

食品照射：放射線による食品や農作物の 殺菌・殺虫・芽止め技術

日本原子力研究開発機構 小林泰彦
菊地正博

Food irradiation can have a number of beneficial effects, including prevention of sprouting; control of insects, parasites, pathogenic and spoilage bacteria, moulds and yeasts; and sterilization, which enables commodities to be stored for long periods. It is most unlikely that all these potential applications will prove commercially acceptable; the extent to which such acceptance is eventually achieved will be determined by practical and economic considerations. A review of the available scientific literature indicates that food irradiation is a thoroughly tested food technology. Safety studies have so far shown no deleterious effects. Irradiation will help to ensure a safer and more plentiful food supply by extending shelf-life and by inactivating pests and pathogens. As long as requirements for good manufacturing practice are implemented, food irradiation is safe and effective. Possible risks of food irradiation are not basically different from those resulting from misuse of other processing methods, such as canning, freezing and pasteurization.

Key words: food irradiation, irradiated food, disinfection, disinfestation, sprouting inhibition, shelf-life extension

1. はじめに

食品照射とは、食品や農産物に放射線を照射して殺菌、殺虫、芽止めなどを行う技術であり、乾燥、加熱、加圧、冷凍などと同じく物理的な食品処理技術の一つ

である。その目的は、1) 食糧・農産物の保存と貯蔵中の損耗防止、2) 食品の衛生確保と食中毒防止、3) 農産物の植物検疫（病害虫の侵入防止）などである¹⁾。

これらの目的を達成するための技術としての食品照射の有用性と、放射線照射された食品や農産物の食品としての健全性（安全性＋栄養適性）が、1980年代以降に各国の研究機関と世界保健機関（WHO）などによって確かめられ¹⁾、世界各国で実用化されている（表1）。近年はアジア地域での進展が著しい^{2)~5)}。

表1 世界における食品照射の処理量（2005年）⁵⁾

国	照射食品	処理量 (トン)
1 中国	ニンニク, 香辛料等	146,000
2 米国	冷凍肉, 果実, 香辛料	92,000
3 ウクライナ	小麦, 大麦	70,000
4 ブラジル	香辛料, 果実等	23,000
5 南アフリカ	香辛料, 蜂蜜, その他	18,185
6 ベトナム	冷凍エビ・魚介類等	14,200
7 日本	ジャガイモ	8,096
8 ベルギー	カエル脚, 鶏肉等	7,279
9 韓国	香辛料, 乾燥野菜	5,394
10 インドネシア	冷凍エビ, ココア粉末等	4,011
11 オランダ	香辛料・ハーブ, 鶏肉等	3,299
12 フランス	鶏肉, カエル脚, 香辛料	3,111
13 タイ	香辛料, 醗酵ソーセージ	3,000
14 インド	香辛料, 玉葱	1,600
15 カナダ	香辛料	1,400
16 イスラエル	香辛料	1,300
その他		2,929
合計		404,804

*引用文献（未公開資料）のデータをもとに作成

しかし我が国では、世界に先駆けて1974年からコバルト60 (Co-60) のγ線照射によるジャガイモの芽止めが実用化されたにもかかわらず、それ以降は他の食品に応用が広がることはなく、今なおジャガイモの芽止めを除いて食品照射は法的に禁止され、諸外国で多く実用化されている香辛料の照射殺菌も禁止され

Food Irradiation
Yasuhiko KOBAYASHI, Masahiro KIKUCHI (*Microbeam Radiation Biology Group, Quantum Beam Science Directorate, Japan Atomic Energy Agency*)
〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233
日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門（高崎）
TEL: 027-346-9511, FAX: 027-346-9688
E-mail: kobayashi.yasuhiko@jaea.go.jp

たままである。食品照射に関して、日本がこのように鎖国状態となってしまった理由の一つは、リスク管理機関・リスク評価機関、研究者、事業者、一般市民の間でのリスクコミュニケーションの不足にあると考えられる。ほとんどの人は、実際の照射食品を見る機会がなく、照射の現場も知らない。その結果、一部の市民団体やマスメディアの放射線に対するネガティブなイメージや先入観に支配された感情論ばかりが幅を利かせているように筆者には思えてならない。本稿では、放射線殺菌（及び殺虫、芽止め）の原理、食品や農作物への応用の現状、リスクとベネフィット、照射食品の検知法と各国での運用法など、論点と最新情報を整理して提供し、科学的な根拠に基づいた冷静な議論を進めるための一助としたい。

2. 食品照射の原理

食品や農産物の放射線殺菌は、放射線の透過力と、食品を汚染する微生物が放射線に弱いことを利用している。殺菌よりも低い線量では、殺虫や不妊化、芽止めができる。

2.1 標的は DNA

生物体の中でもっとも放射線の影響を受けやすいターゲットは遺伝情報を担う記録媒体としての DNA 分子である。自然界でも常に生じている DNA 損傷が、人為的な放射線照射によって一気に大量に起きると細胞の分裂増殖が阻害される。その効果は、照射によって生じた DNA 損傷の質と量、およびその細胞の DNA 修復能の両方に左右される。

放射線は物体を透過しながら確率的にごく一部の原子・分子にだけ作用するため、全体の温度をほとんど上げることなく十分な殺菌効果が得られる。このような非加熱殺菌は、熱に弱いプラスチック製の医療器具や食品包装容器、加熱によって変性・失活するおそれのある医薬品や生薬などと同様に、生鮮青果物や食肉魚介類、冷凍食品にも適用できる。

殺菌線量に相当する 10 kGy の γ 線照射による温度の上昇は、水の場合、たかだか 2.4℃に過ぎない。そのため冷凍食品でも、そのまま殺菌できる。逆に、熱いお茶をひと口飲んだときに受け取るわずかな熱エネルギーが、仮に γ 線の全身急照射の形で与えられたら、ヒトの致死線量の数倍にも相当することになる！

