

〈特集：放射線の利用と防護〉

理学・工学分野における放射線の利用

木村重彦

1. はじめに

原子の中には、その原子に固有な崩壊速度で固有な放射線を出して違う元素になっていく放射性同位元素（以下に RI という）が存在することは、前世紀の末から見出され始めました。その後、放射線測定装置の開発で種々な放射線を詳しく定量し、また原子炉や粒子加速装置等の開発で種々な RI を造っていく中で、ここ約30年の間に、諸科学の研究、身近に数多い生活諸用品を含む諸材料の生産、そして環境汚染への対処等の多分野で、放射線と RI は広く利用されるようになり、今後は更に大きな進展が見込まれています。

しかし、わが国では原子力平和利用の現況についての紹介や理解が必ずしも十分とは思えません。そこでわが国での原子力の理工学利用のうち、最先端の科学研究や工業技術への利用は省いて、主に身近な生活に利用されているものを主体に、その現状を利用方法別に紹介してみます。

2. 放射線で起きる化学反応の利用

1) 人工の電子線の利用

電子線をテレビのブラウン管と同じ原理で発生させ¹⁾、新しい材質の開発や諸公害物質の処理に利用しています。

a. 新しい材質の開発 ア. 表面の硬化：諸材質の表面に樹脂や塗膜を塗るときの乾燥に電子線照射を使うと、一般の熱反応で起きないラジカルが高濃度ででき、次にその連鎖重合反応で高分子量化して硬化に至る反応が、僅か1秒内に済みます²⁾。

この電子線硬化法を一般の熱・赤外線・紫外線を使う加熱法に較べると、①照射深さを薄い樹脂や塗膜に限ることができて、省エネ・低コスト、②反応は製品

の温度に関係なく、照射での発生熱も少ないので、一般の加熱法で対処できないプラスチック・紙・木材等に利用可能、③反応が瞬時なので高速のライン生産が可能、④溶剤がない又は少量にした塗料に使えるので、加熱法で発生する有毒な溶剤の大量な酸化に対する高額の環境汚染対策コストを大幅に減らし、⑤装置は小型、操作が簡単、省スペース等の利点をもちます²⁾。

しかも塗膜面は、①強度が鉛筆の6H以上に高くなって傷つきにくく、②汚れの色がつきにくく、③汚れを水で洗い落としやすく、④折り曲げでひび割れしにくく、⑤耐候性や耐薬品性に勝れる等の利点をもちます³⁾。

このため、身近な冷蔵庫・洗濯機の側板、自動車・オートバイの諸部品、鋼板、セメントボード、セメント瓦、石膏タイル等への塗装のほか、包装紙・カード・紙器、レコードジャケット、プラスチック、プリント配線の基盤、防曇フィルム等への印刷やコーティング、そしてフロッピーディスク、粘着フィルム、金属蒸着紙、薄膜紙、塩ビ被覆鋼板等の接着や剝離に利用されています²⁾。さらに自動車タイヤの硬化、ホイールの塗装、ホテル等のロビーでプラスチックや石膏の壁に透明な樹脂を使い絵や写真の貼り込み、高速道路のトンネル内壁の塗装等があげられます³⁾。

イ. 高分子材の改質³⁾：ポリエチレンは電子線照射による重合反応で、電気配線の半田付け時である融点の105℃以上でも熱変形がなくなり、配線に瞬間の過電圧が起きたときの絶縁破壊は1.2倍も改善し、耐摩耗性は数十倍も向上します。そこでテレビを始めとする種々な電気機器、オーディオ製品、自動車内のケーブル配線等に、電子線照射をしたポリエチレン電線を使っています。

電子線照射後のポリエチレンを融点以上に過熱後、引っ張って急冷するとその形状を保ち、再び融点以上

(株)日さく 技術研究所)

に過熱すると引っ張る前の形に戻ります。この記憶効果を利用した熱収縮チューブは、諸電子機器内で配線の端末保護、通信ケーブル用のジョイントカバー、そしてパイプラインの保護等に用いています。また、発泡剤を含むポリエチレン材を電子線照射後の昇温で高発泡体とし、これを断熱材や軽量で省エネルギーな構造材として建築等に広く使っています。

