アイソトープの工業利用における最近の傾向

—第4回ジュネーブ会議提出論文からの話題[†]—

小 林 昌 敏

日本原子力研究所

はしがき

1971年9月9日から16日までの期間、ジュネーブにおいて第4回原子力平和利用国際会議が開催され、アイソトープ・放射線利用の関係でも各国から多数の論文が提出された。この関係のセッションとしてはつぎのようなものがあった。

G7 Nuclear methods of increasing food production

A12 Nuclear methods of increasing food production

C9 Medical applications: techniques and use in diagnosis, therapy and research, including dosimetric aspects

B15 Nuclear methods of reducing food losses

C10 Medical applications: techniques and use in diagnosis, therapy and research, including dosimetric aspects

C11 Industry: study, investigation and development of resources

C12 Industry: study, investigation and development of resources

A16 Special applications of nuclear energy

C15 Industry: study, investigation and development of resources

このうちアイソトープの工業利用にとくに関係の深い論文が提出されたのはC11, C12, C15およびA16の一部である。この資料では数多くの論文のなかから内容の充実したあるいは最近の大きな傾向を反映する特定の論文をいくつか選び、それらの概要について報告することにする。

とりあげた論文はつぎの11編である。

C11

P/840 USA

C12

P/634 France, P/646 Denmark, P/509 UK, P/769 UNESCO

A16

P/056 USA, P/487 UK, P/721 USSR

C15

P/637 France, P/464 USSR, P/123 Australia

セッションC11 インド, USA, 日本をはじめ世界各国ならびに MERRC (Middle Eastern Regional Radioisotope Center for Arab Countries) などにおけるアイソトープ・放射線利用について総説的な論文が提出された。

P/840 Recent advances in applications of isotopes and radiation in the United States; E.E. Fowler

1964年以来 USA におけるアイソトープの生産と利用は質、量ともに大きな発展をとげ、1964年アイソトープによる診断治療をうけた患者が約2,000,000人であったのに比し1970年には約4,000,000人に増加した。

医学の診断への応用では ^{67}Ga および ^{19}F の利用が有望視されている。より半減期の短いアイソトープの利用研究が新しい傾向となっているが、スプレーションを利用してできるアイソトープの有用性をしらべるための AEC の計画でブルックヘブンの200 MeV AG シンクロトロンに使われるライナックの余剰プロトンビームを利用して ^{88}Y , ^{67}Cu , ^{28}Mg , ^{52}Fe などを製造し供給する予定である。

[†] Recent Trends of Industrial Applications of Radioisotopes—Topics from Papers Presented at the 4th Geneva Conference—, Masatoshi KOBAYASHI: Radioisotope Center, Japan Atomic Energy Research Institute, Oharai-cho, Ibaraki Prefecture

^{241}Am からの 60 keV の γ 線により甲状腺の天然のヨウ素の蛍光 X 線を $\text{Si}(\text{Li})$ でうけ“可視像”にあらず方法では患者の被ばく線量がひじょうに低く (15 m rad), また腫瘍による Bi の摂取を ^{153}Gd で励起してモニターする方法も研究されている。

^{153}Gd (半減期 242 日) は ^{152}Gd の存在比が小さいために高価なアイソトープであるが、オークリッジ研究所の HIFR 原子炉の Eu 制御棒から得られる ^{153}Eu の β 壊変で生成する ^{153}Gd を回収すれば、制御棒 1 本について 80 g の ^{153}Gd が得られる。このアイソトープは 2 段放射により 100 keV および 50 keV の γ 線を放出するが、 γ 線吸収法で骨の中の Ca を測定したり、5 Ci の ^{153}Gd で透過撮影を行なうことも可能である。

アイソトープ熱源の利用ではペースメーカー電源の大部分は ^{238}Pu を用いているが、半減期 2.6 年の ^{147}Pm を利用するものでは頸部のわずかな手術で大動脈をとおして心臓内部にミニチュア装置を入れる方法や交換をすることが計画されている。 ^{238}Pu を用いる人工心臓の血液ポンプの開発研究も行なわれているが、ペースメーカーに用いる ^{238}Pu の量が 150~500 mg であるのに対して、血液ポンプでは 60~100 g が必要になるので問題が多い。内部被ばく線量を少なくするためには純度の高い ^{238}Pu を経済的に生産することが必要で、不純物の軽元素をとりのぞく電解法の研究が進められている。低い温度で用いられる熱源では ^{238}Pu に Ga のような物質を加えて安定化したもので十分であるが、600°C 程度で用いるものでは PuO_2 の形が必要になり、酸素に ^{18}O 以外の同位体があると (α, n) 反