2.2 なぜ生物は放射線に弱いのか？

生物がこのように放射線に弱い理由は、遺伝情報を記録する媒体として DNA を採用したことにある。ヒトの細胞の核に格納されている 46本の染色体 DNA を 1本に引き延ばすと長さは約 2 m になる。このような超巨大分子 DNA は、その化学構造によって遺伝情報を記録するものであり、細胞分裂のたびに DNA 分子全体の正確な複製が不可欠である。

同じ強度（光子数）の γ 線を浴びせた時の吸収線量は、物体中の電子数に比例し、どの電子が電離される

かはランダムに決まる。したがって、1個の DNA 分子（全電子数を仮に 10 億個とする）でも、1億個の水分子（1分子の H_2O が電子を 10 個持つので全体の電子数は計 10 億個）でも、イオン化エネルギーが同等であれば、同じ吸収線量ではそれぞれ同じ数の電子が弾き飛ばされる⁶⁾。

ある線量の照射の結果、仮に 1,000ヶ所の化学結合が切れたとすると、1個の DNA 分子の 1,000ヶ所が一気に切断すると影響は大きいであろう。しかし 1億個もある水分子の集団の中の 1,000分子が分解したとしても、その割合はごくわずかである。分子量 18の水分子を、分子量 1万や 10万の蛋白質に置き換えても、この状況は変わらない。ある酵素蛋白質分子の細胞内プールの中の一部が化学的な変化で機能を失っても、おそらく影響は小さく、すぐに回復できる。変性した蛋白質や不要となった蛋白質は速やかに分解される。必要な蛋白質の数が不足してきたら、速やかに新たに合成される。しかし、遺伝情報を記録する 1本の DNA 分子に生じた多数の鎖切断は、速やかに正確に修復されない限り、細胞にとって致命的となる⁶⁾。

2.3 放射線の致死効果と DNA 修復

地球上の生物圏は、宇宙のなかでも最も放射線が少ない場所であるが、それでも自然放射線は絶えず DNA を傷つけ、生命を脅かしている。また、好氣的呼吸の獲得によって効率的なエネルギー産生が可能になったが、本来、酸素は極めて毒性が高く危険な化学物質であり、DNA 分子は絶えずその攻撃にさらされている。だからこそ、地球上で進化してきた生物は、自然放射線や、酸素呼吸に伴う活性酸素種などによって、絶え間なく生じる DNA の傷を、易々と治してしまう能力（DNA 修復能）を獲得してきた。実際、DNA は、細胞内の生体高分子がどれも代謝回転で使い捨てにされる中で唯一、起きてしまった化学変化を何とか元に戻そうと、様々な手段で「修復」される分子なのである。

放射線殺菌の効果は、対象となる微生物の放射線耐性の裏返しであり、温度や酸素分圧、水分活性、線量率など放射線化学的な条件に依存して変わる DNA 損傷の生成効率と、その微生物の DNA 修復能に左右される。その修復能も、本来の能力がどの程度発揮できるかは照射後の食品が置かれた環境条件に依存する。実際の食品への照射では、成分や照射条件によって殺菌効果が変動するが、その原因は基本的に DNA 損傷の収率と修復能に基づいて説明できる。

後述する照射食品検知法の一つに、食品に含まれる動植物細胞内の DNA 損傷を定量する方法があるが、照射後の食品が「生きていて」、しかも DNA 修復能を発揮するのに好都合な条件に置かれていた場合、時間の経過とともに照射の痕跡が消失してしまう。

放射線の急照射に対する種々の生物の致死線量を比較すると、哺乳動物の数 Gy から、放射線抵抗性細菌の数 kGy まで、非常に幅広いが、ごく大雑把に見ると

細胞当たりの DNA 含量が多いものほど感受性が高い傾向がある。致命的な DNA 損傷の G 値が等しく、その DNA 損傷の修復能も同程度であれば、めくら撃ちをした時には「的」が大きいほど倒し易いということであろう。

3. 食品照射の目的と実用化例

食品照射は、放射線照射によって、1) 食糧・農産物の保存と貯蔵中の損耗防止、2) 食品の衛生確保と食中毒防止、3) 農産物の植物検疫処理（病害虫の侵入防止）を達成するための技術であるが、目的によって必要な線量が大きく異なる。

3.1 芽止め（萌芽抑制）：20～150 Gy

ジャガイモやニンニクの芽のもとになる部分は他の一般組織よりも放射線に感受性が高い。そのため、収穫後の適当な時期に適当な線量を照射すると、その部分の細胞分裂だけが阻害される。その結果、ジャガイモやニンニクを新鮮な状態で保存しつつ芽止めが可能となる。芽止めに必要な線量は、ジャガイモの場合は60～150 Gy、タマネギやニンニクでは20～150 Gyである⁷⁾。

日本では、食品衛生法によって食品への放射線照射が禁止されている中で、ジャガイモへの芽止め照射だけが許可されている。国内では唯一、北海道士幌町農業協同組合で、1974年の春以来、専用の Co-60 γ 線照射施設（図1）を用いて、照射芽止めジャガイモを3月から5月の端境期に出荷している。その量は、2007年産では約4千トン、これは士幌町農協の同年の生食用ジャガイモ出荷量約4万2千トンの10%、全国のジャガイモ出荷量約240万トンの約0.17%にあたる。

芽止めジャガイモの出荷量は、2005年産までは約7千トン～8千トンで推移していたが、2006年産から、照射に関する店頭での表示販売（図2）を確約した販売先に限定して出荷することとしたため、一時は3千トン台に落ち込んだ。しかし、消費者の声としては、「害はないのか」といった問い合わせもある一方で、「おいしかった」「芽止めされていてよい」「小さなコロッケ屋をやっているがこの時期に芽が出ないジャガイモはありがたい」といった感想も聞かれ、店頭での表示が定着し、高品質で芽が出ないメリットが消費者にも伝わっていることが伺えた。芽止めジャガイモを売りたいと言う新規の量販店も現れ、2007年産では4,112トン、2008年産では約4,500トンと順調に回復してきている⁸⁾。

