial Applications of Activation
Analysis with 14 MeV Neutrons, Nucl. Instr. and
Meth 92 (1971) 511.
4. Californium - 252 Progress number 16 Dec. 1973 and
number 17 May 1974.
5. C. Michael Lederer, Jack M. Hollander and Isadore
Perlman: Table of Isotopes, John Wiley and Sons,
N.Y. 1967.
6. Enrico Fermi: Nuclear Physics, The University of
Chicago Press 1960.
7. J. Csikai: Use of Small Neutron Generators in Science
and Technology, Atomic Energy Review, vol. 11
p. 415, 1973.

VIÐAUKI

Næmni espigreiningu, þegar notaðar eru 14 MeV nifteindir, er sýnd í meðfylgjandi töflu. Í fyrsta dálk er efnið, þá aðalkjarnabreyting; síðan er helmingunartími dótturkjarna gefinn í mínútum. Orka aðalgammageislunar í MeV er gefin í fjórða dálk, en næmnin, sem yfirleitt er gefin í μg , er gefin í fimmta dálki. Næmnin er yfirleitt miðuð við $5 \cdot 10^8 - 10^9 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Taflan er unnin upp úr heimild (1).

Efni	Kjarnabreyting	T 1/2 (min)	Gamma (MeV)	Næmni
Al	$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	9.5	0.84	140 μg
-	-	-	-	2 μg
Sb	$^{121}\text{Sb}(n,2n)^{120}\text{Sb}$	15.9	0.51	0.17 mg
-	-	-	-	18 μg
As	$^{75}\text{As}(n,p)^{75}\text{mGe}$	0.82	0.14	1-5 mg
Ba	$^{138}\text{Ba}(n,2n)^{137\text{m}}\text{Ba}$	2.55	0.66	150 μg
-	- " -	-	-	27 μg
Br	$^{79}\text{Br}(n,2n)^{78}\text{Br}$	6.5	0.51	50 μg
Ce	$^{140}\text{Ce}(n,2n)^{139}\text{mCe}$	0.92	0.75	10 μg
-	-	-	-	70 μg
Cs	$^{133}\text{Cs}(n,2n)^{132}\text{Cs}$	9360	0.67	8.5 mg
Cl	$^{37}\text{Cl}(n,p)^{37}\text{S}$	5.06	3.09	100 μg
-	-	-	-	10 μg
Cr	$^{52}\text{Cr}(n,p)^{52}\text{V}$	3.76	1.43	8 ppm
-	-	-	-	300 μg
Co	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$	154.6	{0.85} {1.81}	4.3 mg
Cu	$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$	9.8	{2.11} 0.51	10 μg

Efni	Kjarnabreyting	T 1/2 (min)	Gamma (MeV)	Næmni
Cu	$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$	9.8	0.51	25 ppm
-	-	-	-	6 μg
Dy	$^{164}\text{Dy}(n,\gamma)^{154}\text{mDy}$	1.26	0.11	0.1 mg
Eu	$^{153}\text{Eu}(n,2n)^{152}\text{mEu}$	96	0.09	2.9 mg
F	$^{19}\text{F}(n,p)^{19}\text{O}$	0.48	0.20	1 ppm \pm 10%
Gd	$^{160}\text{Gd}(n,2n)^{159}\text{Gd}$	1080	0.36	14 mg
Ga	$^{69}\text{Ga}(n,2n)^{68}\text{Ga}$	68.3	0.51	0.18 mg
-	-	-	-	8 μg
Ge	$^{76}\text{Ge}(n,2n)^{75}\text{mGe}$	0.82	0.14	0.38 mg
Au	$^{197}\text{Au}(n,n,\gamma)^{197}\text{mAu}$	0.12	0.28	0.60 mg
Hf	$^{180}\text{Hf}(n,2n)^{179}\text{mHf}$	0.31	0.22	1 mg
In	$^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116}\text{mIn}$	54	0.406	0.3 mg
Ir	$^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{mIr}$	192	0.063	10 mg
Fe	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	154	0.84	1.3 mg
-	-	-	-	0.14 mg
-	-	-	-	100 μg
Pb	$^{208}\text{Pb}(n,2n)^{207}\text{mPb}$	0.01	{0.57} {1.06}	5 mg
-	-	-	-	3.3 mg
Lu	$^{175}\text{Lu}(n,\gamma)^{176}\text{mLu}$	222	0.09	7.5 mg
Mg	$^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$	900	1.37	1 mg
Mn	$^{55}\text{Mn}(n,\alpha)^{52}\text{V}$	3.76	1.43	0.49 mg
Hg	$^{200}\text{Hg}(n,2n)^{199}\text{mHg}$	43	0.16	0.46 mg
-	-	-	-	60 μg
Mo	$^{92}\text{Mo}(n,2n)^{91}\text{Mo}$	15.49	0.51	1.0 mg
-	-	-	-	0.13 mg
Nd	$^{142}\text{Nd}(n,2n)^{141}\text{mNd}$	0.92	0.76	320 μg
-	-	-	-	4 μg

