

アイソトープ工業利用における最近の進歩

加 藤 正 夫

放射性同位元素の工業利用について、最近 2, 3 年の顕著な進歩状況を解説した。放射化分析、線源利用物理分析、応用機器、トレーサー、ラジオグラフィーについて述べた後、特に地球物理学や、宇宙工学における利用、アイソトープ電池の開発、計測法の進歩などをとりあげたが、食品照射、放射線殺菌、放射線化学に関しては割愛した。

1. ま え が き

放射性同位元素の工業利用は大別して、放射線応用機器、ラジオグラフィー、放射線照射、電離線源利用、トレーサー利用、分析利用、その他になる。1964 年 3 月、ウィーンで国際原子力機関 (IAEA) 主催により、工業利用の経済性に関する討論会が持たれた。この討論会は 1962 年 IAEA が全世界的に工業利用の実態調査を行なった結果にもとづいて行なわれたものであり、最近刊行された報文集¹⁾によると、工業利用の傾向は国によってかなり異なるが、放射線応用機器とラジオグラフィー応用がほとんどすべての国でもっとも広く利用されていることがわかる (表・1)。

表・1 アイソトープ工業利用の現況
(1961-1963 年のうち 1 年間の集計)

	ゲージの 設置数	ラジオグ ラフィー 線源数	トレーサ 利用	電離作用 利用
アルゼンチン	33	27	6	—
オーストラリア	125	50	12	—
オーストリア	34	30	5	—
ベルギー	144	51	7	3
カナダ	1394	145	—	1022
チェコスロバキア	115	168	38	16
デンマーク	174	21	14	45
フィンランド	69	8	—	8
フランス	1465	500	210	24
西ドイツ	2000	300	65	—
日 本	341	170	58	34
オランダ	304	135	—	16
ノルウェー	84	16	5	4
ポーランド	219	80	15	18
ポルトガル	8	10	2	—
南アフリカ	113	48	9	11
スペイン	41	17	2	58
スウェーデン	480	80	28	—
イギリス	2037	706	126	472
アメリカ	8000	—	560	—
ユーゴスラビア	41	124	28	11

またこの報文集には、世界の主要な工業国の 1961 年～1963 年における 1 年間の利用の実態および、利用方法別に専門家が集めた論文が載せられているので、その後に開発された新しい進歩を中心に述べてみたい。

なお放射線化学の工業利用放射線照射による食品貯蔵の期間延長や各種物質の殺菌など、最近工業化が行なわ

れつつあるが、ここでは省略したことをお断わりしておく。

2. 放射化分析

原子炉の熱および速中性子による中性子放射化分析にかぎらず、各種加速器を用いて陽子・重陽子・アルファ粒子を加速し、照射して分析する方法が行なわれている。放射化された核種の放射能を測定する場合、化学分離を行なう場合と行なわない場合とあるが、いずれにせよ、その工程を自動化しようという傾向が顕著であり、すでに化学分離をしない場合、放射化した試料を原子炉または加速器から自動計測装置に送り、計算機の助けをかりて分析データをうる装置が開発された²⁾。とくに生成核種の半減期の短い場合にこれら一連の操作の自動化は威力を発揮する。このような顕著な傾向は 1964 年私が出席した二つの国際学会、第 3 回世界原子力平和利用会議と放射化学分析に関する IAEA シンポジウムとにおいてクローズアップされた。

また 14 MeV の中性子発生装置の工業利用の研究が行なわれ、金属中の酸素、油中の微量元素の定量などに用いられつつあるが、この方法の欠陥はトリチウム (T) ターゲットの寿命が短いことにある。この点を改善する試みもいくつか発表されている。たとえば T と D をエルビウム (^{68}Er) に吸着させたものをターゲットとし、D と T のイオンビームでたたいて (D, T) 反応をおこさせる方法³⁾によれば、100 時間以上中性子束を一定にすることができる。

