

「食品照射」

の基礎知識と最新技術動向

照射食品の表示と検知法

第7回

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

放射線を照射した食品が社会に流通する際は、消費者の自由な選択を可能にするためにも照射食品であることの表示が必要と考えられ、コーデックス国際食品規格^{注1)}で表示の方法が定められている。

適切な表示に関する規制の実効性を担保するため、照射によって生じる物理的、化学的、あるいは生物学的な変化を指標として照射されたか否かを判定する技術（検知法）が開発され、そのいくつかは実用化されている。

表示に関する国際規格

コーデックス国際食品規格^{注1)}では、照射食品に関する一般規格^{注2)}によって以下のことがらを定めている（連載第6回「照射食品の健全性評価と国際規格」2024年10月号参照）。

- 出荷書類に照射の事実を示す文言を記載すること
- 最終消費者に対してばら売りされる食品の場合は、売り場に食品名と照射されている旨を表示すること
- 包装済み食品については、「包装食品の表示に関するコーデックス一般規格」^{注3)}に従って、食品名の近くに照射の事実を示す文言を記載し、原材料として照射された成分を含む食品の場合もその事実を表示すること

包装食品の表示に関する

コーデックス一般規格の要求事項

包装済みの照射食品に関しては、以下の3つの要求が規定されている。

- 電離放射線で処理された食品のラベルには、その処理を示す記載を当該食品の名称に近接して添付すること（Radura ロゴ（図1）は任意）
- 放射線照射製品を別の食品の原材料として使用する場合は、原材料の一覧にその旨を明記すること
- 単一原材料による製品が放射線照射原料から製造される場合は、当該製品のラベルにはその処理を示す記載を含めること

国際的な食品照射シンボルマークである Radura ロゴを用いる場合は食品名のすぐそばに配置しなければならない（図2～4）。また、照射された原料を含む食品は、その旨を原材料一覧に明記すべきで



図1 Raduraのロゴ。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



図2 南アフリカの照射スパイスとRaduraのロゴ



図3 メキシコの照射グアバとRaduraのロゴ



図4 タイの照射パプリカ粉末、照射中華ソーセージとRaduraのロゴ



あると規定している。ただし、これらは加盟国に強制されるものではなく、国によって具体的な規制は異なる。

照射食品の表示は、製品販売国の関係当局が定めた要求事項をすべて満たす必要がある。製品が照射された旨の記載方法は国によって異なるが、どの規則も、製品に照射が行われたことを消費者が認識できることを要求している。関連する出荷文書にもその旨を明記しなければならない。

英語では通常、「irradiated（照射処理されています）」や「treated with ionizing radiation（電離放射線で処理されています）」という文言を照射された包装食品に表示することが求められる。

フランスでは「irradiation」の代わりに「ionisation」と表記されている（図5）。



Ingrédients : poivre noir, poivre blanc, coriandre, baies roses, poivre vert, piment de la Jamaïque.
Traité par ionisation



irradiationの言い換え

原材料:黒コショウ、白コショウ、コリアンダー、ピンクペッパー、グリーンペッパー、ジャマイカペッパー(オールスパイス)。

イオン化処理(照射処理)

図5 「irradiation」ではなく「ionisation」と表記されたフランスの照射香辛料

その方が消費者に受け入れられやすいとか…。

EUの厳格な表示義務

ヨーロッパ連合（EU）では、すべての照射食品に「照射」あるいは「放射線処理」という言葉を表示することを義務づけ、その規制の実効性を担保するために欧州標準化委員会（CEN）^{注4}が定めた標準分析法（検知法）を用いて市販流通品のモニタリングを行っている（CENの標準分析法については後述）。

EUの表示義務は、照射された成分が含まれる割合についての閾値がない（原材料のごく一部でも照射されていたら表示が必要）という厳格なもので、レストランやケータリングで提供される食事にも適用されることになっている。オーストラリアとニュージーランドでも同様の規則を定めている。

それらの規則に従えば、例えば、微量の照射スパイスを含むブレンドスパイス（スパイスミックス）で味付けされたサラミソーセージの薄切りをほんの少しだけトッピングしたピザのように、極めて微量の照射原材料を含む食品にも表示の義務があることになるが、そのような場合でも照射の事実の有無を判別して表示義務の履行を確認できるかどうかは分析法（検知法）の感度の問題になると思われる。



図6 IRRADIATED TO PROTECT THE ENVIRONMENT (環境保護のために照射)と書かれたオーストラリアの照射マンゴー



図7 NON-IRRADIATEDをアピールしている。NON-GMOやNO MSG、NO PRESERVATIVESなどの表記も

米国やカナダの例

一方、米国では、「表示は消費者への警告ではない」という考え方から、肉類と果実はコーデックス規格に則った表示をしているが、香辛料の表示は義務付けられていない。

カナダでは、成分の10%以上が照射されている場合に表示を義務づけているが、2005年から食品と医薬品のどちらでもない「サプリメント」というカテゴリーが設けられ、サプリメントの照射は食品照射の規制を受けなくなった。