Efni	Kjarnabreyting	T 1/2 (min)	Gamma (MeV)	Næmni
Ni	$^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$	2160	0.51	0.52 mg
Nb	$^{93}\text{Nb}(n,n,\alpha)^{89}\text{mY}$	0.27	0.91	18 mg
-	-	-	-	1.8 mg
N	$^{14}\text{N}(n,2n)^{13}\text{N}$	9.96	0.51	~ 1%
O	$^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$	0.12	6.13	1 ppm
Pd	$^{110}\text{Pd}(n,2n)^{109\text{m}}\text{Pd}$	4.8	0.19	0.4 mg
P	$^{31}\text{P}(n,\alpha)^{28}\text{Al}$	2.31	1.78	40 μg
-	-	-	-	10 ppm
K	$^{39}\text{K}(n,2n)^{38}\text{K}$	7.71	{0.51} {2.17}	3.4 mg
-	-	-	-	0.19 mg
Pr	$^{141}\text{Pr}(n,2n)^{140}\text{Pr}$	3.39	{0.51} {1.60}	150 μg
-	-	-	-	2 μg
Rb	$^{85}\text{Rb}(n,2n)^{84\text{m}}\text{Rb}$	20.0	{0.22} {0.25} {0.46}	0.12 mg 12 μg
Ru	$^{96}\text{Ru}(n,2n)^{95}\text{Ru}$	102	0.51	{
-	$^{101}\text{Ru}(n,p)^{101}\text{Tc}$	14	0.31	{1.4 mg
-	$^{104}\text{Ru}(n,p)^{104}\text{Tc}$	18	0.36	{
Sm	$^{144}\text{Sm}(n,2n)^{143}\text{Sm}$	8.9	0.51	2.1 mg
Se	$^{80}\text{Se}(n,2n)^{79\text{m}}\text{Se}$	3.9	0.10	{0.24 mg
-	$^{82}\text{Se}(n,2n)^{81\text{m}}\text{Se}$	0.95	0.10	{
Si	$^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al}$	2.3	1.78	0.07 mg
Ag	$^{107}\text{Ag}(n,2n)^{106}\text{Ag}$	24	0.51	0.08 mg
Na	$^{23}\text{Na}(n,\alpha)^{20}\text{F}$	0.19	1.63	0.5 mg
Sr	$^{86}\text{Sr}(n,p)^{86\text{m}}\text{Rb}$	1.04	0.56	1.8 mg
S	$^{34}\text{S}(n,p)^{34}\text{P}$	0.21	2.13	1 mg
Ta	$^{181}\text{Ta}(n,2n)^{180\text{m}}\text{Ta}$	486	0.09	0.48 mg
Tb	$^{159}\text{Tb}(n,2n)^{158\text{m}}\text{Tb}$	0.20	0.11	0.93 mg

Efni	Kjarnabreyting	T 1/2 (min)	Gamma (MeV)	Næmni	
Sn	$^{122}\text{Sn}(n,\gamma)^{123\text{m}}\text{Sn}$	40	0.160	0.69	mg
Ti	$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46\text{m}}\text{Sc}$	0.33	0.14	2.5	mg
W	$^{183}\text{W}(n,n)^{183\text{m}}\text{W}$	0.09	0.05	{	
-	$^{184}\text{W}(n,2n)^{183\text{m}}\text{W}$	0.09	0.05	{1.3	mg
V	$^{51}\text{V}(n,p)^{51}\text{Ti}$	5.8	{0.32} {0.01} {0.93}	0.14	mg
Y	$^{89}\text{Y}(n,n,\gamma)^{89\text{m}}\text{Y}$	0.27	0.91	0.58	mg
-	-	-	-	0.1	mg
Zr	$^{90}\text{Zr}(n,2n)^{89\text{m}}\text{Zr}$	4.18	0.51 0.91	0.25	mg