

「食品照射」

の基礎知識と最新技術動向

照射食品の健全性評価と国際規格

第6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

照射食品の「健全性」評価

健全性とは、食品の毒性学的・微生物学的安全性に加えて栄養学的適格性の観点も含めた、より広い概念である。

毒性学的安全性とは、食品の急性毒性、慢性毒性、発がん性、遺伝毒性、細胞毒性、催奇形性、変異原性などに関する安全性であり、照射食品の場合には照射による誘導放射能^{注1)}の生成も考慮される。

微生物学的安全性とは、照射食品に生残する微生物叢の変化による有害微生物の生育への影響や、照射による微生物の突然変異によって引き起こされる毒素生産能や放射線抵抗性の増強などの可能性を考慮した安全性を指す。

栄養学的適格性とは、照射食品に含まれる主要栄養素や微量栄養素などが、栄養という観点から食品として必要な要件を十分に備えていることである。

照射食品の健全性は、長い年月をかけて得られた膨大な試験結果に基づいて評価され、国際機関をはじめ多くの国々で公式に確認されている。すなわち食品照射は、これらの観点から最もよく検討され国際的に標準化された食品処理技術と言える。

国内外での照射食品の健全性評価と規格・基準制定などの経緯については、本連載の第1回（2024年5月号）の表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」を参照されたい。

国際的な評価体制

照射食品の健全性を国際的に評価しようとする動きは1960年代初めに始まった。1961年に国連のFAO（国連食糧農業機関）^{注2)}、IAEA（国際原子力機関）^{注3)}、WHO（世界保健機関）^{注4)}の3機関が連携して法規制に必要な照射食品の健全性の証明のための技術的な方法論と試験方法等の国際的な議論を開始し、1969年に「FAO/IAEA/WHO 照射食品の健全性に関する合同専門委員会（JECFI）」が発足した。

当時はまだ放射線化学反応について知見が不十分で、食品成分の放射線分解^{注5)}で生じる種々の生成物の種類や量が明らかになっていなかった。そのため、動物試験による照射食品の健全性評価は、食品添加物と同様の考え方で、異常検出の感度を上げるためにヒトの食事からの平均摂取量の100倍量の照射食品をラットやマウスに与える試験を行うことで合意された。

食品添加物との違い

しかし、一般に単一化合物を食品中に極微量だけ添加して使用する食品添加物の試験とは異なり、大量の照射食品そのもの（または対照の非照射

射食品そのもの)を動物に食べさせることになるため、栄養障害が原因となって実験動物に異常が観察されるなどの問題が生じた。また、滅菌線量未滿の照射食品には雑菌が生残しているため、これを飼料に混ぜて飼育した場合は元々の微生物汚染による影響が生じる可能性もあった。さらに、実際の食品は種類が膨大であり、中には香辛料のように動物試験を行いにくいものもあった。

そこで、動物試験による照射食品の健全性評価では、1) 観察された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) 他の要因による見かけ上の影響ではないか、以上の4点について考察する必要があるというのが共通認識となった。健全性評価の研究は多岐にわたり品目も多いため、国際的な協力も必要とされた。

国際食品照射プロジェクト(IFIP)と合同専門家委員会(JECFI)

1970年にFAO、WHO、IAEA および OECD^{注6)}が協力して International Project in the Field of Food Irradiation (国際食品照射プロジェクト: IFIP)が開始された。このプロジェクトには米国、英国、フランス、旧西独、オランダ、ハンガリー、日本など24カ国が参加し、動物を用いた毒性学的試験や放射線分解生成物に関する研究が1980年まで分担して実施された。

この国際プロジェクトによって放射線分解生成物の種類や量が明らかになってきたため、FAO/IAEA/WHO 合同専門家委員会(JECFI)は1976年に「食品の放射線処理は加熱や冷凍処理など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」との見解を示した。

1977年には飼料の放射線殺菌に関するFAO/IAEAの専門家会議が開催され、50 kGyまでの照射は飼料としての安全性に問題がないと勧告した。当時、実験動物用飼料の放射線滅菌がヨーロッパや日本で実用化されており、25～60 kGy照射された飼料の方が高圧蒸気滅菌(オートクレーブ)飼料よりも動物の飼育成績が良好だったためである。

FAO/IAEA/WHOの安全宣言

そして1980年に開催されたFAO/IAEA/WHO 合同専門家委員会の第3回会議では、国際食品照射プロジェクト(IFIP)の検討結果を踏まえ、「10 kGy以下の総平均線量でいかなる食品を照射しても、毒性学的、微生物学的、栄養学的に全く問題がない。今後はこの線量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。

さらに1992年、WHOは10 kGyまでの照射食品の健全性について米国食品医薬品局(FDA)^{注7)}の収集データ等も合わせた再評価を行い、「10 kGy以下の照射食品は健全である」というJECFIの結論を再確認した。そして1994年に照射食品の安全性と栄養適性に関して最新の科学的知見をまとめたWHOの報告書^{注8)}が出版され、邦訳も出ている。

