

「食品照射」 の基礎知識と最新技術動向

食品照射とは

食のコミュニケーション円卓会議 副代表
(元QST高崎量子応用研究所)
小林 泰彦

新連載・第1回

食品の放射線照射処理

食品照射とは、認可された放射線を定められた条件で食品や農産物に照射し、殺菌・殺虫・芽止めなどの処理を行う技術である。実用的には、殺菌などの目的達成に十分な線量^{注1)}以上で、かつ食品の商品特性や嗜好性に悪影響が生じない範囲の適切な線量が照射される(表1)。

食品照射は、毒性学的・微生物学的安全性および栄養学的適格性の観点から最もよく検討された食品処理技術であり、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(WHO、1997)、安全性に関して喫緊の懸念事項はない(EFSA、2011)とされ、コーデックス国際食品規格(CODEX STAN 106-1983, Rev.1-2003)やISO規格(14470:食品照射-電離放射線を用いた食品の処理工程の開発、妥当性確認および日常管理における要求事項)などの国際規格が整備されている。

そして、日本以外のすべての先進国で、国際機関の評価をもとに安全性を再評価し、表2に示すように必要に応じて国内の規格・基準を整備し、食品の安全確保と品質向上のために食品照射技術を利用してきた。現在、多くの国でスパイス・ハーブ類(香辛料)や乾燥食品素材、冷蔵・冷凍食肉・魚介類などの微生物制御、果実類の検疫殺虫処理、ニンニクの芽止め処理などが実用化されている(図1~9)。

特に、耐熱性の芽胞菌で汚染されることが多いスパイス・ハーブ類(香辛料)や乾燥野菜等は、風味や色調が重要視されるため加熱殺菌が難しく、非加熱で殺菌が可能な放射線処理に技術的な優位性が認められる。

最近では、農産物の貿易に伴う病害虫の侵入・蔓延を防ぐための植物検疫処理で、適用品目が限定される蒸熱処理や低温処理、オゾン層を破壊する臭化メチルによる燻蒸処理などに代わる新たな方法として、病害虫の成育・繁殖阻止(不妊化や産卵阻止)を目的とする放射線処理が急増している。

表1 食品照射の実用例と線量

目的	品目	線量(吸収線量)
滅菌(無菌化)	宇宙食、病人食	20~50 kGy
香辛料や乾燥食品素材の殺菌	スパイス・ハーブ類(香辛料)、茶、乾燥野菜、乾燥果実、ココア粉末、健康食品原材料など	~10 kGy
冷蔵・冷凍の食肉・魚介類の食中毒防止	赤身肉・家禽類、カエル脚、エビ、魚、二枚貝、蜂蜜など	1~5 kGy
植物検疫処理、寄生虫・貯穀害虫の殺虫	果物、穀類、食肉・魚介類、発酵ソーセージなど	0.1~1 kGy
芽止め(保存中の発芽防止)	ジャガイモ、ニンニク、タマネギ	~0.1 kGy

表2 食品照射の研究・評価と実用化に関する世界と日本の主な動き

世界	日本
1961 照射食品の健全性と規制に関する国際会議	1967 国の特定総合研究(7品目)開始
1971-80 日本を含む24カ国で共同研究	1972 ジャガイモの照射許可
1980 FAO/WHO/IAEAの安全宣言	1974 土幌農協で照射芽止めジャガイモを 端境期に出荷開始
1983 コーデックス国際食品規格採択	
1986 香辛料・乾燥調味料の照射殺菌および全食品の 照射殺虫を許可(米)	
1986 欧州食品委員会(SCF)のリスク評価	1986 日本アイントープ協会の研究(~'91)
1990 食鳥肉の照射殺菌許可(米)	
1991 食鳥肉の照射殺菌許可(英)	
1997 冷蔵冷凍赤身肉の照射殺菌許可(米) WHO:10 kGy以上でも安全と宣言	
1999 香辛料類の照射殺菌許可(EU全体)	
2001 香辛料類の照射殺菌許可(豪、NZ)	2000 全日本スパイス協会が香辛料殺菌の許可を要請
2002 熱帯果実の検疫用照射許可(豪、NZ)	
2003 植物検疫に関する国際基準採択、 コーデックス国際食品規格改定	
2005 牡蠣など2枚貝の照射殺菌許可(米)	2005 厚労省:検知法の開発研究開始
2007 インドの照射マンゴー輸入許可(米)	2007 輸入香辛料のモニタリング検査開始(TL法)
2008 レタスなどの照射殺菌許可(米)	
2011 ISO14470 採択	2009 食品健康影響評価(2-ACB毒性評価)
2011 欧州食品安全機関(EFSA)安全評価	2010 検知法の追加(2-ACB法)
2012 柿などの検疫照射許可(豪、NZ)	2012 検知法の追加(ESR法)
2014 甲殻類の照射殺菌許可(米)	2012 厚労省:牛肝臓の照射殺菌効果の研究
2017 牛ひき肉の照射殺菌許可(カナダ)	
2021 全生鮮農産物の検疫用照射許可(豪、NZ)	2018 農水省:植物検疫処理基準の研究

