

# 地下資源開発へのラジオアイソトープの利用

佐野 凌一

## 1. はじめに

1954年中性子検層器を帝国石油K.K.が輸入して各地の油田で使用した。これがわが国における地下資源開発へのラジオアイソトープの利用の最初であろう。その後他の産業の分野でのラジオアイソトープの利用の著しい発展に比較して地下資源開発とくに探査部門での進歩はほとんどみられなかったように思われる。

しかし諸外国において新しい方法が次々と開発され利用が拡大されていることや国内において土木工学に対する応用が発展してきたことに刺激されラジオアイソトープの利用が再び注目されるようになってきた。

ソビエトを中心とする東欧諸国およびアメリカでのこの分野の急激な発展を背景として1965年10月に国際原子力機関 (IAEA) の主催で工業および物理探査におけるアイソトープ利用機器に関するシンポジウムがポーランドの首府ワルシャワで開催されわが国からは物理探査の分野で大野博教氏 (電力中研) および筆者の論文が発表された。引続き同国の鉱山地帯の中心地クラコウで地下資源開発におけるラジオアイソトープの利用のパネルが開かれ東大生産研の加藤教授が出席された。本年5月に東京で開かれた第7回日本アイソトープ会議では国際原子力機関研究部の Dr. Cameron が「鉱物資源の開発におけるラジオアイソトープの利用」と題する特別講演を行ないまた最近の研究成果として伏見教授 (早大) らによる石炭の灰分迅速測定

や浜田・高橋氏 (理研) らによる天然水中のトリチウムの測定などが発表された。

毎年春に関係学会が連合して開催している理工学における同位元素研究発表会では今年伊藤寿恒氏 (石油資源) のパルス中性子検層 落合敏郎氏 (農士試) のガンマ-ガンマ検層による孔隙率の測定 伏見教授 (早大) の金属鉱山におけるガンマ-ガンマ検層の研究などが発表されまた土木・製鉄などの分野での水分計・密度計の利用の現状と問題点に関するパネル討論会が開かれた。第7回日本アイソトープ会議での Dr. Cameron の特別講演を参考にして地下資源開発とくに探査へのラジオアイソトープの利用のいろいろな方法やその研究の状況を述べてみよう。

## 2. 天然放射能測定の実用

せまい意味でのラジオアイソトープの利用では天然の放射能や放射線の測定は除外されているが地下資源探査の分野ではかなり重要な役割りを果たしている。

重要な天然放射性核種であるウラン系列・トリウム系列・カリウムはいずれもガンマ線を放射し実用面ではガンマ線の測定がもっぱら利用されている。

ラジオアイソトープの利用のなかで最も盛んに応用されている分野は一般的に検層すなわち坑井内での測定である。天然ガンマ線検層はウラン鉱石やカリウム鉱石のような放射性鉱石の探鉱のほか地層の対比に対してすぐれた検層法の1つである。

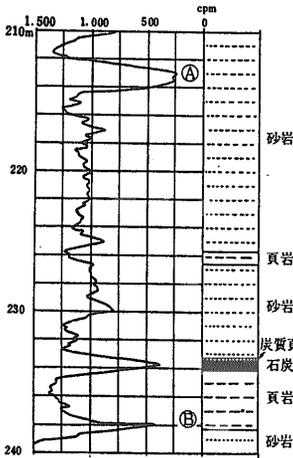


図1 炭田における天然ガンマ線検層 ①②ではコアがとれなかったが検層により炭層を推定し傾斜掘りをして確認した (片寄らによる)

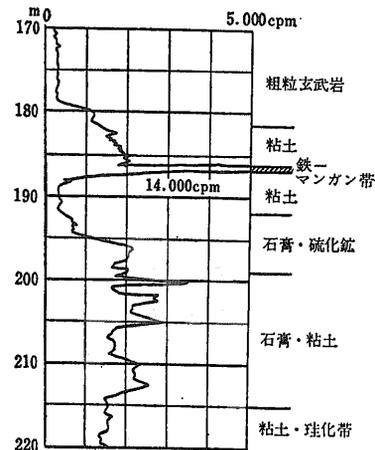


図2 黒鉱鉱床における天然ガンマ線検層 上盤粘土中の鉄マンガン帯でとくに大きな異常がみられる

わが国で注目されている応用は ウラン鉱床を除いて炭田と黒鉱鉱床とである。炭田への応用は 宇部興産 K.K. によって約10年にわたって研究・実施され 各地の炭田で炭層が低放射能異常として明瞭に把握され 放射能の低さによって発熱量も推定できることが確認されている。黒鉱鉱床については その放射能を研究した林昇一郎氏(地調)が天然ガンマ線検層の有効性を指適し 筆者も試験的な調査を行なったが 最近金属鉱山各社で検層器を購入して 測定を行なうようになってきた。

石油・天然ガス坑井に対するやや特殊な応用としてガンマ深度の決定がある。これは放射能検層がケーシング内でも測定できることを利用したものであるが 帝国石油 K.K. では数年前国産検層器を購入して 従来の温度測定にかえて実施している。