吸収線量 10 kGy 以上の照射食品

前節での「10 kGy以下」という限定は、1980年当時は食品照射の主な応用例は10 kGy以下で、健全性に関するデータも10 kGy以下が中心だったことによるもので、それを超えると有害になるとような現象が観察されたわけではない。

その後、10 kGy以上の照射が必要な事例が現れるとともに、10 kGy以上照射された食品の健全性を証明する科学的データも蓄積されてきたため、1997年にはWHOの「高線量照射に関する専門家委員会」が10 kGy以上の照射食品の評価を実施した。その結果、「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(健全性に問題はない)」と結論した^{注9)}。

さらに欧州食品安全機関(EFSA)^{注10)}が2011年に公表した照射食品の安全性に関する声明^{注11)}では、照射食品の摂取にはヒトに対する喫緊の懸念事項は無いこと、今後の許可品目の検討には、従来の食品クラス毎に線量設定をする方法ではなく、微生物リスクや食品の物理状態を考慮した柔軟な線量設定が必要であることなどが述べられている。

日本での健全性評価研究

日本では1955年頃から殺菌、殺虫、芽止めなどの照射効果を中心に食品照射の研究が始まり、1960年代には放射線分解生成物や放射線抵抗性菌に関する基礎的研究も大学や研究機関で実施されるようになった。

そして1967年から1981年にかけて、食品照射原子力特定総合研究^{注12)}として馬鈴薯(芽止め)、タマネギ(芽止め)、米(殺虫)、小麦(殺虫)、ウインナーソーセージ(殺菌)、水産練り製品(殺菌)、みかん(表面殺菌)を対象とした健全性の検討が行われ、すべての品目について問題のないことが明らかとなった(表1)。

その最初の成果として1971年に馬鈴薯の評価結果が報告され、それに基づいて1972年に馬鈴薯の芽止め目的の照射が食品衛生法のもとで認可された。(連載第1回:2024年5月号、第3回:同7月号参照)

さらに1986年から1991年までの6年間、日本アイソトープ協会は、新しい評価手法で照射食品の健全性を再評価して安全性についての懸念を払拭するために「食品照射研究委員会」を設け、誘導放射能、食品成分の変化(香辛料の香味変化、

照射馬鈴薯のビタミンC含量)、 γ 線照射による変異原性誘発の可能性(グルコース、糖液、糖・アミノ酸混合物、スパイス、マンゴー、小麦粉)、微生物学的安全性(照射後の微生物のポツリヌス毒素やアフラトキシンの産生能の変化)などについて最新的手法を用いて再試験を行った。その結果、すべての照射食品の健全性に問題のないことが確認された。この研究成果^{注13)}は、前述の1992年のWHOの再評価^{注8)}の際にも引用されている。

照射食品の健全性に関する過去の懸念

世界各国で数十年にわたって行われた健全性に関する研究結果のほとんどは「問題ない」という結論だったが、中には安全性に疑問を呈する報告もあった。それらは日本を含めた各国の研究機関での数多くの追試によって最終的に否定されているが、いまだに繰り返し引用されては反対運動の根拠に使われている。その中の2つを紹介する。

1) ジャガイモの照射で生成する毒素?

1972年にソビエトのKuzinらによって、照射ジャガイモのアルコール抽出物中にマウスの染色

表1 食品照射原子力特定総合研究の結果の概要

品目 (照射目的)	放射線の種類	照射効果	検知法	健全性試験	実施年度
馬鈴薯 (芽止め)	γ 線	0.06~0.15 kGyで、室温で8ヶ月間、発芽を防止できる	なし	<ul style="list-style-type: none"> 栄養試験 慢性毒性試験 世代試験 変異原性試験 いずれも影響なし	1967年~1971年 (変異原性試験は1981年)
タマネギ (芽止め)	γ 線	0.02~0.15 kGyで、室温で8ヶ月かん、発芽を防止できる	なし		1967年~1978年
米 (殺虫)	γ 線	0.2~0.5 kGyで、殺虫効果は完全、殺菌効果あり	なし		1967年~1979年
小麦 (殺虫)	γ 線	〃	なし		1969年~1979年
ウインナー ソーセージ (殺菌)	γ 線	3~5 kGyで、10℃での貯蔵期間を3~5倍延長できる	なし		1968年~1980年
水産練り製品 (殺菌)	γ 線	3 kGyで、10℃での貯蔵期間を2~3倍延長できる	励起蛍光 スペクトルによる 測定		1969年~1980年
みかん (表面殺菌)	電子線 (0.5 MeV)	1.5 kGyで、低温での貯蔵期間を2~3倍延長できる	なし		1970年~1981年
実施機関 (機関名称は実施当時)		農林省食品総合研究所、 水産研究所、畜産試験場 日本原子力研究所高崎研究所 日本アイソトープ協会	厚生省 国立予防 衛生研究所	栄養試験: 厚生省国立栄養研究所 慢性毒性試験・世代試験: 厚生省国立予 防衛生研究所 変異原性試験: (財)食品薬品安全センター	

