

放射線・RI 利用 — 現状と将来

原子カシステム研究懇話会

刊行のことば

原子力システム研究懇話会 (Nuclear Systems Association, NSA) は、1990 年に設立され、現在 (一社) 日本原子力産業協会のもとで活動している。その活動の一環として、1993 年より毎年「NSA コメンタリー」を刊行している。重要主題を選び、内容を検討し、わが国の当分野の第一人者に執筆をご依頼し、ご協力いただきました。

本年度は、No.26「放射線・RI 利用—現状と将来」をとりまとめた。原子力には、原子力発電に代表されるエネルギー利用と放射線・RI の利用の両輪があり、後者は前者ほど喧伝されないが、工業、医療、農業等で、社会に広く浸透していて人類社会の進歩に大きく貢献していることは確かなことである。これまで関連する主題で複数のコメンタリーが刊行されてきたが、この分野では技術や利用の進歩・進展が速いので、あらためて最近の状況をまとめたものである。

本コメンタリー・シリーズで過去に関連する主題で、刊行されてきたものを列挙すると；

- ・ No.4 「原子力と先端技術 [III]—放射線利用による新材料開発、レーザー応用」(平成8年)
- ・ No.6 「原子力と先端技術 [V]—加速器の現状と将来」(平成10年)
- ・ No.7 「中性子科学」(平成11年)
- ・ No.8 「放射線利用における最近の進歩」(平成12年)
- ・ No.11 「放射線と先端医療技術」(平成15年)

本書の企画編集に当たって指導的な役割を果たされた勝村庸介会員に心より謝意を表しますとともに、編集に協力され、あるいは各章の執筆を担当していただきました著者各位に深甚なる謝意を表します。

最後に、本書が原子力利用に関心を持たれる方々に、少しでもお役に立てていただけることを祈念いたします。

令和3年5月

原子力システム研究懇話会・運営委員長
山脇 道夫

はじめに

我が国の放射線利用は原子力開発とほぼ同じ時期にスタートした。一方、RI 利用は戦前の仁科芳雄博士によるサイクロトロンでの RI の作製と、それらを用いた植物生理学、放射線生物学への利用研究に遡ることができる。したがって、60 年以上の放射線利用、80 年以上の RI 利用の歴史がある。その延長上にある現在の状況を確認するとともに、今後の動向を予想することは意義深いことである。執筆者は各分野で現在活躍中の方をお願いした。

第 I 編で、「放射線利用の歴史」として私の方から我が国の工業分野を中心とした放射線利用の歴史について概観し、関連する年表を作成した。

第 II 編は放射線利用の現状について、(1)の「 γ 線照射利用の現状と将来」では、 ^{60}Co γ 線を用いた利用に携わっておられる廣庭隆行氏、(2)の「加速器利用の現状と将来」では、電子線加速器を用いた分野で活躍されている山瀬豊氏に紹介をお願いした。利用の原理とともに現場の活動状況を紹介頂いている。

一方、食品照射利用は50年前には日本が先陣を切って、ジャガイモの照射利用をスタートしたが、それ以外の適用には広がらず、その間海外での展開が進んできた。(3)「食品照射の現状と将来」として、この分野で尽力されてきた等々力節子氏に閉塞的な日本の現状に対し、積極的、戦略的に展開している世界の進行状況についてまとめて頂いた。

第 III 編は RI 利用である。戦後に仁科芳雄博士が戦後初めて米国より RI を寄贈された。その当時の RI の輸入業務を担当した組織を基に設立された日本アイソトープ協会は、現在も国内の RI の流通を一手に引き受け、現状を最も的確に把握している。そのような理由から、日本アイソトープ協会の萩原聡昭氏と畑澤順氏に、各々、(1)「工業分野における RI 利用の現状と将来」、(2)「医療分野における RI 利用の現状と将来」、について紹介をお願いした。密封 RI は他の代替手段がない場合に利用されてきており、需要は大きく変化せず、現在も隠れたベストセラー的存在である。一方、RI の医療への展開は近年の医療技術の展開と相まって大きな展開を始めている。

これらの紹介が我が国の放射線利用の現状理解に役立ち、今後の放射線利用展開の一助になることを願っている。

◇ 目 次 ◇

◆刊行の言葉	i
◆はじめに	ii
◆編集・執筆者	viii
第 I 編 放射線利用の歴史 （勝村庸介）	1
1. はじめに	1
2. 原子力時代の幕開けと放射線利用の開始	1
3. 放射線利用の成長	3
4. 放射線利用の新たな展開	7
5. 21 世紀に入ってから放射線利用展開	11
6. 放射線利用の今後	12
7. 終わりに	13
別添 放射線利用関連年表	14
第 II 編 放射線利用 （廣庭隆行、山崎 豊、等々力 節子）	17
(1) γ 線照射利用の現状と将来 （廣庭隆行）	17
1. はじめに	17
2. γ 線照射利用の現状	17
2.1 γ 線源	17
2.1.1 γ 線源の構造	18
2.1.2 入手の現状	19
2.2 γ 線照射装置	19
2.2.1 国内の γ 線照射施設の状況	19
2.2.2 γ 線照射装置の構造	20
2.2.3 γ 線照射の方法	22
2.2.4 γ 線源の設置方法（補充）	23
2.3 線量の管理	23
2.3.1 線量管理の重要性	23
2.3.2 線量の管理方法	23

2.4	γ線照射が利用されている製品	25
2.4.1	滅菌を対象とした製品	25
2.4.2	滅菌と滅菌保証について	25
2.4.3	γ線滅菌・殺菌が行われている製品	27
2.4.3.1	医療機器	27
2.4.3.2	再生医療・バイオ医薬品関連	28
2.4.3.3	医薬品	29
2.4.3.4	化粧品	29
2.4.3.5	実験動物飼料	29
2.4.3.6	包装材料	30
2.4.3.7	検査器具	31
2.4.3.8	その他	31
2.4.3.9	他の滅菌法との比較	32
2.4.4	γ線照射により改質が行われている製品	33
2.4.4.1	架橋を用いた事例	34
2.4.4.2	分解を用いた事例	34
2.4.4.3	グラフト重合を用いた事例	34
3.	γ線照射利用の将来	34
3.1	γ線源の入手について	34
3.2	耐放射線材料の開発	35
4.	γ線照射の今後の展開について	35
(2)	加速器利用の現状と将来（電子加速器による電子線滅菌等について）（山瀬 豊）	36
1.	はじめに	36
2.	電子加速器による電子線滅菌のはじまり	36
3.	電子線滅菌の概要	37
3.1	電子線照射滅菌設備	37
3.2	電子線の線量と測定	39
3.3	電子線滅菌の殺菌原理	41
4.	電子線滅菌の特徴	43
4.1	電子線滅菌の長所	43
4.2	電子線滅菌の短所、留意点	44

5. 電子線滅菌の現状	46
6. 電子加速器利用の将来展望	47
6.1 CSR、SDGs 推進に関する電子線利用	47
6.2 イノベーションの期待	48
6.3 電子加速器による変換 X 線利用	49
7. まとめ	49
(3) 食品照射分野の現状と将来（等々力 節子）	51
1. はじめに	51
2. 照射食品の評価と国際基準	52
2.1 国際機関における安全性評価と国際食品規格	52
2.2 国際植物防疫条約	53
3. 照射食品の健全性と毒性学的安全性の論点	54
3.1 照射食品の安全性評価の論点（健全性：Wholesomeness）	54
3.2 放射線照射特異的分解生成物の安全性評価	54
4. わが国における健全性評価と食品照射の規制	56
4.1 わが国における健全性試験の実施とバレイショの照射認可	56
4.2 現行の食品照射に関する規制	56
4.3 規制変更に関する国内議論（2000 年以降）	57
4.4 牛肝臓の殺菌と国産農産物の輸出拡大にむけた照射効果に関する研究	58
5. 諸外国における食品照射の実施状況	58
5.1 アジア・太平洋地域	59
5.2 米国およびカナダ	62
5.3 ヨーロッパ連合（EU）：	63
5.4 その他の地域	64
6. 植物検疫処理としての放射線照射利用の現状	65
6.1 放射線照射による植物検疫処理の特徴	65
6.2 米国における植物検疫目的の放射線照射の利用状況	66
6.3 オーストラリアにおける植物検疫目的の放射線照射の利用状況	67
6.4 ベトナムにおける植物検疫目的の放射線照射の利用状況	68
6.5 世界に拡大する照射農産物の流通	69

7. 今後の技術開発における展望	71
7.1 IAEA の国際共同研究 (CRP)	71
7.2 低エネルギービーム利用による食品・農産物の処理	72
8. おわりに	73
文献	74
第Ⅲ編 RI利用 (萩原聡昭、畑澤 順)	76
(1) 工業分野における RI 利用の現状と将来 (萩原聡昭)	76
1. はじめに	76
2. 密封 RI と非密封 RI	76
3. 密封線源の種類	77
4. 密封線源の使用法	78
5. 密封線源の工業利用の歴史	78
6. 工業利用における密封線源の装備機器	81
7. 密封線源の工業利用の現状	84
8. 将来の展望	88
9. RI 法改正	90
10. まとめ	91
(2) 医療分野における RI 利用の現状と将来 (畑澤 順)	92
1. はじめに	92
2. 核医学治療	92
2.1 核医学治療実施施設	92
2.2 核医学治療に用いる放射性医薬品の種類、供給量	93
2.3 核医学治療の現状	93
2.3.1 ^{131}I	94
2.3.2 ^{90}Y	95
2.3.3 ^{223}Ra	96
2.3.4 ^{177}Lu	96
2.4 核医学治療の将来展望	96

3. インビトロ検査	97
3.1 インビトロ検査実施施設	97
3.2 検体検査に用いる放射性医薬品の種類、供給量	97
3.3 インビトロ検査の実際	98
3.4 インビトロ検査の展望	98
4. 核医学画像診断	99
4.1 核医学画像診断の概要	99
4.2 核医学画像診断を行っている施設数	99
4.3 核医学画像診断に用いる放射性同位元素	100
4.3.1 単光子放出核種	100
4.3.2 陽電子放出核種	102
4.4 核医学画像診断の実際	102
4.4.1 悪性腫瘍	102
4.4.2 心臓疾患	103
4.4.3 脳神経疾患	103
4.4.4 甲状腺疾患	104
5. 密封 RI による放射線治療	105
5.1 がんの放射線治療	105
5.2 ガンマナイフ	105
5.3 小線源治療	106
6. 医療分野における RI 利用の将来展望	107

◇ 執筆者一覧 ◇

(執筆順、敬称略)

はじめに	勝村 庸介 *1
第Ⅰ編 放射線利用の歴史	勝村 庸介 *1
第Ⅱ編 放射線利用	
(1) γ 線照射利用の現状と将来	廣庭 隆行 *2
(2) 加速器利用の現状と将来 (電子加速器による電子線滅菌等について)	山瀬 豊 *3
(3) 食品照射分野の現状と将来	等々力 節子 *4
第Ⅲ編 RI利用	
(1) 工業分野におけるRI利用の現状と将来	萩原 聡昭 *5
(2) 医療分野における現状と将来	畑澤 順 *6

(注) *1 原子力システム研究懇話会

*2 コーガアイソトープ

*3 住重アテックス

*4 農業・食品産業技術総合研究機構

*5 日本アイソトープ協会

*6 日本アイソトープ協会

第 I 編 放射線利用の歴史

勝村 庸介

1. はじめに

我が国の放射線利用は 70 年にも及ぶ、本稿では放射線利用のうち工業利用関係の歴史について述べる。参考のため、別添に放射線利用関連年表を作成したので参考にさせていただきたい。

2. 原子力時代の幕開けと放射線利用の開始

日本では第二次世界大戦の疲弊から復興するとともに欧米では既に突入していた原子力開発に乗り出すことになった。1955 年に民主、自主、公開を原則とした原子力基本法を制定し、その翌年には国として推進の母体となる日本原子力研究所を設立し、1957 年には国内初の原子炉 JRR-1 が臨界に達した。当時の花形の産業は石油化学や高分子化学であり、工業界自体も高分子、化学繊維の開発と生産に向かっていた。1956 年には川崎、四日市、岩国、新居浜に石油コンビナートが建設された。こういった背景の中、放射線の高分子への影響、高分子の改質への放射線利用の研究を目的に、1955 年に日本放射線高分子研究懇談会が設立され、翌年に日本放射線高分子研究協会となり大阪、東京に研究所が設立された。放射線研究のために Co-60 照射線源が 1956 年に国内一号として理化学研究所に、翌年には原子力研究所に 1 万 Ci 線源が建設され、1950 年代末には国内の主な研究所や大学には Co-60 γ 線の照射施設が整備されるようになった。天然のコバルトは存在比 100%の ^{59}Co であり、Co-60 の製造は原子炉中での熱中性子照射による $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$ 反応に基づいて行われる。1950 年代に入って Co-60 線源が生まれるまでは原子炉を用いての照射が一般的であった。Co-60 が安価に原子炉で生産され簡便な照射設備であるため、その建設が急速に広まった。少し遅れて電子線加速器も用いられるようになった。現在の放射線利用の多くが Co-60 γ 線源や電子線加速器の利用に基づいているが、これらが活用されるようになったのは 1950 年代後期であった。

高分子の放射線照射効果に強い関心が集まったのは 1950 年前後の二人の科学者の報告に基づいている。一人は米国の M. Dole 教授 (1906–1990)¹⁾ である。彼はハーバード大学の

参考文献

¹⁾ Chapter 6, My Research in the Field of Radiation Chemistry of Polymers, pp. 81–90, in Early Developments in Radiation Chemistry, Ed. J. Kroh, Royal Society of Chemistry, Cambridge, 1989.

大学院で電気化学を専攻し、大きな成果をあげた。1942-45年にかけてはマンハッタンプロジェクトにも参画した。戦後、ノースウェスタン大学でアルゴン国立研究所の原子炉を用いてポリエチレンの照射実験から、照射により高分子間に新しく化学結合が導入される、架橋反応を発見、1948年のアメリカ化学会で報告した。もう一人は英国のA. Charlesby教授(1915-1996)^{2,3)}である。大戦前の1941-42年には電子線回析に携わっていた。1948、49年ベルリン空輸作戦に参加後、1949年からHarwell研究所で勤務していた。BECO原子炉を用い、主に金属材料照射が仕事であったが、ポリエチレンの照射で架橋を発見、1951-52年に特許、1952年に架橋論文を公表する。特許を巡る確執から1955年に研究所を辞しHinxtion Hallの新しい研究所で勤務、さらに1957年以降はRoyal Military College of Scienceに在籍した。彼は架橋反応以外に放射線分解、記憶効果、材料の殺菌、放射線重合、硬化など様々な効果を見出し、その産業利用の可能性を予見し放射線利用推進拡大の主役となった。

1950年代末には東京都立アイソトープ総合研究所、大阪府立放射線中央研究所が開設された。放射線育種の分野では放射線育種場(ガンマフィールド)が茨城県常陸大宮に設置された。1960年代に入ると大学に原子力教育のための学部が新設されてゆく。こういった中で放射線高分子研究協会東京研究所は日本原子力研究所高崎研究所として活動を開始した。高崎研究所は放射線利用の技術開発を目的として設立され、世界でも類を見ない活動を続けてきた。日本の放射線利用の牽引車としての役割を果たしてきたことは特筆すべきことである⁴⁾。

放射線化学討論会が1958年にスタートし、学の中核として現在まで活動している。また、理工学における同位元素研究発表会(現在の理工学におけるアイソトープ・放射線研究発表会)も1964年から毎年開催されることになった。1965年には日本放射線化学会も設立され、放射線の引き起こす反応や放射線の利用を中心に据えた学会が設立された。1968年には放射線照射利用を促進するため放射線照射振興協会(現在の放射線利用振興協会)が設立された。

1960年代後半には民間により電子線加速器を用いて架橋電線、発泡材料、熱収縮材料などの生産が始まる。また、民間の滅菌用照射施設が稼働し始め、放射線利用も成長の時代に入ってゆく。

参考文献

²⁾ Chapter 4, A Physical Intruder into Radiation Chemistry, pp. 29-52, in Early Developments in Radiation Chemistry, Ed. J. Kroh, Royal Society of Chemistry, Cambridge, 1989.

³⁾ A. J. Swallow, Arthur Charlesby, 1915-, Radiat. Phys. Chem., 28, 133-134 (1986).

⁴⁾ 国立研究開発法人 量子化学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所 50周年記念誌、高崎量子応用研究所 50年のあゆみ、<https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/3145.pdf>.

3. 放射線利用の成長

馬鈴薯は北海道で秋に、九州で春に収穫される。収穫後室温保管の場合は100日程度で発芽する。発芽すると有毒な成分が発生し食することができなくなる。そこで発芽防止のために放射線照射技術の適用研究が日本原子力研究所の高崎研の支援のもと1967年から実施され、60-150 Gyの照射で発芽が抑制され、安全性にも問題ないとして1972年に利用許可がなされた。直ちに北海道の士幌町農業協同組合に照射施設を建設、1974年から照射馬鈴薯の出荷が開始された^{5,6)}。食品照射としては世界に先駆けての利用であった。同様に、タマネギ(発芽防止)、米(殺虫)、小麦(殺虫)、ウィンナーソーセージ(殺菌)、水産練り製品(殺菌)、温州みかん(表面殺菌)に対して、原子力特定研究として1967年から1981年まで実施され、全ての品目について健全性に問題がないと評価された⁷⁾。国内で実用化されたのは馬鈴薯の照射だけであり、それ以外の製品についてはその後海外で実用化されていった。

沖縄は戦後永らく米軍の占領下にあったが、1972年に日本に返還されることになった。これを記念して害虫の根絶事業が始まった。ウリミバエは食物検疫上、特殊病害虫に指定されており、生息地域のニガウリ、メロン、カボチャなどの農作物を本土で販売することが禁止されていた。もともとウリミバエは沖縄には生息していなかったが、20世紀に入って人の往来が盛んになるに従い、元々の生息地である台湾から沖縄列島を北上してきた。沖縄の農作物を本土で販売することができれば、沖縄経済にも大きな収益をもたらすことが期待され、ウリミバエ根絶が復帰事業の記念事業として開始された。ウリミバエは交尾後、メスがゴウヤなどの作物に卵を産み付け、これが幼虫となって作物を食い荒らす。幼虫は作物から地上に落ち、地中で蛹となる。その後蛹から成虫となり、このサイクルは1.5ヶ月程度で年間八サイクルするため繁殖力は大きなものである。駆除の原理は、ウリミバエの蛹に70 Gyの放射線を照射して通常に交尾はするが不妊となり、次世代を生めないようにする。この照射した不妊虫を多量に放飼して野生虫を十分に上回れば、野生虫の割合は減少し、最終的に根絶できる。原理は簡単であるが、飼育技術、大量増殖法の確立、不妊化技術の確立、放飼技術の開発、野生虫と不妊虫の判別技術などの課題を解決して初めて根絶が可能となる。関係者の懸命な努力を経て、1990年の11月に根絶が達成された。放飼総数は530億77万匹であった。

参考文献

- 5) 内海和久、馬鈴薯芽止め事業30年目の現状紹介、食品照射, 38, No. 1&2, 73-79, (2003).
- 6) 伊藤均、北海道士幌町農協の照射施設建設と馬鈴薯照射事業展開の経緯、食品照射, 49, No. 1, 72-74, (2014).
- 7) 伊藤均、原子力特定総合研究・食品照射ナショナルプロジェクトの経緯、食品照射, 49, No. 1, 62-63, (2014).

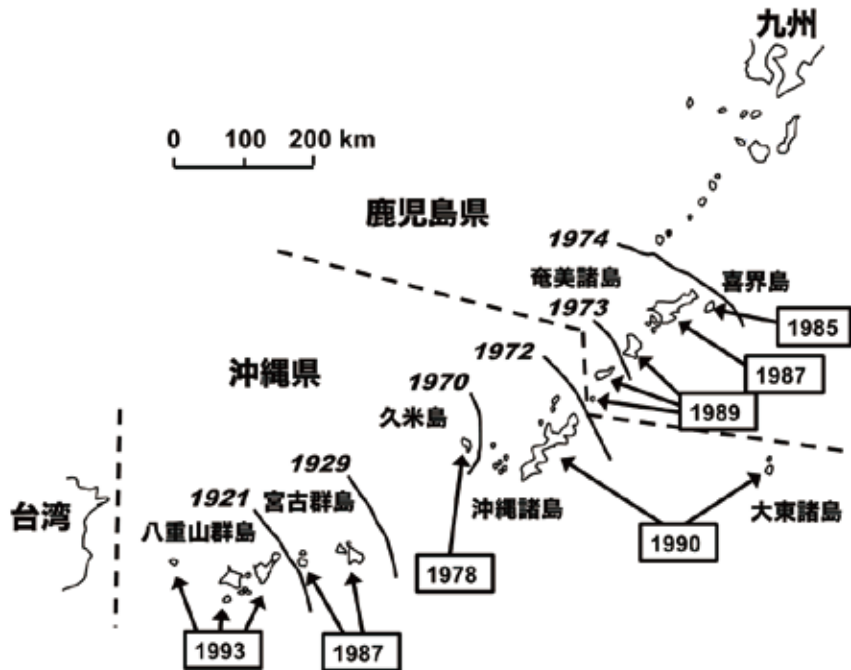


図1 西南諸島におけるウリミバエの分布拡大と根絶経過⁸⁾ 斜体数字は分布拡大年次、枠内数字は根絶年度を示す。(奄美諸島については鹿児島県の資料による)

防除地域	久米島	宮古群島	沖縄群島	八重山群島	合計
防除事業年度	1972-1977	1983-1987	1986-1990	1989-1993	
防除対象面積(ha)	5,992	22,714	137,920	58,612	225,238
延防除面積(ha)	878,353	4,736,241	23,415,441	1,543,771	38,733,712
不妊虫放飼数(万匹)	35,671	634,197	3,094,104	1,543,771	5,307,743
事業費(百万円)	309	1,558	4,562	2,774	9,203
延従事者数(人)	30,068	70,516	135,250	82,098	317,932

表1 沖縄県におけるウリミバエ根絶事業の概要⁸⁾

図1にウリミバエの侵入と根絶の足跡を示す。表1には沖縄県内の駆除の実施年代とその事業規模を示す⁸⁾。これによって、年間77億円の経済効果に結びついたと評価されている。

参考文献

⁸⁾ 垣花廣幸 不妊虫放飼法によるウリミバエの根絶 - 沖縄県におけるウリミバエ根絶事業、放射線と産業、51, 33-37 (1991).

現在も、再付着防止のために、毎週大量の放飼が継続されている。現在、沖縄産の農作物を楽しめているのはこのような努力があったからである。根絶達成までの記録として成書が出版されている⁹⁻¹¹⁾。

注射筒、点滴器、縫合糸、手術用メスなどの医療機器の放射線滅菌が効果的であることから、1969年にCo-60 γ 線照射設備を有する受託照射サービス会社が国内で初めて開設された。1970年代に入ると照射サービス会社も増え、1980年代初頭には3社が操業していた。委託照射のためには照射用の製品を照射サービス会社へ移送、照射後は工場へ返送ということで、大変な手間がかかる。人工透析器や医療器具の滅菌には γ 線滅菌が不可欠であり、1980年代後半には委託照射に代わり四社の透析器メーカーは各々滅菌用の照射施設を保有して自社製品の滅菌を行うほどになった。また、1990年代には電子線加速器で照射を受託する照射会社、さらに21世紀に入ると電子線加速器を保有して医療器具の自社製品を照射するメーカーも現れた。現在は受託照射サービス会社も γ 線照射設備と電子線照射設備を併設している所もある。当時は、照射した製品の一部を用いて一週間程度の培養による無菌化の確認作業を経た後に出荷する規則になっていた。保管のための余分のスペースが必要で手間がかかり、迅速な作業とは言えなかった。こういった時期を経て十分な経験を積み、欧米で整備されたガイドラインに従い照射線量を精度高くコントロールすることで滅菌を担保する、所謂ドジメトリックリリースが国内で許可されたのは1997年であった¹²⁾。

1970年代に入り放射線利用は欧米や日本で盛んになってきたこともあり、1976年に世界の状況を議論するための初めての国際会議、IMRP (International Meeting on Radiation Process) が開催された。以降、隔年ごとに開催されてきた。また、1981年にはIAEA主催の放射線利用の会議がグルノーブルで開催された。これらの会議の報告^{13,14)}を読むとその当時の状況がよくわかる。放射線架橋反応により電気絶縁性、耐摩耗性、耐化学薬品性などの向上を生かして、架橋電線の生産が進み、国内の主要電線メーカーは電子線加速器を保有するほどになっていた。熱収縮材料も販売され、発泡ポリエチレンは日本でいち早く実用化された。

参考文献

- 9) 伊藤嘉昭 虫を放して虫を滅ぼす 中公新書 570 (1980).
- 10) 小山重郎 530億匹の闘い ウリミバエ根絶の歴史 築地書館 (1994).
- 11) 伊藤嘉昭、垣花廣幸 農薬なしで害虫とたたかう 岩波ジュニア新書 (1998).
- 12) 医療器具の放射線滅菌の滅菌線量設定の根拠に関する基準について、薬機第60号、平成9年3月31日
- 13) 田畑米穂、放射線化学の工業化の現状と将来の動向、Isotope News, 3月号, 1-5 (1977)
- 14) 田畑米穂、ラジオアイソトープと放射線技術の工業利用 国際会議(グルノーブル)(RI) Isotope News, 12月号, 27-28 (1981)

米国では1960年代より架橋プラスチック、シートも生産され、50台の電子線加速器が稼働していた。放射線による表面の硬化、放射線キュアリングは汚染が少なく、省エネで省力化、高生産性が見込めることから自動車部品、家具、建材の商業生産、工業化のためのテスト生産などが進んでいた。自動車メーカーとしてはスズキ自動車、フォードモーターがあった。この分野では60基のCo-60照射施設、7基の電子線加速器が稼働していると報告されている。また、両会議で共通して話題になった課題は放射線を用いた環境保全への利用であった。1970年初頭から西ドイツではスラッジのCo-60照射のテストプラントが稼働され、米国ボストンでは電子線加速器でのスラッジ処理のパイロットプラントが建設され、処理技術の開発が進められていた。

ラジアルタイヤ生産に電子線照射が利用されていることはよく知られている。タイヤは天然ゴム、スチレンブタジエンゴム、ブタジエンゴムなどのゴムにカーボンブラック、シリカ、老化防止剤などの配合剤を混ぜたゴム材料を金属ワイヤ、布や繊維の構造材などに貼り合わせて成形後に加硫工程を経て製造されるが、この成形、加硫工程は加熱を伴うのでゴムのグリーン強度（未加硫時の強度）が十分でないと、構造材とのズレなどの欠陥を引き起こす。そこで、利用されているのが電子線照射による予備架橋である。これによりゴムを軽度架橋させ、機械強度を増し、形状、寸法を加硫が終了するまで保持する。1978年の第二回のIMRPでは、タイヤメーカーである米国ファイアストーン社ではタイヤ原料、タイヤ生産への放射線の利用について検討し、制御性、迅速性に優れ、不要なゴムの使用が回避できることから、電子線加速器をタイヤ生産に用いていることを発表した¹⁵⁾。現在では、タイヤメーカーの大部分は電子線加速器を利用しているが、この先駆けとなった報告であろう。

日本では1970年代にはいり大気汚染が社会問題となった。イオウ酸化物(SO_x)、窒素酸化物(NO_x)は光化学オキシダント生成、酸性雨などの元凶になることから日本では放射線を用いた排煙処理の技術開発をいち早く進めていた。電子線法はSO_x、NO_xを電子線照射により硫酸、硝酸生成反応を起こす。これは自然界で光反応により進行する酸性雨生成反応に対応する。そこで事前に排煙に適量のアンモニアを添加し電子線照射すると生成した酸との中和反応で硫酸アンモニウム((NH₄)₂SO₄)、硝酸アンモニウム(NH₄NO₃)の微粒子が生成するので電気集塵機で回収してSO_x、NO_xを除去する。(NH₄)₂SO₄、NH₄NO₃は

参考文献

¹⁵⁾ J. D. Hunt and G. Alliger, Rubber-Application of Radiation to Tire Manufacturing, Radiat. Phys. Chem., 14, 39-53 (1979)

硫酸、硝酸で、窒素肥料である。この技術は火力発電所や都市ゴミ焼却プラントからの排煙の脱硫、脱硝技術として開発が進められ、1990年代に入り、前者は中部電力、後者はアンモニアの代わりに消石灰(CaOH)を用い松戸のゴミ焼却場にテストプラントが建設された。良い技術でありながら日本では利用されていない。既に火力発電所では湿式処理設備が適用されたこと、連続して処理を保証するためには予備の電子線加速器が必要になることから高コストの上、国内では窒素肥料は十分に生産され、また重金属による汚染が危惧されることなどから実用に至っていない。1997年に中国成都の火力発電所、その後北京の火力発電所で実証プラントが稼働した。

このような放射線利用の広がりから1976年に放射線照射振興協会から放射線と産業が刊行された。さらに学と産のプラットフォームを目指し、1985年に隔年開催の放射線プロセスシンポジウムの第一回が開催された。翌年にはUV・EB研究会(現、ラドテック研究会)が発足した。1991年にはRadTech Asiaの第一回が大阪で開催された。

4. 放射線利用の新たな展開

1980年末頃からレーザーの実用化が進み、レーザー照射で材料表面を削る(ablation)、逆に表面に沈着させる(deposition)といった表面改質の技術が開発されていった。並行してイオンビームの利用もなされるようになった。イオンビームはラザフォード後方散乱、PIXE分析、反跳粒子検出、核反応水素分布分析などの技術を生かした分析手法として活用されるとともに、イオンビームを用いた表面改質技術の開発も進められた。GeウェハーにPなどをイオン注入して半導体生産に利用が進んでいたが、さらなる応用としてイオンビームの注入により材料の耐摩耗性や耐食性の向上等が着目された。前者では、飲料用アルミ缶のイージーオープンエンド製造用金属金型や人工関節の摩耗性向上に活用されている。電気カミソリの刃の改質にも利用されている¹⁶⁾。

高分子基板を放射線照射しラジカルを発生、このラジカルと各種モノマーを反応させ、機能を付加するグラフト重合技術の利用も盛んになっていった。ボタン電池用の隔膜作製が実用化したのは1982年である。その後、高分子膜に機能性を付与することから広い用途が切り開かれてきた。消臭材料、空気浄化や水浄化用フィルターなどに拡がっている。1996年にはこの

参考文献

¹⁶⁾ IAEA-TECDOC-1165, Surface modification of materials by ion implantations for industrial and medical applications, IAEA (2000).

技術を利用した有用金属捕集材として海水からのウランの回収実験が開始された。海洋実証実験が行われ、最終的に1 kgのイエローケーキを得ることができた。この手法は、海水中の有用金属の回収にも利用できる。また、これらを使用しての有害重金属の除去にも利用可能である。日本独自の技術であり、米国、中国などがこの技術開発をフォローしている。

1990年代には新材料の一つとしてセラミック繊維である炭化ケイ素や窒化ケイ素の放射線を用いた製造法の開発に成功した。ポリカルボシラン高分子を放射線架橋し、不活性ガス中で熱分解、あるいはNH₃ガス中で熱分解すると各々セラミックである炭化ケイ素、窒化ケイ素の繊維を製造できる。これらの製品は従来法に比し、高温での強度維持に優れる。現在、炭化ケイ素は電子線加速器を使用してジェット機のエンジン周りに使用する材料が製造されている。窒化ケイ素は絶縁性で、高温で使用する電線の被覆材として実用化されている^{17,18)}。

輸血後移植片対宿主病 (graft-versus-host disease、GVHD) は輸血された血液に含まれる供給者のリンパ球が排除されず、むしろ患者の抗原を認識して急激に増殖し患者の体組織を攻撃し、輸血から1ヶ月以内に致死的な経過をたどる。輸血後GVHD発症予防には15-50 Gyの放射線照射で達成できることが知られ、我が国では1990年頃から照射が行われてきた。1998年の照射済み輸血用血液の製造認可後は輸血用の血液は大部分照射されるようになっており、患者の発生も報告されていない。現在では全国47箇所の血液センターで照射が行われている¹⁹⁾。

1990年代で最も大きな出来事は1994年に日本原子力研究所の高崎研究所にTIARA (Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application) 施設が稼働を始め、同じ年に千葉の放射線医学総合研究所にHIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) で重粒子線治療が開始されたことである。前者は複数の加速器群からなる施設でサイクロトロンを中心にタンデム加速器、イオン注入装置、シングルエンド加速器からなり質量数200、500 MeVを超えるエネルギー範囲をカバーする。有機物、金属、植物などの様々な試料の照射が行える。ミクロンオーダーのビームを活用した局所照射も可能である²⁰⁾。後者は炭素イオンを用いてのがん治療を目指したもので、体内の病巣を照射するために核子当たり430 MeV (炭素イオン

参考文献

17) 瀬口忠男、超耐熱性材料製造への放射線の利用、放射線と産業、No. 54, 16-21 (1992).

18) 瀬口忠男、電子線照射による耐熱電気絶縁性窒化ケイ素繊維の開発、No. 69, 59-61 (1996).

19) 藤井康彦、稲葉頌一、稲田英一、輸血による graft-versus-host disease (GVHD) 予防のための血液に対する放射線照射、日集中医誌 19, 27-32 (2012).