応により中性子が放出されるので ^{16}O を濃縮しなければならない (表 1)。血液ポンプの植込みについては動物実験による熱除去の検討、ファントムや動物をつかった線量測定、医学用品位の“燃料”の製法などが研究されている。

アイソトープ・ゲージの分野で特筆されることは 1970 年の機器の売上げ高が 4,000 万ドルに達したこと、道路建設に関連して 1,000 台以上の中性子水分計が利用されているほか、 ^{85}Kr のクラスレートを用いた自動車排気の実験装置、励起 X 線分析による汚染物質の多元素同時分析、 ^{252}Cf 1.8 mg を用いた海底での V, Mn, In, Au, Ag などの資源の分析など新しい技術の開発が進んでいることである。新しい検出器として使用時だけ冷却を必要とする高純度 Ge 検出器、 ^{57}Co の 122 keV γ 線に対する FWHM 4 keV の CdTe 検出器なども研究されている。

セッション C12 UNESCO の招待論文をはじめ主として水文学 (hydrology) におけるトレーサー利用に関連した各国の論文が発表され、この分野がアイソトープ利用の重点の 1 つとして進展し、内容も充実していることが認められた。

P/634 Applications of stable and radioactive isotope in hydrology and sedimentology: E. Roth, L. Merlivat, G. Courtois, R. Cornuet, J. Guizerix, R. Margrita, J. Molinari (France).

漂砂の移動の測定では ^{46}Sc で標識したガラス砂が用いられてきたが、放射性ガラス砂は河泥のモデルとして不適当であり、また河泥を直接放射化しても十分な放射能が得られない。そこで河泥を ^{198}Au , ^{51}Cr , ^{46}Sc などの水溶液に浸漬して吸着させ、乾燥後高温で焼くことによって適当なトレーサーとして用いることができる。

漂砂に関係した放射線ゲージでは ^{133}Ba の γ 線の吸収を利用した漂砂コアの密度計、 ^{153}Eu の β 線の吸収を利用した微細な漂砂の密度計、 ^{241}Am の β 線の吸収を利用した濁度計などが開発されてきた。

水文学の分野では水中に含まれる安定同位体 ^2H , ^{18}O および核爆発でできた放射性同位体 ^3H などの濃度を測定し、水の循環系における移動速度を推定する方法が広く応用されている。IAEA で定められた SMOW (Standard Mean Ocean Water) では同位体濃度 δ は次式であらわされる。

$$\delta = \left[\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 1000$$

表 1 熱出力 30 ワットの金属線源および酸化物線源の性質の比較¹⁾

	Pu-238-3- 原子% Ga	Pu(238) O_2 (16)
出力 (ワット)	30.3	30.1
燃料出力密度 (W(t)/cc)	7.18	4.07
Pu 円筒の寸法 直径 (in.)	0.72	0.85
高さ (in.)	0.63	0.80
中性子放出率 (n/sec·g Pu)	2535	2750
距離 10 cm における線量率		
中性子 (m rem/h·g Pu)	0.25 ²⁾	0.28 ²⁾
γ 線 (mR/h·g Pu)	0.16 ²⁾	0.16 ³⁾

1) 80 at. % Pu-238, 1 ppm Pu-236

2) 厚さ 0.068 in. の Ta-10W および 0.025 in. の Hastelloy C-276 を隔てた空気中での線量率

3) 厚さ 0.030 in. の Ta を隔てた空気中での線量率

質量分析器による同位体濃度の測定精度は ^{18}O 0.2%, D 0.3%である。この方法の応用例としてマルセー近く Crau にある水のテーブルと地中海における海水—真水の境界を知るための調査、ダムへの漏水の同位体濃度がダム上部の水のそれと一致しておりダム下流数 km にある湧水と関係のないことの確認によるダム漏水の調査などの実験例をあげている。

人工トレーサーの利用では ^{82}Br , ^{131}I などの放射性トレーサー、化学トレーサー、ロダミンBの色素トレーサー、蛍光染料などを場合によって使い分けている。貯水池や運河などに関連した漏れを検出するのに従来は放射性溶液を静的に拡散させ、放射性雲の等放射能線の形状のくずれた部分を探す方法が用いられてきた。最近ではピッチ乳剤を ^{131}I で標識してトリオレンの形にして底に沈めると漏水個所にピッチが固定されることによって漏れを検出している。

P/646 Some applications of radioisotopes in coastal pollution control: J.J. Edens (Denmark).

