

「食品照射」

の基礎知識と最新技術動向

芽止めと植物検疫

第3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

照射による殺虫・不妊化・芽止め

連載第2回で解説した放射線滅菌・殺菌技術は、食品・飲料容器や包装材の滅菌、スパイス・ハーブ類（香辛料）や乾燥食品素材、冷蔵・冷凍の食肉・魚介類などの微生物制御に利用されるほか、穀類の殺菌・防カビや害虫駆除にも利用できる。

図1はウクライナのオデーサ（オデッサ）港で稼働していた穀類用電子線照射施設である。ソビエト時代から年間40万トンの小麦などの殺虫処理を実施しており、ソ連崩壊後も使用されていた。1.2 MeV、20 kWの電子加速器2台を擁し、

2005年の処理量は約70,000トン（小麦42,000トン、大麦28,000トン）と報告されているが、現在は閉鎖されているようである。

また、穀類や青果物の害虫を駆除あるいは不妊化することによって、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を防止できる。ゾウムシ類による穀類の食害には、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。

熱帯果実や柑橘類の輸入に伴うミバエ類などの

害虫の国内への侵入防止のための植物検疫^{注1)}では、病害虫の発生確認により移動（輸出）が制限されている地域の青果物の消毒手段として照射処理を行うことで、その流通を解禁することができる。その場合は必ずしも病害虫を即死させる必要はなく、不妊化や産卵阻止によって輸入（侵入）後の病害虫の成育・繁殖を阻止できればよい。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。

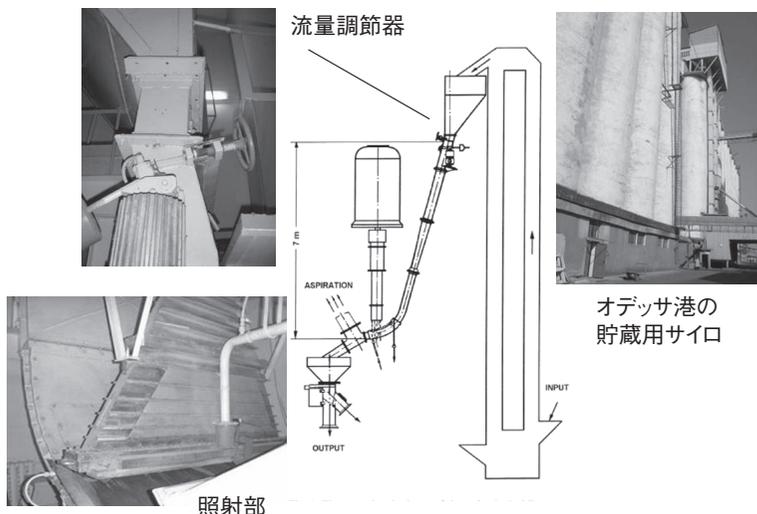


図1 ウクライナ・オデーサ（オデッサ）の穀類用電子線照射施設

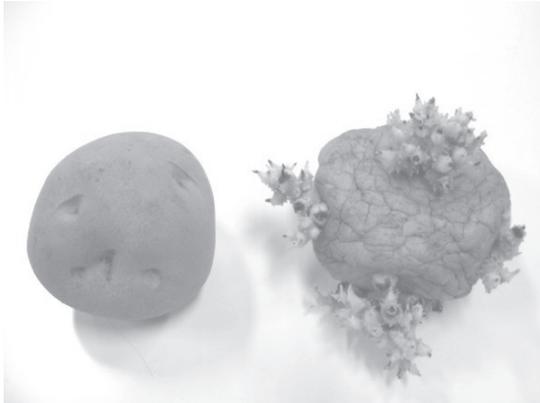


図2 照射芽止めジャガイモ(左)と非照射のジャガイモ(右)を常温で2ヶ月放置

病害虫を即死させるためには3～5 kGy程度が必要だが、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100～500 Gyで十分である。

さらに低い線量では、ジャガイモやニンニク、タマネギなどの芽止めができる(図2)。ジャガイモやニンニクの芽のもとになる部分は他の組織よりも放射線に感受性が高く、収穫後の適切な時期に適切な線量の放射線を照射するとその部分の細胞分裂が阻害される。そのため、芽が出ないままジャガイモやニンニクを新鮮な状態で保存できる。芽止めに必要な線量は、ジャガイモの場合は60 Gy、タマネギやニンニクでは20～150 Gyである。

JA 士幌町の照射芽止め馬鈴薯

日本では1967年に原子力特定総合研究の食品照射ナショナルプロジェクト研究^{注2)}として、厚生省国立衛生試験所(当時)などの国公立の研究機関を中心に、馬鈴薯と玉ねぎ(発芽防止)、米と小麦(殺虫)、ウインナーソーセージと水産練り製品(殺菌)、みかん(表面殺菌・防カビ)の7品目について照射技術、照射効果、毒性的・微生物学的安全性、栄養学的適格性などに関する総合的な研究が開始された。