機械特性と柔軟性が良いポリウレタンは耐水性が低い短所をもちます。それを電子線照射で改善し、自動車のアンチロックブレーキ用センサーのケーブルに用いています。フランスでは照射での残留歪みが少なく寿命が永くなることに着目し、航空機やロケットの胴体の材料である繊維プラスチックの硬化に使っています。

炭化硅素系の繊維にアルミやガラスを電子線照射で複合化して過熱処理すると、500℃以上も耐熱性になります。これを宇宙開発や核融合の材料・タービン等の耐熱材料にする試みは、わが国で実用研究に入っています。石炭ガス発電に利用できると、エネルギーの利用効率はなんと30%も向上するそうです。

電子線照射法の実用は1960年代の後半から急増の一途で、現在は世界に約400台、日本では200台以上が稼動しています¹⁾。

b. 環境汚染物質の処理 石炭燃焼排煙に対する従来の処理法は、その過程で発生する大量な廃水の処理が問題でした。しかし、排煙に電子線照射をすると、その主成分である窒素・酸素・水・炭酸ガス等が活性をもつイオンを経てラジカルになり、それらがこれら諸元素の酸化物を硝酸と硫酸に変えます。そこで排煙にアンモニアを与えてそれらを硝酸と硫酸の粉末にし、集めて肥料にする方法を開発しました⁴⁾。従来法より操作が著しく簡単で、大量な廃水処理が不要という大きな利点をもちます。4年前から新名古屋火力発電所で実用実験をし、満足な処理能と良質の肥料を得た上、設備・運転の経費や施設面積を従来法の8割以下にしました⁴⁾。

自動車道トンネルの換気ガスに含む窒素酸化物の除去にも同じ方法を使い、東京港トンネルの実用実験では、数ppm台という低濃度な窒素酸化物を効率良く安定に除去しました⁵⁾。

都市ごみの燃焼排煙は、石炭燃焼の排煙成分に塩化

水素が加わり、水分が30%以上もあって、排煙温度を150℃以下にできない制約をもちます⁵⁾。そこで電子線照射時の添加剤を消石灰にし、取除く成分を粉末のカルシウム塩にする方法を考案して千葉県松戸市で2年間の実用実験をし、満足な成果を得ました⁵⁾。

一般の下水処理では添加した塩素がトリハロメタン等の有害な有機塩素化合物になることが問題になっています。これに対し、種々な汚染物の分解と種々な微生物の殺菌は、汚水に電子線照射という簡便な方法で効率良くできることが世界の数多くの野外実験で立証され⁶⁾、わが国ではその実用研究が着手され始めています⁷⁾。

2) ガンマ線の利用⁸⁾

原子炉で造ったコバルト-60から出るガンマ線で、高分子に別の物質を化学的に接き木させるグラフト重合を起こします。精密な透過膜にキレート形成基を重合させたものによって、水中の不純物を大幅に取除いた超純水の製造と、クリーンルームでの清浄空気の保持とが初めて可能となり、半導体、医薬品、原子力等での製造や研究を急速に進展させました。乾電池の膜にも使われています。

木材にプラスチックをグラフト重合させたものは、高温で割れず、見栄えよく、耐久性に富む材料となり、教会や空港のロビーに使われています。また、ゴルフのクラブやボールにも使われ、コンタクトレンズへの利用が研究されています。

一方、廃材となったテフロンに電子線照射をすると、分子の鎖が切れて非常に微細な粉末になります。これを種々の合成樹脂・インク・塗料・オイルグリース等に混ぜて、それらを高い潤滑度にしています。

3) イオンビームの利用⁹⁾

a. 新材質の開発 アルミ材に粒子加速装置で窒素イオンをビームとして注入し、寿命を3~5倍も永くしたアルミ缶は、清涼飲料水用に使われています。電気剃刀の刃の改質にも用いています。

この方法で鉄にクロム、硅素、チタン等を注入して耐腐性を数十倍も向上させたり、ジェットエンジン用鉄合金材にアルミ、セシウム、硅素等を注入して耐酸性を10倍以上に向上させたり、接着剤になじむ表面の作り出しや表面に親水性を付けること等が可能になりました。その他、これまでに造れなかった高分子膜に