「照射していません！」

照射食品であることの表示に加えて、安全性の向上や品質の維持、環境保護などの照射の利点が表記されることもあるが(図6)、逆に、非照射の食品にわざわざ「照射していません」と表記することで、「遺伝子組換えでない」や「添加物不使用」などと同様に、あたかもそれが他の食品に比べて安全で健康的な食品であるかのように消費者に思わせようとする宣伝も見られる(図7)。

日本の表示基準

食品表示法の施行に伴う平成27年内閣府令第十号「食品表示基準」^{注5)}では、第18条(横断的義務表示)の第2項に、食品関連事業者が一般用生鮮食品を販売する際には、「放射線を照射した食品」については「放射線照射に関する事項」として「放射線を照射した旨および放射線を照射

した年月日である旨の文字を冠したその年月日を表示する」と定められている。

同じく第20条(義務表示の特例)では、容器包装に入れずに販売する場合は「放射線照射に関する事項」の表示は要しないとされている(にわかに信じがたいが)。また第22条(表示の方式等)では、「容器包装に入れられた照射食品にあつては、容器包装を開かないでも容易に見ることができるように当該容器包装の見やすい箇所に表示する」と定められている。

ちなみに有機農産物の日本農林規格(有機JAS)^{注6)}では、「5.13 収穫、輸送、選別、調製、洗浄、貯蔵、包装その他の収穫以後の工程に係る管理」の中で「5.13.4 放射線照射を行ってはならない」とされている。しかし、EUで実際に行われているような栽培前の種子・種苗の照射殺菌も禁止なのかはよくわからない。また、種子・種苗の品種改良のための放射線育種や化学変異原による育種まで禁止するはずはない、と常識的には考えられるが、それについても明記されていない。

本連載第3回「芽止めと植物検疫」2024年7月号で解説したように、北海道土幌町農協の馬鈴薯芽止め処理事業は2022年春の出荷分で終了した。

その後、新たな照射食品は認可されておらず、現在日本で表示の対象となる照射食品は存在しない。

ありし日の照射馬鈴薯「芽どめじゃが」の表示に関する、あるエピソードをコラムで紹介したい。

なぜ東京都の青果市場では照射ジャガイモを扱わないのか？ 1個1個にも表示義務??

十数年前、筆者は、青果市場の社員の方から、人を介してこんな問い合わせを受けた。「東京都では照射ジャガイモ（芽どめじゃが）は販売されていないようだが、国が認めているのに、なぜ?」

筆者はまた、こんな噂も耳にしていた。『東京都では、ばら売りの照射ジャガイモの1個1個に表示しなければならない（だから現実には取り扱うことができない）』

そこで、その真偽を確かめるべく、2011年5月某日、科学的根拠に基づく学びと体験を重視する消費者グループ「食のコミュニケーション円卓会議」^{注7)}の市川代表とともに都庁を訪れた。

都の担当者の説明と当時の青果新聞記事

面談に応じて下さった福祉保健局健康安全全部食品監視課規格基準係長は、「現時点では、表示をすれば照射ジャガイモの販売は問題ないと認識している」と回答した上で、昭和52年（1977年）3月1日付の青果新聞記事のコピーを示して次のような経緯を説明された。

- 昭和52年2月15日、美濃部都知事から東京都青果物商業協同組合理事長宛に、照射ジャガイモは店頭に表示して下さい、との要請があった。
- 青果新聞の記事によると、その要請の内容は、「最近、ばら売りの照射ジャガイモについてもそれを識別できるように店頭で表示することを消費者から要望されている。ついでには、ばら売りする場合には、包装品に対する食品衛生法の表示規定に準じて店頭表示を実施するよう、（組合員に）ご指導頂きたい」
- 理事長はこの要請を了承した。

青果市場側の拡大解釈と自己規制?

この記事の通りとすれば、都からの「ばら売り時には店頭表示」との要請を青果市場の

関係者が「照射ジャガイモの1個1個にも表示しなければならない」と誤解、あるいは拡大解釈したのかもしれない。

販売する側としては、1個1個に表示する手間をかけてまで売るとは現実に不可能なので、結果的に東京都の要請（行政指導）の意図を離れて、「照射ジャガイモは扱えない、扱わない」という市場側の判断と自己規制が行われた可能性がある。

しかし、東京都からは、その誤解や行き過ぎを指摘するような指導は一切なかった（少なくとも記録には残っていない）。

そして今に至るまで、「照射ジャガイモに反対する消費者団体の要求を受けて、東京都では扱わないように指導された。その規制は今も有効である」という誤った認識が受け継がれている、ということらしかった。

この誤解を図式化すると、次のようになるのではないか。

消費者は照射ジャガイモの販売に反対
⇒だから、無理な個表示を突きつけている
⇒都もそれを容認している（暗黙のうちに販売を禁止している）

照射ジャガイモをめぐる当時の空気については、本連載第3回:2024年7月号を参照されたい。p.41の「表1 食品照射に関する記事の見出し」に「1977 (S52) 2.16 朝日新聞/照射ジャガイモ ばら売りにも表示を 東京都 消費者保護で行政指導」とある。

もし東京都の青果市場の関係者で当時の状況をご存知の方がおられたら、ぜひ真相をお伺いしたかったが、残念ながら連絡がつかず、調査はここで終了した。筆者の印象に強く残ったのは、次の2点である。

- 芽止めジャガイモの消費者メリットが、その時、都からも青果市場からも情報提供されなかった。
- 選択の自由は、反対する人たちだけの権利ではない。芽止めジャガイモを買いたい消費者の権利が侵害されてしまったのではないか?