一方 Steele⁴⁾ は、サイクロトロンで 7 MeV の D または 12 MeV の T ビームを作り、Li, Be, B をたたいて中性子を出して放射化分析する方法を研究している。ビーム電流 $1 \mu\text{A}$ あたりの中性子発生数は (D, T) 反応と同程度であり、しかも (D, T) 反応では不可能な長半減期の速中性子生成物、たとえば $^{47}\text{Ti}(n, p)^{47}\text{Sc}$ (半減期 3.43 日) により Ti の分析が可能であるほか、発生する中性子のエネルギーを変えることにより、(D, T) 反応では ^{62}Cu , ^{64}Cu の生成によって分析不可能な、銅合金中のバナジウム、燐などの分析ができる。

放射化分析はきわめて微量な元素を検知することができるという点を生かして、法医学や犯人捜査、芸術作品

の産地や年代決定などにも利用されてきている。すなわち、人体の毛髪中に含まれている 30 元素のうち 10 元素を比較することにより 1500 万人のうちの 1 人を識別することができるという研究⁵⁾ やピストル発射時に手につく Sb や Ba を検出することにより犯人捜査を容易にする研究⁶⁾ などが行なわれている。絵画の鉛白によって製作年代をきめる方法や、大理石中に含まれている元素が産地によって異なることを利用した古代ギリシャ建築物の産地の推定法なども開発されている。

さらにまた、少量の試料を非破壊のまま分析することができるという特長を利用して、同一試料を中性子照射条件をかえて数回原子炉に入れ、少量の隕石中の Al, Mn, Fe, Sc, Na, Co, Ni などの分析を行なった Fisher⁷⁾ は、将来宇宙科学の進歩に伴い、採取した宇宙塵や月面の物質などの分析にもっともすぐれた方法であると称している。

このほか原子炉をパルス状のピーク出力で働かせ、短半減期放射性核種によって分析する方法も試みられた⁸⁾。TRIGA Mark I (250 kW 7.8×10^{12}) を半値幅ピーク出力 10⁶ kW で働かせたとき、半減期 1 秒のものの放射能生成量は通常運転時の飽和値の 50 倍に達し、1 分以内の半減期のものの分析に有利である。

3. 物理分析

熱中性子捕獲 γ 線や速中性子非弾性散乱 γ 線を利用して鉄鉱石中の鉄分⁹⁾、岩石層中の Al, Fe, Si¹⁰⁾、石灰中の C, O¹¹⁾ などを分析する方法が開発された。迅速連続分析が可能であるという点で注目される。中性子線源として Ci オーダーの ²³⁹Pu/Be, ²⁴¹Am/Be などのアイソトープを用いることもできるが検出精度がわるいので、中性子発生装置を用いる方法も研究されている。

蛍光 X 線分析では ³H, ¹⁴⁷Pm からの制動放射線のほか、目的元素の吸収端エネルギーより幾分エネルギーの大きい γ 放射線源として ¹⁵³Gd, ²⁴¹Am, ⁵⁷Co, ¹⁰⁵Cd の利用、軽元素分析のための ⁵⁵Fe, ²¹⁰Po などの利用法が開発された。錫・亜鉛、銅・鉄などの鉱石、スチール中の重元素、セメント原料中の成分などの分析に利用されているほか、³H/Ti-2.5 Ci の制動副射線源を用いて 0.2 容積%までの SO₂ の分析法¹²⁾ が発表された。また、この線源を使って、郵便スタンプインク中に酸化亜鉛または硫化亜鉛を含ませておき、ハガキのスタンプ内に含まれる亜鉛の KX 線を検出して自動的にハガキを選別する方法¹³⁾ も開発された。1 秒間に 360 m の速さでうごくコンベヤ上のハガキを 1 時間に 40,000 枚選別することができる。各種のメッキ厚さも基層と被覆層の金属組合せいかんにより、エネルギーの異なる蛍光 X 線源を使い分ければ、数 10 秒間で 1~2% の精度で測定することができる。

X 線または低エネルギー γ 線の背面散乱を利用した

石炭の灰分測定は、含有する鉄分いかんによりかなり結果がばらつく欠点があった。この鉄による散乱 γ 線の吸収を、検出装置の改良によってその有感範囲に鉄の KX 線を含ませるようにして補償する方式が開発され、5~45% の灰分を 0.2~0.8% の精度で測れるようになった。

