

<概要>

放射性同位体からの放射線を含め、すべての放射線利用は情報利用（計測応用）とエネルギー利用（照射効果の応用）とに分けられる。ここでは、前者の理工学分野における計測応用について解説する。計測応用は、大別して、自然の放射性壊変そのものが測定の対象となるもの、人為的に放射性同位体を取り扱う追跡子の計測、放射線と物質との相互作用で検知できる物質情報の計測の3つの異なる分野に分けられる。基本となる現象と技法に応じてこれらをさらに細分類し、全20種の異なる計測応用の技術に分類して、それぞれの原理、技法、応用例などを最近の状況を踏まえて概説する。

<更新年月>

2014年11月

<本文>

1. 放射線利用の分類

放射性同位体（ラジオアイソトープ、以下RI）からの放射線を含め、すべての放射線の利用は、表1のように2種類に分けられる（文献1）。一つは、放射線を物質情報の探査手段として、自然あるいは人為的に生ずる現象を検出測定する情報利用＝計測応用であり、他の一つは、放射線のエネルギーを物質に与えることで、物質に生ずる作用効果に着目するエネルギー利用＝照射効果の応用である。両者は技術的にも、また、取り扱う放射線量の観点からもまったく異なっており、それぞれ分化した広い応用分野を有している。ここでは、前者の計測応用を取り上げ、その理工学分野の全体像を概説する。

情報利用には、特定のRI（例えば炭素14（ ^{14}C ））の存在比を測定して考古学上の年代を求める場合や、放射線信号を出し続けるRI（炭素14（ ^{14}C ）、硫黄35（ ^{35}S ）、コバルト60（ ^{60}Co ））を目印として特定物質の挙動を追跡するトレーサ利用（例えば自動車エンジン内壁摩耗の計測など）のように、放射線と物質との相互作用には関係なく、RI自体の計測が行われるものがある。

しかし、その他の多くの計測応用は表1に示すように、この相互作用で生ずる放射線自体の変化や2次放射線あるいは気体分子イオンなどを捕らえて、物質に関する種々の情報を得るものである。これらは計測工学の立場からは放射線応用計測と呼ばれるが、なかには、メスバウアースペクトロメトリや陽電子消滅のように、自然科学の研究手段として利用される場合が多いものも含まれている。

2. RI・放射線の計測応用

表1の基本になる現象及び方法をさらに細分化し、技法、応用分野・応用例などを表2に記載した。

「放射性同位体自体の計測」が計測の対象となる場合は、RIは非密封のまま取り扱われる。そのうち、表2で最初の「放射性壊変そのもの」が応用の基本になる場合は、自然に存在する状態（試料は処理されたとしても）のRI（例えばカリウム40（ ^{40}K ）、ルビジウム87（ ^{87}Rb ）など）を計測対象とする点が他と異なっている。これにより年代測定や地層探査が可能である。他方、次の「放射線放出そのもの」が基本になる広義のトレーサ利用では、測定対象にRIを人為的に投入するのが通例である。この場合も、普通、RIは非密封で用いられる。

これに対して、「放射線と物質との相互作用の計測」では、線源の種類は問題でなく放射線だけが必要なので、RIは密封線源として用いられる。表2の各区分に代表的な応用例を示した。このほかに、原子炉または加速器による種々の中性子散乱計測（文献2）、加速器高エネルギー光子

による放射化核種の計測など（文献3）があり、さらに将来的には、ミュオン、パイオンの計測応用（文献1）など新しい放射線利用も期待されている。表2に沿って以下に各応用計測の概要、意義などを記す。

3. 放射性壊変そのものの計測

3.1 地球科学・考古学試料等の年代測定

RIの壊変速度は核種固有の半減期により一定であるため、これを時計として利用し、特定RIの存在比率を測定することにより、そのRIが自然のなかで試料物質に取り込まれた後の経過年数を知ることができる。一般に、長半減期のRIでは放射線測定よりも、加速器質量分析でRI量を測定する方が高感度になる。近年その方法が利用可能となって、考古学における数百ミリグラムから数グラムの鉄試料で¹⁴C年代測定が精度よくできるようになったため、その適用範囲は著しく拡大した（文献1）。この分野での利用に関しては、ATOMICAデータ「放射線測定による年代推定（08-04-01-11）」、「環境放射能測定による地下水年代の推定（08-04-01-12）」、「考古学研究への放射線利用（08-04-01-13）」等を参照。