日本の現状

表2に示すように、日本では1972年にコバルト60 (^{60}Co) のガンマ線照射による馬鈴薯(ジャガイモ)の芽止めが許可され、1974年春には世界に先駆けて一般向けに実用化された照射食品として北海道の土幌町農協から「芽どめじゃが」が出荷された(図10)。それから48年間、毎春の端境期に注文を受けて出荷され、高品質のジャガイモの周年安定供給に貢献してきた馬鈴薯芽止め処理事業であるが、残念ながら2022年春の出荷分で終了となった。

そして日本では、世界の動きと異なり、他の食品への放射線照射の適用については慎重な姿勢が続く一方で、海外の照射食品の国内流通を防ぐために、熱ルミネッセンス(TL)法、2-アルキルシクロブタノン(2-ACB)法、及び電子スピン共鳴(ESR)法を用いて輸入食品の放射線照射の有無についてのモニタリング検査が行われている。

なお、ジャガイモの芽止め照射を許可する際に、それまで食品への放射線照射については何も規定がなかった食品衛生法に、新たに照射食品を個別に許可するための法的規制の手続きとして放射線照射を禁止する規定が導入された結果、土幌町農協の「芽どめじゃが」以外の照射食品の製造・加工や販売、海外からの照射食品の輸入も、現在は全て禁止となっている。

その後、国際貿易で高品質の照射香辛料類の流通が一般的となり、国際的に高く評価されていることを踏まえて、2000年に全日本スパイス協会が香辛料の微生物汚染の低減化を目的とする放射線照射の許可を当時の厚生省に要請したが、許可されないまま現在に至っている。

2011年の腸管出血性大腸菌によるユッケ集団食中毒事件を受けて2012年に牛生レバーの提供が禁止された後、厚生労働省で牛肝臓の照射殺菌効果の研究が行われた。製品化を踏まえた包装形態と照射条件も検討され、安全で美味しい照射生



図1 台湾のカップ麺と食品照射に関する表記



図2 南アフリカの照射黒胡椒(ミル付き小瓶入り)



図3 中国のコンビニで広く売られているピリ辛チキンのスナック2種。照射によって茹で時間を短縮して良好なテクスチャーを保ちながら室温で長期保存可能



図4 フランス産の冷凍カエル脚。“Ionisation”と表記されている



図5 タイ産の照射発酵ソース(非加熱製品)

レバーの実用化の見通しが得られているようであるが、その扱いについての議論は進展していない。

2018～2019年には農林水産省による「我が国の輸出に有利な国際的検疫処理基準の確立・実証事業」の中で柑橘のミカンバエとリンゴのモモンクイガに対する放射線照射による殺虫効果と果実障害試験が行われ、品質と商品価値を保ちながら効果的に殺虫できる照射検疫処理の有効性が確認された。照射処理に適性を持つ柑橘やリンゴの品種も明らかになったが、政府が推進する国産農産物の輸出拡大のために照射検疫処理技術をどう活用するかについての議論は全く進展していないようである。

本連載では、食品への放射線照射に関する基礎知識と海外での最新の技術動向を解説する予定であるが、その前にまず放射線について簡単に述べる。

放射線とは

放射線 (radiation) とは、広義には、空間を伝わるエネルギーの流れであり、一般的な光や音波も含まれる。狭義には、物質を電離する能力を持つエネルギーの流れとして、電離放射線 (ionizing radiation) と呼ばれる。

