【解説】

林 徹

照射食品の急性毒性、慢性毒性、発ガン性、遺伝毒性、細胞毒性、催奇形性、変異原性などの毒性について検討するとともに、食品を汚染している微生物が突然変異を起こして毒性を増すことがないか、栄養素の破壊が起こらないか、アレルゲンにならないかなどについても調べる必要がある。

照射の安全性

Treatment of Foods with Ionizing Radiation
Toru HAYASHI, 聖徳大学人間栄養学部

鈴薯の照射が実施されている。

食品照射に使用する放射線

食品照射に利用される放射線は、コバルト60およびセシウム137のガンマ線、エネルギーが1,000万電子ボルト（10 MeV）以下の電子線、そして500万電子ボルト（5 MeV）以下のエックス線に限られている。これは、放射線を照射した食品の中に放射能が誘導されるのを防ぐためであり、上記の放射線を使用するかぎり、放射線を照射した食品が放射能を帯びる心配はなく、したがって照射食品を食べても内部被曝することはない^(2,3)。

紫外線は透過力がなく、食品の表面しか照射できないが、放射線、特にガンマ線は透過力が大きく、厚みのある食品でも突き抜け、均一に照射できる^(4,5)。電子線はそのエネルギーにより透過力が異なり（図1）、5～10 MeVの電子線はガンマ線と同様に食品を透過するが、300 keV以下の低エネルギー電子線（ソフトエレクトロン）は、透過力が小さいために食品内部を照射することなく食品の表層部のみ照射できる（図2）^(5,6)。

ガンマ線のような電磁波放射線が物質を通過すると、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成を起こしてエネルギーを失う。光電効果は、電磁波放射線（光子、フォトン）の全エネルギーが原子の外殻電子に与えられることにより、その電子が高速で原子から飛び出す現象である。コンプトン散乱は、電磁波放射線がエネルギーの一部を物質中の電子（主に自由電子）に与えてエネルギーを減少させ方向を変えるとともに、エネルギーをもらった電子は反対方向に高速で飛び出す現象である。電子対生成は、1.02 MeV以上の電磁波放射線が原子核の近くを通過する際に電子と陽電子を生成して電磁波が消滅する現象であり、電磁波のエネルギーは電子と陽電子に与えられ、高速の電子が生じる。このように、物質中では電磁波放射線のエネルギーは高速電子に変換されるために、物質中では電子線もガンマ線も同じような反応をひき起こす⁽⁴⁾。

これらの放射線が水に作用すると、酸素を触媒として多様な活性酸素やラジカルを生成し、これらが生体分子や食品成分と反応する。一方、水が存在しないと放射線が直接生体分子や食品成分と反応する。水を介した放射線的作用を間接作用、水を介さないものを直接作用という。水の存在下のほうが、放射線的作用は間接作用により増幅されて大きくなる。ちなみに、原発事故で問題となっている放射線による発ガンは、放射線が直接DNAを傷つける直接作用よりは、放射線によって生体内の溶

図1 ■ 電子線の透過力

図2 ■ 放射線の透過力の模式図

液中に生成したラジカルや活性酸素によりDNAが傷つけられる間接作用によるものの寄与のほうが大きい。

ガンマ線と電子線の比較

食品照射における放射線量は吸収線量で評価され、グレイ (Gy) という単位で表わされる。物体1 kgが放射線から1ジュールのエネルギーを吸収したときの吸収線量を1 Gyという。物体が吸収したエネルギーをルーチンに評価するためにフィルム線量計が用いられている。フィルム線量計は吸収したエネルギー量のある特定波長における吸光度の変化で評価するものである。フィルム線量計に同じ線量のガンマ線と電子線を照射したときの

吸光度の変化はガンマ線照射のほうが大きく、ガンマ線よりも30%高い線量の電子線を照射すると、これらのフィルム線量計の吸光度変化は一致する。すなわち、ガンマ線のひき起こす化学変化は電子線によるものよりも30%大きいことになる^(7,8)。しかし、脂質の酸化のような連鎖反応においては、ガンマ線と電子線の影響の差が増幅され、同じ線量で脂質を照射したときの過酸化物の生成量は、ガンマ線照射したときに電子線照射したときの数倍になる⁽⁹⁾。