1972年8月、厚生大臣からの諮問に対する食品衛生調査会の答申を受け、厚生省告示第285号によって食品衛生法の一部が改正され、馬鈴薯の放射線照射による発芽防止が許可された。それに合わせて照射基準の設定、許可営業としての食品衛生管理者の設置、照射した旨の表示義務、保健所による施設の査察などの政省令も整備された。

その際、従来は全く規制が存在しなかった照射食品を「許可」するための法的規制の手續きとして、食品衛生法に新たに「照射禁止規定」を導入し、ひとまず食品への放射線照射を原則的に「禁止」した後に、馬鈴薯に続いて食品照射ナショナルプロジェクト研究を進めていた玉ねぎなどの他の食品についても順次許可していく方針だった。

厚生省の許可を受け、北海道の士幌町農業協同組合の依頼により日本原子力研究所高崎研究所

表1 食品照射に関する記事の見出し

1967(S42) 3.23 読売新聞	原子力開発長期計画の内容 食品保存に放射線活用
1970(S45) 7.21 読売新聞	食品保存の放射線の害は? 試験結果では心配ない
1971(S46) 7.17 読売新聞	照射ジャガは無害 早ければ来年から市販
1977(S52) 1.22 北海道新聞	芽止め照射 腐敗、毒性抑止に成功
1977(S52) 2.15 読売新聞	照射ジャガは安全か 17日に集会、疑問ただす 販売の再検討も 消費者団体が業者など呼び
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
1977(S52) 2.18 毎日新聞	放射線照射ジャガイモ安全か 政府側とホットな対話集会 「回答、納得できぬ」 消費者側 ボイコット拡大へ
1977(S52) 2.20 朝日新聞	発芽防止の放射線照射ジャガイモ 消費者から不安の声「100%安全まで自衛」 不買申し合わせ団体も
1977(S52) 2.27 消費者レポート	照射食品には染色体傷害や異常を起こす物質ができる 照射食品を考える大集会
1977(S52) 4.21 新婦人しんぶん	照射じゃがいも はたして安全? 消費者は拒否反応 なぜいそぐ
1980(S55) 7.23 日経新聞	玉ねぎの放射線照射 安全性に問題ない 科技厅結論
1980(S55) 7.23 毎日新聞	放射線照射の玉ねぎ 食べても大丈夫 科技厅の研究会議が報告 消費者団体は反発

(当時)で照射施設の概念設計と実証試験が行われ、農林省による「農産物放射線照射利用実験事業」として馬鈴薯照射施設「土幌アイソトープ照射センター」が建設された。

1973年に完成した照射施設(連載第1回、図10参照)は、土幌町農協の馬鈴薯貯蔵施設、澱粉工場、マッシュポテト工場、スナック食品工場(ポテトチップ等)、冷凍食品工場(フレンチフライ等)などから構成される馬鈴薯加工コンビナートの一画にある。

最大30万キュリー^{注3)}のコバルト60線源を用いて1日に最大350トンの馬鈴薯を照射し、年間(3カ月稼働)で3.5万トン処理できるように設計され、1974年春の端境期から芽止め馬鈴薯の出荷が始まった。

照射馬鈴薯ボイコット騒動とその報道

しかし1976年頃から一部の消費者団体が「安全性に疑問がある」などとして照射馬鈴薯反対運動を始め、翌年には政治家や報道機関を巻き込んだボイコット騒動に発展し、毎日のように報道された。

その当時の新聞雑誌での食品照射に関する記事の見出しを抜粋して表1に示す。当初は食品照射を歓迎し、その活用を期待していた論調が、1977年の2月中旬から急に批判的になったことがわかる。

食品照射研究に携わってきた大学や国立研究機関の研究者は、自分たちは生産者でも事業者でもなく、むしろ「消費者」に属すると思っていたので、おおいに混乱し当惑したという。それでも科学的に正しい知識を丁寧に伝えれば誤解は解けると素朴に考えて、学問的レベルで論争しようと真摯に呼びかけたが、その期待は裏切られた。

日本消費者連盟の『消費者リポート』1977.2.27付記事のリード文には「原子力が“平和利用”にこんなに役立っているというPRのためであり」と書かれ、同4.21付の『新婦人しんぶん』記事本文には「原発事故から人びとの目をそらし、平和利用を宣伝するために、急いで実用化にふみきる姿勢に改めて疑問を感じざるをえません」とあ

る。振り返ってみれば、これらの動きは、本来の意味での「消費者」ではなく、日本消費者連盟のような一部の「消費者団体」によって周到に用意され、組織化された、政治的な運動だったことが分かる。

その後、1980年に食品照射ナショナルプロジェクト研究第2弾として照射玉ねぎの安全性や有用性に関する研究成果が報告されたが、以後、現在に至るまで、行政当局が実用化に向けて動くことはなかった。

その後も土幌町農協は、「放射線照射ジャガイモの販売中止要請および公開質問状(照射食品反対連絡会)」のような嫌がらせを受けながらも約50年間にわたって毎春の端境期に注文に応じて照射芽止めジャガイモを出荷し、高品質のジャガイモの周年安定供給に貢献してきた。