沃化ナトリウムの結晶を用いたシンチレーション・カウンターを波高分析装置に組合わせて ガンマ線のエネルギー・スペクトルを測定することができるので 岩石や鉱石の試料中のウラン・トリウム・カリウム等を分析することができる。ソビエトやアメリカでこの方法を検層に利用する研究が発表されているが ふつうの地層からの天然ガンマ線の強さは弱いので 実用化は困難だろうと思われる。特殊な応用として 粘土はウランを吸着する性質があり 粘土の分類に使うことができるといわれている。

### 3. ガンマ-ガンマ検層

ガンマ-ガンマ検層 は本誌 135号に詳しい解説があるが ガンマ線検出器の先に コバルト-60 や セシウム-137 のようなガンマ線を放出するラジオアイソトープをつけ 地層中で 散乱 してエネルギーの低いガンマ線となって検出器に入射するガンマ線の強さを測

定する方法である。散乱ガンマ線の強さは 散乱体の物質の密度がだいたい1より大きいとき その物質のガンマ線の 吸収係数 に比例して減少する。吸収係数は物質の密度や構成原子核の原子番号・質量数に関係するが ふつうの地層では 密度 だけに比例すると考えてもよい。したがって ガンマ-ガンマ検層を 密度検層 ともいう。

ガンマ-ガンマ検層によって地層の密度を求める場合には もちろん 坑内泥水の有無やその比重 孔径 泥壁の状態などの坑井の条件によって影響を受ける。ガンマ線と密度との関係は 実際の坑井の状態に近い模型を作って実験的に求めるか 実際の坑井での測定値とコアの密度と比較して求める。土木工事のための浅い地盤の調査では ボーリングをしないで 一定の規格の鉄管(アクセス・チューブともいう)を打込んで測定することによって 測定条件を一定にしている。ガンマ-ガンマ検層による密度測定は 条件のよいとき 土1~2%の誤差で測定できるといわれている。

実用上では 密度より 孔隙率 が地層の重要な性質として要求されることが多い。密度検層でかさ密度が求められるので 地層の粒子密度と空隙にみだされている流体の密度がわかれば 孔隙率が計算できる。粒子密度や流体密度は コアなどの掘さくの資料や 他の種類の検層から地層や流体の種類を推定することによって求められる。わが国では 石油・ガス坑井に対するガンマ-ガンマ検層のサービスをシュランベルジャー支社が行なっているほか 浅く細い試錐孔の検層が原子燃料公社や地質調査所で実施されている。地下水に対する応用は農業土試験場で盛んに研究・実施されている。土木関係では電力中央研究所 土木研究所 鹿島建設研

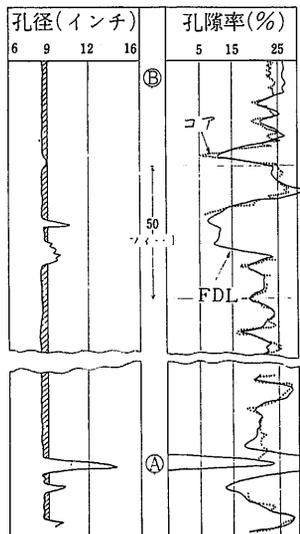


図3 シュランベルジャー社のガンマ-ガンマ検層(FDL)を孔隙率のスケールで示したものと コアの測定値との比較 ④は孔径の急変するところを通過したときのガルバノメーターの振動によるズレ ⑤は砂中の薄い石炭のはさみによるズレである (J.Tittmans らによる)

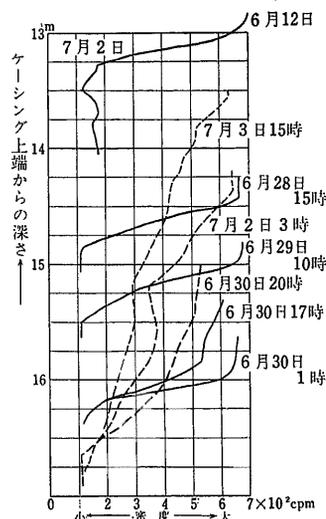


図4 利根川栗橋で測定した洪水時の河川の洗掘の状況 1961年6月末の洪水の際の河床が洗われて深くなり(6月30日1時まで)その後土砂が堆積する様子を橋脚に沿って河床に打込んだ ケーシング中でガンマ-ガンマ検層で測定した (有泉昌らによる)

究所をはじめ とくに浅い地盤の調査は民間会社においても おもに工事管理のために 盛んに利用されているほか 応用地質調査事務所などの物探コンサルタントでも測定業務を開始している。

