

内閣府食品安全委員会
平成16年度食品安全確保総合調査

放射線照射食品の安全性に関する文献等 の収集・整理等の調査報告書

平成17年3月

**独立行政法人
食品総合研究所**

はじめに

食品の放射線照射技術は、物理的な品質保持技術の一つであり、限られたエネルギーの電離放射線（ガンマ線、電子線、エックス線）を適切な管理下で照射することで、食品の付着微生物の殺滅や害虫の駆除、農産物の発芽や発根の抑制、熟度調整による保存期間の延長を可能にするものである。

国際的には1980年、WHO（世界保健機構）/FAO（国連食糧農業機関）/IAEA（国際原子力委員会）の合同専門家委員会により、10kGy以下の線量で照射された食品の健全性が確認され、さらに1997年に、10kGy以上の高線量を照射した食品についても、その健全性に問題がないとの見解が出されている。現在、全世界で50以上の国で食品への利用が許可され、30以上の国で商業レベルでの食品照射が行われている。

わが国においては、1972年、バレイショの発芽防止のための照射が承認されて以降、消費者の理解が進まなかったこと等により、新たな対象品目の拡大はされていない。しかし、欧米やアジア諸国では食品照射の実用化が進んでおり、今後これらの食品輸出国から、わが国に対し照射済み食品の輸入を求められる可能性は否定できない。さらに、検疫や殺虫に使われている臭化メチル代替技術としても放射線照射技術が求められる可能性がある。

また、国内のスパイス業界には、スパイスの品質向上や食中毒事故の未然防止のため、本技術の使用許可を求める動きがある。

このような状況下、本技術に関し適切なリスク評価を行う必要性が生じている。そこで、本調査では、これまで国際機関や各国政府の行った照射食品の安全性評価結果や評価基準、および評価の根拠として用いられた研究文献・資料の収集と整理を行い、今後の照射食品の安全性評価のための基礎資料とすることを目的とし実施した。

平成17年3月

独立行政法人・食品総合研究所

目 次

1. 放射線照射食品の安全性評価、基準等資料の収集・整理	
1-1 国際機関における放射線照射食品の安全性評価	1
1-1-1 初期における照射食品健全性に関する国際的な概念の変遷	2
1-1-2 国際食品照射プロジェクト	3
1-1-3 J E C F I における安全性評価の結論（10kGyまでの照射食品の安全性）	4
1-1-4 WHOの健全性に関する再評価（1992年）	5
1-1-5 高線量（10kGy以上）を照射した食品の健全性	6
1-1-6 コーデックス国際食品規格	8
1-2 ヨーロッパ共同体における放射線照射食品の安全性評価	9
1-3 英国における放射線照射食品の安全性評価	13
1-4 米国食品医薬品庁（FDA）の放射線照射食品の安全性評価	15
1-4-1 米国における規制	15
1-4-2 米国における安全性評価の考え方	16
1-4-3 個別食品に対する評価の経緯	19
1-5 カナダにおける放射線照射食品の評価	22
1-6 オーストラリア/ニュージーランドにおける放射線照射食品の評価	26
1-7 わが国における放射線照射食品の評価	33
1-8 まとめ	43
2. 放射線照射食品の安全性に関する研究文献の収集・整理	
2-1 誘導放射能	45
2-2 化学的安全性	48
2-3 栄養学的適合性	68
2-4 微生物学的安全性	77
2-5 毒性学的安全性	95
3. 放射線照射食品の安全性に関する文献等の収集・整理等の調査に関する考察	
3-1 調査に関する検討会	141
3-2 照射食品の安全性評価に関する今後の課題	146

＜別冊＞ 放射線照射食品の安全性に関する文献・資料集

放射線照射食品の安全性に関する文献・資料集 目次

I． 国際機関および各国政府による安全性評価結果に関する資料

- 1． 世界保健機構（WHO）関連レポート
- 2． ヨーロッパ共同体 食品科学委員会（E U－S C F）評価レポート
- 3． 英国農務省「照射・新食品に関する諮問委員会」評価レポート
- 4． 米国食品医薬品庁（F D A）関連資料
- 5． カナダ保健省(Health Canada)関連資料
- 6． オーストラリア/ニュージーランド食品基準機関（F S A N Z）
- 7． 日本における放射線照射食品の安全性評価
- 8． まとめ

II． 放射線照射食品の安全性に関する研究文献等

5． 毒性学的評価

- 5-1 ラルテック鶏肉毒性試験の総括文献
- 5-3 2-アルキルシクロブタノンの毒性評価に関するオリジナル文献と評価結果

1. 放射線照射食品の安全性評価、基準等資料 の収集・整理

1-1 国際機関における放射線照射食品の安全性評価

この項では、WHO（世界保健機関）を中心とした国際機関での、放射線照射食品の安全性評価について述べる。本節全体の歴史的経緯を表1-1-1にまとめた。

表1-1-1 国際機関における放射線照射食品の評価の経緯

1961 年	照射食品の健全性と食品照射の規制に関する国際会議（ブリュッセル） 照射食品の健全性評価の必要性の提起
1964 年	FAO/IAEA/WHO 照射食品の規制の技術的基準に関する合同専門委員会（ローマ） 照射食品の健全性評価の検討、食品添加物扱い
1969 年	FAO/IAEA/WHO 照射食品の健全性に関する合同専門家委員会（JECFI）（ジュネーブ） 同一の食品なら品種間差、地域差はない
1970 年	国際食品照射プロジェクト（IFIP）開始（カールスルーエ） 健全性試験研究の方法の検討、委託、情報提供
1976 年	FAO/IAEA/WHO 照射食品の健全性に関する合同専門家委員会（JECFI）（ジュネーブ） 食品照射は物理的加工技術、類似食品の健全性は同じ、 放射線化学知見の活用 ケミクリアランス
1980 年	FAO/IAEA/WHO 照射食品の健全性に関する合同専門家委員会（JECFI）（ジュネーブ） 10kGy 以下の照射食品の健全性に問題はない
1981 年	国際食品照射プロジェクト終了
1983 年	FAO/WHO 食品規格委員会が「照射食品に関する一般規格」（Codex 規格）および 「食品処理のための照射施設の運転に関する国際基準」を策定
1984 年	国際食品照射諮問グループ（ICGFI）設立 食品照射の実用化と照射食品の貿易の推進
1988 年	照射食品の受容、貿易、管理に関する国際会議（ジュネーブ）
1989 年	国際食品規格委員会食品表示部会が照射食品の表示の結論（オタワ） 照射食品は言葉で表示する
1992 年	WHO 専門家委員会が照射食品の健全性について再評価 Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food（1994） （日本語版；照射食品の安全性と栄養適性（コープ出版）1996 年
1997 年	WHO 専門家委員会の高線量照射食品に対する見解 10kGy 以上照射した食品の健全性に問題はない 他の加工・処理との実質的同等性 High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy.(1999)
2003 年	FAO/WHO 食品規格委員会が「照射食品に関する一般規格」（Codex 規格）を改訂 （原則 10 kGy まで、技術的必要性が認められれば 10 kGy を超えても 可）

1-1-1 初期における照射食品健全性に関する国際的な概念の変遷

過去40数年間に、食品照射に関する国際的または各国での会合、会議、研修会が数多く開催されてきた。これらの会議には、WHO（世界保健機関）、FAO（国連食糧農業機関）、IAEA（国際原子力機関）などの国際機関が企画したものが多く含まれている。

最初にこの3つの国際機関が合同で開催した照射食品についての会議は1961年にベルギーのブリュッセルで開催された「FAO/WHO/IAEAの照射食品の健全性に関する合同委員会（Joint FAO/IAEA/WHO meeting on the wholesomeness of Irradiated Foods）」¹⁾で、国際的に照射食品の健全性を評価することの必要性が強調された。この会議のフォローアップとしての会議が、1964年にローマにおいて開催された²⁾。この中で、照射食品を法的に規制する上での一般的な原則が討議され、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に関する勧告がなされた。その際、後述するように米国が既に1958年に決定したのと同様の立場をとり、照射食品を食品添加物とみなした試験方法を採用し、食品ごとにデータ収集が必要であると結論した。すなわち、毒性試験の方法としては、3種の動物を用いた長期(慢性)毒性試験（2年間）と2種の動物を用いた短期(亜急性)毒性試験（90日）の実施が提案された。また、毒性試験と並んで誘導放射能の問題も含めた放射線学的観点、さらに栄養学的および、微生物学的な観点の議論がなされた。1969年には、FAO/WHO/IAEA「照射食品の健全性に関する合同専門家委員会（Joint Expert Committee on Food Irradiation：略称JECFI）」の、第1回目の会議が、ジュネーブで開催された³⁾。

この会議では、既に得られた安全性データが小麦、バレイショ、タマネギについて多数提出され、これに基づき0.75kGyまで照射した小麦と小麦製品、および、発芽防止の目的で0.15kGyまで照射されたバレイショに対して暫定的な承認が与えられた。しかし、タマネギについてはデータが不十分であるとして、さらに検討が必要であるという結論に達した。

1976年の第2回のJECFIにおいては、それ以降に実施された種々の食品の安全性試験のデータが収集された。そして、その結果の総括から、殺虫を目的とした小麦と小麦粉（0.15～1.0kGy）、腐敗および病原菌の制御を目的とした鶏肉（2～7kGy）、発芽防止のためのバレイショ（0.03～0.15kGy）、殺虫を目的としたパパイヤ（0.5～1kGy）、貯蔵期間延長を目的としたイチゴ（1～3kGy）の照射を無条件で承認し、発芽防止のためのタマネギ（0.02～0.15kGy）、腐敗および病原菌の制御を目的としたタラとサケ（2～2.2kGy）および殺虫のための米（0.1～1kGy）の照射を暫定的に承認した。マッシュルームについては、十分なデータが存在せず評価が見送られた。この会議では、同時に放射線化学的な研究のレビューが実施され、食品照射を添加物とはみなさず、加熱や凍結と同様の食品の処理方法であるとする転換があった。これにより、健全性評価の考え方に変化がもたらさ

れ、1日許容摂取量（A D I）や安全係数の概念の適用は否定された。また、同じような食品成分を有する品目の毒性データは相互に参照できること、放射線化学の知見から放射線分解生成物の生成量が予測され、健全性試験における動物の毒性試験を補うことができることが強調された⁴⁾。

1-1-2 国際食品照射プロジェクト

第2回のJ E C F I以降、健全性試験に莫大な経費がかかることと、同一食品においては、主要品種における研究データを他品種にも適用できるとの考えが確認されたことから、各国が研究を分担して実施しようという機運が高まった。この結果、F A O, W H O, I A E AおよびO E C Dが協力し、本部をドイツカールスルーエの連邦栄養研究所内に設置して、International Project in the Field of Food Irradiation（国際食品照射プロジェクト：略称I F I P）が1970年に開始された。このプロジェクトの参加は当初19ヶ国であったが、最終的には日本も含めた24ヶ国が参加し、1981年12月31日に終了した。ここでは、加盟国の間で分担を決めて動物投与試験を実施した他、照射食品の健全性評価に関する方法論の検討調査、各国に対する健全性に関する情報提供を行った。また、試験内容は、小麦粉、バレイショ、タマネギ、魚、マンゴ、スパイス、乾燥デーツ、カカオ豆などの長期投与試験、変異原性試験に加え放射線分解生成物に関する研究も実施された。

このプロジェクトで得られた成果は、67の報告書：Technical Report（I F I P Technical Report R1-R67）および、4つのActivity Report、2冊の本（Elsevier：Radiation Chemistry of Major Food Component (1977) ed by P.S. Elias and A.J. Choen, およびRecent Advance in Food Irradiation(1983) ed by P.S. Elias and A.J. Choen）として出版された。また、プロジェクト実施中の情報提供として、Food Irradiation Information (vol. 1~12)が発行された。

このプロジェクトの実施中に行われた、1976年および1980年のJ E C F Iでは、各国政府のデータとともにI F I Pで実施された健全性試験の結果が検討されており、I F I Pの成果はJ E C F Iが1980年の結論に達する過程で多大な貢献をした。

1-1-3 J E C F Iにおける安全性評価の結論（10kGyまでの照射食品の安全性）

1980年にジュネーブで実施された第3回J E C F Iでは、照射食品の健全性について以下の結論を出した⁵⁾。

10kGy以下の総平均線量でいかなる食品を照射しても、毒性学的な危害を生ずるおそれがない。さらに今後は、10kGy以下の照射した食品についての毒性試験は、もはや不要である。そして、10kGy 以下の線量で食品を照射することは、栄養学的または微生物学的にみて特別な問題を引き起こすことはない。

なお、ここで扱った試験のほとんどが10kGy 以下を照射した食品であり、それ以上を照射した食品についての毒性や健全性評価については考慮がなされておらず、それに関してはさらに研究が必要とされている。

1976年のJ E C F Iの結論を踏襲し、ここでも健全性評価における化学分析データの重要性が強調されている。異なる食品に含まれる同一の食品成分（たんぱく質、脂質、炭水化物、水など）については類似の放射線分解反応がおこるため、照射食品について生成する共通の放射線分解生成物の量は予想できる。この**ケミクリアランス(Chemiclearance)**の概念は安全性（毒性）評価に際して非常に有用である。この概念は、前項の国際食品照射プロジェクト（International Project in the Field of Food Irradiation: I F I P）において実施された様々な食品における放射線化学的研究データによって裏付けられた。

1980年に実施されたJ E C F Iにおける各食品の健全性の個別評価において、前回までに暫定承認または、保留されていた食品の再評価が実施され、次の品目が無条件承認された。

魚（寄生虫駆除；1kGy 以下、病原菌または腐敗菌の減少；2.2kGy 以下（保存温度は0℃））、タマネギ（発芽防止；0.15kGy 以下）、米（貯蔵中の害虫防除；1kGy 以下）、ココア豆（殺虫；1kGy 以下、殺菌；5kGy 以下）、ナツメヤシ（殺虫；1kGy 以下）、マンゴ（殺虫、熟度調整、微生物制御；1kGy 以下）豆類（殺虫；1kGy 以下）、香辛料・調味料（殺虫；1kGy 以下、病原菌または腐敗菌の減少；10kGy 以下）。

以上3回のJ E C F Iの結果から、最終的に無条件承認された食品(群)は13種類に上る。これらを表にまとめた（表 1-1-2）。

表1-1-2 J E C F Iで無条件承認された食品の品目

食 品	目 的	線量 (k G y)
小 麦	害 虫 防 除	0. 1 5－1. 0
バ レ イ シ ョ	発 芽 防 止	0. 0 3－0. 1 5
鶏 肉	病 原 菌 防 除	2. 0－7. 0
パ パ イ ヤ	殺 虫 ・ 熟 度 遅 延	0. 5－1. 0
イ チ ゴ	殺 菌 保 存	1. 0－3. 0
魚 ・ 加 工 品	寄 生 虫 駆 除 ・ 保 存	2. 2 以下
タ マ ネ ギ	発 芽 防 止	0. 1 5以下
米	害 虫 防 除	1. 0 以下
コ コ ア 豆	殺 虫 ・ 細 菌 減 少	5. 0 以下
ナ ツ メ ヤ シ	害 虫 防 除	1. 0 以下
マ ン ゴ	殺 虫 ・ 熟 度 遅 延	1. 0 以下
豆 類	害 虫 防 除	1. 0 以下
香辛料・調味料	殺 虫 ・ 細 菌 減 少	1 0. 0以下

1980年に出されたJ E C F Iの結論は、その後、スウェーデン、フランス、デンマーク、英国、アメリカ合衆国など多くの国で独自に実施された健全性評価によって追認されている。また、ECの食品科学委員会（Scientific Committee on Food）も入手可能なデータを用いて評価を実施している。これらのすべての評価結果は、J E C F Iの1980年の結論と同様の結論に達している。またJ E C F Iの結論は多くの国における照射食品の許可の根拠に用いられ、さらに、J E C F Iの結論をうけた1983年と1984年の「照射食品に関する国際一般規格」および「食品処理のための照射施設の運転に関する国際基準」のコーデックス委員会における採択は、世界規模での照射食品の受容推進のための制度的な裏づけとなっている。

1-1-4 WHOの健全性に関する再評価（1992年）

1980年のJ E C F Iの決定、1984年のコーデックス規格基準の採択以降、FAOとWHOは食品照射の実用化を加盟国に勧告したが、少なからぬ数の消費者団体が、食品照射に不安を訴え、反対をしてきた。国際機関はこれらに反論をしているが、照射食品に関する不安は解消されなかった。1992年にWHOメンバーの1つであるオーストラリアからの要望に応じ、WHOに専門委員会を設置して1980年以降の新しい研究デー

タと、それ以前の古い研究も考慮した新たな評価が実施された。ここでは特に、反対運動の議論となっている報告を注意深く取り上げ、米国政府機関（食品医薬品庁：F D Aや米国農務省：U S D A）およびドイツ連邦栄養研究所の照射食品に関する研究データベースから入手したデータの再評価を実施した。この評価結果は、“ Safety and nutritional adequacy of irradiated food. WHO, Geneva. ”（日本語版「照射食品の安全性と栄養適性」コープ出版、1996年）として1994年にWHOから出版された⁶⁾。

この報告書では、特に毒性学的な観点に重点がおかれ、過去にF D Aがデータベースを用いておこなった評価において採用（留保付き採用を含む）された試験とその影響を記述した表を掲載している。そして、この中で、照射の悪影響が認められたと報告された試験については、WHOの専門家委員会の解釈が示され、なぜ、その影響が観測されたかを解説した上で、ほとんどすべての場合において、それが真に照射による悪影響を示すものとは認められないという判断が下されている。結果的に、WHOの専門家委員会は、F D Aの毒性研究データベースでは照射処理による毒性学的な悪影響は示されていないと結論している。さらに、このF D Aが扱った毒性データベースにおける試験では、ヒトの食餌中に含まれると期待される、より高濃度の放射線分解生成物を含む餌が動物に与えられていることから、WHOの専門家委員会は、これらが毒性試験として適正な感度を有しているとも結論している。

この1992年報告の総合的な結論は次のようにまとめられている。

確立したGMP(適正製造規範)に則って、照射された食品は、以下に述べる3点から安全で栄養学的にも適合性があると考えられる。

- ・ 照射処理は、毒性学的な見地から、人間の健康に有害な影響を及ぼすような食品成分の変化をもたらさない。
- ・ 照射処理は、消費者への微生物学的危険性を増大するような食品中の微生物叢の変化をもたらさない。
- ・ 照射処理は、個人および集団の栄養状態を悪化させるほどの栄養素の損失をもたらさない。

1-1-5 高線量（10kGy以上）を照射した食品の健全性

F A O／I A E A／WHOの合同研究グループは、1997年にジュネーブで会合を開き、10kGy 以上照射した食品の健全性を評価するために、毒性学的、微生物学的、栄養学のおよび、放射線化学および物理学的な点に関するデータのレビューを実施した。この結果はWHOから1999年に出版された⁷⁾。ここでも、数多くの毒性試験についての結果

が膨大な表にまとめられている。そして、観察された悪影響のほとんどに関しては、与えられた餌や栄養が原因で、それが照射に起因するものではないと説明されている。また、いくつかのケースにおいては、観察された悪影響がその後に行われた追試験で再確認されていないことを指摘している。

そして、この合同研究グループは、次の2点を強調した。

- ・ 食品の処理技術の中で毒性学的な検討がもっとも実施されているのは、おそらく食品照射である。
- ・ 発ガン性試験のためのバイオアッセイや何世代にも渡る繁殖試験を含む非常に多くの毒性試験結果は、照射に関連するいかなる急性および慢性毒性の存在も示さない。

そこで、最終的に以下の結論に到達した。

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。

そして、科学的な見地から、**食品照射の線量について10kGy 以上を超えても上限を設ける必要がない**と勧告している。これは、1980年のJECFIの結論や1983年に採択されたコーデックス規格の線量上限の考え方を転換するものである。ただし、ここでの考え方の重要なポイントは、“照射によって達成する目的にかなう適正線量”と記述されている点である。この適正な線量を、たとえば風味などの食品としての価値をとどめながら有害な微生物を殺滅できる線量と捉えれば、技術的な面で利用可能な線量と食品の種類にはおのずと限界が存在すると解釈される。

実質的同等性 (substantial equivalence)

この研究グループの結論では、照射処理を通常の加熱処理や缶詰加工と同等の処理とみなし、食品中の生物学的な危害（病原微生物等）は低減するが、新たに何らかの危害要因となるような物理的あるいは化学的なものを生成することはないとしている。そして、集められた豊富なデータは、高線量照射された食品には、測定可能な誘導放射能レベルの上昇や非照射の食品と区別されるような特徴的な放射線分解生成物が有意なレベルで含まれていることはほとんどないことを示し、これらが食品中に生成する量は大変少なく、最大限に見積もっても毒性学的な影響はないと考えている。そこで照射食品の評価において、実質的同等性 (substantial equivalence) の概念を導入することがより適切であり、高線量照射した食品は、人間が数世紀にわたって食べてきた加熱処理食品と同等に安全であると述べている。

1-1-6 コーデックス国際食品規格

1980年のJECFIの結論を反映し、1983年のコーデックス委員会総会（CAC）においてコーデックス照射食品に関する一般規格（Codex General Standard for Irradiated Foods）および食品処理のための照射施設の運転に関する国際基準（Codex Recommended International Code of Practice for Operation of Radiation Facilities Used for the Treatment of Food）⁸⁾が採択された。この規格基準は、1997年に出された高線量照射に関するFAO/IAEA/WHOの合同研究グループの結論を受けて改定が提案された。この改定案の討議過程において、本報告書の2章の項で取り上げる、2-アルキルシクロブタノン類の安全性に関する疑問が論争を巻き起こし、線量の10kGy の上限撤廃について反対の意見が提出された。最終的には、線量に関して、“すべての食品に関して最低線量は、技術上の目的を達成するのに十分な量とし、最大線量は、消費者の安全性と健全性を損なわない量、あるいは食品の構造、機能性あるいは官能的特性に悪影響をもたらすかもしれない線量よりも低くすべきである。”という前書きに続き、“**最高吸収線量は、正当な技術的目的を達成するのに必要とされる場合を除き10kGy を超えてはならない。**”という表現が採用された。そして2003年のCACにおいて「照射食品に関する一般規格」⁹⁾と「食品処理のための照射施設の運転に関する国際基準」の改定が採択された。なお、後者はタイトルも変更され「コーデックス食品の放射線処理に関する国際規範（Codex Recommended International Code of Practice for Radiation Processing of Food）」と改められた¹⁰⁾。

1-2 ユーロッパ共同体における放射線照射食品の安全性評価

1986年の評価

1986年にヨーロッパ共同体の食品科学委員会(Scientific Committee on Food: SCF)は、欧州委員会が適切に照射した食品の健全性についての助言を求めたのに応じ、1950年以降1985年までに入手可能なデータの評価を実施した。その結果、**10kGy までの線量を照射した食品の安全性評価について動物を使用した飼育試験は必要ない**という見解に達し、1980年のJECFIの結論を支持した。ここでは、照射食品の健康に直接関係する毒性および栄養学的性質ばかりでなく、存在している可能性のある病原菌または腐敗菌についての検討(微生物学的安全性)、化学的な変化(放射線分解生成物の生成量)の観点での考察がなされている。さらに、食品の照射処理における効果と適正線量、照射の工程管理、検知法といった技術的な問題も扱われ、これらの評価結果は1987年に出版された報告書にまとめられている¹¹⁾。

この報告書では、放射線分解生成物について次のように考察している。照射に伴う化学変化には種々の条件が影響するが、生成する多くの化学物質の最大量は予想することができる。放射線化学的な変化を抑制するように注意し、照射食品の成分と照射条件が明らかな場合、放射線処理で生成する個々の生成物の量は ppm のレベルであると考えられる。照射された肉から検出される多くの揮発性物質の90%は他の処理法(加熱など)でも存在すると判断される。放射線化学の理論に基づく計算では、1kGy 照射した肉に生成する特異な揮発性物質(非照射食品中に検出されない成分)の総量は3ppmレベルであり、実際の食品中では1ppmにもならないと推察される。

毒性学および栄養学的な評価では、食品別にデータの考察が行われたが、毒性学的な評価においては、過去の評価で疑問が提起された変異原性試験の結果とトリグリセリドを構成する不飽和脂肪酸の照射に由来する化合物(過酸化物、不飽和アルデヒド、マロンアルデヒドなど)の毒性について、特別の関心が払われた。そして、これらの問題は高線量を単純な食品成分に照射した際に観測される感度のものであり、技術的に適正な線量で照射された食品においては認められていないと結論づけている。

SCFの評価委員会は全ての健全性試験の評価結果を総括し、毒性学的、化学的、微生物学そして技術的にも正当であると考えられる、特定の照射線量と食品の類別を提案した(表1-2-1)。

なお、1986年の評価では高線量照射食品は商業的に応用される可能性がないとの理由で、10kGy 以上の滅菌の目的で処理した食品類(例えば牛肉や食鳥類)のデータに関する考察は実施していない。また、食品添加物と包装材の照射については特に考察を行っていない。

表 1-2-1 1986年に容認された食品の分類と照射線量（ヨーロッパ共同体食品科学委員会）

食品の類別	総平均線量（kGy）
1. 果実	2.0 まで
2. 野菜	1.0 まで
3. 穀類	1.0 まで
4. 澱粉質根茎野菜	0.2 まで
5. 香辛料および調味料	10.0 まで
6. 魚および貝類	3.0 まで
7. 生鮮肉	2.0 まで
8. 食鳥肉	7.0 まで

その後、EUのSCFは、1992年に生乳を原料とするカマンベールチーズの微生物叢の制御、特にリステリアの制御のための照射（2.5kGy）¹²⁾を、1998年にカエルの脚（5kGy）、エビ（5kGy）、アラビアガム（3kGy）、カゼイン（6kGy）、卵白（3kGy）、穀物フレーク（10kGy）、米粉（4kGy）、乾燥血液および製品（5kGy）¹³⁾の8品目の照射を好ましいとする意見を表明している。ただし、これらの照射に対する好意的な意見とは相反し、1999年に合意されたEUの照射食品に関する統一規制（EC 指令1999/2/EC および1999/3/EC）では、EUで共通する唯一の許可品目として、乾燥ハーブ・スパイス、野菜調味料類がリストアップされるに止まった。

2003年の再評価

2003年4月、SCFは、1986年の照射食品に関する評価結果に関し、以降の研究発展に照らした見直しを行った結果を報告した¹⁴⁾。これは、1997年のWHOの高線量照射に関する評価、1999年のEC指令の合意などの状況変化から欧州委員会が発した次の2点の疑問に対する助言を与えるためであった。

- （１）特定の食品の照射に関して線量の上限を決めることが適切かどうか。
- （２）それぞれの食品に対して以下の観点を考慮した個別の評価を実施することが適切かどうか。
 - ・ 消費者の健康に対する照射食品の安全性
 - ・ 技術的な必要性
 - ・ 適正衛生規範や適正農業規範（GAP）の代替とされないこと
 - ・ 高線量照射のための条件を指定する必要性

結論から述べると、この評価では1986年の評価結果を再確認しているが、1994年および1997年のWHO専門家委員会が勧告した「いかなる線量を照射したいかなる食品も安全である」という見解は受け入れず、**食品を類別して最大線量を決めておくのは正当なことであり、各照射食品については引き続き技術的な必要性和安全性について個々に調べる必要がある**との見解を示した。また、委員会は現存する毒性学的なデータベースから得られた安全性と健全性の観点から、**照射食品を生産する10kGyの上限を変更するのは困難である**と判断した。

SCFは、この報告において、照射食品の毒性学的安全性に対して否定的な証拠を示す新たなデータの存在を認めていない。また、10kGy以上の照射食品の人間による臨床的な研究で、照射食品の消費による異常が認められないことにも言及している。さらに、10kGy以上の照射食品の微生物の問題は他の滅菌しない照射食品の場合と同じであり、照射による健康被害は生じないとの判断を示している。しかしながら、上記のような結論に到達した理由として以下の点を指摘している。

- ・ 線量が10kGy以下の照射食品についての毒性学的、栄養学的データベースは、1980年のJECFIや1986年のEU食品科学委員会の報告と比べて著しい発展が見られないため、現時点で以前の見解を変えず、1986年に示した各食品の照射線量と類別を受け入れるべきである。
- ・ 多くの研究は、ヨーロッパや西洋の食品についての安全性を確認したものであり、欧米で用いられない食品加工工程で利用される食品成分についての照射後の成分組成や毒性のデータが得られていない。したがって、SCFは、1994年および1997年のWHO専門家委員会が勧告した「いかなる線量を照射したいかなる食品も安全である」という見解は受け入れられない。
- ・ 10kGy以上の線量を照射した食品においては、食品の安全性を評価する上で許容できる食味条件の確立、放射線分解生成物の低減、放射線による化学反応機構の解明のための放射線化学の研究が続けられるべきである。
- ・ 10kGy以上の照射食品については、限られた毒性試験しか行われておらず、極低温凍結下で10kGy以上照射された即席食品についての毒性試験のデータは提供されていない。

委員会としては今後、10kGy以上照射された食品の安全性と健全性を証明する適正なデータベースが得られるならば、現在の立場を再考するであろうとの見解を示している。

高線量照射の現時点での必要性については、乾燥芳香性ハーブ、香辛料、野菜調味料類のみが衛生的な観点から30kGyまでの照射が技術的に必要であると委員会は認めている。

なお、ここでは放射線特異的分解生成物の2-アルキルシクロブタノン遺伝毒性試験に言及しているが、これまでに実施された試験法だけから遺伝毒性を証明できないこと、サル

モネラを使った突然変異試験の結果がネガティブであること、2-アルキルシクロブタノンを含む高線量照射した鶏肉の長期給餌試験で影響が見られないこと、を述べている。

1-3 英国における放射線照射食品の安全性評価

英国では1967年につくられた規制で、食品の放射線処理と輸入も含めた照射食品の流通（輸入も含む）を実質的に禁止した。その後、この規制の例外適用について検討するため食品照射諮問委員会を設立して、例外適用の条件に関する一般的な指針が作成された。1969年には、治療用として無菌食を必要とする患者に対して食品照射が許可された。

1980年代になって、JECFIの結論や諸外国の動向、食品産業界の意向が考慮され、英国厚生相と農業相は食品照射の再調査の必要性を認識した。そこで1982年に前述の委員会を改組し、産業界や政府とは無関係の食品照射関連の専門家からなる照射食品および新規食品に関する諮問委員会(Adversary Committee on Irradiated and Novel Food: ACINF)が設立された。ACINFには照射食品のすべての事項に関する助言が求められたため、誘導放射能（国立放射線防護委員会）、微生物学（食品の微生物汚染の害に関する常任委員会）、毒性学（食品、消費物資、環境中の化学物質の毒性に関する委員会）、栄養学（新規食品に関する常任委員会）および表示（食品諮問委員会）に関する検討を各委員会に付託し、その結果をうけて1986年に“Report on the Safety and Wholesomeness of irradiated Food”を取りまとめた¹⁵⁾。