一方、国内でニンニクの芽止めに使われていた農薬（植物生長調整剤）マレイン酸ヒドラジドが、不純物として含まれるヒドラジンの発がん性の問題で急に2002年から使用できなくなり、青森県などのニンニク産地では大変な苦勞を強いられた。現在は、出荷直前まで低温貯蔵することで凌いでいるが、出荷後の流通

から店頭までの過程で常温に戻るとすぐに発芽してしまう。中国では2005年には約8万トンのニンニクが照射芽止めされており²⁾⁻⁵⁾、日本でもニンニクの照射芽止めが許可され、実用化されることが期待される。

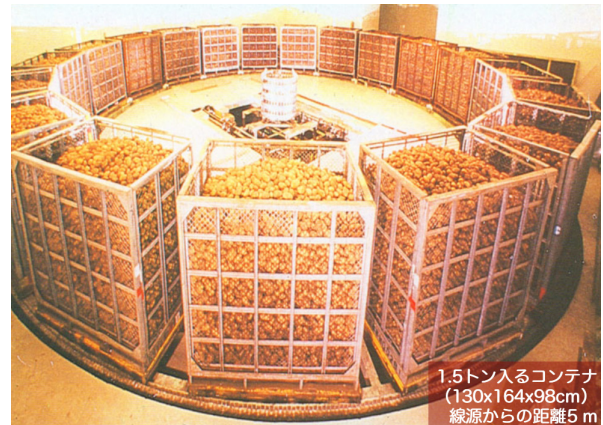


図1 北海道士幌町農協の Co-60 γ 線照射施設



図2 「芽止めじゃが」「ガンマ線照射済み」と印刷された小袋用シールを貼って販売

3.2 殺虫・不妊化：0.1～1 kGy

穀類や青果物の害虫を駆除あるいは不妊化させることによって、保存中のゾウムシ類（コクゾウムシなど）やダニなどの繁殖による食害の防止や、ミバエ類などの検疫害虫の国内への侵入防止（農作物の植物検疫）ができる。そのためには、必ずしも即死させる必要はなく、繁殖を阻止（不妊化）できればよい。食害防止についても、紛れ込んだ成虫の寿命はそう長くはないので、産みつけられた卵の孵化や幼虫の羽化を阻止できればよい。即死させるためには3～5 kGy必要であるが、不妊化であれば放射線感受性の高い生殖細胞だけが不活性化されればよいので1 kGy以下で十分である⁹⁾。

ゾウムシ類によるコメなどの穀類の食害には、齧られた傷からのカビの発生が伴うため、照射による食害防止はカビの発生防止とカビ毒産生の防止、すなわち

アフラトキシンなどのカビ毒による汚染の防止にも役立つ。

従来これらの害虫の防除には臭化メチルが使用されてきた。しかし、臭化メチルはオゾン層破壊物質としてモントリオール議定書により国際的に使用が制限されることになった。国内で未発生の害虫を対象とする植物検疫処理には引き続き使用できるが、すでに国内に存在する害虫の駆除には、どうしても代替法が見つからない場合を除いて、原則的に使用が認められなくなった。

輸入穀類の殺虫には、臭化メチルの代わりにリン化水素燻蒸（リン化アルミニウム剤燻蒸）が行われているが、耐性虫の発生は時間の問題と懸念されている。

輸入青果物の殺虫には、リン化水素燻蒸の他に、

- ・低温処理：-0.6～3℃前後で12～20日間
- ・蒸熱処理：43～50℃の飽和水蒸気で10～50分間
- ・温湯浸漬処理：46℃程度の温湯に10分前後浸漬
- ・乾熱処理：80℃前後の乾燥空気です1時間程度

などが用いられているが、これらの処理は、いずれも品質を低下させる。

近年、品質を保ったまま殺虫が可能な放射線処理を、通常の害虫駆除の手段としてだけでなく、国際植物防疫条約の下で植物検疫の手段として認める動きが活発になってきた。すでに、メキシコミバエの羽化防止には70 Gy以上、などの国際基準が定められ、インドや東南アジア、ハワイなどから米国本土に持ち込まれるマンゴーやパパイヤなどの放射線照射による検疫処理が実用化されている（図3）。

3.3 殺菌・滅菌：1～50 kGy

放射線殺菌は、目的によって下記に分類される。

- 1) 日持ち向上のための菌数低減化
- 2) 食中毒菌の殺滅を目的とした消毒殺菌

- 3) 医療器具や医薬品、病人食、無菌実験動物用飼料などの滅菌（完全殺菌、無菌化）

肉類や生鮮魚介類およびその加工食品の腐敗菌は、1～3 kGyの照射で菌数が著しく低減し、10℃以下の低温貯蔵と組み合わせることで、非照射品と比べて貯蔵期間を2倍から数倍に延長できる。実際の食品中で、サルモネラなどの病原性細菌を完全に殺菌するのに必要な線量は、0℃から室温では2～4 kGy、-20℃以下の凍結下では3～7 kGyである。なかでも腸管出血性大腸菌 O157、カンピロバクター、腸炎ビブリオ菌などは、1 kGy で十分に殺菌が可能である⁷⁾。

それでも生き残っている微生物のうち、サイクロバクター、腐敗性酵母、乳酸菌群は、腐敗の原因になるものの病原性はなく増殖速度も遅い。セレウス菌やボツリヌス菌などの芽胞形成細菌は、10 kGy 以上照射しないと完全殺菌できないため、室温ではこれらの病原性のある芽胞形成細菌が増殖するおそれがあるが、3 kGy 程度の照射と低温貯蔵との組合せによって食中毒防止が可能と考えられる。一方、食中毒を起こすノロウイルスは、60～70℃で不活性化するが、放射線には抵抗性が高く、不活性化するには10 kGy 以上が必要と考えられる⁷⁾。

これらの知見を踏まえ、フランスやベルギーでは冷凍エビや冷凍カエルの脚の照射殺菌が、米国では腸管出血性大腸菌 O157 による食中毒防止のための冷凍牛挽肉（ビーフバーガーパテ）の照射殺菌と、サルモネラによる食中毒防止のための冷凍食鳥肉（鶏、七面鳥）の照射殺菌が実用化されている^{2)~5)}。冷凍エビや冷凍・乾燥魚介類の照射殺菌はインドネシア、タイ、ベトナムでも実用化されている^{2)~5)}。（図4）