ガンマ-ガンマ検層は 重元素や石炭の検出 石炭の灰分の測定や坑井の遮水セメントの効果の測定などに応用されるが わが国では未開拓の分野となっている。低いエネルギーのガンマ線の吸収係数は 元素の種類によって顕著に変化し また 原子は低エネルギーのガンマ線を吸収して 元素に特有なエネルギー(波長)を持つX線を放射する。したがって 特定の範囲の低いエネルギーのガンマ線だけを検出するようにしたガンマ-ガンマ検層法によって 金属鉱床中の鉛や鉄などの含有量を推定することができる。このような方法を 選択ガンマ-ガンマ検層 と呼び おもにソビエトで研究されている。

#### 4. 中性子検層

中性子と地層中の原子核との反応の検層への応用は古くから また多方面にわたって開発されている。

中性子が原子核と衝突してエネルギーが減少する現象は 弾性散乱 である。弾性散乱の起こりやすさ いわゆる 断面積 は水素の場合が最も大きいから 中性子が地層を通過したとき エネルギーの低い 熱中性子が多くできるほど 地層中の水分が多いということになる。したがって 熱中性子を検出する装置と 中性子源 とを坑井の中に入れて測定すると 地層中の水分が測定できる。地層中の空隙がすべて水で満たされていれば 水分は孔隙率に比例し この方法で孔隙率が測定できることになる。これが 中性子-中性子検層の原理である。同じ原理で浅い地盤の水分測定用に作られた装置は 中性子水分計 と呼ばれている。

中性子源としては ラジオアイソトープからのアルファ線やガンマ線がベリリウムの原子核と反応して中性子を放射することを利用する。ラジオアイソトープとして ラジウム・ポロニウム などが用いられていたが 最近では プルトニウム・アメリシウム などの原子炉の副産物が利用される。

水素と弾性散乱をして低エネルギーとなった中性子はさらに水素に捕えられて ガンマ線を発生する。したがって 地層中に水素が多いほどガンマ線が多く発生することになり 中性子-中性子検層と同様に孔隙率が測定できることになる。これが 中性子-ガンマ検層の原理であるが ラジオアイソトープを利用する検層法としては最も古く 1941年に研究が始まり 間もなく実

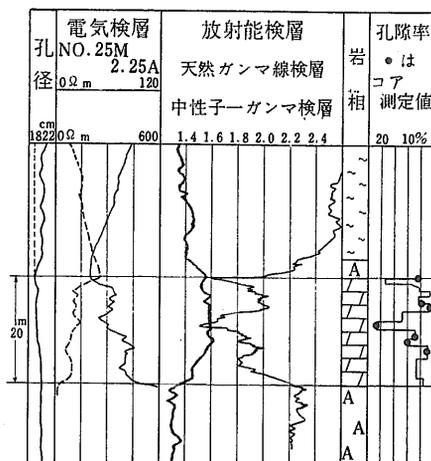


図5 レイクンハーゲン油田(東独)のドロマイト質油層における中性子-ガンマ検層による孔隙率の決定(A. Becker による)

用化された。これらの 中性子検層法 はおもに地層の孔隙率を求める目的で行なわれる。中性子線またはガンマ線の強さと孔隙率との関係は 密度検層と同様に坑井模型またはコアの孔隙率との比較によって求められる。孔径や泥水の性質の影響などの坑井条件の影響は密度検層よりも著しいくらいであり 中性子は地層に含まれる水素以外の原子核とも反応するから 地層やその中に含まれている流体の成分によっては 較正曲線(測定された放射線の強さと孔隙率と関係曲線)が大きな影響をうけることもある。

塩素は熱中性子を吸収する能力が著しく大きいから中性子-中性子検層器や中性子水分計は塩水の場合に低い水分の値を指示する。ところが カドミウムは熱中性子を吸収する能力がもっと大きく 中性子検出器をカドミウムでおおうと 熱中性子に感じないで それよりややエネルギーの高い エピサーマル中性子 に感じるようになり 塩分に関係なく水分がはかれる。油田の地下水は非常に高い塩分を含むことが多い。また 海岸地域の地下水は海水の混入のためかなりの塩分を含むことがあり 塩分の補正が必要であると同時に 塩分を知ることが望ましい。エピサーマル中性子線の強さと熱中性子線の強さとの両方を測定して 塩分量を推定することもできる。

原子炉の解析・設計のために発展した中性子の減速・拡散の理論を応用して 中性子検層の理論的研究が盛んに発表されるようになったが なお多くの研究課題が残されていると思われる。なお ガンマ-ガンマ検層の理論も 原子炉のしや蔽の理論を応用して 発展させることができるはずであるが 現在のところあまり進んでいないようである。中性子検層は比較的古くから実用

化されたにもかかわらずあまり進歩していないといわれていた。この検層による孔隙率の測定は上に述べたような事情で正確な解析が困難であってエピソード中性子の検出による方法の進歩が期待される。中性子検層が実用的に成功している応用は異なった2種類の検層結果の比較による油層と水層との判別や液体層とガス層との判別である。これは原油・水・ガスで水素の含有量がちがうことにもとづいている。また中性子源と検出器との間隔が異なる2種類の中性子-中性子検層はガス層の探査に有効であるといわれている。一方ソビエトをはじめ東欧圏では金属鉱床に対する応用も盛んに研究されている。