出典: 古田雅一, 放射線照射食品の健全性. RADIOISOTOPES, 71(3), 195-210 (2022)

体異常や優性致死を引き起こす毒素「ラジオトキシン」が生成していたと報告され、各国で追試が行われた。日本での追試では、150 Gy 照射したジャガイモ抽出物中に問題となるような物質は見せず、変異原性試験やチャイニーズ・ハムスターの培養細胞を用いた染色体異常誘発試験、マウスによる小核試験も陰性だった。マウスによる優性致死誘発も全く起こらなかった。Kuzin らは、変異原性は照射直後2～3時間以内に抽出操作を行った場合のみに現れ、照射後40日間保存したジャガイモでは検出されず、照射直後においてもゆでた場合には変異原性は検出されなかった、と報告していることから、現在は照射ジャガイモの安全性と直接の関連はないと評価されている。

2) 照射コムギの摂取による染色体異常？

1975年にインドの国立栄養研究所で栄養失調児5人に0.75 kGy照射直後、照射後12週間貯蔵、および非照射の3群の小麦をそれぞれ4週間与えた結果、照射後12週間貯蔵した小麦を与えた子供に比べて照射直後の小麦を与えた子供の方が血液細胞の染色体異常（ポリプロイディ：倍数化）が多く検出されたというものである。しかし、日本を含む約20件の追試や中国でのボランティア学生による試食試験でも染色体異常は観察されず、現在は完全に否定されている。前述の日本アイソトープ協会が実施した染色体異常試験^{注13)}でも、やはり染色体異常は観察されなかった。

日本で1970年代にジャガイモの照射芽止めが許可・実用化された当時、さまざまな懸念や反対意見が表明された（連載第3回「芽止めと植物検疫」2024年7月号参照）。その多くは単なる誤解や知識不足によるもので、科学的には解決済みのものと言えるが、今でも誤解の払拭には至っていない。そして照射食品反対運動の主張の中には意図的なデータの曲解もある。

そのような過去の懸念の一例をコラムで簡単に紹介する。

照射食品の健全性に関する過去の懸念

放射線照射した食品は放射能を帯びるのではないかと？

食品照射に用いるCo-60ガンマ線（1.17 MeV および1.33 MeV）、10 MeV以下の電子線、および5 MeV以下のX線のそれぞれのエネルギーは、食品を構成するさまざまな元素を放射性同位元素に変化させる核反応の閾値以下であり、誘導放射能^{注11)}は生じない。1986年以降に日本アイソトープ協会が実施した研究^{注13)}の中でも、理論的・実験的に照射食品中に有意の放射能増加はないことが証明されている。

食品中のカビのアフラトキシン産生能が照射で増加することはないかと？

現時点では、放射線照射によってアフラトキシン^{注14)}の産生が促進される証拠はなく、照射によってアフラトキシンを強力に産生する変異株が出現したという報告もない。逆に、食品中のアフラトキシン産生菌の初発菌数を照射で低減することによって、輸送中や貯蔵中のアフラトキシン産生を抑制する効果が期待できる。

照射食品を検知する方法はないので、出回った照射食品の飲食を避けたくても避けられないのでは？

照射によって食品に生じる物理的、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、実用化されている。照射食品である旨の表示によって消費者は選択することができるし、その表示の正しさは検知法で担保される。なお、食品に放射線を照射しても食品に放射線は残らないため、放射線測定器などで検知することはできない。（検知法と表示については次回以降で解説予定）

わが国の「食品照射原子力特定総合研究」で、ラットに照射馬鈴薯添加飼料を与えた実験では体重増加や卵巣重量に変化が見られた。健全性に問題があるのではないかと？

照射ジャガイモを添加した飼料で飼育したラットの体重増加曲線には、線量が 0 Gy、150 Gy、300 Gy、600 Gy と異なる各グループの間で違いが見られたが、線量が大きいほど体重の増加も遅れるといった線量依存性（線量との用量関係）は見られなかった。従ってこの体重増加カーブの違いは照射とは無関係のばらつきと考えられる。

飼育開始から3、6、12、24ヶ月後に卵巣重量を調べた実験では、確かに、600 Gy照射したジャガイモを与えたグループで、6ヶ月後の時点でだけ、卵巣重量の減少が見られた。しかし、他の時点では見られず、卵巣の病理学的検査でも異常は見られなかったことから、この一時的な卵巣重量の減少は照射とは無関係と考えられる。

照射すると生命力が弱り、馬鈴薯やタマネギでは腐敗しやすくなるのではないかと？

照射した馬鈴薯（ジャガイモ）は、収穫時にできた傷の修復作用の一時的な低下や、呼吸が活発になるなどの生理的反応を見せるが、「生命力が弱る」との指摘は見当違いである。

「馬鈴薯やタマネギでは腐敗しやすくなる」という主張は、「放射線照射によるタマネギの発芽防止に関する研究成果報告書」のデータを曲解したものである。発芽したタマネギはほとんど腐ってしまうため、発芽したものを除外して、芽止めされたタマネギだけで集計すると、照射によってあたかも腐敗率が高くなるように見える。しかし、発芽したタマネギも含めて集計すると、照射試料よりも非照射試料の方が腐敗率ははるかに高くなる。