20) イオン照射研究施設 -TIARA-, <https://www.qst.go.jp/site/taka/2162.html>

では 50 GeV の運動エネルギーに相当)までのエネルギーに加速したイオンを発生する。He、C、Ne、Si、Ar、Fe、Kr、Xe の 8 種類のイオンで照射できることも特徴である²¹⁾。このような施設は世界でも比類がなく、いずれの装置も共同利用施設として研究者に開放され、多くの成果を上げてきた。それまでの γ 線、電子線は低 LET 放射線であるのに対し、イオンビームは高 LET 放射線に分類され、微生物に対して殺傷能力が高い、酸素の存在が照射効果に大きく影響しないといた生物効果を有し、新たな研究領域を拓げるとともに新しい放射線利用の展開を推進することとなった²²⁾。

放射線照射技術の環境保全分野への技術開発が積極的に進められた。排煙処理以外にも、電子線照射技術を活用して下水汚泥の肥料化、工場で発生する揮発性有機汚染物質処理、ゴミ焼却場の発生ダイオキシンの無害化などの開発がなされた。しかしながら実際のプロセスとして国内で採用されたものはないようである。新しい技術に対して慎重なことに原因があるのかもしれない。一方、韓国では電子線加速器利用をビジネスとした会社、EB Tech 社が 2000 年にサムソンから独立して活動している。多くの実績を残しているようで、大邱の染色工場コンビナートで着色排水の電子線照射による脱色のパイロットプラントを建設した。実規模での排水処理では 10,000 m³/日、ガス処理では 600,000 Nm³/時の処理能力のプラント開発を実現している。さらに、電子線加速器を搭載したトレーラーを製作し、処理現場に派遣するシステムも構築している。水処理であれば 500 m³/日、ガス処理であれば 2000 Nm³/時の達成能力がある。世界的に見ても珍しい会社である²³⁾。

1990 年代はキュアリングが活躍した。化粧網板やフロッピーディスク製造が販売された。白物家電への適用についても行われたが販売には至らなかった様である。放射線の技術を活用した製品は品質では素晴らしいものであるが、時代の需要、他の技術との競合、特に価格面では加速器などの放射線源のコストに大きく依存することから、成功例は必ずしも多くない。化粧合板への適用は着実に進展し、現在でも継続されている。

1997 年の放射線利用の経済効果の初めての調査が内閣府の委託事業として行われた。原子力発電への利用と放射線利用が、原子力利用の両輪を構成しているとの認識で、各々の規模を推定している。放射線利用は工業利用、農業利用、医療・医学利用の三分野に分類され

参考文献

21) 重粒子線がん治療装置 (HIMAC), <https://www.nirs.qst.go.jp/rd/collaboration/himac/index.html>

22) 特集 粒子ビームサイエンスの進歩と展望 - HIMAC の成果を中心に - RADIOISOTOPES, 68, 145-291, 355-441, 483-592 and 675-764 (2019)

23) EB Tech, <https://www.eb-tech.com/>

ている。工業用分野では製品の売上高に放射線利用の寄与率を想定している。半導体加工分野では25%、ラジアルタイヤ4%、他の放射線加工品は出荷額で算出する。農業分野は1) 照射利用、2) 突然変異育種、3) アイソトープ利用・放射能分析の三部構成である。照射利用では食品照射、害虫駆除、動物飼料や食品包装材料などの滅菌とし、突然変異育種はイネやその他の放射線突然育種の直接、間接利用を算定する。アイソトープ利用・放射能分析ではRI研究、放射能分析、C-14年代測定などの項目で具体的にはRI頒布、放射性廃棄物集荷、放射線・放射能分析、測定サービスなどの事業、RI施設廃止、施設保守点検事業などを対象としている。医療・医学利用では保険診療の対象である包括医療の中の放射線が関わる割合として4%、保険外診療として、がん検診、PET、CT、マンモグラフィー、先端医療を含む。一方の原子力利用では原子力発電が中心となり、発電に関わる直接の費用、送電・配電、一般管理費などの間接費用、付加価値をくむめた需要端の計算をしている。そのほか、原子力機器輸出も加えている。さらに、調査年度による国内企業物価指数で補正している。この経済規模調査は1997年を対象に第一回、2005年に第二回を、2015年に第三回を実施してきた。表2とそれを図にした図2にまとめる²⁴⁾。放射線利用の経済規模は

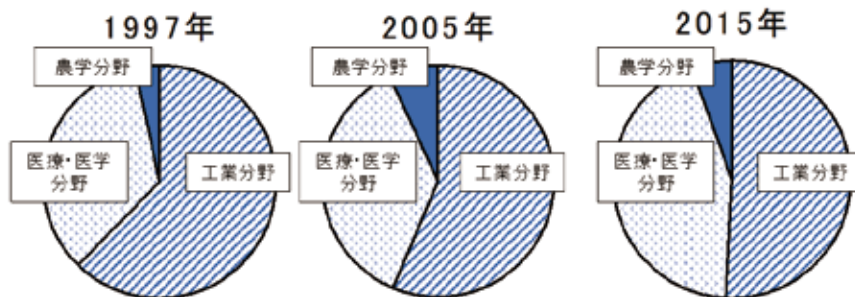


図2 我が国の1997、2005、2015年度の放射線利用の経済規模

(億円)

調査年度	工業分野	医療・医学分野	農業分野	放射線利用合計	原子力発電収益	電気事業者支出	エネルギー利用合計
1997年	21773	12000	1167	35000	57913	17161	75074
2005年	23000	15000	2800	41117	47410	16866	64276
2015年	22200	19100	2400	43700	3307	20943	24250

表2 放射線利用と原子力利用の経済規模²⁴⁾

参考文献

²⁴⁾ コラム 放射線利用の経済規模、p. 325、平成30年度版原子力白書、
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/index2020.htm>.

着実に増加していることが見て取れるが、中でも医療・医学の増加が特徴的である。また、放射線利用はエネルギー利用に比べてやや少ないが同規模であり、両輪と呼ぶにふさわしい状況であった。しかし、2015年を見ると東京電力福島第一原子力発電所事故後は原子炉の再稼働が進まないため、大きく減少していることが見て取れる。

5. 21世紀に入ってから放射線利用展開

2001年9月11日に世界を驚かせた同時多発テロがアメリカで発生した。航空機がハイジャックされ、ニューヨークの国際貿易センタービルに激突、ビルが全壊し、多くの犠牲者が出た様子は世界を震撼させた。その直後に炭疽菌入りの封書が議会に送られ、スタッフが開封して5名が死亡、15名が発症した。炭疽菌は生物兵器の一種で威力は大きくなく、何千もの菌を吸引して初めて症状が出る。菌であるので放射線照射により滅菌でき、文献によれば10-15 kGy 照射で 10^{-7} から 10^{-8} の滅菌レベルが実現できる。アメリカ合衆国郵便公社 (USPS、U.S. Postal Service) は直ちにワシントン地区への郵便物を対象として、ライナックとロードロン加速器をレンタルし、10 MeV の高エネルギー電子線照射による滅菌システムを導入して対応した²⁵⁾。日本も直ちに同様の事態に対する対応策を検討し、商業用放射線照射施設に協力を要請した。郵便物の電子線照射はその後しばらく継続された。同様のサービスがトランプ大統領時代にも提供されていたと聞いている。

2007年に茨城県東海村で J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) が稼働を始めた²⁶⁾。30 GeV まで陽子を加速するための陽子加速器群と実験施設群から構成されている。これらを用いて素粒子物理、原子核物理、物質科学、生命科学、原子力など幅広い分野の最先端研究を行う。中でも陽子を水銀のターゲットに打ち込み発生する破砕中性子の活用も重要な分野で、原子炉からの中性子とは異なるパルス状の中性子の利用である。当初より中性子を産業応用することも一つの目的とされた。また、高強度ミューオンも発生でき、新しい分析ツールとして活用されており、文理融合を称したミューオンを考古学や歴史学の分野への利用展開するプロジェクトも推進されている²⁷⁾。

参考文献

²⁵⁾ D. J. Hanson, Zapping the mail, C&EN, 80, March 18, 30-32 (2002)

²⁶⁾ 大強度陽子加速器施設 (J-PARC), <http://www.j-parc.jp/public/index.html>.

²⁷⁾ 第3回文理融合シンポジウム 量子ビームで歴史を探る - 加速器が紡ぐ分離融合の地平
<https://www2.kek.jp/imss/msl/2020/07/3.html>.

21 世紀に入ってから放射線利用の展開の特徴は生活に密着した製品の生産であろう。代表的なものとして創傷被覆材がある。従来のようなガーゼを剥がす際に傷口を痛めることなく、水を含んだハイドロゲルで傷口をカバーすることで治癒を促進する。元々はポーランドで実用化したが、国内でも実用化された。病院内で処方され、一般には購入できない。魚の目、靴ずれを守るものとして「ジェルプロテクター」なる名称の製品が市販されている。この分野ではグラフト技術が活躍し、様々な消臭機能を持つ材料や繊維が消臭剤、衣料などに使用されてきている。これらは我々の日常生活に密着した製品と言えよう。

100 keV 程度の低エネルギー電子を加速する電子線加速器が多くの企業により開発されてきた。従来の加速器に比べてコンパクトで安価なのが特徴で、卓上に設置可能な製品も出現し、材料表面の滅菌やインクの硬化などの表面処理に活用が期待される。

300 keV の低エネルギー電子線加速器を用いる PET ボトル飲料用無菌充填システムが実用化された。ペットボトル充填装置は日産 50 から 100 万本を生産している。これまで過酸化水素を用いて容器の滅菌を行っていたが、大量の洗浄水の消費が問題であった。従来の方式に代わって加速器からの電子線を利用する新しいシステムが開発され、水消費が回避できることから急速に利用が拡大し、現在 10 以上の充填ラインが稼働している²⁸⁾。滅菌の分野は放射線法が薬剤を用いないために断然有利である。しかし、品質の維持のためには使用材料の放射線照射による劣化にも配慮の必要がある。

6. 放射線利用の今後

70 年にも及ぶ、放射線利用の歴史について国内を中心に振り返って見た。1950 年代の後半にスタートした放射線利用は、当時の先端であった石油化学、繊維化学、加えて原子力の開発と相まって急速に広がった。1960 年代には電線の照射や熱収縮材料が市場に現れた。1970 年代、1980 年代は放射線利用が拡大し、ジャガイモ照射、沖縄県でのウリミバエ根絶を代表する利用が開花した。同時に、1980 年代には放射線による環境保全技術として水処理、排ガス処理と国内のみならず国際的にも研究が拡大した。20 世紀までは放射線技術の適用、拡大、成熟の時代であった。多くの放射線利用技術が活用され、広く社会に受け入れられ、他の手段では達成できない必須の技術も多い。このことは放射線利用の経済規模調査で明らかである。しかし、21 世紀に入るとその勢いに陰りが出てきた。新しい技術分野が次々との出現

参考文献

²⁸⁾ 西納幸伸、PET ボトルの電子線滅菌、S2-1、第 14 回放射線プロセスシンポジウム、2012 年、東京大学。

する中で、放射線利用は新しい技術とは見做されなくなった。放射線研究に関わる大学の研究室の数の減少に現れている。また、同時に研究を支えてきた放射線源などの実験施設の老朽化も無視できず、その管理・維持が困難になっている。事実、放射線利用の技術開発に鍋釜の役割を担ってきたコバルト 60 照射施設も廃止が進み、コバルト 60 照射施設を保有する大学の数も 5 大学前後になっている。同様に、研究用原子炉の廃止が続いている。コバルト 60 線源は、現在、100%をカナダからの輸入に頼っている。カナダの原子炉も老朽化が進んでおり、線源価格も高騰を続けているのが現状である。こういった背景の中、原子力分野の人材育成が叫ばれ始めて久しい。放射線利用分野も同じ問題を抱えているように思われる。一方で、放射線源としての加速器は元気である。特に、医療分野はがん治療に医療用のライナックの高度化、粒子線治療施設の建設が相次いでいるからである。こういった中、従来の「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」は、2019 年に「放射性同位元素等の規制に関する法律」に改正された。特にコバルト 60 照射施設等ではセキュリティーの観点から従来以上の管理が求められるようになった。

デジタル化が進行する中で、2015 年には SDGs (Sustainable Development Goals)、持続可能な開発目標が掲げられ、グリーン化、リサイクル、カーボンニュートラル、脱炭素社会等のキーワードが重要視されている。既に見てきたように放射線利用はこれらの達成に大いに寄与できる技術であり、今後のこの分野の展開を望んでやまない。

7. 終わりに

我が国の 70 年にも及ぶ、放射線利用の歴史について工業利用分野を中心にまとめた。触れていない分野がある事、海外協力については言及していないなど不十分である事をご容赦いただきたい。最初に述べたように現在の量子科学技術研究開発機構の高崎量子応用研究所は、前身の日本原子力研究所、さらには日本原子力研究開発機構を経て現在に至るまで、一貫して放射線利用の技術開発を目的として世界でも類を見ない活動を続けてきた。日本の放射線利用の牽引車としての役割を果たしてきた事を再度述べておく。また、これまでの放射線利用の膨大な技術開発については、放射線利用振興協会の放射線利用・原子力基盤技術データベースにまとめてある²⁹⁾。

参考文献

²⁹⁾ 放射線利用振興協会、放射線利用技術データベース <http://www.rada.or.jp/dbtop/riyoudb/index.html>.

放射線利用関連年表

1940

原子炉照射 M. Dole / 1948 PE 放射線架橋反応についてアメリカ化学会にて報告
A. Charlesby / 1952 架橋論文、1951-52 特許

1950

1955 日本放射線高分子研究懇談会の設立（10月）
1955 原子力基本法の制定 / 民主・自主・公開（12月）
1956 日本原子力研究所の設立（6月）
1956 Co-60 照射用線源第一号 / 理化学研究所（10月）
1956 日本放射線高分子研究協会（大阪、東京）の設立
1957 日本原子力研究所 Co-60 照射用線源 10,000 Ci（8月）
1957 日本初の原子炉 JRR-1 の臨界（8月27日）
1958 東京大学 Co-60 照射装置稼働（9月）
1958 第一回放射線化学討論会開催（東工大 11月）
1959 東京都立アイントープ総合研究所、大阪府立放射線中央研究所設立

1960

1960 放射線育種場 / ガンマフィールド（常陸大宮市）の開設
1961 東京大学工学部原子力工学科創設 / 原子力教育の開始
1962 第一回日仏原子力会議 / 東京
1963 原子力研究所高崎研究所設置（開所式 1964年3月）
←日本放射線高分子研究協会東京研
1964 理工学における同位元素研究発表会（現在のアイントープ・放射線研究発表会）
第一回開催（4月）
1964 第二回日仏原子力会議 / パリ
1964 東海道新幹線開通 東京オリンピック開催
1965 日本放射線化学会発足
1965 HVEC 社 電子線加速器を用いたポリエチレンフォーム生産
1966 日米放射線化学会議 / ハワイ
1967 本放射線高分子研究協会大阪研の日本原子力研究所への移管、大阪研究所となる
1968 放射線照射振興協会（現放射線利用振興協会）設立

1970

- 1972 沖縄県本土復帰記念事業 / ウリミバエ根絶事業のスタート
1972-1977: 久米島、1983-1988: 宮古群島、1986-1990: 沖縄群島、
1989-1993: 八重山群島
- 1972 バレイショ照射 / 北海道士幌農協
- 1972 許可、1973 プラント完成、1974 出荷開始
- 1976 IMRP (International Meeting on Radiation Process) 第一回開催 プエルトリコ
- 1976 「放射線と産業」創刊
- 1979 TMI 原発事故

1980

- 1982 日本原子力研究所大阪研究所は高崎県大阪支所に組織替え
- 1982 フォトンファクトリー (Photon Factory) 共用開始
- 1982 グラフト重合を用いた電池隔膜製造 / 原研 & 湯浅電池
- 1985 第一回放射線プロセスシンポジウム開催
- 1986 チェルノブイル原発事故
- 1986 UV・EB 表面加工研究会 (1988 ラドテック研究会に改名) 誕生
- 1990 大阪府立放射線中央研究所、大阪府立大学と統合し、大阪府立大学附属研究所となる。

1990

- 1991 第一回 RadTech Asia の大阪開催
- 1992 電子ビームによる都市ゴミ燃焼排煙処理プラント / 松戸市
- 1992 火力発電所石炭燃焼排煙処理プラント / 中部電力、荏原、原研
- 1994 電子線照射による炭化ケイ素繊維の開発 / 原研、日本炭素
- 1994 TIARA (Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application) 稼働
- 1994 HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) 治療開始
- 1995 高崎研大阪支所を廃止、関西研の設置
- 1995 ポリテトラフルオロエチレン (テフロン) の放射線架橋発見
- 1996 グラフト重合利用による有用金属捕集材の海洋実証試験開始 / ウラン回収
- 1997 東京都立アイトープ総合研究所、東京都立工業技術センターと統合し、
都立産業技術研究所として発足
- 1997 中国成都火力発電所で電子線を用いた排煙処理プラント稼働
- 1997 Rad Tech Asia の設立 / ラドテック日本、ラドテック中国
- 1997 放射線利用の経済規模に関する調査 / 第一回

1998 照射済み輸血用血液の製造認可

1998 Spring-8 (Super Photon ring - 8GeV) 稼働

2000

2004 ハイドロゲルを利用した創傷被覆材開発 / 大鵬薬品、原研

2004 第一回 APSRC (Asian Pacific Symposium on Radiation Chemistry) が上海で開催

2005 放射線利用の経済規模に関する調査 / 第二回

2007 J-PARC (Japan Photon Accelerator Research Complex) 稼働

2010

2011 東京電力福島第一原子力発電所事故

2015 放射線利用の経済規模に関する調査 / 第三回

2018 次世代放射光施設が東北大学青葉山新キャンパスに建設決定

2019 「放射線と産業」 147 号で休刊

第 II 編 放射線利用

(1) γ 線照射利用の現状と将来

廣庭 隆行

1. はじめに

γ 線照射は、現在、工業、農業、医療などを中心に、我々の生活のさまざまなところで利用されており、今や無くてはならないものになっている。1898年に放射能が Curie 夫人により発見されてから、 γ 線の透過力や電離作用・励起作用を用いた滅菌・殺菌や高分子の改質などの様々な効果が研究されてきた。日本においても、1962年には、高崎の日本原子力研究所（現 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構）が、世界で初めての放射線化学反応の工業化試験を目的として設立され¹⁾、多くの成果が得られている。 γ 線照射の利用については、まだまだ多くの応用が可能であると考えている。たとえば、 γ 線照射による高分子材料への新機能の付加や、食品への滅菌・殺菌への応用がある。

本章では大規模線源を用いた施設で行われている γ 線照射の利用について解説させていただく。これらの情報が今後の γ 線照射利用の更なる応用のヒントに少しでもつながれば幸いである。

2. γ 線照射利用の現状

この項では γ 線照射利用の現状として、 γ 線源、照射装置、照射対象物についての現状について解説する。

2.1 γ 線源

γ 線照射に用いられている線源には、Co-60とCs-137があるが、Cs-137は半減期が約30年と長く、交換時期が長いため魅力的ではあるが、 γ 線エネルギーが0.66MeVとCo-60の1.17、1.33MeVに比べてエネルギーが弱く透過能力が劣ること、潮解性のため密封が難しいこと、核分裂生成物からしか得られず、高放射能のものが製造しにくいことから、大規模施設での γ 線照射では Co-60 が利用されている。Co-60 はすでに日本国内でも、50年以上に渡り、安定して利用されている。

引用文献

¹⁾ 九里 善一郎, *放射線化学*. 東京都: 共立出版株式会社, 1970.

2.1.1 γ 線源の構造

市販されているもっとも流通量の多いタイプは、カナダの Nordion 社製の C-188 タイプの Co-60 線源が使用されている。

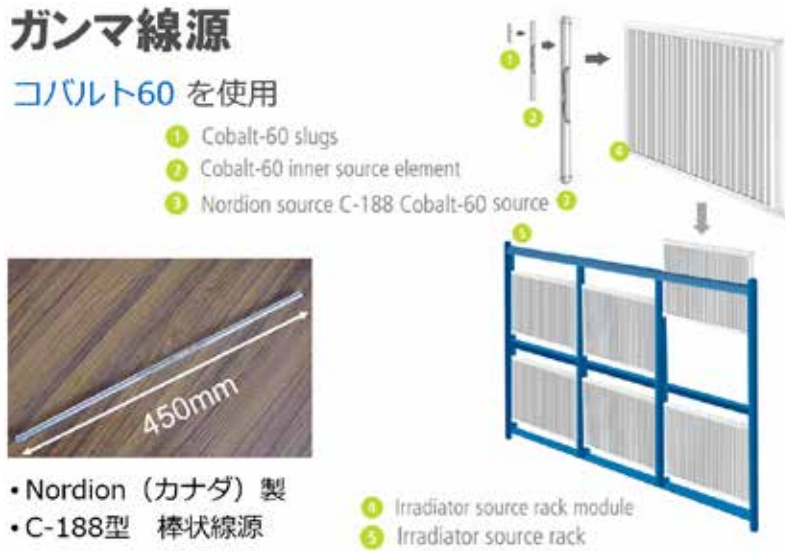


図1 カナダ Nordion 社製 Co-60 線源 C-188 タイプ

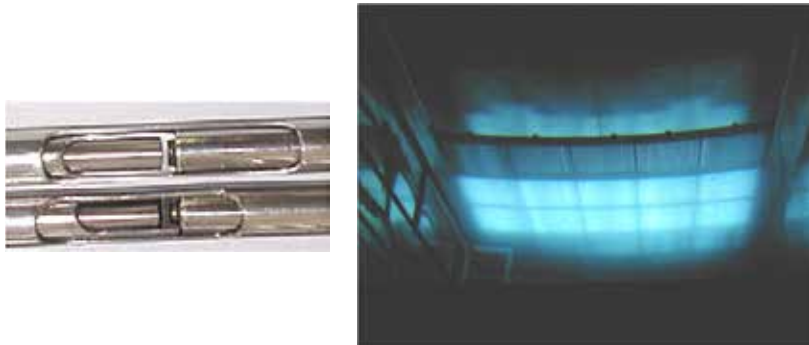


図2 プール内での Co-60 線源 (青い光はチェレンコフ光)

本線源は、金属の Co-60 が、2重のステンレスカプセルに密封されたペンシル状の線源構造となっている。これを約 50cm 角のモジュールに 42 本並べ、さらにこのモジュールをラックにセットして、板状の線源として利用している。

γ 線照射施設では、1本あたり $3.7 \times 10^{14} \text{Bq}$ (370TBq 1万 Ci) の線源が利用されている。

Co-60 線源の特長としては

- ①金属ペレットを使用しており、液体、気体、粉末のように飛散の恐れが少なく、密封しやすい。
- ② γ 線が高エネルギーで、透過率が高いことから、製品の密度が高い製品、金属や水、湿気を嫌う粉体などの製品でも滅菌が可能。
- ③半減期が 5.27 年で、年間約 12%の減少となるため、通常年 1 回補充すれば、同じ能力を維持できる。

といった事があげられる。

2.1.2 入手の現状

大規模施設での γ 線照射に用いられる高放射能の Co-60 は、Candu (Canadian deuterium uranium) 炉と呼ばれる重水を減速材として使用される原子炉で製造されている。Co-59 を一定期間原子炉で中性子を浴びせることで、Co-60 に変換している。Candu 炉の特長としては、運転中に燃料交換ができるため、Co-60 の入れ替えも運転しながらできることが、大きな利点となっている。これをカナダの Nordion 社で 2 重のステンレスカプセルにて密封したあと、船で日本へ輸送され、公益社団法人日本アイソトープ協会にて汚染検査などの受入検査が行ない、その後各照射施設に移送される。輸送時は、 γ 線の遮蔽のため、5 トンの専用の鉛容器に収納されて移送されている。

日本では、安定した線源の調達を目的として、公益社団法人日本アイソトープ協会が窓口となって、カナダ Nordion 社と 5 年ごとの長期契約を締結しているが、放射能の国際的なセキュリティ強化や、廃棄保管施設の維持管理のため毎年線源価格は値上がり傾向となっている。

また、Co-60 線源は、密封のメーカー保証が 20 年となっており、20 年を経過した線源は順次、入荷した容器にて帰りのルートにて Nordion 社に返却している。

2.2 γ 線照射装置

現在利用されている γ 線照射施設は、ほとんどの施設が Nordion 社の設計となっており、2mほどのコンクリート壁、照射台、プール設備、コンベア装置で構成されている。

2.2.1 国内の γ 線照射施設の状況

日本国内では、図 3 (次頁参照) に示すように、現在受託を行っている γ 線照射会社が 3 社、自社の製品を照射している自家照射会社が 2 社、大学、農業利用が 3 社以上あり、照射会社は 10PBq (ペタベクレル) 級の Co-60 線源を有している。



図3 国内・世界の大規模γ線照射会社

2.2.2 γ線照射装置の構造

照射室は、いくつかタイプがあるが、共通している設備には、

- ①2m 厚以上のコンクリート外壁
- ②6m 以上の深さの線源格納プール
- ③照射設備
- ④製品搬送コンベア

がある。

γ線が外部に漏洩しないよう、照射室は天井も壁も2m以上のコンクリートで囲われている。そして、照射室に人が立ち入る際には、線源は深さ6m以上の格納プールに収納される。

通常大規模照射施設で用いられている数十PBqの線源であれば、上記の遮蔽壁と4m以上のプール水の遮蔽があれば、γ線が漏洩することはない。格納プールには線源を腐食させないように、イオン交換水を用いている。

線源使用時には、線源上下移動用エアシリンダーで、線源ラックに取り付けられたワイヤーを巻き上げ、板状の線源ラックを照射容器の間に引き上げる(図5、6(次頁参照))。線源自体の動きは上下移動のみとなっている。停電時には、エアシリンダーの電磁弁が解放され、線源は自重で格納プールに収納される。照射室内は、最も線源に近い場所で100kGy/h以上になるため、当然、照射中は人が中に立ち入ることはできない。照射物は、専用の照射容器に充填され、搬送コンベアにて下段から搬入され、線源の周りを一定の時間で一周して、上段から搬出される。医療機器の滅菌に使用されている25kGyを照射するのに、当社1号機で、およそ2.5時間程度となっている。

この照射時間は、Co-60 の放射能、照射容器の大きさ、線源の配置方法などによって変わる。

照射装置は、パレットのまま照射するタイプと専用の容器で照射する2種類がある。

①パレットのまま照射室に搬入し、照射するタイプ

パレットのまま照射が可能であるため、積み替え作業が不要になるという大きな利点がある。また、照射パレットが1.1m×1.1mサイズの場合、大きい製品、積み替えが難しい重量物なども照射が可能である。ただし、パレットはγ線で劣化しない専用のアルミ製とする必要がある。また、パレットの奥行きが1.1mあるため、密度が高い場合には最大線量と最小線量の比が下記の装置に比べて大きくなるなどの制約がある。



図4 パレットで照射するタイプ (Nordion 社カタログより)

②専用のアルミ合金の照射容器に製品を充填してコンベアで線源の周りをまわすタイプ

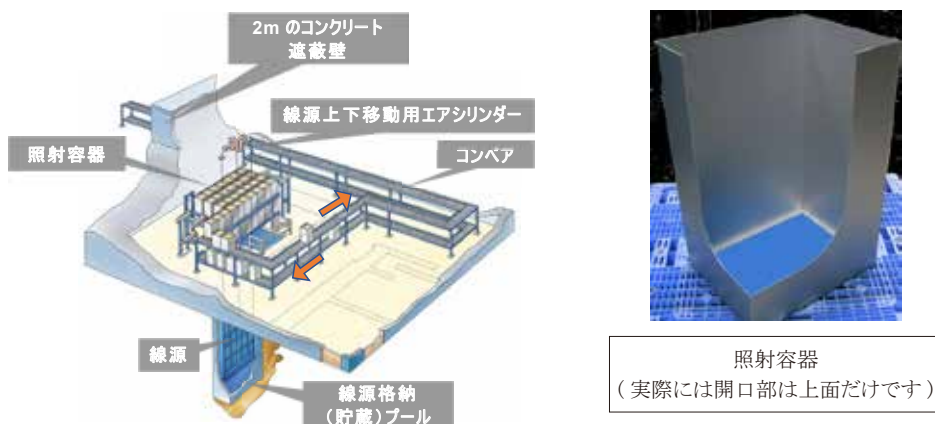


図5 専用照射容器で照射するタイプ

現在使用されている大規模γ線照射施設はほとんどがこのタイプで、専用の照射容器に製品を詰め替えて照射を行う。専用の照射容器のため、線源の近傍まで

近づけて照射することが可能なため照射効率が高い。また、照射容器の厚さも 50cm ほどのものが多く、最大 / 最小線量比を 1.5 程度に抑えることができる。照射容器のサイズは各社さまざまで、取り扱う製品に合わせた容器を採用している。ただし、照射容器に製品が入ることが必須条件となる。容器より大きい製品は照射室に別途持ち込んで、静置照射などを行っている。

2.2.3 γ 線照射の方法

図6は、当社 1 号機の場合、格納プールから引き揚げられた板状の Co-60 線源は照射容器の中心に固定され、全方向に γ 線が放出されている。各番号の奥側に 7 箱の照射容器が並んでいる。搬送コンベアで搬入された照射容器は①を奥側に 1 コマずつ数分ごとに移動していき①から⑧のラインを全て移動することで、上下左右からまんべんなく均等に照射され、照射室から搬出される。

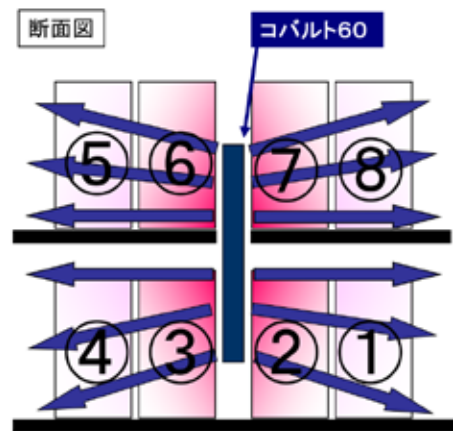


図6 照射装置の側面図

大規模照射施設での Co-60 の γ 線は、1 秒間に 10 の 17 乗個程度が自然壊変により放出されるため、非常に安定しており、線源を引き上げるだけで一定出力の γ 線が得られる。照射容器の移動速度が数分に 1 回に対し、移動速度の誤差は 1 秒以内のため、再現性が高い照射が可能である。また、照射容器が移動した時間を記録して、すべてが誤差範囲内で移動したことが確認できれば、その間の照射容器がすべて同じ線量で照射されたことが確認できる。一部の照射容器に線量計を取り付け、その線量が既定の範囲に入っていれば、同時に照射された同重量形状の製品も既定の線量範囲に入っていたことが証明される。

このように、照射された線量の保証は、一定間隔で決められた線量計と、移動時間の記録のみで行われるため、管理項目が他の滅菌法に比べて格段に少なく、管理しやすい滅菌法となっている。

減衰により、月に 1% 程度出力が減っていくが、その分移動時間を隔週で数秒増やすことで、元の線量での照射が可能である。これを繰り返し、1 年たつと 12% 出力が減少するため、線源を補充し、元の出力に戻す作業を行う。

2.2.4 γ 線源の設置方法(補充)

γ 線源の補充は、通常年1回程度、カナダのNordion社の専門技術者か、同様の教育を受けた日本人スタッフにより行われている。専用の鉛容器で運ばれた γ 線源は、容器ごとクレーンで線源プール内に挿入され、その後の作業はすべて6m以上の長いトングを使って、プール内で手作業にて線源の入れ替えを行う。図1のモジュールに入れ替え作業を行うが、どこに何番の線源が設置されているかすべて記録されており、新たな線源をどこに設置するかは、線量分布が良くなるようにあらかじめNordion社で計算され、その計算により作成された指示書通りに線源を配置していく。根気と腕力のいる作業で、2-3日程度かけて入れ替え作業を行う。

線源を入れ替えた後は、照射容器内に格子状に線量計を取り付け、線量分布を作成して性能の確認を行う。

2.3 線量の管理

2.3.1 線量管理の重要性

γ 線照射受託会社が保証しているのは、滅菌保証ではなく、線量の保証である。滅菌を保証するためには、滅菌線量を決定したときと滅菌前の製品に付着している菌の種類や数が大きく変わっていない必要があるが、 γ 線照射受託会社ではそれを保証できないためである。そのため、 γ 線照射受託会社は製品が照射された線量をバリデーションされた方法で測定し、報告を行っている。

2.3.2 線量の管理方法

線量の管理は、国内の関係法令「医薬品、医療機器等の品質、有効性及び安全性の確保等に関する法律(薬機法)」の通知²⁾において、放射線滅菌についてはISO11137に従うよう定められている。詳細はISO11137-1「医療機器の滅菌プロセスの開発、バリデーション及び日常管理の要求事項」、ISO11137-3「線量計測に関わる指針」に記載されており、

- ・線量測定が、国際又は国家計量標準にトレース可能であること
- ・据付時適格性の確認(IQ)として、線源の放射能及び個々の線源の位置を記録し、装置が設計仕様に従った運転ができることが求められている。

引用文献

²⁾ 薬生監麻発0215第13号「滅菌バリデーション基準の改正」

- ・ 運転適格性の確認 (OQ) として、滅菌プロセスで要求される線量範囲が照射できる能力があることを確認することが求められている。当社では、照射容器に充填される可能性のある最小、中間、最大重量の均一照射物に格子状に線量計を貼り付け、各3回照射して、平均値を求め、最大線量・最小線量の出現位置とその比を求める。

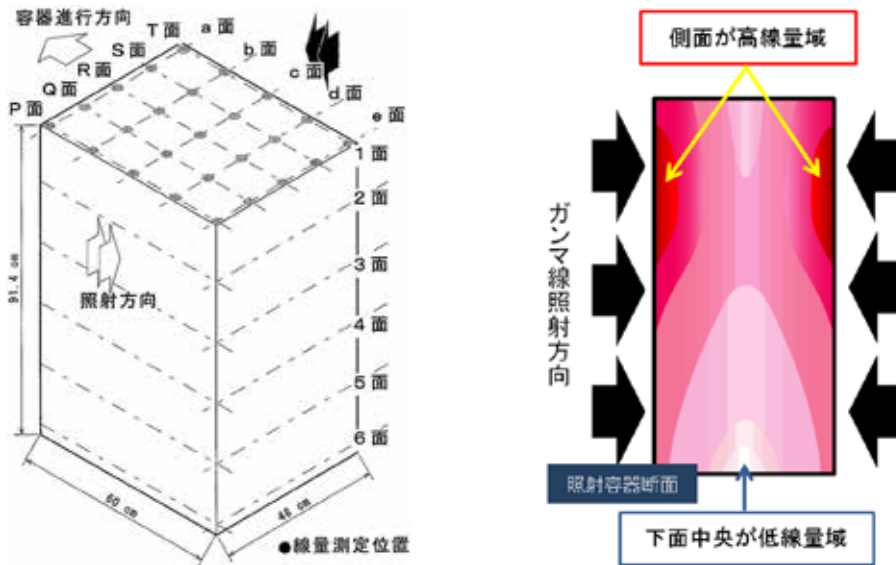


図7 線量分布の測定例

γ 線滅菌を行う医療機器では、滅菌プロセスで求められる線量範囲は、1.4～2倍程度であり、これらが十分可能になるように設計されている。

- ・ 稼働性能適格性の確認 (PQ) として、実際に滅菌する製品の線量分布を製品毎に OQ と同様の方法で確認し、工程管理位置 (例えば照射容器下面中央) と最大線量値、最小線量値との比を算出する。

実際の製品の線量測定は、この工程管理位置のみに線量計を取り付け、PQ で求められた比を用いて最大線量、最小線量に換算して報告を行う。これは、製品内部に最小線量計位置が出現した場合、実際の製品の内部に線量計を取り付けることになり、製品を開封すると滅菌が維持できないため、換算にて算出する方法がとられている。

線量計の取り付け間隔については、各社さまざまであるが、ISO11137-3 では、照射中、照射室内に常に1個以上の線量計があることを求めている。当社では、顧客の申込ごとに照射容器の先頭と最後、照射室に収まる照射容器数の半数ごとに線量計を取り付けている。

2.4 γ 線照射が利用されている製品

この項では実際にどのようなものが照射されているかを以下に紹介してゆく。

大規模 γ 線照射施設での照射を行う目的は、大きく分けて殺菌・滅菌と改質に分けられる。

2.4.1 滅菌を対象とした製品

滅菌方法には、湿熱法、エチレンオキシドガス法、電子線照射、 γ 線などが利用されているが、それぞれ製品の形態により向き不向きがある。

γ 線滅菌の場合、着色や、強度劣化の可能性があるため、まず試験照射を実施して最大許容線量を設定し、微生物汚染の状況により、必要最小線量を求めた後、その間に入るように照射方法が決定される。

2.4.2 滅菌と滅菌保証について

簡単に殺菌・滅菌について紹介する。

γ 線による滅菌・殺菌の原理は、いずれも、 γ 線の電離・励起作用によって、微生物のDNAが他の構成物質より低線量で切断されて、遺伝子情報が破壊されることにより、生存できなくなる作用を利用している。この滅菌・殺菌の比較を示す。

- ・殺菌・・・菌を殺す行為をいい、特にどれくらい菌を減らすなどの定義はない
- ・滅菌・・・確実に生きている菌を死滅させる行為で、医療機器等では保証が必要

この滅菌の保証の方法であるが、医療機器においては、前述の薬機法の通知²⁾に定義されており、その通知で参照されているのがISO11137-2に従うこととなっている。

本基準には、

- ・「滅菌」とは、製品を生育可能な微生物が存在しない状態にするために用いる、バリデートされたプロセスのことをいう。
- ・「無菌性の保証」とは、滅菌後に、生育可能な1個の微生物が製品上に存在する確率のことをいい、目的とする製品を製造するため、滅菌プロセスが、具体的かつ検証可能な原則 10^{-6} 以下の無菌性保証水準 (SAL : Sterility Assurance Level) を達成することをいう。と記載されている。

引用文献

2) 薬生監麻発 0215 第 13 号「滅菌バリデーション基準の改正」

滅菌を保証するには、その製品を滅菌処理後に無菌試験を行うことが確実な確認方法であるが、試験をした製品は包装が開封されており、製品として販売できない。そこで、確率をもとに保証する方法がとられている。ただし、菌は指数関数的に減っていく(図8)ため、数学的にゼロにならない。そこで本基準では 10^{-6} つまり滅菌後の 100 万個の製品の中に生きている菌が 1 個以下になっていることを科学的に証明することと定めており、その方法が、ISO11137-2 (JIS T0806-2) に記載されている。