世界的に最も照射による殺菌処理が普及し、国際貿易で広く流通しているのは、図5に示すように香辛料（スパイス・ハーブ類）と乾燥野菜である^{2)~5)}。天然



図3 米国における検疫処理のための熱帯果実の照射



図4 外国で売られていた照射食品。左上から時計回りに、冷凍ビーフバーガーパテ（米国）、粉末パプリカ（タイ）、醗酵ソーセージ（タイ）、甘辛味付き干し魚（タイ）、マンゴーのドライフルーツ（タイ）、黒胡椒など（南アフリカ）

の香辛料は微生物汚染が著しいものが多く、1 g 当たり $10^4 \sim 10^8$ 個の菌が検出される。その多くは、耐熱性の芽胞を形成する枯草菌やバチルス・プミルスなどの腐敗菌であり、病原性の芽胞形成細菌であるセレウス菌やボツリヌス菌も検出される⁷⁾。これらの香辛料が殺菌されていなくても、厨房や食卓で少量を料理に使うだけならば食中毒の心配はあまりないが、加工食品の原料に加えた場合や、未殺菌の香辛料を添加した食品を加熱調理後に保存した場合に、耐熱性芽胞として含まれていた病原菌が繁殖して食中毒を引き起こすことがある。そのため、我が国の食品衛生法でも、加工食品に用いる香辛料類は1 g 当たりの菌数を 10^3 個以下とするように基準が定められている。

問題となる芽胞形成細菌は耐熱性で、 100°C の調理ではほとんど死滅しないため、日本では過熱乾燥水蒸気を用いた高温気流式殺菌処理 ($140 \sim 180^\circ\text{C}$, 2~5 秒) が行われているが、高温に曝されることで香辛料の命というべき香りや色調が劣化してしまう。ところが、放射線では、7~10 kGy の照射で、香りや色調を劣化させることなく同等の殺菌処理が可能である。このため、香辛料の照射殺菌は世界の趨勢であり、今後増大していくと思われる。世界の食品照射許可国 57 ヵ国の中で、香辛料の照射殺菌を許可していないのは日本とウルグアイだけである。

4. 食品照射のメリットとデメリット

放射線による殺菌・殺虫、芽止め処理は、加熱殺菌や薬剤による殺菌など他の技術との比較において、次のようなメリットがある。

4.1 放射線処理法のメリット

- 1) 非加熱で殺菌・殺虫が可能であるため、生鮮青果物や食肉・魚介類を冷蔵や冷凍の状態で処理でき、色や香りの劣化、栄養素の損耗も少ない。
- 2) 発がん性が疑われるエチレンオキシドガスやオゾン層破壊物質である臭化メチルによる燻蒸処理と異なり、食品中の残留毒性や環境汚染の心配が無い。
- 3) 放射線の透過力が大きいため、効率的で確実な処理が可能であり、形状を問わず内部まで均一に殺菌できる。特に、均一な加熱処理が困難な粉体の殺菌に有効である。また、密封包装した状態で梱包後に殺菌処理でき、使用時に開封するまで清潔な状態が保たれるメリットも大きい。一方、食品に対する放射線処理のデメリットには、次のようなものがある。

4.2 放射線処理法のデメリット

- 1) コストが高い。芽止め照射では、約 2~3 円/kg とされるが、照射コストは線量に比例するため、殺菌線量ではその 10~100 倍になる。
- 2) 肉類や乳製品への高線量照射による異臭の発生や色調の変化、小麦粉の粘度低下など、食材や照射条件によっては風味や加工適性が変わることがある。水溶性のビタミン B₁ やビタミン C など特定の栄養素の損失が、加熱処理と同程度以下ではあるが、ありうる。
- 3) 消費者に誤解され敬遠されるおそれがある。食品メーカーや流通・小売、飲食店などは、マスコミ報道による企業イメージの低下や風評被害の発生、食品照射に反対する団体によるボイコット運動や個人攻撃などのリスクを負う。

すなわち、加熱や冷凍、缶詰、レトルトパウチ、農薬や食品添加物など、既存の食品加工技術、食品衛生化技術の全てを照射で代替できる訳ではなく、商品価値が高くメリットが大きい場合や、他に適当な方法がない場合に限って、照射が使われる。言い換えると、すでに世界各国で実用化されている食品照射の対象品目は、様々なデメリットを克服して社会にその価値を示すことができた希少な成功例だと言えるかもしれない。

5. 照射食品のリスクと安全性

照射食品の潜在的な危害要因としては、1) 毒性 (慢性毒性、発がん性、催奇形性を含む) 物質の生成、2) 誘導放射線の生成、3) 生残菌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、などが考えられる。その他に、食品安全上の問題ではないが、特定の栄養素の損耗など食品としての品質低下や、照射施設における事故のおそれなども一部の人たちからは問題視されている。

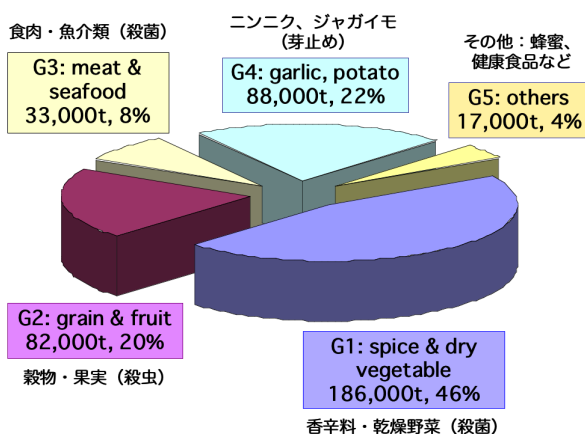


図5 世界の食品照射処理量・品目別 (2005年)^{2)~5)}

5.1 食品照射は十分に検証された食品処理技術

しかし、これらの懸念について、長年にわたり国内外で膨大な研究が行われてきたが、照射食品を摂取することによる悪影響を示唆する証拠は一つもなかった。すなわち、1) 動物飼育実験などで急性毒性、慢性毒性、発がん性、変異原性、遺伝毒性、催奇形性は見出されておらず、健康に有害な影響を及ぼすような食品成分の変化は生じない、2) 食品照射に用いる Co-60 の γ 線、10 MeV 以下の電子線、5 MeV 以下の X 線のエネルギーは核反応のしきい値以下であり、適正な照射条件では誘導放射能は生成されない、3) 生き残った微生物によるリスクは他の殺菌法と同じであり、照射で病原性や毒性が増大することはない、などの事実が明らかにされている^{1),9)~12)}。