その出荷量は、2005年産までは約7~8千トンで推移していたが、2006年産からはガンマ線照射に関する店頭での表示(図3、4)を確約し



図3 照射馬鈴薯「芽どめじゃが」の表示



図4 店頭で小分け販売する際のシール

た販売店に限定して出荷することにしたため、一時は年3千トン台に落ち込んだ。

店頭で『ガンマ線照射』という表示を目にした消費者からは、「害はないのか」といった問い合わせもあったが、一方で「おいしかった」「芽止めされていてよい」「小さなコロ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」などの感想も寄せられ、照射馬鈴薯のメリットが消費者にもある程度は伝わっていることが伺えたという。

その後、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トンと回復してきた馬鈴薯芽止め処理事業であるが、最近の処理量は約3,000トン/年に減少し、残念ながら2022年春の出荷分で終了となった。現在、日本国内で食品への放射線照射は行われていない。

ニンニク萌芽抑制剤の登録失効の衝撃

従来ニンニクの芽止めに使われていたマレイン酸ヒドラジド液剤（エルノー）の農薬登録が2002年に失効して使用できなくなった時、青森県など国内のニンニク産地ではパニック状態になったと報道された。

萌芽・発根したニンニクは商品価値がなくなるため、年間を通じて安定的に出荷するには芽止め剤の散布が不可欠だった。ニンニク農家では、夏に収穫・乾燥した後、冬の農閑期を利用して調整しながら出荷していたが、それも難しくなる。また、失効したエルノーに代わる農薬はなく、ニンニクの出荷が一時期に集中して価格が暴落することが予想された。さらに、国内産ニンニクに端境期が生じたことによる輸入ニンニクの急増も懸念された。

ニンニクの芽止めにはガンマ線照射が非常に有効で、中国や韓国では実用化され、中国では2005年に約8万トンのニンニクが照射芽止めされている。日本でも照射がすぐに許可されれば問題は解決したかもしれないが、その見通しが全く立たず、また「照射ニンニク」に対する消費者の不安や反発を懸念したこともあって、結果的には収穫後のニンニクを氷

点下2～3℃、酸素濃度3%以下の低温・低酸素雰囲気^{注4)}で貯蔵するための大規模なCA貯蔵庫^{注4)}を建設し、さらに低温貯蔵の前後に乾熱処理する方法を工夫して対応することになった。それでも出荷後2～3週間で発芽してしまうとのことである。

もし、日本でもニンニクの照射芽止めが速やかに許可される可能性があって、それを前提に、ニンニクの産地に新しく芽止め照射施設をつくる案とCA貯蔵庫をつくる案とを比較して、どちらの方法で出荷されるニンニクの品質が優れているのか？費用対効果はどうか？夏に収穫した青森産のニンニクを、逆に夏場は遊んでいる北海道士幌町の馬鈴薯照射施設に運んで照射することは可能か？などの合理的・現実的な検討ができていたら、生産者と消費者の双方の利益になったかもしれないのだが・・・

後日、ガンマ線照射によるニンニクの萌芽・発根抑制効果についての研究者による実験観察と並行して、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」の有志が各家庭で実際に照射ニンニクを保存して継続的に観察した。そのレポートが下記URLに掲載されているので、興味のある方にはぜひご覧いただきたい。

- 食のコミュニケーション円卓会議・ガーリック通信No.1「青森産のにんにくの体験実験レポート（その1）」(2009.9.30)
<https://food-entaku.org/img/file99.pdf>
- 同No.2「青森産のにんにくの体験実験レポート（その2）」(2009.10.14)
<https://food-entaku.org/img/file100.pdf>
- 同No.11「感無量ののにんにく最終観察記」(2010.5.10)
<https://food-entaku.org/img/file109.pdf>
- 小林泰彦ほか「放射線照射によるニンニクの萌芽発根抑制効果」食品照射.45(1,2),26-33(2010)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jrafi/45/1_2/45_1_2_26/_pdf/-char/ja

海外ではニッチな 商業照射が継続

海外ではスパイス・ハーブ類（香辛料）や乾燥食品素材の照射殺菌こそ一般的になっているが、それ以外にはフランスやベルギーの冷凍カエル脚、米国の照射ビーフバーガーパテなど、ニッチなニーズに対する小規模な商業照射が継続している状態と言える。

やや古いデータだが、2005年現在の世界全体の食品照射処理量は年間約40万トンと推定されている（図5）。そのうち殺菌目的の照射では、香辛料・乾燥野菜など食品原材料が約19万トン、冷凍エビなどの水産物が1万4千トン、牛挽肉や鶏肉、カエル脚などの肉類が1万1千トンであった。

図5の品目別処理量の中で2番目に多い「ニンニク・馬鈴薯 8.8万トン」は芽止めのための照射処理で、この中には土幌町農協の馬鈴薯の2005年の処理量8千トンが含まれている。「その他、1.7万トン」には、蜂蜜、卵、キノコ、健康食品およびその原料などが含まれる。