表1 照射食品の検知法

方法	CEN分析法 ^{注9)} 番号	分析対象食品 (妥当性が確認された最低線量、単位: kGy)	Codex標準分析法 ^{注9)} での位置付け
炭化水素の分析 (HC法)	EN1784(1996) (2003改定)	脂肪を含む食品:鶏肉(0.5)、豚肉(0.5)、 牛肉(0.5)、アボカド(0.3)、マンゴー (0.3)、パパイヤ(0.3)、カマンベールチー ズ(0.5)	Type II (係争時や校正の目的で 使用が推奨される参照法)
2-アルキルシクロブタノンの分析 (ACB法)	EN1785(1996) (2003改定)	脂肪を含む食品: 鶏肉(0.5)、豚肉(1)、 液体全卵(1)、カマンベールチーズ(1)、鮭 (1)	Type III (規制や検査などの行政目 的に有効な代替承認法)
骨のESR測定 (ESR法)	EN1786(1996)	骨を含む食品:鶏肉(0.5)、肉(0.5)、鱈 (0.5)、カエル脚(0.5)	Type II
セルロースのESR測定 (ESR法)	EN1787(1996) (2000改定)	セルロースを含む食品:パプリカ粉末(5)、 ピスタチオナッツの殻(2)、イチゴ(1.5)	Type II
糖結晶のESR測定 (ESR法)	EN13708(2001)	結晶性の糖類を含む食品:乾燥パパイ ア(3)、乾燥マンゴー(3)、乾燥イチジク (3)、干ぶどう(3)	Type II
熱ルミネッセンス測定 (TL法)	EN1788(1996) (2001改定)	ケイ酸系鉱物を含む食品:ハーブ・スパイス 類(6)、エビ(1)、貝類(0.5)、乾燥野菜・ 果物(8)、ジャガイモ(0.05)	Type II
光励起ルミネッセンス測定 (PSL法)	EN13751(2002)	ケイ酸系鉱物を含む食品:ハーブ・スパイス 類(10)、貝類(0.5)	Type III
DNAコメットアッセイ法 (スクリーニング)	EN13784(2001)	DNAを含む食品:鶏肉(1)、豚肉(1)、植 物細胞・種実類(1)	Type III
DEFT/APC法 (スクリーニング)	EN13783(2001)	ハーブ、スパイス類(5)	Type III
LAL/GNB法 (スクリーニング)	EN14569(2004)	鶏肉(2.5)	Codex標準分析法への取 載無し

出典:

- 堤智昭, 放射線照射された食品の検知法について. RADIOISOTOPES, 71(2), 101-107 (2022)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/radioisotopes/71/2/71_1010205/_article/-char/ja
- 日本アイントープ協会, 食品照射の最前線 ~研究者が解説するQ&A (2024年3月全面改訂版)
<https://www.jriass.or.jp/pdf/shokuhinshoushaQA.pdf>

照射食品の検知法 (照射の有無判定法)

1990年頃から欧州を中心に照射食品の適切な表示と規制の実効性を確保する目的で検知法開発の共同研究が実施され、1996年から2004年までに合計10種類の検知法がCEN^{注4)}によってヨーロッパ標準分析法(EN規格^{注8)}に制定された(表1)。これらの検知法のうち9種類がコーデックス標準分析法^{注9)}として採用されている。ただし、これらは食品が照射されたか否かを判定する定性試験法であり、どれだけの線量で照射されたかを確認、保証するものではない。

表1に示した検知法は、その原理によって物理的検知法、化学的検知法、生物学的検知法の3つに分けられる。

1. 物理的検知法

食品に付着・混入しているケイ酸系鉱物に照射によって蓄積されたエネルギーを検出する熱ルミネッセンス(TL: Thermoluminescence)法や光刺激ルミネッセンス(PSL: Photo Stimulated Luminescence)法、食品中の結晶性の糖、セルロース、骨に由来する比較的安定なラジカルを検出する電子スピン共鳴(ESR: Electron Spin Resonance)法がある。

これらは放射線作業時の外部被曝管理に用いる個人線量計や工業製品の照射処理の線量管理に用いるフィルム線量計などと同様の原理によるものである。(連載第4回「照射施設と工程管理/不妊虫放飼法」2024年8月号参照)