3.2 地層探査、鉱物資源探査など

地球表層のRIの分布は、地層の構造や鉱物の存在と密接に関係している。この事実に基づき、移動可能な自然ガンマ線スペクトル測定装置等によって、金属鉱床のみならず、埋もれた断層の検出や地下水・温泉源の探索などを含む多くの探査計測（文献1、4）が行われている。海外の鉱山等では、石炭・鉄鉱石のベルトコンベア上の品質管理にも、自然放射線計測技術を活用して成功した例（文献5）が多くある。

また、多種多様な素材で構成される製品については、見かけの性状と品質だけからではバイオマス由来素材と石油由来素材の構成比率を判定することが困難であるが、放射性炭素（¹⁴C）の量を計測することによって多種多様な素材で構成される製品のバイオマス由来度を定量的に測定する方法の開発が進んでいる。これは、太古に形成された石油の場合には放射性炭素の大部分が壊変して今では残っていないが、現代に栽培されたバイオマス中には一定比率で放射性炭素（¹⁴C）が含まれているという炭素同位体構成比率の違いを応用した方法である。

4. 放射線放出そのものの計測

放射線を出すこと以外は普通の元素と変わらない挙動を示すRIを目印として、物質の移動を追跡測定できるRIは、その発見以来、理想的トレーサ（追跡子）として用いられてきた。

4.1 放射性トレーサによる物質移動の測定

金属材料中の原子の移動などミクロな現象から、工業プラント内の原料滞留時間あるいはダム工事における漏水など大規模な工学的計測まで、RIトレーサが利用されてきた分野は広範囲に及んでいる（文献1、3）。例えば、ディーゼルエンジンの開発において、エンジンの排出ガス規制強化が進められており、排出ガス中の微粒子成分（Particulate Matter, PM）の低減を図るために、エンジン各部から消費されるオイル分から発生するPM測定のため炭素14（¹⁴C）を標識元素として用いている。この分野での利用に関しては、ATOMICAデータ「自動車産業分野における放射線利用（08-04-02-11）」、「放射性トレーサ法の原理と応用（08-04-03-01）」等を参照。

4.2 同位体利用分析

RIをトレーサあるいは指示薬として用いて、非放射性同位体を定量分析する方法は種々ある。化学反応の当量関係に比べて過剰量あるいは不足量の放射性試薬を用いるものの他、化学反応によらない方法（同位体交換分析法）もあり、同位体利用ならではの特徴を発揮している。（文献1、3、6）

4.3 オートラジオグラフィ

RIトレーサ利用技術の一つとして、特定物質の移動後の分布及びその時間的变化をX線フィルムなどで可視化する方法であり、動植物への応用が多い。理工学分野では、合金組織及びその腐食の研究や、鋼材表面の特定元素分布測定などに用いられている（文献1、3、7）。

4.4 放射型CT

人体に投与したRIトレーサからのγ線を体外から種々の方向で計測し、コンピュータにより体内断面のRI分布画像を描くトモグラフィ（CT）技術は、シングルフォトンエミッションCT（SPECT）及びポジトロンエミッションCT（PET）として普及している（文献1）。同様の技術が理工学分野でも注目され、気液二相系の流れの解析に陽電子（ポジトロン）放射体を利用した研究報告（文献8）なども見られる。

5. 放射線の受ける変化の計測

物質との相互作用で放射線が受けるさまざまな変化は、自然科学の研究から工業計測まで幅広く利用されている。

5.1 透過型工業計測

β線、γ線、X線、さらに最近では中性子線を利用した単純な透過法が、工業計測の不可欠な手

段として多く用いられている。特にβ線は紙やプラスチック、γ線は厚い鋼・金属の厚さ計として、生産工程に組み込まれている。この分野での利用に関しては、ATOMICAデータ「RIの工業計測用の厚さ計、密度計、水位計などへの利用統計（08-04-02-06）」と「RIの工業計測機器への応用原理（08-04-03-02）」を参照。

この他、二重エネルギーγ線の同時利用によって石炭中の灰分をオンライン計測する方法が海外の天然資源産業分野で普及したが、最近、同種の技術が石油採掘現場におけるオイル・水・ガス3成分連続計測に応用・開発され、注目されている（図1、文献9）。