100 万個の製品を無菌試験することは実質上困難なため、滅菌前の製品に付着している菌とその放射線抵抗性をすべて調べて、 10^{-6} を満たす線量を求めるという方法があるが、放射線抵抗性を調べる試験はかなり手間のかかる方法である。そこで上記規格の中にある VDmax25 法では、あるモデル製品を設定し、その製品の付着菌の放射線抵抗性とその存在比率(標準抵抗性分布)を求められており、

- ①実際の製品において付着している菌の数を求める。
- ②モデル製品において 10^{-1} つまり 10 個の製品に生存している菌が 1 個以下になる線量を規格の表より算出する。
- ③実際に 10 個の製品に算出された線量を照射して死滅しているかどうかの試験をする。
- ④菌が生きている製品が 1 個以下であれば、本製品の放射線抵抗性が規格のモデル製品と比較して同等か低いことが証明されるため、モデル製品が 10^{-6} となる 25kGy が滅菌線量として設定される。

という試験法が記載されている。

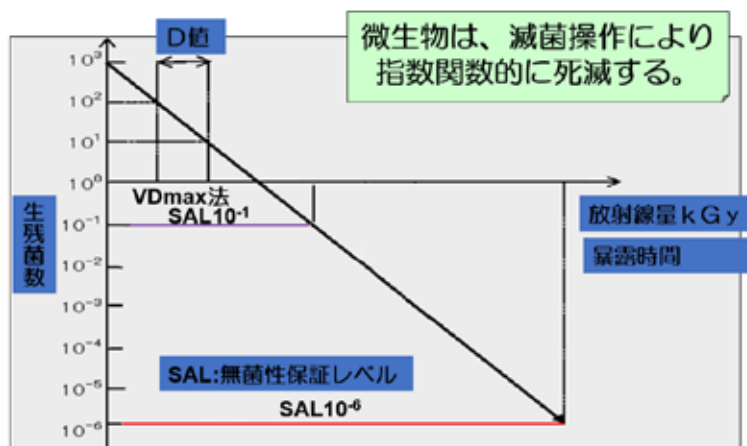


図8 滅菌保証の考え方 — 生残菌数と滅菌量の関係 —

本規格には、VDmax 法以外にもいくつかの方法が記載されているが、現状ではサンプル数が最も少なく済む VDmax 法が最も利用されている。

また、医薬品の滅菌保証についても同規格が参照されており、 γ 線滅菌にて滅菌保証を必要とする製品については、医療機器、医薬品以外も本規格を準拠して実施されている。

2.4.3 γ 線滅菌・殺菌が行われている製品

γ 線滅菌・殺菌が行われている製品では、医療機器、医薬品、化粧品、包装材料、実験動物飼料、検査器具などがあげられる。

2.4.3.1 医療機器

体内に挿入される、または体液と触れる医療機器においては、滅菌医療機器として、滅菌保証が求められる。 γ 線滅菌は、上記の規格により滅菌保証の方法が確立しており、比較的導入しやすいことから多くの滅菌医療機器で採用されている。その特長として、ガスを通すような特殊な包装を必要とせず、通常の包材でヒートシールなどを用いて密封し、梱包した後に開封せずに滅菌できるため滅菌後の 2 次汚染がないこと、熱に弱い製品でも滅菌できることが挙げられる。

当社で γ 線滅菌されている例を以下に示す。



図9 γ 線滅菌されている医療機器の例

・人工透析膜

使い捨ての血液浄化用のフィルターであり、容器がプラスチックで熱に弱く、フィルターからガスが抜けにくいことから、ほとんどの製品に γ 線滅菌が採用されている。

・ランセット(血糖値測定用針)

血糖値を測定するときに、血を一滴採取する際に用いる針。針がキャップで密封されており、透過率の高い γ 線滅菌が用いられている。

・シリンジ

・人工骨・インプラント

膝関節や、大腿骨などにおいて金属製のものや超高分子量ポリエチレンなどの複雑な構造の内部まで、 γ 線滅菌であれば透過・滅菌可能である。インプラント等は金属製品やPEEKといった耐放射線性の高い素材が多く、他滅菌法と比べて、比較的小ロットでの滅菌保証が可能のため、最近多くの製品において、 γ 線滅菌が採用されている。

2.4.3.2 再生医療・バイオ医薬品関連

最新の医療としてiPS細胞等を利用した研究が進められているが、細胞を培養する上で、培養機器の滅菌保証が必要となっている。しかし、洗浄等では保証が難しく、ガンマ線滅菌された使い捨てのバックや容器などの需要が増加している。

また、生物由来の生体膜などを医療機器・医薬品として応用しようとする事例も増えており、熱では変質してしまうものも、 γ 線では品質が維持できる場合があり、これらの応用が検証されている。

- 生物由来膜(治験中・開発中)
- 細胞培養容器
- 細胞培養バッグ
- 培地用サプリメント(牛胎児血清など)
- 細胞培養装置の消耗品

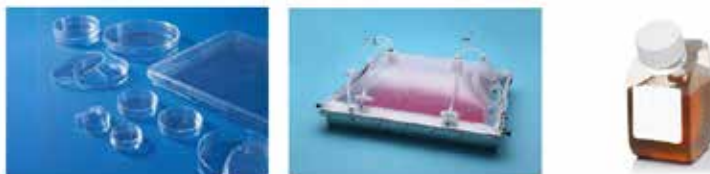


図10 再生医療・バイオ医薬品関連の例

2.4.3.3 医薬品

医薬品では、原料の段階での γ 線滅菌は実用例があるが、最終製品段階での利用例はまだない。これは放射線滅菌の導入段階での試験で、製剤の分解などが問題となることによるが、山口氏³⁾により、冷凍照射をすることで製剤の分解を押さえながら滅菌する方法が提案されている。当社においても医薬品の分解を抑えた冷凍照射の検討が行われており、今後の展開が期待される。

医薬品の滅菌法としては、日本薬局方の第十八改正の参考情報に放射線法が記載されており、各滅菌法にて管理すべき項目及びユーティリティが記載されているが、放射線滅菌の中でもガンマ線滅菌の管理事項の少なさが際立っている。これは、滅菌工程を管理する上で放射線滅菌がいかに管理しやすいかを物語っている。

医薬品で滅菌が必要なものは点眼薬や注射剤と限られており、濾過滅菌や加熱滅菌および無菌充填によって無菌性が担保されている。しかし、熱に弱い製剤や、濾過ができない製剤及び製造ロット単位が小さい製剤についても、代替法として γ 線滅菌が検討されている。

2.4.3.4 化粧品

化粧品においては、エチレンオキサイドガス滅菌や抗菌剤にて菌数管理を行っているが、殺菌剤の残留、抗菌剤添加による人体への悪影響が懸念されていることから、一部の化粧品原料や最終製品には、ガンマ線照射による微生物抑制が利用されるようになっている⁴⁾。

たとえば、タルクといった鉱物由来の製品には嫌気性菌が混入している場合があり、原料段階での γ 線照射が実用化されている。

2.4.3.5 実験動物飼料

医薬品などの研究所等で使用される実験動物には無菌環境で飼育されているものがあり、滅菌した飼料が与えられている。 γ 線滅菌された餌はほかの滅菌方法に比べて栄養価が下がらず、変化が少ない⁵⁾ことから餌の食いつきも良く、すでに40年以上前から実施されている。

引用文献

³⁾ 山口透．医薬品の冷凍照射法を用いた電子線滅菌．日本防菌防黴学会誌，Vol.41，No.10，pp.535－544（2013）

⁴⁾ 成末泰岳．ガンマ線による化粧品と化粧品原料の殺菌．FRAGRANCE JOURNAL，12，（2012）

⁵⁾ 伊藤均．放射線と産業．No.24，pp19-23（1983）

2.4.3.6 包装材料

包材では主に食品用や医薬品用に利用されている。食品用では、容易に腐敗するものを包む製品に多く用いられている(図11)。

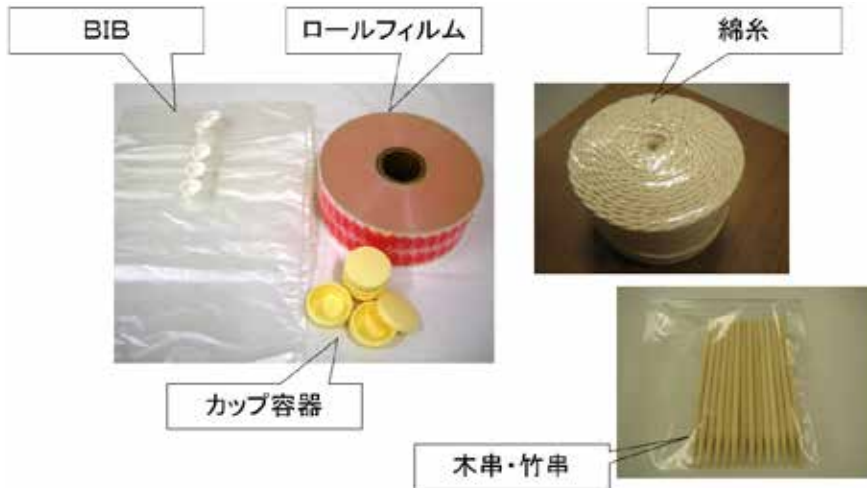


図11 食品包材の利用例

- バックインボックス (BIB)

液体を入れて輸送するキャップ付きの袋。

- ロールフィルム

ロール状に巻かれたものは、他の滅菌法では処理しにくいですが、 γ 線であれば内部まで透過するため、巻いたままの照射が可能で、フィルムを痛めることなく処理が可能となっており、多く利用されている。

- 綿糸

贈答用のハムにまかされている綿糸。ハムにカビが生えないように、先に γ 線で殺菌しておく必要がある。

- 木や竹の串

フランクフルトなどの串。以前はエチレンオキサイドガス滅菌が行われていたが、エチレンクロロヒドリンが検出され⁶⁾、現在では γ 線滅菌が用いられている。

引用文献

⁶⁾ 羽石 奈穂子ほか. 食品用竹製品および串刺し食品中の 2-クロロエタノール. Ann. Rep. Tokyo Metr. Inst. Pub. Health. 62, pp.165-169 (2011)

- ・医薬品包装材料

無菌医薬品の包材について、厚生労働省医薬食品局監視指導・麻薬対策課（平成23年4月20日付け事務連絡）の「無菌操作法による無菌医薬品の製造に関する指針9.2.2バリデーション」に「容器及び栓の滅菌方法のバリデーションを実施すること」と記載されており、無菌医薬品の包材について、滅菌保証しやすいγ線滅菌の利用が進められている。

2.4.3.7 検査器具

検査器具においても、菌が存在すると試験結果に影響を及ぼすことがあるため、γ線照射が利用されている。

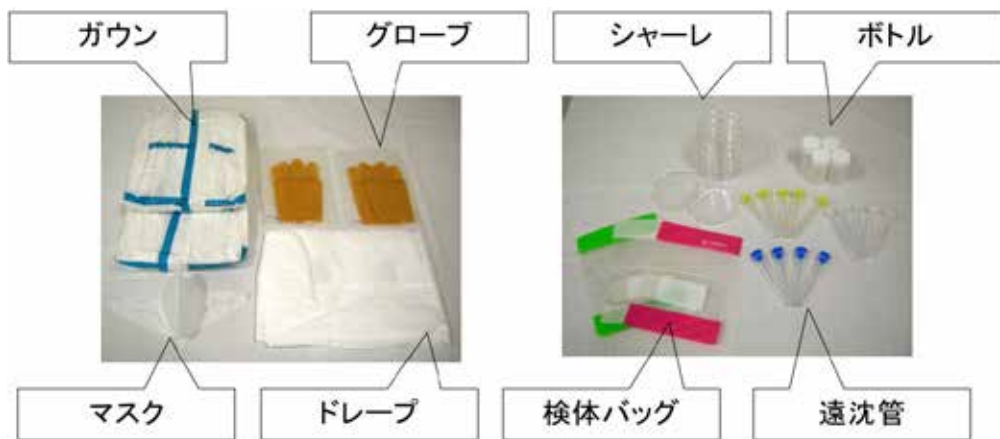


図12 検査器具の利用例

2.4.3.8 その他

その他の利用例について紹介する。

- ・木製仏像

文化財として重要な仏像であるが、定期的な修復の際に、解体した木製部位に対し、殺虫目的のガンマ線照射が一部行われている。通常は燻蒸処理が行われているが、ガンマ線照射であれば木の内部に存在する虫の卵も殺虫可能で、修復後内側から虫食いが生じるといったことがなくなる。

今後カビ対策も含めた文化財の保護にも、素材によっては応用可能と考えられる。

・水損文書

災害等で水損被害にあった重要書類は、すぐに復元作業ができないことから、多くのカビが発生しており、復元作業に大きな障害となっている。そこで、事前に γ 線処理をしてカビを死滅させ、作業を行いやすくするための研究が行われている⁷⁾。

・畳表

和室で利用される畳は天然のイグサで作られている。しかし、新しい畳にカビが生えることがある。通常防カビ剤を用いてカビの発生を抑えているが、防カビ剤の量によっては人体への影響も懸念され、また畳内部からのカビには効きにくい。そこで、畳表のみを放射線照射し、カビを死滅させた後、必要最小限の防カビ剤を塗布することで、カビを極力生えにくくした畳が大阪畳商工業協同組合から発売されている⁸⁾。

2.4.3.9 他の滅菌法との比較

滅菌に利用されているガンマ線以外の方法を以下に示す。

①湿熱滅菌（オートクレーブ）

121°Cで15分といった高温高湿での滅菌法。製品が熱と圧力に耐えることができれば、確実な方法である。大規模での滅菌には向いておらず、研究室での器具の滅菌等に用いられている。

②エチレンオキシドガス滅菌

エチレンオキシドガスにより、菌をアルキル化して死滅させる滅菌法。比較的材質への影響が少ないことから、複合材料の医療機器に多く用いられている。ガスに爆発性、発がん性があり、不活化処理が重要である。製品へのガスの残留を確認する必要があり、処理後のガスの除去に一定期間のエアレーション（換気）が必要となっている。

③電子線滅菌

γ 線と同様に放射線を用いた滅菌法。電子線を装置で発生させるため、放射性物質を使用せず、電気で発生させることが可能。 γ 線と比べて透過力が弱いですが、短時間での処理が可能。詳細は次章を参照いただきたい。

引用文献

⁷⁾ NGUYEN THI THUY LINH, Application of gamma radiation for disinfection of fungi in a large volume of historical archives damaged by flood following Typhoon Hagibis 2019, Japan: A case report, Biocontrol Science, 2021, Vol.26, No.1,55-59

⁸⁾ “大阪畳 :osakajou.” 大阪畳商工業協同組合

<http://www.osakatatamikumiai.com/osakajou/index.html> (2014.7.31)

滅菌市場については図13に示すように海外でも EOG 滅菌とともに γ 線滅菌が多く用いられている。

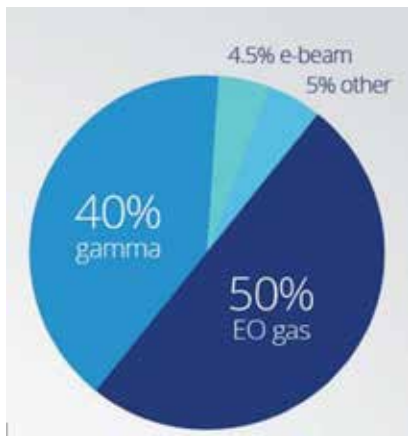


図13 滅菌市場の内訳 (米国)

A Comparison of Gamma, E-beam, X-ray and Ethylene Oxide Technologies for the Industrial Sterilization of Medical Devices and Healthcare Products (AUGUST 21, 2017 GiPA and iia)

2.4.4 γ 線照射により改質が行われている製品

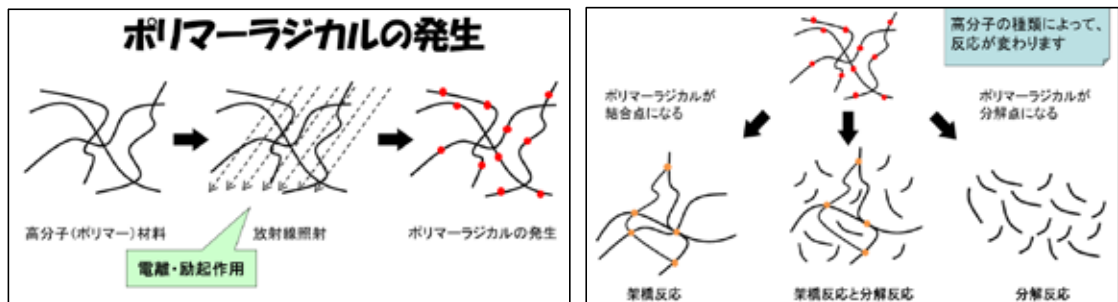


図14 γ 線照射による架橋と分解

高分子に放射線を照射すると、分解・架橋が起こることを図14に簡易図で示すが、分解・架橋は通常両方起きていて、どちらかが優勢になると分解型や架橋型と呼ばれる。どちらが優勢になるかは高分子の種類、酸素の有無、立体構造や照射条件等により変わることが知られている。

改質においては、滅菌に比べて高線量を必要とするものが多く、 γ 線滅菌で改質が利用する場合、高密度の製品が多くなっている。

2.4.4.1 架橋を用いた事例

架橋を用いて γ 線照射が利用されている事例として、医療機器の超高分子量ポリエチレンを架橋して、耐摩耗性の向上を図るといったものがあげられる。

2.4.4.2 分解を用いた事例

分解の事例では、ポリオキシドの分子量調整による可溶性の調整や、PTFEを分解させて粉碎しやすく加工し、添加剤の材料にするといったことが行われている。

2.4.4.3 グラフト重合を用いた事例

放射線重合においては、グラフト重合として基材に γ 線を照射して、ラジカルを発生させ、様々な官能基を結合させ、レアメタルなどを吸着させる素材の開発に利用されている。現在、 γ 線によるグラフト重合により、ホルムアルデヒドを吸着分解する機能を持つ製品が製造・販売されている。ホルムアルデヒドは、シックハウス症候群の原因物質で発がん性物質として分類されており、建材からの除去が求められている⁹⁾。

3. γ 線照射利用の将来

3.1 γ 線源の入手について

γ 線照射は、自然現象による γ 線の放出を利用しており、滅菌医療機器の安定供給には、 γ 線の出力の安定性はなにもものにも代えがたいメリットとなっている。そのためには、安定した線源の入手が必須である。

γ 線源は、原子炉で製造されているため、原子力業界と深く結びついている。販売元である、Nordion社においても、原子力発電所との契約を進め、長期にわたる安定供給を確保する努力を行っている。さらに、現在Candu炉でしか製造されていないCo-60線源を、軽水炉で製造するような検討も行われている¹⁰⁾。

Co-60線源の輸送についても、原子燃料と同便にて輸送されており、原子燃料の輸送が減っている状況で、輸送価格の高騰の原因にもなっている。

また、継続して利用ができるように世界的な原子力・放射性物質の更なるセキュリティ強化が

引用文献

⁹⁾ 河合政利．ガンマ線照射による高分子材料の影響．プラスチック，8，pp（2013）

¹⁰⁾ <https://www.nordion.com/nordion-acquires-technology-to-expand-future-global-cobalt-60-supply/>

進められており、各 γ 線照射施設においても、新たに特定放射性同位元素防護管理者の設置が義務付けられ、放射線防護の観点から様々なセキュリティ対策を行っている。

3.2. 耐放射線材料の開発

γ 線滅菌の最初のハードルに、材料劣化の問題がある。これまで利用できなかった材料を γ 線滅菌できるようになれば、さらなる応用が広がると考えられる。

そこで、素材メーカーも耐放射線材料の開発が行われている。当社においても、滋賀県立大学と共同研究を行い、これまで、 γ 線滅菌が困難であったポリアセタールに添加剤を加えることで、曲げ特性を滅菌線量レベルでも維持できる材料を開発して特許の申請を行った。現在、素材メーカーと量産の検討を行っている。こうした取り組みを進めることで、滅菌可能製品の対象範囲を広げるとともに、これらの素材を積極的に紹介していくことが重要と考えている。

4. γ 線照射の今後の展開について

バイオ医薬品の項でも解説したが、他の滅菌法では、対応できない製品への検討も増加しており、 γ 線滅菌という、便利で確実な滅菌法をまだまだ多くの方にご利用いただくのが、私たちの社会的使命ととらえており、より分かりやすい説明、応用例の紹介、新しい利用方法の開発を進めていきたい。

第 II 編 放射線利用

(2) 加速器利用の現状と将来（電子加速器による電子線滅菌等について）

山瀬 豊

1. はじめに

我が国における電子加速器を利用した電子線滅菌は、国内の滅菌法の歴史において、比較的新しい滅菌法で放射線滅菌の代表的なガンマ線滅菌よりも 20 年ほど後に実用化された放射線滅菌法に分類される滅菌方法である。近年、特に企業のコンプライアンス遵守や SDGs、CSR の取り組みや意識の高まりなど、社会環境の変化にともない、従来から採用されていた滅菌方法から電子線滅菌法に切り替える傾向がでてきている。特に、有害化学物質で発がん性が明らかとされたエチレンオキシドによる EOG 滅菌法の切り替えや放射性物質を用いないことからパブリックアクセプタンスの観点や輸入放射性コバルト線源の高騰などによりガンマ線滅菌からの電子線滅菌への切り替え、大手医療機器企業の自社導入も進んでいると思われる。

以下に電子線滅菌の概要と利用経緯並びに国内の電子線滅菌の現状と電子加速器の利用の将来展望（滅菌以外も含む）について、当社の電子加速器の事例等も踏まえコメントしたい。

2. 電子加速器による電子線滅菌のはじまり

電子線滅菌は、1956 年米国のエチコン社による縫合糸の滅菌の実用化が放射線滅菌の最初で、ガンマ線よりも若干早く実用化された。しかし、当時は、電子加速器の性能、透過性、信頼性も十分でなかったことから普及には至らず、1960 年頃からガンマ線滅菌の方が世界で広く使用されはじめた。一方、国内では、1980 年代に既にガンマ線滅菌は実用化されていたが、電子線滅菌は、当時の日本原子力研究所高崎研究所（現、QST 高崎研究所）の 2、3MeV の電子加速器や東京都立アイソトープ研究所（現、東京都産業技術研究センター）東京都駒沢の 1.5MeV の電子加速器などにより電子線滅菌の基礎的な試験研究が行われていた。しかし、当時の電子加速エネルギーは 1.5 ～ 3MeV でガンマ線に比べ透過力が大幅に劣り実用的な滅菌法としては研究者からもネガティブな意見が多かった。筆者は 1988 年に東京都立アイソトープ研究所で当社がつくばに導入した電子線滅菌と研究所のガンマ線滅菌との比較など主に微生物の抵抗性試験（D 値測定）などの試験研究指導を受けた。

1988 年に住友重機械工業（現、住重アテックス（株））は、当時、産業用としては世界最大出力の 5MeV 200kw のダイナミロン静電型電子加速器（当時米国 RDI 社製 / 住友重機械工業傘下）の照射施設（図 1. 次頁参照）を茨城県つくば市に設置し、1989 年に施設をオープンした。当初この施設は電子照射応用開発センターの名称で、電子線による滅菌、素材改質、

半導体の特性改善など各種応用試験研究の他、商用の受託サービスも始めた、当時、前述の国内各公的研究機関や米国大手医療機器各メーカーも当該つくばの照射施設に集まり多くの電子線及び電子線を利用した変換 X 線などの試験研究も実施された。

1991 年には、国内初の医療用具の電子線による滅菌製造業許可を取得し、同時に委託企業の製品の薬事承認も得られた。また、その直後、当時の厚生省は電子線滅菌の承認申請ガイドラインの事務連絡を整備し、その後、日本薬局方の滅菌法の放射線滅菌法に、ガンマ線滅菌だけでなく電子線滅菌も加えて正式に滅菌法に収載されることに繋がった。

3. 電子線滅菌の概要

3.1 電子線照射滅菌設備

当社の電子線照射設備（最大 5MeV 静電型加速器）の例を中心にその概要及び安全管理などについて以下に示す。設備は、図 1. のようにコンクリート遮蔽壁（最大厚 2.5m）でおおわれた建屋の上部 2 階に電子加速器本体（高さ 8m × 幅 3m）が配置され、加速された電子線はビームラインを通り下部 1 階の照射室で品物に照射が行われる。この加速器の電子線発生原理は、図 2.（次頁参照）のようにテレビのブラウン管と同様で、電子銃フィラメントより放出され

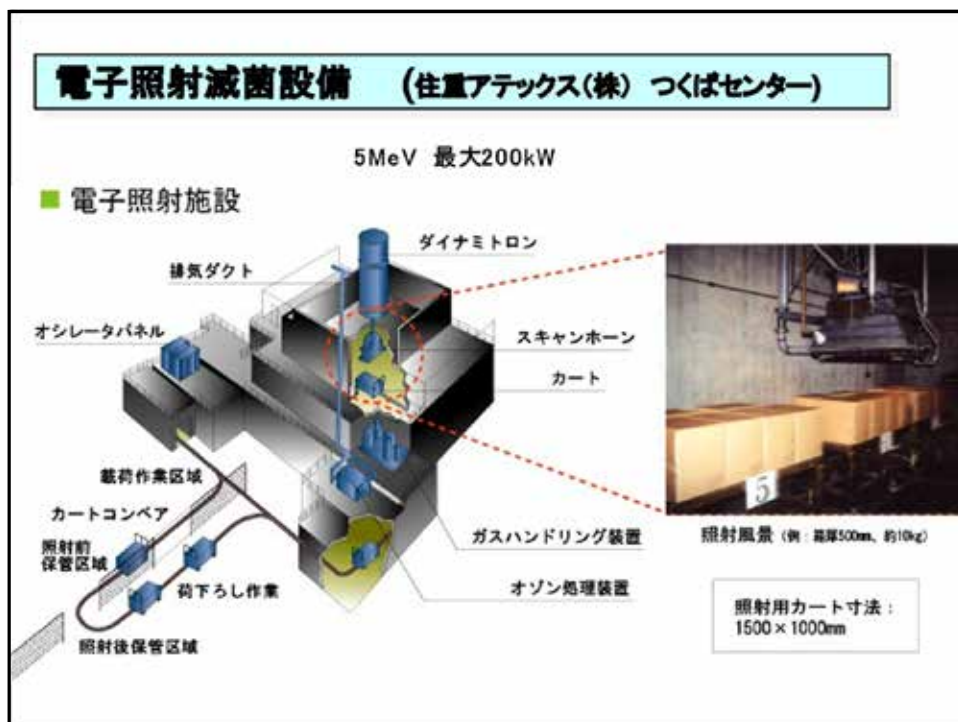


図1. 電子線照射施設（住重アテックス（株）つくばセンター）

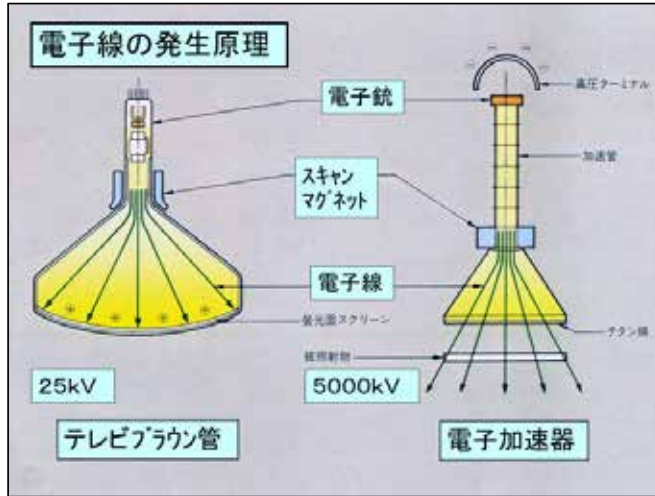


図2. 電子線の発生原理（テレビブラウン管と加速器の比較）

易い状態となった電子が高電圧下で加速され、スキャンマグネットの磁力により電子線をスキヤニングして一定の幅（約1.4m）で均一に照射する。そのビーム下を照射カート（1×1.5m）に積載した照射品が連続的に搬送走行された状態で照射が行われる。この電子加速器は静電型加速器のため、20mA以上の比較的大電流値で照射可能のため被照射物を瞬時（1～3秒間）に照射滅菌することが可能である。但し、被照射物の高さ（厚み）がその加速エネルギーでも透過が厳しい場合は1回片面照射後、2周回目では、被照射物を反転し両面照射を行うことで2倍以上の透過力として利用することができる。例えば、5MeVの加速エネルギーの場合は、片面照射で密度1g/cm³の対象物では約20mm透過でき、容器、医療機器など、かさ密度が0.1g/cm³の場合は約200mm透過することができる。さらに反転させ両面から照射の場合は約400mm以上透過し製品を梱包のまま照射滅菌することが可能となる。その際、照射時の温度上昇は一般に水の場合、10kGyの滅菌照射時では約2.4℃程度の温度上昇しかなく、かさ密度がより軽い梱包での温度上昇はほとんど感じられない程で低温滅菌が可能である。

尚、1MeV以上の電子線は文部科学省の定める放射線の適用を受けるため電子加速器設置の場合は、放射線発生装置の使用許可、第1種放射線取扱い主任者選任、放射線安全管理が必要となる。また、近年は、10MeV以上の高エネルギー電子加速器も利用される機会が増えたが、6MeV以上は被照射物質が放射化する可能性が考えられるため注意が必要となる。但し、電子加速器による電子線滅菌の場合はガンマ線滅菌のように高レベルの放射線物質を取り扱うわけではないため、IAEA等の放射性物質関連施設のセキュリティ対策や地震災害等の外部への放射性物質の漏洩等のリスクが無いためリスクマネジメント、パブリックアクセプタンスの観点でも注目されている。

3.2 電子線の線量と測定

電子線滅菌の際の照射量は一般に「線量」と言われるが正確には吸収線量のことである。その単位は Gy (グレイ) で示され、Gy は J/Kg に相当し被照射物質の質量当たりのエネルギーの吸収を意味する。微生物の滅菌線量は通常 15 ~ 25kGy 程度であるが、100kW 程度の高出力の電子加速器の場合は、数秒で滅菌線量に達し、商用ガンマ線滅菌の場合の数時間に比べ高出力電子線の場合は 5000 倍以上の高い線量率で瞬時に滅菌できることがわかる。

尚、滅菌のための線量設定には、ISO/TC198 の放射線滅菌 (ISO11137) に準拠して行うことができる。また、この線量 (Dose) は照射滅菌の際に最も重要なファクターで、ISO 滅菌バリデーション (素材への最大許容線量、滅菌線量、線量分布測定等の科学的妥当性検証) でも示される通り、実質的な滅菌パラメータということになり、事前の滅菌バリデーションが確実に実施される場合は、これまで実施されていた滅菌処理後の微生物の無菌性培養試験の確認を省略可能とする、ドジメトリックリリース (線量の結果で無菌試験を省略) が国内の規制緩和により認められるようになった (電子線、ガンマ線共)。この結果、電子線滅菌の場合は、滅菌処理時間も短く滅菌判定も照射後 1 ~ 2 時間程度と短時間で行うことができるため、製品の滅菌後の滞留時間も短く物流、保管費用、納期短縮などのメリットに繋がる。一方、EOG 滅菌などでは滅菌パラメータが温度、濃度、湿度、圧力、時間など複数存在し相互関係するため、滅菌のパラメータによるパラメトリックリリースは実質ほとんど採用できないため、微生物インジケータ (BI) による培養無菌試験などが必要となり滅菌判定までに数日 ~ 1 週間の培養期間が必要となる。

実際の電子線の線量測定は図3. のような薄いフィルム形の線量計 (CTA、RCD 等) を用いて照射前後の吸光度差を線量に換算している。但し、高線量に対する線量計等であるため、



図3. 電子線用フィルム線量計 (CTA,RCD)

国内では校正する機関が現状無く、欧米の線量校正機関と校正が必要となり、費用と時間を要する点が課題と考えられる。

また、このように電子線のフィルム形線量計は、安価で小さく薄いため（RCDの場合：10mm角）、滅菌対象製品の細部に複数装着でき、詳細な線量分布測定をすることも可能である。一方、他の滅菌の場合の滅菌パラメータの温度、湿度、濃度等の各センサー等が必要となるため細部の詳細なパラメータの分布測定は困難であり、その点電子線滅菌の場合の線量分布測定（稼働性能のバリデーション）においても優位であるといえる。例えば、図4.のように電子線滅菌の場合の線量分布測定時には製品の梱包1箱当たり30～200点の線量測定も可能であるが、EOG、高圧蒸気滅菌等では各製品梱包単位ではなく、多数箱載荷された滅菌釜当たりに対し数点～十数点程度の滅菌パラメータの測定が現実でその差は歴然である。さらに、電子線の場合は、その線量の透過性分布が概ね計算で容易に予測できるが、他のガス、蒸気

電子線滅菌時の線量分布測定(ドーズマップ)事例

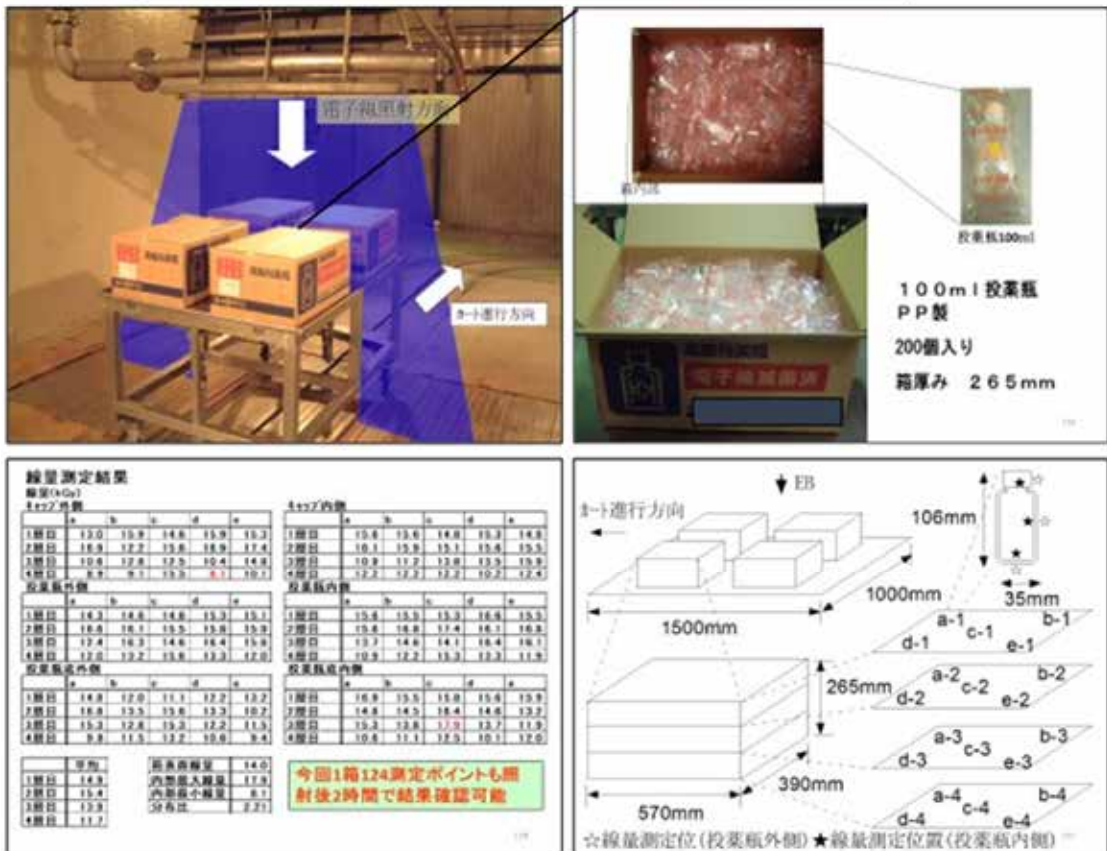


図4. 電子線滅菌の線量分布測定事例

等の挙動を予測するのは容易ではなく、滅菌バリデーションの都度、微生物 BI を用いた死滅効果などを梱包の積載パターンごとに測定するなど滅菌バリデーションには長期間と労力を要するなど課題も多い。その他、滅菌バリデーションには、条件設定までの検証だけでなく、日常のバリデーション、定期的バリデーションも必要となり、図5. では、日常のバリデーションの事例として、製品ごとの許容線量に対する監視システム（自社開発）を示した。特に、近年は、許容値に対して逸脱防止の措置として予めアラートレベルを設定し監視することも重要とされている。