^{82}Br 1 Ci をアンモニウム塩の形で海中への排水口近くから放流し、移動しながら拡散する放射能の“cloud”の形状を船上から測定し、同時に廃水の放流によるバクテリアの減少についても測定した。

P/509 Selected environmental studies using radioactive isotopes: D.B. Smith, H.J. Richards (UK).

地表の水あるいは地下水の中には通常宇宙線で作られる 5~10TU (TU: Tritium Unit, 1 TU は T:H の原子比が $1:10^{18}$ の場合で、水 1 l について 7.2 dpm の放射能をもっている) のトリチウムが含まれているが、1954年以降熱核実験の結果として濃度ピークが観測されるようになった。1954年のピークでは 120TU, 1963年および1964年のピークでは 1360TU の濃度が観測されたが、現在では 100TU 程度の濃度に減少している。

1年間についてみると初夏にトリチウム濃度の最大値があり、年間最高値と年間平均値の比は1.7~2.5になっている。

表面水は地層を透過して地下水の水脈に向かって移動しているが、地表からの深さとトリチウム濃度との関係を求めると水の移動を観測することができる。測定にはボーリングによって得られるコアセクションに含まれる地下水を真空蒸留し電解濃縮したものを比例計数管で測定している。図1にはボーアホールにおけるトリチウム濃度の測定結果を示すが、4 m の深さに1963/4年のピーク、7.5 m の深さに1958/9年のピーク

図1 石灰岩プロフィールにおけるトリチウム濃度変化

が認められる。

地表の水のリチャージに関してあるモデルを設定して実際に観察されるプロフィールと合致するようにモデルを選ぶことによっていろいろな解釈を行なうことができる。この場合に両者について適合しなければならぬ条件として、(1)2つのピークの深さとピークの形状、(2)プロフィール中でのトリチウムの全量、などがあげられる。

このほか海岸での堆積物の研究に使う3種類のトレーサー、すなわち天然の堆積泥を放射化したもの、 ^{48}Sc 塩化物の水溶液に天然の堆積物を入れて粒子の表面だけ標識したもの、均一な放射能をおびたガラス砂について堆積物の移動の挙動と一致するか否かを実験室的に検討した。放射化には 150 MeV のプロトンをつかい、主として ^{54}Mn (半減期291日) および ^{22}Na (半減期2.6年) により数 $\mu\text{Ci/g}$ のものを作った。またガラス砂では Sc_2O_3 2.4%を入れたガラス砂を中性子で放射化した。

高さ1.5 m の沈殿用チューブをつかい、4,000 ppm の浮遊物が沈降するさいの天然の堆積泥とトレーサーの挙動の差を沈降層の比放射能を測定することによってしらべたが、均一に放射化した天然の堆積泥がもっともよい結果を示した。

P/769 Status of and reasons for using isotope techniques in hydrology; UNESCO

1965年UNESCO その他の国際機関が協力してIHD (International Hydrological Decade) とよばれる計画をつくり、IAEA, WHO など参加し、全世界の100以上の気象ステーション、研究室も加わっているが、このなかでラジオアイソトープや安定同位体を利用する広範な研究が行なわれている。

これらの研究結果はガイドブックにまとめられてIAEAから出版されているが (IAEA, Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology, Technical Report Series No. 91, 1968), ジュネーブ会議ではUNESCO, IAEA が国際的な規模で行なってきた研

究の成果を招待発表の形でとりあげた。

水文学の分野における放射線応用計測では水分計、雪量計、含泥計、検層計などがあげられる。水分計については利用性の限界を装置の改良によって広げることが必要であり、雪量計では遠隔操作によるテレメータ・システムの開発が今後の問題である。含泥計では最近浮遊物の測定が要求されるようになり（洪水によって1 lあたり数グラム以上が運ばれる）、放射線の吸収と散乱を利用したゲージでは微量の浮遊物に対して感度が低いこと、浮遊物の化学的性質によってレスポンスが左右されるという問題が残されている。

ラジオアイソトープのトレーサー利用では放出量の測定、漂砂の移動追跡、貯水の漏水の測定などがあげられる。最近は大量の放出量やフラッシュ洪水の測定に関心もたれており、またデータ解釈が進歩したのが特徴である。漂砂ではトレーサーの一部がかなりの距離を移動するために観測される iso-count curve が実際の漂砂の移動と一致しないことが指摘され、移動層の厚さが問題になっている。