以上について、詳しくは、下記の資料を参照されたい。

- 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.jriis.or.jp/pdf/shokuhinshoushaQA.pdf>
- 日本原子力産業協会「食品照射Q&Aハンドブック」（2007年3月）
https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/about/publication/qa-handbook.pdf

放射線照射で特異的に生じる 2-アルキルシクロブタノン類^{注15)}に関する懸念

脂質を含有する照射食品には、放射線照射に特異的な分解生成物である 2-アルキルシクロブタノン類 (2-ACBs)^{注15)} が極微量含まれている。1990 年代の終わりから 2000 年代初頭にかけて、高濃度の 2-ACBs に暴露された培養細胞での DNA 損傷作用等が報告されたが、その後実施された国際的に標準化された方法による遺伝毒性試験では全て陰性の結果が得られている。WHO をはじめ、食品照射を認可する各国の食品安全評価機関は、この化合物の存在による照射食品の安全性への懸念を否定している。

2-アルキルシクロブタノン類 (2-ACBs) は、照射食品の検知法を開発する研究の中で、脂質由来の放射線照射に特有な分解生成物、すなわち照射食品に特異的なマーカー候補として同定された。その構造は、脂質を構成する脂肪酸より炭素数が 4 つ少ないアルキル基を側鎖に持つ環状ケトンである (図 1)。

照射食品中の含有量は、線量と食品中の脂質 (脂肪酸) 含量に依存して増加するが、その量は非常に少なく、例えば主要な脂質の一つのパルミチン酸 (palmitic acid) に由来する 2-ドデシルシクロブタノン (2-dDCB : 2-dodecylcyclobutanone) の鶏肉 100 g 中の含量は、3 kGy の照射で 12.9 μg 程度である。

2-アルキルシクロブタノン類 (2-ACBs) の毒性評価

2-ACBs は 1990 年以降に新たに照射食品中に検出されたため、90 年代後半に改めて純品を用いた毒性評価が実施された。そして高濃度の 2-ACBs による培養細胞中の DNA 損傷作用がコメットアッセイ^{注16)} で検出され、発がんプロモーション活性（それ自体が発がん性は無いが発がん物質との同時投与で発がんを促進）の可能性が報告されると、照射食品の安全性を疑問視する消費者グループなどによってその危険性がセンセーショナルに喧伝された。

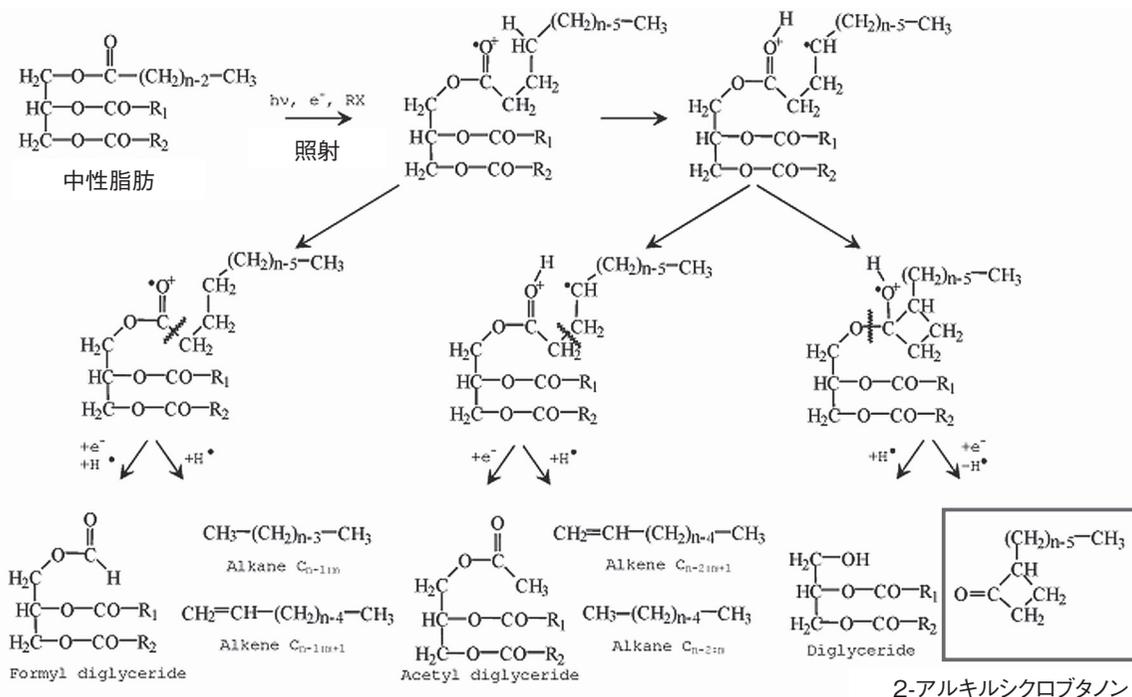


図1 脂質の放射線分解と2-アルキルシクロブタン類の生成。
n=16の脂肪酸であるパルミチン酸からは2-ドデシルシクロブタン(2-dDCB)が生成される

しかし、その後の試験で、2-dDCBのDNA損傷作用は前駆体であるパルミチン酸と同程度の弱いものであること、2-dDCBはラットの体内で無害な2-ドデシルシクロブタノールに代謝され糞中に排泄されることなどがわかってきた。