電子線滅菌時の日常線量監視システム事例(日常のバリデーション)

住重アテックス（株） 自社開発

各製品ごとに許容線量値に対し実測値を監視

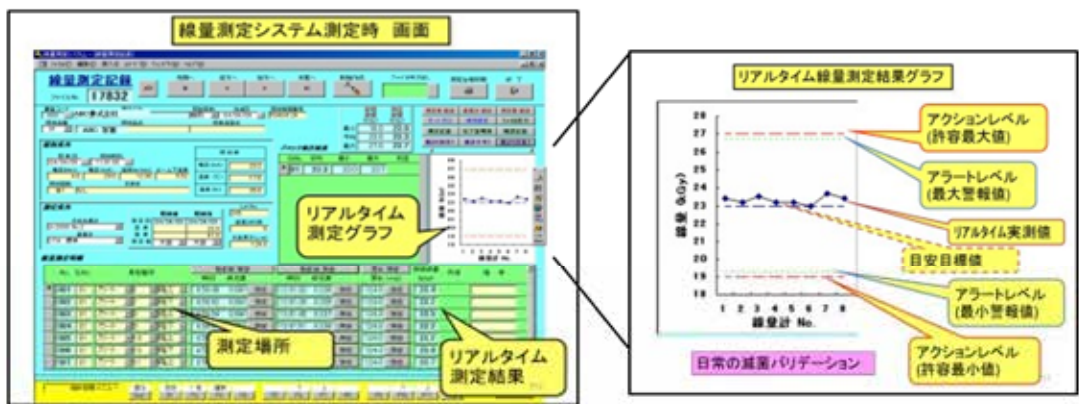


図5. 電子線滅菌時の日常線量監視システム事例（日常のバリデーション）

3.3 電子線滅菌の殺菌原理

電子線滅菌の殺菌原理は図6.（次頁参照）のように電子線の電離作用等がきっかけとなり殺菌される。この電離作用等は微生物の DNA に直接的にダメージを与える直接作用と DNA の周りの水分子を活性の高い OH ラジカル化させ、このラジカルが DNA にダメージを与える間接作用があり、この両作用により微生物の増殖を停止させ死滅することとなる。微生物に対する滅菌効果の指標としては微生物の抵抗性の D 値（90%死滅線量）で示すことが一般的で、例えば放射線抵抗性が高いとされる *B.pumilus* の芽胞菌の芽胞の場合 D 値は 1.6 kGy 程度で、大腸菌など芽胞を作らない栄養細胞では D 値は 0.2 kGy と一般に芽胞菌の芽胞状態の抵抗性は高いことがわかる。尚、筆者の電子線とガンマ線の D 値（*B.pumilus* 芽胞菌）の比較実験を行った結果では、その差はほとんどないことがわかる（次頁グラフ 1 参照）。

電子線の殺菌原理 (イメージ)

作成 YUTAKA YAMASE

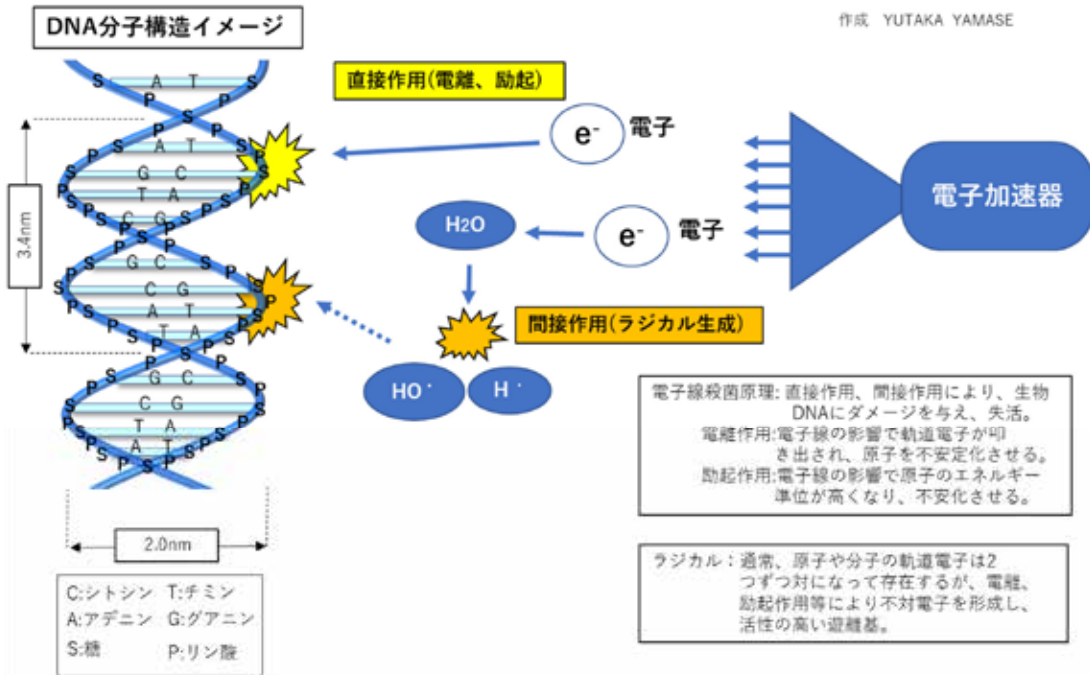
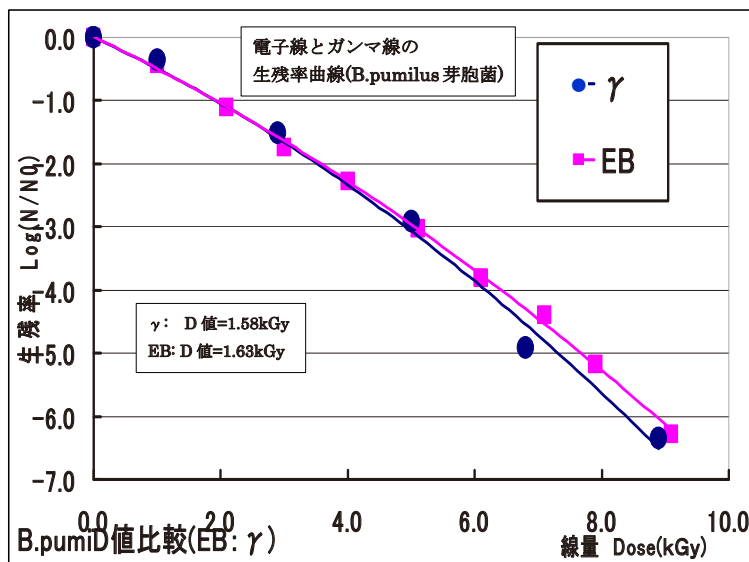


図6. 電子線の殺菌原理イメージ



グラフ1. 電子線とガンマ線の生残率曲線 (B.pumilus 芽胞菌) と D 値比較 (Y.YAMASE)

4. 電子線滅菌の特徴

4.1 電子線滅菌の長所

①物質の透過性

前述のように、高エネルギー 5MeV 電子線では密度 $1\text{g}/\text{cm}^3$ の素材（水やプラスチックブロック等）に対し両面照射により約 40mm 透過でき、医療機器、プラスチック空容器など梱包かさ密度 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ の場合両面照射により約 400mm 透過が可能である。また、例えば栄養ドリンク剤用アルミキャップなどの金属キャップ数千個入りの最終梱包でもかさ密度は低いため高さ 400mm 程度を透過し滅菌処理されている。更に近年の 10MeV の高エネルギー電子加速器では 5MeV の 2 倍の透過力があるため、ほとんどのプラスチック成型品、医療機器、包装容器、アルミ包装容器等の滅菌をカバーすることができる。また、他のガス、蒸気滅菌の場合はガス透過性の滅菌バッグで対象品を包装する必要があるが、電子線の場合では、一般のポリエチレン、ポリプロピレン等のガス透過仕様のバッグでなくとも包装可能で、さらに多重包装、アルミラミレート包装でも電子線の透過性により問題なく使用できる。

②低温滅菌処理

照射による温度上昇は 10kGy の滅菌線量で水の場合温度上昇は 2.4°C ときわめて少ない（但し、密度の高い金属ではある程度の温度上昇は伴う）ため、熱の影響を受けやすいプラスチック素材や医薬品などにも適用される可能性もある。無菌動物飼料などの電子線滅菌試験では高圧蒸気滅菌に比べビタミン等の熱変質がほとんど無いことや生薬などの熱による変質を受けやすい有効成分なども加熱殺菌に比べ変質が少ない事が考えられる。

③短時間での滅菌処理と滅菌判定

前述のように、原理的にガンマ線に比べ、線量率（時間当りの照射吸収線量）が数千倍～万倍と高線量率のため、電子線の電子ビーム暴露時間は数秒と短く、その他の滅菌法と比較してもきわめて高速で連続処理も可能である（電子線ビーム電流 20mA 程度の場合）。従って大量処理や緊急の滅菌処理にも対応しやすい。また、高線量率のため材質への影響（劣化、着色、臭気等）はガンマ線に比べ一般的に少ない（同線量の場合）。

また、滅菌判定として前述のドジメトリックリリースを採用する場合は、電子線の線量測定も製品梱包の表面の測定し易い管理点を定めその管理点の線量と内部の線量分布挙動をあらかじめ滅菌バリデーションすることでこの製品梱包表面の管理点の線量を所定の許容範囲内か否かを測定判定することで滅菌の判定ができる。

④滅菌後の後処理が不要

EOG や薬剤等による滅菌の場合これらの薬剤の残留物に注意が必要となるが電子線滅菌の場合は残留物がないため、EOG 滅菌の際の処理後のガス抜き等が不要である。近年特に

EOG 滅菌の残留ガスの測定に関して ISO10993-7 の規格ではエチレンオキサイドだけでなくエチレンクロルヒドリンの測定の追加や測定方法、測定機器、分析などのバリデーションなどの残留ガスに関する様々な管理が必要となってきた。その他 EOG 滅菌の残留ガス除去には 2 週間以上要する場合もあり保管スペース、保管費用、納期などに課題があるが電子線の場合はそのような課題はない。

⑤環境対策等が不要

近年、EOG 滅菌の際の EO は有害化学物質で発がん性物質に指定されており、PRTR や特定化学物質の対象ともなり、環境への排気処理が国内外でも問題視されている。また、作業者の暴露についても同様に十分な注意が必要となる。一方、電子線の場合は環境への影響はほとんど無く、作業員へ有害物質の暴露などの問題も無い。例えば、米国大手医療機器メーカーの日本工場では救急絆創膏を自社で EOG 滅菌処理していたが、米国本部より自社での EOG 滅菌の中止指令により、EOG 滅菌から外部委託の電子線滅菌へほとんど移管した事例もある。（素材により一部は、EOG 委託滅菌）

⑥滅菌バリデーションが容易

滅菌バリデーションは、医薬品、医療機器等の医療用品に対する滅菌の無菌性保証を行うための科学的妥当性の検証のことで、滅菌条件の設定や装置の検証、滅菌前の汚染微生物の数、滅菌抵抗性確認など厳しい要求事項に対応する必要がある。その際、前述のように、電子線滅菌の殺菌の実質ファクターは、線量（吸収線量：kGy）1 つだけであるため EOG 滅菌のように多数の滅菌管理ファクター（ガス濃度、温度、湿度、圧力、時間）がなく滅菌バリデーションデータを取りやすい。特に滅菌梱包品内部の線量分布は、照射条件に従って物理的に傾向が定まるため、ガス系等の滅菌方法に比べその挙動を予測しやすく再現性も高い。また、これらの線量は各種線量計を用いて容易に詳細な測定ができるなど滅菌バリデーションの精度も高くその確認が早くできることもメリットである。但し、電子線滅菌の場合はガンマ線滅菌同様、素材への影響についてのバリデーションについては、材質劣化、変質等細心の注意が必要で経時的変化についても十分な検証が必要となる。

4.2 電子線滅菌の短所、留意点

①滅菌設備が大型で高額

高エネルギーの電子線滅菌では、概要で示したように電子加速器、制御システムだけでなく放射線遮蔽壁なども含めると大型となり、さらに設備一式で通例 10 億円以上と高額である。従って自社で保有する企業は多くの医療用品を取扱う企業に限られる。また、電子加速器の種類により大きく異なるが初期投資だけでなく定期的な消耗部品交換、メンテナンスなども必要

となるケースもあり、トータル費用も大きくなる。但し、ガンマ線滅菌施設のように、毎年、高額な放射性物質のコバルトを補充などの負担に比べ費用負担は少ない。さらに近年は、大災害、大きな故障事故時の危機管理、リスク管理、BCP 管理としてバックアップの体制を考慮しておくことも重要で、電子加速器を複数所有するケースもある。

②照射設備の管理に専門性が必要

電子線滅菌施設はガンマ線滅菌施設と同様、放射線管理施設となり放射線に関する許認可や放射線管理が必要である。このため放射線安全管理として第一種放射線取扱主任者選任し、定期的放射線環境測定、定期的な作業者の被ばく線量管理、作業者の教育、健康診断なども必要となる。また、ガンマ線とは異なり高電圧、高真空の設備となり設備の制御、維持管理に専門性が必要となる。

③設備に関するバリデーション等が必要

医療用品の滅菌バリデーションでは電子線照射施設を保有する側での設備のバリデーションや支援システムのバリデーション要求がある。特に電子ビーム特性は重要で、加速電圧、ビーム電流、スキャンの幅に対するバリデーション等が重要となる。また、支援システムバリデーションでは、線量計、線量測定システム、搬送システム、ソフトウェアの校正やバリデーションなども注意が必要である。

④透過能力が限定的

電子線とガンマ線を比較した際の大きな違いの1つに前述のように放射線の透過力の差がある。ガンマ線の場合は電磁波であるため、液体入りダイアライザーやプラスチック大型な医療機器や動物用飼料のような密度が高く大型な包装のものでも時間を要するが透過することができるが、電子線ではこのように密度が高く厚みのあるものは透過できない場合がある。従って、電子線滅菌の場合は従前の梱包から透過可能な範囲で梱包の厚み変更が必要となる場合もある。

⑤材質への影響に注意が必要

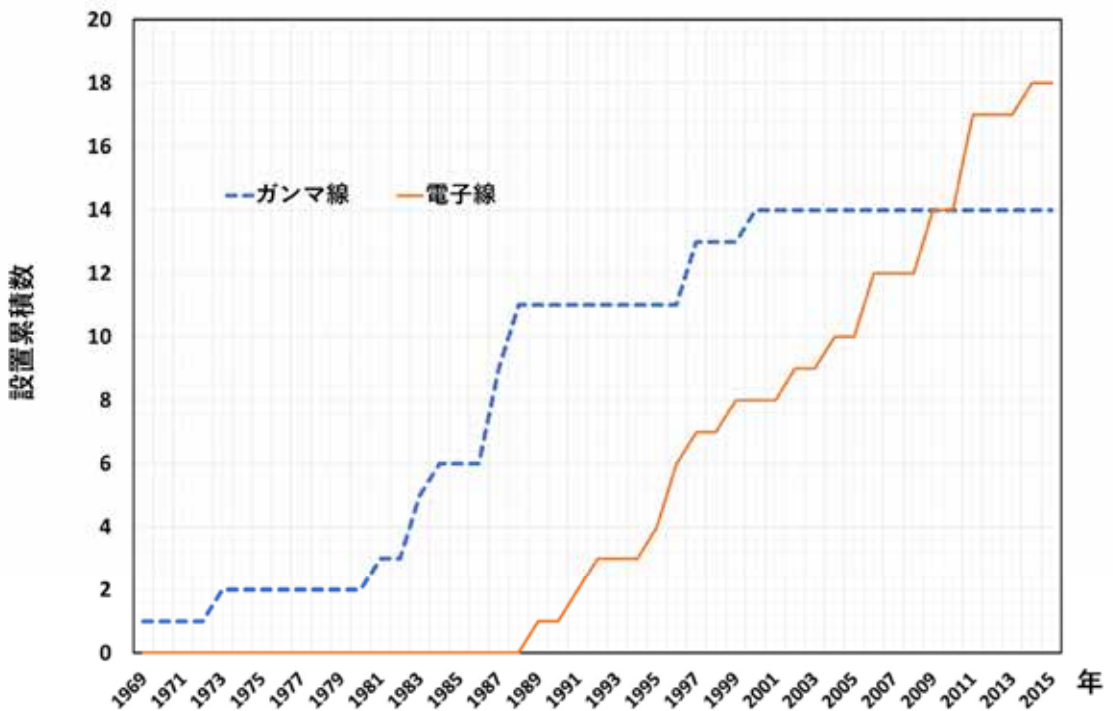
放射線滅菌の場合、医療用品では放射線の材質への影響はとても重要となる。特に人体への影響リスクが高い医療機器ほど材質への影響は無菌性保証レベルをキープするよりリスクが高いことも考えられるからである。また、照射直後に素材への変化がなくとも、1ヶ月後に劣化変質等が進む場合もあり、各樹脂の特性も事前に十分検討する必要がある。例えば、医療機器に多く使用されているポリプロピレンなどは、一般グレードの場合、照射による経時劣化、黄変などあるため、耐放射線グレード品を用いることが多い。また、塩化ポリビニル、ポリカーボネートは、照射後の劣化は問題ないが黄変着色に注意が必要となる。その他、包装材で多い低密度ポリエチレンは、照射後に酢酸臭などを伴う場合があるため製品への

臭気への影響なども事前の試験は重要となる。その他、医薬品の場合、照射による容器樹脂内への残存ラジカルにより、薬剤への影響も一部で報告されるケースもあり注意を要する。

5. 電子線滅菌の現状

電子線滅菌は前述のように、ガンマ線滅菌に比べて歴史が浅く、一部の受託電子線滅菌業者への委託滅菌のみであったが、近年は、大型のガンマ線滅菌設備を有する大手の各医療機器メーカーも高エネルギー電子線滅菌設備を自社に導入する動きもでてきており(グラフ2. 参照)、例えば、病院で目に付く、多くの注射器、注射針等のパッケージの滅菌法には従来のガンマ線滅菌済から電子線滅菌済に替わってきていることから電子線滅菌が認知され普及されつつあることがわかる。また、製品への表記はないものの一般薬の点眼薬、洗眼薬等のペット樹脂容器のほとんどは薬剤を入れる前の滅菌工程でEOG滅菌から電子線滅菌に替わって来ている。

(図7. 次頁参照)



国内照射滅菌設備 設置推移(累積数)
(電子線は高エネルギー5~10MeVクラスを対象)

グラフ2. 国内照射滅菌設備 設置推移(自社調べ)



図7. 電子線滅菌事例（点眼薬容器等）

また、医薬品の無菌製剤への電子線滅菌については、未だ一部であるが、世界に先駆けて当社つくばの電子線滅菌施設では、無菌医薬品の製造許可を取得して、製薬企業と共同で無菌製剤の電子線滅菌の薬事承認を得て実施している。さらに近年は、無菌製剤の電子線滅菌のドジメトリックリリースでの認可も取得して実施している事例もある。

その他、世界に先駆けて低エネルギー電子線による食品飲料用ペットボトルの殺菌目的でも大手飲料メーカーが自社インラインで小型の低エネルギー電子線殺菌処理するケースもでてきている。

6. 電子加速器利用の将来展望

6.1 CSR、SDGs 推進に関する電子線利用

WHO-GMP、ISO10993-7、国内通知等では、有害化学物質で発がん性のエチレンオキサイドによるEOG滅菌は、他の滅菌が全く使用できない場合にのみ使用すべきと示している、しかし、国内外では、プラスチック医療機器、衛生材料等の滅菌には、未だ多く使用されており、処理後のガスも十分処理されずに外部に排気されているケースもあると考えられている。近年では米国でエチレンオキサイドの滅菌施設が基準以上のエチレンオキサイドガスが外部に漏洩しているとのことで、米国FDAは大手滅菌業者施設の操業停止命令をし、現在も近隣住民の使用反対のデモや集会が実施されている。その影響で国内でも環境省が調査したところ、環境目標基準を多くの地点で超えていることが分かり、エチレンオキサイドを滅菌の際に多く使用している医療機器業界に対し注意喚起を始めている。既に、意識の高い企業は、電子加速器による電子線滅菌に切り替えてきたが、今後はより多くの企業でも、コンプライアンス遵守、CSR、SDGsの推進のために滅菌プロセスを有害化学物質の使用を避け、滅菌バリデーションプロセスでも効率的な電子線により変更されることを期待したい。また、一部の飲料ペットボトルへの低エネルギー電子線殺菌利用では、従来の薬剤殺菌後の大量な洗浄水を使用しないことや、従来熱殺菌ではペットボトル容器は肉薄にできなかったが電子線では低温処理のため容器の超肉薄化が可能で樹脂材料を大幅に減らすとともに、減容しやすいことも環境負荷低減にも繋がると期待され今後広範囲に電子線の殺菌利用が進むことも期待される。

また、殺菌滅菌以外の工業利用では、省エネ用パワー半導体への電子線照射によるライフタイム制御の活用としてEV自動車、家電など多くの電気機器に使用されることで省エネ、CO₂

削減へより貢献できると考えられる。(図8. 参照)

6.2 イノベーションの期待

無菌医薬品の無菌化製造プロセスでは、多くの場合、ろ過滅菌、無菌ラインによる無菌操作による処理が多く、その無菌のラインの無菌検証には、培地充填無菌試験やその後の洗浄バリデーションなど1～3ヶ月の製造ライン停止を伴う検証を実施している。更に、製品の無菌性の確認には、抜き取り検査で無菌培養試験を実施している。ところが、滅菌の定義とされる無菌性保証水準(SAL)は、原則 10^{-6} とされている。しかし、抜き取りの無菌培養試験では、100件の抜き取り試験でも無菌性保証水準は $SAL10^{-2}$ でしか達成されず、抜き取りの試験では $SAL10^{-6}$ の保証は確立的無理であることがわかる。つまりライン停止して行った数か月のバリデーション期間、製品の無菌培養試験の14日間など合計した長期間を費やしても本来の目的とする無菌性保証水準 $SAL10^{-6}$ は達成できないことになる。そこで、電子線による滅菌が素材的に問題なければ、最終包装容器に薬剤を封入後、電子線による最終滅菌とドジメトリックリリースによる無菌試験の省略を行うことで、無菌性保証の $SAL10^{-6}$ を確保するとともに、無菌製造ラインのバリデーションも不要となり長期間の機会損失を解消する無菌製造プロセスのイノベーションに繋がると考える。そのためには、薬剤、素材への影響を抑える、低温無酸素処理やラジカルスカベンジャー等の探索研究開発など今後を期待したい。(図8. 参照)

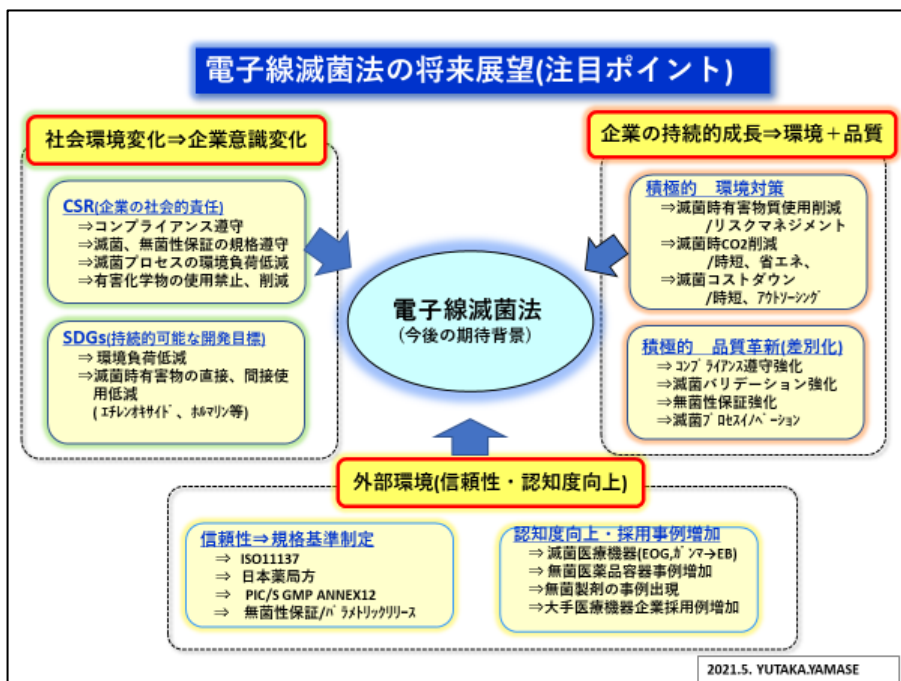


図8. 電子線滅菌法の将来展望 (注目ポイント)

6.3 電子加速器による変換 X 線利用

現状の電子線では透過力が劣るために処理できない対象物も多い、そこで、今後は、電子線に変換 X 線コンバータを利用した制動 X 線の利用にも期待したい。この変換 X 線は、透過力がガンマ線以上にも達することも可能で、当社でも世界に先がけて、当時の高崎原子力研究所、各国医療機器メーカーなどがつくばで試験研究し、その後、当社、関西センターでは、世界初の実用変換 X 線と電子線の切り替え可能な電子線設備を設置し、農水省による輸入の切り花の X 線照射による防疫処理の研究も実施されたか(図9. 参照)。従来、植物の輸入時の防疫処理技術として、臭化メチルガス燻蒸処理が実施されているが、臭化メチルガスはオゾン層破壊物質として、その使用が国際的にも問題視されている。しかし、現在も、国内では変換 X 線による防疫処理等の実用化は実現していない。将来的には、このような植物等の防疫処理だけでなく海外で既に実績もできている食品照射等への国内での活用にも期待したい。

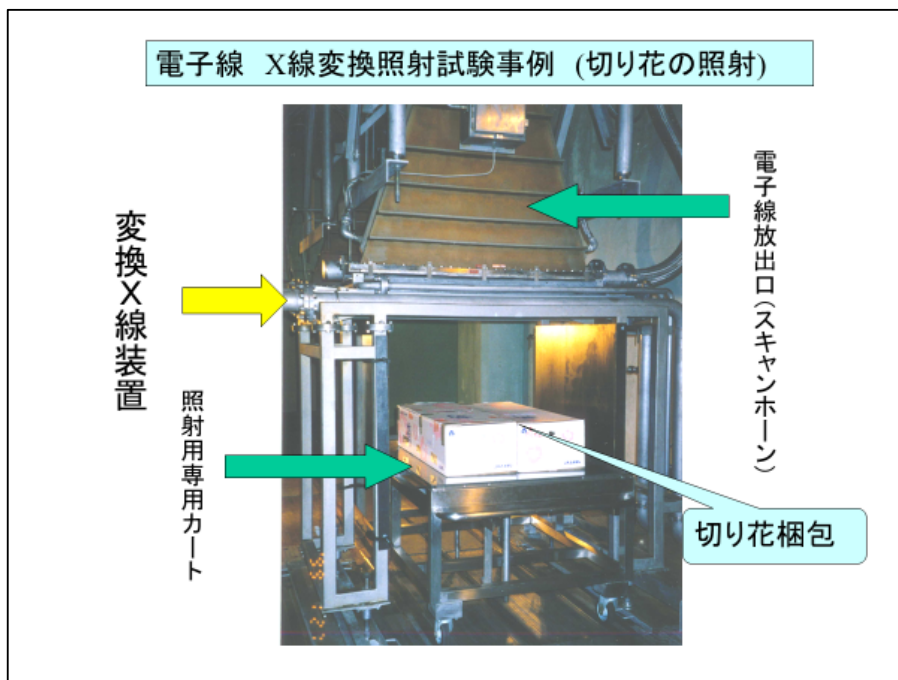


図9. 電子線 X 線変換照射試験事例 (住重アテックス (株))

7. まとめ

近年、CSR、SDGs への関心が高まっているが、電子加速器による電子線利用にはこれらに対応する多くの活用の可能性があると考えている。本稿では主に電子線による現状と

今後の展望の中で示したように、滅菌プロセスによる、有害化学物質等からの代替は、今後期待できるが、それだけでなく、化学物質の残留物の除去のための多く使用されていた電力、洗浄水、廃棄物の削減にも繋がるなど波及的効果も期待される。また、本稿の滅菌以外でも電子線照射による、排水処理、排煙処理、有害化学物質の分解、機能性吸着材の開発利用、さらに省エネ用パワー半導体への活用から輸入植物、食品等への防疫処理の臭化メチルの代替などまだ多くの活用が期待できる。但し、これらは20年以上前には多くの試験研究は実施されていたが残念ながら実用化されていない現状があった。その背景の1つには、当時、一般的に環境に対する意識が現在と比べまだ低く、環境対策のためにそんなにコストを掛けられないという風潮があったことが考えられる。また、例えば食品等への放射線照射は国内では規制により利用できないという諦め、ネガティブ思考などにより折角の基礎研究が生かされていない現状があるようにも思われる。しかし、近年、ようやくグローバル的にも環境に対する意識、社会的価値が向上し、環境対策に対して、一定のコストを掛けても良いとするマーケットが出来つつあり、さらにイノベーションの機会は規制の変わり目に生まれることもあり、食品照射、防疫処理、環境処理利用等においても放射線利用の規制があるのであれば逆にイノベーションの機会であると捉え、国際規格と国内行政のギャップなどあればそれらに対してもポジティブ思考で積極的に国とのコミュニケーションを図り、放射線、加速器利用を活用したイノベーションへと発展することを期待したい。

第 II 編 放射線利用

(3) 食品照射分野の現状と将来

等々力 節子

1. はじめに

農産物や食品に放射線を照射することにより、ジャガイモやニンニクなどの塊茎や球根の発芽や発根を抑制して貯蔵期間を延長し、また、食中毒を引き起こす病原微生物を制御することができる。さらに、青果物に潜む害虫を繁殖不能にすることによってその未発生地域への分布拡大を防ぐための植物検疫処理として、害虫の侵入、蔓延防止が可能となる。

この食品照射は、乾燥や冷蔵、加熱などのような、食品の物理的な処理の選択肢の一つである。放射線照射は食品の温度を上昇させず、薬剤を残留させない、包装された食品にも適用可能で、害虫や病原菌による再寄生や再汚染を抑えることができるという特徴を持つ。食品や農産物に使われる線量範囲は、図1に示すように、特別な場合を除いて、数十グレイ (Gy) ～十キログレイ (kGy) の範囲であり、工業分野での放射線加工より低い線量域である。

■ 芽止め (保存中の発芽防止) <u>ジャガイモ、ニンニク</u>	~0.15 kGy
■ 植物検疫処理、寄生虫の殺虫 <u>熱帯果物、穀類、食肉・魚介類、<u>切り花</u></u>	0.1~1 kGy
■ 肉類、水産物の食中毒防止 <u>赤身肉・家禽類、カエル脚、冷凍エビ・魚介類</u>	1~5 kGy
■ 香辛料など乾燥食品原材料の殺菌 <u>スパイス・ハーブ類、乾燥野菜、<u>生薬、食品容器</u></u>	~10 kGy
■ 無菌化 (滅菌) <u>宇宙食、病人食、<u>医薬品、無菌動物用飼料</u></u>	20~50 kGy

図1 食品照射の応用範囲と線量範囲
緑字の品目は食品ではないが参考として併記

ごく最近まで、食品照射の最も一般的な用途はスパイス・ハーブ類の微生物の低減や動物由来製品における病原体の不活性化などの衛生目的であった。特に、耐熱性の芽胞菌で汚染されることの多い、スパイス・ハーブ類や乾燥野菜等は、風味や色調が重要視され、加熱殺菌が難しいことから、放射線の利用に技術的な優位性が認められる品目である。さらに、この十数年の間に、商業的な利用が本格化し、毎年、流通規模が拡大しているのが、植物検疫処理としての利用である。グローバル化が進む食品のサプライチェーンに乗って新たな地域へ侵入し、農業生産に影響を与えるおそれのある、ミバエなどの害虫の分布拡大を防ぐため、放射線を消毒処理として利用する。このような植物検疫目的の照射処理は、2020年には、全世界で6万トンを超える農産物に適用されてると推定されている。

商業ベースで流通している照射食品の量は、主にアジア太平洋地域と南北アメリカ大陸で毎年増加しており、2020年には、全世界で100万トンを超える照射食品が流通していると推定

されている。食品照射が採算の合うものになるにつれて、食品専用の照射施設の数が増加すると考えられ、やがては放射性核種からのガンマ線ではなく、放射線発生装置（電子加速器及びX線発生装置）が主流になっていくと予測される。

本稿では、照射食品の安全性評価と国際的な規格基準、各国の法規制と実用化の状況、近年、発達の著しい植物検疫処理における放射線照射処理の現状、わが国における食品照射をめぐる議論と研究開発の現状、今後期待される技術開発の展望について解説したい。

2. 照射食品の評価と国際基準

照射食品の安全性評価と規格・基準設定の動きを、図2にまとめた。

世界	日本
1952 照射による芽止め効果発見（米）	
1963 穀物とベーコンの照射許可（米）	
1970-81 国際食品照射研究プロジェクト（IFIP）	
1980 FAO/WHO/IAEA（JECFI）の安全宣言	1967 特定総合研究（7品目）開始 ~88
1983 コーデックス国際食品規格採択	1972 ジャガイモの照射許可
1986 香辛料の照射殺菌および全食品の照射殺菌を許可（米）	1974 土幌農協で照射芽止めジャガイモを出荷開始
欧州食品科学委員会の評価	
1990 食鳥肉の照射殺菌許可（米）	
1997 冷蔵冷凍赤身肉も照射許可（米）	
1997 WHO: 10 kGy以上でも安全宣言	1986 日本アイソトープ協会研究プロジェクト ~91 (通称：松山委員会)
1999 食品照射規制の域内統一（EU）	
2001 香辛料類の照射許可（豪、NZ）	2000 全日本スライス協会香辛料殺菌の許可要請
2002 熱帯果実の照射許可（豪、NZ）	2003 食品安全委員会設立
2003 植物検疫に関する国際基準採択	2005 厚労省 検知法開発研究開始(厚労科研) ~11
コーデックス規格の改定	2005-06 原子力委員会食品照射専門部会
	2007 厚労省 薬事・食品衛生審議会（食品衛生分科会食品規格部会） 厚労省 輸入香辛料ミックスの検査開始（TL法）
2005 牡蠣など2枚貝の照射殺菌許可（米）	2008 原子力委員会（文科省）
	2009 食品健康影響評価研究(2-ACB毒性評価)
2008 レタスなどの照射殺菌許可（米）	2010 検知法の追加（2-ACB法）
2011 欧州食品安全機関（EFSA）評価	2010 厚労省 薬事・食品衛生審議会（食品衛生分科会食品規格部会）
2012 柿の検疫用照射許可（豪、NZ）	2012 検知法の追加（ESR法）
2014 甲殻類の照射殺菌許可（米）	2012 牛肝臓照射殺菌研究開始(厚労科研) ~18
2016 生鮮物（10種）の照射許可（豪、NZ）	
2017 牛ひき肉照射許可（カナダ）	
ブルーベリー、ラズベリーの許可（豪、NZ）	
2018 EC指令の見直し検討開始(EU)	2018 植物検疫処理基準研究開始(農水事業) ~19