5.2 透過像撮影-ラジオグラフィ

各種の非破壊検査法のなかでも、X線、γ線透過法は早くから知られ、有力な検査方法の一つとして普及している。また、中性子ラジオグラフィは、原子力、宇宙航空、その他産業分野において、特に先進工業国で多く利用されている（文献1）。この分野での利用に関しては、ATOMICAデータ「中性子ラジオグラフィの原理と応用（08-04-01-01）」、「考古学研究への放射線利用（08-04-01-13）」、「工業用ラジオグラフィ（放射線透過試験）（08-04-02-03）」、「海外における中性子ラジオグラフィの利用（08-04-02-10）」等を参照。

5.3 透過型CT

医療分野のX線CTスキャナーほど多くはないが、X線ビーム透過型のCT検査装置が各種産業製品の断面試験、異物検査、文化財内部の検査などに用いられている（文献1）。

5.4 後方散乱線計測

上記の透過型ほどには一般的ではないが、散乱β線による被覆層厚さ測定、散乱γ線による表層土及び地下検層の嵩密度計測など産業分野で実用化されているものも種々ある。

加速器イオンビーム利用法の一つとして、ラザフォード後方散乱法（RBS）は、標的原子の質量を識別する手段として知られている。同じ原理でRIからのα粒子の後方散乱を測定する分析器（文献10）は、米国で人類初の月着陸に先立って、無人月面探査機（1966年～1968年）に搭載され、月表面の岩石の組成分析に成功した。

5.5 結晶回折

放射線の波としての性質による干渉のため、散乱線がある方向でのみ強くなる現象、すなわち回折の利用は、X線回折法として古くから結晶構造解析などに用いられ、いまなお発展し続けている。X線と同程度の波長を持つ熱～冷中性子は、X線に無い特徴（高い透過力、小角散乱等）があり、水素やその同位体に関する分析での応用が期待される（ATOMICAデータ「中性子回折・散乱の原理と応用（08-04-01-05）」参照）（文献1、2）。タンパク質の機能を正確に理解するためには、原子レベルでの三次元構造を知ることが必要で、そのためにはSring-8放射光X線結晶構造解析法が最も強力な手段である。

5.6 中性子減速（熱中性子化）

中性子のもつ特徴の一つに、水素による多重散乱で減速され熱中性子になる度合いが、他の元素に比し際立って大きいことがある。これを応用した水素・水分量測定が、RI中性子線源等を用いて実施されている。大量物質から小試料まで適用範囲は広い（文献2、11）。小試料の場合、1mg程度の微量水素まで測定できる（文献12）。

5.7 メスバウアースペクトロメトリ

原子核からγ線が出るときその反動で原子核も動くため、原子核がもらう分だけγ線のエネルギーは小さくなる。したがって、このγ線を同じ放出原子核に当てても共鳴吸収は起こらない。しかしγ線放射体を試料に対してある速度で動かし、不足のエネルギーを補えば、同じ核種による共鳴吸収が生じる。このメスバウアー効果は、化学結合状態によって変わるので、鉄磁性体の研究や腐食鋼、表面硬化処理した鋼の分析などに用いられている（文献1、2）。また、手のひらに載るサイズの小型メスバウアースペクトロメータが火星探査機スピリット及びオポチュニティに搭載され、火星表面の石、岩石、土の分析を行っている。

5.8 中性子共鳴吸収

加速器からのパルス状連続エネルギー中性子ビームを用い、飛行時間測定による中性子エネルギー分光の方法によれば、熱外中性子から中速中性子（0.5eV～0.5MeV）の領域では、核種に固有の共鳴吸収ピークが多数観測される。したがって、多くの核種（元素）を同時に分析することができる。核燃料中のウラン、プルトニウム及び核分裂生成物の各同位体量の分布像を調べた例がある（文献1、11）。

6. 二次放射線の計測

6.1 特性X線分析

荷電粒子（α、β、陽子など）あるいは光子（γ線、X線）によって、軌道電子の準位が遷移（高い準位から低い準位へ移動）するとき、元素に固有の波長を持つ特性X線が発生する。普通、X線による場合が蛍光X線、また陽子等の場合が粒子誘起X線（PIXE）とよばれ、元素成分分析の