湧水中での同位体組成に変化のあることが早くから認められ、その理由が検討されたが、新鮮な水については ^{18}O 、D の濃度が可変であり、海洋の水では濃度変化が少ない。これは表面水の蒸発・凝縮の過程でフラクショネーションがおき、プレシピテーションの生成時における気象など（季節、高度、緯度）に依存するためである。

Nier-Mckinney の質量分析装置の開発によってこれら同位体濃度の測定が組織的に行なわれるようになった。その後シカゴの Harold Urey によって分析法が確立され、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ の測定で、0.1‰、D/H で 1‰ の精度が得られた。水中の炭酸塩に含まれる ^{14}C の測定や ^3H の測定も行なわれ、石灰岩、砂岩などをとおしての地下水の移動速度や雪どけの水の run-off なども研究されている。

セッション A16

P/056 Nuclear systems for space power and propulsion; Milton Klein (USA)

NASA によって開発されている宇宙用原子力推進装置についての総説で、アポロ12に搭載されたSNAP 27, 1972~73年に予定されているジュピター用 RI 発電機、1975年に予定されているバイキング用（火星軟着陸用）のための RI 発電機について説明したあと、UZrHを燃料として用いるS8DR地上実験装置、 UO_2 および UC を燃料として用いる熱イオン方式の原子炉

図2 Ripple 発電機の主要部分とアイソトープ電池（寸法4.5cm×1.5cm）の構造

についてもふれている。

P/487 Isotope powered thermoelectric generators; J. Myatt, A.W. Penn, M.J. Poole (UK)

英国における RIPPLE (Radio Isotope Powered Prolonged Life Equipment) 計画で開発された一連のアイソトープ発電機の経験をとおして熱電変換素子などについての一般的な問題についてふれ、またベースメーカーのために開発した超小型アイソトープ発電機について ^{238}Pu の純度の問題などについて説明している（図2）。

P/721 Development of isotopic power technology in the USSR; G.M. Fradkin, N.E. Brezhneva, et al. (USSR)

アイソトープ発電機の熱源として用いられる RI の性質、エネルギー変換、遮蔽体などについて一般的な考察を行なったのち、ソ連邦で開発された Beta, Punguin, Ether, Mig などの一連の発電機を紹介している。

セッション C15

P/637 Programme français de production, et d'application du plutonium 238; R. Berger, R. Boucher, J.C. Derian (France)

フランスでは1970年11月にペトリュス (Pétrus) とよばれるループが稼動を始め、超ウラン元素 ^{238}Pu の製造が開始された。 ^{237}Np を Al-18% Np 合金の板材

にして原子炉セレスタン (Célestin) で照射している。Al-Np 系合金は Al-U 系, Al-Pu 系との類似が多く, NpAl_4 , NpAl_3 , NpAl_2 などの金属間化合物が存在する。 NpAl_4 化合物は Np 0~68.7% の広い範囲にわたっている。この合金は Np 40% までは冷間圧延が容易であって, 中間焼鈍の必要はない。Np ターゲット材料はできるだけ Np の含有率が高いほうがよいので, Np 酸化物ベースのセラミックと Al または C マトリックスについて研究した。

同じくターゲット材料である ^{241}Am は針状にして原子炉オジリス (Osiris) で照射している。

^{237}Np に対して積分線束 $0.5 \sim 0.7 \times 10^{21} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ の照射を行ない, $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{238}\text{Np}$ の転換効率は 7~9% に達する。この照射で得られる Pu 中の ^{238}Pu 同位体の濃度は 90~87 原子% になる。マルクールにある発電炉セレスタン (Célestin) では熱中性子化のよい線束が得られるので, ^{238}Pu 中の ^{236}Pu 含有率を 0.7×10^{-4} 原子% 以下にすることができる。

原子炉オジリスの熱中性子束は $3 \times 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ で, ^{241}Am の照射における積分線束は $1.5 \times 10^{21} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ である。

照射した Np ターゲットは硝酸に溶かし, つぎに還元剤をつかって Np を IV 価に Pu を III および IV 価にする。Np-Pu の除染と Np, Pu の相互分離は溶媒抽出によって行なう。Np(IV) と Pu(IV) の再抽出によって Pu からの Np の除染係数は 5×10^3 以上にすることができる (図 3)。