任意サイズの孔あけをしたり、超伝導材を改質したり、超 LSI のマスクレストーピックを造る等、夢のある実用に近い研究成果が数多く開発され、その製造が進められています。

b. 新解析法の開発 電子顕微鏡や X 線蛍光分析よりも分析能が数桁高いイオンビームを使う PIXE 法の開発で、マイクロ領域の多元素同時分析は非破壊で迅速・高精度になり、各分野でこの方法による数々の研究発表が始まっています。また、高エネルギーで高精度な質量分析ができる加速器質量スペクトロメトリの開発で、名古屋大学では諸物質に含む炭素-14の量から従来法より高精度な年代測定を、5,000個以上行ないました。イタリアのトレノ教会が保存するキリストを包んだとされる布の真偽は、この方法で決着がつき、また、古代ミイラの年代測定や岩石・隕石等の測定が進められています。

3. 放射線の物質透過の利用

種々な物質に放射線を当てると、物質の厚さの僅かな違いは、透過したり散乱する放射線の量を厚さの違いに応じて大幅に変えます。この原理を種々の RI に使った厚さ計は実用に大きく役立っています。

空気中数 mm を飛ぶアルファ線を出すアメリカシウム-241という RI を取付けた煙感知器は、煙りの僅かな発生でアルファ線量が急減する現象を利用します。わが国では約500万台が利用されています⁸⁾。

空気中約40cm を飛ぶベータ線を出すプロメチウム-147という RI を取付けた大気浮遊物質の自動測定装置は、浮遊物質でベータ線量が急減する現象を利用します⁹⁾。東京都内の50ヵ所、全国では1800ヵ所で大気汚染の監視に活躍しています⁹⁾。

タリウム-208やストロンチウム-90というベータ線を放出する RI を用いた厚さ計は、非破壊で正確・迅速な測定がオンラインでできるので、紙・プラスチック・金属薄板等の自動管理に使われ、新聞紙で0.4%という解析能は世界で最高水準です¹⁰⁾。

物質の透過能が高いガンマ線を出す RI を取付けたガンマ線厚さ計は、従来法で測定がむずかしい赤熱した鋼板や高熱状態のガラス厚板の自動生産管理に使われ、前者は0.1秒内に0.1%の精度を示すという世界で最高水準です¹⁰⁾。

これまでに測定がむずかしかった高圧ポンベやタンク内にある液体や粉体、そして缶詰の内容物等の詰まった高さの正確な自動測定にも、ガンマ線透過による方法を使っています¹¹⁾。

ジェット機のエンジン、ビル・橋・船等の鉄骨の溶接状態、空港での手荷物検査等には X 線の他に、イリジウム-192、コバルト-60、セシウム-137等の RI からのガンマ線による映像や写真で判定しています¹²⁾。また、仏像や絵画の内部状態、錆びた刀剣等の文字判定等にもこの方法を用いています¹²⁾。

高炉に入れる鉄鉱石コークスの炭素量は厳しい管理が必要で、その自動管理にはセシウム-137やコバルト-60から出るガンマ線と、アメリカシウム-241又はラジウム-226から出るアルファ線がベリリウムに当たって放出される速中性子線とを使っています¹⁰⁾。ガンマ線が散乱した線量はコークスの密度を示し、速中性子が熱中性子に変わった量はコークスについての水分の量を示すという現象を利用します¹⁰⁾。このガンマ線と中性子線を地層にあてると、それぞれで地層の密度と含水量が分かれます。高速道路の竣工検査にこの方法を採用し、また井戸での測定から地層の区分や地下水のくみ出し層の決定、そしてビルや本四架橋等での基礎杭の深さの決定等に使っています。

この他、放射線の特徴ある利用法に諸元素の定量分析で広く利用されているガスクロマト分析装置での利用があります。ニッケル-63という RI から出て、空気中数 cm を飛ぶベータ線が起す電離電流の量を解析の基準にするものです。

夜光ウォッチや夜光クロックは、文字盤につけた蛍光特質がプロメチウム-147やトリチウムという RI が出す低エネルギーのベータ線で光る現象を利用しています⁸⁾。わが国では両者で年間約1千万個を生産しています⁸⁾。