2013年11月に中国・上海で開催された第17回放射線プロセス国際会合（IMRP2013：17th

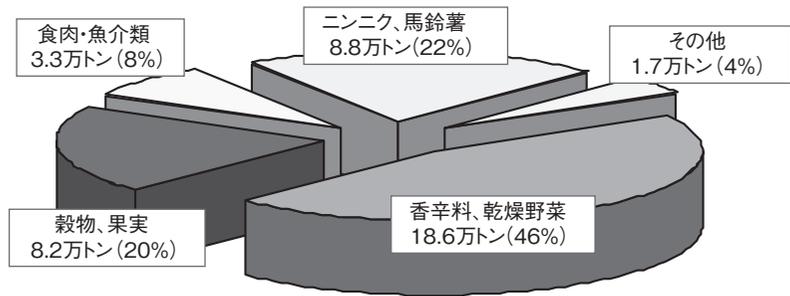


図5 世界における照射食品の品目別処理量(2005年)

International Meeting on Radiation Processing) における講演内容や国連食糧農業機関（FAO）と国際原子力機関（IAEA）の共同プログラムの一つであるIAEA/RCA^{注5)}食品照射プロジェクト（RAS/5/057）^{注6)}における会議報告などを総合すると、2013年現在の世界全体の食品照射処理量は年間約100万トンと推定された。

その後、日本、韓国、ヨーロッパ連合（EU）では、照射した旨の「表示」の厳格化が影響したためか、年々処理量が減少しているが、それ以外の国々では増加が続いており、特に中国やベトナムでの増加が著しい。

2020年9月に開始されたIAEA/RCA食品照射プロジェクト会議での報告を元に、アジア・太平洋地域のRCAメンバー国の2020年の照射処理量を表2に示す。ただし、中国は同会議に欠席だったため、別のソースからの情報に基づいて

表2 アジア・太平洋地域の食品照射実施状況(2020)

国名	数量(トン)		主な品目
	2020年		
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		スパイス・調味料、穀物、豆類、マンゴー、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		馬鈴薯
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、マンゴー、生鮮果実野菜
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		生鮮及び冷凍魚介類、ハーブ、スパイス、穀物、生鮮果実、ペットフード
小計	147,616		
中国*	1,000,000		スパイス・チキン(味付け鶏脚/手羽先スナック)、乾燥野菜、スパイス、調味料、ペットフード

*中国は2020年9月のIAEA/RCA食品照射プロジェクト会議欠席のため別のソースからの情報に基づいて記載

表3 EU域内における国別照射処理量と主な品目(2020~2021)

国名	数量(トン)	主な品目
	2020~21年	
ベルギー	4,173	冷凍カエル脚、食鳥肉、乾燥血液・血漿類
チェコ	30	乾燥ハーブ、スパイス、香味野菜
ドイツ	89	乾燥ハーブ、スパイス、香味野菜
スペイン	113	乾燥ハーブ、スパイス、香味野菜
エストニア	84	乾燥ハーブ、スパイス、香味野菜
フランス	274	冷凍カエル脚、乾燥ハーブ、スパイス、香味野菜
クロアチア	23	乾燥ハーブ、スパイス、香味野菜
ハンガリー	212	乾燥ハーブ、スパイス、香味野菜
オランダ	9	乾燥ハーブ、スパイス、香味野菜
ポーランド	24	乾燥ハーブ、スパイス、香味野菜
EU計	5,029	

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52023DC0676&qid=1714875944591>

推定したものである。この地域は世界で最も積極的に食品照射の実施を展開しており、2005年の処理量は18万トン、2010年には28万トンと増加し、2020年は100万トン以上になると推測されている。その大部分は中国が占め、処理量は世界1位であり、ベトナムがそれに続いている。

EUの公式HPで2023年10月27日に更新されたEU域内における2020~2021年の照射処理量を表3に示す。ただし、これはEU域内での「照射処理量」であり、域外から輸入された照射食品の流通量や消費量は不明である。

このような状況の中で、近年、植物検疫処理としての食品照射技術の利用が商業規模で開始され、国際貿易での流通量が年々拡大している。これは、グローバル化が進む食品のサプライチェーンに乗ってミバエのような害虫が新たな地域へ侵入・拡散して農業生産に打撃を与えることを防ぐための処理であり、海外では蒸熱処理^{注7)}、低温処理^{注8)}、臭化メチル^{注9)}などによる燻蒸処理^{注10)}と並んで放射線照射が採用されている。

照射による植物検疫処理の増加

植物検疫(Plant Quarantine)とは、植物の輸出入に伴い、植物の害虫がその植物に付着して侵入しないように、輸出入の時点で検査を行い、検査の結果消毒などの必要な措置(Phytosanitary Measures)をとることである。

農林水産省では、植物防疫法に基づき、農業生

産の安全および助長を図ることを目的として、病虫害の侵入防止を図るため、輸入される植物等の検査等(輸入植物検疫)や輸出先国・地域の要求に応じた植物等の検査等(輸出植物検疫)を実施している。また日本への侵入を特に警戒している病虫害について、