メスバウアー効果は物理学の基礎分野、核または分子構造の研究に威力を発揮しているが、すでにいくつかの工業的な応用面が開発された。たとえばこの効果を利用して宇宙ロケットがランデブーまたはドッキングするとき、あるいは月面への接近時などの制御を行なう方式^{14), 15)} が発表されている。2~3 m の距離に接近したときの最終的な相対速度は秒速数 mm になるものと予想されるので、もはやレーダーで正確に制御することが不可能となる。一方メスバウアー効果による制御距離は約 30 m 以下なので、それ以上の距離の制御は γ 線束が距離の逆 2 乗によって変わることを利用し、レーダーの補助とする研究も行なわれている。

これまで、メスバウアー効果をもっとも応用された分野は、ターゲット核種の物理的・化学的状態の研究であった。この核のエネルギーレベルが、局所的な磁場や荷電密度や電場の傾きによって影響されるという意味で、これらの研究はメスバウアースペクトロスコーピー⁶⁾ と称されている。⁵⁷Fe や ¹¹⁹Sb などをターゲットとして、酸化鉄やヘモグロビンの化合形の相違を判別したり、合金中の金属間化合物の同定や相の識別に応用されつつある。

4. 放射線応用機器

厚さ計・密度計・水分計・レベル計などは、ますます多くの工業面で自動制御に取り入れられつつある。こうした従来使用されている応用機器のほかに、放射線の透過散乱を利用した新しい応用も現われてきた。

β 線の背面散乱を利用してスチールの硬度を測る方式が研究されている。背面散乱 β 線束が硬度によって異なる効果は結晶粒度の相違によるものと考えられるが、経験的に発見されたものである。しかしなお理論的説明が明らかでないので、硬度計として使用できるまでには、なおいっそうの研究が必要である。

海底の沈積物の密度をその場で ¹³⁷Cs などの γ 線源からの散乱線を検出することによって測り、水分を中性子散乱によって測る方式¹⁷⁾ が研究されている。また深海の流れの方向と流速を測定する装置¹⁸⁾ も開発されている。この装置は通常の流速計では測定できないきわめて遅い流速を測るもので、中央のアイソトープ放射器のまわりに半径 20 インチの円状に 16 本のシンチレーションプローブが配置してあり、約 1800 m の水深にたえるように作られてある。約 1 μ c 程度のアイソトープを瞬間的に放流し、16 本のプローブのうちどのプローブの近くを何分後に放射能ピークを作って通過したかを記録計

算して流速と流向を求めるものである。アイソトープとしては ^{131}I を内蔵して用いるほか、中性子線源として 10 Ci の $^{241}\text{Am-Be}$ を内蔵しておいて、熱中性子放射化断面積の大きいインジウム溶液を放射化し、半減期 54.2 分の ^{116}In を利用するいわゆるアイソトープ製造器を用いることもできる。最近の報告によれば、この装置によって湖水の流れの測定が成功裡に行なわれている。

海中中の放射能を測定する場合、そのガンマ線スペクトルを求めている場所で同時にその地点の水温、水圧を知ることができれば好都合である。このために海水の放射能による γ 線スペクトルに影響を及ぼさないような低エネルギーの γ 線源を用い、その γ 線の透過を利用して水圧と水温を測る方式¹⁹⁾ が検討されている。温度計はバイメタルコイルに γ 線をとりにつけたもので、 0.01°C の精度で、また水圧計は Buordon 管に γ 線をとりにつけてフルスケールの $\pm 2\%$ の精度ではかれる。

40,000 m 以上までの上空の空気密度が ^{85}Kr からの β 線の空気による散乱線をアンストラセンシンチレーターで検出することにより測定することができるようになった²⁰⁾。線源と検出器との距離を適当に保つことにより高度の函数として空気密度が測れる。バックグラウンドを自動補償して計数率を直流信号に変換し、送信機で地上の観測所へ送るようになっている。