我が国の法律上の放射線の定義は、「直接または間接に空気を電離する能力を持つ電磁波または粒子線」とされている。不安定な原子が余分なエネルギーを放射線の形で放出して安定な原子に変わる変化を放射性壊変 (崩壊) といい、そのような原子を放射性同位元素 (ラジオアイソトープ)、そのような性質を放射能という。なお、放射性同位元素を含む物質を一般的に「放射性物質」というが、法律上は、ある定められた量や濃度以上の放射性同位元素を含み、規制や管理が必要とされ

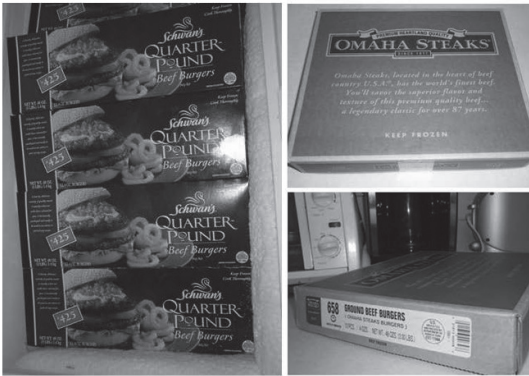


図6 米国産の照射冷凍牛ひき肉のビーフバーガーパテ



図7 NASAが開発した照射宇宙食

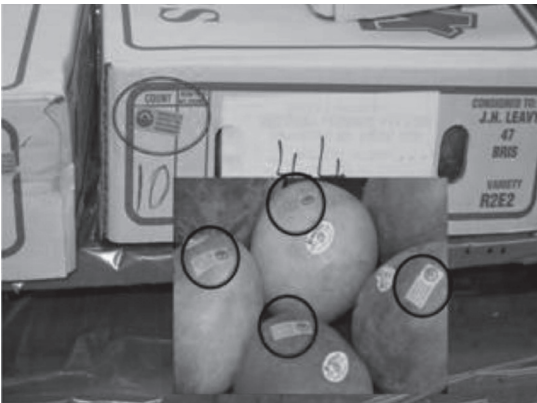


図8 ハワイ産の照射マンゴーと照射済みを示すシール



図9 1960年代後半にオランダで考案された国際的な食品照射シンボルマーク

る物質を指す。

1895年にドイツのレントゲン (Wilhelm Conrad Röntgen) が写真乾板を感光させる未知の光線としてX線を発見し、翌1896年にはフランスのベクレル (Antoine Henri Becquerel) がウラン鉱物からX線とは異なる放射線が放出されていることを発見した。さらに1898年にはラジウムがキュリー夫人 (Marie Curie) によって単離された。これらの発見は原子核の構造研究の先駆けとなり、20世紀の物理学の扉を開くとともに、極微量の放射性同位元素で標識した分子や原子の行方をそれが発する放射線を追跡するトレーサー実験は、光合成における炭酸固定反応の代謝経路 (カルビン回路) の全貌