WHOや欧州食品安全機関(EFSA)^{注10)}は、「発がんプロモーション活性を報告した論文では2-ACBs投与量が照射食品中の含有量に比べ桁違いに大きい^{注17)}ため、この報告をヒトに対する照射食品の健康影響の議論に用いることは不適切」であり、「DNA損傷を検出したコメントアッセイ^{注16)}も遺伝毒性評価の標準法に採用されていない」と指摘した上で、過去に実施された59 kGyという高線量で照射された鶏肉の長期動物投与試験や細菌を用いる復帰突然変異試験(エームス試験)^{注18)}の結果が陰性であることから、「照射食品中に存在する2-ACBsのヒトへの悪影響は無視しうる」と結論した。

日本の食品安全委員会による毒性評価

食品の安全性に関する多くの専門家は上記の

WHOやEFSAの見解を支持し、高価な2-ACBs標準品を用いたこれ以上の動物投与試験は無用と考えていた。

しかし日本では、その後も食品安全委員会が十分な数の動物を用いた発がんプロモーション試験や長期反復投与試験、国際的に妥当性が確認された遺伝毒性のバッテリー試験^{注19)}による2-ACBsの毒性評価などを行い、全てについて陰性の結果が得られた。韓国の研究グループも同様の試験を行い、陰性との結果を論文で公表した。

これらの成果により、2023年時点では2-ACBsの遺伝毒性や発がんプロモーション活性についての懸念は否定されたとと言える。

コーデックス国際食品規格

コーデックス国際食品規格委員会(Codex Alimentarius Commission)は、消費者の健康の保護と食品の公正な貿易の確保等を目的としてFAOとWHOが設置した国際的な政府間機関であり、国際食品規格の策定等を行っている。貿易についての国家間の問題を取り扱う世界貿易機関

(WTO)^{注20)}では、加盟国が科学的見地から行われたリスク評価結果と国際規格に基づいて食品衛生や動植物衛生の措置を行うことを取り決めており、コーデックス国際食品規格はWTO協定^{注20)}の下での唯一の、食品の安全および品質の確保と保証に関する国際規格となっている。

コーデックス国際食品規格委員会は、1980年のFAO/IAEA/WHO合同専門家委員会(JECFI)の結論「10 kGy以下の総平均線量でいかなる食品を照射しても、毒性学的、微生物学的、栄養学

的に全く問題がない。今後はこの線量以下で照射した個々の食品の健全性試験は不要である」を踏まえ、1983年に「照射食品に関する一般規格」^{注21)}および「食品の放射線処理のための実施規範」^{注22)}を採択し、加盟各国に受け入れを勧告した。

2003年のコーデックス規格改定

その後、1997年のWHOの高線量照射に関する専門家委員会の結論「意図した技術上の目的を

表2 照射食品に関するコーデックス一般規格の要点

1.適用範囲	検査を目的とする測定装置からの放射線を受けた食品には本規格は適用されない
2.一般的事項	
2.1 線源	γ線(コバルト60 または セシウム137)、X線(5 MeV以下)、電子線(10 MeV以下)
2.2 吸収線量	食品の最大吸収線量は、技術上の目的を達成する上で正当な必要性がある場合を除き、10 kGyを超えてはならない
2.3 施設と管理	施設の認可と登録、安全性の確保、適正衛生規範の遵守、訓練を受けた十分な能力を有する運転員の配置、線量測定記録の保管、査察に対する記録の開示、「食品の放射線加工に関するCodex実施規範」(CAC/RCP19-1979, Rev.1-2003)に則った管理
3.照射食品の衛生	
3.1 食品の衛生的取り扱い	適正衛生規範(GHP:Good Hygiene Practice)、HACCP(Hazard Analysis and Critical Control Point)、生鮮食品の輸送取り扱い規則の遵守
3.2 公衆衛生への配慮	照射食品を販売する国における微生物学的安全性、栄養学的適合性に関わる公衆衛生上の要求事項の遵守
4.技術的な条件	
4.1 一般条件	照射の正当性は、技術的な必要性 and/or 消費者の健康上の利益となる場合に認められる。この技術をGHP、農業生産工程管理(GAP:Good Agricultural Practice)、食品の適正製造基準(GMP:Good Manufacturing Practice)の代替として利用してはならない。
4.2 食品および容器包装の条件	技術的および衛生上の目的達成に見合った線量、GIPへの適合、照射処理に適した食品および容器包装の衛生状態の確保、GMPに則った照射前後の適正な取り扱い
5.再照射	(1)低水分含量の穀類・豆類、乾燥食品等を殺菌目的で照射した場合を除き再照射は禁止 (2)再照射と看做さないものは、(a)植物検疫や芽止めなど衛生化以外の目的で低線量照射された原料から製造された食品の照射、(b)5%未満の照射された成分を含む食品の照射、(c)特別な技術的目的のため分割照射に正当性のある場合 (3)上記の分割照射において累積線量は(技術上の目的を達成する上で正当な必要性がある場合を除き)10 kGyを超えてはならない。
6.照射後の確認	必要に応じ、また可能であれば、許可や表示に効力を与えるために、コーデックス委員会が採択した検知法を使うことができる。
7.表示	
7.1 在庫管理	包装食品か否かを問わず、照射施設、日付、線量、ロット番号などを証明する書類を添付すること
7.2 包装済み食品の表示	包装食品の表示に関する一般規格(CODEX STAN 1-1985, REV2-1999):食品名と共に照射したことを言葉で表示、ロゴマーク(Raduraマーク)はオプション、照射された原材料を含む食品の場合も表示義務あり
7.3 バルク(ばら売り)の食品の表示	照射食品の出荷にあたって照射の記録を明記した書類を添付すること ばら売りの食品を小売りする場合は "Irradiated"という言葉とロゴマークもしくは "Treated with ionizing radiation"という記述を売り場のコンテナ上にする