頭の回転の遅い人を蛍光灯と言ったように、蛍光灯やネオンランプは当初、通電後光るまでに数秒かかりましたが、今ではすぐに光ります。それはグロースターやネオングローランプ内の口元にプロメチウム-147やニッケル-63という RI を塗り、それらのベータ線で管内に蓄電させて、通電後光るまでの時明をかからなくしたからです⁸⁾。生産量は両者とも年間約1.2億本にもなっています¹¹⁾。

4. 地球科学での利用

地球の形成時に造られた数多くの RI それぞれが、地層中の鉱物・貝殻・骨・木片等を含む量で、それらがどの位前に存在したかがわかります。それは各 RI が時間に固有な比率で減少する時計の性質をもつからです。この方法で地球が45.5億年前に造られたこと、またこれまで動物の化石等で区分した地質の時代区分を、1960年代までに数値で詳しく示すことができました。各地の遺跡で炭素-14を指標に約4万年前までの範囲でその存在年代を決定した例は、新聞によく見受けられます。

利用量が年々増加してその対処が重要になっている水資源では、その開発と管理に RI を利用した方法が大きく役立っています¹³⁾。短距離な水の動きは原子炉で造った種々な RI を追跡子にします。利用結果はそれまでの水の動きに対する考え方を大幅に改め、またダムの漏水を詳しく解析して、止水工事を正確・簡単にしました。降水後の水の動きやその水が蒸発散する状態は、水を含む水素-2と酸素-18の同位体比で解析が可能になりました。宇宙線が大気の70%を占める窒素原子との核反応で発生する水素-3と炭素-14という RI が水を含む濃度で、前者は約80年前まで、後者は約4万年前までの範囲でいつの降水かが決まります。これを基本に広域の地表水と地下水の関係や、ポンプ揚水で起きる地盤沈下のしくみ等が詳しくわかり、地域ごとに安全で無理のない水の利用方法が定まりました。この他、地球の形成時に造られて今も水を含む種々な RI の濃度で、降水後数十万年から百万年以上も地下に蓄えられた水が人為条件で動く状態がわかり、その水も上手に利用できるようになりました。

地球の形成時に発生した種々な RI が表層を含む状態を、海底も含めた地表の自然ガンマ線で求め、そこから地表で見えない断層を詳しく見出して、水の開発が困難な山地・丘陵地で割れ目水や温泉を開発する適地の指摘法は、わが国で百ヶ所以上も成功しました¹⁴⁾。現在は地震・地すべりの仕組みや予知の研究に進んでいます¹⁴⁾。

またヘリコプターを使ったこの自然ガンマ線分布から、水資源量になる積雪厚さの地域分布、チェルノブイリ事故時に活躍した放射能汚染の分布、そして十数

種の鉱床それぞれの検出等の方法も実用になっています¹⁴⁾。

5. 原子炉の利用

ウランはその99.3%がウラン-238で、残りの僅か0.7%がウラン-235です。このウラン-235に中性子が当たると、その原子核は割れて幾つかの原子核となり、そのときに平均2.4個の中性を放出する核分裂反応を起こします。その全発熱量はウラン-235僅か1gで100万kwの電力1日分という大きなものです。

ウランからウラン-235を引き抜いて10kg以上をまとめると、核分裂反応が連続に起こり、その数を短時間にねずみ算的に急増して、発生する放射線と熱で原子爆弾となります¹⁵⁾。このウラン-235の塊りの中に、中性子を捕える材質の棒数多くを適当に出し入れし、核分裂反応の数を好みに抑える装置、それが原子炉です。

それは、発生する中性子を種々の物質に与えて研究や RI の生産をする研究炉と、発生する熱を発電に利用する発電炉とがあります。

研究炉では、種々の物質に中性子をあて、その一部を RI にします。大量に生産した RI は、これまでに述べた種々の利用目的に使います。また、原子炉で RI になりやすい物質の極微量を野外で追跡子に使い、追跡後の物質を原子炉の中性に短時間あててその一部を RI にする方法で、一般の分析より格段に高い分析精度で、その物質の動きを解析する放射化追跡子法が開発され、河川・地下水の流れや公害物質の大気中での動きの追跡等に使っています。