この報告書における助言の要旨を以下にまとめる。

1. 最大許容線量 平均10kGy の電離放射線を適性照射された食品は、安全で、食品照射はシェルフライフの延長、病原菌や腐敗菌の殺滅による衛生化、薬剤殺虫の代替処理という目的を達成できる。
2. コバルト60およびセシウム137のガンマ線、5MeV までのエックス線、10 MeV までの電子線を照射に利用できる。
3. 1980年のFAO／IAEA／WHO合同委員会（JECFI）の結論、すなわち平均線量10kGy までは毒性の発現、栄養学的または微生物学的な問題が生じないことを支持する。
4. 食品照射の実施にあたっては、最近勧告された「コーデックス照射食品に関する一般規格」（照射済みの表示の問題を除く）と「食品処理のための照射施設の運転に関する国際基準」に準じた規制の整備が必要である。特に食品照射の一連の各プロセスおよび照射後一定期間は、食品に対して照射の条件等を記載した証明書の添付が必要である。
5. 食品照射の許可が成立した場合、照射食品の消費、流通パターンを調査解析する手法を開発、実施する必要がある。（それらのデータを用いて、予測不能な栄養学的な現象の検出や起こりうるかもしれない照射食品内での新たな毒性発現の恐れについて考慮することは重要である。）

6. 照射食品の小売に際しての表示に対し、広範な問題を考慮して消費者への周知の目的で、以下の項目を勧告する。
- a. 照射食品そのものや照射された成分を含む食品のすべてに対して照射方法および照射済みであることを一定の方法で表示する。
 - b. 上に述べた表示およびそれを表す証明書は食品加工過程のすべてにわたって保持されなくてはならないことを規則で定める。
7. この勧告は10kGy 以上の過剰照射が食品の安全性を損なうことを示唆するものではない。現時点では高線量照射に関するデータが不十分なので確固たる結論を出すのを控えているのである。高線量の食品照射が万一必要となった場合には、あらためて安全性、健全性の再評価を行う必要がある。

この報告を受けて1989年末に英国では、食品照射の原則禁止を決定、1991年に食品照射に関する基準・規制を制定し¹⁶⁾¹⁷⁾果実、穀類香辛料等への照射を許可した(表1-3-1)。

表 1-3-1 英国における許可品目

食品名	許可線量	許可年月日
病人食		1969.12.01
果実（トマト、キノコ、大黃を含む）	2kGy 以下	1991.01.01
野菜（豆類を含む）	1kGy 以下	1991.01.01
穀類	1kGy 以下	1991.01.01
根菜類（パレイショ、タマネギ、ヤム ガーリック、シャロット）	0.2kGy 以下	1991.01.01
香辛料、乾燥調味料	10kGy 以下	1991.01.01
魚介類	3kGy 以下	1991.01.01
食鳥肉（鶏、ガチョウ、アヒル、 ホロホロドリ、ハト、ウズラ、 七面鳥）	7kGy 以下	1991.02.13

（この許可リストは、EUの統一基準における許可リストが完成されれば失効する予定である）

1-4 米国食品医薬品庁（F D A）の放射線照射食品の安全性評価

1-4-1 米国における規制

米国では、1958年に連邦食品医薬品化粧品法（F D & C Act）を改正し、放射線処理を食品添加物として定義した¹⁸⁾。この考え方は現在も継続されており、食品に対する放射線照射の許可手続きは、新たな食品添加物の使用を求めるのと同様に、現行基準「21CFR179: **Irradiation in the Production, Processing and Handling of Food**（食品製造・加工・出荷における放射線照射）」¹⁹⁾ に対して、安全性を証明するデータを添えた変更申請書を提出することで開始される。

この変更提案は、食品製造業者や放射線照射会社からだけではなく、F D A自身のイニシアティブで実施される場合もある。いずれの場合においても、その内容が米国官報（Federal Register）に公告されてパブリックコメントの募集が行われる。審議の結果、規制改定がF D Aにより決定されると、規制改正案が安全性評価結果やパブリックコメントへの回答とともに米国官報に掲載されるため、米国官報の内容は、米国の安全性評価に関する資料として非常に重要である。

現在の規制、21CFR179 のセクションでは、紫外線、マイクロウエーブなどの電磁波の食品の使用についても定めている（つまりこれらも食品添加物として扱われている）。そのうち、21CFR179.26 では、食品照射（電離放射線の使用）についての線源、線量と品目、表示などの条件が既定されている。また、21CFR179.45 には、照射に用いる容器包装に関する規制が定められている。現行の許可品目とその線量を表 1-4-1 に示す。

表 1-4-1 現在 F D A によって照射が許可されている食品とその線量

食品	目的	線量 (kGy)	許可年月日	参照 (官報)
豚肉 (生)	<i>Trichinella spiralis</i> (寄生虫) 抑制	0.3 kGy (最低) 1 kGy (最高)	1985.07.12	50FR15415 ²⁰⁾
青果物	成長、成熟抑制	1 kGy (最高)	1986.04.18	51FR13376 ²¹⁾
全食品	殺虫	1 kGy (最高)	1986.04.18	
酵素製剤	殺菌	10 kGy (最高)	1986.04.18	
乾燥香辛料 / 調味料	殺菌	30 kGy (最高)	1986.04.18	
食鳥肉	病原菌制御	3 kGy (最高)	1990.05.02	55FR18538 ²²⁾
冷凍肉 (NASA 宇宙食)	滅菌	44 kGy (最高)	1995.03.08	60FR12669 ²³⁾
赤身肉 (冷蔵)	病原菌制御	4.5 kGy (最高)	1997.03.12	62FR64107 ²⁴⁾
赤身肉 (冷凍)	病原菌制御	7.0 kGy (最高)	1997.03.12	
卵 (殻付)	病原菌制御	3.0 kGy (最高)	2000.07.21	65FR45280 ²⁵⁾
もやし用種子	病原菌制御	8.0 kGy (最高)	2000.10.30	65FR64605 ²⁶⁾

米国においては、1960年代から小麦、バレイショおよびベーコンの照射が許可された。その後FDAが食品添加物試験用のより厳格な必要条件を開発したが、ベーコンの評価に用いられた動物実験がこの条件を満足できず、1968年にその許可が取り消された。その後、1980年代前半までに、個別の申請に基づいて香辛料の許可などが追加された。FDAはそれらの品目の許可と並行して、照射食品の安全性についての体系的評価と規則の再編成を実施し、1986年に、照射食品の規制を現行の21CFR179.26に移行してその整備を行うとともに、新たに確立した評価基準に基づいて1kGyまでの青果物（成熟遅延、発芽防止など）および全食品（殺虫）の照射、殺菌を目的とした10kGyまでの酵素製剤および30kGyまでの香辛料の照射を許可した²¹⁾。この評価基準と基になる考え方については次項で述べる。

その後の許可品目としては、1990年には米国農務省食品安全検査局（FSIS）の申請による食鳥肉が、1997年には照射会社の申請による赤身肉、2000年には卵ともやし用種子の照射が追加された。米国官報（Federal Register）には、新たな許可に際しての安全性評価の結果だけでなく、既に許可されている照射食品の安全性に疑問が寄せられた場合、その食品の安全性を再評価し、疑問を呈するコメントに回答した結果が公表されている。1988年には、1985年の豚肉の繊毛虫の防除の許可および1986年の許可（一括規則）に対する異議申し立てに対する回答と規則の改定²⁷⁾、1997年には、照射鶏肉の安全性に対する異議申し立てに対する再評価結果と回答²⁸⁾を公表している。なお、FDAの照射食品に対する規制の概略と安全性評価に関する姿勢が、食品安全・応用栄養学センター（CFSAN）の食品照射規制担当者、George PauliによりFDAのウェブサイトにわかりやすく紹介されている。この文書は、公式文書ではないが、FDAの考え方を理解する助けとして別冊資料集Iに収蔵した²⁹⁾。

1-4-2 米国における安全性評価の考え方

米国では他の政府機関と同様、照射食品の安全性評価において、放射線化学的評価、毒性学的安全性評価、栄養学的評価および微生物学的安全性を考慮に入れている。

初期段階での毒性学的評価では、安全係数や最大無作用量を考慮した食品添加物の毒性学的評価法を、照射食品に適用したことで問題が生じた。なぜなら、殺菌の目的で照射処理された食品は食事の大部分を占めるため、その摂取試験において、例えば安全係数の100倍を用いることは不可能で、食餌中の照射食品の含有量を増加させた場合には、栄養学的な悪影響を起こして、多くの混餌試験の結果を混乱させた。その後、放射線化学的な知見も蓄積されたため、これも加味した上での適切な毒性学的試験の評価法に関する検討が、FDAの要請により1980年代の初めまでに実施された。

その結果は1986年にFDAが行った規制改正時の安全性評価において採用されてお

り、それを公告する官報²¹⁾に、この時点までにFDAが照射食品の安全性評価方法を確立するために実施した作業の経過が詳しく紹介されている。

(1) BFIFCの勧告

1979年、FDAは照射食品の安全性評価に用いる毒性試験の要綱を検討するために委員会(照射食品委員会資料事務所, Bureau of Foods Irradiated Food Committee: BFIFC)を設立した。BFIFCは放射線分解生成物の性質、摂取量、人への暴露レベル、最先端の有毒性検査の検出感度を考慮し、諸機関に対して決議指導すべき勧告内容を1980年にまとめた³⁰⁾。

＊BFIFCは照射食品のヒトの摂取量について、最大全食餌の40%は照射しうが、実際に人間が食べるのは食餌の10%は越えないものだろうということを示した。

＊また、BFIFCは、放射線分解生成物について次のように考えた。

- 1) 食品を1kGy照射した場合の全放射線分解生成物は約30ppm程度の収率と推定される。

$$\text{収率(ミリモル/kg)} = \text{線量(krad)} \times \text{G値} \times 10^{-3}$$

ここで、G値の平均を1、食品成分の平均分子量を300として

$$\begin{aligned} \text{1kGyでの収率} &= 30\text{mg/kg食品} \\ &= 30\text{ppm} \end{aligned}$$

- 2) このうち、非照射食品には見出されない特異的放射線分解生成物(URP)は全放射線分解生成物の10%、即ち3ppm、さらにそのうち単一のURP濃度は1ppm以下と推定される。

- 3) 食品中で0.01%を超えないような少量の成分は、50kGyまで照射しても、上記の考え方を適用して、(人間が摂取するURPはわずかであり)安全であると考ええる。

＊さらに、1kGy以下の照射食品について、従来の投与量と影響の相関関係から安全性を判断する毒性試験方法では、照射食品中の有毒な放射線分解生成物の濃度や潜在的なURPの濃度があまりに低いために、毒性学的に意味のある解答を与えるとは期待できないと判断した。

これらの見解に基づいて、BFIFCは照射食品の安全性試験の基準について以下の結論に達し、照射食品の安全性を判断する手順として、通称決定樹(Decision Tree)と呼ばれる図を提示した(図1-4-1)。

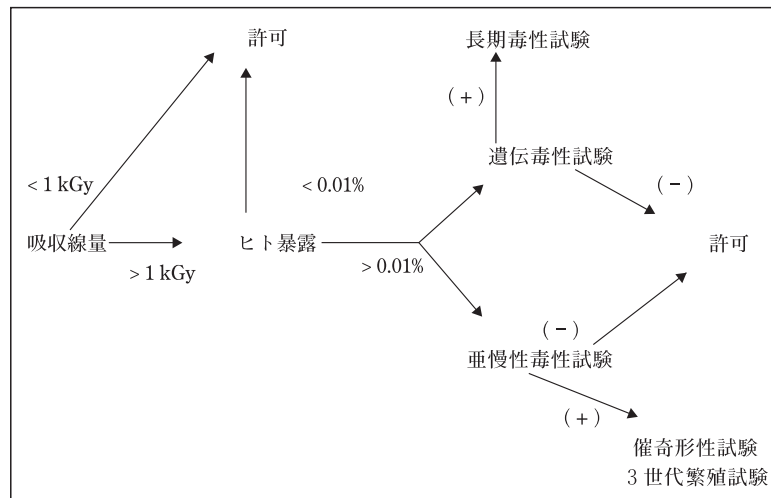


図 1-4-1 FDAの照射食品の安全性に対する判断基準 文献30)より作成

- ・ 1 kGy 以下で照射した食品は、国民が摂取しても健康上の問題はない。
- ・ 1 kGy を超えて照射した食品でも食事に占める割合が 0.01%以下であれば、国民が摂取しても健康上の問題はない、
- ・ 1 kGy を超えて照射した食品で食事に占める割合が 0.01%を超える場合、遺伝的試験と亜慢性試験を行い、有害な結果が得られなければ、国民が摂取しても健康上問題はない。

この決定樹に従うと、摂取量の多い1 kGy以上の線量を照射される食品については、遺伝毒性と亜慢性試験の実施が要求され、その結果、異常が見つければ、長期試験（哺乳動物を用いた慢性毒性試験）、動物試験（催奇形性試験、3世代繁殖試験）による判断が必要とされる。

(2) FDAの作業班 (Task Group) の毒性試験データ分析

1980年のB F I F Cの報告書をうけて、1981年にFDAは放射線処理した食品に関して利用できる毒性学的データの全てを調査するために、照射食品作業班(Irradiated Food Task Group)を設置した。このTask Groupは収集した毒性学データの要約、分析を実施した。この内容については、前述のWHOの1994年のレポート⁶⁾にも詳細に触れられている。

データ調査は3段階を踏んで進められた。第1段階では、全ての毒性学的研究の存在をFDAの整理記録および公開図書館で確認した。第2段階では、こうした研究のうちの441通をコピーして要約し、さらに次の3つのカテゴリーに区分けした。

(1) “受理”、はじめの検討で、十分完全に思われたもの。(2) “留保付き受理”、最初の検討で異論ないようにみえたが、そのデータの解釈を妨げるような相当の欠陥があったもの。(3) “棄却”、実験計画、データのとり方が適切でなく、本質的な評価ができないほど食餌に問題があったりするもの。第3の段階では、副作用の可能性に関し問題を提起したり、照射食品が安全であるという結論に対する証拠を示すような69通の研究を詳細に調べて報告した。

全てのデータの検討に基づき、作業班は照射食品に関する研究は、毒性学的副作用を示していないものと結論した。ただし、今後の安全性評価については次の見解を示した。³¹⁾

- ・ 1kGy 以下の線量を照射した食品に対しては、毒性学的試験によって証明できる安全性の信頼度に限界があり、意味のある答を得ることはできない。よって、作業班はB F I F Cの結論に同意し、1kGy 以下の照射食品に対して毒性試験は不必要であると考える。
- ・ 1kGy より多い線量を照射した食品すべての安全性を評価するためには、収集データだけでは不十分であると結論し、大量に消費されている照射殺菌食品の承認要請は、行政がケースバイケースで判断するよう勧告する。

F D Aは、1986年の規制改正において、以上2つの組織の結論に同意し、1kGy (100krad) を越えない線量で照射した食品は、人間の消費に対し安全であると結論した。このような照射食品中に存在する放射線分解生成物の毒性学的性質は試験で測定することはできないから、このレベルの放射線利用では、毒性試験の要求から除外されるべきものとした。また、30kGy まで照射した植物由来の香辛料、ハーブ類についても、その摂取量がわずかであることから毒性試験を実施しなくても安全との判断をしている。

決定樹はあくまでも勧告という位置づけにあり、これを基にした評価方法が法的な裏付けを持っているわけではない。1994年にWHOが、信頼に足る動物給餌実験を個々ではなく全体的に考察する委員会レポートを発行すると、F D Aは照射食品の安全評価に同様のアプローチを取る事にし、赤身肉の許可にあたっては、鶏肉や他の生鮮食品に関する毒性学的評価データも考慮に入れた判断を実施している。

1-4-3 個別食品に対する評価の経緯

今回の調査では、文献収集のためF D Aの照射食品の規制担当者と面会し、同時に、主な照射食品、香辛料、食鳥肉、赤身肉の安全性評価の根拠に対する質問をした。回答の要点を表1-4-2 にまとめた。さらに、米国官報にある内容も含めて、評価の経緯を示す。

表1-4-2 F D Aが許可している主な照射食品の安全性評価の根拠

品目	評価に用いた根拠
香辛料	B F I F Cの勧告（摂取量の少ない食品については50kGyまで安全とする）に従った。
食鳥肉	F D Aが入手していた既存の個々の研究に関するレビューに基づく（鶏肉を用いた混餌試験、遺伝毒性試験等）
赤身肉	WHOの1994年のレポート（1992年の協議による）によった。

（1）香辛料

F D Aは1983年に申請に基づいて、リストアップした品目の各スパイスについての10kGyまでの照射を認可した。1986年の規制改正は、規制を変更した方が効果的とのF D A自身の判断によって実施され、30kGyまでの香辛料・調味料類（正確な表現では、乾燥または脱水した芳香性の植物性物質）の照射が許可された。

この時の判断根拠は、F D Aが1980年のB F I F Cのレポートの結論、“乾燥して摂取量の少ない食品については50kGyまで、またあらゆる食品に1kGyまでの照射をした場合、動物実験などをしなくとも毒性学的に安全である”を受け入れたことによる。F D Aは、毒性学的観点だけでなく、これらの植物性芳香性物質が、主たる栄養の摂取源とは認められないことから、これらの食品を照射してもヒトが摂取する上で、栄養学的な損失が認められないとの判断も示している。なお、線量の上限については、安全性は50kGyまで保証されるが、30kGyを越える照射をスパイスに対して行うことについて業界の興味がほとんどなかったことから、F D Aは30kGyの上限を設けた。

F D Aは、全てのスパイスの照射が実施された場合の摂取量の合計が、決定樹に示された全食品摂取量の0.01%以下になることを厳密に証明した訳ではない。B F I F Cの判断基準は勧告であり、この0.01%という数字に対する大小の判断が、照射食品の安全性評価において法律的に求められている訳ではない。1986年の最終規則の決定において、F D Aはむしろ、照射される可能性があるスパイス類の1日摂取量の合計は、食事の0.01%を上回る可能性があることを認めている。その上で、異種の香辛料から照射によって生成する分解物の種類はおそらく異なっており、照射処理された香辛料、調味料類から摂取される照射による分解生成物の量が少なく、安全と判断されると述べている。

（2）食鳥肉（Poultry）

1990年に、サルモネラ対策として食鳥肉の照射が許可された。この申請は Radiation

Technology Inc.および米国農務省食品安全検査局（F S I S）による申請に対する対応としてとられた措置である。

F D Aは、この時の安全性評価に際して、鶏肉を用いた毒性試験データに基づいて評価した。この時用いられた主要な毒性試験データは、申請者から提出された、カナダのBio-Research Laboratories for Atomic Energy of Canada, Ltd.が実施したマウスの80週間発癌性試験、オランダのCentraal Instituut Voor Voedingsonderzoek(C I V O)で実施された3つの混餌試験（ラットの多世代試験、ラットの慢性試験、ビーグル犬の1年間の毒性試験）である。F D Aはこれらのデータが照射鶏肉の毒性学的な安全性を証明していると判断した。さらに、F D Aの側から、ラルテック科学サービスが実施した59kGy 照射した鶏肉の混餌試験（2章参照）、ドイツの連邦栄養研究所で実施した鶏肉の遺伝毒性試験を挙げ、いずれのデータも3kGyの食鳥肉の照射許可するための判断において毒性学的安全性を立証していると評価した。

（3）赤身肉 (*red meat*)

1997年12月F D Aは委託照射会社、イソメディック社の申請に対応して、赤身肉の照射を許可した。この評価において、F D Aは、放射線分解生成物に関しては化学的な共通性があり、特定の生鮮食品に関する安全性評価において種々の条件で放射線処理した全生鮮食品のデータを検討することは妥当であると判断し、**ケミクリアランス**の概念を強調している。

F D Aはまず、1981年のTask Group の毒性データ分析で採用したビーフシチューと濃縮ミルクを給餌したラットの試験、および、1990年の鶏肉照射の評価根拠に用いた3つの動物給餌試験の結果が、過去における照射生鮮食品の安全性を立証するものとして存在することを指摘した。次にWHOが1992年に健全性の再評価を実施した際、F D AのTask Groupが扱った全てのデータ、U S D Aがまとめたラルテックの鶏肉試験のデータ、ドイツ連邦栄養研究所が有する全てのデータベースを総合的に評価したことから、F D AはこのWHOの再評価作業が、毒性学的な評価として十分な感度を有した信頼性の高いものと認められることを指摘した。その上で、申請された照射赤身肉の毒性学的安全性評価においては、以前のF D Aの評価とWHOの再評価で扱ったデータベースを改めて吟味し、許可条件における照射肉の安全性を証明するに足る動物混餌試験や遺伝毒性試験の結果が存在すると結論した。F D Aは1997年の官報²⁴⁾の中で、具体的な試験の例を挙げている。その際、過去に問題点を指摘されたいくつかの試験の解釈も述べた。赤身肉の照射を実施した場合の栄養学的考察では、特にチアミンに対する影響を詳細に分析し、放射線処理が食物からのチアミン摂取量に影響を及ぼさないと結論した。微生物学的検討においては、生存微生物の増殖パターンにおいて、特にボツリヌス菌の増殖に注目した分析を実施し、この菌も含め放射線照射が微生物学的ハザードをもたらさないと結論した。

1-5 カナダにおける放射線照射食品の評価

現在の規制と許可要件、評価項目

カナダでは、1960年代にいくつかの食品への照射を許可した。その後カナダ厚生省（現保健省）は、1983年7月28日付けのインフォメーションレター 651号において、食品照射を食品添加物から食品処理としての取り扱いに変更し規制強化する提案を行った。また同時に、JECFIによる10kGy以下の照射食品の健全性の見解を受け、新しい適用の許可申請の際の健全性試験を10kGy以下の場合に免除することも提案をされた。1988年にこの提案に対するパブリックコメントへの回答と審議の結果に基づく改正規制案をインフォメーションレター 746号³²⁾として公表し、1989年に物理処理としての新しい規制が食品・薬品規制法の中に定められた。

カナダの照射食品の規制 Division 26 of Food and Drug Act and Regulation³³⁾ には、許可品目および照射条件、目的と線量を記載したリストが掲載されている。この表への食品の追加や変更には以下要件を含む提案を必要とすることが、同規制に定められている。

- (a) 電離放射線の種類、頻度および最小および最大線量を含む、照射の目的および詳細
- (b) 申請された電離放射線の最小線量が照射の目的を達成し、また、最大線量は目的を達成するのに必要な量を超えないことを示すデータ。
- (c) 使用された線量計の性質に関する資料と、食品中での線量測定頻度、線量測定の結果が食品中の吸収線量を正しく反映していることを保証するデータ
- (d) 効果を示すデータ。もしあれば、申請された照射条件や照射と他のプロセスを組み合わせた場合における、生および調理後の食品の栄養学的品質に関するデータ。
- (e) 照射食品が、人間の消費に不適切となるような化学的、物理的な特性あるいは微生物学的な著しい性質変化を起こしていないことを保証するデータ
- (f) 局長が要求するところで、提案された照射条件の下で安全であると確証するデータ
- (g) 照射食品に対して推奨される時間、温度および包装を含む貯蔵、輸送の条件、また非照射の同一食品に対して推奨される貯蔵輸送条件との比較
- (h) 申請された照射の前後で、食品に適用される他の処理の詳細。
- (i) 照射食品の消費者および購入者が、その特徴、価値、成分、利益あるいは安全性に関して偽られたり誤解を生じたりしないために局長が要求するデータ。

カナダ保健省は、10kGy以下を照射した食品に対して、毒性学上の危険はないことは大筋で認めており、追加または新しい毒性試験が必要であるかどうかはその申請内容をケースバイケースで吟味して決定する。そこで、規制中の許可（変更）申請に必要な要件については、上記の（f）の項目の記述を採用した。このように、照射食品の安全性評価はWHOなど国際機関の見解を尊重しつつも独自の評価基準で実施すると言う立場をとっている。

現行の規制における許可品目は表1-5-1の通りである。

表1-5-1 カナダ保健省が現在放射線照射が許可している品目と吸収線量

項目	カラム I 食品	カラム I I 電離放射線における許可線源	カラム I I I 処理の目的	カラム I V 許可吸収線量
1.	パレイショ (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	コバルト 60	貯蔵中の発芽防止	最大 0.15 kGy
2.	タマネギ (<i>Allium cepa</i>)	コバルト 60	貯蔵中の発芽防止	最大 0.15 kGy
3.	小麦、小麦粉、 小麦全粒粉 (<i>Triticum</i> sp.)	コバルト 60	貯蔵された食品中の 害虫の繁殖抑制	最大 0.75 kGy
4.	粒状もしくは 粉末香辛料および 乾燥調味料等	コバルト 60、セシウム 137、 加速器からの電子線 (最大 3 MeV)	微生物数の低減	最大 10 kGy (平均総線量)

*許可年月日: 1. 1960 年 11 月 9 日, 2. 1965 年 3 月 25 日, 3. 1969 年 2 月 25 日, 4. 1984 年 10 月 3 日

新たな申請に対する評価

カナダ保健省は新たに、食鳥肉（生および冷凍）、牛肉（生および冷凍）エビ（生、冷凍、乾燥、加工品）、マンゴの4つの食品についての照射許可の申請を受け、その評価を2002年10月末までに終了した。その結果、下記条件でそれぞれの食品を照射することを安全と認め、現行規制（Division 26 of Food and Drug Act and Regulation）の表に以下に示すような5～8までの項目を追加することを盛り込んだ改正案を提案した（2002年11月23日 カナダ官報 project 1094）³⁴⁾。この経緯の概略と全体的な結論³⁵⁾および各食品についての個別の評価結果の概略はHealth Canadaのホームページより閲覧可能である^{36～39)}。

どの食品においても、①毒性学的な観点における照射食品の化学変化、②栄養学的適合性、③微生物学的な影響、の3つの観点における科学的な分析を実施し、示された証拠の総合的な重み付けから照射によるリスク（またはベネフィット）を評価している。そして、①毒性学的化学変化では、放射線照射によって生成する分解生成物の量は極めて低いこと（ppbレベル）、②栄養素の変化では、チアミン、リボフラビン、ナイアシンの減少が認められること、③微生物学的な評価においては、提案された線量で病原微生物に対して効果が

あるが、この線量で全ての微生物が殺滅される訳ではない。ただし、適切な貯蔵と包装を実施すれば、競合するバクテリアが健康リスクを脅かすことはないこと、を指摘した。そして、与えられた照射条件でこれら４種の食品の照射を実施した場合の総合的な評価として以下を導き出している。

- ・ これらの照射食品の消費は消費者へのリスクをもたらさない。
- ・ これらの食品の照射は栄養素の重要な減少をもたらさない。
- ・ 食品照射は大腸菌とサルモネラ菌のような病原菌のレベルを低下させ、貯蔵期間の延長と昆虫の加害を減少させ、これらの食品の安全性および質を改善することができるであろう。

表 1-5-2 カナダ保健省によって現在、放射線照射が提案されている食品と条件

項目	カラム I 食品	カラム I I 電離放射線における許可線源	カラム I I I 処理の目的	カラム I V 許可吸収線量
5.	マンゴ	コバルト 6 0	貯蔵中の昆虫繁殖の抑制、 製品寿命の延長	0.25kGy (最小) 1.5kGy (最大)
6. 1	新鮮 食鳥肉	コバルト 6 0、セシウム 137、 加速器からの電子線 (最大 10MeV)	病原体の増殖抑制、 微生物量の減少、 製品寿命の延長	1.5kGy (最小) 3.0kGy (最大)
6. 2	冷凍 食鳥肉	コバルト 6 0、セシウム 137、 加速器からの電子線 (最大 10MeV)	病原体の増殖抑制、 微生物量の減少、 製品寿命の延長	2.0kGy (最小) 5.0kGy (最大)
7. 1	新鮮,調理,乾燥 小型および大型 エビ類	コバルト 6 0、セシウム 137、 加速器からの電子線 (最大 10MeV)	病原体の増殖抑制、 微生物量の減少、 製品寿命の延長	1.5kGy (最小) 3.0kGy (最大)
7. 2	冷凍 小型および大型 エビ類	コバルト 6 0、セシウム 137、 加速器からの電子線 (最大 10MeV)	病原体の増殖抑制、 微生物量の減少、 製品寿命の延長	1.5kGy (最小) 5.0kGy (最大)
8. 1	新鮮／ 冷蔵 牛挽肉	コバルト 6 0、セシウム 137、 加速器からの電子線 (最大 10MeV) エックス線 (最大 5MeV)	病原体の増殖抑制、 微生物量の減少、 製品寿命の延長	1.5kGy (最小) 4.5kGy (最大)
8. 2	冷凍 牛挽肉	コバルト 6 0、セシウム 137、 加速器からの電子線 (最大 10MeV) エックス線 (最大 5MeV)	病原体の増殖抑制、 微生物量の減少、 製品寿命の延長	2.0kGy (最小) 7.0kGy (最大)

2002年11月23日官報に規制の改正提案が公告され、現在、コメント検討期間中であり最終決定に至っていない。

カナダにおける評価の特徴は、個別の食品に対して実際に照射を実施する条件や処理の工程を考慮して安全性評価を実施するところである。特に、上記のエビ類では、微生物学的な影響面で、放射線に対して強い抵抗性を持つボツリヌス孢子が潜在する可能性を考慮した。そこで、線量に関しては、照射によってターゲットである病原性微生物を殺滅することができ、照射後の微生物叢の競合においてボツリヌス菌の成長を抑制することができるような腐敗菌の十分な生存を考慮して、最大線量を申請の5.0kGyから3.0kGyに限定する必要があること結論した。

なお、カナダ保健省は、この4つの食品の照射の評価と同時に、放射線特異的分解生成物である2-アルキルシクロブタノン類についての評価を実施している⁴⁰⁾。その方法は新たな毒性学的実験の実施によるものでなく、①既存の照射食品全体における毒性学的/動物給餌試験の結果と、②2-ドデシルブタノンの毒性に対する懸念を想起させた文献（本報告書2章参照）の内容評価、③2-ドデシルシクロブタノンの照射食品からの摂取量推定によるものである。この摂取量推定は、化学分析文献に示されたシクロブタノンの生成効率（ドデシルシクロブタノン（ μg ）/脂質重量(g)・線量（kGy））を根拠に、カナダにおける鶏肉（ロースト用鶏肉の皮の可食部）および牛挽肉（中挽）の脂肪含有量と、それらの食品のカナダ人の実平均消費量のデータとを用いて、鶏肉（3kGy）および牛肉（3kGy）からカナダ人が摂取すると推定される2-ドデシルシクロブタノン量を算定した。