1.1 熱ルミネッセンス(TL)法

食品に付着あるいは混入しているケイ酸塩鉱物

(長石や石英など)に放射線照射によって蓄積されていたエネルギーが、加熱(熱励起)によって放出される発光現象を検知指標とする。

ケイ酸塩鉱物などの電気伝導度の悪い物質が照射されると、電離で生じた電子は自由に動けないので、照射で生成した一対の電子と正孔(electron hole)はそのまま物質内に留まっている。その電子が自由に動けるようになるだけのエネルギーが加熱によって与えられると、電子はその場所から移動し、正孔に捕捉されて光を放出する。その際の加熱による温度上昇と発光量との関係を測定する。

香辛料、野菜類、果実、茶、水産物などでは、しばしば土壌や埃などに由来する鉱物の付着や微量の混入があり、これらを採取可能な食品がTL法の対象となる。

加熱による発光特性は採取された鉱物の性質によって大きく異なるため、発光量の大小だけで照射の有無を判定することは難しい。そこで、測定後の鉱物試料に既知線量の放射線(1 kGyのCo-60 γ 線など)を照射したのち、再度発光量を測定し、最初の発光量に対する比(TL発光比)を計算して判定を行う。

TL法は食品成分自体の特異的な変化を測定するものではなく、生産時や加工時に付着・混入した鉱物が測定対象となるため、表面が平滑で鉱物が付着しにくい食品や、洗浄・精製など異物除去処理を受けたものでは、測定に必要な量の鉱物の分離が困難となり、試験が不成立(照射の有無を判定できない)となる。食品が照射後に高温下で保存されたり加熱処理を受けた場合も検知は困難となる。

TL法は、ESR法、ACB法とともに日本国内の通知法^{注10)}として厚生労働省から発出されている。その判定基準はヨーロッパ標準分析法^{注8)}EN1788とほぼ整合した形となっている。

1.2 光刺激ルミネッセンス(PSL)法

TL法と同じく食品に付着あるいは混入しているケイ酸塩鉱物(長石や石英など)に放射線照射によって蓄積されていたエネルギーが、近赤外光の照射(光励起)によって放出される発光現象を検知指標とする。

PSL法はTL法と異なり高温に加熱しないので、測定前に試料から有機物を除去する必要がなく、すなわち食品に付着した鉱物試料を分離して測定する必要がない。そのため、迅速な照射食品の検知が可能であるが、鉱物が付着しにくい食品や、洗浄・精製など異物除去処理を受けた食品、照射後に高温下で保存されたり加熱処理を受けた食品では適用が困難なのはTL法と同じである。

発光の強さはTL法と同様に鉱物の種類や含量に依存するため、ヨーロッパ標準分析法EN17351ではあらかじめ照射および非照射の試料を用いて求めた発光量の閾値と測定試料で得られた発光量の比較によって判定を行っている。

1.3 電子スピン共鳴(ESR)法

放射線照射によって生じた食品中のラジカル^{注11)}を電子スピン共鳴装置^{注12)}で検出する方法である。

骨や貝殻、果実の殻などの乾燥して硬い組織に生じた比較的長時間安定なラジカルを測定する。このうち、植物組織の成分であるセルロース、骨の成分であるヒドロキシアパタイト、乾燥果実中の結晶性の糖などに由来するラジカルを検出することで、香辛料、骨付き肉、および糖結晶を含む乾燥果実を対象に照射の検知が可能となる。

試料調製が簡単で、原理的に非破壊測定である。TL法やPSL法では一度測定すると照射履歴が失われるのに対し、ESR法では何度も繰り返して測定可能である。しかし、照射で生成したラジカルが測定時まで安定に存在している必要があるため、常温で流通期間の長い食品では照射の判定が困難になる場合がある。

ESR法は、TL法、ACB法とともに、ヨーロッパ標準分析法^{注8)}のEN1786とEN13708に対応するものが日本国内の通知法^{注10)}として厚生労働省から発出されている。通知法では、炭酸ラジカルや糖ラジカルを検知指標として、貝殻付きの貝、糖結晶を含む乾燥果実が対象食品となっている。殻付きの貝としてハマグリとアサリ、糖結晶を含む乾燥果実としてマンゴー、パイナップル、パパイヤについて、少なくとも照射後6ヶ月間は判定が可能であることが確認されている。

2. 化学的検知法

食品中の脂質の放射線分解^{注13)}によって特異的に生成するごく微量の2-アルキルシクロブタノン類(2-ACBs)^{注14)}を検出するACB法や、放射線分解の際に(加熱処理との比較において)特徴的に生成する揮発性炭化水素を検出する炭化水素(HC)法がある。

2.1 ACB法

照射により食品中の脂質(トリグリセリド)から生じる特異的な放射線分解生成物である2-アルキルシクロブタノン類(2-ACBs)を検出する方法である。

2-ACBsは照射のみによって生成し、一般の環境中には存在しない化合物であると考えられるため、本化合物が検出されればその食品は照射された可能性が極めて高いと判断できる。

照射により生成する2-ACBsは単一物質ではなく、前駆体となる脂質の脂肪酸側鎖に応じた種々の2-ACBsが生成する(連載第6回「照射食品の健全性評価と国際規格」図1参照)。