侵入調査や防除等(国内植物検疫)を行っている。これらの植物検疫に関する措置は、WTO/SPS協定(衛生植物検疫措置の適用に関する協定)^{注11)}や国際植物防疫条約(IPPC)^{注12)}などに従い、科学的根拠と国際基準に基づいて実施されている。

海外では、国際植物防疫条約(IPPC)に基づく「植物検疫措置に関する国際基準」(ISPM)^{注13)}の下で、適用品目が限定される蒸熱処理^{注7)}や低温処理^{注8)}、オゾン層を破壊する臭化メチル^{注9)}による燻蒸処理^{注10)}などに代わる新たな方法として、病虫害の成育阻止と繁殖阻止(成虫の不妊化や産卵阻止)を目的とする照射処理の導入が進み、照射検疫処理による熱帯果実などの生鮮物の国際流通が増加しつつある。

臭化メチル(Methyl Bromide)は多種類の病虫害および雑草に対して安定した効果を発揮する優れた薬剤で、輸出入植物・木材の検疫燻蒸や土壌消毒に広く利用されてきた。1992年のオゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書締約国会合でフロンなどと同様にオゾン層破壊物質^{注14)}に指定されたが、一部の土壌燻蒸や植物検疫などの臭化メチルが必要不可欠な処理については『不可欠用途』として使用が認められている。

しかし、近年、地球環境保護の観点から、不可欠用途であっても全廃すべきという国際的な動きが進んでおり、使用量の削減や代替剤への転換による臭化メチルの排出削減が求められている。

照射検疫処理の利点

放射線照射による植物検疫処理には、臭化メチルの排出削減に貢献する他に、図6に示すような特徴と利点がある。

図6で例に挙げた低温処理の処理基準(PT26～29)は、「植物検疫措置に関する国際基準(ISPM)」^{注13)}の一つであるISPM28「規制有害動植物に対する植物検疫処理」の付属書によって定められたもので、対象となる害虫が寄生するホスト農産物の種類、果実の中心温度、および処理時間などの条件が実験データに基づいて規定されている。

果実の大きさが異なれば、当然、その中心温度が処理条件に達するまでの時間も異なるため、予備試験が欠かせない。また、本稿では具体例の紹介は割愛するが、ヨウ化メチルなどの代替薬剤を用いた燻蒸処理は、密閉された容器内で気体の薬剤を対象に浸透させる処理方法のため、果実外皮の性質や状態、その大きさ(農産物内部の病害虫の寄生部位までの深さ)だけでなく、様々な梱包資材(ダンボール箱や包装フィルム、緩衝材など)への薬剤の吸着による効果の減弱など、実際の出荷の状態に合わせて検討すべき要素が多くあり、煩瑣であること極まりない。その点、照射処理では、病害虫に対する吸収線量だけで処理効果が決まるのである。

近年、植物検疫処理としての利用が商業規模で開始され、年々流通規模が拡大している理由の一つは、このような照射処理の利点が理解されてきたことである。

2022年に開催された国際会議(IMRP20: International Meeting on Radiation Processing)では、メキシコから米国向けのマンゴーとオレンジの2022年の見込み照射処理量は約4万トン、豪州からニュージーランドおよび米国向けのブドウとマンゴーは同じく約9千トンと報告されている。

2023年5月現在、植物検疫措置に関する国際基準(ISPM)^{注13)}の一つであるISPM28「規制有害動植物に対する植物検疫処理」^{注15)}の付属書

- ✓ 連続処理が可能で、処理時間が短い
- ✓ 温度がほとんど変化せず、処理後の品質が良好
- ✓ 薬剤を使わないので、残留ガスの放出や残留検査が不要
- ✓ 効果は線量だけで決まり、工程管理が容易で再現性が良い
- ✓ ホスト農産物によらず同じ条件で広範に適用できる

● Ceratitis capitata(チチュウカイミバエ)の羽化防止の処理基準(例)

PT14	放射線照射	100 Gy	当該害虫が寄生する全ての果物、野菜
PT26/1	低温処理	中心温度 2℃≥ 16日	<i>Citrus limon</i> (レモン)
PT26/2	低温処理	中心温度 3℃≥ 18日	<i>Citrus limon</i> (レモン)
PT27/1	低温処理	中心温度 2℃≥ 19日	<i>Citrus paradise</i> (グレープフルーツ)
PT27/2	低温処理	中心温度 3℃≥ 23日	<i>Citrus paradise</i> (グレープフルーツ)
PT28	低温処理	中心温度 2℃≥ 23日	<i>Citrus reticulata</i> (マンダリンオレンジ)
PT29	低温処理	中心温度 2℃≥ 16日	<i>Citrus clementina Hort. ex Tanaka</i> (クレメンティン)

低温処理: 同じ害虫でもホスト農産物の種類や大きさが処理基準が異なる
照射処理: どんなホスト農作物でも、満たすべき基準は「吸収線量」だけ

図6 照射による植物検疫処理の特徴と利点

には45本の病害虫に対する処理基準が採択されており、そのうち表4に示す23本が照射処理による基準で、他は低温処理14本、蒸熱処理5本、蒸熱処理+ガス置換処理1本、フッ化スルフル燻蒸処理2本である。