出典:CODEX STAN 106-1983, Rev.1-2003. "Codex General Standard for Irradiated Foods"

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(健全性に問題はない)^{注9)}を受けて、コーデックス国際食品規格の改定が議論された。2003年に採択された現行の「照射食品に関する一般規格」^{注21)}では、「食品の最大吸収線量は、技術上の目的を達成する上で正当な必要性がある場合を除き、10 kGy を超えてはならない」と修正されている。

しかし日本では、欧米などの先進諸国とは異なり、上記の1983年のコーデックス規格の採択や2003年の改定の後も食品衛生法における規制の見直しはいっさい行われていない。照射食品の健全性に関する国際的な評価には日本のさまざまな研究機関による膨大な試験結果も大いに貢献しているのに…。

改定された一般規格(CODEX STAN 106-1983, Rev.1-2003)^{注21)}の要点を表2に示す。

2003年のコーデックス規格の改定では、上記の上限吸収線量についての文言の修正のほか、照射実施の正当性について消費者の健康への寄与をうたうなど、消費者重視の立場が強化された。また規制や表示の実効性を確保するため、コーデックスが定めた検知法を利用できるとの条項も加えられた(照射食品の表示と検知法については次回以降で解説予定)。

変換 X 線のエネルギー上限

食品処理に用いることができる線源については、照射された食品に新たな放射能を誘起することがないように放射性同位元素の核種や放射線エネルギーが制限されており、加速器で発生させた電子線をターゲットに当てて発生させる変換 X 線(制動 X 線)^{注23)}の場合、使用できるエネルギーの上限は5 MeV となっている。

しかし、電子線から X 線への変換効率や、照射対象物への X 線の透過性の点では、より高い加速電圧の電子線で発生させた、より高エネルギーの X 線が有利となる。また、7.5 MV 以下の加速器で発生させた電子線による変換 X 線(制動 X 線)の照射によって食品中に生成する誘導

放射能^{注1)}のリスクは、自然放射線に比較して無視しうると評価されている。そのため米国、カナダ、韓国、インド、インドネシアの5カ国の国内規制はすでに X 線のエネルギー上限を7.5 MeV としている。

オーストラリア・ニュージーランド食品基準機関(FSANZ)^{注24)}も、両国の食品照射基準における X 線のエネルギー上限を5 MeV から7.5 MeV に引き上げる規制変更を認可し、2024年6月19日に7.5 MeV への拡大申請を認めることを大臣に報告し、2024年8月15日付で規制が変更された。

このような動きの中で、今後、コーデックス規格の改定も議論される可能性がある。

なお、植物検疫に関する国際基準であるISPM18「植物検疫措置としての放射線照射の利用の要件」では、すでに2023年の改定で X 線のエネルギー上限は7.5 MeV に変更されている。

ISO 規格とIAEA の食品照射実践マニュアル

国際標準化機構(ISO)^{注25)}は医療滅菌や材料改質などの工業分野における放射線プロセスに関する多数の規格を発行している。食品照射についても「ISO14470:食品照射—食品処理のために使用する電離放射プロセスの作成、妥当性確認及び日常管理における要求事項」が発行され、食品照射施設の運用に役立てられている。(連載第4回:2024年8月号参照)

放射線処理の効果を担保し、期待される品質の照射食品を提供するためには、これらの規格の意図を理解し、要求されるプロセス管理を適切に行うことで、規定された範囲の線量を過不足なく照

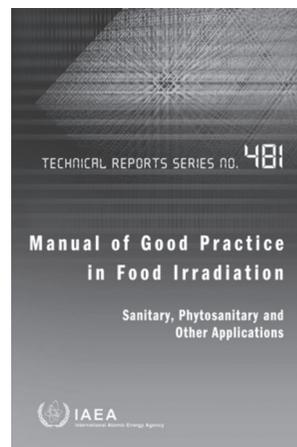


図2 IAEAの食品照射実践マニュアル(IAEA Technical Reports Series No. 481)