図2 食品照射技術の評価と研究の歴史

2.1 国際機関における安全性評価と国際食品規格

照射食品の安全性評価に関する研究は、1950年代から開始された。60年代になると、WHO（世界保健機関）、FAO（国連食糧農業機関）、IAEA（国際原子力機関）が連携した国際会議が開催され、1969年には、「FAO / IAEA / WHO の照射食品の健全性に関する合同専門家会議（JECFI）」の枠組が誕生した。1970年には、これら組織とOECDが協力して、International Project in the Field of Food Irradiation（国際食品照射プロジェクト：IFIP）が

開始された。このプロジェクトには24か国が参加して、長期動物投与試験を含む安全性試験を各国で分担し、さらに、変異原性試験や放射線分解生成物に関する研究を実施し、その結果が共有・議論された。

1980年に実施されたJECFIの第3回会議では、IFIPの成果も踏まえ「10 kGy以下の総平均線量でいかなる食品を照射しても、毒性学的な危害を生ずるおそれがない。」という結論が出された。

1983年には、JECFIの結論を踏まえ、FAO／WHOのコーデックス国際食品規格委員会が「コーデックス照射食品に関する一般規格(Codex General Standard for Irradiated Foods)」を採択した。80年代後半になると、カナダ政府や欧州委員会の食品科学委員会等が、照射食品のリスク評価を実施しJECFIの結論を追認する結論を出した。また、米国医薬品食品安全局(US-FDA)も、1986年に照射食品の規制の枠組を再整備した。

1997年には、WHOの高線量照射に関する専門家委員会が、10 kGy以上を照射した食品に関しても健全性評価を実施し「意図した技術上の目的を達成するために適正な線量を照射した食品は、いかなる線量でも適正な栄養を有し安全に摂取できる。」として、10 kGy以上を照射した食品についても健全性に問題がないとの結論を出した。これを受けて、コーデックス照射食品の一般規格の改訂が議論され、2003年には現行規格が採択された。この改訂では、吸収線量について、「照射する食品の平均総吸収線量は10 kGyを越えてはならない」から、「食品の最大吸収線量は、技術上の目的を達成する上で正当な必要性がある場合を除き、10 kGyを越えてはならない。」という表現に改められた。また、照射の正当な目的について消費者の健康への寄与が明言され、表示等の規制の実効性担保のための検知法利用も言及された。

2.2 国際植物防疫条約

WTO体制下では、食品や農産物の輸出入に関する措置をSPS協定(Agreement on the Application of Sanitary and Phytosanitary Measures：衛生植物検疫措置の適用に関する協定)に適合させる必要がある。SPS協定において、(ヒトが摂取する)食品の衛生に関する国際基準としてコーデックス国際食品規格があるように、植物防疫の分野では、FAOの管轄する国際機関の「国際植物防疫条約(International Plant Protection Convention：IPPC)」が定める、「植物検疫措置に関する国際基準(ISPM)」が存在する。2003年4月には、「放射線照射を植物検疫処理法として利用するための指針(ISPM#18)」が採択され、2009年からは「規制有害動植物に対する植物検疫処理(ISPM#28)」の付属書に、個別の検疫害虫に対する消毒処理基準が収載され、基準の拡充が始まった。これらにより、放射線照射処理が、国際的基準の下で認知された植物検疫処理として利用できるようになった。

3. 照射食品の健全性と毒性学的安全性の論点

3.1 照射食品の安全性評価の論点（健全性：Wholesomeness）

照射食品の摂取によるリスク（人に対する健康影響）を考慮する際には、①照射により毒性（慢性毒性、催奇形性、変異原性を含む）物質の生成、また、誘導放射能の生成が起こらないか？（**毒性学的な安全性**）。②生残菌での突然変異誘発による有害菌の発生や毒素産生の促進、放射線耐性や薬剤耐性の増大が無いのか？（**微生物学的安全性**）、さらに、③照射により特定の栄養素の損耗などの食品としての栄養学的適性が保持されているか？（**栄養学的適確性**）という3つの論点を合わせた、**健全性（wholesomeness）**について議論されている。

照射食品の健全性評価については、長年にわたり国内外で膨大な研究が行われており、その結論は以下にまとめられる；

- ・毒性（慢性毒性、催奇形性、変異原性を含む）試験では照射の悪影響は認められない。
- ・照射後の生残微生物の影響は他の殺菌法の場合と同じで、照射で病原性や毒性が増大することはない。
- ・適正な照射条件では核反応は起こらず、食品が放射能を帯びることはない。（コーデックス規格、ISPMとも線源ごとに、核種とエネルギー上限を規定）
- ・栄養素の損耗は、加熱処理などとの比較において特に問題とならない。
- ・放射線照射による分解生成物のほとんどは、加熱などの加工処理でも生成し、通常の殺菌線量（10 kGy 以下）では、多くの場合、加熱処理に比べて生成量も少ない。
- ・現在、同定されている唯一の放射線照射特異的な分解生成物は2-アルキルシクロブタノン類であるが、この化合物を含む照射食品の摂取によるヒトへの健康リスクはほとんど無視できる。

3.2 放射線照射特異的な分解生成物の安全性評価

2-アルキルシクロブタノン類（2-ACBs）は、照射食品を見分ける検知法開発の研究の過程で、脂質由来の放射線照射に特有な分解生成物として同定された。その構造は、脂質を構成する脂肪酸より炭素数が4つ少ないアルキル基を側鎖に持つ環状ケトンである（図3）。照射食品中の含量は、照射された線量と、食品中の脂質（脂肪酸）含量に依存するが、その生成効率は小さい。例えば、パルミチン



図3 放射線照射で生成する2-ACBs

酸に由来の 2-ドデシルシクロブタノンの鶏肉 100g 中の含量は、3 kGy の照射で 12.9 μ g 程度である。

この化合物は、1990 年以降になって照射食品中で検出されたため、90 年代後半に、改めて純粋な 2-ACBs の毒性評価が実施された。そして、高濃度の 2-ACBs による培養細胞中の DNA 損傷作用や、発がんプロモーション活性（それ自体に発がん性は無いが発がん物質との同時投与で発がんを促進）の可能性について報告されると、照射食品の安全性を疑問視する消費者グループなどにより、その危険性がセンセーショナルに喧伝された。

しかし、WHO や欧州食品安全機関（EFSA）等は、発がんプロモーション活性の論文では 2-ACBs 投与量が、照射食品中の含有量に比べ桁違いに大きなことから、この報告をヒトに対する照射食品の健康影響の議論用いることは不適切であり、DNA 損傷を検出したコメントアッセイも、遺伝毒性評価の標準法に採用されていないと指摘した。その上で、過去に実施された、高線量（59 kGy）照射された鶏肉（2-ACBs を含有）の長期動物投与試験の結果や、2-ACBs のエームス法による変異原性試験の結果を重要視して、これらが、陰性であることから照射食品中に存在する 2-ACBs のヒトへの悪影響は無視しうると結論した。多くの専門家はこの見解を支持し、高額な 2-ACBs の標準品を用いたこれ以上の動物投与試験は無用と考えたが、一旦、想起された懸念が払しょくされない状況が続いた。

その後、わが国の食品安全委員会が出資した研究プロジェクトでは、十分な動物数を用いた、発がんプロモーション試験や長期反復投与試験、国際的に妥当性の確認された遺伝毒性のバッテリー試験を用いた 2-ACBs の評価が行われ、全てについて陰性の結果を得た。また、韓国の研究グループも同様の試験を行い、陰性の結果を論文公表している。これらの成果により、現時点では 2-ACBs の遺伝毒性や発がんプロモーション作用についての懸念は否定されている（図4）。

○遺伝毒性試験および動物を用いた毒性試験
「食品健康影響評価技術研究（2009-11）
（食品安全委員会）」代表研究者 古田雅一先生

・標準的なプロトコルによる「遺伝毒性試験」**すべて陰性**
・動物数を確保しての発がんプロモーション実験 **陰性**
○Yamakage, K. et al (2014) *Mutat Res* 770:95-104.
○Sato, M. et al (2015) *Toxicol Pathol.* 28(2):99-107.

韓国原子力研究所のグループも、
長期投与試験、遺伝毒性試験で**陰性**の結果を報告
○Beom-Seok Song(2018) *Food Chem. Toxicol.*121 639-647

○2-ACBsの体内代謝
・2-ドデシルシクロブタノンをラットに投与し、代謝産物を解析したところ、生体内で2-ドデシルシクロブタノールに変換され、糞中に排泄されることが明らかになった。
○HIJAZ, F. et al (2010) *J. Food Sci* 75 (4) 772-80.

図4 2-ACBs の安全性試験結果（2010 年～）

4. わが国における健全性評価と食品照射の規制

4.1 わが国における健全性試験の実施とバレイショの照射認可

わが国の食品照射研究は1955年(昭和30年)頃より開始された。1967年に、原子力委員会は、食品照射をナショナルプロジェクトとしての「原子力特定総合研究」に指定し、実用化に向けた総合的な研究開発を開始した。このプロジェクトでは、バレイショ、タマネギ、米、小麦、ウインナーソーセージ、水産練り製品、ミカンの7品目を取り上げられ、健全性(照射食品の安全性および栄養適性)、照射効果、照射技術についての研究を、国内機関で分担した。1971年には、最初の評価品目であるバレイショの試験結果が報告され、1972年にはバレイショの照射が認可され、翌年、士幌農協の施設において商業照射が開始された。

原子力特定総合研究では、1981年にすべての試験を終了し、1988年までに、順次、品目ごとの最終報告書がまとめられた。しかし、1970年代の後半に、消費者団体による照射バレイショのボイコット騒動が勃発し、バレイショ以外への食品照射の運用は拡大しなかった。

原子力特定総合研究で実施された、バレイショやタマネギの安全性試験結果は、前述した国際プロジェクト(IFIP)やJECFIの会合でも共有され、国際的に評価されるなど、このころはわが国としても、健全性評価における国際的な最新の見解を追認していた。しかし、1983年にコーデックス規格が採択された時点では、国内における照射食品開発の機運が低下しており、その後、国際基準に照らし合わせて、国内規制の枠組みを再検討する機会を失したまま現在に至っている。

一方、欧州、米国、カナダ、オーストラリア/ニュージーランドなどでは、コーデックス規格の採択や改定、新規品目への照射処理拡大要請などの機会を捉え、最新の科学的知見に基づいたリスク評価や規制の見直しが実施されている。

4.2 現行の食品照射に関する規制

わが国においては、「食品、添加物の規格基準(告示370号)」において、放射線照射を使った食品の製造・加工を禁止している。上位にある食品衛生法第13条(旧11条)では、基準に合わない製法や規格に合わない成分を含む食品の製造・加工・販売・輸入を禁止しており、これらより、放射線照射された食品は製造することも、輸入して流通させることも出来ない。

バレイショについては、同告示の D 条に、発芽抑制を目的にガンマ線による 150 Gy を超えない範囲での照射を例外として記載する形で法的に許可している。したがって、B 条の原則禁止は、例外条件設定の前提として設けられたとも言える（図5）。

食品衛生法第 6 条では、13 条とは別に、危害の恐れのある毒物や微生物に汚染された食品の製造販売を明確に禁止している。

食品衛生法第13条第2項（旧11条第2項）

前項の規定により基準又は規格が定められたときは、その基準に合わない方法により食品若しくは添加物を製造し、加工し、使用し、調理し、若しくは保存し、その基準に合わない方法による食品若しくは添加物を販売し、若しくは輸入し、又はその規格に合わない食品若しくは添加物を製造し、輸入し、加工し、使用し、調理し、保存し、若しくは販売してはならない。

食品、添加物等の規格基準 (昭和34年厚生省告示第370号)

B 食品一般の製造、加工及び調理基準

1. 食品を製造し、又は加工する場合は、**食品に放射線**（原子力基本法第3条第5号に規定するものをいう。）を照射してはならない。
ただし、食品の製造工程又は加工工程において、その製造工程または加工工程の管理のために照射する場合であって、食品の吸収線量が**0.10グレイ以下**のとき及び**D各条の項において特別の定めをする場合は、この限りでない。**

D 各条

○穀類、豆類及び 4 野菜の加工基準

発芽防止の目的で、**ばれいしょに放射線を照射する場合は、**次の方法によらなければならない。

- (1)使用する放射線の線源及び種類は、**コバルト60のガンマ線**とすること。
- (2)ばれいしょの吸収線量が**150グレイ**を超えてはならないこと。
- (3)照射加工を行ったばれいしょに対しては、**再照射してはならないこと。**

図5 食品衛生法における食品照射の規制

4.3 規制変更に関する国内議論（2000 年以降）

全日本スパイス協会は 2000 年に香辛料照射の許可要請を厚生省（当時）に提出したが、それに対する明確な回答は得られられていなかった。

2003 年に食品安全に関する独立のリスク評価機関として設立された食品安全委員会は、当初から食品照射に関して海外の実用状況や法規制および安全性評価の調査事業を実施したが、自発的に照射食品のリスク評価を実施することは無く、リスク評価は厚生労働省等からの具体的な諮問によるべきと判断し、収集した情報の提供を行うに留まっている（最新更新は 2012 年 6 月）。

2005 年に原子力委員会は、「原子力政策大綱」に基づき、「食品照射専門部会」を設置し、食品照射技術について、担当省庁や消費者団体等の関係者や有識者のヒアリングを含む、公開議論を実施した。同専門部会は、香辛料国内における今後の対応に関する提言を含む報告書を取りまとめ、2006 年 9 月に原子力委員会に報告した。これを受けた原子力委員会は、翌 10 月に、食品照射（特に香辛料への適用拡大）について；①食品安全性行政からの判断、②検知技術の実用化等、③社会受容性向上の取り組みの 3 点を、各省庁や関係者に求める「決定」を勧告した。

厚生労働省はこの勧告を受け、2007 年に「薬事・食品衛生審議会（食品衛生分科会食品規格部会）」での議論を開始した。

2010年5月の厚労省の部会では、委託調査結果、科学的知見や国民理解の不足が明らかになったとし、①事業者に対し、「アルキルシクロブタン類の毒性評価に不足する科学的知見（食品中の生成量と推定曝露量・遺伝毒性と発ガンプロモーション作用を中心とする毒性）の収集」を、②原子力委員会に対し「国民理解の促進に係る取り組み」を要請すると結論した。なお、厚労省・基準審査課は、部会質疑での回答で、「将来的に科学的知見が集まれば、食品安全委員会にリスク評価を依頼するに値する情報があるかを、食品規格部会で再検討する用意がある」と明言している。

さらに、厚生労働省は、原子力委員会の「検知法実用化」の勧告を受け、2007年に香辛料類を主対象に TL 法を通知し、検疫所において輸入食品検査を開始した。2010年3月には、アルキルシクロブタン法を追加するとともに、国際的な標準分析法と結果判定に齟齬のあった TL 法の手順を改定し、さらに、2012年には ESR 法を通知した。この数年、これら分析法を運用した輸入食品のモニタリングを年間 500 ～ 700 件程度、実施している。

4.4 牛肝臓の殺菌と国産農産物の輸出拡大にむけた照射効果に関する研究

2011年、ユッケを原因食材とする腸管出血性大腸菌による集団食中毒を契機に、畜産物の生食による食中毒リスクの議論が活発化した。牛肝臓については、その内部が腸管出血性大腸菌により汚染される可能性と、それらを除去する手法が見いだせないことから、2012年に生食用としての販売が禁止された。同時に、放射線照射による微生物制御の有効性検討が必要と判断され、2018年度までの厚生労働科学研究により、牛肝臓に接種した腸管出血性大腸菌 O157 および Salmonella の死滅に必要な、ガンマ線照射条件が明らかにされた。

農林水産省は、同省の掲げる国産農産物の輸出拡大戦略の中で、リンゴやミカンの輸出の妨げとなる検疫害虫（モモシクイガ、ミカンバエ）に、有効な植物検疫処理技術（主にヨウ化メチル燻蒸と温度処理）を開発し、国際基準への提案を目指す委託事業を、2018年度に開始した。この事業の一部には、放射線照射処理の効果確認も取り入れられ、2018-19年度には、量研・高崎研で国産品種の品質影響を中心に検討が行われた。

5. 諸外国における食品照射の実施状況

世界全体の農産物・商品の総照射量は、2000年が30万トンであったが、2005年には40万トンに達し、中国が全体の1/3を占めた。その後も中国及びベトナムの増加が著しく、2010年の総処理量は58万トンに達した。日本、韓国、ヨーロッパでは、処理量が減少しているが、それ以外の国では、増加が続いている。以下、地域別の状況を述べる。

5.1 アジア・太平洋地域

表1、2に、2020年9月開催のIAEA/RCAプロジェクト会議での情報に基づき、各国の食品処理量と食品照射施設の状況をまとめた。RCAプロジェクト参加の19ヶ国中、日本を含む13ヶ国で食品照射処理を実施し、施設を持たないニュージーランドでは、オーストラリアから輸入した照射果実が販売されている。また、中国を除く12ヶ国に47施設が稼働しており、多くは、医療器具の滅菌など、食品以外の製品の照射も実施する多目的施設である。以下、主な国の状況を概説する。

表1 各国の実用照射の品目と数量

国	数量 (トン)	主な品目
オーストラリア	6,000	生鮮果実野菜
バングラディッシュ	145	輸出用スパイス、ペットフード
インド	12,500 (3年の平均)	スパイス・調味料、穀物、豆類、マンゴ、ドライフルーツ、ペットフード
インドネシア	650	ハーブ、スパイス、その他
日本	3,000	パレिशョ
韓国	250	乾燥野菜、朝鮮人参製品、穀物、調味料、酵母製品
マレーシア	1,100	ハーブ、スパイス、加工食品
パキスタン	2,000	ハーブ、スパイス、マンゴ、生鮮果実野菜、ペットフード (ドッグフード)
フィリピン	470	ハーブ、スパイス
スリランカ	1	ハーブ、スパイス
タイ	1,500	ハーブ、スパイス、マンゴスチン、加工食品
ベトナム	120,000	生鮮および冷凍魚貝類、ハーブ、スパイス、穀物、生鮮果実、ペットフード
小計	147,500	
中国*	1,000,000	スパイシーチキン (手羽、脚)、乾燥野菜、スパイス、調味料、ペットフード

* 中国は会議出席が無く、推測情報である。

表2 各国の照射施設の整備状況 (食品照射実施国)

国	稼働中の食品用 商業照射施設			
	ガンマ線	電子線	X線	多目的/ 食品専用
オーストラリア	1		1*	M
中国	多数	数機	1	不明
バングラディッシュ	1	0	0	M
インド	18	0	0	M=12 D=6
インドネシア	2	0	0	M
日本	1	0	0	D
韓国	2	1	2	M
マレーシア	1	0	0	M
パキスタン	2	1	-	M
フィリピン	1	0	0	M
スリランカ	1	0	0	M
タイ	1	0	0	M
ベトナム	8	1	2	M
合計	39 + 中国	3 + 中国	5 + 中国	

M=multi-purpose : 多目的施設、
D= Dedicated 食品照射専用施設)

中国：世界で最大の食品照射実施国であり、70～100万トンの食品が処理されていると推定される。2005年の報告では、ニンニクや香辛料等を中心に146,000トン余りとされていたが、最近では、スナックとして食される、スパイシーチキン(鶏爪)の照射が顕著に増加している。照射施設に関しては、2005年にはガンマ線103施設、電子線6施設であったが、2018年のIAEA情報ではガンマ線126施設、電子線60施設となっており、電子線照射施設の増加が顕著である。2016年には、ベトナムとの国境近くの憑祥市に100万トン規模の果実照射施設(10MeV/7.5kWのEB2基)が設置された(図6(次頁参照))。



図6 中国の照射施設と照射食品

Yves Henon (2018)
第 54 回食品照射研究協議会大会資料より作成

ベトナム：7つの食品群の照射が認可され、民間施設も含め11の照射施設が稼働しており、さらに、1施設の建設予定がある。処理量は、着実に増加し、2000年の処理量はわずか5千トンであったが、2006年以降急激に増大し2018年の処理量は12万トンに達したものと推測される。照射品目の主体は、海外輸出を目的とした冷凍魚介類（エビ）の照射であるが、検疫処理を目的とした果実の照射も着実に拡大している（図7）。

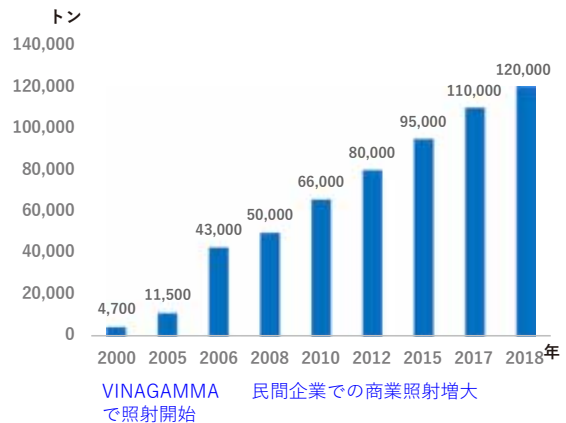


図7 ベトナムにおける食品照射処理量
（久米（2020）第54回食品照射研究協議会大会）

インド：多数（18施設）のガンマ線照射施設を国内に有し、中には欧州委員会や米国農務省に認可を受けた施設も存在する。香辛料や穀物・豆類等の乾燥食材の照射とともに、2007年からマンゴの照射を開始し、米国に向けた輸出を実施している。

タイ：原子力研究所（TINT）傘下のタイ照射センター（TIC）や民間のガンマ線照射施設において、香辛料や発酵ソーセージの照射が行われている。また、2007年には、米国と2国間協定の下、6品目（マンゴスチン、ロンガン、ランブータン、マンゴ、ライチ、パイナップル）の果実についての植物検疫処理による対米輸出プログラムに合意し、マンゴスチン、ロンガン、

ランブータンが、米国農務省認可の施設で処理され輸出が開始された。2020年には、TICに植物検疫処理用のX線施設を開設し、米国からの施設認可に向けた準備を進めている。

オーストラリア：1999年、ニュージーランドとの食品安全基準の統一に際し、食品照射の規則を盛り込み、照射を認可する一般的な要件を定めた。この基準作成に向けては、1992年にWHOに安全性評の再評価を求める（報告書は1994年に出版）等、周到な準備がなされていた。豪州・ニュージーランド食品安全基準機関（FSANZ）は、2001年に香辛料・ハーブ、ハーブ茶の照射を許可、2003年には10種類の果実について植物検疫処理目的



図8 オーストラリア産マンゴの表示
「環境保護のために照射」

の許可を行った。翌年、両国の植物検疫当局の協定に基づき、マンゴの輸出を開始した（図8）。以降、放射線照射を利用した積極的な農産物輸出政策を展開している。なお、オーストラリア国内においても、検疫害虫の寄生による農産物の移動制限がかかる場合があり、国内検疫のための照射処理も実施されている。

韓国：2005年には、民間施設において、香辛料や調味料等、5000トン強の照射処理を実施していたが、2010年に厳格な表示が義務付けられると処理量が激減し、2020年の処理量は250トンだと報告されている。食品照射に関する規制整備は続けられており、2004年までに26品目のガンマ線照射が認可、2012年には、10 MeVまでの電子線、2020年には7.5 MeVまでのX線利用が認可された。植物検疫照射のための基準整備も進めている。

日本：バレイショの照射量は、最盛期には2万トンに達していたが、直近の処理量は数千トンとなっている。生食用のバレイショが店頭販売される際には、小分け袋に食品表示法に基づく照射した旨のラベルが貼られ、情報提供のためのURLとリンクしたQRコードも印刷されている。

その他の国：パキスタン、マレーシア、インドネシアでは、スパイス、ハーブ等の照射が実施されているほか、植物検疫処理の導入も進められており、パキスタンは、米国施設でのマンゴの照射による輸出を、マレーシア、インドネシアはオーストラリアからの照射果実を輸入し、貿易網の拡大を図っている。バングラディッシュ、スリランカ、フィリピンでは、研究機関に備えられたR&D用の照射施設を用いた、スパイス、ハーブ等の照射を実施し商業流通させている。シンガポールには照射施設は無いが、コーデックス規格に則った食品安全規制を採用しており、照射食品の輸入・販売は可能である。

5.2 米国およびカナダ

米国：米国食品医薬品局は、1986年に安全性評価の考え方を整理し、害虫制御目的で青果物全般に1kGyまで、摂取量の少ない香辛料に30kGyまでの照射を認可した。その後、1990年代には、サルモネラや大腸菌157などの病原性細菌の制御の目的で食鳥肉や赤身肉の照射を許可し、2000年代になって、貝類や、非加熱で喫食される可能性のある野菜類の病原性微生物の制御のため、照射の認可を拡大した(表3)。

表3 米国 FDA の許可品目・線量

21CFR179.21

食品	目的	線量 (kGy)	許可年
豚肉(生)	寄生虫抑制	0.3 kGy (最低) 1 kGy (最高)	1985
青果物	成熟抑制	1kGy (最高)	1986
全食品	殺虫	1 kGy (最高)	1986
酵素製剤	殺菌	10 kGy (最高)	1986
乾燥香辛料 / 調味料	殺菌	30 kGy (最高)	1986
食鳥肉	病原菌制御	4.5 kGy (非凍結:最高) 7.0 kGy (冷凍:最高)	2012
冷凍肉 (NASA宇宙食)	滅菌	44 kGy (最低)	1995
赤身肉	病原菌制御	4.5 kGy (冷蔵:最高) 7.0 kGy (冷凍:最高)	1997
卵 (殻付)	病原菌制御	3.0 kGy (最高)	2000
もやし用種子	病原菌制御	8.0 kGy (最高)	2000
貝類	病原菌制御	5.5 kGy (最高)	2005
ほうれんそう・レタス	病原菌制御	4.0 kGy (最高)	2008
畜肉・畜肉副産物・ 畜肉製品 (冷蔵及び常温)	病原菌制御 貯蔵期間延長	4.5 kGy (最高)	2012
甲殻類 (生 (チルド、冷凍)、 乾燥、調理品を含む)	病原菌制御 貯蔵期間延長	6 kGy (最高)	2014

商業照射の品目は、香辛料、乾燥野菜等が年間7～8万トン、牛ひき肉肉や食鳥肉が年間8,000トン、そのほか、ペット用製品が2万トン程度と推定される(図9)。また、国内検疫として、サツマイモ等のハワイ産農産物が、年間7,000トン超、ハワイで処理され、米本土に出荷されている。

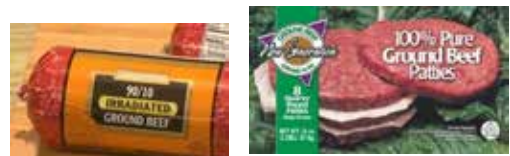


図9 照射牛ひき肉と冷凍パテ(米国)
Ronald Eustiice 氏提供

カナダ：1988年に整備した食品照射の基準では、ジャガイモ、タマネギ(発芽防止)、小麦(粉)(殺虫)、香辛料(殺菌)の4品目を許可した。2002年には、マンゴ(植物検疫処理)、

牛肉、食鳥肉、エビ（食中毒細菌制御）についてのリスク評価が実施されたが、規制変更には至らなかった。その後、2012年に発生した大腸菌157汚染を原因とする牛ひき肉の大規模リコールをきっかけに、業界団体が照射の認可を要請した。カナダ保健省は、リスク評価を実施し、2017年に、生鮮（冷蔵）および冷凍牛ひき肉の照射を認可した。流通している品目としては、香辛料の照射が実施されている。2005年の処理量は1,400トンであったが、最新の処理量は把握できていない。

5.3 ヨーロッパ連合（EU）：

欧州委員会（EC）は、照射導入の一般原則を定めた Directive 1999/2/EC と EU 域内で統一的に認可する処理品目を規定した Directive 1999/3/EC の 2 つの指令で食品照射の基準を定めている。前者には、照射導入の前提条件や表示などの要件が記され、許可品目は、「欧州委員会の食品科学委員会（SCF：Scientific Committee on Food）が、安全性評価上、適用が好ましいと判断した食品リストと線量範囲の中から許可品目を選ばれるべき」、と規定されている（図10）。後者において、域内で流通できる品目は、スパイス・ハーブ類（dried aromatic herbs, spices and vegetable seasonings）のみが許可品目として合意されている。ただし、この許可品目リストは、最終合意に至っておらず、2000年以前に加盟各国が認可し品目も、未だに有効と位置づけられている。

- ・ **域内統一基準：Directive 1999/2/EC（一般事項）、1999/3/EC（品目リスト）**
- 照射導入の原則**
 - 技術的必要性（正当性）
 - 安全性評価（欧州食品科学委員会*が評価・承認した品目と線量範囲内にあること）
 - 消費者利益
 - 適正衛生規範、GMP、GAPの代替としないこと
- 正当な目的**
 - 病原生物の制御による食中毒発生低減
 - 腐敗過程の遅延や阻止、腐敗微生物の制御による食品腐敗の低減
 - 成熟遅延、発芽、萌芽防止による食品ロスの低減
 - 植物及び植物製品に対する有害生物の除去
- 表示の徹底** 原料まですべて（下限含有量は無い）
- 施設の認可と査察** 域内（+MCI-）14か国、24施設認可 10施設稼働
EU域外も認可と査察 スイス、タイ、インド、南アフリカ、トルコ（10施設）
- 統一許可品目** スパイス ハーブ 調味料 総平均吸収線量 10 kGy
- 個別許可** 規制の完全調和がとれるまで ベルギー、フランス、オランダ、チェコ、イタリア、ポーランド（+UK）
- 加盟国の年次報告義務** 市場モニタリング（検知）結果と域内施設の処理量

図10 EUにおける食品照射規制の概要

https://ec.europa.eu/food/safety/biosafety/irradiation_en

EC 指令が定める照射食品の表示は、含有量に対して免除下限のない、原材料まで含む厳格なものである。表示の担保として照射検知技術が開発活用され、市販流通品のモニタリング調査と結果の欧州委員会への報告が義務付けられている。このことが、事業者に影響し EU における食品照射の停滞の大きな要因となっている。基準統一前には、2 万トンほどあった照射量は、2017 年の統計では、5000 トン余りに減っている。主な照射品目は、衛生化を目的とした冷凍カエル脚と香辛料である（図11）。

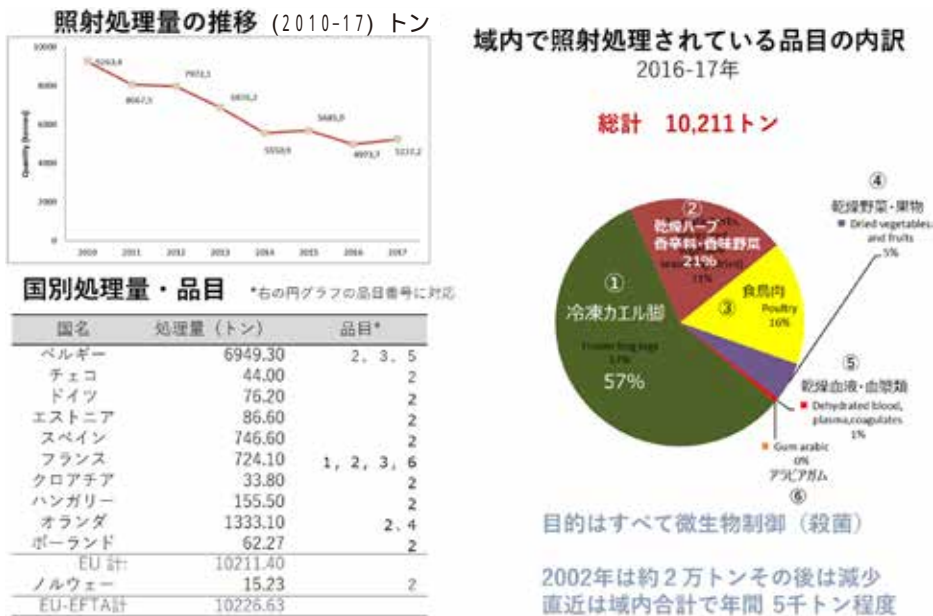


図11 EU 域内における食品の処理状況（域内施設での照射分のみ）
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2019:0454:FIN>

5.4 その他の地域

東欧では、ソビエト時代にウクライナ、オデッサに電子線照射施設を開設し、小麦の殺虫処理を実施していた。2005 年の調査では、ソ連崩壊後も同施設が継続使用され、7 万トンほどの処理量が報告されたが、現在では施設閉鎖されている。ロシアでは、2016 年に Codex 規格に準拠した国内規制を整備し、2017 年より、スモスクワ近郊の 2 つの電子線照射において、スパイス、肉製品、新鮮野菜などの照射を実施している。

アフリカ地域においては、南アフリカで、香辛料やはちみつなどの照射が実施されている。また、2012 年からは、米国に向けた照射果実の輸出を開始し、ライチなどが輸出されている。エジプトにおいても食品照射が実施されているとの情報がある。

中南米地域では、2008年にメキシコが米国への果実輸出を開始した。2011年には、新たな照射施設を開設し、米国に対するの照射果実の最大輸出国として、処理量を順調に伸ばしている。また、ペルー、ジャマイカ、グレナダ等も米国に対する果実輸出を実施している。

6. 植物検疫処理としての放射線照射利用の現状

6.1 放射線照射による植物検疫処理の特徴

輸入国(地域)には未発生で、輸出国(地域)の農産物に寄生の恐れのある害虫、すなわち「検疫害虫」の侵入・拡散を防ぐためには、警戒対象の地域で生産された当該農産物の輸入禁止措置が取られる。しかし、蒸熱処理、低温処理、あるいは薬剤燻蒸等の処理によるリスク低減効果が双方で確認・合意されると、その適用により輸入が解禁される場合がある(条件付き輸入解禁)。この植物検疫処理(Phytosanitary Treatment)の条件について国際的な調和を図るため、ISPM#28「規制有害動植物に対する植物検疫処理」の付属書に、種々の手法における処理基準が策定されている。

放射線照射を植物検疫処理に利用するための基本的要件は、ISPM#18「放射線照射を植物検疫処理法として利用するための指針」として定められている。放射線照射に期待される効果は、ウイルスを媒介するベクターとなる害虫を除き、完全殺虫では無く、不妊化(次世代の発生抑制)や生育阻止である(図12)。したがって、これまで汎用されてきた他の処理と異なり、輸入検査において、「生きた害虫が発見される」可能性がある。しかし、照射処理の工程は、トレーサビリティの確保された管理手法が十分に確立されており、規定された手順で基準(最小)線量以上の照射を行い、その記録を示すことで、検疫処理の効果を十分に保証できる。

1. 権限 (各国の植物検疫当局 : NPPOの責任)

2. 処理の目的

植物検疫措置としての放射線照射を利用することの目的は、規制有害動植物の侵入または、まん延を防止することである。これは、以下のような対象有害動植物における或る一定のレスポンスを達成することによって実現できる：

- 殺虫(菌)、
- 健全な発育の阻止(例えば、成虫の羽化の阻止)
- 繁殖阻害(例えば、不妊化)または
- 不活性化。

放射線照射の植物検疫的利用は、植物の不活化(例えば、種子が発芽するが生育しない、または塊茎、球根または穂木が発芽しない)も含む。

2.1 効力

要求されるレスポンスと統計水準の記載が必要

処理が病原体のベクターを対象とする場合には、死亡率

但し、ベクターではなく品目の表面または内部に生き残る有害動植物については、不妊化が適切なレスポンスである。

3. 処理

線源(60-Coまたは¹³⁷-Csのガンマ線、電子線(10MeV以下)、

エックス線(5MeV以下)

最小吸収線量(Dmin)が品目全体にわたって完全に達成されることの保証が必要

3.1 適用

照射を実施する場所・場面についての記述

図12 ISPM#18の要点(部分抜粋)

2021年現在、ISPM #28の付属書に採択されている39本の処理基準の内訳は、放射線処理(19本)、低温処理(13本)、蒸熱処理(5本)、フッ化スルフルル(2本)である。このように照射処理が先行して採択されている理由には、プロセス管理が容易な放射線処理の特性や、後述するIAEAの研究プロジェクトの貢献が大きい。