コーデックス国際食品規格で食品への照射が認めているX線のエネルギー上限(5 MeV)については、電子線からX線への変換効率を上げるとともに対象物への透過性を向上させる目的でISPM18「植物検疫措置としての放射線照射の利用の要件」^{注16)}では2023年の改訂で7.5 MeVに変更されており、米国、カナダ、インド、インドネシアおよび韓国では国内規制を7.5 MeVに変更している。

日本では2018～19年に農林水産省の「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シンクイガの照射殺虫試験と果実障害試験が実施され、品質と商品価値を保ちながら効果的に殺虫できることが確認されている。そして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ている。しかし、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。

前回の連載第2回で予告した不妊虫放飼法による野外の害虫防除については、次回以降で解説する。

表4 ISPM28付属書に定められた放射線照射による植物検疫処理基準

付属書番号	害虫(学名)	害虫(和名)	品目	線量	効果
1	<i>Anastrepha ludens</i>	メキシコミバエ	果実・野菜	70 Gy	羽化阻止
2	<i>Anastrepha obliqua</i>	ニシインドミバエ	果実・野菜、ナッツ	70 Gy	〃
3	<i>Anastrepha serpentina</i>	ウスグロミバエ	果実・野菜	100 Gy	〃
4	<i>Bactrocera jarvisi</i>	ミバエの一種(和名なし)	果実・野菜	100 Gy	〃
5	<i>Bactrocera tryoni</i>	クインスランドミバエ	果実・野菜	100 Gy	〃
6	<i>Cydia pomonella</i>	コドリंगा	果実・野菜	200 Gy	〃
7	Fruit flies of <i>Tephritidae</i>	ミバエ科のミバエ	果実・野菜	150 Gy	〃
8	<i>Rhagoletis pomonella</i>	リンゴミバエ	果実・野菜	60 Gy	蛹化阻止
9	<i>Conotrachelus nenuphar</i>	スモモゾウムシ	果実・野菜	92 Gy	成虫不妊化
10	<i>Grapholita molesta</i>	ナシヒメシンクイ	果実・野菜	232 Gy	羽化阻止
11	<i>G. molesta</i> (低酸素下)	〃	果実・野菜	232 Gy	産卵阻止
12	<i>Cylas formicarius</i>	アリモドキゾウムシ	塊根・野菜	165 Gy	次世代成虫成育(羽化)阻止
13	<i>Euscepes postfasciatus</i>	イモゾウムシ	塊根・野菜	150 Gy	〃
14	<i>Ceratitis capitata</i>	チチュウカイミバエ	果実・野菜	100 Gy	羽化阻止
19	<i>Dysmicoccus neobrevipes</i> , <i>Planococcus lilacius</i> , <i>P. minor</i>	バナナコナカイガラムシ、 イワンコナカイガラムシ、 ニセミカンコナカイガラムシ	果実・野菜	231 Gy	雌成虫不妊化
20	<i>Ostrinia nubilalis</i>	ヨーロッパアワノメイガ	果実・野菜	289 Gy 343 Gy	次世代(幼虫成育、卵 孵化)阻止
33	<i>Bactrocera dorsalis</i>	ミカンコミバエ	果実・野菜	116 Gy	羽化阻止
38	<i>Carposina sasakii</i>	モモシンクイガ	果実・野菜	228 Gy	正常羽化阻止
39	Fruit flies of genus <i>Anastrepha</i>	<i>Anastrepha</i> 属ミバエ	果実・野菜	70 Gy	羽化阻止
40	<i>Tortricidae</i>	ハマキガ科	果実	250 Gy	羽化阻止
42	<i>Zeugodacus tau</i>	セグロウリミバエ	果実・野菜	72 Gy	羽化阻止
43	<i>Sternochetus frigidus</i>	ゾウムシ科の一種	果実・野菜	85 Gy	産卵阻止
45	<i>Pseudococcus jackbeardsleyi</i>	ビーズレイコナカイガラムシ	全ての果実、 野菜、観葉植物	165 Gy	次世代の2齢幼虫への 発育阻止

*全45本の基準のうち、本表の23本が放射線照射処理。他に低温処理14本、蒸熱処理5本、蒸熱処理+ガス置換処理1本、フッ化スルフルル燻蒸処理2本。
出典:土肥野利幸, 食品照射の現状と展望 (4)植物検疫の仕組みと放射線照射処理の国際基準. RADIOISOTOPES,71(2), 93-99 (2022) ほか

注1) 植物検疫 (Plant Quarantine) : 植物の輸出入に伴い植物の病害虫がその植物に付着して侵入しないように輸出入の時点で検査を行い、検査の結果消毒などの必要な措置 (Phytosanitary Measures) をとること。農林水産省では、植物防疫法に基づき、農業生産の安全及び助長を図ることを目的として、病害虫の侵入防止を図るための輸入される植物等の検査等 (輸入植物検疫) や輸出先国・地域の要求に応じた植物等の検査等 (輸出植物検疫) を実施している。また、日本への侵入を特に警戒している病害虫について侵入調査や防除等 (国内植物検疫) を行っている。植物検疫に関する措置は、WTO/SPS協定 (衛生植物検疫措置の適用に関する協定) や国際植物防疫条約 (IPPC) 等に従い、科学的根拠や国際基準に基づいて実施されている。