ビタミンなどの栄養素の損耗も、加熱処理などとの比較において、特に問題とはならない。世界各国でのこれまでの研究を総括すると、1 kGy 以下の照射では栄養成分の低減はほとんど起こらない、1~10 kGy でも脱酸素下で照射すれば栄養成分の低減はほとんど問題にならない、ビタミン類の中では水溶性のビタミン B₁ やビタミン C が分解され易いが、加熱処理による分解と同程度か、むしろ少ない、などの事実が明らかにされている^{1),10)}。

言うまでもなく、無菌充填用食品容器や医療器具などの放射線滅菌は確立された技術であり、2006 年現在 Co-60 と電子線加速器を合わせて全国で 24 の産業用照射施設があり、滅菌医療機器の 2005 年の売上における放射線滅菌機器の割合は 45% に上る。

従って、食品の適正製造基準 (good manufacturing practice : GMP) に規定される必要条件が満たされている限り、照射食品は安全で効果的であり、GMP の無視に起因する照射食品のリスクは、本質的に、缶詰、冷凍、加熱殺菌などの他の処理方法の誤用によるリスクと変わらない。

5.2 国内での安全性評価

日本では、1967 年から 1983 年にかけて原子力特定総合研究として国を挙げて安全性試験を実施した。ジャガイモとタマネギ (芽止め)、米と麦 (殺虫)、ソーセージとカマボコ (殺菌)、温州みかん (防カビ) の 7 品目を選び、みかんは電子線で表面を照射、他は Co-60 の γ 線を照射し、マウスやラットに食べさせて以下の試験を行った結果、照射による影響はないとの結論が出された⁹⁾。

- ・慢性毒性試験：体重、死亡率、血液学的検査、病理組織学的検査
- ・世代試験：照射食品で飼育した動物を交配し、妊娠中と授乳期、離乳後の仔にも照射食品を投与、これを 3 世代繰り返す、催奇形性、遺伝的毒性を試験
- ・変異原性試験：細菌を用いた突然変異誘発試験、哺乳動物培養細胞とマウスを用いた染色体異常試験

これらの安全性試験の結果を受けて、1972 年に厚生省 (当時) はジャガイモに対する芽止め目的の照射を許可した。

さらに 1986 年から 1991 年にかけて、日本アイソトープ協会は約 15 の大学や国公立研究機関と食品照射研究委員会を組織して研究を実施。香辛料に 10 MeV の電子線を 30 kGy 照射しても誘導放射能は検出されない、蛋白質の消化性や免疫化学的性質は照射によって変化しない、照射ジャガイモのビタミン C 損失は非照射品と変わらない、香辛料を照射しても変異原性物質は生成しない、照射による有害微生物の変異誘発はないなど、誘導放射能、栄養学的変化、変異原性、微生物学的安全性に関して問題がないことを明らかにし、照射食品の健全性 (安全性 + 栄養適性) を確認した⁹⁾。

5.3 国際機関での安全性評価の経緯

世界保健機関 (WHO) と国連食糧農業機関 (FAO) は、食品を通じての病気の発生や、食糧資源の損失への対策として、食品照射技術に注目、1961 年に国際原子力機関 (IAEA) と協力して 3 機関の合同による専門家委員会を設立、1971 年に照射食品の安全性と栄養適性を評価する健全性試験を実施する国際プロジェクトを開始、1980 年まで米・英・仏・西独・日本など 24 カ国が参加して研究を実施した⁹⁾。

1970 年代以前の研究では、放射線による食品成分への影響が明らかでなかったため、食品添加物や医薬品などの化学物質の安全性評価と同様、100 倍量の照射食品をラットなどの実験動物に与える毒性試験が行われた。そのため、栄養バランスの乱れや、食品成分自体による動物への影響などの問題が生じ易かった。その結果を正しく判断するには、1) 体重の減少など問題となる現象に線量依存性が認められるか、2) 飼育期間を通じて一定の傾向が認められるか、3) 世代試験を通じて一定の傾向が認められるか、4) 他の要因による見せかけの異常ではないか、について考察する必要がある¹¹⁾。

上記の国際プロジェクトでも、当初は食品添加物と同じ 100 倍量投与の考え方が採用されたが、研究が進み、放射線による分解生成物の種類や量が明らかになってきたため、1976 年の FAO/IAEA/WHO 合同専門家委員会は「食品の放射線処理は加熱や冷凍処理と同じ物理的処理であり、食品添加物としての扱いは妥当でない」との見解を発表した。

1980 年、FAO/IAEA/WHO 合同専門家委員会は、国際プロジェクトの成果を総括して、「いかなる食品を 10 kGy 以下の総平均線量で照射しても、毒性学的、栄養学および微生物学的に全く問題はない。今後は 10 kGy 以下で照射した個々の食品の健全性試験は不要である」と結論した。

1983 年には、国連機関の FAO と WHO が合同で設置した国際食品規格委員会 (コーデックス委員会 ; Codex Alimentarius Commission) は、上記の FAO

／IAEA／WHO 合同専門家委員会の結論に基づき「照射食品に関する国際一般規格」および「食品照射の実施に関する国際規格」を採択し、加盟各国に受け入れを勧告した。