放射線殺菌の指標菌である *Bacillus pumilus* の胞子を用いて、ガンマ線と電子線の影響を比較すると、ガンマ線および電子線を照射したときの胞子の D_{10} （生残菌数を1/10にする線量）はガンマ線が1.26 kGy、電子線が1.60 kGyであり、その比は1.27となる。すなわち、ガンマ線の殺菌効果は電子線よりも約30%大きい。さらに、胞子を液体培養したときの胞子の発芽、発芽後成長、増殖、タンパク質とRNAの合成のいずれも、ガンマ線のほうが電子線よりも阻害の程度が大きく、電子線をガンマ線よりも30%高い線量で照射したときには阻害の程度が一致する⁽¹⁰⁾。

ここに紹介したように、電子線の効果は生物的にも化学的にもガンマ線よりも約30%小さい。このような電子線とガンマ線の効果の違いの原因となっているのが線量率*（ガンマ線の線量率は $10^3 \sim 10^4$ Gy/時、電子線の線量率は $10^6 \sim 10^9$ Gy/時）であり、そのメカニズムとしては次の2つが考えられる⁽⁴⁾。

①線量率が非常に高いと、放射線により短時間に大量のラジカルが生成するために、ラジカルが過剰となり、ラジカルが生体分子や色素などの物質と反応すると同時にラジカルどうしが反応してしまうので、化学反応や殺菌の効率が落ちる。

②酸素は放射線化学反応を触媒しているが、線量率が非常に高くなると、短時間に大量に生成したラジカルのために反応周辺の酸素がすべて消費されてしまい、生成したラジカルが反応するのに必要な酸素が不足するために、化学反応や殺菌の効率が落ちる。

電子線の場合、ガンマ線と同じ殺菌効果を得るためにはガンマ線よりも約30%高い線量を照射する必要があるが、そのときの品質劣化はガンマ線と同じかそれ以下であり、電子線を利用することの技術的な不利益はない。むしろ、脂質の酸化においてはガンマ線の影響が電子線よりもはるかに大きく、脂質酸化のようなラジカルの連鎖反応が起こる食品においては、電子線を利用する

ほうが品質劣化が少なく効率的に殺菌でき、このことは殺菌技術としての電子線照射の優位性を示しているものである。なお、殺虫効果も電子線よりもガンマ線のほうがわずかに大きい⁽¹¹⁾。

各種香辛料に対する殺菌効果はガンマ線のほうが電子線よりも大きい傾向がある⁽¹²⁾。ガンマ線および電子線を照射しても香辛料の精油や色調はほとんど変化しないため、それぞれの影響の差は観察されない。同様な傾向はタンパク質においても観察される。たとえば乾燥血液の場合、その乳化性、疎水性、溶解性などタンパク質の機能に対する影響はガンマ線照射、電子線照射ともに小さいが、ガンマ線のほうが電子線よりもいくぶん大きな影響がみられる⁽¹³⁾。このように、具体的な食品においても、ガンマ線のほうが電子線よりも殺菌効果や品質に対する影響は少し大きい。

電子線はガンマ線よりもはるかに線量率が高いため、時間当たりの処理能力が大きい。このこともガンマ線に対する電子線の優位性の一つである。

低エネルギー電子線の利用

放射線殺菌は、他の殺菌技術を比較すると、表1のように、精油成分、色素、タンパク質に及ぼす影響が小さいが、デンプンの損傷や脂質の酸化のような品質劣化が起こるので、必ずしもすべての食品に適用できるものではない。すなわち、殺菌に必要な線量のガンマ線や高エネルギー電子線を照射すると、好ましくない変化が食品に生じることがある。たとえば、小麦を放射線殺菌すれば、デンプンが低分子化してテクスチャーが大きく影響されるのでうどんの原料とはなりえない。また、米も放射線を照射するとデンプンの損傷に伴うテクスチャーの変化や油脂の酸化が問題となる。ところで、穀物、香辛料、豆などの食品を汚染している微生物はこれらの食品

表1 ■ 殺菌技術の比較

	EOG	放射線照射	過熱水蒸気	乾熱
殺菌効果	△	○	△	×
タンパク質	△	○	△	×
多糖類	○	×	○△	△
脂質酸化	×	×	?	×
精油	△	○	△	×
フレーバー	△	○	△	×
色調	△	○	△	×
法律	禁止	禁止	許可	許可

EOG：エチレンオキシドガス殺菌。○：品質などへの悪影響なし。△：品質などへの影響は少しあるが、商品価値に影響しない。×：品質などへの影響があり、商品価値に影響する。××：品質への影響が大きく、商品価値はまったくない。