注2) 原子力総合特定研究の食品照射ナショナルプロジェクト研究: 食品照射の早期実用化を促進すべく、原子力委員会が昭和42年9月に指定した研究。食品照射開発基本計画が策定され、これにもとづき国立試験研究機関、日本原子力研

究所(当時)、理化学研究所等において7品目(ガンマ線による馬鈴薯と玉ねぎの発芽防止、米と小麦の殺虫、水産ねり製品とウインナーソーセージの殺菌、電子線によるみかん表面のカビ殺菌) について研究開発が進められた。

注3) キュリー (curie, 単位記号 Ci) : 放射能を表す非SI単位。1キュリー = 3.7×10^{10} ベクレル (37ギガベクレル = 370億ベクレル)。歴史的には、放射能研究の先駆者であるキュリー夫妻 (Pierre Curie, Marie Curie) に因んで1グラムのラジウム226 (^{226}Ra) の放射能を1キュリーと定めたことに由来する。

注4) CA貯蔵 (Controlled Atmosphere Storage) : 通常の冷蔵機能に加えて、気密性の高い貯蔵庫内の空気の組成を「低酸素・高二酸化炭素」の状態に調節し、保管する野菜や果物の呼吸作用を抑えて品質の低下を防ぐ貯蔵方法。

注5) IAEA/RCA (International Atomic Energy Agency/Regional Cooperative Agreement for Research, Development and Training Related to Nuclear Science and Technology for Asia

and Pacific、国際原子力機関 / 原子力科学技術に関する研究、開発及び訓練のための地域協力協定) : 国際原子力機関 (IAEA) が推進する原子力の平和利用促進における加盟国間の技術協力活動の一つで、アジア・太平洋地域の開発途上国を対象とした原子力科学技術に関する共同の研究、開発及び訓練の計画やその他の協力活動を促進及び調整することを目的とする。

注6) 食品照射プロジェクト RAS/5/057 : IAEA が FAO (世界食糧機関) と共同で 2012 年から開始したプロジェクト。正式名称は、Implementing Best Practices of Food Irradiation for Sanitary and Phytosanitary Purposes (衛生および植物検疫を目的とした食品照射規範の実施について)。

注7) 蒸熱処理 : 高温の水蒸気を利用して虫を殺す植物検疫処理の一つ。庫内を飽和水蒸気で満たして処理を行うため、気化熱が奪われることによる果実温度の低下や果実の萎凋がなく、果実温度を均等に上げることができる。蒸熱処理による消毒基準は、100% 殺虫できる温度と時間、果実の商品性を損なわない温度と時間という、相反する条件の接点を探索して決められる。ミバエ類の寄生している生果実の消毒には通常 43 ~ 48℃ の温度が用いられているが、果実の種類によって高温耐性が異なるため、例えば、ミバエ類を対象にパパイヤ、マンゴー等の果実中心温度 45 ~ 47.5℃、10 ~ 70 分間処理などの条件が ISPM28 の付属書で規定されている。

注8) 低温処理 : 主に、有害動植物が内部に寄生する生鮮物に対して用いられる。船舶の冷蔵船室や冷蔵海上コンテナを用いた輸送中に適用することもできる。例えば、ミバエ類を対象にオレンジ、グレープフルーツ等かんきつ類の果実中心温度、1 ~ 3℃、14 ~ 23 日間処理などの条件が ISPM28 の付属書で規定されている。

注9) 臭化メチル (Methyl Bromide, CH₃Br) : 農作物への被害が少なく、多種類の病害虫や線虫、糸状菌、ウイルスに対して安定した効果を発揮する極めて汎用性のある農薬。常温常圧で気体である性質を利用して倉庫や土壌中でガス化させ、収穫後のクリに潜むクリシギゾウムシの殺虫や土壌中の消毒などに広く利用されてきた。爆発性・引火性がなく取扱いが容易。しかし、1992 年に「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」第 4 回締約国会合においてオゾン層破壊物質に指定され、1995 年以降は検疫用途を除きその製造・使用が国際的に規制されることになり、日本を含む先進諸国では同締約国会合で承認された特別の用途 (検疫用途、緊急用途、不可欠用途) を除き 2005 年までに、発展途上国では 2015 年までに、原則廃止することが決定されている。

注10) 燻蒸処理 : 主に害虫駆除や防カビ・殺菌の目的で、気体の薬剤を対象に浸透させる処理方法。燻

蒸は密閉した無人の状態で行われ、燻蒸終了後は人が入る前に十分に換気される。従来、植物検疫処理における燻蒸剤としては、効力と使用性の良さから臭化メチルが多用されてきたが、これがオゾン層破壊物質であるとされたため、物理的な方法も含む代替法への転換が勧告されている。他の燻蒸剤としては、リン化水素 (Phosphorus hydride, PH₃, 別名 : ホスフィン)、ヨウ化メチル (Methyl Iodide, CH₃I)、フッ化スルフリル (Sulfonyl difluoride, SO₂F₂) 等がある。