2-ACBsの中でも、検知指標として主に利用されるのは、パルミチン酸^{注15)}を前駆体とする2-ドデシルシクロブタノン(2-dDCB)^{注16)}と、ステアリン酸^{注17)}を前駆体とする2-テトラデシルシクロブタノン(2-tDCB)^{注18)}である。これらはガスクロマトグラフ質量分析計(GC-MS)による検出感度が良く、食品に含まれる各前駆体の濃度も高いため、比較的分析が容易である。ただし2-ACBsの分離操作には熟練を要する。

ヨーロッパ標準分析法EN1785に準拠したACB法が、TL法、ESR法とともに国内の通知法^{注10)}として厚生労働省から発出されている。

2.2 炭化水素(HC)法

照射による放射線分解で食品中の脂質(トリグリセリド)から生じる揮発性炭化水素(HC)を水素炎イオン化検出器付きガスクロマトグラフ(GC-FID)などで検出する方法である。

オレイン酸から生成する1,7-ヘキサデカジエンをはじめ、ヘプタデセン、テトラデセン、ペンタデカンなど照射に対する特異性が比較的高い炭化

水素が検知指標として利用される。

脂質の放射線分解によって元の脂肪酸(FAn:m)より炭素数が1個少ないCn-1:mの炭化水素と炭素数が2個少なく二重結合が一つ多いCn-2:m+1の炭化水素が生成する。これらの炭化水素が検出され、かつ、その比率(Cn-1:m/Cn-2:m+1)が期待される値であれば、照射されたと判定される。炭化水素は照射以外にも加熱などによっても生じる場合があることから特異性は必ずしも高いとは言えない。

3. 生物学的検知法

食品中の動植物細胞のDNA鎖切断を検出するコメットアッセイ法^{注19)}や、生菌数や微生物叢の変化を検出するDEFT/APC法とLAL/GNB法がある。しかし生物学的検知法は照射に対する特異性が低いため、いずれも予備的なスクリーニング法とされている。

3.1 コメットアッセイ法

放射線照射によって生じたDNA鎖切断を検出する方法である。照射された動植物の細胞をアガロースゲルに包埋して電場をかけると(単細胞ゲル電気泳動)、様々な長さに切断されたDNA断片が細胞の核から流れ出し、陽極に向かって泳動してコメット(彗星)のように尾を引いた像を示す。

DNA鎖切断は細胞の自己消化や凍結融解などによっても誘発されるが、照射による損傷は細胞群全体に起こるため、加熱処理されていない生肉や植物種子等で一様にコメット像が観察されれば、照射されている可能性が高いと判断できる。

ただし、DNA鎖の切断は照射以外の種々の条件でも起こるので、保存状態の影響を受けやすい。生きている細胞が照射された際に生じたDNA鎖切断は、細胞内である程度は修復されるし、逆に食品が加熱や乾燥などDNAが断片化するような加工処理を受けると照射されたことを検知できなくなる。そのため特異性が低く、スクリーニング法として位置づけられており、判定を確定するには他の検知法によらなければならない。

表2 輸入食品のモニタリング検査結果(放射線照射)

年度	検査実施件数	違反件数	違反品目と生産国(違反件数と一致しない場合がある)
H20(2008)	433	8	乾燥しいたけ(中国)、乾燥唐辛子(中国)、乾燥ケール粉末(中国)、黒胡椒(米国)、ビスケット(米国)、マカ粉末(ペルー)
H21(2009)	271	6	乾燥しいたけ(中国)、冷凍ボイルジャコ(中国)、烏竜茶(中国)
H22(2010)	281	3	乾燥とうがらし(タイ)、乾燥しいたけ(中国)
H23(2011)	393	1	乾燥ペパーミント(チリ)
H24(2012)	617	1	乾燥大根の葉(中国)
H25(2013)	624	4	乾燥ミント(ブラジル)、乾燥クミン(バングラデシュ)、乾燥コリアンダー(バングラデシュ)、冷凍ボイルジャコ(中国)
H26(2014)	646	0	—
H27(2015)	639	1	冷凍えび(ベトナム)
H28(2016)	501	0	—
H29(2017)	702	0	—
H30(2018)	709	0	—
R1(2019)	700	3	乾燥果実(中国)、乾燥野菜(中国)、冷凍えび(ベトナム)
R2(2020)	737	1	乾燥果実(中国)、調味料・香辛料・唐辛子(台湾)、パプリカ(スペイン)
R3(2021)	722	0	—
R4(2022)	700	2	乾燥きのこ(中国)、乾燥野菜(中国)
R5(2023)	715	4	乾燥果実(中国)、香辛料(中国)、香辛料(インドネシア)、冷凍えび(ベトナム)

出典：厚生労働省 輸入食品監視業務 監視指導・統計情報 輸入食品監視指導計画に基づく監視指導結果(平成20年度～令和5年度)
https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/shokuhin/yunyuu_kanshi/kanshi/index.html

3.2 DEFT/APC 法

照射によって生じた生菌数や微生物叢の変化を検出する方法である。直接落射蛍光フィルター法(DEF T: Direct Epifluorescent Filter Technique)では食品中の死菌と生菌を合わせた総菌数を、プレート法(APC: Aerobic Plate Count)では食品中の生菌数を測定する。