その結果、①過去の毒性学的（動物給餌試験）の結果は容認できること、②懸念を示す試験結果は疑わしく解釈が困難であること（特に試験法の妥当性）、③2-ドデシルブタノンの摂取量の推定値は、懸念を示す論文での実験条件に比べて著しく低いこと、を指摘し、放射線処理技術の応用をさらに遅らせることは適切ではないと言う判断を下した。

1-6 オーストラリア/ニュージーランドにおける放射線照射食品の評価

食品照射基準作成までの経緯

オーストラリアでは、食品照射に関しては態度を保留し（モラトリアム）、ニュージーランドでは、1984年のNew Zealand Food Regulationにおいて食品照射を禁止していた。しかし、両国の食品基準の統一を目的に Australia New Zealand Food Authority（ANZFA）が1991年に設立され、同時に照射食品に関する基準を制定する最初の提案がまとめられた。両国でのパブリックコメントの集約を経てANZFAはこの草案に関する審議を終了し、1999年8月3日、両国の厚生大臣はオーストラリア、ニュージーランドの食品基準協議会の会合で、新しい食品基準において、食品照射を許可することに同意した。そして照射食品に関する基準が、当時のオーストラリア食品基準A17（ニュージーランド食品規則267）として成立した。なお、2003年1月から、両国の食品基準は完全統一され前述のANZFAは、Food Standard Australia New Zealand(オーストラリア・ニュージーランド食品基準機関：FSANZ)と呼ばれる組織に改められた。照射食品に関する基準は、Food Standard Code 1.5.3⁴¹⁾に、新食品（Novel Food）と同じカテゴリーに位置づけられた。

基準と許可品目

Standard1.5.3では、食品照射を原則的に禁止し、限定された食品（群）に対してケースバイケースの許可を与えている。許可品目は、条項4の中の表に、照射の目的、最小、最大線量とともに記されている。食品照射がGMPの代替として利用されることがあってはならないことも明記され、照射は食品衛生上の必要性や発芽防止、害虫防除などの技術上での必要性を満たす場合にのみ適用できるとしている。また、再照射は禁止されている。この基準の中には、使用できる線源、記録、表示義務などについても規定されている。2005年3月現在までに、Standard 1.5.3における許可品目について、ハーブおよび香辛料類（A413）および熱帯果実（A443）の照射に関する2つの申請（Application）が提出され、その評価結果に基づき、現行（2005年3月現在）の許可品目に対する規制線量は表-1-6-1のように定められている。

表-1-6-1 オーストラリア/ニュージーランドにおける許可品目と条件

カラム I 食品	カラム I I 最大・最小線量	カラム I I I 条件
パンの実、スターフルーツ、 チェリモア、ライチ、リュウガン、 マンゴ、マンゴスチン、パパイヤ、 ランプータン	最小: 150 Gy 最大: 1 kGy	食品は検疫処理を目的とした害虫防除の 目的においてのみ照射できる 上述した技術的な目的を達成するのに必要 な最小線量。

ハーブ、香辛料（ただしStandard 1.4.2 目録4に示した物＊） ハーブ抽出物-生、乾燥または発酵させ た葉、花、または植物の他の部分から作 った飲料で、茶を除く	最小：第3列を条件と し規定しない。 最大：6kGy	食品は、雑草防除を含む発芽防止、害虫防除 の目的においてのみ照射できる。 上述した技術的な目的を達成するのに必要 な最小線量。
ハーブ、香辛料 （ただしStandard 1.4.2の目録4に示し た物＊）	最小：2 kGy 最大：30 kGy	食品は殺菌の目的においてのみ照射できる。 食品は照射前、後ともGMPの手順に則り行 わなければならない。
ハーブ抽出物-生、乾燥または発酵させ た葉、花、または植物の他の部分から作 った飲料で、茶を除く	最小：2 kGy 最大：10 kGy	食品は殺菌の目的においてのみ照射できる。 食品は照射前、後ともGMPの手順に則り行 わなければならない。

＊ハーブ/香辛料 残留化学物質の限界濃度基準の項目での定義と同じである

オーストラリア/ニュージーランドにおける評価法の特徴

ハーブ/香辛料の照射に関する申請に対する最終評価報告書(2001年9月)⁴²⁾ および、熱帯果実の照射に関する申請に対する最終評価報告書(2002年12月)⁴³⁾ では、それぞれの食品を照射した場合の安全性、技術的な効果、栄養面での影響に対する科学的評価と、申請に関する社会的な影響も含めた論点を分析した結果が述べられている。そして、全体の結論を反映した基準改定に関する勧告がなされている。このうち科学的な評価の手法については、以下のような特徴が挙げられる。

- 1) WHOの専門家委員会による健全性評価結論(WHO:1994年および1999年報告書)およびその根拠の採用
- 2) ケミクリアランス概念に基づく評価
- 3) 自国の国民の栄養摂取調査に基づく食事モデルを利用した栄養学的影響評価
- 4) 照射効果の分析に基づく技術的な正当性の評価

ANZFAの評価においては、申請において照射の許可が求められる品目について、毒性学的、微生物学的、化学的および栄養学的観点から評価が行われている。そのうち、毒性学的および化学的な安全性評価の元になるデータは、WHOが取りまとめた1994年および1999年の2つの報告書に引用されたものが採用されており、ANZFAとして新たな毒性試験は実施していない。また、JECFIやWHOの専門家委員会が照射食品の評価における概念として導入したケミクリアランスについて、過去の経緯を解説すると

ともに、この概念に基づいて、類似の化学成分から構成される一連の食品グループについては、そのグループにおける他の食品の毒性学的な評価結果が適用できることから、ハーブ抽出物については、毒性試験（動物試験）の実施結果がなくとも安全であるとの結論を導きだしている。また、同様に熱帯果実についても、ここで許可した種類の熱帯果実の全てに対してデータが存在するわけではないが、過去に行われた数々の果実類に関する毒性学的データにおける安全性の結論から、これらの果実の安全性も結論できるとしている。

なお、健康リスクが懸念された放射線分解生成物 2-アルキルシクロブタノン類に関しては、評価実施時点で入手可能な遺伝毒性の試験結果（コメットアッセイ）では、生体に対する危険因子の判断ができないとした見解を示した。その上で、熱帯果実(可食部)における脂肪酸含有量のデータから、照射後に生成する 2-アルキルシクロブタノン類の濃度は非常に低いと考えられ、照射した熱帯果実の消費がこの化合物による毒性学的な問題を示唆することはないとしている。

ANZFAは、許可申請された食品の食事に対する影響を判断するために、自国の栄養調査に基づいて構築された食事モデル解析ソフトウェアを用い各食品の摂取量を推定した。さらに、照射処理によって比較的影響を受けやすいとされる微量栄養素（ビタミンA、ビタミンC、チアミン、葉酸）および、不飽和脂肪酸、ビタミンEの摂取量全体に対する、各（照射）食品からの寄与率を推定し、申請された食品がこれらの微量栄養素の供給源として重要でないと判断した。そして、放射線処理を実施しても、オーストラリア/ニュージーランドの食事における栄養含量に影響がないと結論した。

また、ANZFAの科学評価レポートでは、その食品の照射を必要とする技術的な背景と照射効果を分析し、照射の正当性を評価している。ハーブおよび香辛料の許可申請（A413）では、ナッツ類の微生物制御と害虫防除が含まれていたが、ナッツの汚染微生物について病原菌の存在を特定できないとし、マイコトキシンを産生するカビについては、毒素産生を促進するような悪い保存状態がなければ問題はないとして、照射の技術的な必要性を認めなかった。その結果、照射ナッツ類の安全性は確認されたが、最終的に照射許可が勧告されなかった。

引用文献

WHO/FAO/IAEA 関連レポート

- 1) FAO (1962) Report of the FAO/WHO/IAEA Meeting on the Wholesomeness of Irradiated Foods, 23-30 Oct. 1961, Brussels, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- 2) WHO (1966) The technical basis for legislations on irradiated food. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. Technical Report Series, No. 316.
- *3) WHO (1970) Wholesomeness of irradiated food with special reference to wheat, potatoes and onions. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. Technical Report Series, No. 451.
＜資 I -1-1＞
- *4) WHO (1977) Wholesomeness of irradiated food. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. Technical Report Series, No. 604. ＜資 I -1-2＞
- *5) WHO (1981) Wholesomeness of Irradiated Food. Technical Report Series, No. 659.＜資 I -1-3＞
- *6) WHO (1994) Safety and nutritional adequacy of irradiated food. WHO, Geneva. ＜原本＞
(日本語版：照射食品の安全性と栄養適性 コープ出版 1996) ＜原本＞
- *7) WHO (1999) High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group, Geneva Technical Report Series, No. 890.
＜資 I -1-5＞
- 8) Codex Alimentarius Commission (1984) Codex general standard for irradiated foods and recommended international code of practice for the operation of radiation facilities used for the treatment of food. CAC/Vol. XV-Ed. 1, FAO, Rome.
- 9) Codex Alimentarius Commission (2003) *Codex General Standard for Irradiated Foods* (CODEX-STAN 106-1983, Rev. 1-2003)
http://www.codexalimentarius.net/download/standards/16/CXS_106_2003e.pdf
- 10) Codex Alimentarius Commission (2003) Recommended international code of practice for radiation processing of food (cac/rcp 19-1979 , rev.2, 2003)
http://www.codexalimentarius.net/download/standards/18/CXC_019_2003e.pdf

EU 食品科学委員会関連

- *11) SCF (1987) Report on the irradiation of food. Opinion given in March 1986. 18th Series of Reports of the Scientific Committee for Food, EUR 10840, European Commission, Luxembourg.
(英語版は 1989 年に改訂) ＜資 I -2-1＞
- 12) SCF (1994) Report on irradiated Camembert cheese. 32nd Series of Reports of the Scientific Committee for Food, EU Commission, Luxembourg.
- 13) SCF (1998) Opinion of the Scientific Committee on Food on the irradiation of eight foodstuffs

(expressed on 17.09.1998)

- ※14) SCF (2003) Revision of the opinion of the Scientific Committee on Food on the irradiation of food (expressed on 4 April 2003) <資 I -2-2>

英国関連

- ※15) Adversary Committee on Irradiated and Novel Food (1986) Report on the Safety and Wholesomeness of irradiated Food HMSO, London. <資 I -3-1>
- ※16) The Food (Control of Irradiation) Regulations SI 2490. HMSO, London (1991) <資 I -3-2>
- ※17) Guidelines on the Food (Control of Irradiation) Regulations. HMSO, London (1991)<資 I -3-2>

米国関連

- 18) Food, Drug Cosmetic Act (1958) S.Rept 2422, 85th Cong., 2dSess.63(1958)-上院報告 2422、85 議会第 2 定例会 63 へ -ジ、1958 年 (過去の規制の原本は入手できないので出典の確認は以下の総説によった。Pauli G.H. and Takeguchi C.A. (1986) Irradiation of Foods - An FDA Perspective, *Food Reviews International*, **2**, 79.
- 19) Code of Federal Regulations 21CFR179 : Irradiation in the Production, Processing and Handling of Food <http://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?CFRPart=179>
- 20) FDA(1985) Irradiation in the Production, Processing, and Handling of Food : Final rule, *Federal Register*, **50**, 15415-15417.
- ※21) FDA (1986) Irradiation in the Production, Processing, and Handling of Food : Final rule, *Federal Register*, **51**, 13376-13399. <資 I -4-3>
- ※22) FDA (1990) Irradiation in the Production, Processing, and Handling of Food: Final rule, *Federal Register*, **55**, 18538-18544. <資 I -4-5>
- 23) FDA (1995) Irradiation in the Production, Processing, and Handling of Food: Final rule, *Federal Register* **60**, 12669- 12669.
- ※24) FDA (1997) Irradiation in the Production, Processing, and Handling of Food: Final rule, *Federal Register*, **62**, 64107-64121. <資 I -4-7>
- 25) FDA (2000) Irradiation in the Production, Processing, and Handling of Food: Final rule, *Federal Register*, **65**, 45280-45282.
- 26) FDA (2000) Irradiation in the Production, Processing, and Handling of Food: Final rule, *Federal Register*, **65**, 64605-64607.
- ※27) FDA (1988) Irradiation in the Production, Producing, and Handlich of Food: Final Rule, Denial of Request for Hearing and Response to Objection, *Federal Register*, **53**, 53176-53209. <資 I -4-4>

- *28) FDA (1997) Irradiation in the Production, Processing, and Handling of Food: Final rule. *Federal Register*, **62**, 64102-64107. <資 I -4-6>
- *29) Pauli G.H. (1999) U.S. Regulatory Requirements for Irradiating Foods,
<http://www.foodsafety.gov/~dms/opa/-rdtk.html> <資 I -4-2>
- *30) Brunetti A.P. et al. (1980) Recommendations for Evaluating the Safety of Irradiated Foods, U.S. Food and Drug Administration, Washington, D.C.<資 I -4-1>
- 31) Food Additives Evaluation Branch (1982) "Final Report for the Task Group for the Review of Toxicology Data on Irradiated Foods", April 9.

Health Canada 関連

- *32) Health and Welfare Canada, Information Letter June 4 1988 <資 I -5-1>
- 33) Food and Drug Acts and Regulations Part B section 26
http://www.hc-sc.gc.ca/food-aliment/friia-raaii/food_drugs-aliments_drogues/act-loi/pdf/e_d-text-2.pdf
- 34) The *Canada Gazette* of November 23, 2002
http://www.hc-sc.gc.ca/food-aliment/friia-raaii/food_drugs-aliments_drogues/part-partie_1/e_109401.html
- 35) Health Canada (2002) Food Irradiation-Proposed Regulatory Changes
http://www.hc-sc.gc.ca/food-aliment/fpi-ipa/e_rlo01.html
- *36) Health Canada (2002) Food Irradiation-irradiation of mangoes: Summary of Submission Process http://www.hc-sc.gc.ca/food-aliment/fpi-ipa/e_mango_irradiate01.html<資 I -5-2-1>
- *37) Health Canada (2002) Food Irradiation- irradiation of poultry: Summary of Submission Process <資 I -5-2-2>
http://www.hc-sc.gc.ca/food-aliment/fpi-ipa/e_summary_irradiation_poultry01.html
- *38) Health Canada (2002) irradiation of shrimp: Summary of Submission Process
http://www.hc-sc.gc.ca/food-aliment/fpi-ipa/e_shrimp_irradiate01.html<資 I -5-2-3>
- *39) Health Canada (2002) irradiation of ground beef: Summary of Submission Process
http://www.hc-sc.gc.ca/food-aliment/fpi-ipa/e_gbeef_submission01.html<資 I -5-2-4>
- 40) Health Canada (2002) Evaluation of the significance of 2-Dodecylcyclobutanone and other alkylcyclobutanones.
http://www.hc-sc.gc.ca/food-aliment/fpi-ipa/e_cyclobutanone.html

オーストラリア/ニュージーランド関連

- 41) FSANZ : Food Australia New Zealand Food standard Code; Standard 1.5.3 Irradiation of Food
<http://www.foodstandards.gov.au/srcfiles/ACF1C7D.pdf>
- *42) FSAN (2001) Application A413 Scientific Assessment Report “Request to include herbs, spices, herbal infusions and peanuts, almonds, cashews and pistachio nuts in the Food Standards Code” Sep 19 2001 <資 I -6-1>
- *43) FSAN (2002) A443 Report on the Technical, Safety and Nutritional Aspects of Irradiation of Tropical Fruits Dec 18 2002 <資 I -6-2>

*印の資料については、本調査報告書 別冊文献資料集 I-海外評価資料に収蔵した。下線のあるものについては本調査で翻訳を作成した。末尾の番号は資料集における資料番号を示す。

1-7 わが国における放射線照射食品の評価

初期の研究

わが国の食品照射研究は1955年（昭和30年）頃より開始された。当初、殺菌、殺虫、発芽防止などの照射効果などの研究が中心であったが、研究勢力の拡大とともに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ような基礎的な研究が、大学や多くの研究機関で実施された¹⁾。

原子力特定総合研究

1967年に原子力委員会は食品照射をナショナルプロジェクトとしての原子力特定総合研究に指定し研究開発を開始した。本プロジェクトではバレイショ、タマネギ、米、小麦、ウインナソーセージ、水産練り製品、ミカンの7品目を取り上げられ、健全性（照射食品の安全性および栄養適性）、照射効果、照射技術についての研究を国公立の研究機関、大学によって分担、実施した。その総括は表1-7-1に示すように、7品目全ての食品は健全性に問題がなく照射効果も満足する結果であるとされた。

このプロジェクトにおける健全性試験では、実験動物への照射食品の投与量の設定に関し、初期の研究では薬剤と同じ100倍量の考えで「食品の投与量×吸収線量」により動物実験を開始した。その結果、タマネギのように過剰投与により非照射試験区および照射試験区とも同じように動物に異常が生じたこともあった。原子力特定研究の成果は、研究終了後品目ごとに成果報告にまとめられ、1988年に最後の品目であるミカンの報告書が提出されてプロジェクトが終了した。これらの研究成果を基に1972年にはバレイショの放射線による発芽防止処理が旧厚生省により認可され、1974年より北海道士幌農協において商業照射が開始された。

原子力特定総合研究における健全性試験の項目

このプロジェクトで実施された安全性試験（毒性試験および遺伝毒性（変異原性試験））の調査項目とデータの所在を表1-7-2に示す。また、栄養試験および栄養成分の変化に関する調査項目を表1-7-3に示す。オリジナルデータの所在は主として、食品照射運営会議による研究報告書の資料であり、このデータは日本原子力研究所高崎研究所が運営するホームページ <http://takafoir.taka.jaeri.go.jp/> に公開されている。また、バレイショの変異原性試験は、バレイショの研究成果報告書の提出後に終了し、その結果は、科学雑誌に公表されている。

表 1-7-1 原子力特定総合研究の総括

品 目 (照射目的)	放射線の種類	照 射 効 果		判 別 法	健 全 性 試 験				実施 期間 年度	備 考
		効 果	問 題 点 等		栄養試験	慢性毒性試験	世代試験	変異原性試験		
パレイショ (発芽防止)	γ 線	70～150Gy の照射で室温中で 8ヶ月間発芽防止が可。	特になし。	実用的な方法は見当 たらなかった。	影響なし	影響なし	影響なし	影響なし	1967 1971	食品衛生許可 (1972 年) 実用化 (1974 年)
タマネギ (発芽防止)	γ 線	20～150Gy の照射で室温中で 8ヶ月間発芽防止が可。	特になし。	実用的な方法は見当 たらなかった。	影響なし	影響なし	影響なし	影響なし	1967 1978	研究成果報告 済(1980 年)
米 (殺虫)	γ 線	200～500Gy の照射で 殺虫効果は完全。 殺菌効果もある。	品種により照射後の食味が 低下するものあり。	実用的な方法は見当 たらなかった。	影響なし	影響なし	影響なし	影響なし	1967 1979	研究成果報告 済(1983 年)
小麦 (殺虫)	γ 線	200～500Gy の照射で 殺虫効果は完全。 殺菌効果もある。	小麦粉の粘度が低下する。	実用的な方法は見当 たらなかった。	影響なし	影響なし	影響なし	影響なし	1969 1979	研究成果報告 済(1983 年)
ウインナ ソーセージ (殺菌)	γ 線	3～5kGy の照射、10℃ 貯蔵で貯蔵期間を 3～5 倍延長できる。	酸素透過性の小さい包装材 料で窒素ガス封入が条件。	実用的な方法は見当 たらなかった。	影響なし	影響なし	影響なし	影響なし	1968 1980	研究成果報告 済(1985 年)
水産練製品 (殺菌)	γ 線	3kGy の照射、10℃ 貯蔵で貯蔵期間を 2～3 倍延長できる。	特になし。	励起蛍光スペクトル の変化による判別の 可能性あり。	影響なし	影響なし	影響なし	影響なし	1969 1980	研究成果報告 済(1985 年)
ミカン (表面殺菌)	電子線	0.5MeV のエネルギーの 電子線により 1.5kGy の照射、 低温で貯蔵期間を 2～3 倍 延長できる。	特になし。	—	影響なし	影響なし	影響なし	影響なし	1970 1981	研究成果報告 済(1988 年)
実施機関	農水省研究機関 日本原子力研究所 (社)日本アイソトープ協会(大学関係)			国立予防衛生研究所	国 立 栄 養 研究所	国立衛生試験所		(財)食品薬品 安全センター		

表 1-7-2 原子力特定総合研究においてわが国で実施された毒性試験の内容

<パレイショ>						
試験項目	動物	期間	添加量	線量(kGy)	判定	文献
亜急性試験	サル	6 ヶ月	35%	0.6	—	2 (N)
慢性試験	dde マウス	21 ヶ月	35%	0.15,0.3,0.6	—	2 (N)
慢性試験	ウィスター系ラット	2 年	35%	0.15,0.3,0.6	—	2 (N)
多世代試験	dde マウス	3 世代	35%	0.6	—	2 (N)
エームス試験 (i): (TA 98, TA 100)				0.15	—	
染色体異常試験 in vitro (i): (チャイニーズハムスター CHL 細胞)				0.15	—	
エームス試験 (ii): (TA 98, TA 1535, TA 1537) (アルコール抽出物)				0.15	—	9 (H)
染色体異常試験 in vitro (ii): (チャイニーズハムスター CHL 細胞) (")				0.15	—	9 (N)
遺伝子突然変異試験 (TA100-10, SM ^d) (")				0.15	—	9 (N)
プロフェージ誘導試験 (")				0.15	—	9 (P)
小核試験 (ddY-SLC マウス) (")				0.15	—	9 (A)
優性致死試験 (BDF ₁ マウス) 経口 2 回/日 7 日 (")				0.15	—	10 (H)
アルコール抽出物の化学組成分析						11
<タマネギ>						
試験項目	動物	期間	添加量	線量(kGy)	判定	文献
慢性試験	ウィスター系ラット	2 年	25%	0.07, 0.15, 0.3	—	3 (N)
慢性試験	ウィスター系ラット	1 年	2%	0.3	—	3 (N)
慢性試験	dde マウス	21 ヶ月	25%	0.07, 0.15, 0.3	—	3 (N)
世代試験	dde マウス	3 世代	2%	0.15	—	3 (N)
世代試験	dde マウス	3 世代	4%	0.3	—	3 (N)
エームス試験 (TA 98, TA 100, TA 1535, TA 1537)				0.15	—	3 (H)
エームス試験 (TA 98, TA 100) (溶媒抽出物)				0.15	—	3 (N)
染色体異常試験 in vitro (チャイニーズハムスター CHL 細胞) (溶媒抽出物)				0.15	—	3 (N)
染色体異常試験 in vitro (HE 2144, DON-6)				0.15	—	3 (N)
S. C. E. 試験 in vitro (溶媒抽出物)				0.15	—	3 (N)
小核試験 in vitro (溶媒抽出物)				0.15	—	3 (N)
宿主経路試験 (G 46 in BDF ₁ マウス)				0.15	—	3 (H)
DNA 修復試験 (E. coli)				0.15, 0.3	—	12 (P)
染色体異常試験 in vivo (BDF ₁ 骨髄) p. o. x5				0.15	—	3 (H)
染色体異常試験 in vivo (Long-Evans ラット 骨髄)				0.15	—	3 (H)
体細胞変異試験 in vitro (V 79 細胞)				0.15	—	3 (H)
優性致死試験 (BDF ₁ マウス) 経口 1 回/日 5 日				0.15	—	3 (H)

表 1-7-2 続き

<米>						
試験項目	動物	期間	添加量	線量(kGy)	判定	文献
亜急性試験	サル	2 年	40%	1.0	—	4 (N)
慢性試験	ウィスター系ラット	2 年	50%	0.5,1.0	—	4 (N)
慢性試験	ddY マウス	20 ヶ月	40%	0.5	—	4 (N)
世代試験	ddY マウス	3 世代	40%	0.5	—	4 (N)
エームス試験 (TA 98, TA 100)				0.5	—	4 (H)
宿主経路試験 (G 46 in BDF ₁ マウス) 経口投与 3 日				0.5	—	4 (H)
ほ乳類体細胞変異試験 (V 79 細胞)				0.5	—	4 (H)
染色体異常試験 in vitro (CHL 細胞)				0.5	—	4 (H)
染色体異常試験 in vivo (チャイニーズハムスター, 骨髓) 経口 1 日				0.5	—	4 (H)
優性致死試験 (BDF ₁ マウス) 食餌による 40%				0.5	—	4 (H)

<小麦>

試験項目	動物	期間	添加量	線量(kGy)	判定	文献
慢性試験	ウィスター系ラット	2 年	45%	0.2, 2.0	—	5 (N)
慢性試験	ddY マウス	2 年	45%	2.0	—	5 (N)
多世代試験	ddY マウス	3 世代	45%	2.0	—	5 (N)
エームス試験 (TA 98, TA 100, TA 1535, TA 1537, TA 1538, E, coli)				0.15	—	5 (H)
宿主経路試験 (G46 in BDF ₁ マウス)経口 3 日				0.15	—	5 (H)
染色体異常試験 in vitro (CHL 細胞)				0.15	—	5 (H)
小核試験 in vivo (BDF ₁ マウス) 経口 5 日				0.50	—	5 (H)
優性致死試験 (BDF ₁ マウス) 食餌の 40%				0.50	—	5 (H)

<かまぼこ>

試験項目	動物	期間	添加量	線量(kGy)	判定	文献
慢性試験	ウィスター系ラット	2 年	2, 7.5%	4.5	—	6 (N)
慢性試験	ddY マウス	2 年	2%	4.5	—	6 (N)
多世代試験	ddY マウス	3 世代	2%	4.5	—	6 (N)
エームス試験(TA 100SM, ストレプトマイシン依存性)				6.0	—	13 (N)
エームス試験 (TA 98, TA 100, TA 1535, TA 1537, TA 1538, E, coli)				6.0	—	6 (H)
宿主経路試験 (G46 in BDF ₁ マウス)経口 5 日				6.0	—	6 (H)
染色体異常試験 in vitro (チャイニーズハムスター-CHL 細胞, ヒトリンパ球)				6.0	—	6 (H)
小核試験 in vivo (BDF ₁ マウス) 経口 5 日				6.0	—	6 (H)
優性致死試験 (BDF ₁ マウス) 混餌 8 週間				6.0	—	6 (H)

<ウインナーソーセージ>

表 1-7-2 続き

試験項目	動物	期間	添加量	線量(kGy)	判定	文献
亜急性試験	サル	2 年	5%	6.0	—	7 (N)
慢性試験	ウィスター系ラット	2 年	2, 5%	6.0	—	7 (N)
慢性試験	ddY マウス	2 年	5%	6.0	—	7 (N)
多世代試験	ddY マウス	3 世代	5%	6.0	—	7 (N)
エームス試験(TA 100SM, ストレプトマイシン依存性)				6.0	—	13 (N)
エームス試験 (TA 98, TA 100, TA 1535, TA 1537, TA 1538, E, coli)				6.0	—	7 (H)
宿主経路試験 (G46 in BDF ₁ マウス) 1 回腹腔内投与				6.0	—	7 (H)
染色体異常試験 in vitro (チャイニーズハムスター CHL 細胞, ヒトリンパ球 HLC)				6.0	—	7 (H)
小核試験 in vivo (BDF ₁ マウス) 経口 1 回				6.0	—	7 (H)
優性致死試験 (BDF ₁ マウス) 混餌 8 週間				6.0	—	7 (H)

<ミカン>

試験項目	動物	期間	添加量	線量(kGy)	判定	文献
亜急性試験	サル	2 年	3%	1.5	—	8 (N)
慢性試験	ウィスター系ラット	2 年	1, 3%	1.5	—	8 (N)
慢性試験	ddY マウス	2 年	3%	1.5	—	8 (N)
多世代試験	ddY マウス	3 世代	3%	1.5	—	8 (N)
エームス試験 (TA 100SM, ストレプトマイシン依存性)				1.5	—	13 (N)
染色体異常試験 in vitro (CHL 細胞)				1.5	—	8 (H)
エームス試験 (TA 98, TA 100, TA 1535, TA 1537, TA 1538, E, coli)				1.5	—	8 (H)
小核試験 in vivo (BDF ₁ マウス) 経口 1 回				1.5	—	8 (H)
優性致死試験 (BDF ₁ マウス) 経口 5 日				1.5	—	8 (H)

*この表は FAO/IAEA/WHO 合同専門家委員会の照射食品に関する会議(1980 年 10 月 27 日～11 月 3 日、ジュネーブ)のために準備されたものから改変して作成した。オリジナル文献は、成果報告書と科学雑誌に掲載された文献によった。

* (N): 厚生省国立衛生試験所 (現: 国立医薬品食品衛生研究所), 東京都, (H): 食品薬品安全センター秦野研究所, 神奈川県秦野市, (P): 理化学研究所, 埼玉県, (A): 農林水産省畜産試験場 (現: 農業・生物系特定産業技術研究機構 畜産草地研究所), 茨城県つくば市

表 1-7-3 原子力特定総合研究においてわが国で実施された照射食品の栄養試験

品 目	成 分 試 験	
パレイショ (文献2)	1.試験項目	ビタミンB ₁ 、B ₂ 、C
	線量(群)	0、0.15、0.3、0.6kGy
	貯蔵温度、期間	室温、4ヶ月
	結果	ビタミンCは直後低下するが、貯蔵により対照とほぼ同レベルになる。B ₁ 、B ₂ では有意差なし。
	2.試験項目	還元糖、デンプン、ビタミンC、α化度、人口消化率、蒸煮時間、硬度、組織学的検査
	線量(群)	0、0.07、0.15、0.3kGy
	貯蔵温度、期間	室温、9ヶ月
	結果	栄養成分は0.15kGy以下では対象と大差なし。その他については僅かながら線量依存の変化あり。発芽部位に変化を認む。
	成 長 発 育 試 験	
タマネギ (文献3)	試験項目	体重、飼料効率、蛋白効率、消化吸収率、臓器重量、後腹壁脂肪の脂肪酸組成、肝臓の脂質量と蛋白質
	動物	雄ラット 10匹×5
	線量(群)	0、0.07、0.15、0.3kGy、C
	添加量	10% (乾燥粉末)
	飼育期間	4週間
	結果	照射による影響は認められず。
	評価	栄養学的に問題なし。
	成 分 試 験	
タマネギ (文献3)	試験項目	ビタミンB ₁ 、C、全糖量、還元糖、組織学的検査
	線量(群)	0、0.03、0.07、0.15kGy
	貯蔵温度、期間	22℃、室温、4～5ヶ月
	結果	ビタミンCは照射により僅かに低下するが、貯蔵により対照と同レベルになる。その他の成分の差異は認められず。芽の成長点に組織学的な変化を認む。
	成 長 発 育 試 験	
	試験項目	体重、飼料効率、蛋白効率、消化吸収率、臓器重量、後腹壁脂肪の脂肪酸組成、肝臓の脂質量と蛋白質
	動物	雄ラット 10匹×5
	線量(群)	0、0.03、0.07、0.15kGy
	添加量	8% (乾燥粉末)
タマネギ (文献3)	飼育期間	4週間
	結果	照射による影響は認められず。
	生 理 機 能 試 験	
	試験項目	体重、血清テストステロン(昼、夜)、生殖腺重量、睪丸組織像、血液学的検査
	動物	雄ラット、24匹×2
	線量(群)	0、0.3kGy
	添加量	10%(湿重量)
	飼育期間	1～3ヶ月
	結果	照射による影響は認められず。
	評価	栄養学的に問題なし。