*単位時間当たりの放射線量

の表層部に付着しており、食品表面のみを殺菌すれば、品質変化を起こさずに、病原菌や腐敗菌を除去することができる。このような表面のみの殺菌を可能にするのが低エネルギーの電子の利用である。このような低エネルギーの電子を「ソフトエレクトロン」と呼び、このような電子を利用した殺菌を「ソフトエレクトロン殺菌」と呼ぶ^(5,6)。

玄米や小麦はエネルギーが180 keVのソフトエレクトロン、玄米や殻付のソバはエネルギーが225 keVのソフトエレクトロンでそれぞれ殺菌することができる^(5,6)。また、黒コショウをはじめ白コショウ、コリアンダー、バジルも300 keV以下のエネルギーのソフトエレクトロ

図3 ■ カイワレダイコン種子に対するソフトエレクトロンの殺菌効果
普通寒天培地で30℃、2日間培養すると、無処理の試料では微生物のコロニーが観察されるが、処理した試料は正常に発芽・発根し、微生物のコロニーは観察されない。

ンで数分間処理すると減菌できる。さらに、ターメリックフィンガーの殺菌も500 keVのエネルギーのソフトエレクトロンを用いれば可能である。穀物は電子線や滅菌に必要な10 kGyのガンマ線が当たるとデンプンが切断されて、粘度の著しい低下をひき起こす。しかし、ソフトエレクトロンで処理しても穀物の粘度はほとんど低下しない。つまり、ソフトエレクトロンは食品の表面しか当たらないので、穀物の表層部のデンプンしか照射されておらず、実質的にはデンプンは分解されていないのである。ソフトエレクトロンで殺菌した大豆を用いると、無処理の大豆を用いたものとまったく同じ品質の無菌の豆腐をつくることができる。また、ソフトエレクトロンは発芽力に影響を及ぼすことなく、種子を殺菌することもできる(図3)。ソフトエレクトロンは穀物の殺虫にも利用でき、マイルドな薬剤処理との併用により、穀物の

図4 ■ コクゾウムシを接種した玄米に対する殺虫効果
リン化水素燻蒸やソフトエレクトロン照射の単独処理では完全に殺虫できないが、2つの処理を組み合わせると完全に殺虫できる。組み合わせ処理では、出現した成虫は摂食力がなく、出現後まもなく死滅した。

表2 ■ 国際的に認知されている照射食品検知の標準法

方法	分析対象食品	ヨーロッパ標準法としての採択年	Codex 標準分析法としての採択年
ガスクロマトグラフによる炭化水素測定	鶏肉 (0.5), 豚肉 (0.5), 牛肉 (0.5), アボガド (0.3), マンゴー (0.3), パパイア (0.3), カマンベールチーズ (0.5)	1996 2003改定	2001
2-アルキルシクロブタノン類の分析	鶏肉 (0.5), 豚肉 (1), 液体全卵 (1), カマンベールチーズ (1), サケ (1)	1996 2003改定	2001
骨の電子スピン共鳴 (ESR) 測定	鶏肉 (0.5), 肉 (0.5), 魚 (マス) (0.5), カエルの足 (0.5)	1996	2001
セルロースの ESR 測定	パプリカ粉末 (5), ピスタチオナッツの殻 (2), イチゴ (1.5)	1996 2000改定	2001
ケイ酸塩無機物の熱ルミネッセンス測定 (TL)	ハーブ・スパイス類 (6), エビ (1), 貝類一般 (0.5), 生鮮 (1) および乾燥野菜果物 (8), バレイショ (0.05)	1996 2001改定	2001 2003
糖結晶の ESR 測定	乾燥パパイア (3), 乾燥マンゴー (3), 乾燥イチジク (3)	2001	2003
光励起ルミネッセンス (PSL)	ハーブ・スパイス類 (10), 貝類 (0.5)	2002	2003
直接フィルター蛍光観察/プレート法による微生物測定 (スクリーニング)	ハーブ・スパイス類 (5)	2001	2003
DNA コメットアッセイ (スクリーニング)	鶏肉 (1), 豚肉 (1), 植物細胞 (1)	2001	2003
LAL/GNB 法 (スクリーニング)	鶏肉	2004	—

括弧内の数字は検出限界線量 (kGy)

品質劣化を起こすことなく完璧に殺虫できる（図4）⁽¹⁴⁾。このように、ソフトエレクトロンは、ガンマ線や電子線（高エネルギー）によりひき起こされる品質劣化を抑制し、殺菌、殺虫などを可能とする技術である。また、可食部に電子が当たらない（到達しない）ために、食品の安全性についても懸念がない。