わが国においては中性子-ガンマ検層器が帝国石油K.K.によってアメリカから輸入されたが、おもに地下構造がよくわかっていない既成油田でケーシングが挿入されている坑井を使って調査するために用いられ二次回収法などの促進に成果を収めた。地下水調査に対する中性子検層の応用は落合敏郎氏(農土試)らによって研究されているがガンマ-ガンマ検層ほど一般的には使われていないようである。土木関係での中性子水分計の利用は近年非常に拡大しており数社から製品が市販されている。日本放射性同位元素協会では理工学会のなかに水分計・密度計に関する専門委員会を設け大野博教氏(電力中研)を委員長としてこれらの測定器の標準仕様や使用法のマニュアルを作る目的で検討が続けられているが水分計のマニュアルが近く発表されるはずである。地質調査所では工業地帯の地下構造調査に中性子水分計を取り入れるよう研究が進められている。

国際原子力機関も中性子水分計の精度・分解能などの表現や試験・検定の方法の規準を作るための調査をはじめている。

##### 5. パルス中性子源を用いる検層と中性子放射化検層

中性子と原子核との反応は原子核や反応の種類によって起こりやすさが非常に違うから反応の結果として発生する放射線の種類とエネルギーを調べることによって反応した原子核の種類を知ることができる。このような原理に従って地層中の元素の含有量を推定する検層法を開発し資源探査のいろいろな問題に応用しようという研究が進んでいる。

たとえば熱中性子が塩素に捕えられるときは水素に捕えられるときより高いエネルギーのガンマ線が放射されるから中性子-ガンマ検層で高いエネルギーのガンマ線だけを測定すれば塩素量が測定できる。こ

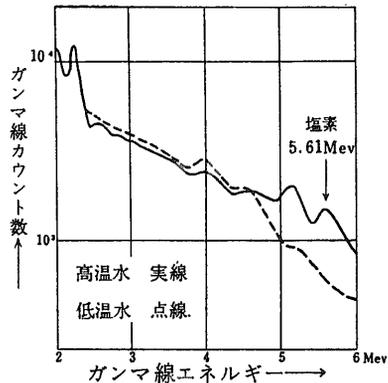


図6 高温水含有砂層と低温水含有砂層との中性子捕獲ガンマ線スペクトル 5 MeV 以上で塩素の捕獲反応による影響が認められる (P. E. Baker による)

れを塩素検層と呼びアメリカで約10年前に開発された。

さて中性子源から高速中性子が放出されると地層中の原子核と弾性散乱をして減速するが、あるものは非弾性散乱をして原子核を励起し、その原子核に特有なエネルギーのガンマ線を放射させる。一方減速された熱中性子は原子核に捕えられて(捕獲反応)別の原子核ができる。この原子核も刺激を受けた状態にあって余分なエネルギーをガンマ線として放出する。このとき新しい原子核が不安定すなわち放射性であればそれが壊変するときさらにガンマ線が放射される可能性がある。非弾性散乱は高速中性子だけに限られる。捕獲反応はいろいろなエネルギーでおこるが一般に熱中性子のとき断面積が大きい。

中性子源から高速中性子がとび出してから熱中性子になるまでに  $10^{-6}$ ~ $10^{-8}$  sec ぐらいの時間がかかるので熱中性子の捕獲反応のガンマ線は非弾性散乱によるガンマ線よりおくらせて放射される。したがって  $10^{-6}$  sec ぐらいの短い時間だけ中性子を放射すればその間にはおもに非弾性散乱によるガンマ線が測定され、中性子の放射を止めた後には捕獲反応によるガンマ線が測定される。只1回の中性子放射では実用になるほどのガンマ線の強さが得られなくても  $10^{-3}$ ~ $10^{-2}$  sec ぐらいの間隔でこの操作をくりかえせば特定のエネルギー範囲のガンマ線を測定できる。このような目的にはラジオアイソトープによる中性子源は使えないが最近では加速器を使う中性子源が発達し検層用として小型のものが開発されている。重水素イオンを数万Vの電圧で加速してトリチウムにぶつけると14MeVのエネルギーをもつ高速中性子が放射される。この方式であれば電気的なコントロールで短時間にパルス状に断続する中性子線が得られ、中性子以外の放射線は無視できるほど小さい。今後の中性子検層の発展には小型の中性



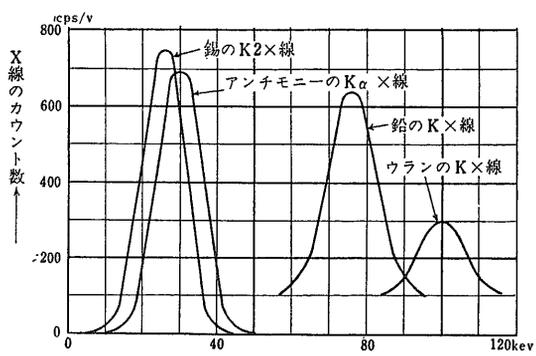


図9 プロメシウム-147をアルミニウム板上に付着した制動放射線源による蛍光X線のエネルギースペクトル(榎本茂正らによる)