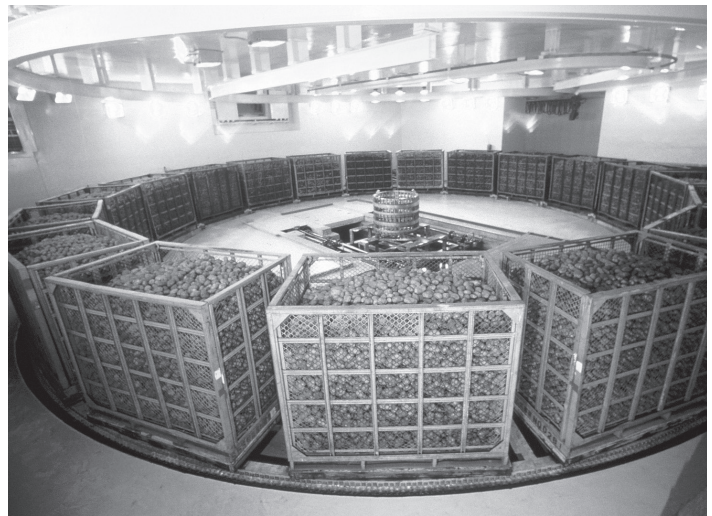


図10 北海道士幌町農協のコバルト60照射施設。生ジャガイモ1.5ト入りコンテナ(130×164×98cm)を線源から5m離れた円周上で周回させて照射していた

解明など数多くの科学的発見をもたらした。今日では、放射線は、基礎科学研究への応用はもちろん、医療、工業、農業など我々に身近なところで

様々に利用されている。そして、放射線防護とは、放射線を社会の中で安全に利用していくための知恵である。

多種多様な放射線のうち、医療や産業など身近なところで利用されているのは、①極めてエネルギーの高い光子（極めて波長が短い＝周波数が高い電磁波）、②極めて高速（秒速数千 km 以上）の荷電粒子、③中性子、の3種類である。

①極めてエネルギーの高い光子

電磁波は空間中を「波」として伝わり、物質と相互作用するときは「粒子（光子）」としてエネルギーを与える、と考えるとイメージしやすい。電磁波の周波数は光子のエネルギーに比例し、約 10^{16} Hz（ヘルツ）以上、すなわち1個の光子が持つエネルギーが数十電子ボルト（eV）^{注2)} 以上になるあたりで紫外線からX線と呼び名が変わる。

X線もガンマ線（ γ 線）も、どちらも実体は同じ高エネルギー光子であるが、その発生源によって、電子の状態の遷移によって発生するものをX線、原子核の状態の遷移によって原子核から放出されるものをガンマ線と呼び分けている。

医学診断や研究・分析用の比較的低エネルギーのX線源には、真空管内で熱電子を加速したングステンなどの重い金属のターゲットに当てて制動X線や特性X線を発生させるエックス線管（クーリッジ管^{注3)}、加速電圧30～150 kV程度）が用いられる。

放射線治療や非破壊検査、放射線殺菌などの高い透過力が求められる用途には、リニアックと呼ばれる線形加速器（加速電圧10 MV程度）で発生させた高エネルギー電子線を重い金属のターゲットに当てて発生させる高エネルギーX線や、コバルト60（ ^{60}Co ）やセシウム137（ ^{137}Cs ）の原子核から放出されるガンマ線が用いられる。

②極めて高速の荷電粒子

ウランなどの原子核から放射される粒子線のうち、アルファ線（ α 線）はヘリウム原子核すなわち裸の ^4He 原子の高速の流れであり、ベータ線（ β 線）は高速の電子の流れである。熱電子や、電荷

を持たせた原子（イオン）を電場などで人工的に秒速数千 km 以上に加速すると放射線（電子線、イオンビーム）となり、そのような装置を加速器（法律上の名称は放射線発生装置）という。逆に、電子線やイオンビームが飛行中にエネルギーを失うと（速度が落ちると）もはや放射線ではなく、ただの電子やイオンに戻る。

加速器には、電極間の電位差（静電場）で加速するもの、高周波電圧による電場で加速するものなど様々なタイプがあり、加速する粒子の種類、加速エネルギー（粒子の速度：透過力を決める）、出力（ビーム電流：線量率を決める）によって使い分けられている。

荷電粒子の運動は電磁界で精密に制御できることを利用して、人工的に発生させたビームをピンポイントに集束させ、かつ自由自在に操ることが可能であり、CRT（陰極線管、ブラウン管）、電子顕微鏡、FIB（集束イオンビーム）による微細加工、粒子線がん治療など様々な利用法がある。

工業的な放射線加工や医療器具・食品などの殺菌・滅菌のための電子線照射では、一般的にその線量率（時間あたりの線量）はX線やガンマ線の千倍も大きい^{かさ}が、透過力は小さいので、薄いシート状のものや嵩密度の小さいものを連続的に短時間で照射する用途に用いられる。

③中性子

自然界では、宇宙線と大気中の原子との衝突などで発生し、大気中では炭素14（ ^{14}C ）^{注4)} や三重水素（ ^3H 、トリチウム）^{注5)} などの天然放射性核種を産生する。核種とは、陽子と中性子の数で決まる原子核の種類のことである。中性子はウラン235（ ^{235}U ）の核分裂でも発生する。医療や産業用のガンマ線源として普及しているコバルト60は、通常^{かさ}の金属コバルト（非放射性的のコバルト59）を原料として原子炉内で中性子を吸収させて製造する。