1992年、オーストラリア政府の要請に応え WHO は再び専門家会合を招集、1980年以降に米国食品医薬品局 (FDA) が実施した系統的な評価データを再評価するとともに、昔の疑念ある報告、例えば照射小麦を与えた栄養失調の子供のリンパ球にポリプロイド (一種の染色体異常) が増加したというインド栄養研究所の報告 (世界の約 20 件の追試で否定され、インド政府自らの調査でも否定され、米国、英国、カナダ政府も否定しているが、いまだに一部の人が照射食品に反対の根拠にしている報告) などを注意深く検討して反証し、改めて「10 kGy 以下の照射食品は健全である」と確認した¹⁾。注意すべきことは、ここで「10 kGy 以下」と制限を設けているのは、実用的にはそれで十分との考えからであり、決して、10 kGy 以上の高線量で毒性が見られたなどというデータが確認されたからではないということである。

その後、病人食や特別な用途、香辛料の場合などを想定して 10 kGy 以上の高線量での評価が必要と考えられるようになり、改めて健全性の評価を実施、1997年に WHO の専門家会合は、10 kGy 以上でも問題はないとして、線量の制限を撤廃するように勧告¹¹⁾し、今日に至る。

5.4 2-アルキルシクロブタノンは危険か？

2-アルキルシクロブタノン類は、1972年に中性脂肪の放射線分解生成物として報告され、照射食品を検知するためのマーカー候補として検討された結果、1993年、照射によって特異的に生成すると報告された。

1998年、2-アルキルシクロブタノン類の一つで、牛肉中の脂質の 20～25%を占める主要な脂肪酸であるパルミチン酸から生成する 2-ドデシルシクロブタノン (2-dDCB) をラットおよびヒトの培養細胞に 5.2 mM という高濃度で加えたところ、コメットアッセイ法 (単細胞電気泳動法) で DNA 切断が観察され、弱い変異原性の可能性が疑われた¹³⁾。そこで 1999～2001年にドイツとフランスの合同チームで追試し、エームス試験などによる復帰突然変異試験ではすべて陰性で変異原性はなく、ラットを用いた飼育実験で発がん性もないことが確かめられたが、発がん物質を同時に投与した場合にその発がん性を促進する可能性が見出された¹⁴⁾。このときのラットへの投与量は、体重 60 kg の人間が米国の照射ビーフバーガーパテ (125 g 中に約 6.0 μg の 2-dDCB を含む) を毎日 4.8 トン (!) 食べ続けた場合の摂取量に相当する。

その後、2006年の報告では、高濃度 (しかし上記の 1998年の実験の 5.2 mM の約 100分の1の、53 μM) の 2-dDCB を培養細胞に作用させた場合、その前駆体

であるパルミチン酸と同程度の弱い (ゼロ濃度の場合の 2～3 倍の) DNA 損傷作用があることがコメットアッセイ法と小核 (一種の染色体異常) 生成試験で確認された¹⁵⁾。しかし、ビーフバーガーパテ中に桁違いに大量に含まれているパルミチン酸のリスクに比べ、照射で生成するが量的にはごくわずかしかな含まれない 2-dDCB によるリスクをことさらに気にするのは無意味であると結論された。ちなみに、この実験で、対照区との有意差が認められた 2-dDCB の最小濃度は、体重 60 kg の人間が米国の照射ビーフバーガーパテを 15.8 トン (!) 食べたときの摂取量に相当する。

すなわち、実際の照射食品中での「2-アルキルシクロブタノン類」の生成量 (脂質含有量と線量で決まる) は極めて微量であり、しかも未照射の食品中に大量に含まれる栄養成分と同程度の「毒性」しかなく、過去の動物実験：59 kGy 照射した冷凍鶏肉による長期の動物 (マウス、ラット、ハムスター、ウサギ、ビーグル犬) 飼育試験でも発がんなどの異常は認められなかった¹⁰⁾ことから、問題視する必要はないというのが現時点での結論である。

6. 照射食品の検知法

照射食品では、本来、農薬や添加物による処理と異なり食品中に残留する化学物質がなく、照射によって食品に生じる変化も加熱処理などと差がないため、照射の有無の検知は比較的困難であるが、いくつかの実用的な方法が確立されている¹⁶⁾。

6.1 照射食品検知法の原理

食品への照射の有無を検知する原理は、以下の 3 つに大別できる。

- 1) 物理的検知法：食品中のセルロース、骨、結晶性糖質などにトラップされたラジカルや、香辛料などの食品に付着・混入している砂埃のような無機物に蓄積されたエネルギーを、電子スピン共鳴 (ESR) 法、熱ルミネッセンス (TL) 法、光刺激ルミネッセンス (PSL) 法などで検出。
- 2) 化学的検知法：食品中に含まれる脂質などから生じる放射線分解生成物 (炭化水素や 2-アルキルシクロブタノン類) をガスクロマトグラフィー・質量分析 (GC/MS) 法などで検出。
- 3) 生物学的検知法：食品中に含まれる動植物細胞内の DNA 損傷量を、コメットアッセイ法 (単細胞電気泳動法) を用いて解析する方法、生菌数と死菌数の比や、その種類の比較観察 (放射線に弱い菌だけが不自然に減少していないかなど) によって照射の有無を推定する方法など。

6.2 国内外での検知法の位置付けの違い

1996年から2004年にかけてヨーロッパ標準法 (CEN 標準分析法) として採択・改訂された ESR 法、TL 法、PSL 法、GC/MS 法など 10 種類のうち、9 種

類が 2001～2003 年にコーデックス委員会の照射食品に関する国際規格における標準分析法（Codex 標準分析法）としても採択されている¹⁶⁾。

原子力機構の筆者の研究グループでも、酸化的 DNA 塩基損傷を化学発光 ELISA 法（酵素免疫測定法）で定量する照射食肉類の検知法¹⁷⁾や、ESR 法による照射生鮮果実の照射履歴線量推定法など、新しい検知法の開発を行っている。

しかし、米国食品医薬品局（FDA）は、基本的に照射食品は安全なものであり、その検知法は不要であるとしており、米国では公定検知法は導入されていない。WHO も、照射食品の検知法は、再照射の有無も含め、公衆衛生上の問題ではなく、産地や『有機食品』の偽装の検知などと同じく経済行為の問題、としている。