射することが不可欠である。

2015年にIAEAは、各種の国際規格・基準に適合するために規制当局、照射事業者、照射処理の依頼者（食品事業者）のそれぞれが食品照射の実施にあたり具体的にどのような手順を実践すべきかを食品照射技術の基礎的な解説とともにまとめたマニュアル^{注26)}を発行した（図2）。

本マニュアルは日本アイソトープ協会理工・ライフサイエンス部会食品照射専門委員会で邦訳され、「食品照射実践マニュアル～食品衛生や植物検疫などへの適正な利用のために～」と題して近く出版される予定である。

植物検疫に関する国際基準

食品照射技術や照射食品に関する国際基準としては、コーデックス国際食品規格の他に、植物検疫措置に関する国際基準として、「植物検疫措置としての放射線照射の利用の要件」（ISPM18）と、「規制有害動植物に対する植物検疫処理」（ISPM28）の付属書における23本の放射線照射処理基準が定められている。これらについては連載第3回（2024年7月号）「芽止めと植物検疫」を参照されたい。

照射食品の検知法と表示、海外での実用化状況と日本の現状などについては次回以降で紹介する。

- 注1) 誘導放射能:放射線の照射によって物質中の一部の原子に核反応が生じた結果、物質が放射化（物質中に放射性核種=放射性同位体が生成）し、俗に言う「放射能を持つ」ようになった場合、この放射能を誘導放射能と呼び、自然界や食品中に元々存在する放射能とは区別している。
- 注2) FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations, 国連食糧農業機関):食料の安全保障と栄養、作物や家畜、漁業と水産養殖を含む農業、農村開発を進めるために、1945年に国際連合の下に設立された先導機関。
- 注3) IAEA(International Atomic Energy Agency, 国際原子力機関):原子力の平和利用を促進するために国際連合の下に設立された国際的な協力機関。1957年設立。平和利用に関する技術情報の交換、原子力施設の運転の安全基準作成、軍事的目的への転用の防止などを行う。

注4) WHO(World Health Organization, 世界保健機関):全ての人々が可能な最高の健康水準に到達することを目的として設立された国連の専門機関。1948年設立。グローバルな保健問題についてリーダーシップを発揮するとともに証拠に基づく政策選択肢を明確にし、保健医療分野に関する指導・調整、研究の促進、国際的基準の策定、技術協力等を行っている。

注5) 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6) OECD(Organisation for Economic Cooperation and Development):経済協力開発機構。ヨーロッパ諸国を中心に日・米を含め38カ国の先進国が加盟する国際機関。国際マクロ経済動向、貿易、開発援助に加え、持続可能な開発、ガバナンスなどの新たな分野についても加盟国間の分析・検討を行う。第二次大戦後のマーシャルプランを契機として欧州16カ国で発足したOEEC(欧州経済協力機構)がその前身。日本は1964年に加盟。

注7) 米国食品医薬品局(FDA, Food and Drug Administration):アメリカ合衆国保健福祉省(Department of Health and Human Services, HHS)配下の政府機関。連邦食品・医薬品・化粧品法を根拠とし、医療品規制と食の安全を責務とする。

注8) WHO, Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Foods, WHO, Geneva (1994). <https://iris.who.int/handle/10665/39463>
邦訳は「照射食品の安全性と栄養適性」コブ出版(1996)

注9) WHO, High Dose Irradiation: Wholesomeness of Food Irradiated with Doses above 10 kGy, Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group, Technical Report Series 890 WHO, Geneva (1999). <https://www.who.int/publications/i/item/9241208902>

注10) 欧州食品安全機関(EFSA, European Food Safety Authority):欧州委員会(EC: European Commission)とは独立した機関として設置されたEUの専門機関の一つ。EU域内の食品の安全性に影響するあらゆることについて、専門家によるリスク評価を行いその安全性などに関する科学的な情報の提供を行う。

注11) 照射食品の安全性に関する声明:正確な表題は「生物学的ハザードに関する科学パネル

(BIOHAZパネル)の『食品照射の有効性と微生物学的安全性についての科学的見解』および食品と接触する物質・酵素・香料・加工助剤に関する科学パネル(CEFパネル)の『照射食品の科学的安全性に関する見解』の結論と勧告に基づいた声明』である。Statement summarising the Conclusions and Recommendations from the Opinions on the Safety of Irradiation of Food adopted by the BIOHAZ and CEF Panels <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/2107>参照