択ガンマ-ガンマ法や中性子放射化法が用いられる。後に説明する蛍光X線法は 裸孔で 泥水のない坑井で原子番号20以上の元素に対し 泥水でみたされた坑井で原子番号50以上の元素に対して応用可能であろう。

6. ラジオアイソトープを利用する元素分析法

ラジオアイソトープの利用で近年著しい発展をしている分野の1つは元素分析への応用であろう。放射能検層の発展もまた これまで述べたように 特定の元素を分析することによって資源探査に関する問題を解決しようとする方向をたどっている。上に述べた 選択ガンマ-ガンマ法・パルス中性子源を利用する新法・中性子放射化法などは 岩石や鉱物の試料の測定 野外の探査での測定 選鉱場での検査あるいは選鉱系統へ組込んだの(オン-ライン)測定なども応用できる。一般にラジオアイソトープからの放射線による測定者の障害を避けるためにしゃ蔽が必要で そのため装置の重量が大きくなり 野外での測定には適さないように考えられるがそれでも幾種類かの野外用の探査装置が作られている。

**蛍光X線分析** は試料にX線をあてたとき発生するX線の波長が試料に含まれる原子に特有な値をもつことを利用して 分析を行なう方法であるが X線発生管を使う汎用の分析装置はかなり大がかりなものである。ラジオアイソトープから放射される低エネルギーのガンマ線を物質にあてた場合も同様に 蛍光X線 が放出される。したがって 低エネルギーのガンマ線を放射するラジオアイソトープを使って特定の元素の分析だけを目的とするならば 野外や坑道内で携帯して使える装置を作ることができるわけで イギリスでは錫鉱石をはじめ鉄鉱石の分析などに実用化されようとしている。

ラジオアイソトープとしては **アメリカシウム-241・プロメシウム-147・ガドリウム-153・カドミウム-**

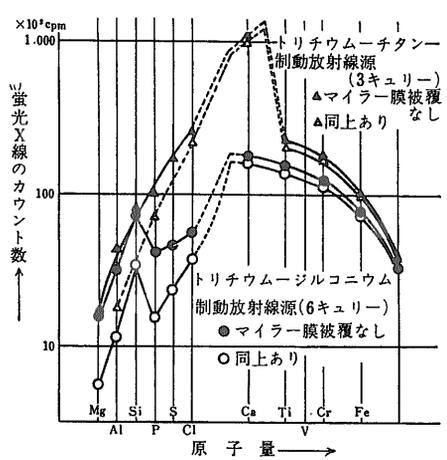


図10 トリチウム制動放射線源による低原子量元素の蛍光X線の強さ試料-検出器間隔6mmでヘリウムガスを2l/minで流す 検出器はガス・フロー・比例計数管で窓は6μのマイラー膜にアルミニウムを蒸着したものの 線源のマイラー膜被覆はベータ線を吸収させるためにおいた (今村弘らによる)

109などが使われ 分析精度は1%から条件のよいときで0.1%に達するという。選鉱場などに設置する装置は錫精鉱やバリウム鉛混合鉱石中のバリウムの定量に用いられていて 25秒間の測定で0.01%の精度で検出できるということである。

また このようにして発生するX線は特定のエネルギーをもつ いわゆる単色X線であって このX線の吸収や散乱を分析に利用することができる。しかし 一般に 吸収や散乱を利用する分析法は個々の元素を明瞭に区別することが困難で 複雑な組成の物質には適しない。ベータ線が原子核の近くを通ると 原子核の電価のため減速され 余分になったエネルギーをX線として放射する。これを制動放射という。この現象を利用してベータ壊変をするラジオアイソトープを使った X線源を作ることができる。最近では **トリチウム(水素-3)**をジルコニウムやチタンに吸着したものがよく用いられるようである。このようなX線源を応用した迅速分析法として原油中の硫黄の分析と石炭の灰分の測定とが開発されている。

原油や重油中の硫黄の迅速な分析はボイラーの保守や大気汚染防止などの観点から重要で とくに火力発電所での燃焼管理のために 実用化が進められている。たとえば **トリチウムの制動放射**によるX線が試料によって吸収される程度によって硫黄の含有量を測定するのであるが 原油の主成分である炭素と水素の比が測定値に影響するので この比を**ストロンチウム-90**のベータ線の吸収によって測定して補正する。 **プロメシウム-147**の制動放射によるX線を用いると このX線のエネルギ

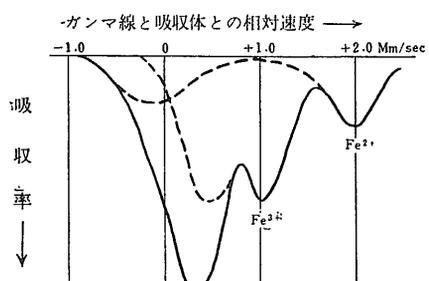


図11 鉄ガラス (20Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・8BaO・72P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) のメスbauer・スペクトル  
2価の鉄 (Fe<sup>2+</sup>) と3価の鉄 (Fe<sup>3+</sup>) とによる吸収線が明瞭にわかれている (吉岡亨らによる)