食品が照射されると多くの微生物が死滅するので、両者の差が大きければ照射された可能性が高いと判断できる。しかし、照射以外の殺菌処理によっても生菌数や微生物叢の変化は生じるので、特異性が低くスクリーニング法として位置づけられており、判定を確定するには他の検知法によらなければならない。

3.3 LAL/GNB 法

これも照射によって生じた生菌数や微生物叢の変化を検出する方法である。リムルス(LAL: Limulus Amebocyte Lysate)試験からグラム陰性菌由来のエンドトキシン活性を、コロニ-カウントからグラム陰性菌(GNB: Gram-Negative Bacteria)の生菌数を測定する。

食品が照射されると多くの微生物が死滅するので、両者の差が大きければ照射された可能性が高

いと判断できる。しかし、照射以外の殺菌処理によっても生菌数や微生物叢の変化は生じるので、DEF T/APC 法と同様に、特異性が低くスクリーニング法として位置づけられており、判定を確定するには他の検知法によらなければならない。

ヨーロッパ標準分析法(EN 規格^{注8)}やコーデックス標準分析法^{注9)}に採用された検知法、そして厚生労働省の通知法^{注10)}は、その妥当性が確認され、公的な検査に利用されている。ただし、それぞれの検知原理が異なることから、対象となる食品の性質に合わせて適切な検知法を選択する必要がある。

なお、厚生労働省の通知法は、食品衛生法への適合判定に使用されるものであるから、製造者等における自主的な検査では通知法にとらわれる必要はない。

日本のモニタリング検査(輸入食品監視)

EU加盟国の多くは、照射許可品目以外の照射食品、または照射の表示が不適切な食品の流通の防止を目的として前述のヨーロッパ標準分析法^{注8)}を用いたモニタリングを実施している。

これに対し、日本では食品への照射は食品衛生法で原則として禁止されているため、輸入食品を監視するためのモニタリング検査^{注20)}が検疫所などで前述の3つの通知法^{注10)}を用いて実施されている。その結果は、以下に示すように分けて集計され、輸入食品監視指導計画に基づく監視指導結果^{注20)}として厚生労働省から公開されている。

1. 畜産食品：牛肉、豚肉、鶏肉、馬肉、その他食鳥肉など
2. 畜産加工食品：ナチュラルチーズ、食肉製品、アイスクリーム、冷凍食品（肉類）など
3. 水産食品：二枚貝、魚類、甲殻類（エビ、カニ）など
4. 水産加工食品：魚類加工品（切り身、乾燥、すり身など）、冷凍食品（水産動物類、魚類）、魚介類卵加工品など
5. 農産食品：野菜、果実、麦類、とうもろこし、豆類、落花生、ナッツ類、種実類など
6. 農産加工食品：冷凍食品（野菜加工品）、野菜加工品、果実加工品、香辛料、即席めん類など
7. その他の食料品：健康食品、スープ類、調味料、菓子類、食用油脂、冷凍食品など

平成20（2008）年度から令和5（2023）年度のモニタリング検査結果を表2に示す。照射されたと判定された場合は食品衛生法13条（食品の製造、加工および調理基準）に違反するものとして取り扱われる。

標準分析法以外の検知法

ヨーロッパ標準分析法(EN規格)^{注8)}やコーデックス標準分析法^{注9)}に採用された検知法(表1参照)の他にも、様々な検知法が過去に研究され、提案されてきた。

例えば、照射による種子などの発根・発芽の抑制を検出する胚培養法、照射によるDNA塩基損傷（修飾塩基）を検出するELISA法^{注21)}、照射による脂質の飽和脂肪酸と不飽和脂肪酸の量やその比の変化を二次元NMR^{注22)}で解析する2D DOSY法^{注23)}などである。

中でも、DNAが照射された際に生じる損傷ヌ

クレオシド(5,6-ジヒドロチミジン)を検知指標としたジヒドロチミジン法^{注24)}は、幅広い食品に適用できると考えられ、検知法として有望である。

表1に示したヨーロッパ標準分析法が開発されてからすでに20年以上が経過している。分析技術の進歩を反映した、より迅速・簡便で信頼性の高い方法への改良や適用範囲の拡大が期待される。

食品照射の海外での実用化状況と日本の現状、今後の見通しについては次回以降で紹介する。

注1) コーデックス国際食品規格:コーデックスとは、「食品規格」を意味するラテン語、コーデックス・アリメンタリウス(Codex Alimentarius)を略したもので、FAO(国連食糧農業機関:Food and Agriculture Organization of the United Nations)とWHO(世界保健機関:World Health Organization)が合同で設置した国際食品規格委員会(CAC:Codex Alimentarius Commission)で策定される。WTO(世界貿易機関:World Trade Organization)協定に含まれる協定の1つで食品や農作物の輸出入に関する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)の下では、食品に関する唯一の国際規格・基準であると位置づけられている。