一般の発電用燃料による発電で起きる環境汚染は、石油の場合、大量の炭酸ガスと窒素・硫黄の酸化物の発生であり、石炭の場合はそれらに加え大量の放射能を含む煤煙の発生があげられます。しかし、原子炉はそれらを一切発生しないクリーンなものなのです。

わが国での発電量を火力・水力・原子力に分けると、原子力の発電量は10年前に水力を抜いて総発電量の10%になり、現在は約30%にもなりました¹⁶⁾。しかし、国別でみると、まだ1位である米国の1/3、2位フランスの6割足らずです¹⁶⁾。

わが国での原子力発電量の増加は、石油・石炭による発電量の増加を大幅に抑えました。今後も原子力発電量を増やすこと、それは今後頻発が懸念される石

油ショックに対し、わが国ばかりでなく、世界の経済安定にも大きな緩和剤になることに着目する必要があるのではないのでしょうか。

大きな原子炉事故は主に初期にソ連、米国、英国等で起こり、わが国でも当初の輸入炉で小規模な事故が起こりました。しかし、純国産炉になってからは無事故であり、またこれまでの原子炉で燃えなかったウラン-238のかかなりの部分を燃料にできるわが国が独自に開発中の新しい原子炉である高速増殖炉の実用研究でも、度重なる数倍もの出力増加に耐え、この5年間無事故を続けています。もう一般の原子炉は都市の地下に設けても大丈夫という意見もある程の技術水準のようです。

6. む す び

書き切れなかった特徴ある利用方法は数多く、また省いた最先端の科学技術や工業化の内容には、大きな夢が一杯に漲っています。放射線の利用はすでに生活に必須な段階にあり、今後益々重要になっていくことを理解いただければ幸いです。

本文作製で諸資料収集に、東大教授勝村庸介博士、放射線計測協会富永洋博士、国立公衆衛生院出雲義朗博士、そして日本アイソトープ協会池田正道氏の各位に、心暖まる御協力を得ました。ここに深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 勝村庸介：電子線照射利用(1)。Radioisotopes 43, 542-551, 1994.
- 2) 澤井健：同上(2), 同上, 613-622, 1994.
- 3) 勝村庸介：ビームを利用した材料開発, 原子力と先端技術(1)。日本原子力産業会議, 33-60, 1994.
- 4) 徳永興公：電子ビームによる排煙処理, 原子力工業 41(7), 24-29, 1995.
- 5) 徳永興公, 新井英彦：電子線照射利用(4), Radioisotopes 43, 781-790, 1994.
- 6) 新井英彦：排水処理への放射線利用, 原子力工業 41(7), 36-40, 1995.
- 7) 橋本昭司：下水汚染の放射線殺菌と有効利用, 同上, 47-52, 1995.
- 8) 財原子力安全技術センター：コンシューマ・グッズの流通実態等に関する調査, 54-108, 1988.
- 9) 伊瀬洋昭：放射線による大気環境汚染の監視, 原子力工業 41(7), 9-14, 1995.
- 10) 富永洋：最近のラジオアイソトープ工業利用開発, 日本原子力学会誌 25(9), 676-682, 1983.
- 11) 富永洋, 佐藤乙丸, 大塚巖, 小林昌敏：アイソトープ研究と利用30年の歩み, 4. 工業, Radioisotopes 30 記念号, 39S-51S, 1981.
- 12) 梅沢弘一ほか9名：アイソトープ利用の現状と今後の展望, 日本原子力学会誌 32(7), 658-687, 1990.
- 13) 木村重彦：水文解析の研究と将来, Isotope News 92(461), 2-5, 1992.
- 14) ————：地表 γ 線による表層地質の探査, Radioisotopes 44, 627-636, 1995.
- 15) 村上悠紀雄・田野皓文・伊藤正美：原子力レクチャーノート, 日刊工業新聞, 1984.
- 16) 朝日新聞社：ジュニア朝日年鑑, 1995-1996 社会統計, 1994.

1) 勝村庸介：電子線照射利用(1)。Radioisotopes 43,