5. トレーサー利用

河川流量測定では、注入アイソトープの数量および水中検出器の効率を正確に求めておかなくともよい方法²¹⁾ が考案された。すなわち、注入アイソトープの一部を少量正確に計量してとっておき、測定地点における 1 個の採水試料と比較計数する方法で、従来の方法より誤差の要因を少なくしうるため正確な測定が可能である。

また一般に流量測定の場合、測定地点で横拡散が十分に行なわれていることが必要である。この注入点から、横拡散が均一に行なわれる地点までの距離を混合距離と称している。この距離をできるだけ短くするために、パイプの流量測定にポンプを用いて拡散させたり、河川の場合に同一断面の数カ所から同時に注入したりする試みも行なわれたが、この混合距離を計算する有効な実験式はまだ得られていない。

河川や海岸の沈積物や漂砂の追跡では、単に移動方向を知るだけでなく量的な移動を求める試みが行なわれている。イギリス²²⁾ では ^{46}Sc ガラス砂約 10~100 Ci を沈積シルトに懸濁して河口に入れ、この放射性シルトの上流への移動を追跡した。この場合検出器としてコリメートしたシンチレーションプローブを用いることにより、垂直方向のトレーサーの分布も計数して、この実験では注入地点から上流には総使用量の 30% 以上のシルトが移動していることを明らかにした。

また放射性砂の投入量を増してゆく傾向を批判して使

用砂粒の数を限定し、しかも一粒の比放射能をたとえ 20 cm 程度砂中にもぐっていても検出できる程度に大きくしてトレースする方法²³⁾ も発表された。この方法では検出可能な領域内にある一粒の放射性砂の位置ともぐっている深さが、パルス高さから推定することができるので移動量の計算もできるようになる。

地下水の移動を追跡する場合には、地下水の流速と流向を明らかにすることが大切である。この目的で中心に放射性溶液の注入装置、周囲 4 カ所に検出器を配置した直径 19 cm 高さ 47 cm の流向流速測定装置²⁴⁾ および単井の中心に放流した放射性液が周囲の層に滲透しているのを、井戸の内壁に沿ってコリメートした検出器を 30° または 45° おきに回転させて計数し、各計数値から得られるパターンから流向を求める方法²⁵⁾ などが開発された。

Chleck²⁶⁾ は、 ^{85}Kr をイオン衝撃法または高温高压下での浸透や拡散によっていろいろな化学的形狀の物質に標識する方法を開発し、こうして標識した物質をクリプトネートと称している。このクリプトネートは、常温で安定であり、不活性元素の Kr と物質との化学反応も生じないからその物質本来の性質を変えることのない万能標識法である。温度を上げると Kr を放出するが再び一定にすると安定となる。したがって温度を一定に保てば、物質表面における物理的・化学的変化の進行度合は放出される ^{85}Kr の放射能に比例する。この原理を応用して、 O_3 の分析、金属面の酸化や腐食の度合、黒鉛の表面積の測定などに用いられるほか、最近ではエンジン部品の動作温度の測定のような現場実験にも適用されている。

以上のようなトレーサー技術は放射能遊離法と称され最近特に注目されている。この方法は非放射性物質を分析する目的でその物質と化学反応をする放射性試薬を加え、化学反応の結果遊離されて出てくる放射能を測ることによって間接的に定量する分析法である。現在まで、水中のパナジウム²⁹⁾ (^{110m}Ag 使用)、汚染大気中の SO_2 ガス²⁸⁾ ($\text{K}^{131}\text{IO}_3$ 使用)、水中溶存酸素²⁹⁾ (^{204}Tl 使用) などの分析方法が発表されており、これらの諸方法を開発した Gillespie は、深海中の酸素をその場で測定するためにこの方式の溶存酸素計を開発中である。