- 注12) 食品照射原子力総合特定研究: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)、理化学研究所などで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、水産物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13) 日本アイソトープ協会 食品照射研究委員会 研究成果最終報告書(1992年12月): https://www.jstage.jst.go.jp/article/jrafi1966/28/1-2/28_1-2_41/_pdf参照
- 注14) アフラトキシン(Aflatoxin):穀類、落花生、ナッツ類、とうもろこし、乾燥果実などに寄生するカビである*Aspergillus flavus*および*Aspergillus parasiticus*によって産生されるカビ毒。遺伝毒性発がん物質とされている。摂取量を可能な限り低減すべきと評価され、基準値が設けられているほか、様々な低減対策が取られている。https://www.maff.go.jp/j/syouan/seisaku/risk_analysis/priority/kabidoku/kabi_iroiro.html#af 参照
- 注15) 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ノンの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16) 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17) 照射食品中の含有量に比べ桁違いに大きい2-ACBs投与量:体重60 kgのヒトが米国の照射ビーフバーガーパテ(125 g)を毎日38,500個(4.813 kg)、あるいは59 kGy照射した鶏肉を毎

日136 kgも食べ続けた場合のシクロブタン類摂取量に相当する。

- 注18) 復帰突然変異試験(エームス試験, Ames test):変異原物質の第一次スクリーニング法として広く用いられている試験。DNAや染色体に突然変異を引き起こす物理的、化学的、生物学的な作用を確認するための試験を変異原性試験といい、その一つでサルモネラ属菌または大腸菌を用いて化学物質等を作用させて遺伝子(DNA)が突然変異を起こす頻度を調べる復帰突然変異試験(Reverse Mutation Test)は開発者のBruce N. Amesの名前に因んでエームス(エイムス)試験と呼ばれている。
- 注19) 遺伝毒性のバッテリー試験:化学物質の遺伝毒性を評価するために数種類の遺伝毒性試験をセットで実施するもの。
- 注20) 世界貿易機関(WTO, World Trade Organization):国家間のグローバルな貿易の規則を取り上げる唯一の国際機関。ウルグアイ・ラウンド交渉の結果1994年に設立が合意され、1995年1月1日に設立。全加盟国が合意する多国間規則に基づくシステムの中で貿易が円滑に行われるように支援し、政府間の貿易に関する紛争を公平に解決する場を提供する。WTO協定(WTO設立協定及びその付属協定)は、貿易に関連する様々な国際ルールを定めている。
- 注21) 照射食品に関する一般規格(General Standard for Irradiated Foods):コーデックス国際食品規格の一つ。1983年、10 kGy以下の照射食品について採択され、さらに2003年、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。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、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。
- 注22) 食品の放射線処理のための実施規範(Code of Practice for Radiation Processing of Food):食品照射施設における照射工程の要件を対象とした実施規範。食品の効果的な放射線処理を実現するために、照射施設が実施すべき施設のレイアウト、目標線量の決定、線量測定等の工程管理に加え、照射処理の対象産物の一次生産、収穫、収穫後の処理、保管及び出荷、包装、表示、照射後の保管及び取り扱い、作業者の訓練など、照射工程に附随する他の側面も考慮している。
- 注23) 制動X線(bremsstrahlung X ray):高速で運動する電子が物質中の原子核の近傍を通過するときに、その電界によって減速され、その際失ったエネルギーを電磁波すなわちX線として放出するもの。原子番号と密度が大きい物質ほど制動X線の発生強度が大きい。電子線を当てる標的には密度が大きく融点も高いタンゲステンやモリブデンなどの金属が用いられる。
- 注24) オーストラリア・ニュージーランド食品基準機関(FSANZ, Food Standards Australia New

Zealand):食品の安全を確保し、両国民の健康を守ることを目的として、オーストラリアとニュージーランドが二国間協定に基づいて設立した機関。両国で販売される食品の使用基準及び成分規格、食品表示基準等の共通の食品標準規格 (Food Standards Code) を定めている。

- 注25) 国際標準化機構 (ISO, International Organization for Standardization): 国家間の製品やサービスの交換を助けて標準化活動の発展を促進し、知的・科学的・技術的・経済的活動における国家間協力を発展させることを目的に1947年に18カ国によって発足。電気・通信及び電子技術分野を除く全産業分野 (鉱工業、農業、医薬品等) に関する国際規格の作成を行う。
- 注26) 食品照射実践マニュアル (IAEA, Manual of Good Practice in Food Irradiation): IAEA Technical Reports Series No. 481, (2015) <https://www.iaea.org/publications/10801/manual-of-good-practice-in-food-irradiation> 参照

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)
- 等々力節子, 照射食品中における2-アルキルシクロブタノンの生成とその毒性評価について. 食品照射, 38(1,2), 57-71 (2003)
- 林徹, 食品・農業分野の放射線利用. 幸書房 (2008)
- 日本食品照射研究協議会, 照射食品中の2-アルキルシクロブタン類の検出と定量に関する文献リスト(2010年12月現在). [http://www.jrafi.jp/cyclobutanone\(teiryu\).htm](http://www.jrafi.jp/cyclobutanone(teiryu).htm)
- 古田雅一, 最近の食品照射の国際動向-欧州食品安全機関 (EFSA) の見解を中心に-. 食品照射, 46(1), 27-31 (2011)
- 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)
- 古田雅一, 放射線照射食品の健全性. RADIOISOTOPES, 71(3), 195-210 (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>