のところで炭素と水素とによる吸収係数が一致するので 炭素対水素比の補正が不要であるという研究も発表されている。採油現場での測定では水分の混合が避けられないことが多く この方法の応用はあまり注目されていないようである。

石炭の灰分の測定は とくにイギリスで実用化の段階へ進んでいて 低エネルギーのガンマ線の散乱の測定によって 薄い炭層の採掘の場合にカッターを制御するために用いられている。定量的な測定には 灰分中の鉄が強い蛍光X線を発生することが難点になっているが エネルギーの低いX線を発生する線源を使い 適当なX線フィルターをかけることによって0.2%ないし0.8%の精度が得られるという。しかし 低エネルギーのX線を使うと透過力が小さいため 粉碎した試料にしか利用できない。

早大の伏見教授らは **アメリカシウム-241** のガンマ線の吸収の測定値を **セシウム-137** のガンマ線の吸収による密度測定値で補正する方法を研究し 工場現場で使用する計器を開発している。

**コバルト-57**が鉄-57へ壊変して 高いエネルギー状態にある鉄-57の原子核は14.4KeVのガンマ線を放射する。このガンマ線を鉄を含む物質に入射させるとその中の鉄-57の原子核が鋭く吸収する。すなわち 共鳴吸収をする。このような現象は光の場合には一般的な現象であるが 原子核の場合にはガンマ線の放出や吸収にあたって原子核自身も反動で動き エネルギー損失を生ずるため 常温では鉄および錫ぐらいしかみられない。原子核は低温にされた結晶内では強く結晶格子に固定されて動かないので そのほかの元素でもガンマ線の共鳴吸収が起こる。

この現象の観測するには ガンマ線源と吸収体とを相対的に運動させるとドップラー効果で吸収体に入射す

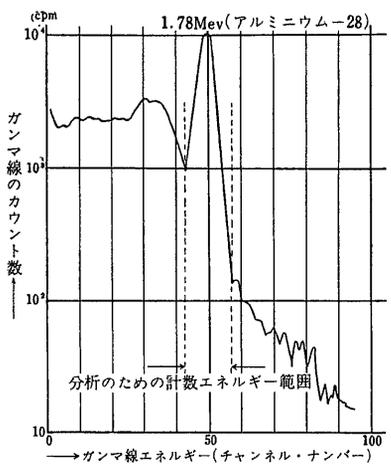


図12 岩石中のアルミニウムの放射化によるガンマ線のエネルギー・スペクトル 9.2%のアルミニウムを含む試料 1.5g を中性子で照射し アルミニウム-27を放射性的アルミニウム-28に変えた 3'×3'dのNaI(Tl)シンチレーション・カウンター2個で測定したスペクトル 高速中性子はバン・デ・グラフ起電機の電子線の制動放射をベリリウムに当てて発生させたルーチンで0.1%までのアルミニウムが10%の精度で測定できる(D.F.Rhodesによる)

るガンマ線のエネルギーがわずかに変化するため 相対的な運動速度と吸収との関係を調べることによって 吸収スペクトルが得られる。これを**メスbauer・スペクトル**という。ところが 原子核はわずかながら核外電子の状態によって影響をうけるから メスbauer・スペクトルは化合物の状態によって変化する。たとえば 二価の鉄塩と三価の鉄塩とでは著しくちがう。したがって メスbauer・スペクトルは化合物の構造の研究などに用いられるが また吸収率を比較することによって試料の分析をすることもできる。地下資源の開発の分野では 錫や鉄の鉱石の分析に応用することが研究されている。

分析しようとする試料に放射線を照射し 目的とする元素の原子核を放射性原子核に変え その放射線を測定することによって分析する方法は **放射化分析** と呼ばれ 微量分析あるいは迅速分析の手段として非常に進歩している。放射化分析によってナポレオンの遺髪から砒素が検出され 毒殺されたことが推定されて 犯罪捜査に対する応用も注目されている。

放射化に用いる放射線としては 中性子線が最も一般的で 多くの元素に対する応用が考えられている。中性子源としては ラジオアイソトープを使う線源 中性子発生装置 および原子炉が目的に応じて使われている。検層における応用はすでに述べたが そのほか 実験室あるいは工場における分析ばかりでなく 野外の現場で使う装置 たとえばボーキサイトの中のアルミニウムを分析する装置が開発されている。

放射化分析はわが国でも盛んに研究され実用化されているが 地下資源開発の分野ではまだ取り上げられていない。岩石中のウラン・トリウムは定量に対する応用は初田教授(京都大学)らが 京都大学の原子炉を使って研究している。