注2) 照射食品に関する一般規格(General Standard for Irradiated Foods, CODEX STAN 106-1983, Rev.1-2003):コーデックス国際食品規格の一つ。照射食品の製造に関し、利用する線源、吸収線量、施設とその管理、処理の前後も含めた食品の衛生上の取扱い、技術的な条件、照射後の確認(検知)、表示などについて規定されている。1983年に10 kGy以下の照射食品について採択され、2003年には「技術的必要性があれば10 kGy以上の照射を認める」と改定された。

注3) 包装食品の表示に関するコーデックス一般規格(General Standard for Labelling of Prepackaged Foods, CODEX STAN 1-1985, Rev.8-2018):コーデックス国際食品規格の一つ。食品表示に関する国際規格として認められており、国内法もこの一般規格に準拠することが求められる。

注4) 欧州標準化委員会(CEN:Comité Européen de Normalisation, European Committee for Standardisation):国際社会におけるヨーロッパ経済の力を強め、ヨーロッパの市民の福祉や環境を高めるために、標準規格と仕様を開発・保守・配布の効率的基盤を提供する非営利組織。欧州連合(EU:European Union)27ヶ国と欧州自由貿易連合(EFTA:European Free Trade

Association) 3ヶ国の計30ヶ国で構成される。CENが定める規格(EN規格, European Norm)の一部は自発的なものだが、EUの法律の定めに従って策定されている義務的規格もある。照射食品の検知法に関しては、CEN/TC 275/WG 8 が管轄し、10種類のヨーロッパ標準規格法を定めている。欧州委員会が定める食品照射に関するEC指令では、これらの分析手法を利用した市場モニタリングを加盟国に義務づけている。

- 注5) 食品表示基準:平成27年内閣府令第10号。
https://www.caa.go.jp/policies/policy/food_labeling/food_labeling_act/assets/food_labeling_cms201_240823_1.pdf 東京都保健医療局「食品衛生の窓／食品事業者情報」で簡潔明瞭に分かり易く整理されている。
https://www.hokeniryo.metro.tokyo.lg.jp/shokuhin/hyouji/shokuyuhou_seisen_summary.html#21jyou
- 注6) 有機農産物の日本農林規格(有機JAS):
https://www.maff.go.jp/j/jas/jas_kikaku/attach/pdf/youuki-436.pdf 日本農林規格 有機農産物、JAS1605(2005年10月27日制定、2024年7月1日改正)
- 注7) 食のコミュニケーション円卓会議:
<https://food-entaku.org/index.html> 参照
- 注8) ヨーロッパ標準分析法(EN規格):欧州標準化委員会(CEN)によって策定された標準分析法。試験室間共同試験によって分析法の検知性能の妥当性が確認され、EU圏内における照射食品の検査に使用されている。
- 注9) コーデックス標準分析法:食品の国際規格を定めるCodex委員会により、照射食品の標準分析法として採択された分析法のこと。一般には妥当性が確認された分析法が採択される。採択された検知法のうち、HC法、ESR法、TL法は係争時や校正の目的において使用が推奨される参照法(Type II)、その他は規制や検査などの行政目的に有効な代替承認法(Type III)に分類されている。
- 注10) 通知法:厚生労働省「放射線照射された食品の検知法について」生食発第1128 第4号(平成30年11月28日)
<https://www.mhlw.go.jp/content/11130500/000415144.pdf>
- 注11) ラジカル(radical):1個またはそれ以上の不対電子(対になっていない電子)を持つ原子または分子。放射線の電離作用によって照射対象物中に生成する。放射線化学ではフリーラジカルまたは遊離基とも呼ばれる。ラジカルは通常、反応性が高く不安定で、生成するとすぐに他の原子や分子と反応して安定な分子やイオンとなる。そのため単離できるものは少なく、反応や分解の中間体として想定されていることが多いが、例外的に比較的長時間安定に存在するラジカルについては電子スピン共鳴(ESR)による分析が可能である。
- 注12) 電子スピン共鳴装置(ESR:Electron Spin Resonance):ラジカル(不対電子)を持つ試料に

磁場中でマイクロ波を放射し、マイクロ波とラジカルの間で起こる吸収共鳴現象による信号を測定する。核磁気共鳴(NMR:Nuclear Magnetic Resonance)とは観測対象が異なるが、基本的な原理は同じ。