照射食品の検知

わが国も参加し筆者がコーディネータを務めたFAO/IAEAの照射食品検知のための国際研究プロジェクト（1990～1994）において、電子スピン共鳴（ESR）法、熱ルミネッセンス（TL）法、化学的方法（炭化水素法など）、その他の物理学的方法（粘度測定など）、生物学的方法（微生物計測など）など、多様な検知技術の開発が進められた。EUでの研究プロジェクト（1990～1993）でも同様に多くの方法が検討され、有望な方法はプロトコルを作成してその妥当性確認試験が実施された。これらの成果に基づき、ヨーロッパ標準委員会（CEN）は1996年以降、10種類の分析方法を標準分析法として採択している。また、コーデックス委員会は、化学分析法（2-アルキルシクロブタノン法、炭化水素法）、TL法および光励起発光（PSL）法、骨含有食品、セルロース含有食品、結晶糖含有食品を対象としたESR法3種、DNAコメットアッセイ法、DEFT/APC法（総菌数と生菌数の比を指標とする方法）の9分析法をコーデックス標準分析法として採択している（表2）⁽¹⁵⁾。

照射食品の検知技術は適切な表示を実施させるためのもので、照射の有無を正確に判断することが役割であり、線量推定をする必要はない。照射食品が正確に表示されれば、その履歴などは、トレーサビリティ（照射・流通の記録の記帳と保存により照射施設や線量がわかるようにすること）のシステムを確立することによって、知ることができる。国際的な協力で照射食品の検知技術が確立されたことにより、きちんとした照射食品の管理が可能となっている。

おわりに

食品照射は食品に放射線を照射するという単純な技術である。ここに紹介したように、ガンマ線と電子線の特徴を使い分けることにより、多様な活用が可能である。照射食品の安全性については、1980年に国際的な安全性に関する見解が出された以降も、新たな疑問に答えるべき検討がなされている。食品照射の管理に不可欠な照射食品の検知技術も確立されており、約30カ国で約40万トンの食品が照射されている。しかし、わが国では1974年に士幌町で馬鈴薯の照射が実用化されて以来、まったく進展がなく、現在数千トンの馬鈴薯が発芽抑制目的に照射されているのみである。食品照射は放射線というマイナスイメージがつきまとい、今回の原発事故の影響でさらに食品照射への逆風は強くなるものと思う。遺伝子操作と同様、科学的な議論だけでは進展しないのが、食品照射の宿命である。

文献

- 1) 林 徹：臨床栄養，**118**, 836 (2011)。
- 2) 世界保健機関，国連食糧農業機関：“食品照射”，林 徹訳，光琳，1989。
- 3) 世界保健機関：“照射食品の安全性と栄養適性”，コープ出版，1996。
- 4) T. Hayashi: “Food Irradiation”, ed. by S. Thorne, Elsevier Sci. Pub., 1991, p. 169。
- 5) T. Hayashi: *Food Sci. Technol. Int.*, **4**, 114 (1998)。
- 6) 林 徹：日食科工，**49**, 559 (2002)。
- 7) T. Hayashi, S. Todoriki, Y. Takizawa & M. Furuta: *Radiat. Phys. Chem.*, **40**, 593 (1992)。
- 8) T. Hayashi, S. Todoriki & M. Furuta: *Radiat. Phys. Chem.*, **43**, 613 (1994)。
- 9) S. Todoriki & T. Hayashi: *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **58**, 737 (1994)。
- 10) T. Hayashi, Y. Takizawa, S. Todoriki, T. Suzuki & K. Takama: *Radiat. Res.*, **137**, 186 (1994)。
- 11) K. Tanabe, T. Dohino & T. Hayashi: *Res. Bull. Pl. Prot. Jpn.*, **30**, 69 (1994)。
- 12) 林 徹，マムン，等々力節子：食総研報，**57**, 1 (1993)。
- 13) T. Hayashi, R. Biagio, M. Saito, S. Todoriki & M. Tajima: *J. Food Sci.*, **56**, 168 (1990)。
- 14) T. Imamura, S. Todoriki, A. Miyanoishita, A. K. Horigane, M. Yoshidaa & T. Hayashi: *Radiat. Phys. Chem.*, **78**, 627 (2009)。
- 15) 等々力節子：食品照射，**40**, 49 (2005)。