品 目	成 分 試 験	
米 (文献4)	試験項目	水分、蛋白質、脂質、炭水化物、ミネラル、ビタミンB ₁ 、B ₂ 、アミノ酸
	線量(群)	0、0.1、0.2、0.3kGy
	貯蔵温度、期間	室温、1 ヶ年
	結果	いずれの成分にも照射による影響は認められず。
	成 長 発 育 試 験	
	試験項目	体重、飼料効率、臓器重量、栄養素の消化吸収率
	動物	ラット、12 匹 (♂6、♀6) ×4
	線量(群)	0、0.1、0.2、0.3kGy
	添加量	78%
	飼育期間	3 ヶ月
	結果	特に影響は認められず。
小麦 (文献5)	生 理 機 能 試 験	
	試験項目	体重、総摂餌量、血清テストステロン(昼、夜)、生殖腺その他の臓器重量、睪丸組織像、血液学的検査
	動物	雄ラット、24 匹×2
	線量(群)	0.03kGy
	添加量	70.8%
	飼育期間	1～3 ヶ月
	結果	血液学的検査では群間で有意差が認められる場合もあるが正常範囲内の変動で、その他については差異なし。
	評価	栄養学的に問題なし。
	成 分 試 験	
	試験項目	水分、蛋白質、脂質、炭水化物、ミネラル、ビタミンB ₁ 、B ₂ 、脂肪酸組成
小麦 (文献5)	線量(群)	0、0.2、0.5kGy
	貯蔵温度、期間	20℃、1 ヶ年
	結果	いずれも差異認められず。
	成 長 発 育 試 験	
	試験項目	体重、飼料効率、臓器重量、栄養素の消化吸収率
	動物	ラット、10 匹 (♂5、♀5) ×3
	線量(群)	0、0.1、0.2kGy
	添加量	75%
	飼育期間	4 ヶ月
	結果	いずれも有意差なし。
小麦 (文献5)	生 理 機 能 試 験	
	試験項目	体重、総摂餌量、血清テストステロン(昼、夜)、生殖腺その他の臓器重量、睪丸組織像、血液学的検査
	動物	雄ラット、24 匹×2
	線量(群)	0、0.75kGy
	添加量	75%
	飼育期間	1～3 ヶ月
	結果	照射による影響認められず。
	評価	栄養学的に問題なし。

品 目	成 分 試 験	
ウインナー ソーセージ (文献7)	試験項目	水分、蛋白質、脂質、炭水化物、ミネラル
	線量(群)	0、3、5kGy
	貯蔵温度、期間	5℃、3日
	結果	照射による差異は認められず。
	栄 養 生 理 学 的 試 験	
	試験項目	体重、総摂餌量、臓器重量、血清テストステロン(昼、夜)
	動物	雄ラット、24匹×2
	線量(群)	0.6kGy
かまぼこ (文献6)	添加量	2.7%(乾燥粉末)
	飼育期間	1～3ヶ月
	結果	照射による影響は認められず。
	評価	栄養学的に問題なし。
品 目	成 分 試 験	
かまぼこ (文献6)	試験項目	水分、蛋白質、脂質、炭水化物、ミネラル
	線量(群)	0、3、4、6kGy
	貯蔵温度、期間	5℃
	結果	照射による影響は認められず。
	栄 養 生 理 学 的 試 験	
	試験項目	体重、総摂餌量、臓器重量、血清テストステロン(昼、夜)
	動物	雄ラット、24匹×2
	線量(群)	0.3kGy
かまぼこ (文献6)	添加量	3.3%(乾燥粉末)
	飼育期間	1～3ヶ月
	結果	照射による影響は認められず。
	評価	栄養学的に問題なし。

原子力特定総合研究以降の研究

(1) 照射グレープフルーツの健全性試験 (国立原子力試験研究)

1986年から1988年までの3年間、国立原子力試験研究費により、柑橘類（グレープフルーツジュース）を用いた健全性試験が国立衛生試験所（現：国立医薬品食品研究所）で実施された。この研究では、マウス、ラットを用いた毒性試験、項目の毒性試験、変異原性試験が実施された^{14)～18)}。

(2) 日本アイソトープ協会によって行われた健全性試験

財団法人 日本アイソトープ協会は 1986年～1991年に食品照射研究委員会を組織し国内外で反対運動が問題にしている代表的な項目について最新の研究技術で再試験を行った。本研究委員会には約15に及ぶ大学、研究機関が参加し、表 1-7-4 に示すように全ての項目に関する研究を実施した¹⁹⁾。

表 1-7-4 日本アイソトープ協会 食品照射研究委員会で実施された健全性試験

分類	内容	結果
誘導放射能	10MeV 電子線：香辛料中の放射能測定（黒コショウ、白コショウ）100kGy 照射（赤唐辛子、ターメリック、ジンジャー）30kGy 照射 - ガンマ線による誘導放射能食品構成元素での考察	- 誘導放射能は検出されない 5MeV 以下のガンマ線で放射化される核種はない
食品成分の変化(化学分析)	- タンパク質(卵白アルブミン)消化性、免疫化学的性質 - コショウの成分変化、香辛料の風味変化（精油成分の GC パターン）(10kGy、3.5kGy) - バレイショのビタミン C 減少（150Gy、調理、貯蔵の影響） - 活性酸素種の生成（水溶液、脂質溶液）とメーラード反応生成物による活性酸素消去能	- 変化なし - 変化なし - 照射による損失は無視できる - メラノイジンは強い消去作用を持つ
変異原性試験	- 照射糖液の変異原性試験 - 糖とアミノ酸混合物の照射による変異原性 - スパイス（黒コショウ、赤唐辛子、ナツメグ、パプリカ抽出物）1,10kGy、マンゴ（水溶物）1kGy の変異原性 - 照射小麦の給餌による倍数性細胞の誘発、小核試験	- 照射糖液は弱変異原性物質を生成するが生体内で無毒化される - 変異原性なし - ナツメグ、パプリカ、マンゴ 変異原性なし。コショウ、赤唐辛子は照射に無関係に弱い変異原性を示した - 倍数性細胞の誘発はない - 小核試験の結果は陰性
微生物学的安全性	- ボツリヌス菌芽胞 - アフラトキシン産生能	- ボツリヌス毒素産生能は変化せず - アフラトキシン産生能の増加は無視できる程度

引用文献 (1章 7節)

日本の安全性研究

- 1) 食品照射運営委員会(1970) 食品の放射線照射に関する微生物学的ならびに化学的基礎研究 - S 41～43文部省化学研究費総合研究成果
- 2) 食品照射運営委員会(1971) 放射線照射による馬鈴薯の発芽防止に関する研究成果報告書(付録) (S46.6.30)
- 3) 食品照射運営委員会(1980) 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(資料編) (S55.7.10)
- 4) 食品照射運営委員会(1983) 放射線照射による米の殺虫に関する研究成果報告書(資料編) (S58.12)
- 5) 食品照射運営委員会(1983) 放射線照射による小麦の殺虫に関する研究成果報告書(資料編) (S58.12)
- 6) 食品照射運営委員会(1985) 放射線照射による水産ねり製品の殺菌に関する研究成果報告書(資料編) (S60)
- 7) 食品照射運営委員会(1985) 放射線照射によるウィンナーソーセージの殺菌に関する研究成果報告書(資料編) (S60)
- 8) 食品照射運営委員会(1988) 放射線照射によるミカンの表面殺菌に関する研究成果報告書(資料編) (S63)
- 9) Ishidate M. et al. (1981) Mutagenicity Studies On Alcohol Extracts From Gamma Irradiated Potatoes Tests For Biological Activities In Bacterial And Mammalian Cell Systems, *Radioisotopes*, **30 (12)**, 662-668.
- 10) Shibuya T. et al. (1982) Mutagenicity Studies On Alcohol Extracts From Gamma-Irradiated Potatoes-Dominant Lethal Test in Mice, *Radioisotopes*, **31 (2)**, 272-11.
- 11) Shinozaki Y. et al. (1981) Mutagenicity Studies On Alcohol Extracts From Gamma Irradiated Potatoes Preparation of Samples And Their Chemical Analysis, *Radioisotopes*, **30 (12)**, 655-661.
- 12) Hattori Y. et al. (1979) Mutagenicity tests of irradiated onions by *Escherichia coli* mutants in vitro., *Mutation research*, **60**, 115-119.
- 13) 吉川 他 (1982) 照射食品(かまぼこ, ウィンナーソーセージ, ミカンジュース)の微生物に対する突然変異試験、衛生試験所報告、第100号、110-119
- 14) 川崎靖 他(1988) ガンマ線照射した柑橘類等の毒性に関する研究(1) ラットによる慢性毒性試験、昭和63年度 国立原子力試験研究成果報告書 29 (科学技術庁 昭和63年度)
- 15) 落合敏秋 他(1988) ガンマ線照射した柑橘類等の毒性に関する研究(2) マウスによる慢性毒性試験、昭和63年度 国立原子力試験研究成果報告書 29 (科学技術庁 昭和63年度)
- 16) 関田清司 他(1988) ガンマ線照射した柑橘類等の毒性に関する研究(3) マウスによる世代試験、昭和63年度 国立原子力試験研究成果報告書 29 (科学技術庁 昭和63年度)
- 17) 石館基 他(1986) ガンマ線照射した柑橘類等の変異源性に関する研究 照射グレープフルーツの微生物に対する突然変異試験、昭和61年度 国立原子力試験研究成果報告書 27 (科学技術庁 昭和61年度)
- 18) 石館基 他(1987) ガンマ線照射した柑橘類等の変異源性に関する研究 照射グレープフルーツのほ乳類培養細胞を用いる染色体異常試験、昭和62年度 国立原子力試験研究成果報告書 28 (科学技術庁 昭和62年度)
- 19) 日本アイソトープ協会(1992) 食品照射研究委員会 研究成果最終報告書 (委員長 松山晃)

1 - 8 まとめ

本章で扱ったヨーロッパ連合、米国、カナダ、オーストラリア/ニュージーランドにおける照射食品の法的扱い、WHOの専門委員会の評価に対する見解およびそれぞれの機関における評価の特徴を表1-8にまとめた。

表1-8 諸外国における放射線照射食品の規制と評価の特徴

	ヨーロッパ連合 (EU-SCF)	米国 (FDA)	カナダ (Health Canada)	豪州・ニュージーラ ンド (FSANZ)
規制 (体系)	EC指令1999/2/EC EC指令1999/3/EC 食品処理	21CFR179.26 食品添加物	Food and Drug Act and Reg. 26 食品処理	Standard 1.5.3 食品処理
許可	原則禁止 ケースバイケース	ポジティブリスト	原則禁止 ケースバイケース	原則禁止 ケースバイケース
評価の基準	独自基準	独自基準	独自基準	独自基準
WHOの評価	1980年のJECFI結 論に同意(1992年 および1997年の見 解は受容できな い)。	1992年の再評価 結果を受容す る。	WHOの見解には 大筋で同意して いる。新たな品目 の許可における 毒性試験等のデ ータに関する要 求はケースバイ ケースで判断す る。	1997年の見解に 大筋で同意し、 この評価結果を 受容して、スパ イス、熱帯果実 を許可する。
高線量照射 (>10kGy)	認めない	認める 30kGy 香辛料	認めていない	認める 30kGy 香辛料
その他	許可品目について の統一拡大リスト について合意が得 られず、個別の国 内規制が効力を持 っている。			

参考資料

本章の本文中の引用には資料の出所を明確にするため、オリジナル報告書および規制、官報等原文等を用いた。第1章の内容をまとめるにあたり以下の総説、解説書等も参考にした。

1. 伊藤均：日本における食品照射の開発の経緯と今後の課題、食品照射、23-30（2003）
2. 宮原誠：照射食品安全性検証の歴史、食品照射、**38**，31-48（2003）
3. 田中憲穂：日本における照射食品の遺伝的安全性試験、食品照射、**39**，13-27（2004）
4. 食品照射調査委員会：諸外国における食品照射動向等に関する調査研究報告書、（社）日本原子力産業会議（1986）
5. 戸部満寿夫、伊藤均、林徹：「食品照射の効果と安全性」、監修： 藤巻正生、（財）日本原子力文化振興財団、（1991）
6. 伊藤均：食品照射の基礎と安全性、食品衛生と貯蔵にはたす放射線処理の可能性、JAERI-Review 2001-2029、日本原子力研究所(2001)
7. 日本原子力産業会議：照射食品の健全性関連資料仮訳集（1991年6月）
8. 等々力節子：オーストラリア／ニュージーランドにおけるハーブ・スパイスの照射の許可、食品照射、**37**，53-59（2002）

2. 放射線照射食品の安全性に関する 研究文献の収集・整理

本章では、放射線照射食品の安全性に関する研究文献について以下の項目に分けて収集整理を行った。

1. 誘導放射能：食品中の放射能の有無
2. 化学的安全性：照射副産物の有無とその産生量および化学的性質
3. 栄養学的適合性：照射に伴う栄養価の変動(食品としての適性が失われていないか)
4. 微生物学的安全性：照射による食品中の微生物叢の変化および毒素産生の変化
5. 毒性学的評価：照射食品および照射副産物の毒性

各項目において収集した文献の一覧を掲載し、優先度の高い文献については内容分析を行った。

なお、文献リスト中の文献IDのうちWHOの2つのレポートの引用文献を示すものがある。

＊WHO (1994) Safety and nutritional adequacy of irradiated food. WHO, Geneva. (日本語版 1996 年) の引用文献としては、同書の化学的安全性、微生物学的安全性、毒性学的安全性、栄養学的適合性を扱った各章の章末の文献リストの番号を活かして、以下のように文献 ID をつけた。XXX の部分は、各章での参考文献番号と同じである。

第4章	食品照射の化学	94C-XXX
第6章	毒性学	94T-XXX
第7章	微生物学	94M-XXX
第8章	栄養学	94N-XXX

＊WHO (1999) High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. の引用文献については、本文末の参考文献番号を活かして以下のように示した。

99-XXX

2-1 誘導放射能

食品の放射線照射によって、食品の構成元素が放射性同位元素に変換され、照射食品中に放射能が誘導されることがない（あるいは無視できる量の放射能の誘導しか起きることがない）ということを確認することは、安全性評価において考慮すべきことである。

現在、誘導放射能を考慮して、コーデックス国際食品規格や多くの照射許可国の規制では、食品照射に用いることのできる放射線源を次の3つに限定している。

- a) 放射性同位元素 ^{60}Co （コバルト60：エネルギー1.33MeVおよび1.17MeV）または、 ^{137}Cs （セシウム137：エネルギー0.66MeV）からのガンマ線
- b) 5 MeV以下のエネルギーで運転されるエックス線発生装置から得られるエックス線
- c) 10MeV以下のエネルギーで運転される加速器から得られる電子線

これらの放射線源は、食品中の原子の外殻電子や分子と作用して電子を放出し、イオンを生成する。それゆえこれらの放射線はイオン化放射線と呼ばれるが、これら3つの放射線が、食品中の元素との核反応によって有意なレベルの放射性同位元素を生成する可能性はないとされている。これらのことを実証するために、多くの測定と計算（シミュレーション）が実施されている（以下文献一覧B、Cの項）。

なお、多くの委員会勧告や報告書（文献一覧Aの項）では、（非照射）食品中に存在する自然放射能（たとえば、 ^{40}K ；カリウム40、 ^{14}C ；カーボン14、 ^3H ；トリチウム）および人体内の放射能のレベルを考慮し、照射処理による放射能の誘導の可能性と照射食品摂取の人体影響を評価している。

2002年にBrynjolfsonがIAEAのテクニカルドキュメントとして、食品中の自然および誘導放射能に関するデータを取りまとめている。この中で、上述した3つの放射線（ガンマ線、電子線（10MeV以下）エックス線（5 MeV以下））を用いたモデル食品の60kGyまでの照射による誘導放射能の有意な増加は認められず、感知できない程度のものであるとしている。また、7.5MeVのエックス線を30kGy以下で照射した場合の食品中の誘導放射能は、非照射食品中の自然放射能よりも低いと結論している（IAEA 2002）。

なお、エックス線のエネルギーについては、1995年のICGFI（食品照射に関する国際諮問グループ）の諮問委員会の会議を開き、7.5 MeVまでのエネルギーが安全であるという勧告を出している（ICGFI 1995）。2004年末にFDAは、食品照射に用いるエックス線のエネルギーを7.5MeVに変更する最終規則を提案している（FDA 2004）。

本調査では、照射食品の摂取の安全性について検討している。食品照射技術を放射線（医学的な観点で検討した場合、施設や工程管理の安全性についての考慮も必要であるが、適切な管理下（たとえば放射線障害防止法に則った）で作業を行っている限り、作業者の被

爆等の健康に係わる問題はないと考えられるので、それに関する文献収集はここでは実施しない。

<収集文献一覧>

A. 総説、委員会調査等報告書、規制

- 1) FDA (2004) Irradiation in the Production, Processing and Handling of Food, Federal Register, 69(246), 76844-76847.
- 2) IAEA (2002) Natural and induced radioactivity in food.
- 3) ICGFI (1995) The development of X-ray machines for food irradiation (proceedings of a consultants' meeting, Vienna, Austria 16-18 October 1995).
- 4) Olszyna-Marzys A. E. (1991) Radioactivity and foods, Bulletin of the Pan American Health Organization, **25(1)** 27-40.
- 5) CAST (A. I) (1986) Ionizing energy in food processing and pest control, I. Wholesomeness of food treated with ionizing energy, Council for Agricultural Science and Technology (Report No.109), p50.
- 6) National Radiological protection Board (UK) (1985) Report on the radiological Implications of irradiated Foods (Adversary Committee on Irradiated and Novel Food (1986) Report on the Safety and Wholesomeness of irradiated Food HMSO: London. 3 Appendix B)
- 7) Becker, R.L (1983) Absence of induced radioactivity in irradiated Food. In "Recent Advance in Food Irradiation" P. S. Elias Ed Elsevier p258-315.

B. 研究論文

- 8) Katayama T. et al. (1994) Evaluation of induced radioactivity in 10 Mev-electron irradiated spices. II. β - ray counting, Radioisotopes, **43(2)**, 71-76.
- 9) Furuta M. et al. (1994) Evaluation of induced radioactivity in 10 Mev-electron irradiated spices. I. γ - ray measurement, Radioisotopes, **43(2)**, 63-70.
- 10) Findlay D. J. S. et al. (1992) Experimental electron beam irradiation of food and the induction of radioactivity, Int. J. Appl. Radiat. Isotopes, **43(5)**, 567-575.
- 11) Furuta M. et al. (1988) Preliminary examination of induced radioactivity in black pepper by 10 Mev electron irradiation, Radioisotopes, **37(7)**, 390-393.
- 12) Miller A. et al. (1987) Measurements of induced radioactivity in electron - and photon - irradiated beef, International journal of radiation applications and instrumentation. Part A, Applied radiation and isotopes, **38(7)**, 507-612.
- 13) Leboutet. H. et al. (1985) Theoretical evaluation of induced radioactivity in food products by electron - or X-ray beam sterilization, Radiat. Phys. Chem., **25(1-3)**, 233-242.

- C. 日本の原子力特定総合研究、日本アイソトープ委員会のプロジェクト研究報告
- 14) 食品照射運営会議（1971）照射馬鈴薯中の誘導放射能について。放射線照射による馬鈴薯の発芽防止に関する研究成果報告書〔付録〕－1
 - 15) 食品照射運営会議（1972）照射タマネギ中の誘導放射能について。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〔付録〕－1
 - 16) 武田篤彦 他（1989）照射食品の誘導放射能についての評価, 日本アイソトープ協会食品照射研究委員会研究成果中間報告書 日本アイソトープ協会
 - 17) 橋爪朗（1989） γ 線による誘導放射能に対する考察（10 MeV以下の光核反応）日本アイソトープ協会食品照射研究委員会研究成果中間報告書 日本アイソトープ協会

2-2 化学的安全性

照射食品の安全性を議論する上で、食品や食品成分の放射線化学的な変化によって、毒性学上で問題となるような物質が生成しないかどうかは重要な観点である。

種々の食品成分や食品を放射線照射したときの化学反応については、多くの総説がある。特に I F I P（国際食品照射プロジェクト）で実施された化学的成分変化に関する研究の結果は、2つの単行本にまとめられている。

化学的安全性に関する総説およびオリジナルデータに関する収集文献はこの節の末尾に一覧にまとめた（表2-2-4）。

① 放射線特異的分解生成物 2-アルキルシクロブタノン類の生成に関する研究

食品中の2-アルキルシクロブタノンはトリグリセリドの分解物としてその構成脂肪酸よりも4つ炭素数の少ないアルキル鎖を持った環状化合物である。この物質の生成については、1972年にモデル系での生成が報告され、その後1990年に鶏肉の化学的検知の目的の研究過程で照射食品中での検出が報告された。

この化合物は、現在知られる中では、唯一の放射線特異的分解化合物であり、最近ではその毒性評価に注目が集まった。その特異性から、照射食品の検知において指標化合物とされている。なお、照射食品中での生成量はわずかである（表2-2-1）。

② 香辛料、ハーブ等の成分、性質変化に関する文献

香辛料、ハーブ類に関しては、多くの国で放射線殺菌が実用化しており、産業的意味合いからここでの分析の対象として取り上げた。生薬、生のハーブ類もここでは取り上げている。他に検知の目的で物理化学的な変化を研究した文献が多数存在するが、ここでは省略した（表2-2-2）。

③ 最近の文献（主に1997年以降）

食品の放射線照射に関する研究は現在も多数、報告されているが、ここでは主にアレルギーの観点で（食品）タンパク質の変化を扱ったもの、アルデヒド類の生成に関する最近の文献を扱った（表2-2-3）。

表2-2-1 食品中の2-アルキルシクロブタノン類の定量結果に関する文献

照射対象(食品)	線源	線量(線量率)	温度 雰囲気	分析法	結果(コメント)	文献
トリアシルグリセリド	コバルト60	60kGy	25℃	GC-MS NMR	2-アルキルシクロブタノンの存在を初めて報告した論文	Letellier 1972
脂肪酸、 トリアシルグリセリド	コバルト60	10 kGy		GC-MS	トリアシルグリセリドから2-アルキルシクロブタノンの生成効率は構成脂肪酸が飽和脂肪酸(パルミチン酸、ステアリン酸)の方が、不飽和脂肪酸(オレイン酸、リノール酸、リノレン酸)よりも高い。	Kim 2004
鶏肉	コバルト60	5kGy		GC-MS	DCB : 5 kGy 照射で 0.2 μ g/g fresh weight, 照射後 20 検出可能(食品中から初めて2-アルキルシクロブタノンを検出した文献)	Stevenson 1990
脂肪酸、 トリアシルグリセリド 鶏肉	コバルト60	4.3～5.1kGy (1.3～21kGy/h)	12℃	GC-MS NMR IR	DCB の含量は貯蔵とともに減少, 照射後 20 日間は検出可能 DCB: 4.7 kGy で約 $\sim$ 0.2 μ g/g fresh weight.	Boyd 1991a
鶏肉	コバルト60	0.5～10 kGy (1.1 kGy/h)	8-10℃ プラスチックバッグ	GC-MS	DCB が線量に依存して精製 DCB は生肉の貯蔵中に安定、加熱調理で分解しない。	Crone 1992
鶏肉 (ラルテック毒性試験 試料)	コバルト60, 電子線	10～60 kGy (14kGy/h)	-46℃	GC-MS IRD/MSD	新たに-46℃の条件で60kGy まで照射して DCB の生成効率を検討。ラルテック動物試験で使用した鶏肉照射試料(58kGy、真空、缶詰、凍結乾燥 室温 13 年保存)から DCB を検出、DCB 濃度は新しく照射した試料の 50%に減少	Victoria 1992
鶏肉、卵	コバルト60	2.5 kGy	4℃, -40℃ 空気、二酸化炭素、真空		DCB は線量依存的に生成., 照射温度は生成量に影響。凍結(-40℃)は冷蔵(4℃)に比べて DCB 生成量が少ない。包装雰囲気、貯蔵は分析結果に影響しない。	Stevenson 1993
鶏肉、卵、牛肉、羊、 豚		0～10 kGy		ESR GC-MS	照射食品検知の総説	Stevenson 1994
鶏肉	コバルト60	2.5～10 kGy	プラスチックバ ッグ	ELISA GC-MS	エライザ法による2-アルキルシクロブタノン分析	Elliot 1995
鶏肉、パルミチン酸	コバルト60	5kGy, 60kGy (10 kGy/h)	10℃	SFE GC-MS	SFE 超臨界流体抽出法では、従来法(ソックスレー抽出、フルオリ ジル)に比べて検出量が4 倍に。	Rahman 1996
チーズ、鶏肉、卵		0.5～5kGy		LC-GC-MS	検出限界: 0.05mg/kg fat (0.5kGy) 2-アルキルシクロブタノン生 成は線量依存的	Meier 1996

牛肉、鶏肉	コバルト60	2～8 kGy (10 kGy/h)	10℃	SFE GC-MS	SFE 抽出 は従来法に比べて有利。牛肉からの 2 -アルキルシクロブタノンの抽出効率が従来法に比べて上昇	Tewfik 1998
チーズ、イワシ、マス、マンゴ、米、鶏肉、牛肉	電子線	0.1～5 kGy	6-8℃, 20℃, -20℃, -80℃ プラスチックバッグ 空気	GC-MS	DCB/TCB の生成量は照射温度に依存的。-80℃ では 20℃照射の半分。照射雰囲気の影響は少ない。 線量依存的な生成を広範に確認。生成効率: 1.1-1.6 nmol/mmol 前駆体 脂肪酸/kGy	Ndiaye 1999
米、卵、鶏肉	電子線	0.1～5 kGy (3kGy/s)	6-8℃, プラスチックバ ッグ	GC-MS	銀イオンクロマトグラフィーを前処理に導入することで、0.1kGy 照射の米から 2 -アルキルシクロブタノン検出が可能(脂質量を 800mg の増量)	Ndiaye 1999
鶏肉、豚、卵、牛肉、マンゴ、パパイヤ	コバルト60	0.1～5kGy (0.87kGy)	4℃	SFE GC	SFE 法による分析は従来法に比べてまさる。DCB/TCB の生成量は線量依存的	Stewart 2001
鶏肉	コバルト60	0.5～30 kGy 0.4～ 4 kGy/h	室温	GC/FID	0.5 kGy 照射まで検出	Tanabe 2001
鶏肉	コバルト60	0.5～10 kGy	室温	GC/FID	カラム条件の改良 同一カラムで HC 2-ACB の精製	田辺寛子 2002
牛肉 (バーガーパテ)	コバルト60 電子線	0.5～7kGy 1.01Gy/s(γ) 2.25 ～3.0 kGy/s(EB)	冷凍 (-18℃) ナイロン/ポリエ チレンバッグ 酸素	GC-FID SFE GC-MS	DCB の生成は線量依存的 電子線のほうがガンマ線に比べて生成量が多い。	Gadgil 2002
七面鳥、肉ダンゴ	電子線	5～ 8 kGy		ESR TL GC-MS	硝酸銀イオンクロマトグラフィーまたは、SFE は低濃度の 2 -アルキルシクロブタノン分析に有利	Marchioni 2002

卵	コバルト60	2.5-54.1 kGy (2～26.4kGy)	ガラスバイアル 4℃	GC-MS	DCB と TCB の生成は生卵でも熱殺菌した卵でも変化しない 。 DCB/TCB の生成量の線量依存性を確認 DCB: 2.5 kGy:0.7 μg/g lipid 10 kGy: 3.3 μg/g lipid TCB: 2.5 kGy:0.2 μg/g lipid 10 kGy: 1.2 μg/g lipid	Crone 1993
卵		1～5 kGy		GC-MS	炭水素 (C14:1/16:2/16:3/17:1/17:2) の生成量は線量依存的 (1-5kGy) DCB の生成量は TCB や TeCB に比べて多くより線量依存的 (1-5kGy)	Pfordt 1995
チーズ	コバルト60	1～8 kGy		GC-MS	DCB と TCB の生成量の線量依存性を 1-8kGy で確認 DCB:TCB 比 2.1:1 パルミチン酸/ステアリン酸比= 2.5:1	Rahman 1996

魚	コバルト60	2～8kGy (10kGy /h)	10℃	SFE GC-MS	SFE 抽出は従来法に比べて有利(魚油の分析可)	Tewfik 1999
ニジマス	コバルト60	0.56～11.1 kGy	室温	GC-MS ESR	ESR シグナルの線量依存性を確認(0.56 - 5.7 kGy) DCB/TCB の生成量の線量依存性(1.1 - 11.1 kGy) DCB:TCB 比は 4.4, パルミチン酸:ステアリン酸比とほぼ同じ	Tanabe 2002
いか	コバルト60	0.5～10kGy (2.5kGy /h)	12℃	GC-MS	炭化水素 (pentadecane, 1-tetradecene, heptadecane, 1-hexadecene, 8-heptadecene, 1,7-hexadecadiene) および 2-アル キルシクロブタノン CB (DCB, TCB)は0.5kGy 以上で線量依存的な 増加を確認	Kim 2004

ピーナツ、スープパウ ダー、ピスタチオ、カ モ、豚、キャビア		2.5～ 5 kGy		SFE GC-MSD	SFE を用い炭化水素、2-アルキルシクロブタノンを連続分析 SFE により精製度があがり 2-アルキルシクロブタノン分析が可能 に。	Lembke 1995.
ピーナツ	コバルト60	0.1～10 kGy		GC/FID GC-MS	炭化水素、2-アルキルシクロブタノン生成ともに線量依存的 炭化水素 0.5 kGy 以上で検出可 DCB, TCB, TeCB:1 kGy 以上で検出可	Lee 1999
チーズ、鶏肉、アボカ ド、チョコレート、卵	電子線	0.5～100kGy	6-8℃ プラスチックバ ッグ 空気	SFE GC-MS GC/FID	SFE により複雑な食品マトリックスからの 2-アルキルシクロブタノン 検出が可能に。	Horvatovich 2000
マンゴ、パパイア、チ ーズ、サケ	コバルト60	0.1～10 kGy (0.75～1 kGy/h)	4℃, -40℃	GC-MS	チーズ 0.5-5kGy, サケ 1-10kGy, マンゴ 0.5-2kGy, パパイア 0.1-1 kGy, TCB DCB の検出可。 パパイアの DCB は貯蔵期間中に減少	Stewart 2000
シソ	コバルト60	0.1～10 kGy (2.5 kGy/h)	10℃	GC-MS	炭化水素生成(C15:0/14:1/17:0/16:1/17:1/16:2/17:2/16:3) お よび CB (DCB, TCB, TeCB)の生成は 0.5-10 kGy で線量依存的	Lee 2000
チーズ、ササゲ、米		50～ 100 Gy; 100 kGy	6-8℃ プラスチックバ ッグ空気	SFE GC-MS	脂質量を 2g に増やし、植物性食品 50-100Gy 照射でも 2-アルキ ルシクロブタノン検出が可能	Horvatovich 2002