手段として広く知られている（ATOMICAデータ「蛍光X線分析の原理と応用（08-04-01-26）」参照）（文献1）。

6.2 即発γ線分析

中性子や加速器粒子ビームを試料に照射すると核反応で即時に生ずるγ線は、即発γ線と称され、核種に固有のエネルギースペクトルを持つ。原子炉中性子ビームの捕獲反応によるものは試料の微量分析に適している。中性子放射化分析では困難な元素（H、B、N、Si、S、Cdなど）も分析可能である。一方、RI及び加速器中性子の捕獲及び非弾性散乱反応の場合は、野外現場あるいは工業生産工程での大体積物質を対象とするオンライン分析などに用いられている（文献1、2、11）。ホウ素（B）は最も高感度な元素でその検出限界はppbレベルと低く、原子炉材料、岩石、隕石、植物、海洋堆積物、各種環境試料など多くの分析例がある。

6.3 放射化分析

原子炉中性子や加速器の荷電粒子あるいは高エネルギー光子による核反応で、生成した放射性核種から出る放射線を測定して、もとの元素を分析する放射化分析は、一般に、考古学、環境関連科学、地質学、地球科学、医学・生物学、工業製品、微量試料の高感度、多元素の分析など広い分野での微量分析法として利用されている（ATOMICAデータ「犯罪捜査における放射線利用（08-04-01-18）」を参照）（文献1、2、3）。

6.4 陽電子消滅

電子の反粒子である陽電子は、物質中に入ると直ちに速度を失い、電子と対になって消滅する。その際、511keVの消滅γ線2本をほぼ正反対の方向に出す。この消滅までの時間（寿命）や2本のγ線の間の角度を正確に測定することによって、試料物質中の電子の密度及び運動量分布の測定ができる。この方法は、固体材料の塑性変形、疲労、水素脆性など固体物性に関する研究に有用であるため、注目を集めている（文献1、3）。生命科学の分野では、がん細胞の存在とその位置を特定するためにこの技術が応用されている。がん細胞表面に発現したがん抗原に対して特異的に結合する抗体に陽電子放射体（例えば ^{64}Cu ）を標識すると、陽電子放射体はがん抗原に集まる。そこで、この陽電子放射体の分布画像を作成することによって、がん細胞の存在とその位置を知ることができる。この技術は次世代分子イメージングの一種で、PETイメージングと呼ばれる。

ポジトロン放出核種の特性を活かした植物に特化した非侵襲的計測技術を開発し、植物体内の物質動態を解明する研究も進められている。

7. 気体電離イオンの計測

7.1 電離電流の変化測定

一種の電離箱の中に弱いαまたはβ放射体を置き、一定の電離電流が流れているところに異物の煙や気体が侵入すると、電流値が減少する。ごく弱いα線源 ^{241}Am を用いた煙感知器（イオン化式）や、β線源 ^{63}Ni 使用のガスクロマトグラフ検出器（エレクトロンキャプチャディテクタ）が、日本でも広く普及している（文献1）。しかし、煙感知器（イオン化式）に関しては、外国では普及しているが国内では最近急速に減少している。

7.2 イオン移動度測定

微量の気体を取り込み、これをβ線によりイオン化した後に電場の中を走らせ、イオンの移動速度の違いを測定する、新しい携帯型分析器が最近米国で開発・商品化された。麻薬・爆薬の高感度探知器（図2）といった一般的用途から国際宇宙ステーション（ISS）内の大気監視まで、多くの分野で幅広く利用されている。

（前回更新：2005年2月）

<関連タイトル>

[中性子ラジオグラフィの原理と応用 \(08-04-01-01\)](#)

[中性子回折・散乱の原理と応用 \(08-04-01-05\)](#)

[放射線測定による年代推定 \(08-04-01-11\)](#)

[環境放射能測定による地下水年代の推定 \(08-04-01-12\)](#)

[考古学研究への放射線利用 \(08-04-01-13\)](#)

[犯罪捜査における放射線利用 \(08-04-01-18\)](#)

[RIの工業計測用の厚さ計、密度計、水位計などへの利用統計 \(08-04-02-06\)](#)

[自動車産業分野における放射線利用 \(08-04-02-11\)](#)

[放射性トレーサ法の原理と応用 \(08-04-03-01\)](#)