このほか数多くのトレーサー利用における最近の進歩がみられるが紙面がないので割愛する。

6. ラジオグラフィ

γ 線ラジオグラフィ用線源としては、高密度厚肉ものに対して高エネルギーの ^{60}Co 、低密度薄肉ものに対して中エネルギーの ^{192}Ir を用いる傾向に進みつつある。一般に精度を上げるには、比放射能の大きい線源を用いればよい。AEC の報告によれば ^{60}Co では 6 年前の 70 Ci/g から 160 Ci/g に、 ^{192}Ir では 175 Ci/g から 300 Ci/g といずれも 2 倍近くになっている。この傾向はさらに続くも

のと考えられ、400 Ci/g の ^{60}Co が使用されるのも間もないことと思われる。

照射装置が小型で持ち運びできることは、 γ 線ラジオグラフィーの重要な利点である。したがって軽量小型化をはかるために最近ではウラニウムを用いる傾向にある。こうすれば、100 Ci の ^{192}Ir 照射装置の場合 17.2 kg で済む。鉛しゃへいでは 79.4 kg となる。線源 (1×1 mm ϕ) の放射能の強さも数年前の ^{60}Co 1 Ci 程度から、現在は数 10 Ci のものが普通となりつつある。この割合だけ露出時間が短くなる。

フィルムを用いなくて欠陥を直視する装置の研究も進められており、その 1 例として pn 接合半導体を検出器とする装置も開発されている。この研究³⁰⁾によると、半導体表面で 2 mr の露出のとき、2% 線束が変わる欠陥に対して S/N 比が 15:1 となり、走査速度も 1 分間に 15~30 cm まで可能である。

イギリスでカラーフィルムを用いたラジオグラフィーの研究³¹⁾も行なわれた。フィルムの現象のさい黄色のフラッシュを使用する必要があるが、得られた像は鮮明度、分解能、色彩範囲の広さ、コントラストの点できわめてすぐれていることがわかった。

ANL の Berger³²⁾ らによって開発された中性子ラジオグラフィーは、放射性物質、原子炉制御材、U, Pu, W などの重金属試料、ポリエチレンなどの含水素物質の探傷に有効である。中性子源としては原子炉を用いているが、中性子発生装置の応用に関する研究も行なわれている。合成樹脂やコンクリートなどの非破壊検査に用いられる可能性があるので注目される。

7. 資源工学への応用

1965 年 10 月、ワルソーにおいて、IAEA 主催の工業と地球物理学における放射線応用機器に関するシンポジウムが持たれ、引きつづいてクラコウで資源開発へのアイソトープ利用のパネル討論会が行なわれた。最近私はこの両国際会議に出席する機会を得たので、この分野における最近の進歩についてふれておきたい。

資源開発へのアイソトープ利用は実験室または野外で使用される鉱石や岩石の分析機器、採鉱選鉱工程における密度計、レベル計、放射線応用スイッチなど応用計測機器、各種放射線を利用した検層、およびレーザー利用に分けられる。このうち、分析およびそのほかの応用機器についてはすでに述べてきたので、主として検層技術について述べる。

放射能検層には自然放射能検層、ガンマ検層、中性子検層の三つがある。このうち中性子を用いる方法はさらに、n-n 法、n- γ 法、中性子放射化法、中性子寿命法に分けられる。中性子検層法は中性子源として、パルス的に中性子を発生する装置が開発されてからとくに有効な検層方法となった。

ソビエトで開発されたパルス中性子発生器を組み込んだ検層プローブ³³⁾は、直径約 10 cm 長さ 3 m 程度のもので、5 インチのケーシングに入れて深さ 3,000 m まで検層することができる。中性子パルスは 100~400 μS 、繰返し周波数 200~300 サイクルで、トリチウム・ターゲットを重水素でたたいて $2\sim 5\times 10^7$ n/sec の中性子が得られる。組み込んである検出器は BF_3 管である。このほかに 10 cm ϕ ×4 m のプローブで、100~150°C に耐え、 γ 線用検出器として NaI (Tl)、中性子検出用として ZnS(Ag) を組み込んだものもある。この型のものの中性子発生装置は前のものと異なるが、特性はほぼ同じである。