DCB: 2-ドデシルシクロブタノン、 TCB: 2-テトラデシルシクロブタノン (本章 5-3参照)

表2-2-2 香辛料、ハーブ、生薬類の化学変化に関する文献

照射対象(食品)	線源	線量 (線量率)	温度 雰囲気	分析法	結果(コメント)	文献
白コショウ、ナツメグ、ショウガ	コバルト60	0.5-4.5 Mrad	ポリエチレンパック 室温	GC/MS ESR	フリーラジカルの生成は無視できる。揮発性生成物がわずかに増加 味、においの変化なし(1.58 Mrad:)	Tjaberg 1972
オニオンパウダー	コバルト60	400-4000 krad	缶	UV 分光光度計 IR 分光光度計	たんぱく質、脂質、炭水化物、水分、灰分に変化なし	Galetto 1979
オニオンパウダー	コバルト60	0.9-4 Mrad; 27 Mrad		官能評価	変化なし	Silberstein 1979
クローバ、セージ オレガノ、ローズマリ、タイム、メース	コバルト60	2-4 Mrad			抗菌性の変化なし	渡辺 1985
黒コショウ、パプリカ、オニオンパウダー、ニンニクパウダー	コバルト60	4-8 kGy 9.6 kGy/h	室温	製油成分(水蒸気蒸留) 分光学的検査	変化なし 殺菌効果も検討 エチレンオキサイドガスとの比較	Farkas 1988
朝鮮ニンジン(ジンセン)	コバルト60	1-10 kGy 1kGy/h	室温 室雰囲気	サポニン/炭水化物: (HPLC) ミネラル (ICP) アミノ酸分析	サポニン/ginsenoside Rg1 に変化なし 含硫アミノ酸 /チロシン減少(>5kGy) プロリン、リジンの増加(10 kGy) 遊離糖の変化なし。ミネラル変化なし	Kwon 1990
ナツメグ	コバルト60	10 kGy		GC/MS	脂質の放射線分解を確認 炭化水素	Wilmers 1990
黒コショウ、ナツメグ、ローズマリー、クローブ	コバルト60	5-80 kGy 10 kGy/h		GC HS-GC	過酸化物の生成は線量依存的 ヨウ素価/酸価: 線量により若干増加 炭化水素/酸化物: 50 kGy まで有意な変化なし	金子 1991
コショウ	コバルト60	0.1-10 kGy		HPLC SFC	Piperine: 変化なし Coumarine: 変化あり	奥山典生 1992
黒コショウ、白コショウ、オニオンパウダー、ナツメグ、パセリ、レッドペッパー、パプリカ、ローレル	電子線(2.5MeV) コバルト60	5-10 kGy	0.10 kGy/min	GC	精油成分に変化なし (殺菌効果の検討 電子線ガンマ線の検討)	林 1993

トウガラシ	コバルト60	5-10 kGy	オゾン処理との比較	GC カロリメトリー	capsaicin, capsanthin に変化なし 褐変、脂肪酸組成、官能特性の変化なし	Lee 1997
アロエ粉末	コバルト60	2.5-10 kGy 1 kGy/h	PVC コンテナ -20℃	アミノ酸、TBA 値、ミネラル分 析(殺菌効果)	10 kGy で殺菌効果 アミノ酸、脂肪酸、ミネラル、TBA 値, barbaloin, クロロフィル, カ ロテノイド変化なし	Byun 1997
サフラン	コバルト60	2.5-5 kGy	18 Gy/min 25℃	GC/MS HPLC thin layer chromatography	揮発性精油成分: safranal 含量の減少 5kGy で芳香性が若干減少 色素: crocetin glucoside 減少 5kGy の照射は品質上好ましくない。	Zareena 2001
コリアンダー(生)	セシウム 137	1-3 kGy	plastic bag 5℃ 0.098 kGy/min	GC/MSD	Linalool, dodecanal, (E)-2-dodecenal の減少 Decanal (E)-2-decenal は変化なし 新規の揮発性物質は照射で生成しない。 3kGy までは、揮発性(香気)物質への影響が無い。	Fan 2002
コリアンダー(ハーブ) 生	コバルト60 0.02kGy/min.	1-3 kGy	ポリエチレンバック 氷水中(0度) 0.02kGy/min.	微生物検査 色素 クロロフィ ル、カロチノイド (分光分析) 精油成分: GLC/GC-MS	1 kGy で殺菌効果 色、色素成分、香気に影響なし	Kamat 2003
ナツメグ	コバルト60	2.5-10 kGy	14 Gy/min 25℃	TLC GC/MS	5-10 kGy: 線量依存的にトリグリセリドの減少と遊離脂肪酸の増 加 5 kGy 以上でにおいの変化	Niyas 2003

表2-2-3 化学変化に関する最近の文献（アレルギーの観点でのタンパク質の変化とアルデヒドの生成、脂質分解に関してなど）

照射対象(食品)	線源	線量 (線量率)	温度 雰囲気	分析法	結果(コメント)	文献
タンパク質変化						
卵白	コバルト60	10-20 kGy 20 kGy/h	10℃	SDS-PAGE ELISA	卵白アルブミンのコンホーメーション変化が照射によって起こった。 卵白のアレルゲン性の減少。卵白アルブミン濃度の減少(コントロール:375-432 μ g/g sample) 10kGy (14.3 μ g/g) 20kGy (8.8 μ /g)	Seo 1999
ブラウンシュリンプ(エビ) 耐熱性タンパク質 (hsp)	コバルト60	1-10 kGy 10 kGy/h	10℃	ELISA: マウス モノクローナル 抗体 (m AB), ヒト患者血清 IgE SDS-PAGE	エビ アレルゲンタンパク質および耐熱性タンパク質 (hsp) に対するガンマ線照射の影響を検討した。 マウスモノクローナル抗体の照射 hsp および照射エビへの結合、ヒト患者 IgE の照射エビへのアレルギー反応は線量依存的に減少した。 SDS-PAGE の結果hspの高分子化が示唆された。 照射はアレルギーの低減に利用できる可能性がある。	Byun 2000
卵 卵白アルブミン	コバルト60	0-100kGy	7.5kGy/h	モノクローナル 抗体 表面プラズモン 解析 (SPR)	照射卵白アルブミンを認識するモノクローナル抗体を作成し、照射卵白アルブミンとの相互作用を表面プラズモン解析により検討した。 10kGyまでの線量で照射したアルブミンでは変化は観測されなかったが、20kGy 以上を照射すると線量依存的に卵白アルブミンのコンホーメーション変化を表面プラズモン共鳴解析により検出できた。	Masuda 2000
牛乳 アルファカゼイン (ACA) ベータラクトグロブリン (BLG)	コバルト60	3-10 kGy 10 kGy/h	10℃ ガラスチューブ	Ci-ELISA: ヒト IgE SDS-PAGE	照射により牛乳のアレルゲン性は低下した。 照射は ACA および BLG.のコンホーメーション変化を引き起こす。 SDS-PAGE の結果は照射による高分子化を示唆。 ACA/BLG に対応する電気泳動でのバンドが照射により減少、照射により溶解度が減少。	Woon 2001
卵 ovomucoid	コバルト60	10 kGy 10 kGy/h	10℃ 10pH 7.4, 9.0, 10.0	Ci-ELISA: ヒト IgESDS-PAGE	10kGy 照射または加熱でインタクトのオボムコイド濃度が減少する。この効果は pH が高いほど大きい。 10 kGy + 100℃加熱によりpH によらずインタクトのオボムコイドがpHにかかわらず効果的に減少する。 SDS-PAGE の結果 28kDa のバンドが10kGy 照射で消失。組み合わせ処理はアレルゲンの低減に効果的。	Lee 2002

卵 ovalbumin	コバルト60	10 kGy 10 kGy/h	10℃	Ci-ELISA: human IgE	加熱と照射によりアレルギー性が低下した。 卵白アルブミンのマウス IgG への結合は 75℃以上で、ヒト IgE への結合は 80℃以上で変化した。 ELISA の結果では卵白アルブミンを 80℃かそれ以上で加熱すると IgE の認識は低下したが、マウス IgG はこの条件で処理した卵白アルブミンの認識を保持していた。 照射と加熱を組み合わせた場合どちらの処理を先にしても卵とヒト患者血清 IgE の結合は低下した。	Kim 2002
アルデヒド生成						
七面鳥	電子線 (10MeV)	1-2 kGy 88.3kGy /min	ナイロン/ポリエチレンバック 真空	比色、TBA GC/MS	2kGy 照射でアセトアルデヒド、 2-methyl butanal, 3-methyl butanal, トルエン ベンゼン生成. 含硫黄化合物 TBA: 変化なし. 1-2kGy で色調の a* value 増加	Zhu 2004
リンゴ(ジュース)	セシウム 137	0-8.9 kGy 0.1 kGy/min	5℃ 3.5 kGy: 0℃, 20℃, -20℃ (ガラスバイアル) 空気窒素条件 28 日間貯蔵(5℃)	GC/MSD	マロンアルデヒド(MA), ホルムアルデヒド(FA), アセトアルデヒド(ACT)の生成は、加熱殺菌および生ジュースの照射の両方で増加した。 加熱殺菌ジュース中の G 値は MA (0.0056), FA (0.061) and ACT (0. 0044)。マロンアルデヒドは5℃貯蔵中に減少した。 これらのアルデヒドの生成は照射温度が低下すると減少(-20℃)。また、嫌気(N ₂)条件の照射によって ACT および FA の生成量は低下したが MA は影響しなかった。 マロンアルデヒドの生成は 1000ppm のアスコルビン酸およびソルビン酸 亜硫酸の添加により減少。	Fan 2002
ショ糖、フルクトース、 グルコース、アミロペクチン、リンゴ酸	セシウム 137	0-6 kGy 0.099 kGy/min	5℃	GC/MSD	マロンアルデヒド、ホルムアルデヒドが線量依存的に生成。 これらの生成は pH の影響を受ける。	Fan 2003

脂質変化						
鶏肉	コバルト60	2.5-25 kGy 30 kGy/h	4℃, 20℃ フラスコ中	GC/MS	揮発性化合物の生成: dimethyltrisulphide, cis-3 trans-6-nonenals, oct-1-en3-one, bis(methylthio-)methane 鶏肉飼養時の餌にアルファトコフェロールおよびアスコルビン酸を 添加すると照射による揮発性化合物の生成が抑制された。	Pattweson 1995
牛肉(ソーセージ)	セシウム 137	0.5-3 kGy 0.096 KGy/min	4℃ 液体窒素温度	TBA 値 色の変化	脂質酸化および色調にわずかな変化(リステリアの D10 値=0. 5 6kGy)	Sommers 2003
卵(殻つき)	コバルト60	0.5-3 kGy		GC	炭化水素 C15:0, C14:1, C17:0, C16:1, C17:1, C16:2, C17:2, C16:3 は 0.5kGy 以上で検出され、線量依存的に増加した。	Hwang 1999

表2-2-4 化学的安全性 収集文献一覧

A. 総説、単行本

著者	掲載年	表題	雑誌名	巻(号)	頁	文献 I D
Elias P.S.	1977	Radiation chemistry of major food components.Amsterdam,	(Amsterdam Elsevier)			
Basson R.A.	1983	Advances in radiation chemistry of food and food components - an overview	In: Cohen AJ, Elias PS, eds. Recent advances in food irradiation. Amsterdam, Elsevier		38558	99-013
Diehl J.F. et al.	1975	Estimation of radiolytic products as a basis for evaluating the wholesomeness of irradiated foods	International Journal of Applied Radiation and Isotopes	26 (9)	499-501	FI0078
Taub I.A. et al.	1976	Irradiated food: validity of extrapolatin wholesomeness data	Journal of food science	41	942-944	99-015
Sonntag C.V.	1987	The chemical basis of radiation biology.	(London, Taylor and Francis)		375-393	99-043

化学全般

著者	掲載年	表題	雑誌名	巻(号)	頁	文献 I D
Diehl J.F.	1982	Radiolytic effects in foods	Boca Raton,FL,CRC Press In:Josephson ES,Peterson MS,eds.Preservation of foods by ionizing radiation ,Vol.1		279-357	94C 011
Simic M.G.	1983	Radiation chemistry of water-soluble food components	In:Josephson ES,Peterson MS,eds.Preservation of food by ionizing radiation,Vol.2.Boca Raton,FL,CRC Press		1-73	94C 036
Taub I.A.	1981	Radiation chemistry and the radiation preservation of food	Journal of chemical education	58	162-167	99-012
Taub I.A.	1983	Reaction mechanisms, irradiation parameters, and product formation	In:Josephson ES,Peterson MS,eds.Preservation of food by ionizing radiation,Vol.2.Boca Raton,FL,CRC Press		125-166	94C 038
Taub I.A.	1984	Free radical reactions in food	Journal of chemical education	61	313-324	99-022
Taub I.A. et al.	1979	Factors affecting radiolytic effects in food	Radiation physics and chemistry	14	639-653	99-024

タンパク質

著者	掲載年	表題	雑誌名	巻(号)	頁	文献 I D
Liebster J. et al.	1964	The radiation chemistry of amino acids	Advances in radiation biology	1	157-226	94C 024
Taub I.A. et al.	1978	Radiation chemistry of high protein foods irradiated at low temperature	(In: Proceedings, International Symposium on Food Preservation by Irradiation. Vienna, International Atomic Energy Agency)		371-384	99-027
Urbain W.M. et al.	1977	Radiation chemistry of proteins	In:Elias PS,Cohen AJ,eds.Radiation chemistry of major food components.Amsterdam,El sevier		63-130	94C 043

脂質

著者	掲載年	表題	雑誌名	巻(号)	頁	文献 I D
Merritt C.Jr.	1972	Qualitative and quantitative aspects of trace volatile components in irradiated foods and food substances	Radiation research reviews	3	353-368	94C 025)
Nawar W.W.	1977	Radiation chemistry of lipids	In:Elias PS,Cohen AJ,eds.Radiation chemistry of major food components. Amsterdam,Elsevier		21-61	94C 029)
Nawar W.W.	1983	Radiolysis of nonaqueous components of foods	In:Josephson ES,Peterson MS,eds.Preservation of food by ionizing radiation,Vol.2.Boca Raton,FL,CRC Press		75-124	94C 030)
Nawar W.W.	1986	Volatiles from food irradiation	Food reviews international	2	45-78	94C 031)
Nawar W.W.	1978	Reaction mechanisms in the radiolysis of fats: a review	Journal of agriculture and food chemistry	26	21-25	99-062

炭水化物

著者	掲載年	表題	雑誌名	巻(号)	頁	文献 I D
Dauphin J.H. et al.	1986	Radiation chemistry of carbohydrates	In:Elias PS,Cohen AJ,eds.Radiation chemistry of major food components.Amsterdam,Elsevier		131-185	94C 005) (99-45)
Delincee H.	1983	Recent advances in the radiation chemistry of proteins	In:Elias PS,Cohen AJ,eds.Recent advances in food irradiation,Amsterdam,Elsevier Biomedical		129-147	94C 006)
Sonntag C.V.	1980	Free-radical reactions of carbohydrate as studied by radiation techniques	Advances in carbohydrate chemistry and biochemistry	37	7-77	94C 046)

B. 研究論文（オリジナルデータ）

著者	掲載年	表題	雑誌名	巻(号)	頁	対象食品	文献ID
Annon	1994	Chemical method for detection of 2-dodecylcyclobutanone in irradiated chicken meat (In: Concerted action of the Community Bureau of Reference on methods of identification of irradiated foods.)	Luxemburg, European Commission Report No. EUR 15261 EN)		74-78	2-アルキルシクロブタノン分析	94T011
Beyers M. et al.	1979	γ -irradiation of sub-tropical fruits. 4. Changes in certain nutrients present in mangoes, papayas and litchis during canning, freezing and γ irradiation	Journal of agricultural and food chemistry	27	48-51	果実	94C002)
Boyd D.R. et al.	1991	Synthesis, characterization, and potential use of 2-dodecylcyclobutanone as a marker for irradiated chicken	Journal of agricultural and food chemistry	39	789-792	2-アルキルシクロブタノン分析	99-042
Byun M.W. et al.	2000	Effects of gamma radiation on the conformational and antigenic properties of a heat-stable major allergen in brown shrimp	Journal of Food Protection	63 (7)	940-944	タンパク質(アレルギー)	FI0716
Byun M.W. et al.	1997	Comparative effects of gamma irradiation and ozone treatment on hygienic quality of aloe powders	International Journal of Food Science & Technology	32 (3)	221-227	香辛料類(アロエ粉末, 生薬)	FI0993
Crone A.V.J. et al.	1992	Effect of storage and cooking on the dose response of 2-dodecylcyclobutanone, a potential marker for irradiated chicken	J. Sci. Food Agr.	58	249-252	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-17
Crone A.V.J. et al.	1993	Synthesis, characterization and use of 2-tetradecylcyclobutanone together with other cyclobutanones as markers for irradiated liquid whole egg	J. Sci. Food Agr.	62	361-367	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-07
Delincée H. et al.	1974	Effect of γ -irradiation on the charge and size properties of horseradish peroxidase: individual isoenzymes	Radiation research	59	572-584	タンパク質(酵素)	94C007)
Delincée H. et al.	1975	Structural damage of gamma-irradiated ribonuclease revealed by thin-layer isoelectric focussing	International Journal of radiation biology	28 (6)	565-579	タンパク質(酵素)	94C008)
Diehl J.F.	1975	Thiamine in irradiated foodstuffs I. Influence of different radiation conditions and of time after irradiation	Zeitschrift fuer Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung	157	317-321	ビタミン	94C009)
Diehl J.F.	1979	Reduction of radiation-induced vitamin losses by irradiation of foodstuffs at low temperature and by exclusion of atmospheric oxygen (原文ドイツ語)	Zeitschrift fuer Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung	169	276-280	ビタミン	94C010)
Diehl J.F. et al.	1979	Radiolysis of carbohydrates and of carbohydrate-containing foods	Journal of agricultural and food chemistry	26	15-20	炭水化物	94C013)
Dizdaroglu M. et al.	1973	γ -Radiolysis von Cellobiose in N ₂ O-gesättigter wässriger Lösung. Teil I. Identifizierung der Produkte	Zeitschrift fuer Naturforschung	28b	635-646	炭水化物, 食物繊維	99-052
Dorfman L.M. et al.	1962	Pulse radiolysis studies. I. Transient spectra and reaction-rate constants in irradiated aqueous solutions of benzene	Journal of chemical physics	36	3051-3061	放射線化学	99-023

Drijver L.D. et al.	1986	High-performance liquid chromatographic determination of D-arabino-hexos-2-ulose (D-glucosone) in irradiated sugar solutions: application of the method to irradiated mango	Journal of agricultural and food chemistry	34	758-762	マンゴ	94T 044)
Elliot C.T. et al.	1995	Detection of irradiated chicken meat by analysis of lipid extracts for 2-substituted cyclobutanones using an enzyme linked immunosorbent assay	Analyst	120	2337-2341	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-15
Fan X.	2003	Ionizing radiation induces formation of malondialdehyde, formaldehyde, and acetaldehyde from carbohydrates and organic acid	Journal of agricultural and food chemistry	51 (20)	Sep-46	炭水化物糖	FI0855
Fan X. et al.	2002	Changes in volatile compounds of γ -irradiated fresh cilantro leaves during cold storage	Journal of agricultural and food chemistry	50 (26)	Jun-22	香辛料類(コリアンダー(生))	FI0857
Fan X. et al.	2002	Formation of malonaldehyde, formaldehyde, and acetaldehyde in apple juice induced by ionizing radiation	Journal of Food Science	67 (7)	2523-2528	果実 リンゴ(ジュース)	FI0939
FASEB	1977	Evaluation of the health aspects of certain compounds found in irradiated beef	Bethesda, MD, Life Sciences Research Office, Federation of American Societies for Experimental Biology.			牛肉 揮発性生成物	94C 015)
FASEB	1979	Evaluation of the health aspects of certain compounds found in irradiated beef, supplements I and II	Bethesda, MD, Life Sciences Research Office, Federation of American Societies for Experimental Biology			牛肉 揮発性生成物	94C 016)
Gadgil P. et al.	2002	2-alkylcyclobutanones as irradiation dose indicators in irradiated ground beef patties	J. Agric. Food Chem.	50	5746-5750	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-09
Galetto W. et al.	1979	Irradiation treatment of onion powder: effects on chemical constituents	Journal of food science	44	591-595	香辛料類(オニオンパウダー)	94C 019)
Gower J.D. et al.	1986	The oxidation of benzo[a]pyrene mediated by lipid peroxidation in irradiated synthetic diets	Int. J. Radiat. Biol. Related Studies in Physics Chemistry and Medicine	49 (3)	471-484	魚 (脂質)	FI0014
Green B.E. et al.	1966	Lipid oxidation in irradiated cooked beef	Food Technology	20 (8)	111-114	牛肉 脂質	94C 020)
Hamilton L. et al.	1996	Detection of 2-substituted cyclobutanones as irradiation products of lipid-containing foods: synthesis and applications of cis- and trans-2-(tetradec-5'-enyl) cyclobutanones and 11-(2'-oxocyclobutyl) -undecanoic acid	J CHEM SOC PERK T 1	2	139-146	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-08
Horvatovich P. et al.	2000	Supercritical fluid extraction of hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones for the detection of irradiated foodstuffs	Journal of Chromatography A	897 (1-2)	259-268	2-アルキルシクロブタノン分析	FI0549 (OC-11)

Horvatovich P. et al.	2002	Supercritical fluid extraction for the detection of 2-dodecylcyclobutanone in low dose irradiated plant foods	Journal of Chromatography A	968	251-255	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-31
Hwang K.T.	1999	Hydrocarbons detected in irradiated shell eggs during storage	Journal of the American Oil Chemists' Society	76 (10)	1183-87	卵	FI0555
Kamat A. et al.	2003	Potential application of low dose gamma irradiation to improve the microbiological safety of fresh coriander leaves.	Food Control	14 (8)	529-537	香辛料類 (コリアンダー生)	FI0236
Katta S.R. et al.	1991	Effects of gamma irradiation of whole chicken carcasses on bacterial loads and fatty acids	Journal of Food Science	56 (2)	371-372	鶏肉 (脂質)	FI0193
Kavalam J.P. et al.	1969	Effects of ionizing radiation on some vegetable fats	Journal of the American Oil Chemists Society	46	387-390	植物油脂	94C 022)
Kennedy T.S. et al.	1971	Studies on the combined effect of gamma radiation and cooking on the nutritional value of fish	Journal of the science of food and agriculture	22	146-148	魚 ビタミン	94C 023)
Kim H.J. et al.	1984	Binding-site specificity of the radiolytically induced crosslinking of phenylalanine to glucagon	Radiation research	98	26-36	アミノ酸炭水化物	99-030
Kim H.J. et al.	1984	Binding site specificity of the gamma-radiation-induced crosslinking between phenylalanine and phenylalanine-containing tetrapeptide	Radiation research	100	30-40	タンパク質 アミノ酸	99-031
Kim H.J. et al.	2004	Analysis of radiolytic products of lipid in irradiated dried squids (<i>Todarodes pacificus</i>)	Journal of food protection	67 (8)	1731-5	2-アルキルシクロブタノン分析	FI0841
Kim M.J. et al.	2002	Changes in the antigenic and immunoglobulin E-binding properties of hen's egg albumin with the combination of heat and gamma irradiation treatment	Journal of Food Protection	65 (7)	1192-1195	卵 (アレルギー)	FI0948
Kwon J. H. et al.	1990	Chemical constituents of <i>Panax ginseng</i> exposed to γ irradiation	Journal of Agricultural and Food Chemistry	38 (3)	830-834	香辛料類 (ジンセン)	FI0035
Laroff G.P. et al.	1972	The electron spin resonance spectra of radical intermediates in the oxidation of ascorbic acid and related substances	Journal of the American Chemical Society	94	9062-9073	アスコルビン酸	99-056
Lee H.J. et al.	2000	Detection of radiation-induced hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones in irradiated perilla seeds	Journal of Food Protection	63 (11)	1563-1569	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-32
Lee H.J. et al.	1999	Detection of radiation-induced hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones from peanuts	J. Food Sci. Nutr.	4 (4)	271-275	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-16
Lee J.W. et al.	2001	Effects of gamma radiation on the allergenic and antigenic properties of milk proteins	Journal of Food Protection	64 (2)	272-276	牛乳 (アレルギー)	FI0963

Lee J.W. et al.	2002	Allergenicity of hen's egg ovomucoid gamma irradiated and heated under different pH conditions	Journal of Food Protection	65 (7)	1196-1199	卵	FI0947
Lee S.H. et al.	1997	Effects of ozone treatment and gamma irradiation on the microbial decontamination and physicochemical properties of red pepper powder	Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition	26 (3)	462-467	香辛料 (唐辛子)	FI0764
Lembke P. et al.	1995	Characterization of irradiated food by SFE and CG-MSD	J. Agric. Food Chem.	43	38-45	2-アルキルシクロブタン 分析	OC-27
Letellier P.R. et al.	1972	2-alkylcyclobutanones from the radiolysis of triglycerides	Lipids	7	75-76	2-アルキルシクロブタン	OC-04
Marchioni E. et al.	2002	Detection of low amount of irradiated ingredients in non-irradiated precooked meals	Radiat. Phys. Chem.	63	447-450	2-アルキルシクロブタン	OC-26
Masuda, T. et al.	2000	"Monitoring the Irradiation-induced Conformational Changes of Ovalbumin by Using Monoclonal Antibodies and Surface Plasmon Resonance	Biosci. Biotechnol. Biochem	64	710-716	蛋白質 (アレルギー卵白アルブミン)	OC-35
Meier W. et al.	1996	Detection of irradiation of fat-containing foods by on-line LC-GC-MS of alkylcyclobutanones	Mitteilungen aus dem Gebiete der Lebensmitteluntersuchung und Hygiene	87	118-122	2-アルキルシクロブタン 分析	OC-21
Merritt C.Jr. et al.	1983	Commonality and predictability of radiolytic products in irradiated meats	In: Elias PS, Cohen AJ, eds. Recent advances in food irradiation. Amsterdam, Elsevier Biomedical		27-57	肉揮発性物質	94C026)
Merritt C. Jr. et al.	1985	A quantitative comparison of the yields of radiolysis products in various meats and their relationship to precursors	Journal of the American Oil Chemists' Society	62	708-713	肉	99-061
Merritt C. Jr. et al.	1984	Radiolysis Compound in Bacon and Chicken(Final Report)	Science and Advanced Technology Laboratory U.S Army Natick R&D Lab Report PB 84-187095			鶏肉ベーコン	
Michel J.P. et al.	1980	Experimental study of the radiodepolymerization of starch	Starch	32	295-298	デンプン	99-051
Moshonas M.G. et al.	1984	Effects of low-dose γ -irradiation on grapefruit products	Journal of agricultural and food chemistry	32	1098-1101	果実(グレープフルーツ)	94C027
Nagai N.Y. et al.	1985	Quality of gamma irradiated California Valencia oranges	Journal of food science	50	215-219	果実(オレンジ)	94C028
Narvaiz P. et al.	1992	Physicochemical and sensory analyses on egg powder irradiated to inactivate Salmonella and reduce microbial load	Journal of Food Safety	12 (4)	263-282	乾燥卵	FI0425

Ndiaye B. et al.	1999	2-alkylcyclobutanones as markers for irradiated foodstuffs III. Improvement of the field of application on the EN 1785 method by using silver ion chromatography	Journal of Chromatography A	858	109-115	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-25
Ndiaye B. et al.	1999	2-alkylcyclobutanones as markers for irradiated foodstuffs II. The CEN (European Committee for Standardization) method: field of application and limit of utilization	Radiat. Phys. Chem.	55	437-445	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-22
Neta P.	1973	On the ESR spectra of radicals produced by the reaction of OH with uracils	Radiation research	56	201-204	核酸	99-057
Niyas Z. et al.	2003	Effect of γ -irradiation on the lipid profile of nutmeg (<i>Myristica fragrans</i> Houtt.)	Journal of agricultural and food chemistry	51 (22)	Apr-02	香辛料類 (ナツメグ・脂質)	FI0736
Silberstein O. J. et al.	1979	Irradiation of onion powder: Effects on taste and aroma characteristics	J. Food Science	44	917-919	香辛料類	S-27
Patterson R.L.S. et al.	1995	Irradiation-induced off-odour in chicken and its possible control	British poultry science	36 (3)	425-41	鶏肉	FI0630
Pfordt J. et al.	1995	Bakery products from irradiated and unirradiated eggs - detection of irradiation in processed food (原文ドイツ語)	Z. Lebensm. Unters. Forsch.	200	198-202	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-28
Proctor B.E. et al.	1952	Biochemical prevention of flavor and chemical changes in foods and tissues sterilized by ionizing radiations	Food technology	6	237-242	タンパク質 (酵素)	94C 032)
Proctor B.E. et al.	1951	Effect of high-voltage cathode rays on ascorbic acid - in vitro and in situ experiments	Industrial and engineering chemistry	43 (3)	718-721	アスコルビン酸	94C 033)
Radola B.J.	1974	Identification of irradiated meat by thin layer gel chromatography and thin layer isoelectric focusing (原文ドイツ語)	In: Identification of irradiated foodstuffs. Luxembourg, Commission of the European Communities, (EUR 5126).		27-43	肉タンパク質	94C 034)
Raffi J. et al.	1985	Glucose oligomers as models to elucidate the starch radiolysis mechanism	Starch	37	228-231	炭水化物グルコース	99-047
Raffi J. et al.	1987	Identification par résonance paramagnétique électronique de céréales irradiées	Science aliments	4	657-663	小麦大麦トウモロコシ	99-063
Raffi J. et al.	1981	Gamma radiolysis of starches derived from different foodstuffs Part IV: study of radiodepolymerization	Starch	33	301-306	デンプン	99-049
Raffi J. et al.	1980	Theoretical study of the radiodepolymerization of starch	Starch	32	227-229	デンプン	99-050
Raffi J. et al.	1983	Influence of the physical structure of irradiated starches on their electron spin resonance spectra kinetics	Journal of physical chemistry	87	2369-2373	デンプン	99-046