2007 年 7 月 6 日に日本で初めて公定法として定められた厚生労働省通知法（食安発第 0706002 号）¹⁸⁾は、TL 法に基づく検知法であるが、同じく TL 法に基づく CEN 標準分析法（EN1788）とは様々な点で異なる独自の評価基準を採り入れている¹⁹⁾。敢えて CEN 標準分析法と異なる分析手順や判定基準を指定したことに合理性がないとして検知法の専門家である研究者から疑問の声が相次ぎ、検疫所の担当者の負担も極めて大きく不評である。この通知法については、近々、修正、改善することが検討されているらしい。

EU 加盟国の多くは CEN 標準分析法を用いて市場食品のサーベイランスを行っており、例えば薬味（香辛料・乾燥野菜）を照射した韓国製即席麺などが違反として摘発されているが、その大半は、照射すること自体は許可されているのに照射食品である旨を正しく表示していなかった「表示違反」である。

ところが、我が国における照射食品のモニタリング検査は、照射食品は（芽止めジャガイモを除いて）安全性が確認されておらず許可しないという建前であるから、「輸入食品の安全をまもるために」食品衛生法違反として摘発するものである。

すなわち、食品の処理方法を正しく表示していないという表示違反の問題と、危険で有害な食品の流通を阻止するという食品安全の問題が混同されたまま、リスク管理機関による照射食品に関するリスクコミュニケーションが放棄されているのが我が国の実情である。

7. 国内外での最近の状況

2005 年現在、世界の 57 カ国で食品照射が許可されている。アンケートや実地調査に基づいた最新の推計²⁰⁻²²⁾では、世界全体での処理量は年間 40 万 5 千トン、経済規模は 1 兆 6,100 億円。処理量では、ニンニクの芽止め照射が多い中国が世界の 36%、金額では、高価な香辛料の殺菌照射が多い米国が世界の 53% を占める。中国をはじめとするアジア地域で増加が著しいが、EU 諸国では表示違反の取り締まり強化の影響で減少傾向にある。

日本で許可されている食品照射はジャガイモの芽止め照射のみであり、例えば照射殺菌したウコン（ターメリック）を生薬として用いる場合、所定の基準を満たせば OK だが、カレーに入れると食品衛生法違反となる。一方、食品・飲料容器の照射殺菌は許可されており、 γ 線や電子線照射が紫外線照射、熱風乾燥、高圧蒸気、過酸化水素水（浸漬・噴霧）、エチレンオキサイドガスなどと競合している。

先進諸国向けの国際貿易では香辛料の照射殺菌が一般的になっていることから、2000 年に全日本スパイス協会が香辛料の放射線殺菌の許可を要請²⁰⁾したが、厚生省（当時）は今に至るまで対応していない。

2006 年、内閣府原子力委員会は、食品照射専門部会報告書「食品への放射線照射について」²¹⁾を受け、原子力委員会決定（2006 年 10 月 3 日）により、文部科学省、厚生労働省、農林水産省等が、以下の取り組みを進める必要性を強調した²²⁾。

- 1) 食品安全行政の観点から、照射の妥当性を判断するための、食品衛生法及び食品安全基本法に基づく、有用性が認められる食品への放射線照射に関する検討・評価の実施
- 2) 照射食品の健全性についての科学的な情報の収集と研究開発の推進
- 3) 照射食品の表示のあり方についての検討
- 4) 行政検査に用いる公定検知法の確立と技術の高度化に向けた研究開発の推進、照射食品の監視・指導に係る対応の検討
- 5) 食品照射のみならず放射線利用全体に関する社会受容性の向上のための情報公開および広聴・広報活動の推進、放射線に関する基本的な知識に係る教育の充実

国のリスク評価機関である食品安全委員会は、2004 年 12 月 16 日の第 74 回委員会で、現在国内で流通している照射芽止めジャガイモについては、特別な問題がなく、あえてリスク評価をする必要をみとめない、それ以外の食品については、リスク管理機関（厚生労働省等）からの要請に基づいてリスク評価を開始する、との判断を示し^{23), 24)}、さらに 2007 年 3 月の第 182 回委員会で、食品への放射線照射に関する食品健康影響評価については、厚生労働省からの要請がないため、自らは評価を行わないが、引き続き情報収集に努めると決定した^{25), 26)}。

その一方、国のリスク管理機関である厚生労働省は、2007 年 7 月 6 日、香辛料を対象として放射線照射の有無についての輸入食品等モニタリング検査を開始し、厚生労働省通知法として定めた TL 法¹⁸⁾で検知された場合は食品衛生法第 11 条違反として措置すること（厚生労働省医薬食品局 食安輸発第 0706003 号「モニタリング検査の実施について（放射線照射食品）」）²⁷⁾とし、その後も検査対象を次々に広げ、ドイツから輸入されたパプリカ、中国からの乾燥シイタケや赤トウ

ガラス、米国やペルーからのマカ粉末などが摘発されている。2009年1月には、インドからフェアトレード事業として輸入された「インド・本格派マサラ」と「かんたんチャイ」がγ線照射殺菌されていたとして業者によって自主回収された²⁸⁾。

日本で、もしも今後、香辛料の照射殺菌が許可された場合は、その次は、ニンニクの芽止めや、臭化メチルによる燻蒸処理の代替法としての穀物や熱帯果実の殺菌(検疫処理)への適用が検討されると予想される。

8. おわりに

日本における食品照射のリスクコミュニケーションは成功しているとは言いがたい。その背景には、いわゆる放射線アレルギー、原子力アレルギーもあると思われる。ところが、国民の食の安全に責任を負う我が国のリスク管理機関は、食品照射という技術をどのように活かすかについて、国連機関や欧米各国の政府が真剣に検討を重ねてきた1980年代以降、何もしてこなかった。今も、全ては事業者の責任だと言わんばかりに、国民的コンセンサスが醸成されるのを座して待つのみである。現在、日本国内の消費者は、高品質で安全な照射食品を試しに買って食べてみたくても、その選択の自由すら与えられずにいる。日本の消費者は、そもそも照射食品が安全で高品質だということをほとんど知らされないまま放置されているようなものだ。この現状を、放射線の基礎と応用の専門家である読者の皆さんは、どのようにお考えになるだろうか。