パルス中性子発生装置は、検層だけでなく探査、分析、選鉱などにも応用できるので今後の研究が待たれる。

このパルス中性子発生器を用い、塩水と真水、ガス層と水層との差により熱中性子の寿命が 300~500 μS を中心として大きく変わることを利用したいわゆる中性子寿命検層法 (neutron life time logging) が開発された。この方法は時間的に中性子密度が周囲の地層の特長と関連して変化することを利用したものである。同じ方法で捕獲 γ 線の寿命を求める方法と比較し、中性子によるほうが有利であることをモデル実験で実証した結果³⁴⁾も発表された。

8. 計測法の進歩

ここ数年の間に放射線測定器のトランジスター化が進められ、主要なものはすべてトランジスター回路を用いて小型化された。また多次元マルチチャンネルアナライザー³⁵⁾も作られ、これとコンプトン消去低バックグラウンド γ 線検出プローブとを組み合わせ、フォールアウトや生物試料などのように多くの微量の放射性核種が混在する場合でも単時間内に分析することができるようになった。

検出器としては、NaI(Tl) に代わるものとして CaI (Eu) が、光出力、 γ 線の分解能ともにすぐれているため注目されているが、製造上の問題が解決されていない。最近の半導体技術の進歩により、半導体検出器が使用されるようになったことが最も大きい進歩といえよう。

Li-drift Ge が、液体空気の温度に冷却して使用した場合、 γ 線に対する感度、分解能ともに最もよいとされているが、室温では Li-drift Si のほうがノイズが小さいため有利である。室温で使用できる高原子番号半導体検出器と高分解能 γ 線スペクトロメーターに関する研究も行なわれており、Cd-Te、Ga-As などがその対称となっている。現在までの成果では半導体検出器の γ 線計数効率率は 1% 程度で、2 MeV 以下の γ 線に対してシンチレーターよりも分解能のよいものが作られているが、将来

シンチレーターにとって代わる時代がくるものと期待されている。

放射線測定器や応用機器に計算機を組み合わせる自動的にデータを出したり自動制御を行ったりする方法が用いられている。測定器では、放射化分析に用いられる γ 線スペクトルの電子計算機による解析法が確立され、前述の放射化学分析に関する IAEA シンポジウムにおいて数篇の論文が発表された。応用機器でも、国内でセメント原料の蛍光 X 線分析装置に應用している³⁶⁾ほか、諸外国においてもその傾向が強まりつつある。

9. 宇宙工学への利用

宇宙におけるアイソトープ利用についてはすでに若干ふれてきたが改めて分類してみると、補助電源すなわちアイソトープバッテリーとしての利用、ゲージングや分析への応用、宇宙ロケット燃料などの非破壊検査、トレーサー利用そのほかに分けられる。このうち、アイソトープバッテリーについては次節にゆずり、そのほかの利用面についてふれたい。

ゲージングとしては、すでにのべた β 線の前方散乱を利用する空気密度の測定のほか、X 線や γ 線の背面散乱を利用する方式も研究されている。燃料タンクのゲージングシステムや高度測定への X 線利用も検討されており、宇宙空間における各種粒子や γ 線の検出装置はすでにロケットに積載して使用されている。

分析方面では、14 MeV の中性子発生装置による月面や宇宙塵などの物質の非破壊放射化分析をはじめ、中性子非弾性散乱や α 線散乱による月分析に関する基礎研究などが行なわれ、人工衛星に積載して月面分析を行なう小型分析装置も考案されている。

トレーサー利用としては、無重力場におけるプロペラントゲージとして、⁸⁵Kr ガスをタンク内に注入しておき、プロペラントの消費とともに ⁸⁵Kr が非放射性ガスによって希釈されることを利用した方式³⁷⁾の研究、アイソトープを用いた摩滅検出、プロペラントの混合の度合を判定するために ¹³¹I, ¹¹¹Ag, ⁵⁹Fe, ¹³⁷Ba を用いた例などがある。