<参考文献>

- (1) 石樽 顕吉ほか（編）：放射線応用技術ハンドブック、朝倉書店（1990年11月）
 - (2) 日本アイソトープ協会（編）：中性子による計測と利用、丸善（1999年5月）
 - (3) 氏平祐輔：原子核・放射線による化学計測、日刊工業新聞社（1984年4月）
 - (4) 木村重彦：地表 γ 線による表層地質等の探査、Radioisotopes 44, p.627-636（1995）
 - (5) P.J. Mathew: Recent Developments in Nucleonic Control Systems for Coal, Mineral and Agricultural Industries, Proc. Int. Conf. on Application of Radioisotopes and Radiation in Industrial Development, 1998, Mumbai, India（1998）p.233-244
 - (6) 池田長生：同位体交換分析法、同位体の化学（化学総説 No.23）、日本化学会（1979年7月）p.265-272
 - (7) 鎌田 仁（編）：最新の鉄鋼状態分析、アグネ（1979年8月）p.273-281
 - (8) F. Hensel: Studies of Liquid-Gaseous Two-Phase Systems by Positron Emitting Radiotracers, Appl. Radiat. Isot. Vol.48, No.10-12, p.1485-1492（1997）
 - (9) A.M. Scheers: An Oil/Water/Gas Composition Meter Based on Multiple Energy Gamma Ray Absorption (MEGRA) Measurement, IAEA-TECDOC-1142 (Emerging new applications of nucleonic control systems in industry), IAEA（2000）p.105-122
 - (10) J.H. Patterson, A.L. Turkevich, E. Franzgrote: Analysis of Light Elements in Surfaces by Alpha-Particle Scattering, Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics, Vol.1, IAEA（1966）p.337-345
 - (11) 富永 洋：中性子を利用した分析、Radioisotopes, 35, (3) p.148-157（1986）
 - (12) 立川 登、富永 洋、石川 勇：高速中性子の多重反射と減速材最適化を利用した小試料中微量水素・水分測定法の開発、第34回理工学における同位元素研究発表会要旨集（1997）、p.61
 - (13) 大島一史ほか：放射線計測技術を利用したバイオ燃料由来判別の現状、放射線と産業、No125（2010）p.21-25
 - (14) 石岡典子ほか：生命科学分野で役立つポジトロン放出核種を用いた非侵襲的計測技術、放射線と産業、No124（2009）p.21-26
 - (15) 井上高志ほか：RI計測技術を用いたディーゼルパーティキュレートへのオイル消費寄与度解析とその改善、トヨタ技報
-

表1 放射線利用の分類と基本になる現象および方法

R I ・ 放 射 線 利 用	放射線情報利用 ＝ 計測応用	放射性同位体自体の計測 (物質との相互作用なし)	自然放射能の計測 放射性同位体(信号源)の追跡計測
		放射線と物質との 相互作用の計測 (放射線応用計測)	放射線の受ける変化の計測
			2次的に発生する放射線の計測
			気体電離で生ずるイオンの計測
	放射線エネルギー 利用 ＝ 照射効果応用	物理学的作用効果	気体電離、蛍光体発光、起電力発生、熱発生
		化学的作用効果	活性種生成、橋かけ、崩壊、重合、グラフト重合、 分解・合成など
		生物学的作用効果	殺菌、発芽防止、細胞破壊、突然変異など

[資料提供] (有)応用量子計測研究所

表2 RI・放射線の計測応用分類

応用の基本になる現象	計測の原理・方法	技法	応用分野・応用例(理工学関係)
放射性壊変そのもの (自然放射能)	放射性核種存在比測定	放射能測定、加速器質量分析 自然放射線計測	地球科学・考古学試料等の年代測定 地層探査、鉱物資源探査、選鉱
放射線放出そのもの (信号源)	放射体追跡測定	放射性トレーサ利用 同位体利用分析	流量、漏洩、拡散、摩耗など物質移動の測定 同位体希釈法、放射分析法
	放射体分布測定	オートラジオグラフィ 放射型CT	合金組織・腐食の解析、鋼材表面元素分布測定、 気液2相流の挙動調査
放射線の受ける変化	透過減弱(β , γ , X , n)	透過型工業計測	厚さ、密度、濃度、レベルなど計測
		透過像撮影(ラジオグラフィ)	X線、 γ 線非破壊検査
		透過型CT	物体内部の断層非破壊検査
	散乱(α , β , γ , X)	後方散乱線計測	膜厚さ、地層密度計測、
	回折(X , n)	結晶回折解析	分子構造、物性状態、残留応力など測定
	減速(n)	中性子減速・熱化	水素・水分測定
2次放射線発生	共鳴吸収・散乱(γ , n)	メスバウアースペクトロメトリ	材料科学、考古学における元素存在状態の分析
		中性子共鳴吸収	非破壊元素分析および分布測定
	特性X線誘起(γ , X , p)	蛍光X線分析、PIXE	各種試料の元素分析、大気浮遊塵分析調査
	即発 γ 線誘起(n)	中性子捕獲 γ 線分析など	石炭・鉱石等のコンベアベルト上分析
	放射化(n , p ほか)	中性子放射化分析など	各種試料の微量元素分析
気体電離	陽電子消滅(e^+)	陽電子寿命測定、2光子角度 相関測定	物性(原子価電子状態)の研究
		電離電流変化測定 イオン移動度測定	煙感知器、ガスクロマトグラフ(ECD) 麻薬・爆薬検知器