中性子は電荷を持たないので、原子の内部にも容易に入り込み、物質中の原子核への捕獲反応で放射性物質を生成する。この性質は、放射化分析^{注6)} やホウ素中性子捕捉療法（BNCT）^{注7)} などに利用されているが、医療器具や医薬品、食

品の照射処理には不相当である。

中性子は X 線や電子線とは異なり物質中の軌道電子とは相互作用せずに、原子核とだけ、とりわけ質量がほぼ等しい水素の原子核と弾性衝突してエネルギーを失う。そのため、金属やコンクリートを透視して内部の水や有機物など水素を含む化合物の存在を可視化でき（例えばエンジン内部の潤滑油の動きやコンクリート構造物中の水分状態の観察）、金属のような重い（原子番号が大きい＝軌道電子が多い）元素とよく相互作用してエネルギーを失うことで透過像にコントラストを与える X 線透視とは相補的な情報が得られる。

今回は食品照射の具体的な利用法とその原理などについて述べる。

- 注 1) ここでいう「線量」とは「吸収線量」のことで、放射線を照射された物質が吸収したエネルギー量をグレイ (Gy) という単位で表す。物質 1 kg 当たり平均 1 ジュール (J) のエネルギー吸収がある時、1 グレイ (Gy、[J/kg]) となる。ジュールはエネルギーの単位で、4.184 ジュール = 1 カロリー。
- 注 2) 電子ボルト (eV)：エネルギーの単位。電子が真空中で 1 V の電位差の間を移動することによって得る運動エネルギー。1 eV = 1.6×10^{-19} J
- 注 3) クーリッジ管：W. D. Coolidge が実用化した真空放電管の一種。加熱したフィラメントを熱陰極とし、そこから放出された電子が電場で加速されて陽極を兼ねたターゲットに衝突し X 線を発生させる。真空中の放電現象の観察に使われ、レントゲンに X 線の発見をもたらした「クルックス管」を、X 線の発生を目的として改良したもの。

- 注 4) 炭素 14：天然に存在する代表的な放射性核種。高エネルギー宇宙線が大気に入射して発生した中性子 (n) が窒素 14 の原子核に吸収され、 $n + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{14}\text{C} + p$ の反応で炭素 14 を生成する。半減期 5,730 年で 0.157 MeV のベータ線を放出して窒素 14 (${}^{14}\text{N}$) となる。
- 注 5) 三重水素：宇宙線による大気中での生成反応は、 $n + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^{12}\text{C}$ 、 $n + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^{14}\text{N}$ など。半減期 12.3 年で 0.0186 MeV のベータ線を放出してヘリウム 3 (${}^3\text{He}$) となる。トリチウム (tritium) から T とも表記される。
- 注 6) 放射化分析：中性子を照射するなどして試料中の極微量の安定元素を放射性的の元素に変換し、生じた放射性核種が放出する放射線の強度とエネルギーを測定してもとの元素の種類と量を高感度に求める分析方法。
- 注 7) ホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT)：ホウ素 10 (${}^{10}\text{B}$) が中性子と非常によく反応することを利用して、がん細胞に選択的にホウ素 10 薬剤を取り込ませた後に熱中性子を体外から照射し、 ${}^{10}\text{B} (n, \alpha) {}^7\text{Li}$ 反応で飛び出した α 線とリチウム反跳核 (α 線を放出する際、残りのリチウム原子核も反動で逆方向に飛び出す) の作用でそのがん細胞を死滅させる。 α 線とリチウム反跳核の飛距離がほぼ細胞内に限定されるため、ホウ素を取り込まなかった周囲の正常細胞には悪影響を与えず、がん細胞だけに致死効果が期待できる。がん組織の輪郭が不明瞭で外部照射が適応し難い浸潤性のがんに有効。

参考資料

- WHO (世界保健機構)、食品照射の安全性と栄養適正、コープ出版 (1996)
- 林徹、食品・農業分野の放射線利用、幸書房 (2008)
- 等々力節子、食品照射とは - 技術の概要及び評価と研究開発の歴史 -、RADIOISOTOPES, 71(1), 55-62 (2022)
- 小林泰彦、食品照射の実用状況と消費者の受容、RADIOISOTOPES, 71(1), 63-83 (2022)