非破壊検査もまた宇宙ロケット構成物にとって重要である。ジェットエンジンの γ 線ラジオグラフィーをはじ

めとして、10 MeV 前後の加速装置も使われている。 β 線の背面散乱を利用して、ロケットモーターやボラリスケースの欠陥検査を行なった例もある。

放射線損傷に関する研究は枚挙にいとまないほどあるが、ここではふれないことにする。なお今年 2 月中旬アメリカでアイソトープの宇宙工学への利用に関する世界で最初のシンポジウムが行なわれることになっており、筆者に招待状がきているので参加の予定で準備中である。

10. アイソトープ電池

アイソトープから放射される放射線のエネルギーを熱源とし、Te-Pb, Si-Ge などの熱電変換素子を用いて電気エネルギーを得る、いわゆるアイソトープ電池に関する研究は、核分裂生成物の利用の促進を計るという点からも注目され、各国で検討がすすめられている³⁸⁾。現在実用されているのは、人工衛星用補助電源、無人氣象観測所やブイや暗礁表示用に海底に設置する音波発生器の電源として実用されている。

この種の電池の利点は、化学的作用を用いる燃料より 10 万倍も熱エネルギーが大きいこと、使用期間が半減期できまり、半減期の長いものを選べば 2~5 年の安定な電源が得られること、可動部分がなくまた外部から制御する必要もないこと、小型で信頼性も高いことなどである。

しかし、放射線電気変換効率が数%以下であるため、場合により数十万 Ci ものアイソトープを用いることが必要となり、しゃへいや安全取扱い上の困難がある。放射線源として用いられてきた将来性ある核種の関連する諸特性は表・2 のとおりであり、⁹⁰Sr, ¹⁴⁷Pm, ¹⁴⁴Ce は地球上に設置する小電力用として、また ²¹⁰Po, ²³⁸Pu ²⁴⁴Cm などはエネルギー密度が格段に大きいので主として宇宙ロケット用として研究実用化されている。

アイソトープ電池製造にあたっては、使用するアイソトープの処理だけでなく、熱電変換素子の研究、熱電導の問題、しゃへいと放射線防護対策など多くの工学的問題を解決しなければならない。筆者らは共同してこれらの問題を解決する目的で研究所内に研究会を持ち、基礎的な調査研究を行なっている。

表・2 熱源としてのアイソトープの特性

核種	化学的形狀	放射線	半減期	Watt/g	Watt/cm ²	Ci/Watt	年間製造量 (MCI)*	
							1964 年	1970 年
⁹⁰ Sr	SrTiO ₃	β	27.7 年	0.21	0.7	154	3	25
¹³⁷ Cs	ガラス	β, γ	27 年	0.072	0.215	210	1	25
¹⁴⁷ Pm	Pm ₂ O ₃	β	2.6 年	0.18	1.0	2700	0.1	50
¹⁴⁴ Ce	CeO ₂	β, γ	285 日	2.3	13.8	128	1	200
²¹⁰ Po	メタル	α	138 日	140	1320	31.6	0.1	3
²⁴² Cm	Cm ₂ O ₃	α	162 日	120	1170	27.6	0.06	0.3
²⁴⁴ Cm	Cm ₃ O ₃	α	18 年	2.5	22.5	28.6	—	0.2
²³⁸ Pu	メタル	α	90 年	0.48	9.3	29.0	0.1	0.6

* 年間製造量はアメリカ原子力委員会のレポートによる。

11. む す び

以上最近の進歩についてのべてきたが、このほかにも多くの進歩がみられ、工業各分野にわたってますます広く利用されてきている。いままで製造されにくかったアイソトープもいくつかその製造方法が開発され、また数多くの比放射能の高いアイソトープ標識化合物も作られるようになったので、今後さらに新しい利用方法・利用分野が開拓されるものと期待されている。

最近の世界の大勢は、原子力平和利用の一面である動力利用が実用期にはいろいろとしているが、もう一つの面であるアイソトープ利用も初期段階を脱脚し、いまや大きな発展期にはいつてきた感がまことに深い。

(1966 年 2 月 2 日受理)