ガンマ線がベリリウムの原子核にあたって中性子を放

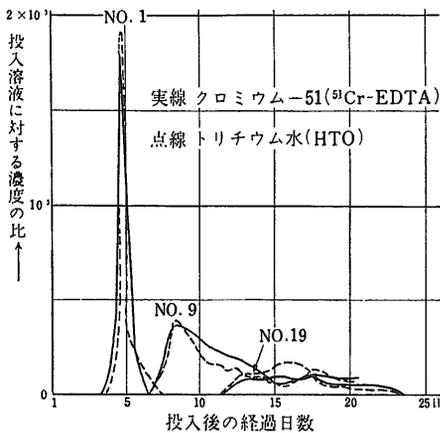


図13 地下水に注入されたトレーサーの検出曲線 採水井戸は投入井戸からそれぞれ2.5および11m地表水の場合に比べて検出曲線は非常に複雑になることが多い (G.Knutssonによる)

出する反応は中性子源として利用されているが ベリリウムの探鉱や分析にも応用できる。この原理を使った探査装置は各国で開発され 市販されている。地質調査所でもベリリウム探査装置を輸入してすでに探査に使用し成果をあげている。ベータトロンによって発生する強力なガンマ線によって放射化分析をすることも考えられ研究されているが 実用化されていない。

中性子検層のところで説明した中性子によるいろいろな核反応は 野外調査や室内での試料の測定にも応用できるし 自動制御系統の検出部として利用することもたいへん興味がある。試料の測定には中性子線の吸収も利用できるわけである。

探鉱や選鉱の段階において 今まで述べたもののほかにも ラジオアイソトープを装備している装置の利用が考えられる。たとえば 選鉱場でガンマ線の吸収や散乱を利用する 密度計 や 液面計 が使われ 選鉱系統の自動制御をすることもできる。また ガンマ線の吸収を利用して鉱車や炭車の重量をはかり またこのような計器をスイッチと組合せて 鉱車の線路を切替えたり ベルトコンベヤの積みすぎを防いだりすることができる。

アルファ線による電離箱の電離電流が煙の浸入によって変化する現象を利用した 電離箱型煙感知器 ベータ線の吸収などを利用して炭塵の蓄積を測定する装置などが開発されているが これらの計測器も鉱山で使われるであろう。ラジオアイソトープを放射線源として位置の目じるしとして使うことができる。筆者は コバルト-60を地層に打込んで 地盤沈下地帯で地層の収縮を観測する方法を開発したが この方法については本誌138号に解説した。

## 7. トレーサー

ラジオアイソトープは トレーサー として多方面の研究に用いられる。トレーサー利用によって それ以外の方法では得られないような情報を得られることが多い。また トレーサー利用は調査研究として行なわれているが そのうちのあるものは最終的には生産過程の制御のために使われるようになるであろう。

石油鉱業においては ラジオアイソトープ・トレーサーは坑井の掘さく・仕上げ・二次回収など坑井作業に関連して多種類の研究に用いられる。パイプライン作業では 流速の測定 漏洩の検出 異なった採油基地からの成分の混合の測定などがある。流速の測定精度は液体の場合にはレイノルズ数 $10^4$ — $10^6$ の範囲で±5% ガスの場合には1—2%であるといわれる。

鉱山での利用では 換気速度・滲出水の分散の研究などがある。滲透水の起源の研究には天然のトリチウムや炭素-14が利用されるであろう。選鉱場では 破碎ボールの磨耗の研究 粉碎作業での破壊の一般理論の展開 浮選の研究などに用いられる。

ラジオアイソトープはトレーサーとして地表水の流速や地下水の流速・径路の測定に用いられる。土木工学への応用には そのほか 河川の石・砂・泥の移動や海底漂砂の研究 あるいはダムの漏水調査などがある。

国際原子力機関はこれらの分野における既知のトレーサー利用について取まとめを行ない 将来利用しようとしている人達に情報を提供することを計画している。

地表水や地下水の調査研究へのトレーサーの利用は 東京大学生産研究所・京都大学工学部・農業土木試験場・東京都立アイソトープ総合研究所・土木究研所・原子力研究所アイソトープ利用開発部などで研究・実施されているが 1963年に国際原子力機関主催の 水理学におけるラジオアイソトープ利用に関するシンポジウム が東京で開かれたことも わが国においてこの分野の研究が盛んで 水準が高いことが認められたからであろう。

地下水トレーサーとして 短期間の追跡には 沃度-131およびブロム-82 が適している。海岸地帯の塩分の多い帯水層を除いてナトリウム-24も使われる。数週間の追跡では 最近 沃度-125やクロミウム-51が注目されている。これらのラジオアイソトープを使う場合には 土壤に吸収されないように 適当な化合物の形としあるいは担体を加えることなどが必要である。長期間の追跡には トリチウムを含む水がもっとも適当しているが クリプトン-85やルビジウム-106も有望であると考えられている。追跡距離はふつう数百mから数kmまでであるが ギリシアの石灰岩地帯ではトリチ