照射した Am ターゲットの化学処理ではまずターゲットを硝酸にとかし, LiNO_3 -DTPA 中で Pu の分離とアクチノイド/ランタノイドの分離を行ない, Am/Cm の分離は溶媒抽出, イオン交換, 硝酸アンモニウム・カラムでのクロマトグラフィのいずれかの方法で行なう。

最後の方法は ^{242}Cm の精製の段階まで同一溶液で行なえるという利点がある。図 4 に示すように 1 回の操作で Cf/Cm, Cm/Am, の分離を径 3 mm, 高さ 160 mm のカラムを使って行なうことが可能である。Cm に対する Ce, Pm, Eu, Am の除去効率は 3100, 31, 10.5, 3.6 である。

ベースメーカーにつかわれる ^{238}Pu 熱源については CEA が開発したが, これの特性や安全性についてはユーラトム加盟国を中心にいろいろな国が行なっている。CEA とスウェーデン原子力会社の協力で線量の測定, NUMEC 社のベースメーカー故障の統計的解析, 国立試験所 (Laboratoire Nationale d'Essais) によ

図 3 還元性水溶液による Pu(IV) の再抽出
○ Solgil 54B 中 TLAHNO_3 0.16N
● TLAHNO_3 0.16N; カプリン酸 0.3N; Solgil 54B
水溶液
 HNO_3 2N; $\text{Fe}(\text{SO}_3\text{NH}_2)_2$ 0.05N;
 $\text{NH}_2\text{-NH}_2=0.05\text{N}$
$$\alpha = \frac{K_D \text{ Np}}{K_D \text{ Pu}}$$

図 4 LiNO_3 7M, DTPA 0.1M, $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 0.1M, pH=1.5 による Am, Cm, Cf の分離 (流出量 0.3 ml/h)

るカプセルの試験, 国立宇宙技術研究所とスペイン CEA による衝撃試験と破断試験など数多くの試験が行なわれてきた。カプセルの破壊試験では耐圧 1,000~2,500 kg, 内部加圧試験では 1,000°C において 840 kg/cm², 耐熱試験では 1,300°C 6 時間という条件が用いられた。

高温におけるカプセルへの Pu の拡散をオートラジオグラフィで検討したが, 炭化した Ta カプセルでは溶融した Pu が 20~30 μ の深さまで拡散してとまり, 炭化しない Ta カプセルでは Pu が Ta 中を拡散して Pt-Ir 合金の表面で融点の高い金属間化合物を形成

	直径(mm)	長さ
1-Pu-Sc 円板	4.3	0.8
2-Ta チューブ	4.4 3.8	4.1
3-Ta カプセル	6.5 4.5	7.4
4-Pt-Ir カプセル	9 6.5	10

図5 ^{238}Pu 線源カプセルの構造

してとまることがわかった。図5にはベースメーカーに用いた ^{238}Pu 熱源カプセルの構造を示した。

このほか人工心臓の必要性について DELPHI 法によって行なったアンケートの結果をも紹介している。

P/464 Industrial nuclear methods and equipment for elemental analysis; A.S.Shtan, et al. (USSR)

ソビエトにおける放射化分析のための線源と応用例についての総説で、捕獲 γ 線分析、励起X線分析についてもふれている。

原子炉では PG-1M (出力30 kW, スイミング・プール, 燃料10%濃縮 UO_2 , 熱中性子束密度 $8 \times 10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$), IIN (出力 10 kW, パルス運転炉, 熱中性子束密度 $10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$, 1 パルスあたりの中性子数 10^{15} n/パルス), 未臨界装置 PS-1 (線源出力 $2.3 \times 10^8 \text{ n/sec}$ に対して増殖した中性子束 $1.3 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$) の例をあげている。

中性子発生装置では NGI-1 ($3 \times 10^8 \text{ n/sec}$), NG-160A ($5 \times 10^{10} \text{ n/sec}$), NG-150 I (2×10^{11}), など一連のNG シリーズを紹介している。このほかベータトロン, マイクロトロンなどの加速器, ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm , ^{252}Cf なども放射化分析用の線源としてあげている。

特殊な分析法としては IIN パルス炉をつかった半減期 2~37 min の ^{28}Al , ^{27}Mg , ^{35}Cl , ^{52}V による分析 (分析感度 $10^{-4} \sim 10^{-6} \%$), パラフィン中のCを共鳴プロトンによる核反応 $^{13}\text{C}(p, n)^{13}\text{N}$ で定量する方法, (n, p) ^{27}Mg および (n, α) ^{24}Na による Al の定量法など