Raffi J. et al.	1981	Study of γ -irradiated starches derived from different foodstuffs: a way for extrapolating wholesomeness data	Journal of agricultural and food chemistry	29	1227-1232、 .166	炭水化物,デンプン	99-048
Rahman R. et al.	1996	Cyclobutanones as markers for irradiated samples of brie and camembert cheese	Nahrung	40 (2)	55-59	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-29
Rahman R. et al.	1996	A rapid method (SFE-TLC) for the identification of irradiated chicken	FOOD RES INT	29 (3-4)	301-307	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-14
Romani R.J. et al.	1963	Radiation physiology of fruit - ascorbic acid, sulphhydryl and soluble nitrogen content of irradiated citrus	Radiation botany	3	363-369	柑橘類 (アスコルビン酸)	94C 035)
Seo J.H. et al.	1999	Change of an egg allergen in a white layer cake containing gamma-irradiated egg white	Journal of food protection	67 (8)	1725-30	タンパク質(アレルギー)	FI0842
Sevilla C. et al.	1983	An ESR study of radical intermediates formed by gamma radiolysis of tripalmitin and dipalmitoyl phosphatidylethanolamine.	Journal of the American Oil Chemists' Society	60	950-957	脂質	99-040
Snauwaert F. et al.	1977	Radiation induced lipid oxidation in fish	Zeitschrift fur Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung	164 (1)	28-30	脂質	FI0707
Sommers C. et al.	2003	Radiation (gamma) resistance and postirradiation growth of listeria monocytogenes suspended in beef bologna containing sodium diacetate and potassium lactate	Journal of Food Protection	66 (11)	2051-2056	牛肉 (ソーセージ) 脂質過酸化	FI0120
Sommers C.H. et al.	2002	Antioxidant power, lipid oxidation, color, and viability of listeria monocytogenes in beef bologna treated with gamma radiation and containing various levels of glucose	Journal of Food Protection	65 (11)	1750-1755	牛肉 (ソーセージ)	FI0126
Sreenivasan A.	1974	Compositional and quality changes in some irradiated foods	In:Improvement of food quality by irradiation.Vienna,International Atomic Energy Agency		129-155	小麦	94C 037)
Stevenson M.H.	1994	Identification of irradiated foods. Electron spin resonance spectroscopy and detection of 2-alkylcyclobutanones are two approaches available to identify foods that have been irradiated	Food Technology	May	141-144	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-20
Stevenson M.H. et. al	1990	Irradiation detection	Nature	344 (15)	202-3	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-05
Stewart E.M. et al.	2001	Isolation of lipid and 2-alkylcyclobutanones from irradiated foods by supercritical fluid extraction	Journal of AOAC International	84 (3)	976-986	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-10

Stewart E.M. et al.	2000	2-alkylcyclobutanones as markers for the detection of irradiated mango, papaya, camembert cheese and salmon meat	Journal of the Science of Food & Agriculture	80	121-130	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-30
Tjaberg, T.B. et al.	1972	The Effect of Ionizing Radiation on the Microbiological Content and Volatile Constituents of Spices	J. Appl. Bact, 35, 473-478 (1972)			香辛料類	S-30
Tanabe H. et al.	2002	Consideration on detection of irradiated rainbow trout by ESR method and 2-alkylcyclobutanone analysis	Food Irradiation, Japan	37 (1/2)	17-23	2-アルキルシクロブタノンニジマス	FI0713
Tanabe M. et al.	2002	Detection method of irradiated chicken by GC analysis of 2-alkylcyclobutanones and hydrocarbons using soxhlet extraction and florisil chromatography	Radioisotopes	51	109-119	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-23
Taub I.A. et al.	1968	Transient solvated electron, hydroxyl, and hydroperoxy radicals in pulse-irradiated crystalline ice	Journal of chemical physics	49 (6)	2499-2513	放射線化学 (反応)	99-026
Tewfik I.H. et al.	1998	A rapid supercritical fluid extraction method for the qualitative detection of 2-alkylcyclobutanones in gamma-irradiated beef and chicken	Lebensm. Wiss. U-Technol.	31	366-370	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-12
Tewfik I.H. et al.	1999	A rapid supercritical fluid extraction method for the qualitative detection of 2-alkylcyclobutanones in gamma-irradiated fresh and sea water fish	International Journal of Food Sciences & Nutrition.	50 (1)	51-56	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-13
Thomas M.H. et al.	1981	Effect of irradiation and conventional processing on thiamin content of pork	Journal of food science	46	824-828	豚肉 (ビタミン)	94C 040)
Thomas P.	1986	Radiation preservation of foods of plant origin. III. Tropical fruits: bananas, mangoes, and papayas	Critical reviews in food science and nutrition	23 (2)	147-205	熱帯果実	FI0020
Thomas P. et al.	1971	Effect of gamma irradiation on the postharvest physiology of five banana varieties grown in India	Journal of food science	36	243-247	果実 (バナナ)	94C 041)
Underdal B. et al.	1973	The effect of ionizing radiation on the nutritional value of fish (cod) protein	Lebensmittelwissenschaft und Technologie	6	90-93	魚	94C 042)
Uzunov G. et al.	1972	Changes in the soluble muscle proteins and isoenzymes of lactate dehydrogenase in irradiated beef meat	International journal of radiation biology	22 (5)	437-442	牛肉 (タンパク質)	94C 044)
Vajdi M. et al.	1985	Identification of adduct radiolysis products from pork fat	Journal of the American Oil Chemists Society	62	1252-1260	豚肉 (脂質)	94C 045)
Crone J. et al.	1992	Detection of 2-dodecylcyclobutanone in radiation-sterilized chicken meat stored for several years	International Journal of Food Science & Technology.	27	691-696	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-18

Ward J.F.	1978	Chemical consequences of irradiating nucleic acids	Journal of agricultural and food chemistry	26	25-28	核酸	99-058
Whitburn K.D. et al.	1984	Interaction of radiation-generated radicals with myoglobin in aqueous solutions-II Analysis of product yields for hydroxyl radicals with oxymyoglobin under deaerated conditions	Radiation, physics and chemistry	23	271-278	タンパク質	99-039
Whitburn K.D. et al.	1981	Globin-mediated redox processes in the interaction of hydroxyl radicals with ferrimyoglobin aqueous solution	International journal of radiation biology	40	297-303	タンパク質	99-035
Whitburn K.D.	1981	Formation of a steady state in the radiolysis of ferrimyoglobin in aqueous solution	Archives of biochemistry and biophysics	208	319	タンパク質	99-034
Whitburn K.D. et al.	1983	Simultaneous reaction of hydroxyl radical and aquated electrons with ferrimyoglobin in irradiated solutions	Journal of food science	48	1888-1889	タンパク質	99-037
Whitburn K.D. et al.	1982	Redox transformations in ferrimyoglobin induced by radiation-generated free radicals in aqueous solution	Journal of biological chemistry	257	1860-1869	タンパク質	99-036
Wills P.A.	1965	Some effects of gamma radiation on several varieties of Tasmanian potatoes 2.Biochemical changes	Australian journal of experimental agriculture and animal husbandry	5	289-295	バレイショ	94C(049)
Wilmers K. et al.	1990	Chemometrische auswertung von GC/MS-profilen zum nachweis einer γ -strahlenbehandlung von gewürzen am beispiel der muskatnuß	Deutsche Lebensmittel-Rundschau	86 (11)	344-348	香辛料類	FI0816
Yang J.S.	1998	Effects of gamma irradiation on the flavor composition of food commodities	Advances in experimental medicine and biology	434	277-84	バレイショ等青果物	FI0231
Yang Z. et al.	2001	Study on radiation preservation of low temperature meat products	Food Science, China	22 (9)	84-86	牛肉・豚肉ソーセージ、ハム	FI0008
Zareena A.V. et al.	2001	Chemical investigation of gamma-irradiated saffron (<i>Crocua sativus</i> L.)	J. Agric. Food Chem	49	887-891	香辛料類	S-28
Zegota H.	1988	Suitability of Dukat strawberries for studying effects on shelf life of irradiation combined with cold storage	Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung	187	111-114	イチゴ	94C(050)
Zhu M.J. et al.	2004	Influence of irradiation and storage on the quality of ready-to-eat turkey breast rolls	Poultry science	83 (8)	1462-6	七面鳥	FI0627
Zhu Y. et al.	1996	(Long-lived free radicals formation in irradiated dried beef)	Food Science, China	17 (8)	38418	牛肉	FI0679
奥山典生 他	1992	ガンマ線照射コショウの化学成分変動の解析	食品照射研究委員会研究成果最終報告書 日本アイソトープ協会、1992年12月		79-89	香辛料類	S-29
金信忠 他	1991	香辛料の精油成分及び脂質に対する γ 線照射の影響	日本食品工業学会誌	38(11)	1025-1032	香辛料類	S-26
田辺寛子 他	2002	ESR 法およびアルキルシクロブタノン法による照射魚類の検地についての一考察 - ニジマス为例として -	Food Irradiation Japan	37 (1-2)	17	2-アルキルシクロブタノン分析	OC-33

田辺寛子 他	2002	2-アルキルシクロブタノンおよび炭化水素 の同時分析 (GC/FID) による照射鶏肉の検知 法に関する考察	Radioisotopes	51	157-166	2- アル キルシ クロブ タノン 分析	OC-24
渡辺宏 他	1985	香辛料の抗菌性及び抗酸化性に対する γ 線 照射の影響	食品照射	20	27-30	香辛料 類	S-31

2-3 栄養学的適合性

食品の放射線照射により特定の栄養素が破壊されたり、消化性が低下するなどの影響により、食品としての適性を欠くようなことがあってはならない。この栄養学的適合性に言及したものとしては、①動物を使った栄養試験、②化学的分析による放射線照射の栄養成分への影響を調べた文献の2つに大別される。栄養素としては、影響を受けやすいものとそうでないものがあり、前者については、脂質の分解と特にビタミンの破壊を考慮に入れる必要がある。その際、照射によって影響を受けやすいビタミンが、照射の対象となる食品を主な供給源としているか否かによっても影響が異なる。食品の放射線照射の栄養学的影響については、Diehlらの本によくまとめられている（Diehl 1995）。

栄養学的考察に関する初期の文献では、放射線照射による主な栄養源の変化を追っている（WHO 1994a）。その中で、照射によって食品の消化性に影響がでないか、脂肪の酸化による影響はでないか、蛋白質に変性が起きないか、デンプンがどの程度分解するか等が調べられている。脂肪については、例えば後述する文献（Vaca 1986）のように不飽和脂肪酸の減少や過酸化物質の増加を示すものが存在する。

一方、本章の5節でも述べるように、動物を用いた毒性試験の初期段階では、照射食品を投与された動物に悪影響が観察され、毒性試験の実施が困難となった例がある。これらの原因を追求する過程で、この悪影響が照射によって毒性学的に危険な物質が生成したことによるものではなく、ビタミンなどの微量栄養素の照射による破壊が原因となっていることが明らかにされた。これらの経緯については、いくつかの総説的資料に解説されている（宮原 2003、林 1993、Tobback 1977）。

なお、栄養素の破壊に対する照射の影響を評価する際の観点としては、単に照射と非照射の食品の比較においての議論だけではなく、実際に食品を摂取する際の条件を考慮して、照射と加熱の組み合わせや加熱のみの場合の影響についても議論されている（Kennedy 1971, Theyer 1990）。また、バレイショのように長期貯蔵する農産物においては、照射直後の微量栄養素の変化だけでなく、貯蔵中の変化に着目した研究が実施されている。たとえば照射によってアスコルビン酸は減少するが、貯蔵後のアスコルビン酸含量は低温貯蔵された非照射のバレイショと比較して高いレベルにあるという報告もある（ICGFI 1997）。さらに前章で扱った各国政府における個別食品の評価において指摘したように、照射食品の微量栄養素の損失の影響を評価する際には、分析化学的研究で得られる食品中の微量栄養素の照射による損失率のデータだけでなく、その食品の食事全体に占める割合を考慮に入れる必要があることがWHOの報告書でも述べられている（WHO 1994b）。

最近の文献で、特に放射線に敏感なチアミン、ビタミンK、トコフェロール、アスコルビン酸、葉酸などの減少について調べた文献については内容を分析した（表2-3-1）。また、今回収集した文献の一覧は表2-3-2にまとめた。

＜参考文献＞ 総説、解説等

- 1) Diehl J.F. (1995) Safety of irradiated food. (照射食品の安全性) 2nd Ed(New York,Marcel Dekker.)
- 2) WHO (1994a) Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food, Geneva, p138.
- 3) 宮原誠 (2003) 照射食品安全性検証の歴史, 食品照射, **38**, 33-39.
- 4) 林徹 (1993) 放射線の基礎と応用 (第6章) 大森豊明編 “電磁波と食品” 光琳東京 p245.
- 5) Tobback (1977) ビタミンの放射線化学, Elias、Chohen編著 “食品照射の化学” (林力丸訳: 学会出版センター、1981、東京)
- 6) ICGFI (1997) Irradiation of bulbs and tuber crop (IAEA-Techdoc-937 Genva, p15.
- 7) WHO (1994b) Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food, Geneva, p143.

表2-3-1 栄養素の変化に関する最近の文献

照射対象(食品)	線源	線量 (線量率)	温度 雰囲気	分析法	結果(コメント)	著者/参考文献	
ニンジン パプリカ	コバルト 60	1kGy 2.35kGy/h,	ポリエチレンバック (室温) 照射後は、 5,10,15℃ (パプリカ) 1,10,16℃ (ニンジン) で保存	β カロテン 含量 (比色 450nm),ア ス コ ル ビ ン 酸 (HPLC) (リステリ アの殺菌線量)	1 kGy でパプリカのアスコルビン酸が 12% 損失。 B カロテン含量は照射試料のほうが非照射よりも高い。	Farkas 1997	FI0239
A) ライ麦 B) 小麦 C) 米	コバルト 60	0.4-63 kGy 0.33 Gy/s	ガラスチューブ 室温. 60 日間貯蔵 照射. + 加熱 照射. +酸素飽和 水分含量: 10%- 13%	GLC TBA assay HPLC	A)リノール酸(C18:2) およびリノレン酸(C18:3) 含量 :水分 10%で不飽和脂肪酸の減少なし;水分 13%の時のリノレン酸(C18:3)含量 63kGy で 2.3%減少 (総脂肪酸に対する重量比); 63kGy+熱処理で 3.9%の減少, 63kGy+O ₂ で 5%減少。水分 13%でリノール酸(C18:2) : 63kGy+O ₂ 11.3%減少 B)C18:2 および C18:3 : 水分 10%で変化なし;水分 13%の時 C18:2, 63kGy : 3.2% , 63kGy+heat 5.3% 減少,63kGy+O ₂ で 0.4%減少 C)水分含量 10%の時 63kGy で C18:3 :1.2%減少 A)/C) 過酸化脂質: TBA 値は線量依存的に増加 B) 線量依存的に TBA 値が増加するほか 5% ~ 13%までの水分含量に応じて増加	Vaca 1986	94N 039)(99- 116)
牛肉,豚肉, 羊肉, 七面鳥	セシウム 137	0.24-9.37 kGy 0.108 kGy/min	5℃	HPLC	2kGy まです α トコフェロール含量 は急速に減少。それ以上の線量では、トコフェロールレベルは一定。 牛肉: 2.34-9.37 kGy, 59-46% 保持 豚肉: 2.34-9.37 kGy, 79-35% 保持 羊肉: 2.34-9.37 kGy, 84-44% 保持 七面鳥(胸肉): 2.34-9.37 kGy, 54-19% 保持 七面鳥(脚): 2.34-9.37 kGy, 64-33% 保持 自由水 : 変化なし	Lakritz 1995	99-072
芝エビ	コバルト 60	up to 7 kGy 0.15 kGy/min	4℃, -20℃ 照射後調理	比色法	チアミンの減少は線量および照射温度に依存。7 kGy, 4℃ で 31% 損失, -20℃で 21% 損失。 照射後の調理でさらにチアミンの減少が大きい。 ナイアシン/リボフラビン: 有意な変化なし	Lee 1996	99-075

A) チーズ、パニ ラアイス、イチゴ フローズンヨーグ ルト、脱脂粉乳 B) 脱脂粉乳 C) モッツアレラチー ズ	コバルト 60	40 kGy	0.8 kGy/h ポリエチレン、ポリエス テルバック N ₂ 置換 A) dry ice (-78°C) B) 22/0-5/-78°C C) 0-5/-78°C	比色法	A) thiamin/riboflavin/vit.B12: 変化なし B) どの温度でもチアミンの損失はなし C) 0-5°Cで32%の損失。-78°Cでは変化なし	Dong 1989	99-095
牛肉、羊、豚、七 面鳥	セシウム 137	0.234-9.374 kGy	0.108 kGy/min Cryovac E-300 パウチバック、真空、 5°C	チアミン含量 (蛍光法)	3 kGy 以上の照射でチアミンの減少は 11%/kGy; リボフラビンの減少 は 2.5%/kGy チアミンの減少は、含硫タンパク質や水分、脂質含量、pH に影響され ない。	Fox 1995	99-098
A) ホウレンソウ B) キャベツ, C) 芽キャベツ D) グリーンペッパー E) 牛レバー F) イースト ,G) カマン ベールチーズ(60% 脂質) fat H) カマンベールチ ーズ(17%脂質)	電子線 (10MeV)	2.5-10 kGy	10 MeV 室温		A)/B)/C): 総葉酸量は線量依存的に減少。10% 損失(2.5 kGy) A)乾燥/B)/C)/E)/F)G)/H): 0-30% 損失(10 kGy)	Mueller 1996	99-105
マンゴ	電子線	0.5-1.5 kGy 1.43 kGy/h	照射前に温水浸漬, 55°C/5min PVC film. 12°C, 80-85% 相対湿 度で保存	フェノール化合 物、カロテノイド、 アスコルビン酸、 全糖、還元糖、酸 度	照射により総カロテノイド含量は若干増加。(熟成過程での増加)。アス コルビン酸が照射によってわずかに減少。ただしマンゴの貯蔵期間中 に起こるアスコルビン酸の減少は、非照射(コントロール)のほうが大き い。	El-Samah y 2000	FI0386
野菜ジュース(セ ロリ、ブロッコリ、あ したば、にんじん)	コバルト 60	1-5kGy		CFU アスコルビン酸、 クロロフィル、カロ テノイド EDA (electron donating ability)	3-5 kGy で生菌数低減。照射によりタンニン、総アスコルビン酸量はわ ずかに増加 カロテノイド、クロロフィル, EDA, 過酸化物質は変化なし	Kim 1999	FI0975

表2-3-2 栄養学的適合性に関する収集文献一覧

A. 総説、単行本

著者	掲載年	表題	雑誌名	巻(号)	頁	文献ID
Raica N. Jr. et al.	1972	The nutritional quality of irradiated foods	Radiation Research Reviews	3	447-457	99-065
Sreenivasan A.	1974	Compositional and quality changes in some irradiated foods	IAEA-PL-561/10		129-155	94C 037)
Josephson E. S. et al.	1978	Nutritional aspects of food irradiation: An overview	Journal of Food Processing and Preservation	2	229-313	99-067
Eggum B. O.	1979	Effect of radiation treatment on protein quality and vitamin content of animal feeds	Decontamination of animal feeds by irradiation Proc.Meeting Sofia, 1977 IAEA Vienna		55-67	99-084
Diehl J. F.	1981	Effects of combination processes on the nutritive value of food	IAEA-/SM-250/28		349-366	94N 008)
Murray T. K.	1983	Nutritional aspects of food irradiation	Elsevier Biomedical Press Recent Advances in Food Irradiation		203-216	94N 029)
Thayer D. W.	1990	Food irradiation: benefits and concerns	Journal of Food Quality	13	147-169	94N 36 (99-78)
Diehl J. F.	1991	Nutritional effects of combining irradiation with other treatments	Food Control	Jan.	20-25	94N 010)
Diehl J. F. et al.	1991	Regulation of food irradiation in the European Community: is nutrition an issue?	Food Control	Oct.	212-219	94N 011)
Thayer D. W. et al.	1991	Effects of ionising radiation on vitamins	(In:Thorne S. ed. Food Irradiation. Barking, Elsevier)		285-325	99-070
Diehl J. F.	1992	Food irradiation: is it an alternative to chemical preservatives?	Food Additives and Contaminants	9	409-416	99-088
Diehl J. F.	1995	Safety of irradiated food. (照射食品の安全性) 2nd Ed	(New York,Marcel Dekker.)			

B. 研究論文（オリジナルデータ）

ヒトの摂食試験

著者	掲載年	表題	雑誌名	巻(号)	頁	文献ID
Plough I. C. et al.	1960	Human feeding studies with irradiated foods (食事内容:肉、魚、鶏肉、キャベツ、豆、サツマイモ)	Federation Proceedings	19(4)	1052-1054	94N 033)
Bierman E. L. et al.	1958	Short-term human feeding studies of foods sterilized by gamma radiation and stored at room temperature (食事内容:タラ、ヘーコン、フルーツコンポート、モモ、グリーンピース、小麦、ハレイショ、エビ、マグロ、サツマイモ、トウモロコシ、ニンジン、ハイチップル、ジャム、コールスロー、オレンジ など)	U. S. Army Medical Nutrition Laboratory	Report2 24		94N 004
Kraybill H. F.	1958	Nutritional and biochemical aspects of food preserved by ionizing radiation. (食事内容:丼、チーズ、ブルーベリー、サランボ、肉、ミルク、豆、小麦、トウモロコシ、ピーツ)	Journal of Home Economics	50(9)	695-700	99-077
Brasch A. et al.	1947	Ultrashort application time of penetrating electrons: a tool for sterilization and preservation of food in the raw state (官能評価) 牛肉、豚肉、鶏肉、丼、サ、エビ、卵黄、ミルク、チーズ、野菜、果実	Science	105	112-117	99-093

動物摂食試験

著者	掲載年	表題	雑誌名	巻 (号)	頁	文献 ID	食品
Bubl E. C. et al.	1960	The growth, breeding and longevity of rats fed irradiated or non-irradiated pork	Journal of Nutrition	70(2)	211-218	99-328	豚肉
Brin M. et al.	1961	Effects of feeding X-irradiated pork to rats on their pyridoxine nutrition as reflected in the activity of plasma transaminases	Journal of Nutrition	75	35-38	94T 023	豚肉
Brin M. et al.	1961	Effects of feeding X-irradiated pork to rats on their thiamine nutrition as reflected in the activity of erythrocyte transketolase	Journal of Nutrition	75	29-34	94T 024	豚肉
Daghir N. J. et al.	1983	Effect of gamma irradiation on nutritional value of lentils (<i>Lens culinaris</i>) for chicks	Nutrition Report International	27(5)	1087-1093	99-087	レンズ豆
Day E. J. et al.	1957	Effects of gamma radiation on certain water-soluble vitamins in raw ground beef	Journal of Nutrition	62	27-37	99-098	牛肉
Day E. J. et al.	1957	The bioassay of thiamine in beef exposed to gamma radiation	Journal of Nutrition	62	107-118	99-092	牛肉
Ley F. J. et al.	1969	Sterilization of laboratory animal diets using gamma radiation	Laboratory Animals	3	221-254	99-085	動物試料
McGinnis J. et al.	1978	Improvement in the nutritional value of rye by gamma irradiation	Federation Proceedings	37	759	99-083	ライ麦 トウモロコシ
Metta V. C. et al.	1959	Vitamin K deficiency in rats induced by the feeding of irradiated beef	Journal of Nutrition	69	18-22	99-112	牛肉
Pfeiffer C. et al.	1994	Effect of irradiation on folate levels and on bioavailability of folates in dehydrated foodstuffs	Acta Alimentaria	23(1)	105-118	99-106	ホウレンソウ, アスパラガス, 卵黄
Read M. S. et al.	1961	Successive generation rat-feeding studies with a composite diet of gamma-irradiated foods	Toxicology and applied pharmacology	3	153-173	99-076	ベーコン, 牛肉, タラ, 豆, 穀類, ビタミン
Reddy S. J. et al.	1979	Effect of gamma irradiation on nutritional value of dry field beans (<i>Phaseolus vulgaris</i>) for chicks	Journal of Nutrition	109	1307-1312	99-086	豆
Richardson L. R. et al.	1961	Comparative vitamin B6 activity in frozen, irradiated and heat-processed foods	Journal of Nutrition	73	363-368	99-099	牛レバー, 鶏肉, キャベツ, 豆, サツマイモ
Richardson L. R. et al.	1961	Comparative vitamin K activity of frozen, irradiated and heat-processed food	Journal of Nutrition	73	369-373	99-111	ホウレンソウ, フロッコリー, キャベツ, アスパラガス, 豆, カリフラワー
Skala J. H. et al.	1987	Wholesomeness of irradiated food	Journal of Food Protection	50(2)	150-160	99-097	牛肉, 鶏肉, 動物試料
Tou J. et al.	2003	Evaluation of NASA foodbars as a standard diet for use in short-term rodent space flight studies	Nutrition	19	947-954	FI0040	宇宙食
Underdal B. et al.	1976	The effect of ionizing radiation on the nutritional value of mackerel	Lebensmittel Wissenschaft und Technologie	9	72-74	99-079	魚(サバ)

栄養成分の化学分析

著者	掲載年	表題	雑誌名	巻 (号)	頁	文献 ID	食品
Adam S. et al.	1982	Influence of ionizing radiation on the fatty acid composition of herring fillets	Radiat. Phys. Chem.	20(4)	289-295	94N 001)	魚(ニシン)
Agneessens R. et al.	1989	Dosage du β -carotène dans les fruits irradiés, par chromatographie liquide à haute performance avec détection ampérométrique	Bull. Rech. Agron. Gembloux	24(1)	85-90	94N 003)	オレンジ°, ハ°イ ナッ°, ル, アッ ス°
Al Kahtani H. A. et al.	1996	Chemical changes after irradiation and post-irradiation storage in tilapia and Spanish mackerel	Journal of Food Science	61(4)	729-733	99-074	魚(ティラピ°, ア°, サハ°)
Alexander H. D. et al.	1956	Radiation effects on water soluble vitamins in raw beef	Federation Proceedings	15	921-923	99-103	牛肉(生)
Brooke R. O. et al.	1966	Preservation of fresh unfrozen fishery products by low-level radiation	Food Technology	20	99-102	99-101	魚(タラ)
Chiou R. Y.-Y. et al.	1991	Characterization of gamma irradiated peanut kernels stored one year under ambient and frozen conditions	Journal of Food Science	56(5)	1375-1377	99-118	ピーナツ
Diehl J. F.	1975	Thiamine in irradiated foodsutuffs I . Influence of different radiation conditions and of time after irradiation	Z. Lebensm. Unters.-Forsch.	157	317-321	94C 009)	卵
Diehl J. F.	1979	Vitamin A in bestrahlten Lebensmitteln	Z. Lebensm. Unters. Forsch.	168	29-31	94N 006)	チーズ°, ソセジ°, 豚ハ°, 粉末 卵, オレンジ°
Diehl J. F.	1979	Verminderung von strahleninduzierten vitamin-E- und -B1- verlusten durch bBestrahlung von Lebensmitteln bei tiefen Temperaturen und durch Ausschluß von Luftsauerstoff	Z. Lebensm. Unters. Forsch.	169	276-280	94N 007)	粉末卵, 植 物油
Dong F. M. et al.	1989	Effects of gamma-irradiation on the contents of thiamine, riboflavin, and vitamin B-12 in dairy products for low microbial diets	Journal of Food Processing and Preservation	13	233-244	99-095	チーズ°, ヨーク ルト, アイスクリ ム, ミルク
Fan X. et al.	2002	Sensorial and chemical quality of gamma-irradiated fresh-cut iceberg lettuce in modified atmosphere packages	Journal of Food Protection	65 (11)	1760-1765	FI0737	レタス
Farkas J. et al.	1973	Feasibility of irradiation of spices with special reference to paprika	IAEA-SM-166/66		389-401	99-108	ハ°ブ°リカ, マシ°ヨラムコショウ
Fésüs I. et al.	1981	Protection of oranges by gamma radiation against Ceratitis capitata wied	Acta Alimentaria	10(4)	293-299	94N 015)	オレンジ°
Fox J.B. et al.	1995	Gamma irradiation effects on thiamin and riboflavin in beef, lamb, pork and turkey	Journal of food science	60	596-598	99-064	牛肉
Galetto W. et al.	1979	Irradiation treatment of onion powder:effects on chemical constituents	Journal of Food Science	44(2)	591-595. 605	94C 019)	タマネギ°
Groninger H. S. et al.	1956	Some chemical and organoleptic changes in gamma irradiated meats	Food Research	21	555-564	99-089	牛肉, 豚肉, 鶏肉, サ°, ツ ナ, ハム, カレイ
Hafez Y. S. et al.	1985	Effect of gamma irradiation on proteins and fatty acids of soybean	Journal of Food Science	50	1271-1274	99-117	大豆

Hammer C. T. et al.	1979	The effect of ionizing radiation on the fatty acid composition of natural fats and on lipid peroxide formation	International Journal of Radiation Biology	35(4)	323-332	94N 018)	油脂(ラード, コーン油, ココナツ油)
Hozová B. et al.	2000	Microbiological, nutritional and sensory evaluation of long-time stored amaranth biscuits produced from irradiation-treated amaranth grain	Nahrung	44 (1)	13-18	FI0946	アマランサス, 小麦
Janave M. T. et al.	1979	Influence of post-harvest storage temperature and gamma irradiation on potato carotenoids	Potato Research	22	365-369	94N 021)	ハレシヨ
Kennedy T. S. et al.	1971	Studies on the combined effect of gamma radiation and cooking on the nutritional value of fish	J. Sci. F. Agric.	22	146-148	94C 023)	タラ
Kim M. J. et al.	1999	Sanitizing effect of γ -irradiation on fresh vegetable-extract juices	Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition	28 (2)	378-382	FI0975	野菜ジュース
Knapp F. W. et al.	1961	Comparison of the radiosensitivities of the fat-soluble vitamins by gamma irradiation	Journal of Agricultural and Food Chemistry	9(6)	430-433	99-110	ビタミン (VA, D, E, K カロテン)
Kun-Fen L. et al.	1996	Effect of gamma-irradiation and post-irradiation cooking on thiamine, riboflavin and niacin contents of grass prawns (Penaeus monodon)	Food Chemistry	55(4)	379-382	99-075	エビ
Matschiner J. T. et al.	1966	Vitamin K content of ground beef	Journal of Nutrition	90	331-334	99-113	牛肉
Metta V. C. et al.	1959	Biological value of gamma irradiated corn protein and wheat gluten.	Journal of Agricultural and Food Chemistry	7(2)	131-133	99-081	トモロコシ, 小麦
Müller H.	1991	Bestimmung der folsäure-gehalte von Lebensmitteln - der einfluss der verarbeitung und zubereitung auf das Verteilungsmuster [Determination of folic acid content of foodstuffs - effect of processing on the distribution pattern]	Ernährungs-Umschau	38	101	94N 028)	葉酸
Müller H. et al.	1996	Effect of ionizing radiation on folates in food.	Lebensmittel Wissenschaft und Technologie	29	187-190	99-105	ホレンソウ, キャベツ
Richardson L. R. et al.	1958	The activity of certain water-soluble vitamins after exposure to gamma radiations in dry mixtures and in solutions	Journal of Nutrition	65	409-418	99-104	ビタミン類
Thomas M. H. et al.	1981	Effect of radiation and conventional processing on the thiamin content of pork	Journal of Food Science	46	824-828	94C 040) 94N 036)	豚肉
Tipples K. H. et al.	1965	Some effects of high levels of gamma irradiation on the lipids of wheat	Cereal Chemistry	42(5)	437-451	94N 038)	小麦
Vaca C. E. et al.	1986	Radiation-induced lipid peroxidation in whole grain of rye, wheat and rice: Effects on linoleic and linolenic acid	Radiation Physics and Chemistry	28(3)	325-330	94N 039)	ライ麦, 小麦, 米