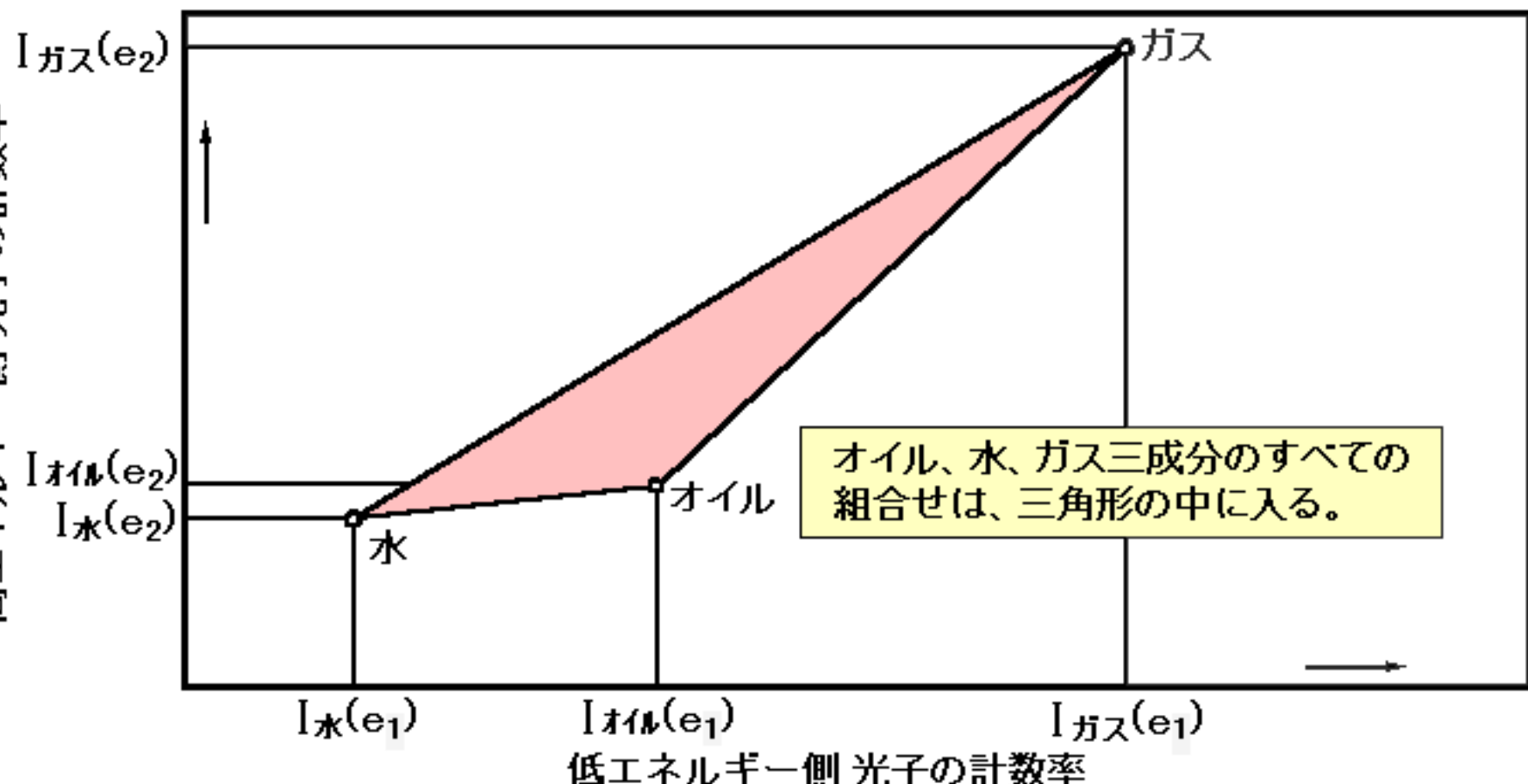


図1 二重エネルギー光子透過減弱法による
オイル・水・ガス三成分の計測

[出典] A.M. Scheers: An Oil/Water/Gas Composition Meter Based on Multiple Energy Gamma Ray Absorption (MEGRA) Measurement, IAEA-TECDOC-1142 (Emerging new applications of nucleonic control systems in industry), IAEA (2000)

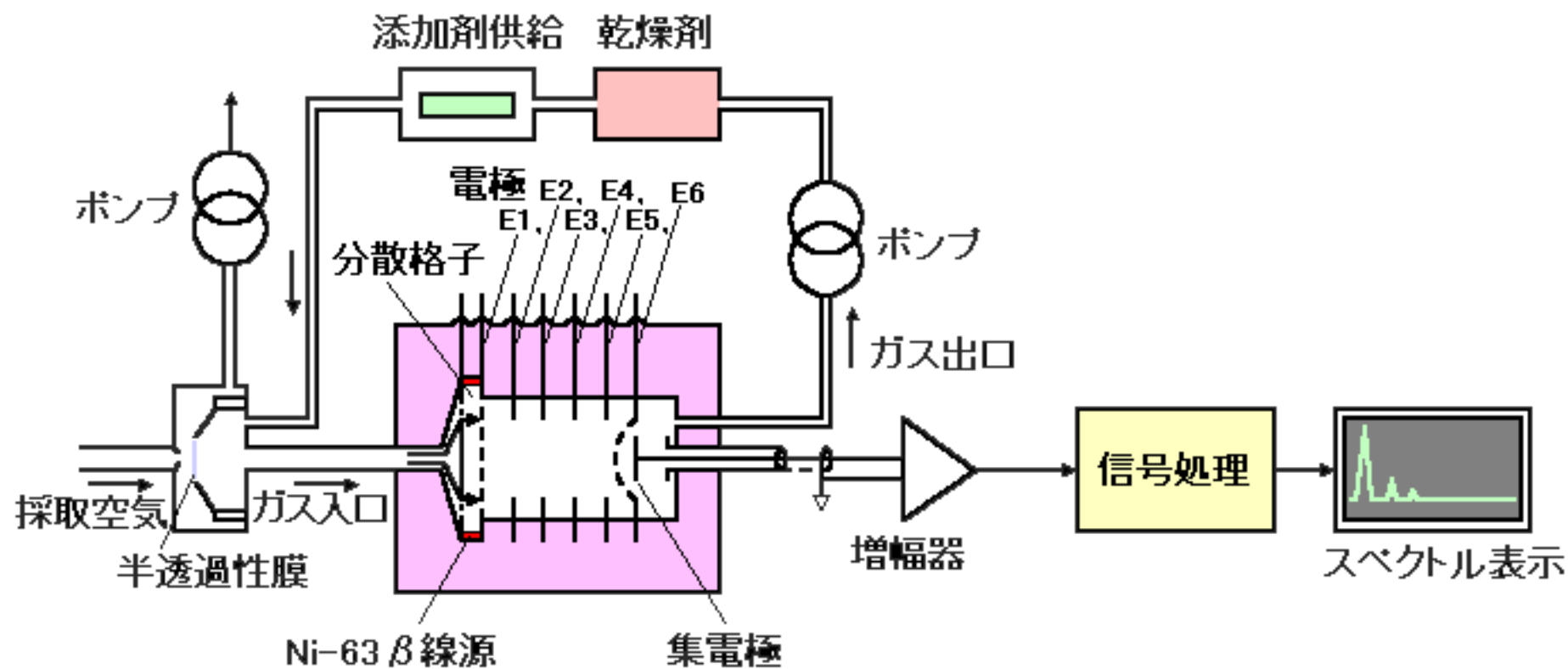


図2 イオン移動度スペクトル測定による麻薬・爆薬の検知

[出典] ポータブル分析器“Vapor Tracer”取扱マニュアル、Ion Track Instruments社(米)