ISPMにおける照射処理の処理(線量)基準は、害虫種に応じて、固有の最小線量が定められているが、寄生される農産物の種類によらず広範に適用できる。一方、ISPMにおける低温処理基準の場合、チチュウカイミバエを例にとると、中心温度2℃以下であっても処理日数は、レモン、グレープフルーツ、マンダリンオレンジで、16日、19日、23日と異なる。このように、低温処理の場合、果実種ごとに効果を確認して条件する必要がある、さらに処理に要する時間も長い。照射処理の場合は、多品目への適用拡大が容易であり、処理時間も短く、照射直後に出荷することが可能である。照射処理のさらなる利点として、温度上昇が無いため比較的、品質が良好であること。薬剤くん蒸処理で必要な、残留検査やガスの放出が不要である。といった特徴を挙げるができる。

6.2 米国における植物検疫目的の放射線照射の利用状況

米国は世界最大の、照射果実の輸入国である。ハワイ(主な処理品目はサツマイモ)から米本土への国内検疫分も含めると、2019年の照射生鮮物の(輸入)数量は、約4万1千トンと推定され、インド産照射マンゴが初めて輸入された2007年に比べると、その量は約10倍に達している。米国の主要な貿易相手国は、数量の大きい順に、メキシコ、ベトナム、インドである。これに続き、タイ(マンゴスチン)、オーストラリア(マンゴ、ライチ)、南アフリカ(ブドウ)からも、照射果実を輸入している。これらの国では、米国農務省(USDA)の動植物検疫局(APHIS)が植物検疫用も認可した照射施設を有しており、輸出前に自国内で照射を実施し、植物検疫証明書を添付して青果物を迅速に通関させる“Preclearance”と呼ばれるシステムにより米国への輸出を行っている。一方、到着後に、米国内の認可施設で処理を行う“Port of Entry”と呼ばれる選択肢も用意されており、このシステムによれば、照射施設を持たない国であっても対米輸出が可能となる。ジャマイカ、パキスタン、ペルー、グレナダは、このシステムにより輸出を実現している。(図13(次頁参照))

米国への最大の輸出相手国のメキシコでは、グアバやマンゴなどの品目を、国内施設および、米国施設の両方で照射しており、その量は継続的に増加し、2020年の輸出量は、27,000トンあまりで、前年の21,000トンに比べて約30%増加した。

米国は（輸入）プログラムの開始に当たり、「輸出相手国」との2国間で同等作業計画体制（Framework Equivalency Work Plan - FEWP）に合意している。これは、放射線照射された農産物の貿易を許可する全般的な条件の相互承認を構築するもので、米国への輸入に際して認められた照射の条件は、米国から相手国への照射農産物の「輸出」に際しても承認されることを意味する。従って、Port of Entry のシステムで輸入に利用される米国内照射施設は、相手国への輸出においても承認されていることとなり、これを利用した米国産農産物の輸出が可能となる。米国の植物検疫政策は、長期的な戦略のもとに実行されている。

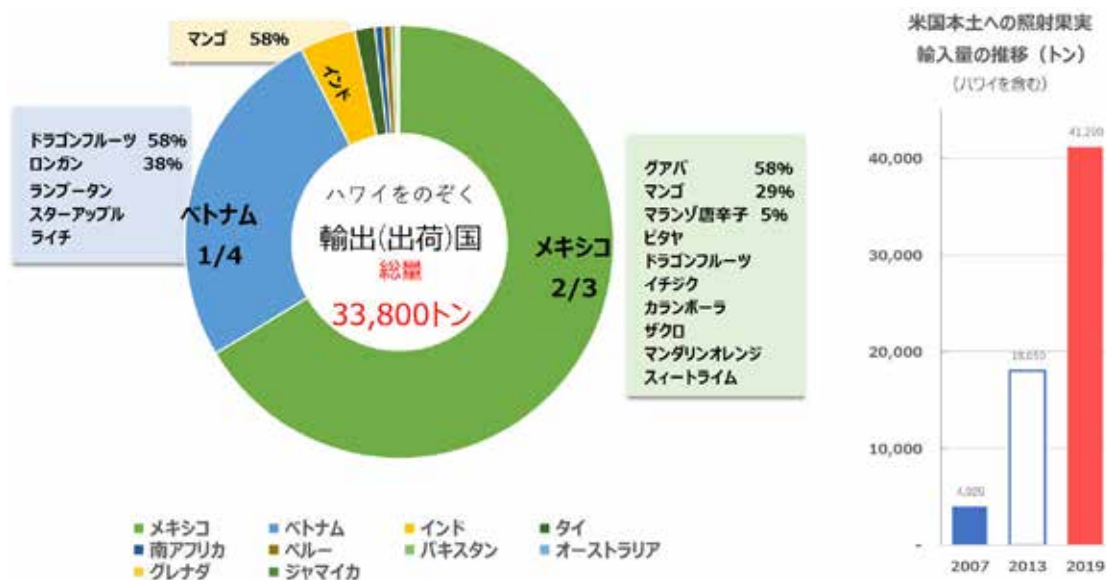


図13 米国（本土）に輸入される照射果実の出荷国別割合と主な品目（2019年）
米国農務省データにより PsIP 作成した資料から引用 <https://psipglobal.org/members/>

6.3 オーストラリアにおける植物検疫目的の放射線照射の利用状況

オーストラリアは、2004年のニュージーランドへの照射マンゴの輸出を皮切りに、照射処理による農産物輸出を積極的かつ戦略的に進めて来た。両国の食品安全基準は、食品安全規制当局であるFSANZ（豪州／ニュージーランド食品安全基準機関）により、共通して定められている。2021年5月には、植物検疫目的で認可されていた青果物に対する放射線照射を26品目から「すべての生鮮農産物」に拡大する規制変更がおこなわれた。

表4にオーストラリアからの輸出量の推移を示した。同国は、インドネシア、米国、タイ、ニュージーランド、マレーシア、ベトナムの6か国に対して、照射による輸出プロトコールを作成し、輸出を実施している。

表4 オーストラリアが輸出した照射果実量の推移

Peter Leach 私信

単位：トン

シーズン	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19
果実(輸入国)				
マンゴ(ニュージーランド)	1024	982	1297	1357
マンゴ(米国)	179	141	107	114
マンゴ(マレーシア)	79	21	14	15
トマト(ニュージーランド)	349	134	269	517
唐辛子(ニュージーランド)	9	0	9	0
ライチ(ニュージーランド)	64	72	216	459
ライチ(米国)		6	12	16
パパイヤ(ニュージーランド)	104	0	22	57
プラム(インドネシア)	4	0	0	0
ブドウ(ベトナム)	843	1121	1747	2105
ブドウ(インドネシア)				
サクランボ(インドネシア)	2	6	0	16
マンダリン(ベトナム)	67	40	55	103
オレンジ(ベトナム)	2	14	54	14
サクランボ(ベトナム)			402	609
合計	2726	2537	4204	5306

照射施設を運営する Steritech 社は、2019年、従来、照射実施していたブリスベンのガンマ線照射施設に加えて、メルボルンに、植物検疫処理のための X 線照射施設を建設し、2020年初頭から運転を開始した。2019/20年の輸出シーズンは、新たに、タイに向けたカキの輸出や、ニュージーランド向けのブドウの輸出も開始され、COVID-19の影響による航空貨物の混乱にもかかわらず、前シーズンを超える量の輸出を達成したと報告している(2020年9月の情報で、処理量 6,000トン)。

6.4 ベトナムにおける植物検疫目的の放射線照射の利用状況

ベトナムでは、民間事業者の Son Son の電子線施設、Anphu のガンマ線施設に加え、ベトナム原子力研究所・ハノイ照射センター(Hanoi Irradiation Center : HIC)のガンマ線照射施設においても、植物検疫照射が可能となった。2019年には、Son Son 社で照射された果実類 7,598トンが米国に輸出された。これは、輸出が開始された2008年に比較すると76

倍の数量であり、ドラゴンフルーツ、ロンガン(2,729トン)、マンゴ(307トン)ランブータン、スターアップル、ライチなどが含まれている。これらに続き、米国に対しては、グレープフルーツ等の果実輸出についての交渉を実施中である。オーストラリアに対しては、Son Son 社が108トン、HIC がライチとマンゴ合わせて70トンの照射処理を行い、輸出が行われた(図14)。

ドラゴンフルーツの照射(2008年～) スターアップル(2017年～)



図14 ベトナムから米国に輸出されるドラゴンフルーツとスターアップル

6.5 世界に拡大する照射農産物の流通

図15に全世界の植物検疫目的の照射生鮮農産物の数量を、表5(次頁参照)に主な国(地域)の対応状況をまとめた。

国際基準があっても、実際の貿易は、輸出・輸入国の双方の植物検疫当局による、2国間協議に基づき実施される。また、市場流通には、輸入国の食品安全当局による規制をクリアする必要がある。なお、わが国が採用している植物検疫処理は、熱処理(蒸熱、温湯)低温処理、くん蒸(臭化メチル、青酸ガス、リン化水素)、システムズアプローチ(園地管理や検査による無発生証明)であり、放射線照射は植物検疫法上認められていない。

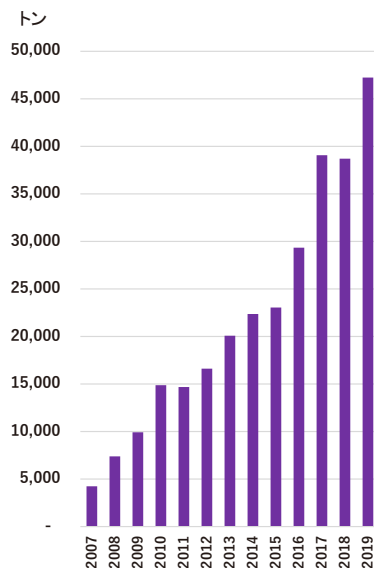


図15 全世界の青果物照射量
PsIP (2021)
<https://psipglobal.org/members/>

表5 植物検疫処理制度における放射線照射利用への各国の適業状況

国名	制度 (2国間協定)	貿易	パートナー	国名	制度 (2国間協定)	貿易	備考
米国	Yes	Yes(im/ex)	ex: メキシコ7 im: 11か国	チリ	Yes	No	USDA/APHISと連携
ベトナム	Yes	Yes(im/ex)	ex: AUL, 米 im: AUL	フィリピン	Yes	No	米国と協議成立も、品種適 性が輸出には非合
タイ	Yes	Yes(im/ex)	ex: 米, AUL im: AUL	台湾	Yes	No	米輸出条件に非合
メキシコ	Yes	Yes(im/ex)	米国	韓国	Yes (no)	No	検疫当局の 基準整備
オーストラリア	Yes	Yes(im/ex)	ex: 6か国 im: IND, VET	中国	Yes (no)	No	検疫当局の 基準・施設整備
インド	Yes	Yes (ex)	米, AUL	アルゼンチン	Yes (no)	No	国内基準 発効前
ハルーフ	Yes	Yes (ex)	米国	EU	No	No	
ジャマイカ*	Yes	Yes (ex)	米国	カナダ	No	No	
グレナダ*	Yes	Yes (ex)	米国	シンガポール	No	No	
パキスタン*	Yes	Yes (ex)	米国	ブラジル	No	No	詳細不明
南アフリカ	Yes	Yes (ex)	米国	香港	No	No	詳細不明
ニューゼaland	Yes	Yes (im)	AUL				
マレーシア	Yes	Yes (im)	AUL				
インドネシア	Yes	Yes (im)	AUL				
ロシア	Yes	Yes (im)	ベトナム 試験輸出?				

制度: Yes, 植物検疫上の国内規制の整備や二国間協定がある
 Yes(no) 国内での体制整備は進んでいるが協定締結は無し
 貿易: (im) 輸入, (ex) 輸出
 下注経路: 米国とのFWEP締結国 * 米国施設における照射処理のみ実施
 香港, シンガポールの食品安全規制はコーデックス準拠(品目別無効なし)
 ブラジルの食品安全規制では全食品を許可
 日本は、植物検疫法の上でも、輸入解禁に放射線照射処理を採用していない

表中左欄のロシア以外の14ヶ国は、商業規模での輸出入の実績がある。また、チリやフィリピンは、米国とのFWEPに合意している。(表外の中南米諸国、エジプト、ガーナ、ラオス等、総計20か国がFWEPに合意)。

中国の植物検疫当局はベトナム国境の江西省憑祥市に、世界最大級の電子線照射施設を建設し、テスト照射を実施しており、植物検疫処理への放射線利用を進めるための国内基準の整備も進めている。ベトナムは、ロシアやサウジアラビアにも照射果実の試験的な輸出を行うなど、積極的な市場開拓を行っている。韓国は、自国の農産物(パプリカ、ナシ、リンゴ、キノコ、切り花)輸出のための、処理基の整備を進めている。今後、オーストラリア、ベトナムを核とした貿易網のさらなる発展が期待される。(図16)

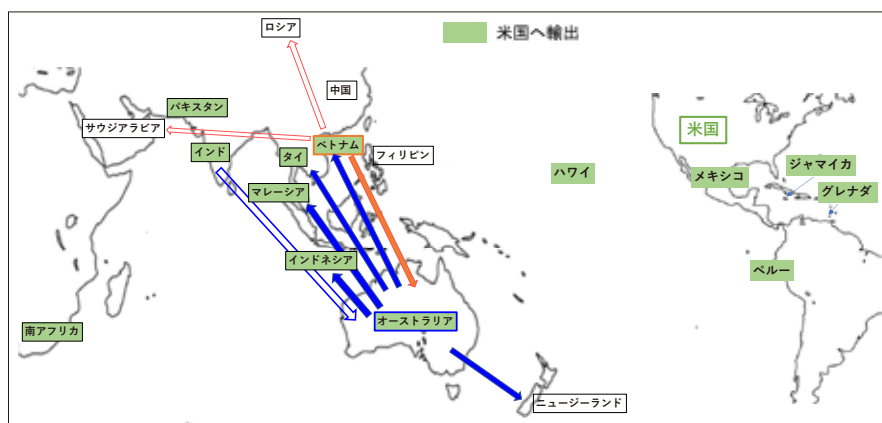


図16 米国への照射農産物輸出国とアジア太平洋地域での貿易の拡大

7. 今後の技術開発における展望

7.1 IAEA の国際共同研究 (CRP)

食品照射の研究の潮流は、IAEA の実施する国際共同研究「Coordinated Research Program (CRP)」課題の変遷より知ることができる(表6)。衛生目的での照射利用の課題では、調理済み食品やカット野菜・果実など、非加熱食品の病原微生物の制御が中心的な課題であった。また、植物検疫処理に関しては、前述のように国際基準の策定に大きな役割を果たし、さらなる拡充のため、新規課題が継続している。また、90年代には、検知法開発のプロジェクトが実施され、後のコーデックス標準分析法の採択にも役割を果たした。

現在注目されているのは、新しい装置開発を含む、加速器を用いた革新的な食品照射技術の開発である。

IAEA の食品照射に関する CRP ではこれまで中心的に利用されてきたコバルト線源を、輸送や保守の困難性を理由に、加速器から発生する電子線やエックス線に置き換えて行く技術開発ニーズが生まれ、2015年から約5年にわたり、電子線とガンマ線の照射効果の比較や、電子線に適した線量測定プロトコールや線量分布のシミュレーション技術開発等の研究が行われた。さらに、この研究プロジェクトの一部を発展させ、低エネルギーの電子または X 線を利用した新しい食品照射技術の応用開発のプロジェクト研究が、2021年から開始されることとなった。

表6 FAO/IAEA の実施する食品照射の国際共同研究課題

開始 終了	課題
2021	植物検疫処理にかかるプロジェクト(計画中)
2021	低エネルギービームの応用による革新的な食品の放射線処理技術の開発
2015-2020	電子ビームおよびX線を利用した食品照射技術の開発(DEXAFI)
2010-2015	免疫不全患者および潜在的ターゲット層に向けた照射食品の開発
2009-2015	植物検疫処理のためのジェネリック線量の開発
2001-2005	生鮮なカット果物・野菜、および他の植物由来調理済み食品の照射による衛生化
1998-2002	品質保証された微生物試験による食品汚染病原微生物のプロファイリング
1998-2002	食品および農産物の植物検疫処理としての照射
1996-2000	放射線照射による調理済み食品の安全性および貯蔵性の確保
1992-1997	ミバエを除くダニ、線虫、および昆虫の植物検疫照射
1989-1994	照射食品の検知技術の開発 (ADMIT)
1986-1990	生鮮果実・野菜の植物検疫照射

7.2 低エネルギービーム利用による食品・農産物の処理

従来のガンマ線や高エネルギーの電子線は、大規模な遮蔽を装備した専用照射施設に製品を持ち込んでの処理が必要となる。また、デンプンなどの食品中の高分子成分は、放射線照射により低分子化するため、ガンマ線や（高エネルギー）電子線による穀類の殺菌では、加工品の食感が劣化する難点がある。一方、エネルギーが 300keV 未満の低エネルギー電子線発生装置は、大掛かりな遮蔽が不必要で、すでにペットボトル飲料の無菌充填包装で実用しているように、食品事業者がインライン・インハウス処理に導入出来る可能性がある。穀粒や香辛料、種子などに存在する微生物が、表面から限られた距離の表層に分布していれば、低エネルギー電子のエネルギー調節により到達範囲を最適化し、穀粒や種子の内部の成分や発芽能力を損ねること無く、殺菌することが可能となる。

わが国では、1990 年代後半、低エネルギー電子を“ソフトエレクトロン”と定義して、上記の考え方に基づいた低エネルギー電子の食品への応用研究を実施していた。2000 年代初頭には、科学技術振興事業団（現 JST）及び施設園芸協会の補助を受け、NHV コーポレーションが“穀物殺菌装置”を、岩崎電気が、“種子殺菌装置”の開発事業を実施し、プロトタイプの実用装置を開発した。乾燥食品原材料の効率的な殺菌ニーズは高く、ソフトエレクトロン殺菌には、多くの期待が寄せられた。しかし、食品衛生法上の取り扱いの曖昧さや、導入コスト等も含む技術的障壁もあり、国内で普及すること無く今日に至っている。

最近、スイスの大手食品機械メーカーの Buhler 社は、日本での開発研究とは全く独立に、最新の低エネルギー電子発生装置を組み込んだ、粒状食品の殺菌装置“Laatu”を開発・上市した。彼らは、加速器や放射線とは全く無縁の技術者であったが、品質廉価の少ない殺菌技術開発のニーズがあり、既存の 18 の殺菌技術を比較検討した結果、殺菌能力や食品品質の他に、環境配慮、エネルギー効率、設置面積、トレーサビリティなど、現在の食品企業への社会経済的要求を全て満足する技術として、低エネルギー電子を選択したと述べている。

また、USDA の研究所では、果実の入った小箱を複数の X 線管の間を通して、低エネルギー X 線をまんべんなく照射することで植物検疫処理をおこなう、インライン植物検疫装置の開発を行っている。この装置開発が実現すれば、空港の手荷物検査のような感覚で、より手軽に検疫処理が実施出来るようになり、新しい物流システムとして、様々な応用場面が広がるであろう。

8. おわりに

食品照射技術について議論を進めると、消費者受容の困難性がしばしば指摘される。しかし、大多数の消費者は、食品照射技術に対して無関心であり、照射食品が販売されていない状況では、それを購入するか否かについて、判断する機会を与えられていない。海外では、照射果実が店頭販売されると、消費者は躊躇せず購入するという事実が報告されている。現実には、消費者の判断より前に、食品流通事業者の判断があり、社会受容性の問題は、消費者の拒絶反応を先回りして恐れている食品事業者の問題でもある。そして、このような状態は、おそらく先進国の全てに共通する問題で、どの国にも、食品照射に反対する消費者活動団体は存在する。

わが国の状況が、決定的に諸外国と異なるのは、国による照射食品のリスク評価の結論が、国民に示されていないことである。そして、食品照射一般が、食品衛生法で禁止されている状態で、一般消費者が照射食品の安全性を理解出来ないのは当然であり、食品事業者からの潜在的なニーズを顕在化させるのは非常に困難である。やはり、現在の食品安全行政の枠組みにおいて、リスク評価機関による、科学的な評価を行うことが先決と考える。

最近、注目されている、加速器による新たな食品照射技術の開発は、工業分野における加速器技術応用の実績が豊富な、わが国の得意分野である。食品加工における新しいニーズが、優れた加速器技術と出会い、最新のデジタル技術とともにシステム化されれば、Society5.0の中で目指す、スマートフードチェーンの構築に大きく貢献することだろう。本稿が、関連分野の技術者の関心を引き起こし、膠着した現状を打破するような、革新的な食品処理の技術シーズの創成や新しいビジネスモデルの誕生につながれば幸いである。

【文献】

[照射食品の国際的な評価]

- WHO (1981). Wholesomeness of Irradiated Food. Technical Report Series, No. 659.
- WHO (1994) Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food.
(日本語訳 : 照射食品の安全性と栄養学的適合性、コープ出版 1996 年)
- WHO (1999) High-dose irradiation : wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group, Geneva Technical Report Series, No. 890
- EFSA (2011) EFSA Journal 2011; 9 (4) : 2107
<https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2011.2107>

[国際基準]

- FAO/WHO : CODEX STAN 106-1983, REV.1-2003 :
<http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/en/>
- IPPC : ISPM # 18 : Guidelines for the use of irradiation as a phytosanitary measure.
<https://www.ippc.int/en/publications/604/>
- IPPC : ISPM # 28 : Phytosanitary treatments for regulated pests Annex
<https://www.ippc.int/en/core-activities/standards-setting/ispms/>

[2-ACBs の安全性に関する研究のレビュー]

- 等々力節子, 食品照射, 38 (1, 2) 57-71 (2003)
- 古田雅一, 食品照射, 50 (1), 29-46 (2015)

[原子力特定総合研究、国内機関における検討と提供情報]

- 日本食品照射研究協議会, 食品照射研究の歴史と現状, 食品照射 49, 51-128 (2014).
- 小林泰彦, 放射線と産業 (146), 21-25 (2019)
- 日本食品照射研究協議会, 食品照射研究の歴史と現状, 食品照射, 36 (1, 2) 49-61 (2001)
- 原子力委員会, 食品照射専門部会,
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/syokuhin/index.htm>
- 食品安全委員会, 放射線照射食品に関する情報 (平成 22 年 6 月 16 日作成)
https://www.fsc.go.jp/sonota/hosha_index.html
- 食品安全委員会, ファクトシート (平成 24 年 6 月 14 日)
https://www.fsc.go.jp/sonota/factsheets/f06_food_irradiation.pdf
- 厚生労働省, 食品への放射線照射について
<https://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/iyaku/syoku-anzen/housya/>
- 佐々木貴正, 「畜産食品の生物学的ハザードとその低減手法に関する研究」
厚生労働科学研究費報告書 (2019)

[各国の実情状況 (含植物検疫照射)]

- IAEA/RCA, First Coordination Meeting of Project RAS5087: Promoting Food Irradiation by Electron Beam and X-Ray Technology to Enhance Food Safety, Security and Trade MEETING REPORT. (2020. Oct) (非公開)
- 久米民和, RADIOISOTOPES, 68, 469-478 (2019)
- 久米民和, 第55回食品照射研究協議会大会 教育講演 (2020)
- Henon, Y, 第54回食品照射研究協議会大会 教育講演 (2018)
- Phytosanitary Irradiation Platform (PsIP)
<https://psipglobal.org/>
- 豪州・ニュージーランド食品安全基準機関 (FSANZ),
A1193 - Irradiation as a phytosanitary measure for all fresh fruit and vegetables (2021)
<https://www.foodstandards.gov.au/code/applications/Pages/A1193.aspx>
- 欧州員会 (EC), Food Irradiation,
https://ec.europa.eu/food/safety/biosafety/irradiation_en
- Koutchma, T. et al. Global Harmonization Initiative (GHI) Consensus Document on Food Irradiation (2018)
https://www.globalharmonization.net/sites/default/files/pdf/GHI-Food-Irradiation_October-2018.pdf
- EUSTICE, R. F., Global Status and Commercial Applications of Food Irradiation, in “Food Irradiation Technologies : Concepts, Applications and Outcomes” Edited by Isabel C. F. R. et al, Royal Society of Chemistry, Cambridge (2018)
<http://foodirradiation.org/Global%20Status%20of%20Food%20irradiation.pdf>

[低エネルギー電子/X線による食品処理]

- IAEA, Innovation of Irradiation Technologies on Surface Treatment of Food Commodities, REPORT OF A CONSULTANTS MEETING (2019)
http://www-naweb.iaea.org/nafa/fep/CM_Report_Oct_2019_FINAL_web_version.pdf
- 等々力節子, 食糧, 42, 85-95 (2004)
- Buhler, <https://digital.buhlergroup.com/laatu/>
- Haff, R. et al. Radiation Physics and Chemistry, 121, 43-49, 2016

[その他の情報提供サイト]

- 原子力産業協会, 食品照射ハンドブック (2007)
<https://www.jaif.or.jp/about/publication/food-faq>
- 食品照射データベースシステム <http://foodirra.taka.qst.go.jp/>

第Ⅲ編 RI利用

(1) 工業分野における RI 利用の現状と将来

萩原 聡昭

1. はじめに

放射性同位元素（以下、RI という）は、その特徴を活かして様々な分野にて利用されている。その範囲は、医療分野、工業分野、農業分野、研究分野、教育分野と広い。本節では、RI の工業分野における利用の現状と将来の展望について紹介する。

2. 密封 RI と非密封 RI

RI の工業分野での利用状況について述べる前に、RI について概要を簡単にまとめておくこととする。RI は密封された放射性同位元素（以下、密封 RI という）と密封されていない放射性同位元素（以下、非密封 RI という）に大別される。密封 RI とは、RI をステンレスやアクリルなどの密封容器（以下、カプセルという）に封入することにより、RI がカプセルの外部に漏れ散逸しないようにしたものである。放射性同位元素等の規制に関する法律（以下、RI 法という）では、「密封された放射性同位元素の使用をする場合には、その放射性同位元素を常に次に適合する状態において使用すること、イ. 正常な使用状態においては、開封又は破壊されるおそれのないこと。ロ. 密封された放射性同位元素が漏れ、浸透等により散逸して汚染するおそれのないこと。」と、密封 RI を使用する場合の技術上の基準が規定されている。裏を返せば、正常な使用状態であれば、被ばくの観点からは外部被ばくに注意を要するものの、基本的には汚染することもないため取り扱いやすく、様々な利用方法の可能性が広がるということになる。一方で、非密封 RI とは文字通り密封されていない RI を指し、前述の密封 RI 以外のものが該当する。固体、液体、気体とあらゆる形状のものが存在し、散逸性のものであるため、RI 法においても「密封されていない放射性同位元素の使用は、作業室において行うこと。」と使用の基準が規定されている。散逸性であることから汚染が拡大する可能性も高く、被ばくの観点からも、外部被ばくのみならず、内部被ばくにも注意を要し、RI 法でも様々な基準が設けられている。このように取扱いの制限は密封 RI より厳しくなるものの、例えば、医療分野では病気の治療に使うため体内への投与や、他分野でもトレーサ利用することが可能となるなどのメリットがある。両者は性質が違うものの、それぞれの特徴を活かして利用されるのである。

このように大別される RI の中で、密封 RI は医療分野、工業分野、農業分野、研究分野、教育分野など幅広い分野で使用されており、工業分野においては密封 RI の利用が圧倒的に

多い。この密封 RI は密封線源と呼ばれている。

非密封 RI においては、前述の特徴から医療分野や研究分野で多く使用されている。こちらは密封線源に対して非密封線源と呼ばれている。

3. 密封線源の種類

次に、工業分野でも多く使用されている密封線源について概要をまとめる。密封線源には、 α 線源、 β 線源、 γ 線源、中性子線源などの種類があり、それぞれ特徴が異なるため、形状も構造も様々である。 α 線源(写真1)は、 α 線の飛程が短く、空気中で4cm程度である。したがって、線源の表面は α 線を透過させるため非常に薄くできており、わずかな力でも破損する可能性がある。そのような性質もあり、過酷な環境下で使用されることはなく、比較的穏やかな環境下で使用される装置などに組み込まれることが多い。 β 線源(写真2)は、 β 線の透過力が α 線より強いものの、 γ 線に比べると非常に弱い。したがって、 β 線源の表面も薄くできている。 α 線源と同様、破損に注意が必要であり、使用環境の面から見ると α 線源に近い部分がある。 γ 線源(写真3)は、透過力が強く、ステンレス鋼製など衝撃に強いカプセルに封入されて



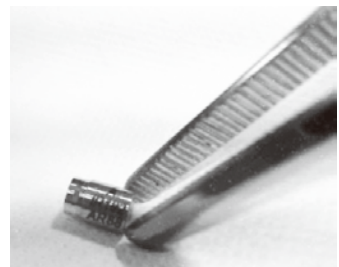
写真1 α 線源



写真2 β 線源



写真3 γ 線源



いる。正常な使用状態での破損の可能性は低いものの、特徴である強い透過力や、また、放射能が大きいものも多いことから、外部被ばくには注意が必要である。また、中性子線源も金属をよく透過するが、 γ 線源との決定的な違いは、電荷を持たないので物質中で直接電離することはなく、原子核との反応により荷電粒子が放出されるということである。構造上は γ 線源と同様にステレンス鋼製など衝撃に強いカプセルに封入されていることが多い。このように、密封線源を構成するカプセルは、放出する放射線の種類、放射能および使用目的に応じて適切な形状、材質のものが用いられている。

4. 密封線源の使用方法

続いて、密封線源を使用目的別にみてみることにする。密封線源の使用目的としては、「そのまま使用する場合」と「機器に装備して使用する場合」とに大別される。「そのまま使用する場合」とは、文字通り密封線源そのものだけで何かしらの目的使用することをいい、その例として、様々な分野で使用されている放射線・放射能測定器の校正や動作確認用、また、教育分野での学生測定実験などが挙げられる。また、医療分野においては腫瘍等の患部に直接密封線源を埋め込む治療等がある。一方で、「機器に装備して使用する場合」とは、産業分野で使われている機器や装置に組み込んで目的使用することをいい、その例として、非破壊検査装置、厚さ計、レベル計、ガスクロマトグラフ検出器、静電除去装置などが挙げられる。また、医療分野では、照射装置に組み込んだ密封線源から出る放射線を腫瘍などに照射して治療する方法がある。

このように、密封線源をそのまま使用する利用方法は工業分野ではほとんどなく、工業分野で使用される際でも管理などに用いる放射線・放射能測定器の校正や動作確認用に使われるなど、間接的に使用されることが多い。そして、工業分野で圧倒的に多いのは機器に装備して使用する利用方法である。そのため、この後はこれを主に述べていくことにする。

5. 密封線源の工業利用の歴史

さて、本項では本題である密封線源の工業利用について説明していきたいと思うが、その前にまずはその歴史である。密封線源が我が国の工業分野で利用され始めたのは昭和30年頃といわれている。それは前項で示した機器に装備して使用する形態で、装備機器と呼ばれた。具体的には、厚さ計、レベル計、密時計、水分計、硫黄分析計等である。この装備機器は、昭和30年代には各メーカーが新製品を競って開発した。一方で、機器としての信頼性はまだ低く、また、放射線障害防止法が制定されるなど使用に対する制約も加えられた。この時期は開発期であり、発展の可能性のない機器については姿を消していった。昭和40年代に入ると

各メーカーの努力により装備機器の信頼性も向上し、高度成長の波に乗って利用台数も増加した。昭和 50 年代には装備機器の性能の高度化が進み、経済効果も生みだした。この頃の装備機器は、鉄鋼、紙、化学、石油などの分野にて利用され、昭和 50 年代半ばには装備機器の使用台数も約 1 万台に達したといわれている。その後は安定的に使用されてきた。もちろん、安定的に使用されてきた裏側には、装備機器の重要課題として安全管理があったことは付け加えておこう。密封線源を使用しているということは、密封線源が安全に管理されるということが前提であることは歴史的にも変わっていない。線源収納部の安全性については、安全性向上に取り組む関係者の尽力があって初期から現在に至るまで大きな事故が発生していない。また、密封線源そのものの安全性も注目され、ISO 規格をもとにした JIS Z 4821「密封放射線源」が制定されたのである。

ところで、なぜ工業分野においてこの密封線源が機器に装備して使用されてきたのかを述べる。工業における生産工程では、製品を効率よく製造し、品質の向上を図り、かつ工程の自動化、高速化などにより生産性を向上することが重要である。このため、工程途上の原料や半製品の状態、あるいは工程の状態を自動的に検知する計測機器が多く用いられる。これらの計測の原理には、光や電磁気など種々の物理現象が用いられるが、このひとつの手段として、密封線源からの放射線を利用する方法がその独自の特徴を活かして利用されている。また、他の方法では不可能か、あるいは、それより性能が勝る場合に広く用いられ、普及定着したのである。

放射線としては、密封線源からの α 線、 β 線、 γ 線、および中性子線が用いられる。これらの放射線は電離放射線ともいわれ、直接または間接的に物質を電離する性質を有するほか、物質中を透過することにより減弱を受けながらそれを透過する性質、散乱する性質、さらにまた 2 次放射線を発生させる性質があるので、これらの性質が計測に利用される。しかも、それらの性質は物質の元素が同じならば（場合によっては元素の種類が異なっても）、原子・電子の密度・個数にのみ依存し、一般に温度、振動、速度、その他の物理的・化学的状態の影響を受けない。密封線源からの放射線を利用しての計測の利点としては、さらに、計測対象物に対して非破壊および非接触によって計測できること、あるいは閉じた系の中の物体の計測を外部から行うことも可能であるということである。

参考までに、その性質の利用について以下に示す。

1) 吸収・散乱を利用

放射線が物質に当たると、その方向、エネルギー、強度が変化する。この変化の度合いは、入射する放射線の種類とエネルギー及び当該物質の種類と量などによって異なる。従って、この変化の度合いを測定すれば、その物質の種類や量についての情報を得ることができる。例えば、物質の特性によって放射線の透過する割合が変わることに着目した利用

方法がある。γ線が厚さ xcm の物質を透過した後の強さを I とすると

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

となる。μ は厚さ x の単位を cm にとるときは線減弱係数 (μ) と呼ばれ、cm⁻¹ の単位を持つ。機器や材料に放射線を照射して透過画像を作り、その濃淡から内部の欠陥などを検査する非破壊検査も密度によって放射線の吸収に差が生じることを利用している。放射線が散乱される度合いも物質の密度や厚さと一定関係があることが知られている。散乱線を測ることにより、これらの測定ができる。実際には多重散乱のため、理論的取扱いは困難なので標準資料を用いて予め作成した検量線から密度や厚さを求めている。

2) 電離作用を利用

荷電粒子の電離作用により発生するイオン対を利用する機器も多い。α線やβ線は比電離 (ある与えられたエネルギーをもつ直接荷電粒子が物質中を通過するとき、その経路の単位長さ当たりには生じるイオン対の平均数) が大きく、イオン発生源としての用途に適している。特にα線の比電離は大きく、静電除去装置、煙感知器、放電管などはα線の電離作用を利用している。β線をイオン発生源として用いる機器としては ECD ガスクロマトグラフが挙げられる。

3) 蛍光 X 線を利用

物質に X 線を照射すると原子は励起状態となり、これが元の状態 (基底状態) に戻る時元素に固有のエネルギーを持った特性 X 線を放出する。このように X 線を照射することによって発生する二次的な特性 X 線を蛍光 X 線といい、そのエネルギーや強度を測定することにより元素の定性・定量分析を行うことができる。この方法は、硫黄形や金属材料の分析、メッキの厚さ測定などに利用されている。