Wilson G. M.	1959	The treatment of meats with ionising radiation. II. Observations on the destruction of thiamine	Journal of the Science of Food and Agriculture	10	295-300	99-094	豚肉, 牛肉
--------------	------	---	--	----	---------	--------	--------

2-4 微生物学的安全性

食品照射の実施目的は、多くの場合、特定の病原菌の殺滅や腐敗菌の制御による食品の衛生化や保蔵期間の延長である。これらの目的とする微生物学的効果を達成するのと同時に食品照射によって好ましからぬ微生物学上の変化が誘発され、食品としての安全性に問題が生じることがあってはならない。この点においてより具体的に想起される疑問は次の1から5までの項目に集約される。

1. 照射によって特定の有害微生物を食品中に増す危険性はないか。
2. 照射によって微生物の突然変異が誘発される危険性はないか。
3. マイコトキシン等の毒素産生能が増加しないか。
4. 微生物の放射線抵抗性が増す危険性はないか。
5. 病原微生物等の特性が変化しないか。

これらに加え、放射線照射の微生物学的検討を行った文献の存在の可能性として次の2点が考えられる。

6. 上記以外の観点で微生物学的安全性にかかわる問題を扱った文献
7. 単なる微生物の放射線死滅効果や感受性に関する文献

そこで、本稿の微生物学的安全性に関する文献収集と整理においては、WHOの2つのレポート（1994, 1999 1章参照）の微生物に関する章のレファレンス文献と文献検索によって挙げられた文献の候補について、まず、上記の観点の1から7のどれかに該当する文献であるのかの分類を行った。その際、7番目の、放射線照射による微生物への影響を調べ、単なる致死効果や放射線感受性のデータを示している文献は今回の収集分析の対象から除外した。

候補文献の中に、6に示した新たな観点から微生物学的安全性に対する問題を提起するような文献に該当するものは見当たらなかった。また、2に示した、突然変異の誘発については、「微生物が突然変異をおこして従来存在しなかったような危険な生物が生じることはないのか」という食品照射技術に関する一般的な懸念として論じられることはあるが（たとえば Murray 1990）、これまでに存在しないような特殊な生物への突然変異が誘発されたことを実証するような研究論文は見当たらなかった。

今回、内容を分析した文献において、実質的に微生物学的安全性に関する議論の対象となる研究報告は、①照射による特定微生物の選択的増殖 および ③微生物の毒素産生能の変化 に関するものがほとんどであった。また、④放射線抵抗性の変化 および ⑤病原性等の変化 について、若干の文献が存在した。

照射による特定微生物の選択的増殖 ①

微生物の放射線感受性は D10 値 (90%の微生物を不活性化するのに必要な線量) で示される。主な病原微生物; *Aeromonas hydrophila*, *Campylobacter jejuni*, 病原性大腸菌 O157:H7、リステリア菌、サルモネラ、*Staphylococcus aureus*, *Yersinia enterocolitica*, *Vibrio parahaemolyticus*, は 1 kGy 以下の D10 値を示す。乳酸菌のような非病原性微生物はこれらの病原菌よりも放射線抵抗性が強いので、前述の病原微生物が照射食品中で選択的に増殖することはない。

しかしながら、バチルス属とクロストリジウム属の孢子は放射線抵抗性が強く、照射後の食品の保存条件がこれらの細菌の増殖を予防するのに適切でない場合 (塩類濃度の調整や、低温貯蔵の措置がとられない場合) には、選択的増殖の危険性がある。特に、魚介類に存在する *Clostridium botulinum* type E の殺菌処理後の増殖の可能性は、放射線処理だけでなく他の完全滅菌でない処理 (例えば魚の燻煙) でも懸念される。例えば照射マスの実験においては、適性製造規範 (GMP) に則って低い貯蔵温度 (3°C) を守れば、生存した通常の腐敗菌のフローラは、ボツリヌス菌と競合状態を保って生育し、ボツリヌス毒素が現われる前に、明確に認識できるような腐敗のパターンを示す (Diehl 1995)。しかしながら 10°C より高い貯蔵温度では、腐敗臭による貯蔵 (賞味) 期限の終了が顕在化する前に、(ボツリヌス) 毒素産生が開始されるという指摘がある。GMP は、照射食品、非照射食品のいずれにおいても、魚介類のような生鮮食品が低い特定の温度 (4°C 以下) で保蔵されることを要求している (ICGFI 1991)。

ボツリヌス菌の肉類における選択的な増殖の問題も議論されている。例えば、鶏においては、照射の後の残存する自然なマイクロフローラが生存するボツリヌス菌よりはるかに速く成長して毒素産生の前に腐敗臭が発生すると報告されており、低線量の照射が芽胞形成細菌のリスクを増加させないと Radomyski らは述べている (Radomyski 1994)。

これら魚介類および肉類のボツリヌス菌の選択的増殖の問題は多くの総説 (文献一覧 A の項参照) に解説されている。また、オリジナルデータを含む一次文献は文献一覧 B にまとめた。

微生物の毒素産生能の変化 ③

照射がマイコトキシン (カビ毒) の産生能を増強させるか否かについて、多くのモデル系における接種実験がなされている。実験結果はまちまちで、マイコトキシンの産生に変化がないもの、増加するもの、減少するものそれぞれの報告が存在する。これらに違いについては、カビ (アスペルギルス属) の遺伝的多様性によるという説明や、用いられた実験系で、摂取されたカビの孢子数が考慮されず、照射が単純な希釈効果をもたらすことに起因していると説明するものもある (Diehl 1995)。しかしながら、マイコトキシン産生菌に自然汚染された小麦を使った実際条件の下では、照射の後の毒素産生の増加は観察されないという報告もある (Behere 1978)。

カビ毒（マイコトキシン）以外の細菌毒素、腸管出血性大腸菌0157:H7のベロ毒素産生、ボツリヌス毒素の産生に対する照射の影響についても研究がなされている。これらについては文献一覧 Bにまとめた。

いったん生成した微生物毒素に対する照射の影響は、アフラトキシンなどのマイコトキシンに対しては小さい。この項の文献整理では、毒素分解に対する照射の影響もまとめた。

放射線抵抗性の変化 ④、病原性等の変化 ⑤

加熱や薬剤などの他の殺菌手段と同様、放射線照射の繰り返しによって放射線抵抗性が増大するかどうかについても研究例がある。照射の繰り返しによって放射線抵抗性の強い細胞集団が得られたという報告がある。しかし、実際の食品照射の条件での抵抗性の増強について明確な証拠を示した文献は見あたらなかった。

照射後の微生物の性質変化について検討した文献も存在するが、微生物学的な観点において照射が危険性を増す様な変化を起こすことを示す文献は見あたらなかった。

＜収集文献一覧＞

A. 総説、単行本

A-1. 微生物学的安全性全般

- 1) Diehl J.F. (1995) Microbiological safety of irradiated food In "*Safety of irradiated foods*", (2. ed.), Marcel Dekker, New York, p225-239.
- 2) Ingram M. et al (1977) Microbiology of foods pasteurised by ionising radiation *Acta Alimentaria* **6(2)**, 123-185.
- 3) Idziak E.S. (1973) Effect of radiation on micro organisms, *Int. J. Radiat sterilize*, **1**, 45-59.
- 4) Murray D.R. (1990) Biology of food irradiation. New York, John Wiley.

A-2. 照射食品中のボツリヌス菌の増殖に関連する総説

- 5) Shewan, J.M. et al. (1970) The Botulism Hazard in the Proposed Use of Irradiation of Fishery Products in the United Kingdom, in "Preservation of Fish, by Irradiation", FAO/IAEA Vienna.
- 6) ICGFI/IAEA (1991) "Code of Good Irradiation Practice for the Control of Microflora in Fish, Frog Leg, and Shrimps", ICGFI Document 10.
- 7) Maxcy R.G. (1983) Significance of residual organisms in foods after substerilizing doses of gamma radiation: a review. *Journal of Food Safety* **5**, 203-211.
- 8) Quinn D.J. et al. (1967) The inactivation of infection and intoxication microorganisms by irradiation in seafood. In Microbiological problems in food preservation by irradiation. (Vienna, International Atomic Energy Agency, Panel Proceedings Series)
- 9) Eklund M. W. (1982) Significance of *Clostridium botulinum* in fishery products preserved short of sterilization, *Food Technology*, **36 (12)**, 107-112, 115.
- 10) Hobbs G. (1976) *Clostridium botulinum* and its importance in fishery products, *Advance in Food Res.*, **22**, 135-185.
- 11) Radomyski T. et al. (1994) Elimination of pathogens of significance in food by low-dose irradiation: A review, *Journal of Food Protection*, **57 (1)**, 73-86.
- 12) 宮原誠 (2004) 照射食品安全性検証の歴史 (2) (総説) 照射魚介類中のボツリヌス菌について - アメリカ合衆国原子力委員会の報告書より, 食品照射, **39**, 28-49.
- 13) WHO (1977) Wholesomeness of irradiated food. (照射食品の健全性) Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. Geneva, World Health Organization (WHO Technical Report Series, No. 604)

A-3. 毒素産生能の変化

- 14) Mitchell G. E. (1988) Influence of irradiation of food on aflatoxin production, *Food Technology in Australia*, **140 (8)**, 324-326.
- 15) Fenell A.J. (1966) Aflatoxin in groundnuts. IX. Problems of detoxification of the aflatoxins.

Tropical science, **8**, 61-70.

A-4. 放射線抵抗性の変化

- 16) Moseley B. (1992) Radiation, microorganisms and radiation resistance. in: Johnston D.E. et al. eds. Food irradiation and the chemist. Cambridge, Royal Society of Chemistry (Publication No.86), 97-108.
- 17) Grecz N. et al. (1978) Bacterial spores: biophysical aspects of recovery from radiation injury., *Journal of Food Processing and Preservation*, **2**, 315-337.

B. 微生物学的安全性に関するオリジナルデータ

表2-4-1 微生物の選択的増殖 ①

線源	照射条件	食品(実験系)	対象微生物	結果コメント	文献
セシウム137	1.5, 3 kGy 114 Gy/min, 5℃で照射	骨抜き鶏肉	<i>Salmonella enteritidis</i> <i>Clostridium botulinum</i>	菌を接種後、窒素充填缶詰にして照射。 5℃で2-4週間保存後も毒素産生なし。	Thayer (1995)
	0.5, 1 kGy	共存酸素濃度を変えて(0%, 10%, 20%) パックした豚肉	<i>Clostridium botulinum</i>	照射後 5℃,15℃,25℃で保存しアフラトキシンが検出されるまでの日数を比較。 15℃では、酸素濃度0%よりも10, 20%の方が早くトキシンを産生、CO ₂ 濃度上昇のためか。	LAMBERT (1990)
コバルト60	10 kGy 8kGy/min, -30℃	冷凍ポーク、冷凍チキンを照射後、生 残菌を分離	<i>A. Clostridium botulinum</i> (放射線 抵抗性の比較対照)	照射肉から <i>C. botulinum</i> 孢子よりも放射線抵抗性の孢子が分離されたが、加熱処理と組み合わせれば問題とはならない。	Maxcy (1978)
コバルト60	0, 0.5, 1 kGy 10.86 kGy/h	新鮮な豚肉に孢子を添加し、酸素濃度 0,10,20%で密封、照射後 5,15,25℃で最 大 44 日間保存、マウスで毒性をアッセイ	<i>Clostridium botulinum</i>	5℃では全区で 44 日後まで毒性なし。25℃では全区で 2 日後に毒素検出。 15℃、酸素濃度 10,20%では照射の有無によらず 14 日後に、無酸素では非照射で 21 日後、1kGy 照射区で 43 日後に毒素検出。	Lambert (1991a)
コバルト60	0, 0.5, 1 kGy 10.86 kGy/h	新鮮な豚肉に孢子を添加し、CO ₂ 濃度 を変えて(15-75%)密封、照射後 15℃で最 大 42 日間保存、マウスで毒性をアッセイ	<i>Clostridium botulinum</i>	どの二酸化炭素濃度でも、照射によって毒素産生が遅延した。	Lambert (1991b)
コバルト60	45 kGy 3 kGy/h; -25℃, 0℃, 25℃	牛挽肉	<i>Clostridium botulinum</i> strain 33A	肉に孢子を加えて缶詰にして照射。30℃で10ヶ月保存した後、生きた孢子は検出されず。 しかし毒素の活性(マウスに注射してアッセイ)は残存。	Fernandez (1969)
コバルト60	1, 2 kGy	タラ、カレイ、ヒラメ	<i>Clostridium botulinum</i> types B, E, F	新鮮な切り身を酸素透過性あるいは非透過性のフィルムでパック、毒素産生菌の孢子を接種、温度条件を変えて保存性をテスト。	Ekland (1970)
コバルト60	1, 3 kGy	新鮮な魚肉(カレイ、ハタハタ、スケトウ ダラ、ニシン)に孢子を加え、照射後 10℃で2週間または20℃で3日間保存	<i>Clostridium botulinum</i> type E	マウス腹腔内注射で毒素を検出。 非照射および1kGy 照射区では試料の2-8%で毒素が検出された。 3kGy 照射区では毒素は検出されなかった。	安藤 (1969)
10 MeV EB	1, 2 kGy	新鮮な虹鱒の切り身に孢子を植え、ポ リエチレンフィルムで真空パック、EB 照 射して0℃、5℃、10℃で保存可能期間 を比較	<i>Clostridium botulinum</i> type E	10℃の貯蔵では、異臭の発生より毒素産生が早く始まった。	Hussain (1977)

毒素産生能の変化③

線源	照射条件	食品(実験系)	対象微生物	結果コメント	文献
コバルト 60	0.5, - 2.5 kGy 43.2 Gy/h	ごま種子	<i>A. flavus</i>	接種後、照射、30℃で 15 日間培養、アフラトキシンB1を分析。 2.5kGy 照射試料では毒素が産生されなかった。	Shahin (1998)
不明	3kGy	タラ切り身	<i>Clostridium botulinum</i> type E	芽胞を接種して照射、5℃または 10℃で保存、毒素産生を調べた。	安藤 (1973)
コバルト 60	1 - 10 kGy 1 kGy/h	トウモロコシ	<i>Penicillium purpurogenum</i> (rubratoxin-B 産生菌)	胞子接種後、照射、10 日または 40 日間 28℃で培養。 線量によっては非照射区よりも毒素産生量が増加、競合するフローラの影響と思われる。	Abd-El-Aal (1996)
コバルト 60	0.5 - 3 kGy 200 Gy/min	トウモロコシ	<i>Aspergillus flavus</i>	胞子接種後に照射、30℃で 15-45 日間培養。 1-1.5kGy 照射区でアフラトキシンB1産生が増加。	Aziz (2002b)
コバルト 60	1, 3 kGy 16.9kGy/h (殺菌), 1.11kGy/h (胞子接種後)	トウモロコシ(非殺菌・オートクレーブ殺菌・12kGy ガンマ線殺菌)に胞子接種、さらに照射(0, 1, 3 kGy)して 14-77 日後に3種類の毒素を定量	<i>Fusarium culmorum</i> IMI 309344: deoxynivalenol(DON), acetyl deoxynivalenol(A DON), zearalenone 産生菌	熱・ガンマ線殺菌試料に胞子を接種した場合、接種後の照射線量による毒素量の違いなし。 非殺菌試料に接種した場合、DONとA DONは0kGy 試料では検出されなかったのに、1,3kGy 照射試料で検出された。	O'Neill (1996)
コバルト 60	0.5, 1, 2 kGy 86 Gy/min	トウモロコシ粉	<i>Aspergillus flavus</i> (アフラトキシンB1産生菌)	オートクレーブ後、胞子を接種してから照射、28℃、14/28 日培養後にアフラトキシンB1を定量。 Zn,Cu, Fe を 100ppm 添加すると照射後培養中の毒素産生量が増加した。	Aziz (2000)
コバルト 60	0 - 5 kGy	ハーブ4種(キヤラウエイ、ケーラ、カモミールなど)	<i>Aspergillus</i> 属の毒素産生菌を分離	照射ハーブ、2年間5℃で保存したハーブからアフラトキシン産生菌を分離。	El-Bazza (1996)
コバルト 60	1, 3, 5 kGy 64 Gy/min	バステルマ(エジプトの生ハム)、スパイス	非照射試料で検出されたカビと毒素: <i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Mucor</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Cladosporium</i> ; Aflatoxin B1m B2, G1, G2	照射後 25℃で 2 週間保存した試料に存在するカビと毒素を分析。 3kGy 照射ではカビもアフラトキシンB1も検出されず。	Refai Mohamed (2003)
コバルト 60	2 kGy 1.8 kGy, 8℃	ローストビーフおよび肉汁	<i>Staphylococcus aureus</i> <i>Bacillus cereus</i>	低線量の照射は、初期菌数を減らすことにより、食中毒の予防に有効に働く。	Grant (1993)
コバルト 60	1.5, 3.5, 5.0 kGy 1.8 kGy/h	果物(イチゴ、アブリコット、プラム、桃、ぶどう、リンゴ、洋ナシなど)	市中で購入した果物から、 <i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Botrytis</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Alternaria</i> 属のカビ検出	市中で購入した果物 100 試料中 60 試料で何らかのマイコトキシンを検出。5 kGy 照射で、28 日保存後に毒素検出されず。	Aziz (2002a)

コバルト 60	1, 3, 5 kGy 200 Gy/min	小麦、大豆、ハト豆 (fababean) に孢子を加え、照射後、25℃で 30 日間保存、生菌数測定、TLC でアフラトキシン B1 産生量を測定	<i>Aspergillus flavus</i>	5 kGy 照射でカビの生育と毒素産生が阻害された。	Aziz (2004)
ガンマ線	12 kGy	照射 (12kGy) 殺菌したトウモロコシ上で、各種の分離菌を単独あるいは混合培養	<i>Fusarium moniliforme</i> , <i>F. proliferatum</i> , <i>F. graminearum</i>	<i>Fusarium</i> 属の複数の毒素産生菌を混合培養した場合の相互作用による毒素産生への影響を解析。	Velluti (2000)
コバルト 60	0.5 – 2.5 kGy	照射小麦に菌を植え、28℃で 7 日間培養	<i>Aspergillus parasiticus</i>	接種に先立つ小麦への照射線量の増加に伴って、遊離脂肪酸含量とアフラトキシン B1 産生量が増加した。	Priyadarshini (1979)
コバルト 60	0.1 – 6 kGy	培地、あるいは小麦	A: <i>Aspergillus ochraceus</i> NRRL 3174 B: 102 Gy/min	照射した孢子を培養、オクラトキシン A 産生量を分析。 0.1–0.5kGy 照射区で 7–11 日後に毒素産生量が非照射区より大に。 4,6kGy 照射区では孢子発芽せず毒素産生もなし。	Applegate (1976)
コバルト 60	3kGy	培養系	<i>Clostridium botulinum</i> type E 0℃、蒸留水浮遊芽胞を照射	致死線量以下のガンマ線を照射した芽胞を 30℃で培養すると、照射によって発育と毒素産生が促進され、10℃で培養すると遅滞した。	安藤 (1972)
コバルト 60	0.5, 1, 1.5, 2, 3kGy	培養系。菌糸を合成培地上で照射、14 日後まで培養	A: <i>Aspergillus ochraceus</i> B: 室温照射	1kGy 照射でカビ毒 ochratoxin の産生量増大、2kGy では非照射と同じ (菌体乾燥重量は線量によって変わらず)。 生育 (コロニー径) は、1Gy まで非照射と同じ、1.5Gy、2Gy で若干の生育遅延、3kGy で生育阻害。	Paster (1985)
コバルト 60	0.05 – 2 kGy	白米、黒胡椒、白胡椒、赤唐辛子	<i>Aspergillus parasiticus</i> <i>Aspergillus flavus</i>	低線量 (0.05kGy) 照射によりアフラトキシン産生量の増大が認められたが、分生子を植え継いだ 2 代目では照射の影響は消失していた。	伊藤 (1992)
コバルト 60	0.16 – 4.75 Gy	米	<i>Aspergillus flavus</i> <i>Aspergillus parasiticus</i>	孢子懸濁液を照射したのち、コメに接種、7 日間培養後、アフラトキシン B1, G1 を TLC で分析。 照射区では、非照射孢子に比べ、最高で 50 倍も毒素産生量が増加。	Schindler (1980)
コバルト 60	0, 1, 2 kGy	孢子または菌糸を照射後、酵母エキスを 7 日間培養、アフラトキシン B1, G1 の産生量を TLC で測定	<i>Aspergillus parasiticus</i> NRRL 2999, NRRL 3000	照射による毒素産生量の増加は認められなかった。	Bullerman (1974)
コバルト 60	0.5, 1, 2, 3, 4 kGy 198 Gy/min	トウモロコシ	<i>A. flavus</i> EA-81 (aflatoxin B1 産生菌)	孢子接種後に照射するとカビの生育・毒素産生は抑制、照射後に孢子接種すると、非照射の場合よりも生育・毒素産生が亢進。	Hassan (1998)
コバルト 60	1, 3, 9 kGy	トウモロコシ、米	<i>Fusarium graminearum</i> (F-2 toxin 産生菌) <i>Fusarium tricinctum</i> (T-2 toxin 産生菌)	菌を接種してから照射、14 日後まで培養。 1, 3kGy 照射では、生育は遅れたが毒素産生量は増加。9kGy では、生育せず、毒素も検出されず。	Halasz (1989)
コバルト 60	0.6, 1.25, 2.5, 5 kGy	ナイジェリア産の大豆、落花生、椰子果汁、パパイヤ	<i>Aspergillus flavus</i> 孢子・室温で照射	すりつぶしてオートクレーブ滅菌した食材に孢子を植えて照射、8 日間培養後、アフラトキシン B1 産生量を TLC 分析。 線量を増すと毒素は減少。	Ogbadu (1980)

コバルト 60	1, 3 kGy 4-10°C	ニシン(肉質部のホモジェネート)	<i>Clostridium botulinum</i> type E	芽胞を接種して照射、10°Cまたは20°Cで保存。 ボツリヌス毒素産生をマウス腹腔内注射でアッセイ。 照射試料で非照射試料より毒素産生が増加。	安藤 (1969)
コバルト 60	2.5, 5, 7.5, 10, 15 kGy	ピーナツ	<i>Aspergillus parasiticus</i>	カビを植えてから照射、4週間30°Cで培養後、アフラトキシンB1, B2, G1, G2をTLCで定量。 線量に応じて毒素産生量は減少。	Chiou (1990)
コバルト 60	1-10 kGy 0.5 kGy/h	家禽飼料	<i>Aspergillus flavus</i> NRRL 5520	オートクレーブ滅菌した飼料に <i>A.flavus</i> の菌糸と胞子を加え、ポリエチレンでパック、照射後27°Cで10日間培養。 6 kGy 以上ではカビもアフラトキシンB1も検出されず。	El-Far (1992)
コバルト 60	20kGy	乾燥食品中の汚染微生物の探索と照射による毒素分解の検討 ピーナツ、米、小麦、大豆、綿実、ヒマワリ、ソルガム	<i>A.Flavus</i> <i>A.ochrus</i> <i>Fusulium Oxysporum</i>	20kGy 照射による毒素低減率 アフラトキシン B1(100%)、オクラトキシン A (72-76%) ゼラレノン(100%)	Aziz (2002c)
10 MeV EB	1.6-2.4 kGy	寒天培地上で培養	A: <i>Aspergillus flavus</i> /Aflatoxin B1, G1 産生株 x3 株、非産生株 x3 株 B: 寒天平板培地上で室温で照射、6ヶ月間にのべ16回繰り返し照射。生残コロニーを植え継ぎ、3年後まで冷蔵と培養を半年ずつ繰り返し	生残コロニーにおけるアフラトキシン産生能には特に増加も減少もなく、照射の影響は認められない。	Frank (1971)
コバルト 60	10 kGy	黒胡椒、白胡椒、唐辛子、米	<i>Aspergillus flavus</i>	香辛料および香辛料抽出液が示すアフラトキシン産生抑制効果は、10 kGy のガンマ線照射で影響されない。	伊藤 (1994)
コバルト 60	75 Gy or 100 Gy	小麦、トウモロコシ、モロコシ (sorghum)、トウジンビエ、パレイシヨ、タマネギを照射後、オートクレーブ滅菌して胞子を添加、27°Cで7日間保存、抽出、TLCでアフラトキシンB1を定量	<i>Aspergillus parasiticus</i> NRRL 2999	照射試料でのアフラトキシンB1産生量は、非照射の場合の1.3倍から1.8倍に増加した。	Priyadarshini (1976)
コバルト 60	0.5-4 kGy 198 Gy/min	大麦	<i>Aspergillus alutaceus</i>	照射大麦に胞子を接種し培養すると、非照射の場合より <i>Ochratoxin-A</i> の産生量が増加(競合菌フローラの減少による)	SzeA kely (1991)
コバルト 60, 10MeV EB	0-4 kGy 200Gy/min(Co), 4.5 kGy/s(EB)	大麦: 照射あるいは非照射大麦に胞子を植え、28°Cで最長113日間培養	<i>Aspergillus alutaceus</i>	照射大麦では、非照射大麦より菌数(cfu)あたりの <i>Ochratoxin</i> 産生量が増加。競合菌が照射によって減少したことが原因と考えられる。	Chelack (1991a)
コバルト 60	0.5, 1, 2, 4 kGy	大麦に胞子を接種、3、10日後に照射、さらに最長60日間培養、アフラトキシンB1, B2, G1, G2産生量をTLCで分析	<i>A.parasiticus</i> NRRL 2999	ひとつの例外を除き、照射線量が高いほど毒素産生量は減少した。	Chang (1982)

不明 (ガンマ線)	0-1.5 kGy 36 Gy/min	培地	<i>Aspergillus parasiticus</i> 孢子	孢子的接種量を減らすと、25℃で 14 日間培養後のアフラトキシン産生量が増える(28 日後には元に戻る)。 孢子液への照射は、孢子液の希釈と同様の効果をもたらす。	Sharma (1980)
コバルト 60	0-12 kGy 0℃、7.2 kGy/h	培養系	<i>Clostridium botulinum</i> type E	芽胞は加熱ショックによって発芽が活性化されるが、ガンマ線照射によっては活性化されない。 (照射による毒素産生の増加は発芽の活性化では説明できない)	安藤 (1971)
コバルト 60	3.5 kGy, 4 kGy 60 Gy/min	培養系	<i>Aspergillus flavus</i>	孢子的接種量を減らすと、28℃4 日間培養後のアフラトキシン産生量が増える。 孢子液への照射は、孢子液の希釈と同様の効果をもたらす。	Odamtten (1987)
不明 (ガンマ線)	0.2-1.6 kGy 20 Gy/min、	培養系	<i>Aspergillus parasiticus</i> 孢子懸濁液を照射	照射孢子を培養しても非照射対照よりアフラトキシン産生量が増えることはない。	Sharma (1990)
コバルト 60	0.4 - 5 kGy	白米、黒胡椒、白胡椒、赤唐辛子	香辛料等から分離した <i>Aspergillus flavus</i> var.	0.8kGy 照射で生存したコロニーから得た分生子を6回まで再照射。 D ¹⁰ もアフラトキシン産生量も特に変わらず。	伊藤 (1991)
コバルト 60	0.1-5 kGy 0.7 kGy/h		<i>Aspergillus flavus</i>	1-1.5kGy照射した孢子接種によりアフラトキシン生成が増加。	Jemmali (1969)
ガンマ線	20 kGy	えんどう豆、黒豆、緑豆、小豆、大豆	<i>Staphylococcus aureus</i>	オートクレーブまたは照射(20kGy)した豆から作った培地に菌を接種し、enterotoxin A の産生を調査。	Neumayr (1990)
コバルト 60	250 Gy-6 kGy 平均 100 Gy/min	照射した孢子を小麦あるいは合成培地で 10 日間培養、生成アフラトキシン B1 を TLC で分離、比色法(358nm)で定量	<i>Aspergillus flavus</i> の毒素産生株 (NRRL-3145)および非産生株 (NRRL-A-12268)	毒素産生株では、1.5-2 kGy 照射孢子で照射後培養中のアフラトキシン B1 産生量が非照射対照よりも増加した。 非産生株では照射の影響なし。	Kenneth (1973)
なし	なし	孢子を蒸し米に濃度を変えて接種、1-10 日後までのアフラトキシンB1産生量をTLCで分析	<i>Aspergillus flavus</i> subsp. <i>parasiticus</i> NRRL 2999 (旧名:A. <i>parasiticus</i> NRRL 2999)	孢子的初期濃度が低いほど、毒素産生量が増加する傾向。	Karunaratne (1990)
コバルト 60	0 - 2.0 kGy 1.2 kGy/h	培養系	<i>E. coli</i> O157:H7	D10=0.05 - 0.1 kGy であり、比較的低線量のガンマ線で殺菌が可能。照射によるベロ毒素産生量の変化はみられなかった。	菊池 (2001)
不明	2 kGy	大麦	<i>Aspergillus alutaceus</i> (ochratoxin A 産生菌)	照射処理後あるいは燻蒸処理後に菌を接種すると、どちらも同様に非処理区よりも毒素産生量が増えた。 照射によるこの効果は、薬剤燻蒸と同等。	Borsa (1992)
コバルト 60	1-1.5 kGy 200 Gy/min	牛挽肉	A: <i>Aspergillus flavus</i>	10kGy 照射後に孢子を加え、各線量を照射、5℃で 15 日間保存後、アフラトキシン B1 産生量を逆層カラムクロマトで分析。 1.5 kGy 照射区では生菌数ゼロ、毒素も検出されず。	Youssef (1999)
コバルト 60	1 kGy 198 Gy/min	大麦	<i>Aspergillus alutaceus</i> (ochratoxin A 産生菌)	孢子接種後照射、28℃で 10 日間培養、コロニー分離。毒素産生量が 9 倍に増した変種が分離された。	Chelack (1991b)