文 献

- 1) Industrial Radioisotope Economics. IAEA, 1964
- 2) R. E. Wainerdi: Isotope System Development Program. p. 17 Dec. 1965
- 3) J. M. A. Lenihan: Nucleonics. **23** 2 65 ('65)
- 4) E. L. Steele: Isotope System Development Program. p. 14 Dec. 1965
- 5) F. W. Lima, et al.: IAEA Symp. on Radiochemical Methods of Analysis SM-55/114 ('64)
- 6) P. R. Ruch, et al.: Nuclear Science and Eng. **20** 381 ('64)
- 7) D. E. Fisher: IAEA Symp. on Radiochemical Methods of Analysis SM-55/45 ('64)
- 8) H. P. Yule, et al.: *ibid.* SM-55/115 ('64)
- 9) R. Christell, et al: *ibid.* SM-55/28 ('64)
- 10) K. Kyznetsov, et al.: SM-55/121 ('64)
- 11) T. C. Martin, et al.: Int. J. of App. Rad. and Isotopes **15** 331 ('64)
- 12) M. Stoepler, et al.: IAEA Symp. on Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics SM-68/8 ('65)
- 13) G. Robin, et al.: *ibid.* SM-68/9 ('65)
- 14) R. Jr. Zito: Space/Aeronautics **40** 12 90 ('63)
- 15) R. B. Matthaws, et al: Proc. of IEEE 1963 National

- Space Electronics Symp. Oct. 1-4, 1963
- 16) F. C. Ruegg, et al.: IAEA Symp. on Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics. SM-68/17 ('65)
- 17) B. F. Wilson: Isotope Systems Development Program. p. 27 Dec. 1965
- 18) W. H. Johnston: USAE Report JLI-2748-0-7 ('63)
- 19) G. Peil: Isotope Systems Development Program. p. 35 Dec. 1965
- 20) L. L. Bird, et al.: USAEC Report NYO 10220 ('63)
- 21) R. P. Gardner: Int. J. of App. Rad. and Isotopes **15** 339 ('64)
- 22) D. B. Smith, et al.: AERE-R 4980 ('65)
- 23) G. Courtois: Int. J. of App. Rad. and Isotopes **15** 655 ('64)
- 24) J. Souffriau, et al.: Nuclear Structural Eng. **1** 338 ('65)
- 25) M. Borowczyk, et al.: Nukleonika **10** 1 19 ('65)
- 26) D. Chleck: IAEA Symp. on Radiochemical Methods of Analysis SM-55/41 ('64)
- 27) A. S. Gillespie, et al.: Anal. Chem. **36** 2493 ('64)
- 28) H. H. Ross, et al: IAEA Symp. on Radiochemical Methods of Analysis SM-55/49 ('64)
- 29) H. G. Richter, et al: Chem. **34** 1116 ('61)
- 30) N. A. Baily, et al.: Int. J. of App. Rad. and Isotopes **15** 523 ('64)
- 31) R. W. Parish: Brit. J. Non-Destructive Testing **6** 4 103 ('64)
- 32) H. Berger: ANL-6846 ('64)
- 33) D. F. Bespalov, et al.: Proc. of Nuclear Geophysics Conf. Cracow p. 483 Sept. ('62)
- 34) R. L. Caldwell, et al.: IAEA Symp. on Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics SM-68/31 ('65)
- 35) R. W. Perkins, IAEA Symp. on Radiochemical Methods of Analysis SM-55/53 ('64)
- 36) 内田, 富永, 今村, 三輪: IAEA Symp. on Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics SM-68/6 ('65)
- 37) J. F. Wakeman: Isotope Systems Development Program p. 54 Dec. 1965
- 38) R. P. Perret, et al: Atompraxis **11** 9/10 508 ('65)

次 号 予 告 (5 月 号)

研究解説

モンテカルロ法とその応用.....	森田	脇淵	義謹	雄也
分散型遅延回路測定用パルス発生器.....	尾高	上木	守幹	夫雄
	藤	本		洋
合成化学における薄層クロマトグラフィーの二三の応用.....	浅早	原野	照茂	三夫

研究速報

マトリックス変位法による骨組の解析(その1).....	川	股	重	也
-----------------------------	---	---	---	---