19世紀の半ばにパスツールやコッホによって腐敗や醗酵、伝染病が微生物の仕業であることが明らかにされた後、1885年にはデンマークとスウェーデンでパスツールの低温殺菌法(pasteurization)による牛乳の殺菌が商業的規模で開始され、ニューヨークでも1890年頃には牛乳の殺菌が行われるようになった²⁹⁾。その後、アメリカでは1909年に、日本でも1933年に牛乳の加熱殺菌が法律で義務化されたが、その当ても、猛烈な反対運動があったという²⁹⁾。いわく、「殺菌は自然を損なうものである」「殺菌は汚い牛乳をごまかして売る方法だ」「殺菌によってビタミンCが破壊される、カルシウムなどのミネラル分が利用されなくなる」などなど…。今日、照射食品に反対する人たちの主張と、面白いように似通っている。加熱殺菌された牛乳が社会に受け容れられ、確固とした地位を築くまでに何十年もかかった。はたして照射食品はどうだろうか？

本稿では、参考文献としてなるべく日本語の総説を挙げた。他には、食品・農業分野の放射線利用を基礎から最新の応用まで幅広く解説した総説³⁰⁾、社団法人日本原子力産業協会から2007年に発行されPDF版のダウンロードも可能な「食品照射Q&Aハンドブック」³¹⁾、原子力機構・高崎量子応用研究所のHPから閲覧

できる「食品照射データベース」³²⁾も、資料として活用していただきたい。本稿で割愛した実験データや国内外のその後の進展状況に興味を持たれた方は、筆者までご連絡下されれば幸いである。

参考文献

- 1) WHO 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).
- 2) T. Kume, M. Furuta, S. Todoriki, N. Uenoyama and Y. Kobayashi, *RADIOISOTOPES*, **58**, 25 (2009).
- 3) T. Kume, M. Furuta, S. Todoriki, N. Uenoyama and Y. Kobayashi, *Radiat. Phys. Chem.*, **78**, 222 (2009).
- 4) 久米民和, 食品照射, **43**, 46 (2008).
- 5) 独立行政法人日本原子力研究開発機構, 「平成19年度 放射線利用の経済規模に関する調査報告書-食品照射海外調査-(内閣府委託事業)平成19年12月」(2007).
- 6) 大野新一, 放射線教育, **11**, 3 (2007).
- 7) 伊藤 均, 放射線と産業, 112号, 36 (2006).
- 8) <http://biotech.nikkeibp.co.jp/fsn/kiji.jsp?kiji=2599>
- 9) 伊藤 均, 放射線と産業, 110号, 36 (2006).
- 10) 伊藤 均, 放射線と産業, 113号, 26 (2007).
- 11) 伊藤 均, 放射線と産業, 115号, 6 (2007).
- 12) WHO Technical Report Series 890, High-Dose Irradiation: Wholesomeness of Food Irradiated with Doses above 10 kGy (1999).
- 13) H. Delincee, *et al.*, *Radiat. Phys. Chem.*, **52**, 39 (1998).
- 14) F. Raul, *et al.*, *Nutr. Cancer*, **44**, 88 (2002).
- 15) C. H. Sommer, *J. Food Sci.*, **71**, 281 (2006).
- 16) 伊藤 均, 放射線と産業, 114号, 33 (2007).
- 17) M. Kikuchi, *et al.*, *RADIOISOTOPES*, **56**, 509 (2007).
- 18) <http://www.mhlw.go.jp/topics/yunyu/hassyutu/dl/263.pdf>
- 19) 等々力節子, 齋藤希巳江, 辻本佑佳, 食品照射, **43**, 25 (2008).
- 20) http://www.ansa-spice.com/M08_SpiceQandA/SpiceQandA.html
- 21) <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2006/siry040/siry011.pdf>
- 22) http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2006/kettei/kettei061003_2.pdf
- 23) <http://www.fsc.go.jp/iinkai/i-dai74/dai74kai-siryou2-2.pdf>
- 24) <http://www.fsc.go.jp/iinkai/i-dai74/dai74kai-gijiroku.pdf>

- 25) <http://www.fsc.go.jp/iinkai/i-dai182/dai182kai-siryoku3-1.pdf>
- 26) <http://www.fsc.go.jp/iinkai/i-dai182/dai182kai-gijigaiyou.html>
- 27) <http://www.mhlw.go.jp/topics/yunyu/monitoring/dl/02-070706a.pdf>
- 28) <http://www.peopletree.co.jp/news/notice/masara1.html>
- 29) 土屋文安, 「牛乳読本」NHK 出版, (2001).
- 30) 林徹編, 「食品・農業分野の放射線利用」幸書房, (2008).
- 31) http://www.jaif.or.jp/ja/sangyo/qa-handbook_intro.html
- 32) <http://foodirra.jaea.go.jp/>

< 著者の略歴 >

小林泰彦：1988年 東京大学大学院農学系研究科博士課程修了（農学博士）。農芸化学専攻（特にお酒の醗酵）。独立行政法人日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門研究主席，マイクロビーム細胞照射研究グループリーダー（兼）放射線生物作用解明研究グループリーダー，群馬大学大学院医学系研究科客員教授。専門：放射線生物学，重イオンマイクロビーム細胞照射装置の開発と生物実験への応用，食品照射に関するリスクミ活動など。趣味：田舎道のドライブ，鉄道，読書（マンガを含む）。

菊地正博：1987年 東北大学農学部農芸化学科卒業（農学士）。独立行政法人日本原子力研究開発機構研究員。専門：放射線生物学，分子生物学的手法を用いた遺伝子構造解析（放射線抵抗性細菌のDNA修復遺伝子とゲノム高次構造の解析），電子スピン共鳴装置を用いた放射線誘導ラジカル解析（照射食品検知法）など。趣味：短距離ランニング，ゲレンデスキー，家庭菜園（特に草取り）