- 注13) 放射線分解(radiolysis):電離放射線を照射された物質の電離・励起によって引き起こされる分解。例えば、水の放射線分解によって水和電子、OHラジカル、水素、過酸化水素などが生成し、高分子の放射線分解によって主鎖の切断や側鎖の解離、分子量の低下などが起こる。より広義には、脂質の放射線分解による2-アルキルシクロブタン(2-ACBs)類の生成や高分子鎖間の架橋(橋かけ)など、放射線によって引き起こされる化学反応全体を指す。
- 注14) 2-アルキルシクロブタン類(2-alkylcyclobutanones, 2-ACBs):脂質の放射線分解で生成する化合物。炭素数4の環状ケトンであるシクロブタンの2位にアルキル基が結合した構造をもつ。放射線照射により中性脂肪(トリグリセリド)のアシル基-酸素結合が開裂すると、前駆体となる脂肪酸よりも炭素数が4つ少ないアルキル基を持つ、元の脂肪酸と総炭素数が同じ2-ACBが生成する。
- 注15) パルミチン酸(palmitic acid):飽和長鎖脂肪酸(高級脂肪酸)の一種。IUPAC系統名はヘキサデカン酸(hexadecanoic acid, C16:0)。多くの動物性脂肪や植物油に含まれ、植物油では、アブラヤシから採取して製造されるパーム油の主な構成成分であり、畜肉の脂肪中にも多く存在している。
- 注16) 2-ドデシルシクロブタン(2-dodecylcyclobutanone, 2-dDCB):食品中の脂質を構成する脂肪酸の中で比較的存在量の多いパルミチン酸に由来する2-アルキルシクロブタン。
- 注17) ステアリン酸(stearic acid):動植物の脂肪に豊富な飽和長鎖脂肪酸(高級脂肪酸)の一種。IUPAC系統名はオクタデカン酸(octadecanoic acid, C18:0)。遊離酸は常温で白色の低融点の固体であり、ろうそくの原料にもなる。
- 注18) 2-テトラデシルシクロブタン(2-tDCB):ステアリン酸に由来する2-アルキルシクロブタン。
- 注19) DNAコメットアッセイ(DNA comet assay):放射線や化学物質への暴露によって細胞に誘発されたDNA損傷のうち、1本鎖または2本鎖の切断を検出する試験法。アガロースゲル中に包埋した細胞DNAの電気泳動像が、DNAの断片化によってコメット(彗星)のように尾を引くことから名付けられた。遺伝毒性試験の中では、DNA損傷までの初期過程を検出するインディケーター試験と位置づけられている。
- 注20) モニタリング検査:国が輸入食品について幅広く監視するため、食品衛生法第28条に基づいて行う検査のこと。検査は年間計画に基づいて実施され、検査結果の判明を待たずに輸入することが可能である。モニタリング検査によって食品衛生法違反となった場合は、当該食品の廃棄・積戻し、あ

るいは回収等の措置がとられる。https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/shokuhin/yunyu_kanshi/kanshi/index.html 参照

- 注21) ELISA法(Enzyme-Linked Immuno Sorbent Assay):酵素結合免疫吸着測定法。抗原抗体反応を利用して特異的に捕捉した微量成分を、酵素反応を利用して鋭敏かつ定量的に検出する。簡便・迅速で汎用性の高い検出法。酸化了的DNA損傷の一つである8-ヒドロキシ-2'-デオキシグアニン(8-OHdG)を検出する検知法が提案されている。脂質の特異的放射線分解生成物である2-アルキルシクロブタノン類の検出にも応用できる可能性がある。
- 注22) 二次元NMR(2-Dimensional Nuclear Magnetic Resonance、核磁気共鳴):シグナル同士の相関あるいは各シグナルのスピン分裂パターンを二次元に展開し、そのピークの強さを等高線図などにより表示する方法。
- 注23) 2D DOSY法(2-Dimensional Diffusion Ordered Spectroscopy、拡散整列分光法):パルス磁場勾配を利用して分子の拡散現象を観測する二次元NMR法で、多成分系の解析が可能。
- 注24) ジヒドロチミジン法:照射によってDNA中に生じる損傷ヌクレオシドの一つである5,6-ジヒドロチミジンを検出する方法である。最近では液体クロマトグラ

フ・タンデム型質量分析計が5,6-ジヒドロチミジンの検出に用いられている。5,6-ジヒドロチミジンは非照射の食品にはほとんど含まれていないため特異性が比較的高い。また、ほとんどの食品にはDNAが含まれているため、適用範囲が広い特徴がある。

参考資料

- WHO(世界保健機構), 照射食品の安全性と栄養適性。コープ出版(1996)
- 宮原誠, 食品照射検知法の現状. 食品照射, 37(1,2), 29-47 (2002)
- 林徹, 食品・農業分野の放射線利用. 幸書房(2008)
- 堤智昭ほか, 加工食品を対象としたアルキルシクロブタノン法(EN1785)の性能評価. 食品照射, 49(1), 9-15 (2014)
- 関口正行, 照射食品検知法の現状と新たな展開. 食品照射, 49(1), 17-32 (2014)
- Peter B. Roberts, Food irradiation: Standards, regulations and world-wide trade. *Radiation Physics and Chemistry*, 129, 30-34 (2014)
- 等々力節子, 食品照射とは一技術の概要及び評価と研究開発の歴史一. *RADIOISOTOPES*, 71(1), 55-62 (2022)
- 堤智昭, 放射線照射された食品の検知法について. *RADIOISOTOPES*, 71(2), 101-107 (2022)
- 日本アイソトープ協会, 食品照射の最前線 ~研究者が解説するQ&A (2024年3月全面改訂版). <https://www.jriias.or.jp/pdf/shokuhinshoushaQA.pdf>