ウムを用いて30kmにわたる追跡が行なわれた。

笹川昭夫氏（帝国石油）らは 数年来 八橋油田で行なわれている水攻法による二次回収にラジオアイソトープを使っている。トレーサーとして硫黄-35・沃度-131・トリチウムを圧入水に投入し 生産井からの産出水を観測して フロントの速度・方向およびチャンネルングなどの調査を行なっている。

地下水の調査では ふうり 数本の井戸を掘り 1つの井戸でトレーサーを投入して他の井戸に達する時間やそこへ達するまでに薄められた割合を測定し 流速や流向を求め帯水層の性質を調べるが 1つの井戸でラジオアイソトープを投入し引続いて多量の水を圧入して帯水層中に押し込み ある一定時間後地下水面が平衡になってから地下水を汲み上げて測定する方法もある。落合敏郎氏（農土試）は1本の井戸で流速・流向を測定する装置を開発した。これは少量のナトリウム-24を含む塩水が地下水によって薄められて濃度が減少する割合から流速を求めるのである。流向はラジオアイソトープが流出する方向を限定する窓を作り 窓の方向と流向とが一致したとき 最も薄くなることにもとづいて求められる。他の方法では困難な低速の地下水流の測定ができる。

わが国のように人口密度の多いところで 地表水のトレーサーにラジオアイソトープを使うことは 放射線障害の防止の見地から困難が多い。そこで 小林昌敏氏（都立アイソトープ研・原研）らは非放射性の化合物を投入し 測点で採水した後試料を放射化して 投入した化合物中の元素を分析し 追跡を行なう方法を発展させており 他の機関でも研究が行なわれるようになってきた。トリチウムや炭素-14は上層大気中で宇宙線により生成され 降下して天然水に混合する。また 核爆発によって作られたラジオアイソトープも天然水を汚染し 水とともに流通 循環している。したがって 天然水中のラジオアイソトープの測定は 地表水・地下水の水利の研究に有効である。

### 8. おわりに

探査を主として採鉱・選鉱を含む地下資源開発に対するラジオアイソトープの利用について 最近の研究開発の実例を引用して説明した。ラジオアイソトープの応用は 今や 調査研究ならびに生産のあらゆる面にわたって滲透し 重要な研究や実用化を見落しているかも知れない。原子力平和利用がわが国で緒についてからすでに10年以上を経過した。初期にはもの珍しさから過大評価された面があったが 現在では正当な批判を受け

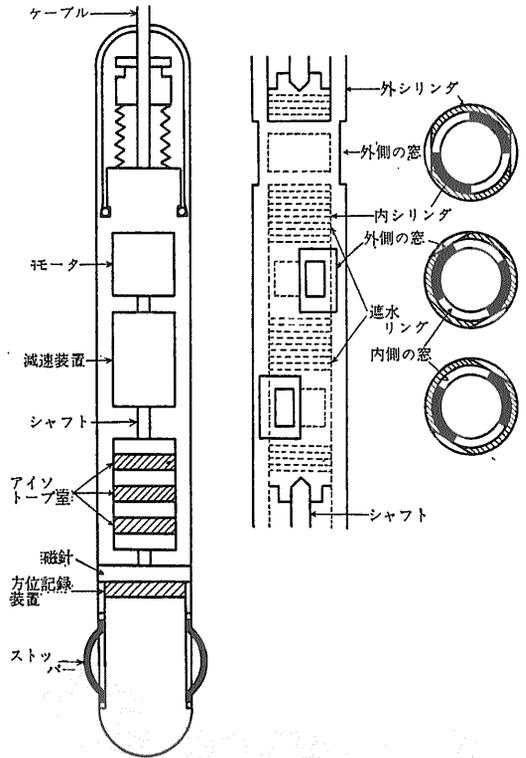


図14 アイソトープ流速・流向計  
モーターの回転によって内シリンダ（アイソトープ貯蔵室）と外シリンダの窓が合さり一定時間後自動的に閉まる 流出の前後の溶液中のラジオアイソトープの濃度を測定して比較する（落合敏郎による）

地道な研究開発が行なわれるようになってきた。

ラジオアイソトープの利用に伴う放射線障害の防止は大きな問題であって ラジオアイソトープを使う方法がそれ以外の方法と同程度の効果しかないとすれば その採用は見合せなければならない。しかし 放射線障害に対する対策の研究も進められ ラジオアイソトープを使用する機器の規制を部分にゆるめてほしいという要望も強く打ち出されている。一方 ラジオアイソトープを利用する方法がすぐれていることが確認されていても工業標準として採用されていないために実用化が進まないという場合もある。このような問題も徐々に解決され 理学・工学におけるラジオアイソトープの利用はますます拡大してゆくであろう。

天然資源の開発の分野においては わが国の現状はソビエトや欧米諸国に比べておくれを認めざるをえないが水理学や土木工学においての著しい進歩と同様に 今後の急速な発展を期待したい。

（筆者は物理探査部 応用地球物理課長）