注11) WTO/SPS 協定 (World Trade Organization / Sanitary and Phytosanitary Measures) : WTO (世界貿易機関) 協定に含まれる協定 (附属書) の一つ。各国が食品の安全性を確保したり、動物や植物が病気にかからないようにしながらも、公正な国際貿易を担保するための国際的なルール。検疫だけでなく、最終製品の規格、生産方法、リスク評価方法など、食品安全、動植物の健康に関する全ての措置 (SPS 措置) を対象としている。

注12) 国際植物防疫条約 (IPPC : International Plant Protection Convention) : 植物類の病害虫の国際間での移動の防止、病害虫防除のための適切な措置を執るための国際的手続きを取り決めた条約。日本を含め現在 180 以上の国と地域が加盟している。

注13) 植物検疫措置に関する国際基準 (ISPM : International Standard for Phytosanitary Measures) : 国際植物検疫条約 (IPPC) が定めた国際基準。WTO/SPS 協定の下で植物検疫措置に関する唯一の国際基準と位置づけられている。2024 年 1 月現在、47 の国際基準が採択されており、これらには植物検疫の原則や定義、病害虫のリスク分析、植物検疫証明システムなどの輸出入規制、放射線照射も含む種々の植物検疫処理の要件や具体的基準、病害虫診断のプロトコルなどが含まれている。

注14) オゾン層破壊物質 : 人間活動により排出され、成層圏オゾン層を破壊する物質。塩素原子や臭素原子を含有し、大気中の寿命が極めて長いもの。対流圏大気中に蓄積した後、大気の運動を通じて成層圏に輸送され、そこでオゾン層で遮蔽されない短波長の太陽紫外線によって分解され、反応性の高い物質に変換され、さらに、連鎖反応により成層圏オゾン層を破壊する。「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」(1987 年) によって規制対象とされたオゾン層破壊物質は、わが国では「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律」において「特定物質」として規制されている。具体的には、クロロフルオロカーボン (CFC)、ハイドロクロロフルオロカーボン (HCFC)、ハロン (臭素を含むハロゲン化炭化水素の総称)、四塩化炭素 (テトラクロロメタン, CCl₄)、1,1,1-トリクロロエタン、ハイドロプロモフルオロカーボン (HBFC)、プロ

モクロロメタン (CH₂BrCl)、臭化メチル (CH₃Br) である。

- 注 15) ISPM28 「規制有害動植物に対する植物検疫処理」: 国際植物検疫条約 (IPPC) が定める ISPM の一つで、植物検疫処理の国際的調和を図るために策定されたガイドライン。加盟国から提案される植物検疫処理基準案に関し、その有効性データや関連情報の提出、その評価について定めている。具体的な個別の植物検疫処理の条件は、植物検疫処理に関する技術パネル (TPPT: Technical Panel on Phytosanitary Treatments) で素案作成後、加盟国での検討を経て、IPPC 年次総会で採択される。この個別の病害虫に対する処理基準は、この ISPM28 の付属書とされ、植物検疫処理に関する国際基準とみなされる。
- 注 16) ISPM18 「植物検疫措置としての放射線照射の利用の要件」: 植物検疫措置に関する国際基準 (ISPM) の一つで、規制有害動植物及び規制品目を対象にした植物検疫処理としての放射線照射に関する技術指針を提供している。具体的には、放射線照射の目的 (有害動植物に対して達成されるべき効果)、利用可能な線源を含む放射線照射の適用方法、線量測定、仕様への適合状況の確認手順、施設要件、文書化、検査と植物検疫当局の責務等について述べている。

参考資料

- 日本食品照射研究協議会, ボイコット騒動の経過とその対応, 食品照射,12(2),45-91(1977)
- 亀山研二, “ばれいしょ” の実用照射プラントの現状と問題点 もう一步・・・消費者・行政の理解, 食品照射,16(1,2),47-52(1981)
- 久米民和, 世界における食品照射の処理量と経済規模, 食品照射,43(1,2),46-54(2008)
- 等々力節子, 報道された食品照射情報, 食品照射,49(1),128-130(2014)
- 等々力節子, 各国の食品照射の現状 (2013 年後半～2015 年前半), 食品照射,50(1),47-58(2015)
- 照射食品反対連絡会, 放射線照射ジャガイモの販売中止要請および公開質問状 (2018 年 4 月 20 日) <http://www.sih.jp/news/syousya/no107.htm>
- 等々力節子, (1) 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,(2) 食品照射の実用状況と消費者の受容,RADIOISOTOPES,71(1),63-83(2022)
- 土肥野利幸,(4) 植物検疫の仕組みと放射線照射処理の国際基準 ,RADIOISOTOPES,71(2),93-99(2022)
- M.Kikuchi *et al.*, Effects of γ -irradiation as phytosanitary treatment on the quality of Japanese fruits and the survival of their regulated pests, Radiation Physics and Chemistry,208,110918(2023)