蛍光 X 線分析に用いられている線源は、Fe-55、Cd-109、Am-241 などがある。

4) 中性子の原子核との反応を利用

中性子は電荷を持たず、直接原子核と相互作用を起こす。水素の原子核は中性子と重さがほぼ等しいため、中性子は水素の原子核との弾性散乱により運動エネルギーの多くを失う。すなわち、水素などの水素原子を多く含む物質では、中性子線源から発生する速中性子は減速され、熱中性子になりやすい。この性質を利用し、熱中性子の量から試料中の水分量を求めるのが中性子水分計の原理である。中性子水分計の用途としては、道路やダム建設工事における土の締固めの管理、コンクリートの配合比の管理、地下検層、溶鉱炉用コークスおよび焼結混合原料の含水量の測定、重油の発熱量を知るための含水量の測定、炭水化物の C/H 比の測定などがある。

6. 工業利用における密封線源の装備機器

このように昭和 30 年代から長らく工業分野にて利用されてきた装備機器について、代表的なものを表1に示す。

表1 主な機器の種類と代表的な核種、数量

主な装備機器等	代表的な核種	主な数量範囲
厚さ計	Kr-85、Sr-90、Cs-137、Pm-147	3.7MBq ~ 1.11TBq
レベル計	Co-60、Cs-137	3.7MBq ~ 370GBq
密度計	Co-60	3.7MBq ~ 111GBq
水分計	Am-241/Be、Cf-252	1.85MBq ~ 18.5GBq
硫黄分析計	Am-241	3.7GBq ~ 22.2GBq
ガスクロマトグラフ	Ni-63	370MBq
たばこ量目制御装置	Sr-90	18.5MBq ~ 148MBq
静電除去装置	Po-210、Am-241	370MBq
非破壊検査装置	Ir-192、Co-60	370GBq ~ 1TBq
大量線源滅菌照射装置	Co-60	370TBq

1) 厚さ計

厚さ計は密封線源の工業利用における代表的な計測器であり、なかでも、 β 線の透過を利用した紙またはプラスチックフィルムの厚さ計、 γ 線の透過を利用した鋼板厚さ計は典型的なものといえよう。構造は、密封線源と検出器が一对になっており、被測定物を測定しながら移動する点が特徴である。

紙厚さ計は、製紙工程において水を含んで高速走行する紙の乾燥重量厚さ(坪量)を高精度で計測する(水分量はふつう赤外線透過率で測定し補正する)。 β 放射体を使い分けることによって、およそ 10~5000g/平方メートルの重量厚さの計測ができる。密封線源は、重量厚さの薄いものから Kr-85、Pm-147、Sr-90 などが用いられる。

鋼板厚さ計の例では、赤熱した圧延中の厚板に対し、1.11TBq の Cs-137 γ 線の透過を利用して、高精度の計測ができる。

以上の透過型の厚さ計のほかに、 β 線、 γ 線の後方散乱を利用する散乱型厚さ計、および2次的に発生する特性X線を測定する蛍光X線厚さ計がある。後者は特にメッキ工程でのメッキした厚さのオンライン計測等に使用されている。密封線源は、Am-241 が用いられる。

2) レベル計

容器内にある内容物(流体、物体、塊状物など)のレベル(液位)を外部から知るため、容器を通して γ 線を透過させその透過度を測定する透過型レベル計が広く用いられている。

放射線を利用したレベル計は、容器内の物体に触れることなく測定でき、高温高圧の環境下でも測定できる利点がある。最も簡単なものは、容器側面の同じ高さに線源と検出器を置き、内容物のレベルがその高さより上にあるか下にあるかを知るオン・オフ型レベル計であり、一種の γ 線リレーということができる。線源と検出器とを異なる高さに置き斜めに γ 線を透過させる方式では、 γ 線の通過する物体の厚さがレベルによって変わるので、ある範囲のレベル（液位）を連続的に計測することができる。

高温、高圧、あるいは腐食性等の内容物であっても問題なく外から計測ができるので、化学工場の反応タンク内の液面計測、鉄鋼業の連続鋳造工程の溶融鋼のレベル（液位）制御、製紙業等のタンク内レベル（液位）の計測などに多く使用されている。密封線源は、Co-60、Cs-137などが用いられている。また、ビールなどの瓶の内容物のレベルを、Am-241を用いて制御している使用方法などもある。

3) 密度計

密度計は、固定配置されパイプの外側から非接触で対象物の密度を測定できる。この利点を活かして爆発性の高い原油、石油や腐食性の高い酸、アルカリ性の化学物質の密度測定に利用される。測定対象の厚さが一定のとき、厚さ計と同じ原理すなわち放射線の透過又は散乱を利用して見かけ密度の測定ができる。厚さが大きくなるほど、透過力の大きい高エネルギーの γ 線が用いられる。工業分野では、パイプ中を流れる流体（スラリー等を含む）の密度を、パイプを通して透過型で測定するものが多い。資源探査、地質検査および土木分野での地盤調査などでしばしば用いられる地下検層においては、 γ 線のコンプトン散乱が多く利用されている。密封線源は、Cs-137、Co-60が用いられる。Am-241 装備の密度計は、航空機のオイルゲージに利用されてきた。

4) 水分計

中性子水分計は、Am-241/Be、Cf-252 などの中性子を発生させる密封線源と、熱中性子（低エネルギー中性子）に対して感度の大きいBF₃計数管やHe-3 計数管などを組み合わせたものである。

中性子の散乱による減速および透過減弱の度合は、水素の場合他の元素に比し著しく大きい（単位質量当り）ので、減速されて生じる熱中性子の数の測定あるいは高速中性子の透過率の測定によって、物質中の水素または水分量を知ることができる。水分計の大多数は、製鉄所において溶鉱炉へ装入するコークスおよび焼ホッパーの壁面あるいは挿入孔で計測するものである。密封線源は、Am-241/Be、Cf-252 の中性子源が用いられている。

この他に、3.7MBq 以下（旧 RI 法の規制対象外）の微小線源（Cf-252 中性子源と Co-60 γ 線源）を用い、土木建設分野で盛土の締め固め度を現場計測するために水分・密度を

同時測定するものがあり、普及している。

5) 硫黄分析計

石油や石炭など化石燃料には成分中に硫黄を含んでおり、燃焼することで環境汚染物質を発生させるため、硫黄の含有量を管理することが重要である。このように大気汚染問題に対処するため、重油などの燃料油中の硫黄分の濃度を、パイプ中を流れる油に対してオンラインで測定するタイプのもが多く用いられている。原理的には、低エネルギーX線やガンマ線の透過を利用するものも多く、硫黄の特性X線(2.3keV)から硫黄分を求める密封線源による蛍光X線分析方式のものもある。密封線源は、Am-241、Fe-55 が用いられている。

6) ガスクロマトグラフ

ガスクロマトグラフは、種々の試料、特に極微量成分を比較的簡単な操作で分析できる。エレクトロン・キャプチャ検出器付きガスクロマトグラフ装置の中で、 β 線によるイオン化電流がガス化した試料成分により変化することを利用したもので、環境試料中の微量の有害成分(塩素系農薬、トリハロメタン、有機水銀、PCB等)や薬品中の不純物の分析に、とくに感度が高いため広く用いられている。密封線源は、Ni-63、H-3を装備したディテクタが用いられる。

7) たばこ量目制御装置

たばこ量目制御装置は、Sr-90の β 線の透過を利用して、紙巻たばこの詰まり具合を計測制御するもので、一種の密度計といえる。

8) 静電除去装置

紙、プラスチック、ゴム、合成繊維など電氣的絶縁物を扱う工業では、これらの物質の接触や摩擦によって必ずというほど電荷が生じ、静電気が帯電する。これにより塵の付着やシートの絡み合い、放電による作業員への電氣的ショックや場合によっては火災発生の原因にもなる。この静電気を除去するのに、放射線の電離作用で生成するイオンによって空气中で中和する方法がある。即ち放射線で帯電体の近傍の空気を電離して正、負のイオンを作ってやると、帯電体の静電気と反対の電荷を持つイオンが引きつけられ、帯電体の電荷が中和される。使用する密封線源は、電離能の大きい α 線を放出するPo-210が多い。

9) 非破壊検査装置

非破壊検査はその名の通り、物を破壊せずに検査をすることができる。その原理をひとことでは、欠陥部を透過した放射線量率は健全部を透過した放射線量率よりも欠陥による厚さの減弱分だけ高くなり、欠陥部をコントラストとして可視化することができるものである。

γ 線を使用し、鋳物や溶接面などの中にある欠損などをフィルムに写す方法と、中性子を使用し、 γ 線ではできないステンレス鋼に封入された核燃料棒の検査がある。文字通り、物を

破壊せずに製品品質をチェックするものである。

γ 線を利用したものでは Ir-192 と Co-60 が代表的で、材質の厚さにより核種を選択する。密封線源が線源格納容器から送り出され、 4π 方向に照射出来るタイプと線源格納容器のシャッターが開閉するタイプがある。密封線源が送り出されるタイプは、ホルダに固定された密封線源が伝送管の中をレリーズワイヤなどで押され所定の位置で止まる。照射終了後はこのワイヤを引き戻し、線源格納容器に収納する。

また、非破壊検査装置は移動使用をする代表的な機器である。

10) 大量線源滅菌照射装置

密封線源を利用した放射線滅菌は、照射施設そのものが装備機器に近いニュアンスで捉えて問題なからう。この照射施設は、完成品を梱包し発送できる状態で放射線滅菌することができるのが特徴である。照射物を照射ラインにセットしておけば後は自動的に押し出され、24 時間止めることなく照射することが可能となる。使用される密封線源は Co-60 で、棒状の密封線源（約 11mm ϕ \times 450mm）を複数本まとめてモジュールに装填し、照射室にそのモジュールを数十枚装備して照射物を照射し滅菌する。照射施設の特徴として、密封線源を保管するためのプールがあり、貯蔵時及び線源交換時にはこのプールにモジュールを沈めて水で遮蔽するものである。

7. 密封線源の工業利用の現状

工業分野で利用されてきた装備機器について、利用開始から半世紀近く経った工業利用の現状はどうなっているのだろうか。

日本アイソトープ協会発行の「放射線利用統計」を参考に、民間企業における使用許可・届出事業所数を表2(次頁参照)に、また、装備機器等の使用許可・届出台数を表3(次頁参照)に示す。これらから主な装備機器等がどのくらい普及し使用されているかをみていくこととする。これは、公表されている 2001 年から 2019 年までの約 20 年間のデータを取り纏めたものである。

この統計は、2001 年から 2005 年は、放射線障害防止法の規定にもとづいて、放射性同位元素または放射線発生装置の使用を文部科学大臣に許可された事業所（許可事業所）および総量 3.7GBq 以下の密封された放射性同位元素のみの使用を文部科学大臣に届け出た事業所（届出事業所）を対象に、2007 年は、放射線障害防止法の規定にもとづいて、放射性同位元素または放射線発生装置の使用を文部科学大臣に許可された事業所（許可事業所）および総量 3.7GBq 以下の密封された放射性同位元素のみの使用を文部科学大臣に届け出た事業所（届出事業所）および表示付認証機器の使用を届け出た事業所（表示付認証機器届出事業所）

を対象に、2008年から2012年は、放射線障害防止法の規定にもとづいて、放射性同位元素または放射線発生装置の使用を文部科学大臣に許可された事業所（許可事業所）、1個または1式あたりの放射能が下限数量の1000倍以下の密封された放射性同位元素のみの使用を文部科学大臣に届け出た事業所（届出事業所）および表示付認証機器の使用を届け出た事業所（表示付認証機器届出事業所）を対象に、2013年から2019年は、放射線障害防止法の規定にもとづいて、放射性同位元素または放射線発生装置の使用を原子力規制委員会に許可された事業所（許可事業所）、1個または1式あたりの放射能が下限数量の1000倍以下の密封された放射性同位元素のみの使用を原子力規制委員会に届け出た事業所（届出事業所）および表示付認証機器の使用を届け出た事業所（表示付認証機器届出事業所）を対象にしたものであり、民間企業における主な装備機器等の使用許可・届出台数を集計したものである。

なお、2006年と2009年は「放射線利用統計」の発行自体がなされていないため、以降のデータに掲載がないことをご了承願いたい。

表2 民間企業における使用許可・届出事業所数
（2001年から2019年の推移）

許可・届出の別	2001	2002	2003	2004	2005	2007	2008	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
許可	866	862	836	827	828	881	877	858	833	822	805	794	765	753	737	733	714
届出	1,061	1,063	1,066	1,050	1,052	328	298	274	259	235	252	269	270	256	256	255	240
総数	1,927	1,925	1,902	1,877	1,880	1,209	1,175	1,132	1,092	1,057	1,057	1,063	1,035	1,009	993	988	954

表3 民間企業における主な装備機器等の使用許可・届出台数
（2001年から2019年の推移）

主な装備機器	2001	2002	2003	2004	2005	2007	2008	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
厚さ計	2,691	2,709	2,716	2,590	2,550	2,484	2,484	2,404	2,454	2,600	2,617	2,619	2,522	2,464	2,469	2,388	2,357
レベル計	1,195	1,231	1,428	1,443	1,399	1,116	1,143	1,183	1,631	1,743	1,938	1,936	1,825	1,746	1,670	1,260	1,235
密度計	781	777	601	546	529	433	430	2,451	2,414	413	290	289	273	190	186	180	179
水分計	140	139	125	107	86	80	69	70	69	66	74	67	67	68	70	71	71
硫黄分析計	235	229	176	173	165	141	140	126	116	117	108	92	92	84	76	72	29
ガスクロマトグラフ	1,728	1,736	1,887	1,876	1,923	1,414	1,355	481	437	480	448	445	422	406	386	278	244
たばこ量目制御装置	703	587	549	466	341	187	177	78	22	-	-	-	-	-	-	-	-
静電除去装置	-	-	-	-	-	16	16	18	18	12	12	12	10	8	8	8	9
非破壊検査装置	1,046	1,019	934	903	872	907	904	958	957	979	970	970	956	957	972	1,043	971

まず、民間企業における使用許可・届出事業所数に目を向けてみると、2001年に866あった使用許可事業所数は、2010年まではほぼ横ばいであったのに対しその後少しずつではあるものの減少が続き、2019年には714と約20%減少した。どこから減少傾向になったのかを見ると2011年前後となる。2011年といえば忘れもしない東日本大震災が発生した年であるが、このデータだけではそれがその引き金になったかどうかははっきりとはいえないだろう。

続いて、届出事業所数に目を向けると、2001年に1,061あった届出事業所数は、2007年に328と一気に70%減少した。これは、2004年に規制の対象となる放射性同位元素の定義数量などが変更されるという放射線障害防止法の大改正がなされ、その数量が適用されるまでの猶予期間が2007年3月31日までであったため、その影響を受けたものと考えるのが自然である。しかし、単純に法改正によって届出事業所数が減ったという結論に持ち込むことは時期尚早である。これにはからくりがあり、この放射線障害防止法の大改正により、2007年から新たな表示付認証機器という概念が生まれたことである。さらに、この「放射線利用統計」の見方に注意を要する。「放射線利用統計」の前提として、表示付認証機器に関しては、「表示付認証機器の使用を届け出た事業所（表示付認証機器届出事業所）を対象にしたもの」であることは前述の通りであるが、この表を作成するために参考にしたデータには、「本章のデータには、表示付認証機器届出事業所は含まれていない。」と注意書きがある。従って、表2の届出事業所数には表示付認証機器は含まれず、この検証が必要となる。

結論を先に述べると、表示付認証機器の代表格であるガスクロマトグラフがこの放射線障害防止法の大改正によってデータの的に大きく影響したと考えられる。表4に民間企業における2005年と2007年のガスクロマトグラフの届出事業所数および台数を示す。

表4 民間企業におけるガスクロマトグラフの届出事業所数
(2005年と2007年の比較)

ガスクロマトグラフ	2005	2007	減少数
届出事業所数	1,010	318	692

民間企業における使用許可・届出事業所数の減少数とガスクロマトグラフの事業所数の減少数はほぼ一致し、前述の通りの結論に至る。それと同時に表示付認証機器の届出事業所数が同数増えているのかといえ、残念ながら表示付認証機器の届出事業所数は公表されていないため公表されている届出台数をみることにする。2007年に新たに公表された民間企業におけるガスクロマトグラフの届出台数は1,084台であったことから、確実にはいえないものの、単純に民間企業における届出事業所数が2007年に突然減少したわけではないということがいえる。それを踏まえて届出事業所数の推移をみれば比較的安定している状態が続いているといえよう。

一方で、2007年以降の民間企業におけるガスクロマトグラフの届出台数と表示付認証機器の届出台数を表5(次頁参照)に示す。

表5 民間企業におけるガスクロマトグラフの届出台数および表示付認証機器届出台数
(2007年から2019年の推移)

ガスクロマトグラフ	2007	2008	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
届出台数	1,414	1,355	481	437	480	448	445	422	406	386	278	244
表示付認証機器届出台数	1,084	1,168	1,273	1,324	2,988	2,999	3,024	3,366	3,362	3,372	3,529	3,516
合計	2,498	2,523	1,754	1,761	3,468	3,447	3,469	3,788	3,768	3,758	3,807	3,760

このように、民間企業における届出事業所数が一機に減少した2007年以降の数年間には安定的な数字だとはいえなくともその後は増加に転じており、ガスクロマトグラフのデータが表面上の届出事業所数を減少させてしまっているものの、実態としては、民間企業における使用許可・届出事業所数は約20年間を通じて比較的安定しているといえるだろう。

続いて、装備機器等の使用許可・届出台数から、主な装備機器ごとの推移をみていくこととする。なお、ガスクロマトグラフについては前述したため、大量線源滅菌照射装置については使用許可事業所が極めて限定的であるため省略する。

厚さ計は、約20年間の中で最も使用許可・届出台数が多かったのは2003年の2,716台、最も少なかったのは2019年度の2,357台であり、359台の減少(10%強)で最大の乖離幅となった。一方で、ガスクロマトグラフと同様に、2007年以降100台強の表示付認証機器の届出台数の増加があった。総合的に見れば概ね横ばいとなっており、長期に渡り工業分野にて密封線源が使用されていた。

レベル計は、2001年当初は約1,200台であったが、2010年代に入り30%強の飛躍的な増加があった。2010年代後半には再び1,200台程度に戻ったが、こちらについても表示付認証機器の届出台数を見ると約1,300台の増加があったため、総合的には増加を伴いながら長期間の工業利用があったことになる。

密度計は、2001年の800台弱から2008年までに半分近くまで減少し、2010年と2011年に突然2,400台強と飛躍的に増加した。この要因は不明であるが、その後再び一気に減少し、現在では200台弱まで減少した。一方で、表示付認証機器では密度計と水分密度計を合わせると約1,000台の増加がみられるため、厚さ計、レベル計と同様に工業分野での利用としてはかなりの数を占めている。

水分計は、2001年の140台から減少し続け、2000年代後半には約70台と半減した。これも表示付認証機器への切り替わりがあり、2019年の表示付認証機器の届出台数は600台強となっている。両方を勘案すると増加していることがわかる。

硫黄分析計は、表3からも明らかで、2001年から継続的に減少していき、2019年には30台を切っている。これは表示付認証機器への切り替わりはなく、密封線源の工業利用としては

終息に向かっているとデータからはいわざるを得ない。

たばこ量目制御装置は、2001年から減少し続け2011年を最後に無くなった。密封線源の工業利用の観点からは非常に残念な結果ではあるが、時代の変化の中で主な装備機器の中で完全に終息した唯一の装備機器として記憶に新しいものである。

静電除去装置は、たばこ量目制御装置とは逆に2007年に始まり、台数こそ少ないものの現在まで続いて工業分野で利用されているものである。なお、表示付認証機器の使用届出台数としては2019年で約160台に達して短期間で発展した装備機器である。

最後に非破壊検査装置だが、表3を見れば一目瞭然で、長期に渡り安定的に利用されている装備機器であることがわかるであろう。

密封線源の工業利用の現状をまとめると、この約20年間に一部で終息、あるいは、終息に向かう傾向が見受けられるものもあるが、全体的には長期に渡り継続利用されていることがわかる。

40年間の全てのデータこそ揃ってはいないが、データから考察したこの20年間、そしてその前の20年間の様々な資料の確認によって、この長い歴史の中でも40年前と現在では基本的には工業分野での利用方法は変わっていないといつてよからう。

そして、更に別の視点で工業利用の状況を確認してみた。それは、密封線源の流通について、日本アイソトープ協会（以下、JRIAという）のそれに係わる部署のデータである。JRIAが流通に携わったものしかわからない（JRIAを通さずに流通しているものはわからない）が、それでもトレンドの方向性はある程度みえるため参考にはなるかと考える。工業分野において利用されている密封線源（大量線源滅菌照射用線源、非破壊検査用線源、厚さ計用線源、ガスクロマトフラフ用線源、レベル計用線源、水分計用線源など）について、データは公表されていないものの、筆者がこれを確認したところ極めて安定的な流通量であり、工業分野での利用方法に大きな変化は見受けられなかった。ただし、JRIAでは密封線源の正確な使用用途までは把握できず、核種や放射エネルギー、使用者名からある程度の推測を含んだ情報であることは付け加えておく。

8. 将来の展望

これまで密封線源の工業分野における過去の利用状況をみてきたが、利用方法の多少の変化は見受けられるものの、全体的には同じものが長期的に利用されていることがわかった。これは、密封線源による利用方法に対しての代替品が出てこない、もしくは、代替品にはないメリットが密封線源にはあると考えるのが普通であろう。実際に装置メーカーや使用者等から話を伺っても似たような言葉が出てくる。

それでは、今後の展望はどうかということになるが、さすがにこれは各装置メーカーや使用者側の企業などの経営戦略などもあるため予測することは困難である。ただし、筆者が密封線源を供給している側の立場として、装置メーカーや使用者との日々のコミュニケーションから得た情報から推測すると、装備する機器の更新、あるいは、新製品発売に伴う線源の構造等の変化などは予測されるものの、密封線源の利用自体の減少は今後においてもないと考えられる。つまり、装置自体は時代と共に変化していくことであろうが、密封線源のメリットを活かした利用方法はまだまだ続くとみている。もちろん代替品も出てくることであろう。しかし、代替品が出てきても完全にそれに代わっていくのではなく、密封線源の利用は併用されていくと予測している。それだけ密封線源による工業分野での利用はメリットがあることが実証されているし、これまでの経緯を踏まえてもそう捉えて差し支えないと考える。一方で、全く新しい利用方法はないのかと考えると、現時点ではなかなか新たなものが開発され、かつ、爆発的に普及するような兆しはみえてこない。これには様々な要因があると考えられるが、そのひとつとして後述する2017年4月のRI法の大改正も影響しているのではなかろうか。この大改正により、密封線源の取扱いや管理がより厳しくなってきたことが新規開発を妨げているひとつの要因であると考えられる。もちろん、RI管理はしっかりとなされるべきことであり、安全管理がなされなければ結果的に国民の不安を煽ることになり兼ねない。その意味でこのRI法の大改正は必要なことであつたし、そこはRIを取り扱う全ての者が認識して実施していくことが重要ではあるが、各装置メーカーや使用者側の企業などの経営の観点も踏まえると、RI法大改正によるRI管理や取扱いにかかるコストは決して無視できないものとなったであろう。そうすると、有効活用されている現状のものをわざわざ排除していくことはないにしても、新たに開発していくという考え方は必然的に減少していくと思われる。これを払拭していくには、各装置メーカーなどの企業任せにするのではなく、RI研究者やJRIAが開発に携わっていくことが必要かもしれない。また、「6. 工業利用における密封線源の装備機器」で掲げたように、実際に工業分野に利用されている密封線源の核種はそう多くはない。発想転換をすると、例えば、同じ用途でも全く別の核種での利用の可能性もあるかもしれない。核種が変わることにより更なる品質向上や効率化に繋がるようであれば当然のことながらトレンドは変わっていく。そういう意味ではRIの工業利用の活性化に向けた取り組み方は変革期に来ていると考えている。

さらに別の視点ではJRIAが役割を果たすことが重要となる。それは、密封線源の安定供給である。これがなされなければそもそもとして工業分野での有効利用に繋がらないため、供給者側として利用者が望む製品を安定して供給するために、密封線源や密封線源を製造するための原料の調達が滞らないようにすることが重要であると考えている。現在は全て海外からの輸入に頼らざるを得ない状況である。もちろん、海外からの輸入を止めることはないが、100%の海外

依存だと少々のトラブルでも供給が滞る結果に繋がる。実際に国際間輸送でのトラブルはそれなりの頻度で発生しており、調達の遅れも見受けられ、安定供給を脅かす要因にもなっているのが実態である。また、価格の高騰も気になるところである。部分的であっても国内で調達できる環境が整うことを強く願っている。

現在は、これら一つひとつに対して取組むことが結果的に密封線源の工業利用の活性化に繋がると考え、最終的に国民の利益に繋げていきたい。

9. RI 法改正

ここまで、RI 利用と供給の状況を過去から未来の時系列でみてきたが、これらに直接的ではないものの、前述の通り工業分野にも大きな影響があった RI 法改正について最後に紹介する。

1955 年に制定された「原子力基本法」の下に「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」（以下、障防法という）が 1957 年に制定され、安全に関して最低限守るべき事柄が決められた。放射線防護に関する考え方は国際放射線防護委員会（以下、ICRP という）の勧告に沿っており、現在の法令は ICRP が 1990 年に出した勧告に基づいている。法令は国内外の情勢の変化に対応するために改正されてきているが、大きな改正としては 2004 年に規制の対象となる放射性同位元素の定義数量などが変更され、また、2012 年には放射化物が規制の対象になるなどの改正が行われた。そして、2017 年 4 月には、法律の名称も「放射性同位元素等の規則に関する法律」に変わるという大改正が行われた。これまで RI の取扱いに対して放射線障害を防止する観点からの規制要求となっていたものが、「安全」に加えて危険性の高い RI の防護に必要なセキュリティ対策「防護措置」の観点からの規制要求となり、2019 年 9 月 1 日に施行された。この法令改正は、近年、IAEA の「放射性物質及び関連施設に関する核セキュリティ勧告」により、防護措置の実施が勧告され、加盟国に対し危険性の高い RI を取り扱う事業者に対する防護措置の義務付けが求められたことによる。危険性の高い RI を RI 法では特定 RI と称し、「放射性同位元素であって、その放射線が発散された場合において人の健康に重大な影響を及ぼすおそれのあるものであって、その種類又は密封の有無に応じて原子力規制委員会が定める数量（D 値）以上の放射性同位元素をいう。」と定義している。密封の特定 RI は、IAEA の「Code of Conduct」を参考に 24 核種が選定されている。

法令改正の主な内容は、前述の「法律名称変更」に加え、「施設における防護措置」、「輸送時における防護措置」である。密封線源の工業利用として掲げた非破壊検査や大量線源滅菌照射などに使われる線源などがこの特定 RI に該当するが、多くの利用者がこの防護措置の対応に追われた。「施設における防護措置」では、防護区域を設定したうえで、監視

カメラや侵入検知装置の設置、堅固な障壁による区画や固縛等の措置、緊急時対応手順書の整備や教育及び訓練の実施、出入管理やアクセス規制、防護規程の作成や防護管理者の選任などの対応、また、「輸送時における防護措置」でも運搬に関する取決めの締結など、手間が増えたことは否めない。しかしながら、この法令改正の大きな目的である特定 RI の盗取を未然に防ぐことで、安全、安心な状態で RI が利用されることが望ましい。

10. まとめ

工業分野における RI（密封線源）利用は、機器に装備されて使用される状況が過去から長期的に続いている。その間、利用方法に大きな変化は見受けられなかった。密封線源を使用するメリットが極めて高く、他の追随を許さないということであろう。一方で、密封線源の工業利用範囲は拡大もしていない。つまり、成熟状態が続いているということである。これはこれで悪いことではないが、このメリットを活かすことをこれで終えていいのであろうか。もっと有効活用が出来るのではないかと考える。そのためには、いわゆる産学官の連携を強めたり、密封線源の調達コストを下げる努力をしたりなどして開発行為自体を増やしていくべきである。密封線源は特に取扱いや管理が重要となるが、これを負として捉えるのではなく、最終的に国民の利益に繋がり、企業（メーカー）の利益にも繋がるようになっていけば負から正へと転換出来るはずだ。密封線源を使用するメリットはすでにわかっているのであるから、あとは業界全体のマネジメント、つまり、このメリットを活かすために業界全体が開発に取り組みやすい環境作りかもしれない。筆者が所属する JRIA は、装置メーカーや RI 製造メーカーなどの企業、研究者や開発者、そして使用者などの関連者の中心にいる。マネジメントというと烏滸がましいが、関連者を結び付けていくことで、工業分野の発展、そして、国民の利益に繋がることを願っている。

参考資料

- 1) 放射線利用統計 2001~2019、公益社団法人日本アイソトープ協会
- 2) 2020 アイソトープ法令集 I、公益社団法人アイソトープ協会
- 3) 放射線障害の防止に関する法令 概説と要点、公益社団法人日本アイソトープ協会
- 4) アイソトープ手帳 12 版、公益社団法人日本アイソトープ協会

第Ⅲ編 RI利用

(2) 医療分野における RI 利用の現状と将来

畑澤 順

1. はじめに

放射性同位元素（以下、RI）は、医療の分野で疾患の診断と治療に広く応用され、多くの国民がその恩恵に浴している。γ線放出核種、β線放出核種、α線放出核種、陽電子放出核種がそれぞれの特徴を生かして利用される。RIは「放射性同位元素等の規制に関する法律」で非密封RIと密封RIに区分される。非密封RIは悪性腫瘍、循環器、脳神経、呼吸器、腎尿路、消化器、内分泌、その他の領域の画像診断および甲状腺がん、転移性骨腫瘍、悪性リンパ腫などの悪性疾患、甲状腺機能亢進症などの内分泌疾患の治療に用いられる。一方、密封RIは、⁶⁰Coなどから放出される高エネルギーのγ線を体外から腫瘍に照射する遠隔照射放射線治療と、小線源を腫瘍近傍や内部に留置し¹⁹²Irなどから放出されるβ線を照射する近接照射治療に用いられる。本節では、医療分野におけるRI利用の現状と展望について紹介する。

2. 核医学治療

核医学治療は非密封RIを用いる。目的の組織に選択的に集積する放射性医薬品を用い、放出されるβ線やα線を利用して行う放射線療法である。アイソトープ治療、アイソトープ内用療法などとも呼ばれているが、本節では厚生労働省の第3期がん対策推進基本計画（平成30年3月）に“核医学治療（RI:Radioisotope 内用療法等）”と記載されているため、“核医学治療”に統一する。現在、日本国内では甲状腺がん、甲状腺機能亢進症に対するNa¹³¹I、がん抗原に対する⁹⁰Y標識モノクローナル抗体、骨転移のある去勢抵抗性前立腺がんに対する塩化ラジウム²²³RaCl₂が「医薬品、医療機器等の品質、有効性及び安全性の確保等に関する法律」（「薬機法」）で承認されており、保険診療が行われている。⁸⁹SrCl₂は悪性腫瘍の骨転移の疼痛緩和を目的として用いられていたが、RIの供給が停止され現在は行われていない。臨床研究では、神経芽腫、褐色細胞腫に対して¹³¹I-MIBGが用いられている。

2.1 核医学治療実施施設

核医学治療は、用いるRIと投与量により入院または外来での診療が行われる。¹³¹Iによる甲状腺疾患では、甲状腺機能亢進症で低用量を投与する場合は主に外来治療、甲状腺癌で高用量の場合は放射線治療病室（以下、治療病室）での入院治療が必要となる。治療実施

施設の総数は全国で 418、治療病室を有する施設数は 75、病床が稼働中の施設は 70、治療病室の病床数は 167、稼働病床数は 157 である。一方、純 β 核種 ^{90}Y 標識モノクローナル抗体は外来治療が可能である。 α 線核種 $^{223}\text{RaCl}_2$ も外来での治療が行われている。2007 年から 2017 年にかけて、治療実施施設は大幅に増加したが、外来での ^{131}I の低用量投与が認可されたことによる。高用量投与時に必要となる治療病室を備えた施設数には大きな変化はない。表 1 に全国の核医学治療実施施設数、治療病室の病床数などの推移を示した。

表 1

	2007	2012	2017
治療実施施設数	150	340	418
治療病室有の施設	75	67	75
治療病室稼働中の施設	64	63	70
治療病室のベッド数	177	149	167
稼働中のベッド数	158	135	157

(日本アイソトープ協会 第 8 回全国核医学診療実態調査報告書による)

2.2 核医学治療に用いる放射性医薬品の種類、供給量

2019 年度の供給量を表 2 に示す。甲状腺疾患に用いられる ^{131}I は、前年比 4.4% の増加、悪性リンパ腫の治療に用いられる ^{90}Y は 37.0% の減少、骨転移のある去勢抵抗性前立腺癌の治療に用いられる ^{223}Ra は 11.3% の減少であった。骨転移の疼痛軽減に用いられていた ^{89}Sr は供給が停止された。

表 2

(単位：MBq)

	2015	2016	2017	2018	2019
^{131}I	15,560,815	15,046,809	15,245,295	15,684,208	16,381,251
^{89}Sr	145,935	111,672	83,895	54,867	供給停止
^{90}Y	296,000	375,050	481,000	510,600	321,900
^{223}Ra		18,597	55,471	39,362	34,915

(日本アイソトープ協会 アイソトープ等流通統計 2020 による)

2.3 核医学治療の現状

対象疾患毎の年間治療件数の推移を表 3 (次頁参照) に示す。甲状腺機能亢進症治療は 83.9% が外来で行われている。甲状腺癌治療は 23.1% の増加を示した。これは 2011 年 11 月から開始された外来投与による甲状腺癌治療の増加による。 ^{89}Sr による骨転移疼痛緩和療法は

2019年に終了した。悪性リンパ腫による⁹⁰Y抗体治療は現在、製造工程の見直しが行われており、供給が停止されている。

表3

	2007	2012	2017
甲状腺機能亢進症	4,146	4,889	4,218
甲状腺癌	2,373	3,644	4,487
骨転移疼痛緩和	-	1,565	593
悪性リンパ腫	-	193	185
骨転移のある去勢抵抗性前立腺癌	-	-	4,353

(日本アイソトープ協会 第8回全国核医学診療実態調査報告書による)

2.3.1 ¹³¹I

¹³¹I(半減期 8.04日)はβ線およびγ線を放出し、甲状腺濾胞上皮細胞に選択的に摂取されるので甲状腺がん、甲状腺機能亢進症の治療に用いられている。¹³¹Iの主なβ線エネルギーは606keV、γ線エネルギーは364keVである。¹³¹Iから放出されるβ線の飛程は体内では0.6mmで、周辺組織への放射線被曝は少ない。

A. 甲状腺がん

甲状腺がんのうち、乳頭がん、濾胞がんなど分化型甲状腺がんの切除後残存腫瘍や転移巣の治療にNa¹³¹Iが用いられる。未分化甲状腺がんは、集積が少なく十分な治療効果が得られない。正常甲状腺があると正常甲状腺に¹³¹Iが集積し、腫瘍へ十分な線量を与えることができない。したがって、この治療を行う前には外科的に甲状腺を全摘除するか、Na¹³¹I前投与によって甲状腺機能を廃絶しておく必要がある。T3製剤やT4製剤で代替治療中の場合は2～4週間中止し、内因性TSHが増加するのを待つ。TSHは甲状腺への¹³¹Iの摂取を増加させるので、上昇した時点で治療病室へ入院の上Na¹³¹Iカプセル(3.7～7.4GBq)を経口投与する。なお、妊婦ならびに授乳継続中あるいは授乳希望者は本治療の絶対的禁忌である。常に介助や看護が必要な患者には、家族や医療従事者の被曝を考慮すると本治療を施行するのは困難である。遠隔転移のない分化型甲状腺癌における甲状腺癌全摘術後の残存甲状腺癌の廃絶(アブレーション)を目的とする場合、1100MBq以下の投与量であれば、外来での治療が可能である。