をあげている。

自動化された多重元素分析装置としては Geracl II, "Element" とよばれるものがある。

励起X線分析の線源としては ^{170}Tm , ^{241}Am , ^{55}Fe , ^{119}Sn , ^{238}Pu , ^{109}Cd などが用いられ, 装置としては Mineral, Ferrit, Gagara, RRKA, RRShA, Folga などいろいろなものがある。Folga 装置を例にとると ^{170}Tm で Hg または Pt ターゲットを照射し, Hg または Pt の K_{α} X線のエネルギーが Ta のK吸収端より低いことを利用して溶液に含まれる Ta の定量を行なうものである。

P/123 Some recent developments in radioisotope technology in Australia; J.N.Gregory, B.D.Sowerby, W.T.Spragg and J.S.Watt (Australia)

オーストラリアにおける RI の工業利用について概観すると同時に, とくに励起X線分析, 核共鳴散乱による元素分析, ^{85}Kr によるパイプライン中のガス流量の測定, 照射利用について報告している。

蛍光X線分析では軟 γ 線をコーン状のターゲットにあてて単一エネルギーのX線を得る方法が1962年および1964年に J.S.Watt によって発表されているが, この方法を利用して分析する元素のKエネルギーより少し大きなエネルギーのX線で試料を励起する方法が用いられている。鉱石中の Zn, Cu, Sn の分析には Ge, Ga, Cs のターゲットが適している。North Broken Hill Ltd. の鉱山のスラリー供給ラインにとりつけられた Pb 分析用の on-stream の装置では ^{137}Cs の γ 線を Fe ターゲットで散乱させたコンプトン散乱の γ 線を利用し, 5~33% Pb を $\pm 4 \%$ の RMS で測定している。 ^{153}Gd から放出される 100 keV の γ 線の Pb による選択的吸収を利用したさらに高感度のゲージが Zinc Corporation で使われており, 平均 Pb 含有率の $\pm 2.5 \%$ である0.4%の誤差で測定が行なわれている。この装置の検出限界は 0.02% Pb で Bi の測定にも応用することができる。

静止状態にある線源から放出される γ 線は転移にあずかる2つのエネルギー状態の差にくらべて, 核の反跳のために少し低いエネルギーをもつ。線源が気体の場合には放出される γ 線のエネルギーがひろがりをもち, その一部が同じ核種の基底状態の共鳴エネルギーと一部重複するようになる。たとえば気体状の ^{60}Co から放出される 1.33 MeV の γ 線は 41eV のひろがりをもち, 基底状態にある ^{60}Ni の共鳴エネルギーと0.7%重複する。このような方法で Ni による共鳴散乱の γ 線を測定すれば Ni の分析を行なうことができる。

適当な半減期 (> 2 日) をもち、かつ壊変によって到達する安定同位体の存在比が十分に大きい ($> 1\%$) 放射性核種を探す少なくとも 31 元素について存在する。Cu および Ni の分析では ^{65}Zn のヨウ化亜鉛および ^{60}Co の臭化コバルトをシリカカステンレスに密封したものを用い、線源を気相に保つためにヨウ化亜鉛では 700°C 、臭化コバルトでは 1050°C 以上に加熱する。

Cu 鉱石について行なった実験では Cu 1% について ^{65}Zn 1 mCi あたり 0.1 カウント/min になり、非共鳴の計数率は 270 cps/mCi である。この方法を実用化

するために全計数率に対する共鳴の割合を大きくする研究が行なわれている。

^{85}Kr のガスを msec の短い時間にパイプラインに注入し、完全混合したガス試料の放射能を測定してパイプラインの流量を算出する精度の高い方法が開発され、 $3,000 \sim 5,500 \text{ ft}^3/\text{hr}$ の低圧ガスラインで校正されたテストメータと比較して $\pm 0.5\%$ の範囲で一致した。 450 lb f/in^2 の高圧のエチレン・パイプラインで $6,500 \sim 7,000 \text{ lb/hr}$ の流量に対し $\pm 1.5\%$ の精度が得られ、 ^{85}Kr の注入量は $5,000 \text{ ft}^3/\text{hr}$ の流れに対して注入時 1 sec あたり $1 \mu\text{Ci}$ の少量で済む。