投与後3～7日目に全身の撮像を行い、集積の程度を確認する。集積がある場合は、半年～1年間隔で繰り返し治療を行うことができる。

Na¹³¹I 投与当日から数日のうちに、全身倦怠、頭痛、食欲不振、悪心嘔吐、唾液腺炎、血小板・白血球減少が出現することがある。投与3ヶ月以降には、肺線維症、骨髄機能低下、発がん（主に白血病）、性腺機能障害が現れることがある。

B. 甲状腺機能亢進症

甲状腺機能亢進症では甲状腺ホルモンの合成と分泌が持続的に亢進している。びまん性甲状腺腫（Gravas 病または Basedow 病）と自律性機能性甲状腺結節（Plummer 病）があり、Na¹³¹I 治療の対象である。我が国では、グレーブス病の治療には、抗甲状腺薬が第一選択とされる。抗甲状腺薬でのコントロールが困難な場合に Na¹³¹I 治療が選択される場合が多い。プランマー病では、正常甲状腺へのヨウ素の取り込みは抑制されており、腺腫部分に高集積となるため、治療効果が高い。1998 年から 500MBq 以下の投与量であれば、外来治療が可能になった。妊婦、妊娠の可能性のある女性、近い将来（6ヶ月以内）に妊娠の可能性のある女性、授乳中の女性には行わない。

Na¹³¹I 投与後 3～6 週間で甲状腺ホルモンが低下し、さらに甲状腺摂取率の低下、甲状腺の縮小がみられる。Na¹³¹I 投与直後には甲状腺組織が破壊されるため、一過性に甲状腺ホルモンが過剰に放出され、発汗、頻脈、発熱が現れることがある。Na¹³¹I 治療により甲状腺機能は低下するがホルモン補充療法でコントロールする。

C. 神経外胚葉性腫瘍

欧米では、¹³¹I-MIBG による悪性褐色細胞腫、悪性傍神経節腫、神経芽細胞腫、甲状腺髄様がんなど神経外胚葉由来腫瘍の内部照射療法が行われている。¹³¹I-MIBG は交感神経終末や副腎髄質でノルエピネフリンと同様に取り込まれる。¹³¹I からの β 線によって抗腫瘍効果を発揮する。¹³¹I-MIBG 投与前に¹²³I-MIBG シンチグラフィで集積の程度を確認する。放射線治療病室への入院が必要である。3700～7000MBq を投与する。カルチノイドや甲状腺髄様癌などにも効果が見られる。日本では¹³¹I-MIBG の承認は得られていない。

2.3.2 ⁹⁰Y

がん抗原に対するモノクローナル抗体を放射性核種で標識・投与し、悪性腫瘍を内部照射する方法を放射免疫療法という。がん抗原 CD20 に対するモノクローナル抗体を純 β 核種 ⁹⁰Y で標識し、腫瘍に集積した⁹⁰Y で内部照射する。低悪性度B細胞性非ホジキンリンパ腫、マントル細胞腫に対して適応となる。

本治療を開始するためには、CD20 ががん細胞に発現しており、CD20 モノクローナル抗体

が腫瘍細胞に結合することを確認しなければならない。 ^{90}Y は純 β 放出核種(半減期:64.1時間、エネルギー:2.28MeV、最大飛程:11mm)で体外計測できないため、 ^{111}In 標識CD20モノクローナル抗体を投与し、ガンマカメラで全身を撮像して腫瘍細胞への集積を確認する。

2.3.3 ^{223}Ra

骨転移のある去勢抵抗性前立腺癌を対象にして塩化ラジウム($^{223}\text{RaCl}_2$)が用いられている。 ^{223}Ra はカルシウムと同様に造骨部位に取り込まれる。 ^{223}Ra は α 線放出核種であり、殺細胞効果が高い。物理的半減期は11.4日、飛程は0.1mm以下で周辺正常組織への障害が少ない。その多くは、糞便中に排泄される。外来治療が可能である。1回55kBq/kgを4週間間隔で投与し、最大6回まで繰り返すことができる。骨髄抑制のある症例、炎症性腸炎(潰瘍性大腸炎、クローン病など)の症例では慎重に投与する。骨転移による疼痛緩和だけではなく、生命予後の改善がみられる。保険診療として行われている。

2.3.4 ^{177}Lu

欧米では、神経内分泌腫瘍の細胞膜に発現しているソマトスタチン受容体を標的とするルテチウム(^{177}Lu)標識ペントレオチドによる核医学治療が行われている。投与前にインジウム(^{111}In)標識ペントレオチドによるソマトスタチン受容体シンチグラフィを行い、ソマトスタチン受容体が発現していることを確認したから行う。国内で治験が行われている。

2.4 核医学治療の将来展望

核医学治療は長い間、 ^{131}I による甲状腺疾患の治療を中心に行われてきた。2000年以降、 ^{89}Sr や ^{90}Y などの純 β 核種、線エネルギー付加の高い α 線核種 ^{223}Ra の臨床応用が始まり、用いるRIも対象疾患も多様になってきた。純 β 核種は周囲への影響が少ないため、治療病室への入院が不要であり、この点は普及のための大きな利点となっている。 α 線核種は殺細胞効果が大きく飛程が短いので、難治性悪性腫瘍への効果が期待されている。海外では ^{225}Ac 標識分子による去勢抵抗性前立腺癌治療が行われている。また、国内では ^{211}At などの α 線核種標識分子の研究が行われている。

核医学治療用RIの中で α 線核種の供給量は極めて少ないので、原子炉または加速器による国内での製造が検討されている。原子炉については、JRR3、JMTR後継炉、常陽、もんじゅ跡地試験炉、商業用発電炉での可能性が模索されている。一方、加速器については大型加速器をもつ理化学研究所、量研機構、東北大学、大阪大学、福島県立医大、民間

企業で²²⁵Ac、²¹¹At など α 線核種の製造が試みられている。臨床用には実験レベルよりも大量かつ安定した供給が必要であり、この点はまだ解決していない。

放射線治療の理想は「癌細胞だけに照射し、正常細胞に影響を与えないこと」である。そのため、標的癌細胞にいかんして選択的に RI を送達するかが鍵となる。現在、腫瘍選択性の高い RI 送達分子の開発が進んでいる。臨床医学では、個々人の患者さんにとって最適な治療を選択する“個別化医療”が推進されている。核医学治療では、RI 送達分子が標的癌細胞に集積しているかどうか、正常臓器に集積して副作用を引き起こす可能性がないかどうかを患者さん毎に確認する必要がある。そのために、送達分子をまず γ 線核種で標識して投与し、送達分子の腫瘍集積性を画像診断で確認する。その上で、 β 線核種や α 線核種で標識した治療用送達分子を投与する手法が求められている。このような画像診断に基づいた核医学治療の手法を「核医学セラノスティクス」と呼んでおり、今後の核医学治療の主流となる。

核医学治療は、第 3 期がん対策推進基本計画（厚生労働省）に初めて記載され、がん診療連携拠点病院の指定要件に「核医学治療等の高度な放射線治療については適切な医療機関との連携」により診療提供体制を整備する旨、記載された。2019 年 4 月から、この指定要件に基づいて全国のがん診療連携拠点病院の整備が始まった。核医学治療は、がんの放射線治療の中で今後ますます重要な役割を担うことになる。

3. インビトロ検査

インビトロ（in vitro）検査は非密封 RI を用いる。血液などの検体試料を採取し、試料中の腫瘍マーカー、ホルモン、酵素、薬剤などの微量物質を精度良く測定する。低エネルギー γ 線放出核種¹²⁵I が用いられる。測定には、液体シンチレーションカウンタを用いる。この分野は非 RI 検査が普及しており、検査施設、検査数ともに減少している。

3.1 インビトロ検査実施施設

1982 年には 937 施設でインビトロ検査が行われていた（日本アイソトープ協会 第 7 回全国核医学診療実態調査報告書）。2019 年にはインビトロ放射性医薬品の使用施設数は 6 施設であった（日本アイソトープ協会 アイソトープ等流通統計 2020）。自施設でインビトロ検査を行っている医療機関が皆無となり、現在は衛生検査所に外部委託されている。

3.2 検体検査に用いる放射性医薬品の種類、供給量

インビトロ検査数は 1992 年の調査でピークに達し、年間 60,180,000 件行われた。以後、漸減し 2012 年には 9,002,000 件となっている。減少の要因は、RI 検査から非 RI 検査に移行

したことが大きい。インビトロ検査にはγ線核種¹²⁵Iが用いられている。表4に年間供給量の推移を示す。2016年からは年間約10GBqが供給されており、大きな変化はない。

表4 (単位：MBq)

	2016	2017	2018	2019
¹²⁵ I	10,398	10,456	10,582	10,152

(日本アイソトープ協会 アイソトープ等流通統計 2020による)

3.3 インビトロ検査の実際

表5にインビトロ検査の項目別件数の推移を示す。検査の分類は第7回全国核医学診療実態調査を参照した。

表5 (件数)

	2015	2016	2017	2018	2019
下垂体機能	524,136	529,032	559,400	572,700	395,100
甲状腺機能	488,462	455,970	427,130	402,180	406,040
副甲状腺機能	486,920	325,360	312,276	329,412	317,620
膵・消化管機能	708,150	310,750	292,350	272,100	227,700
性腺・胎盤機能	111,000	155,100	177,400	169,600	183,700
副腎機能	1,077,300	1,133,400	1,168,100	1,138,700	1,153,200
腎・血圧調節機能	1,175,000	530,700	540,600	562,100	588,900
血液・造血機能	185,200	—	—	—	—
腫瘍マーカー	1,102,400	1,015,700	1,057,700	1,101,200	1,165,800
酵素	209,700	144,750	121,950	119,500	112,400
サイトカイン	13,200	8,000	7,100	18,000	10,700
心臓関連	53,000	53,700	47,000	45,100	36,900

(日本アイソトープ協会 アイソトープ等流通統計 2020による)

甲状腺機能検査、下垂体機能検査、膵・消化管機能検査、酵素検査、サイトカイン検査、心臓関連検査(ミオグロビン)は減少傾向にある。一方、性腺・胎盤機能検査、副腎機能検査、腎・血圧調節機能検査、腫瘍マーカーなどは増加傾向にある。

3.4 インビトロ検査の展望

インビトロ検査自体の有用性は大きいものの、院内の設備の維持にかかるコスト、人材を考えると、今後も衛生検査所がインビトロ検査を担うことになる。非RI検査化が進む中で、検査件数が維持されている検査は、対象分子が不安定かつ検査件数が少ないことから、非RI検査試薬の開発経費を考えると、継続してRI検査が行われると考えられる。

4. 核医学画像診断

4.1 核医学画像診断の概要

核医学診断には非密封 RI を用いる。特定の機能を反映する分子を RI で標識し、生体に投与し（静脈投与、経口）、その RI 標識分子からの γ 線を時間的・空間的に追跡し、得られた情報から病態を解析する。臨床医学の分野では、1940 年代にまず甲状腺への ^{131}I の取り込みが調べられた。甲状腺機能亢進症では甲状腺への ^{131}I 集積が著しく亢進していること、逆に甲状腺機能低下症では取り込みが低下していることが体外計測によって明らかにされた。 ^{131}I が放射する β 線は甲状腺機能亢進症と分化型甲状腺癌の治療に、 γ 線は ^{131}I の甲状腺への集積を体外から計測し評価するために利用された。以後、様々な生理機能・代謝過程が画像化され現在に至っている。最近では、陽電子放出核種 ^{18}F 標識分子の利用が大きく伸びている。疑似ブドウ糖 2-deoxy-2-[^{18}F]fluoro -D-glucose (^{18}FDG)は、細胞のブドウ糖代謝に特異的に取り込まれる。腫瘍細胞ではブドウ糖代謝が亢進しているので、 ^{18}FDG PET によって悪性腫瘍を検出することができる。また、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP や Na^{18}F は造骨細胞に特異的に集積するので、骨転移や骨折の診断に用いられている。代謝の変化は形態的变化に先行することが多いので、CT や MR で変化があらわれる前に異常を発見することが可能である。これからの医学・医療は、疾患を分子レベルの異常としてとらえ治療を行うことになる。核医学画像診断は、分子レベルの障害を検出する手法（分子イメージング）の中心的な役割を担っている。

4.2 核医学画像診断を行っている施設数

表6に核医学画像診断を行っている施設数の推移を示す。全体の約半数は民間医療機関が占めている。残りの半数を公立医療機関が占めている。2015 年以降、施設数はほぼ横ばいの状態が続いている。

表6

(施設数)

	2015	2016	2017	2018	2019
大学医療機関	132	133	133	134	134
国立医療機関	161	161	160	156	155
公立医療機関	342	335	333	331	327
民間医療機関	616	614	610	611	606
総計	1251	1243	1236	1232	1222

(日本アイソトープ協会 アイソトープ等流通統計 2020 による)

表7にPET 検査を行っている施設数の推移を表に示す。2007 年以降、自施設内にサイクロトロンを設置し放射性医薬品を製造している（院内製造）施設はほぼ横ばい、一方、医薬品企業からの供給（デリバリー）でPET 検査を行っている施設が増加している。

表7 （施設数）

	2007	2012	2017
院内製造のみ	95	48	46
院内製造とデリバリー	29	87	100
デリバリーのみ	88	160	243
合 計	212	295	389

（日本アイソトープ協会 第8回全国核医学実態調査報告書による）

4.3 核医学画像診断に用いる放射性同位元素

核医学画像診断には、 ^{123}I 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 、 ^{201}Tl 、 ^{68}Ga などの単光子放出核種と、 ^{18}F 、 ^{15}O 、 ^{11}C 、 ^{13}N などの陽電子放出核種が用いられている。

4.3.1 単光子放出核種

単光子放出核種は、原子核から γ 線を放出する。この γ 線をシンチレーションカメラやSPECT(Single Photon Emission Computed Tomography)などで検出する。核医学画像診断には、 γ 線放出核種の中でもエネルギーが200keV以下、物理的半減期が1週間以下、化合物の標識が容易などの性質をもつ ^{123}I 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 、 ^{201}Tl 、 ^{68}Ga などの核種が用いられる。単光子放出核種のうち、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータから採取する。ジェネレータ内には ^{99}Mo を充填したカラムがある。カラム内で ^{99}Mo （半減期67時間、 β -壊変）は $^{99\text{m}}\text{Tc}$ （半減期6時間、核異性体転移）に壊変する。カラムに生理食塩水を通すと $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$ が溶出してくる。ジェネレータを購入することにより、必要時に $^{99\text{m}}\text{Tc}$ で標識した放射性医薬品を調整することができる。一方、標識済みの $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製剤が販売されており、注文により医療機関に配送される。表8（次頁参照）に、診療対象分野毎に核医学画像診断を行っている病院数、年間検査数、および使用されている主な放射性医薬品を示す。

表8

	病院数	検査件数	主な放射性医薬品
骨・関節	955	350,794	^{99m}Tc -MDP, ^{99m}Tc -HMDP
心臓・血管	919	298,069	^{201}Tl -塩化タリウム, ^{99m}Tc -MIBI, ^{99m}Tc -テトロホスミン, ^{123}I -BMIPP, ^{123}I -MIBG,等
脳・脳脊髄液	904	254,884	^{123}I -IMP, ^{99m}Tc -ECD, ^{99m}Tc -HMPAO, ^{123}I -イオフルパン, ^{123}I -イオマゼニル, ^{111}In -DTPA 等
腫瘍・炎症	680	39,052	^{67}Ga -クエン酸ガリウム, ^{201}Tl -塩化タリウム等
腎・尿路	451	25,069	^{99m}Tc -DTPA, ^{99m}Tc -DMSA, ^{99m}Tc -MAG ₃ 等
肺	399	25,403	^{99m}Tc -MAA, ^{81m}Kr -ガス, ^{99m}Tc -ガス
リンパ節	378	41,034	^{99m}Tc -フィチン酸, ^{99m}Tc -スズコロイド
甲状腺	350	19,558	^{99m}Tc -過テクネチウム酸ナトリウム, ^{123}I -ヨウ化ナトリウム カプセル等
副甲状腺	329	8,562	^{99m}Tc -MIBI 等
肝・胆道	221	12,026	^{99m}Tc -GSA, ^{99m}Tc -PMT 等
唾液腺	178	5,240	^{99m}Tc -過テクネチウム酸ナトリウム
消化管	135	2,189	^{99m}Tc -過テクネチウム酸ナトリウム, ^{99m}Tc -HSA-DTPA, ^{99m}Tc -HSA, ^{99m}Tc -RBC 等
副腎	94	1,674	^{131}I ヨウ化メチルノルコレステロール等
脾・骨髄	15	245	^{111}In -塩化インジウムなど

(日本アイソトープ協会 第8回全国核医学診療実態調査報告書による)

表9に、核医学画像診断に使用されている非密封 RI の年間供給量の推移を示す。 ^{99m}Tc 、 ^{123}I 、 ^{201}Tl 、 ^{99}Mo - ^{99m}Tc ジェネレータはほぼ横ばい、 ^{67}Ga は減少している。これは悪性腫瘍診断が PET に移行していることによると考えられる。一方、 ^{111}In は約3倍に増加している。これは ^{90}Y による悪性腫瘍診断の際の投与前画像評価が増加しているためと考えられる。

表9

(単位: MBq)

	2015	2016	2017	2018	2019
^{99m}Tc	298,780,833	304,739,130	300,495,662	293,085,756	285,604,434
^{123}I	34,434,913	34,032,331	34,987,358	34,902,199	34,836,349
^{201}Tl	14,605,454	13,906,487	13,234,456	12,987,851	12,268,016
^{67}Ga	2,889,774	2,689,687	2,411,290	2,100,860	1,891,921
^{111}In	132,527	287,922	340,545	370,057	385,300
^{99}Mo - ^{99m}Tc	76,126,575	89,851,515	86,688,375	82,068,895	79,314,015
^{81}Rb - ^{81m}K r	559,255	617,345	620,490	622,525	612,720

(日本アイソトープ協会 アイソトープ等流通統計 2020 による)

4.3.2 陽電子放出核種

陽電子放出核種は、原子核から陽電子を放出する。陽電子は陰電子と結合して消滅し、この時一対の消滅 γ 線を放出する。PET (Positron Emission Tomography) は一対の消滅 γ 線を検出している。陽電子放出核種は物理的半減期が短いため、病院内に設置したサイクロトロンで核種を生成し、標識しなければならない。標識のためには専用の標識合成装置が必要で、放射性医薬品に精通した薬剤師による品質管理を行わなければならない。主に悪性腫瘍診断に利用される放射性擬似ブドウ糖 2-deoxy-2-[^{18}F]fluoro-D-glucose (^{18}F -FDG) は最終製剤が販売されており、注文によって医療機関に配送される。表10に、検査実施施設数、放射性医薬品毎の検査実施数を示す。

表10

	検査実施施設数	検査実施数	放射性医薬品
^{18}F 製剤	350	632,051	
脳		9,678	^{18}F -FDG 等 (保険診療)
心臓		3,507	^{18}F -FDG 等 (保険診療)
腫瘍		569,441	^{18}F -FDG 等 (保険診療)
その他		49,425	^{18}F -FDG 等
^{11}C 製剤	44	4,598	
脳		3,690	^{11}C -メチオニン、PIB など
腫瘍		869	^{11}C -メチオニン、コリンなど
^{15}O 製剤	14	2,750	
脳		2,579	$^{15}\text{O}_2$, C^{15}O_2 , C^{15}O , (保険診療) H_2^{15}O
心臓		90	H_2^{15}O
^{13}N 製剤	15	2,363	
心臓		2,362	$^{13}\text{NH}_3$ (保険診療)

(日本アイソトープ協会 第8回全国核医学診療実態調査報告書による)

4.4 核医学画像診断の実際

核医学画像診断の検査件数が多い悪性腫瘍、心臓疾患、脳神経疾患、甲状腺疾患の領域について、臨床的意義をまとめる。

4.4.1 悪性腫瘍

撮像装置は、ガンマカメラや SPECT、または PET を用いる。ガンマカメラや SPECT では、

^{99m}Tc -MDP や ^{99m}Tc -HMDP による骨シンチグラフィが行われる。ほとんどの施設では、核医学検査の中で最も検査数が多く、特に乳癌、前立腺癌、肺癌などの骨転移病巣の検出に用いられる。悪性腫瘍で骨転移があると進行がんと分類され、以後の治療戦略を立てる上で重要である。検査数は漸減傾向にある。画像解析ソフトの利用による簡便化、SPECT 装置の普及、悪性腫瘍の罹患率の増加を考慮すると、今後も一定数の検査が行われると予想される。

^{18}F -FDG による PET 検査は 2002 年に保険適応され、以後適応範囲が段階的に拡大されてきた。国内では製薬企業による供給が始まり、医療機関はサイクロロンと標識合成設備を備えることなく、PET カメラのみを設置することにより保険診療が可能になった。CT や MR と一体化された PET/CT や PET/MR が普及し、悪性腫瘍の検出、病期分類、治療効果の評価、治療後の再発診断に広く用いられている。また、最近では炎症性疾患（高安動脈炎など）へ適応が拡大しており、今後も悪性腫瘍、炎症性疾患の画像診断の要として、さらに利用が促進されると考えられる。

4.4.2 心臓疾患

心臓領域では、虚血性心疾患の診断、心不全における心臓機能の評価に用いられている。SPECT 検査では、 ^{99m}Tc -MIBI、 ^{99m}Tc -TF、 ^{201}Tl -塩化タリウムを用いる。薬物負荷時・運動負荷時と安静時の血流分布を比較する。安静時と負荷時血流が正常な場合、正常と判定する。負荷時に血流低下、安静時には正常な場合、狭心症などによる虚血心筋と診断される。負荷時に血流欠損で安静時にも血流が無い場合は、梗塞心筋と判定する。

高齢者人口が増すにつれ、心臓から全身に血液を拍出する機能が低下した状態、すなわち心不全の患者が増加しており、心不全の重症度を評価するために行われる頻度が増している。画像解析ソフトを用いることにより、拡張期および収縮期左心室容量、駆出率、心筋壁運動について定量的に評価できるようになった。

4.4.3 脳神経疾患

脳神経領域では、虚血性脳血管障害、てんかん、認知症、パーキンソン病と類縁疾患の診断に用いられている。

高齢人口の増加により、無症候性頸動脈狭窄・閉塞の患者が増加している。脳血流量シンチグラフィは、閉塞性脳血管病変によって生じる慢性脳虚血を早期に検出し、内科的治療や外科的血行再建術によって発症を予防することを可能にする。治療後の経過観察にも用いられている。安静時脳血流量に対するアセタゾラミド負荷後の脳血流量上昇率は、脳血管反応性と定義され、灌流圧の低下に依存して障害される。脳血管反応性は脳循環の保護機構の

指標として用いられており、予防的再建術の対象選択に役立てられている。

認知症をはじめとする各種変性疾患や精神疾患では、脳機能障害部位に対応する疾患特異的な脳血流低下パターンが知られており、各疾患の鑑別診断に用いられる。アルツハイマー病では、両側側頭 - 頭頂連合野や前部帯状回での血流低下を認める。前頭側頭型痴呆では両側前頭葉や側頭葉前部での血流低下、レビー小体病では一次視覚野を含む後頭葉内側部の血流低下を認める。脳血流異常を示す認知症関連疾患は、そのほかに皮質基底核変性症では片側性の脳皮質および基底核の血流低下、進行性核上性麻痺では両側前頭葉と基底核の血流低下、脳血管性痴呆では不均一な脳皮質の血流低下などが観察され、補助診断法として脳血流 SPECT 検査が用いられる。画像統計解析法は病初期に疾患固有の血流低下部位を抽出して正常加齢性変化と鑑別する早期診断にも利用されている。

てんかんは、神経細胞が異常興奮することにより発症する。その領域では脳血流が異常に増加している。薬物治療が無効な場合は、てんかん焦点を外科的に切除する。発作最中に脳血流シンチグラフィを行うと、脳血流の増加した領域としててんかん焦点を検出することができる。また、 ^{123}I -Iomazenil はてんかん焦点では集積が低下しており、てんかん発作最中以外でもてんかん焦点を検出することができる。

パーキンソン病はアルツハイマー型認知症に次いで頻度の高い神経変性疾患である。黒質から線条体に投射するドパミン系神経伝達系の変性が原因とされている。治療はドパミン前駆体医薬品を経口投与する。手指の振戦、無動、感情鈍麻などの特徴的な症状を示すが、ドパミン系の異常を伴わず同様の症状を示す病態がある（パーキンソン症候群）。パーキンソン病とパーキンソン症候群を鑑別するために、 ^{123}I -DAT 検査を行う。パーキンソン病では集積の低下、パーキンソン症候群では正常の集積を示す。

様々な原因で、脳脊髄液が脳槽外に漏出し、脳脊髄液が減少して様々な不定愁訴の原因となっている場合がある。漏出の有無、部位を診断するために ^{111}In -DTPA 脳槽シンチグラフィが有用である。 ^{111}In -DTPA は、腰椎レベルで髄腔内に投与すると1～3時間後に脳底槽に到達する。24時間後には脳に分布し、48時間後には大部分が吸収される。頭部の手術や外傷後に生じる髄液漏では、副鼻腔や頭蓋底など漏出部に一致して集積が観察される。検査前に鼻あるいは耳に綿栓を詰めて撮影し、ウェルカウンタで放射能測定を行うと、画像上陰性の場合でも漏出を判定できることがある。髄液減少症の髄液漏は、頸胸髄移行部に好発する。

4.4.4 甲状腺疾患

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ - 過テクネチウム酸ナトリウム、 ^{123}I - ヨウ化ナトリウム等を用いる。Graves 病 (Basedow 病) では甲状腺のびまん性腫大と集積上昇を認める。甲状腺機能亢進症を伴う結節性甲状腺腫は

Plummer 病とよばれ、集積亢進部位として描出される。Plummer 病では甲状腺ホルモンの過剰分泌により甲状腺刺激ホルモン (TSH) が抑制され、正常甲状腺への集積は著明に低下する。

慢性甲状腺炎 (橋本病) では様々なパターンで集積低下を示し、摂取率も不均一であるが、経過中に悪性リンパ腫や甲状腺癌を合併して集積が欠損することがある。亜急性甲状腺炎では甲状腺の移動性圧痛を伴い、組織破壊と血中甲状腺ホルモンの上昇による TSH 抑制のため、シンチグラフィ上は正常部分も含めて全欠損し、摂取率はほぼ 0% を示す。急性化膿性甲状腺炎では先天的に左側に形成されやすい下咽頭梨状陥凹の瘻孔を介して甲状腺上極に炎症が発生するもので、小児に多く、甲状腺左葉上極の欠損陰影を示す。異所性甲状腺腫では正常頸部以外の頸部や縦隔、卵巣などに甲状腺が存在する。先天性甲状腺機能低下症であるクレチン病では舌根部に甲状腺組織を認めることが多い。

甲状腺癌では、 ^{201}Tl -塩化タリウムを用いる。乳頭癌や濾胞癌によく集積する。良性の腺腫にも集積し、良悪性の鑑別は困難な場合が多い。しかし、甲状腺癌の転移巣の検出には優れ、特に術後の患者で甲状腺組織が残存し、 ^{131}I では検出不可能な場合でもヨード制限やホルモン制限の前処置をせずに検査を施行できる。未分化癌、髄様癌、悪性リンパ腫への集積は低く、これらの腫瘍では ^{67}Ga や ^{131}I -MIBG によるシンチグラフィが有効である。

5. 密封 RI による放射線治療

5.1 がんの放射線治療

1950 年代に、 ^{60}Co を用いたテレコバルト装置や高エネルギー X 線リニアックなどの遠隔照射装置が登場し、悪性腫瘍への放射線治療が始まった。2019 年での使用許可台数をみると、リニアックが 1130 台であり、放射線治療の主役となっている (表参照)。 ^{60}Co を線源とする遠隔照射装置の使用許可台数は 56 で、脳腫瘍の放射線治療に用いるガンマナイフである。 ^{137}Cs を線源とする遠隔照射装置の使用許可台数は 7 となっている。

(日本アイソトープ協会 アイソトープ流通統計 2020 による)。

5.2 ガンマナイフ

ガンマナイフは脳病変に対する定位的放射線治療装置である。ヘルメット状の装置に約 200 個の ^{60}Co 線源を半球状に配置し、頭部の病巣にコリメータを用いて多方向から集中的に照射する。 ^{60}Co 線源は減衰 (半減期: 5.27 年) があるので、一定期間毎に線源の更新が必要になる。2014 年から 2018 年までガンマナイフ用に供給された ^{60}Co の年間供給を表 11 (次頁参照) に示す。表中の個数は、一台のガンマナイフに装着される 201 個または 192 個の ^{60}Co 線源を 1 個としたものである。使用許可台数には変化がないので、線源の更新が行われた

ものと推定される。

表 11 (単位：GBq)

	2014	2015	2016	2017	2018
⁶⁰ Co 数量	1,978,020	1,278,720	2,141,190	1,278,720	1,501,830
⁶⁰ Co 個数	9	6	10	6	7

(日本アイソトープ協会 アイソトープ流通統計 2020 による)

5.3 小線源治療

代表的な小線源治療の適応疾患は、前立腺癌、舌癌などの頭頸部癌、子宮癌、子宮体癌である。胆道癌、直腸肛門癌、膀胱癌、乳癌、食道癌、気管気管支癌、脳腫瘍などにも用いられる。現在の小線源治療は、従来の低線量率から高線量率へ移行しつつある。RALS (remote afterloading system) が開発され、術者の職業被曝が軽減された。表 12 に、小線源治療を行っている病院数、用途、線量率、照射方式を示した。表 13 には、各小線源の年間供給量の推移を示した。

表 12

	病院数	用途	線量率	照射方式
¹⁹² Ir	154	RALS	高線量率照射	組織内・腔内照射
		ワイヤ・シード	低線量率照射	組織内一時留置
¹²⁵ I	114	シード	低線量率照射	組織内永久挿入
¹⁹⁸ Au	29	シード	低線量率照射	組織内永久挿入
⁶⁰ Co	20	RALS	高線量率照射	組織内・腔内照射

(放射線利用統計 2019 による)

表 13 (単位：MBq)

	2014	2015	2016	2017	2018
¹⁹² Ir (RALS)	165,390,000	167,240,000	167,240,000	168,350,000	165,020,000
¹⁹² Ir (シード)	31,820	33,300	33,300	19,240	24,420
¹²⁵ I (シード)	2,680,629	3,060,447	2,808,093	2,537,082	2,476,129
¹⁹⁸ Au (シード)	112,295	124,320	140,600	112,295	138,010
⁶⁰ Co (RALS)	444,000	296,000	148,000	74,000	148,000

(放射線利用統計 2019 による)

6. 医療分野における RI 利用の将来展望

医療分野では分子レベルでの病態解明が進み、患者さん毎の病態に合わせた個別化医療が進んでいる。核医学画像診断は、個々の患者さんで分子病態を画像化することが可能なので、今後ますます重要性は増してくる。SPECT による核医学画像診断のうち、心臓・循環器領域は社会の高齢化とともに心不全患者が増加し、心臓機能を定量的に評価する手法として重要性が増している。脳神経系の核医学画像診断では、高齢化社会に伴う認知症患者の増加に伴い、検査件数が伸びている。悪性腫瘍の核医学画像診断は PET が主流となり、検査件数はさらに増加すると予想される。一方、検査件数は少ないものの他の画像診断では代替できない分野があり、今後も継続して行われると考えられる。

核医学治療の分野は、厚生労働省の「第3期がん対策推進基本計画」に初めて盛り込まれた。甲状腺疾患以外の疾患も治療の対象になってきた。腫瘍特異性の高い RI 送達分子が続々と開発されており、今後最も発展が期待される。β線核種に加えてより細胞殺傷効果の高いα線核種の応用が始まり、適応範囲が拡大している。

一方、この分野のリスク要因は RI の調達にある。⁹⁹Mo、⁶⁰Co、¹⁹²Ir、¹²⁵Iなどは、海外の原子炉で製造されたものを輸入している。COVID-19 パンデミックで図らずも露わになったように、脆弱なサプライチェーンに依存することは核医学診療の大きなリスク要因である。加速器による国産の RI 製造が必要な時期にきている。また、国内の試験炉での製造の可能性を模索する必要がある。

— NSA COMMENTARIES —

原子力システム研究懇話会 編著

- | | | |
|-------|---|--------------|
| No.1 | 「原子力と環境」(1700円)〔品切れ〕 | 平成5年6月23日発行 |
| No.2 | 「原子力と先端技術〔Ⅰ〕」(2000円)
①材料関連
②バイオ関連 | 平成6年6月20日発行 |
| No.3 | 「原子力と先端技術〔Ⅱ〕」(2200円)
①原子力への先端的計算機技術の応用
②核融合技術開発の最前線 | 平成7年6月21日発行 |
| No.4 | 「原子力と先端技術〔Ⅲ〕」(2200円)〔残部僅少〕
①放射線利用による新材料開発
②レーザー応用 | 平成8年6月18日発行 |
| No.5 | 「原子力と先端技術〔Ⅳ〕」(2200円)
○原子力におけるロボット技術の動向 | 平成9年6月18日発行 |
| No.6 | 「原子力と先端技術〔Ⅴ〕」(2200円)
○加速器の現状と将来 | 平成10年6月29日発行 |
| No.7 | 「中性子科学」(2200円) | 平成11年6月29日発行 |
| No.8 | 「放射線利用における最近の進歩」(2200円) | 平成12年6月27日発行 |
| No.9 | 「原子力利用の経済規模」(2200円) | 平成13年6月26日発行 |
| No.10 | 「原子力による水素エネルギー」(2200円) | 平成14年6月18日発行 |
| No.11 | 「放射線と先端医療技術」(2200円) | 平成15年6月23日発行 |
| No.12 | 「原子力とそのリスク」(2200円) | 平成16年6月21日発行 |
| No.13 | 「原子力施設からの放射性廃棄物の管理」(2200円) | 平成17年6月21日発行 |
| No.14 | 「軽水炉技術の改良と高度化」(2200円) | 平成18年6月20日発行 |
| No.15 | 「原子力による運輸用エネルギー」(2200円) | 平成19年6月19日発行 |
| No.16 | 「原子力と地球環境」(2200円) | 平成20年6月17日発行 |
| No.17 | 「原子力国際人材育成の必要性和戦略」(1300円) | 平成21年12月1日発行 |
| No.18 | 「原子力開発の光と陰を見つめて」(2200円) | 平成22年6月15日発行 |
| No.19 | 「対談集：原子力の利用」(2200円) | 平成23年9月30日発行 |
| No.20 | 「核燃料サイクルと高速炉開発」(2200円) | 平成25年3月29日発行 |

No.21 「福島第一原子力発電所事故と原子力のリスク」(2200円) 平成26年6月17日発行

No.22 「放射性廃棄物低減化・有害度低減の技術開発」(2200円) 平成28年3月30日発行

No.23 「2050年におけるわが国エネルギーミックスへの原子力の寄与」平成30年3月20日発行
(2200円)

No.24 「我が国将来世代のエネルギーを担う核燃料サイクル」 平成31年3月8日発行
(1600円)

No.25 「原子力平和利用と核不拡散・核セキュリティ」 令和2年6月12日発行
(2200円)

No.26 「放射線・RI利用 ― 現状と将来」 令和3年6月25日発行
(2200円)

別冊シリーズ

No.1 「原子力のリスクと安全の確保」内藤奎爾著(1500円)〔品切れ〕
平成18年12月19日発行

No.2 「カーボン ネガティブ エネルギー システム」(1300円) 平成27年6月16日発行

※価格は消費税込み(送料別)

放射線・RI利用 — 現状と将来
—NSA/COMMENTARIES : No.26—

令和3年6月25日発行

編集・発行 (一社) 日本原子力産業協会

原子力システム研究懇話会

〒105-0001 東京都港区虎ノ門1-7-6 升本ビル4階

電話 : (03) 3506-9071

URL : <http://www.syskon.jp>

E-mail: syskon@syskon.jp

印刷 有限会社 トック 東京都港区虎ノ門1-11-10

ISBN978-4-88911-313-6