コバルト 60	2, 4, 6, 8 kGy	小麦、小麦粉、パン	Fusarium (DON, ZEN, T-2 産生菌)	小麦、小麦粉から Fusarium 属のカビとカビ毒が検出された。4kGy 以上の照射によって(照射直後の)カビ生菌数は大きく減り、毒素量も減少した。	Aziz (1997)
不明 (ガンマ線)	200Gy	小麦(自然汚染)	Aspergillus flavus ATCC 15517	アフラトキシン生産菌で自然汚染した小麦を照射し、貯蔵中のアフラトキシン量を非照射試料と比較すると、照射試料のアフラトキシン産生のほうが少なかった。	Behere (1978)

微生物毒素の分解③

線源	照射条件	食品(実験系)	対象微生物	結果コメント	文献
コバルト 60	0.35-2.45 kGy 0.2 Gy/sec	リンゴジュース		リンゴ果汁中の毒素パツリン含量は、照射によって線量依存的に減少。D50=0.35 kGy。照射直後も、4℃で8週間保存後も、パツリン濃度は変わらず。	Zegota (1988a)
コバルト 60	1 - 10 kGy 0.2 Gy/sec	リンゴジュース		パツリンを 2 mg/kg 添加したリンゴジュースを照射、線量に比例してパツリン含量(HPLC で分析)が減少、2.5 kGy で消失。	Zegota (1988b)
コバルト 60	5, 10, 20 kGy	トウモロコシ、ピーナッツをオートクレーブ滅菌後に胞子を添加して培養	<i>Aspergillus flavus</i>	20 kGy 照射してもアフラトキシンは残る。	Farag (1995)
コバルト 60	50 kGy まで 12.2 kGy/h	ゼラチン・リン酸緩衝液と、オートクレーブした牛挽肉試料で比較	<i>Clostridium botulinum</i> neurotoxin type A (BNTA), <i>Staphylococcus aureus</i> enterotoxin A (SEA)	リン酸緩衝液では8kGy で分解、しかし挽肉では 23.7 kGy でも BTNA の 45%、SEA の 27%が残留。	Rose (1988)
コバルト 60	2-24 kGy 9.4 or 12.2 kGy/h	ゼラチン・リン酸緩衝液と、オートクレーブした牛挽肉試料で比較	staphylococcal enterotoxin A (SEA)	照射後の SEA 量を ELISA で検出。リン酸緩衝液中では 8kGy で完全に分解されたが、挽肉中では 27-37%、23.7 kGy 照射後でも 16-26%が検出された。	Modi (1990)
コバルト 60	1,- 50 kGy 26.43kGy/h (1kGy 照射区のみ 1.97kGy/h)	トウモロコシ	deoxynivalenol (DON) 3-acetyl deoxynivalenol (3-A DON)	DON,3-A DON を水溶液中で照射すると 50kGy で完全に分解した。しかし、トウモロコシに塗布して照射すると、50kGy でも 80-90%が残留した。	O'Neill (1993)

コバルト 60	70, 150, 300 kGy		<i>Aspergillus flavus</i> ATCC 15517, アフラトキシン溶液をガラス容器内、室温で照射	TLC、UV吸収スペクトル、蛍光スペクトルなどで照射後のアフラトキシンを測定、極めて安定で、300 kGy 照射でも大きな変化は無かった。	Miyaki (1967)
不明	2.5, 5, 10, 20 kGy 0.8 kGy/h		Aflatoxin B1 を水溶液で照射	アフラトキシンの分解をエームス試験とTLCで評価。2.5 kGy で分解が見られるが、10 kGy でも 10%が残留、完全分解には 20 kGy が必要。	van Dyck (1982)
コバルト 60	0.3 – 1.8kGy 0.2 Gy/sec		カビ毒素パツリンの毒性バイオアッセイに、 <i>Bacillus subtilis</i> , <i>B.megaterium</i> を使用	パツリン水溶液に対し 1.8 kGy 照射で毒性消失。	ZEGOTA (1989)
コバルト 60	5, 7.5, 10, 20 kGy 1.86 Gy/min	トウモロコシ、小麦、大豆。表面を殺菌して毒素を添加し、照射、凍結保存ののち抽出液中の毒素量を ELISA で定量		アフラトキシン B1 の量には照射の影響なし。T-2 トキシンと DON(deoxynivalenol)は、10kGy 以上の照射で、元の 60-80%程度に減少した。	Hooshmand (1995)
コバルト 60	5.4 kGy	硬質小麦粉	<i>Aspergillus flavus</i> , aflatoxin	TLC スポットでは、5.4 kGy の照射はアフラトキシンの影響なし。	Killebrew (1968)
コバルト 60	200 kGy まで	毒素試料を熟成チーズの表面に塗布して照射	<i>Clostridium toxin type A</i>	200kGy 照射しても毒素量(MLD)は千分の一にしか減らない。	Wagenaar (1960)
2 MeV EB	10-140 kGy		<i>Clostridium type E Toxin</i>	毒素 Toxin の放射線耐性(D値:20-40 kGy)は毒素試料の調整方法によって大きく変動する。	Skulberg (1965)
コバルト 60	1, 10, 50, 100 kGy 32 Gy/min		Aflatoxin B1 水溶液を peanut meal と混ぜて室温で照射	<i>Salmonella typhimurium strain TM 667</i> に対する毒性と変異原性を評価。毒性は 10 kGy 照射で消失。変異原性は 50 kGy 以上で消失。	Temcharoen (1982)
コバルト 60	2-10 kGy 66 Gy/min, 28°C		Aflatoxin B1 を DMSO に溶解後、0-5%の過酸化水素の存在下で照射し、HPLC、TLC、エームス試験で分解を評価	5%過酸化水素存在下で照射するとアフラトキシンの分解が促進された。	Patel (1989)
コバルト 60	3, 15 kGy 2.1 kGy/h	トウモロコシ(カビ毒 fumonisin B1/B2 で汚染されたもの)		毒素産生菌が死滅する線量:15kGy 照射後も 80%の fumonisin が汚染トウモロコシに残留していた。	Visconti (1996)
コバルト 60	0.2 – 2.5 kGy	香辛料から分離したカビを精白米上で培養	<i>A. flavus</i> 菌群の分離菌	香辛料から分離した糸状菌群の放射線感受性と aflatoxin B1, B2, G1, G2 産生能を調査。リン酸緩衝液中での aflatoxin B1 の放射線分解を測定、D37 = 2.7kGy。	久米 (1987)

放射線抵抗性の変化④

線源	照射条件	食品(実験系)	対象微生物	結果コメント	文献
コバルト 60	7-20 kGy	土壌、干草、糞	<i>Deinococcus (Micrococcus) radiodurans</i>	照射挽肉から分離された放射線抵抗性細菌の生育環境の考察、土壌、干草、糞からの再分離の試み。 照射食品とは直接関係ない。	Krabbenhoft (1965)
コバルト 60	0.3-1.1 kGy(繰返し照射) 54 Gy/min		<i>Salmonella typhimurium</i> など	サルモネラ菌類への繰返し照射(20 回)により放射線抵抗性(D ¹⁰ 値が3 倍など)の細胞集団が得られた。	Licciardello (1969)
コバルト 60	1-15 kGy 15 kGy/h		<i>Bacillus pumilus</i> E601 ATCC 27142 <i>E.coli</i> B ATCC 23226 <i>E.coli</i> B/r ATCC 23227	<i>B. pumilus</i> に垂致死線量の照射を最大23 回繰返すとD ¹⁰ 値が数倍に増加するなど抵抗性が増したが、胞子ほど抵抗性にはならなかった。	Parisi (1982)
コバルト 60, UV			<i>Salmonella typhimurium</i> LT12	放射線抵抗性、DNA 修復に関連する遺伝子の解析で、食品照射とは特に関係はない。	Ibe (1982)

微生物の性質変化⑤

線源	照射条件	食品(実験系)	対象微生物	結果コメント	文献
コバルト 60	2.5 kGy または 10 kGy	鶏肉、エビ、パレイシヨ、レンズマメ、にんにく、タマネギ、トマト、マッシュルーム、小麦粉、米、マヨナラ、タイム、カルダモン	<i>E.coli</i> HB101 (検出対象の指標菌に用いられた)	照射食品でも、DNAハイブリによる汚染菌検出法は有効(照射の影響はない)。	Rowe (1994)
Cs-137 103 Gy/min	0.2 - 1.25 kGy	豚挽肉、培地	<i>Yersinia enterocolitica</i>	低線量照射で、プラスミドに担われる <i>crystal violet</i> 結合能(および毒性)を失ったクローンが線量に依存して増加。	Sommers (2001)

表2-4-1 微生物学的安全性に関するオリジナルデータの文献リスト

著者	掲載年	表題	雑誌名	巻(号)	頁	文献ID
Abd-El-Aal S. S. et al.	1996	Influence of competitive microbial flora and inoculum size of <i>Penicillium purpurogenum</i> on the production of rubratoxin-B in corn medium before and after exposure to gamma radiation.	Food Research International	28 (6)	521-524	FI0271
Ando y. et al.	1969	Studies on microbiological safety of irradiated foods 1 on the natural level of contamination of irradiated and non-irradiated fish flesh with <i>clostridium-bptulinum</i> type E	Report of the Hokkaido Institute of Public Health	19	248-252	FI0214
Applegate K. L. et al.	1976	Production of ochratoxin A by <i>Aspergillus ochraceus</i> NRRL-3174 before and after exposures to cobalt-60 irradiation	Applied and Environmental Microbiology	31	349-353	FI0246
Aziz N. H. et al.	2002b	Influence of gamma-irradiation and maize lipids on the production of aflatoxin B1 by <i>Aspergillus flavus</i> .	Nahrung	46 (5)	327-331	FI0257
Aziz N. H. et al.	2002c	Inactivation of naturally occurring mycotoxins in some Egyptian foods and agricultural commodities by gamma-irradiation	Egyptian Journal of Food Science	30 (1)	167-177	FI0258
Aziz N. H. et al.	2000	Correlation of growth and aflatoxin production by <i>Aspergillus flavus</i> with some essential metals in gamma irradiated crushed corn	Nahrung	44 (5)	354-359	FI0262
Aziz N. H. et al.	2002a	Influence of gamma-radiation on mycotoxin producing moulds and mycotoxins in fruits	Food Control	13	281-288	FI0378
Aziz N. H. et al.	1997	Effect of gamma-irradiation on the natural occurrence of <i>Fusarium</i> mycotoxins in wheat, flour and bread.	Nahrung	41 (1)	34-37	FI0269
Aziz N. H. et al.	2004	Effect of gamma-irradiation on aflatoxin B1 production by <i>Aspergillus flavus</i> and chemical composition of three crop seeds	Nahrung	48 (3)	234-238	FI0229
Behere AG et al.	1978	Production of aflatoxins during storage of gamma-irradiated wheat. (ガンマ線照射した小麦の貯蔵中のアフラトキシンの生成)	Journal of food science(Diehl 1995 6-29)	43	1102-1103	94M 007)
Borsa J. et al.	1992	Comparison of irradiation and chemical fumigation used in grain disinfestation on production of ochratoxin A by <i>Aspergillus alutaceus</i> in treated barley	Journal of Food Protection	55 (12)	990-994	FI0276
Bullerman L. B. et al.	1974	Effect of low dose gamma irradiation on growth and aflatoxin production of <i>Aspergillus parasiticus</i>	J. Milk Food Technol.	37(8)	430-434	Diehl 17)
Chang H. P.et al.	1982	Effect of gamma irradiation on aflatoxin production in barley	Journal of the Science of Food and Agriculture	33	559-564	Diehl 25)
Chelack W. S. et al.	1991a	Variants of <i>Aspergillus alutaceus</i> var. <i>alutaceus</i> (formerly <i>Aspergillus ochraceus</i>) with altered ochratoxin A production	Applied and Environmental Microbiology	57 (9)	2487-2491	FI0333
Chelack W.S. et al.	1991b	Role of the competitive microbial flora in the radiation induced enhancement of ochratoxin production by <i>Aspergillus alutaceus</i> var. <i>alutaceus</i> NRRL 3174	Applied and environmental microbiology	57	2492-2496	99-220

Chiou R. Y. Y. et al.	1990	Property characterization of peanut kernels subjected to gamma irradiation and its effect on the outgrowth and aflatoxin production by <i>Aspergillus parasiticus</i>	Journal of Food Science	55 (1)	210-213, 217	FI0286
Dyck P.J.V. et al.	1982	Sensitivity of aflatoxin B1 to ionizing radiation	Applied environmental microbiology	43	1317-1319	99-293
Ekland,M.W. et al.	1970	The Significance of non- proteolytic <i>Clostridium botulinum</i> type B. E and F in the development of radiation pasteurized fishers products	Panel Proceedings series International Atomic Energy Agency, Viena		125-148	Diehl 05)
El-Bazza Z. E. et al.	1996	Fungal growth and mycotoxigenic production in certain medicinal herbs subjected to prolonged cold storage and possible control by gamma irradiation	Egyptian Journal of Pharmaceutical Sciences	37 (1-6)	85-95	FI0293
El-Far F. et al.	1992	Inhibition by gamma-irradiation and antimicrobial food additives of aflatoxin B1 production by <i>Aspergillus flavus</i> in poultry diet	Nahrung	36 (2)	143-149	FI0110
Farag R. S. et al.	1995	Effect of gamma radiation on the infected yellow corn and peanuts by <i>Aspergillus flavus</i>	Chemie Mikrobiologie Technologie der Lebensmittel	17 (3-4)	93-98	FI0240
Fernandez E. et al.	1969	Toxicity of spores of <i>Clostridium botulinum</i> strain 33A in irradiated ground beef	Journal of General Microbiology	56	15-21	FI0115
Frank H. K. et al.	1971	Response of toxigenic and non-toxigenic strains of <i>Aspergillus flavus</i> to irradiation	Sabouraudia	9	21-26	94M 015)
Grant I. R. et al.	1993	Effect of low-dose irradiation on growth of and toxin production by <i>Staphylococcus aureus</i> and <i>Bacillus cereus</i> in roast beef and gravy	International journal of food microbiology	18	25-36	FI0308
Halász A. et al.	1989	Effect of gamma-irradiation on F-2 and T-2 toxin production in corn and rice	Folia Microbiologica	34	228-232	FI0243
Hassan A. A. et al.	1998	Influence of moisture content and storage temperature on the production of aflatoxin by <i>Aspergillus flavus</i> EA-81 in maize after exposure to gamma radiation.	Journal of Food Safety	18	159-171	FI0266
Hussain AM et al.	1977	Comparison of toxin production by <i>Clostridium botulinum</i> type E in irradiated and unirradiated vacuum-packed trout (<i>Salmo gairdneri</i>). (照射および非照射の真空包装した鱒におけるボツリヌス E 型菌による毒素産生の比較)	Archiv für Lebensmittelhygiene	28	23-27	94M 017)
Hooshmand H. et al.	1995	Effects of gamma irradiation on mycotoxin disappearance and amino acid contents of corn, wheat, and soybeans with different moisture contents.	Plant Foods for Human Nutrition	47 (3)	227-238	FI0273
Ibe SN et al.	1982	Genetic mapping of mutations in a highly radiation-resistant mutant of <i>Salmonella typhimurium</i> LT2. (サルモネラ・ティフィムリウム LT2 株の放射線抵抗性変異株の変異の遺伝マップ)	Journal of bacteriology	152	260	94M 018)
Ito H. et al	1994	Aflatoxin production by microorganisms of the <i>Aspergillus flavus</i> group in spices and the effect of irradiation.	Journal of the Science of Food and Agriculture	65	141-142	FI0294

Jemmali M. et al.	1969	Influence de l'irradiation ammma des spores d'A. flavus sur la production d'aflatoxin B1	C. R. Acad. Sc. Paris	269	2271-2273	94M 020)
Karunaratne A. et al.	1990	Interactive effect of spore load and temperature on aflatxin production	Journal of Food protection	53(3)	227-229	Diehl 23)
Kenneth L. et al.	1973	Increased aflatoxin production by Aspergillus flavus via cobalt irradiation	Poultry Science	52	1492-1496	94M 4
Killebrew R et al.	1968	Irradiation with コバルト60 (gamma rays) of hard flour to destroy fungal spores and toxins	Transaction of the American Nuclear Society	11	85-86	99-292
Krabbenhoft K.L., et al.	1965	Ecology of Micrococcus radiodurans	Applied microbiology,	13	1030-1037	99-183
Lambert A. D. et al.	1990	Combined effect of modified atmosphere packaging and low dose irradiation on toxin production by Clostridium botulinum in pork	Journal of Food Protection	53 (10)	907	FI0112
Lambert A. D. et al.	1991a	Combined effect of modified atmosphere packaging and low-dose irradiation on toxin production by Clostridium botulinum in fresh pork.	Journal of Food Protection	54 (2)	94-101	FI0192
Lambert A. D. et al.	1991b	Effect of headspace CO2 concentration on toxin production by Clostridium botulinum in MAP, irradiated fresh pork	Journal of Food Protection	54 (8)	588-592	FI0187
Licciardello J. J. et al.	1969	Development of radiation resistance in Sallmonella cultures	Applied Microbiology	18	24-30	Diehl 38)
Maxcy RB, et al.	1978	Radiation-resistant vegetative bacteria in a proposed system of radappertized meats	In: Food preservation by irradiation, Vol. I. Vienna, International Atomic Energy Agency		347-359	99-176
Miyaki K. et al.	1967	Resistance of aflatoxin to chemical and biological changes by gamma irradiation	Microbiological problems in food preservation by irradiation.(Vienna, International Atomic Energy Agency)		57-64	99-291
Modi N.K. et al.	1990	The effect of irradiation and temperature on the immunological activity of staphylococcal enterotoxin A.	International journal of food microbiology	11	85-92	99-289
Neumayr L. et al.	1990	Production of enterotoxin A and thermonuclease by Staphylococcus aureus in legumes	International Journal of Food Microbiology	10	225-234	FI0284
Odamtten G. T. et al.	1987	Influence of inoculum size of Aspergillus flavus Link on the production of aflatoxin B1 in maize medium before and after exposure to combination treatment of heat and gamma radiation.	International Journal of Food Microbiology	4	119-127	94M 031)
Ogbadu G.	1980	Influence of gammma irradiation on aflatoxin B1 production by Aspergillus flavus growing on some Nigerian foodstuffs	Microbios.	27	19-26	FI0028
O'Neill K. et al.	1996	The influence of gamma radiation and substrate on mycotoxin production by Fusarium culmorum IMI 309344	Journal of Applied Bacteriology	81	518-524	FI0268
O'Neill K. et al.	1993	The stability of deoxynivalenol and 3-acetyl deoxynivalenol to gamma irradiation	Food Additives and Contaminants	10 (2)	209-215	FI0275

Parisi, A. D. et al.	1974	Increased radiation resistance of vegetative <i>Bacillus pumilus</i>	Appl. Microbiol.	28	41	Diehl 36)
Paster N. et al.	1985	Effect of gamma radiation on ochratoxin production by the fungus <i>Aspergillus ochraceus</i>	Journal of the Science of Food and Agriculture	36	445-449	94M 033) (99-227)
Patel U.D. et al.	1989	Inactivation of aflatoxin B1 by using the synergistic effect of hydrogen peroxide and gamma radiation	Applied environmental microbiology	55	465-467	99-296
Priyadarshini E. et al.	1979	Effect of graded doses of gamma-irradiation on aflatoxin production by <i>Aspergillus parasiticus</i> in wheat	Food and Cosmetic Toxicology	17	505-507	94M 034)
Priyadarshini E. et al.	1976	Aflatoxin production on irradiated foods	Food and cosmetics toxicology	14	293-295	FI0233
Refai M. K. et al.	2003	Incidence of aflatoxin B1 in the Egyptian cured meat basterma and control by gamma-irradiation.	Nahrung	47 (6)	377-382	FI0098
Rose S.A. et al.	1988	Studies on the irradiation of toxins of <i>Clostridium botulinum</i> and <i>Staphylococcus aureus</i>	Journal of applied bacteriology	65	223-229	99-288
Rowe T. F. et al.	1994	Effect of irradiation on the detection of bacterial DNA in contaminated food samples by DNA hybridization	Letters in Applied Microbiology	18	171-173	FI0422
Schindler A. F. et al.	1980	Enhanced aflatoxin production by <i>Aspergillus flavus</i> and <i>Aspergillus parasiticus</i> after gamma irradiation of the spore inoculum	Journal of Food Protection	43 (1)	7-9	FI0350
Shahin A. A. M.	1998	Effect of different factors including gamma radiation on the growth and aflatoxin production of <i>Aspergillus flavus</i> in sesame seeds	Egyptian Journal of Microbiology	33 (3)	455-468	FI0317
Sharma A. et al.	1990	Aflatoxin producing ability of spores of <i>Aspergillus parasiticus</i> exposed to gamma radiation	Journal of food science	55	275-276	99-218
Sharma A. et al.	1980	Influence of inoculum size of <i>Aspergillus parasiticus</i> spores on aflatoxin production	Applied and Environmental Microbiology	40(6)	989-993	94M 037) (99-221)
Skulberg A.	1965	The resistance of <i>Clostridium botulinum</i> type E toxin to radiation	Journal of applied bacteriology	28	139-141	99-285
Sommers C. H. et al.	2001	Loss of crystal violet binding activity in stationary phase <i>Yersinia enterocolitica</i> following gamma irradiation	Food Microbiology	18	367-374	FI0380
Szekely J.G. et al.	1991	Scanning electron microscope observations of growth and ochratoxin a production of <i>Aspergillus alutaceus</i> variety <i>alutaceus</i> (formerly <i>A. ochraceus</i>) on gamma-irradiated barley	Food structure	10	295-302	99-224
Temcharoen P, et al.	1982	Removal of aflatoxin B1 toxicity but not mutagenicity by 1 megarad gamma radiation of peanut meal.	Journal of food safety	4	199-205	99-294
Thayer D. W. et al.	1995	Effects of ionizing radiation and anaerobic refrigerated storage on indigenous microflora, <i>Salmonella</i> , and <i>Clostridium botulinum</i> types A and B in vacuum-canned, mechanically deboned chicken meat	Journal of Food Protection	58 (7)	752-757	FI0325

Velluti A. et al.	2000	Fumonisin B1, zearalenone and deoxynivalenol production by <i>Fusarium moniliforme</i> , <i>F. proliferatum</i> and <i>F. graminearum</i> in mixed cultures on irradiated maize kernels	Journal of the Science of Food and Agriculture	81	88-94	FI0238
Visconti A. et al.	1996	Stability of fumonisins at different storage periods and temperatures in gamma-irradiated maize	Food Additives and Contaminants	13 (8)	929-938	FI0270
Wagenaar R.O. et al.	1960	Studies on the inactivation of type a <i>Clostridium botulinum</i> toxin by irradiation with cobalt 60	Food research	25	279-284	99-286
Youssef B. M et al.	1999	Effect of gamma irradiation on aflatoxin B1 production by <i>Aspergillus flavus</i> in ground beef stored at 5C	Journal of Food Safety	19	231-239	FI0141
Žegota H. et al.	1989	Elimination of the toxic effects of patulin on <i>Bacillus subtilis</i> and <i>B. megaterium</i> by irradiation	Zeitschrift fuer Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung	188	348-350	FI0341
Žegota H. et al.	1988b	Effect of irradiation and storage on patulin disappearance and some chemical constituents of apple juice concentrate	Zeitschrift fuer Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung	187	321-324	FI0430
Žegota H. et al.	1988a	Effect of irradiation on the patulin content and chemical composition of apple juice concentrate	Zeitschrift fuer Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung	187	235-238	FI0431
安藤芳明 他	1971	ポツリヌス E 型菌芽胞の放射線抵抗性に関する研究（第 2 報）発芽に及ぼすガンマ線照射の影響	食品照射	6	47-53	MJ 03
安藤芳明 他	1972	ポツリヌス E 型菌芽胞の放射線抵抗性に関する研究（第 3 報）発育および毒素産生に及ぼす低線量照射の影響	食品照射	7	1-5	MJ 04
安藤芳明 他	1969	放射線パストリゼーションした魚肉におけるポツリヌス E 型菌の毒素産生	食品照射	4	11-17	MJ 05
安藤芳明 他	1973	低線量照射タラ切身におけるポツリヌス E 型菌芽胞の接種試験	食品照射	8	118-119	MJ 06
伊藤均	1992	<i>Aspergillus parasiticus</i> および <i>A. flavus</i> 低線量照射によるアフラトキシン産生促進効果	食品照射	27	27-31	MJ 08
伊藤均 他	1991	<i>Aspergillus flavus</i> のアフラトキシン産生に及ぼす照射の影響	食品照射	26	43-46	MJ 07
菊池裕 他	2001	低線量放射線による微生物毒素産生能の変化に関する研究 1 ペロ毒素を産生する腸管出血性大腸菌 <i>Escherichia coli</i>	食品照射	36	23-25	MJ 10
久米民和 他	1987	香辛料汚染糸状菌のアフラトキシン産生能と放射線感受性	食品照射	22 (2)	16-18	MJ 01

2-5 毒性学的安全性

照射食品をヒトが摂取した場合の毒性学的な影響の検討は、1950年代から実施され、世代試験も含めた動物混餌試験、遺伝毒性試験ともに膨大な量の研究文献が蓄積されている。これらのデータに対しては、1章でも述べたようにWHOや各国政府機関が評価を実施し、毒性学的な安全性に関する結論を出している。従って、照射食品の毒性学的評価にあたっては、これらの評価結果（1章参照）の内容を十分に検討することが重要である。

そこで本調査では、①WHOの1994年および1999年の評価レポートに用いた参考文献および、本章2節で指摘した、②放射線特異的分解生成物2-アルキルシクロブタノン類の遺伝毒性に関する最近の研究、③1999年のWHOの報告書よりも後に実施された新たな毒性研究の文献収集を重点的に実施した。

そこでこの節の末尾に今回の調査の期間に収集できた毒性研究の一覧をまとめた。さらに重要度が高いと考えられるカテゴリーの収集文献について整理した結果を以下に述べる。

なお、WHOの1999年のレポートには、WHOが毒性学的評価を実施した文献の内容が整理されており、今回の調査ではこの取りまとめ表の翻訳も実施している。（資料集 I）

ラルテックによる鶏肉の安全性試験

米国陸軍がラルテック（Raltech Scientific Service）に委託して1976年から開始した照射鶏肉に関する安全性試験は、その後、米国農務省が支援して実施され1984年に終了した。この全容は、最終的なとりまとめをした農務省東部研究所（USDA/ARS-ERRC）のDr.Thayerが1987年の*Journal of Food Protection*に公表した（資料集Ⅱに収録）。

この試験の結果は、米国の鶏肉照射の許可における安全性評価に用いられただけでなく、照射食品全般の毒性学的評価において重要視されている。最近では、2-アルキルシクロブタノンの遺伝毒性に関して示された懸念に対し、この放射線分解生成物を実際に含む食餌試料を動物に長期投与した毒性試験として、WHOや他機関におけるこの化合物のリスク評価に用いられている。

食餌の区分と処理条件（表 2-5-1）および試験の種類（表 2-5-2）は以下の通りである。

表 2-5-1 ラルテックの鶏肉毒性試験に用いられた試料と処理条件

食餌区分	鶏肉の処理 保存条件	鶏肉含有量
1) 電子線照射 (ELE)	-25℃真空下で 45-68kGy (平均 59kGy)	35%
2) ガンマ線照射 (GAM)	-25℃真空下で 46-68kGy (平均 56kGy)	35%
3) 熱処理 (TP)	115.6℃で加熱	35%
4) 冷凍保存コントロール (FC)	真空状態で凍結	35%
5) 混合実験飼料 (CLD)		0%

表 2-5-2 ラルテック鶏肉の安全性試験で実施された項目

慢性毒性試験（発ガン性試験、世代試験）	マウス
慢性毒性試験	ビーグル犬
催奇形性試験	ラット、ウサギ、ハムスター、マウス
優性致死試験	マウス
伴性劣性試験	キイロショウジョウバエ
エームス試験	Salmonella TA1535, TA98, TA100, TA 1537, TA 1538

これらの試験については、WHOの1994年の報告書にも解説されており、総括としては、放射線による悪影響が認められないとされている。

なお、WHOやFDAが評価に使用したラルテック試験のオリジナル報告書については、米国陸軍が実施した照射による鶏肉および牛肉の分解生成物の分析に関する報告書も含めて以下の通りであると米国官報に公告されている。（FR4940623）（表2-5-3）

表2-5-3 ラルテックの鶏肉安全性試験に関連するオリジナル報告書

*Pb84-186980	Wholesomeness Studies of Precooked (Enzyme inactivated) Chicken Product In Vacuum Sealed Containers Exposed To Dose Of Ionizing Radiation, Sufficient To Achieve Commercial Sterility (Summery Of Supporting Document) 191p	1984
*Pb84-186998	Animal Feeding Study Protocol For Irradiation Sterilized Test Foods; Packaging Materials For Use During The Ionizing Irradiation Sterilization of Prepackaged Chicken Products Technology, Product Quality, Feasibility Technical Report) 688p	1984
Pb84-187004	Animal Feeding Study For Irradiated Sterilized Chicken (Quarterly Report) (15073p)	
Pb84-187012	Chronic Toxicity, Oncogenicity And Multigeneration Reproductive Study Using Cd-1 Mice to Evaluate Frozen, Thermally Sterilized, Cobalt-60 Irradiated, And 10 MeV Eelectron Irradiated Chicken Meat.(Final Report) (10328p)	1984
Pb84-187020	Irradiated Sterilized Chicken Meat: A Chronic Toxicity And Reproductive Performance Study In Beagle Dogs.(196,861p)	1982
Pb84-187038	Irradiation Sterilized Chicken Feeding Study in Rats(401p)	
*Pb84-187046	Hamster, Mouse, Rabbit And Rat, Teratology Studies of Irradiation Sterilized Chicken Products.(835p)	1982
*Pb84-187053	Genetic Studies: Dominant Lethal Study, Sex Linked Recessive Lethal, Ames mutagenecity, and Heritable Translocation Test of Thermal Processed And Frozen, Electron Irradiated And Gamma-Irradiated Chicken.(406p)	1983
Pb84-187061	Protein Efficacy Ratio Determins of Irradiation Sterilized Chiken Product(44p)	1980
Pb84-187079	Antivitamin Studies of Irradiation Sterilized Beef And Chicken Assessment of Mutagenic Activity Of Irradiated Beef Using The Ames Salmonella / Mammalian Mutagenecity Assay (292p)	1979
*Pb84-187087	Evaluation of The Health Aspects of Certain Compounds Found in Irradiated Beef(184p)	1977
*Pb84-187095	Radiolysis Compounds in Bacon And Chicken (466p)	1984

ラルテック試験の一連の報告書類とオリジナルデータは、米国農務省東部研究所が所蔵していることを今回の調査において確認した。また、表2-5-3中＊印のものについては、日本原子力研究所高崎研究所が所蔵している。日本国内にないものについては東部研究所にコピーを依頼している。

毒性試験（動物試験）で過去に異常が報告された研究

毒性試験に関してWHOの1994年および1999年の報告書の中で多くの研究について解説されている。多くの異常を示さなかった試験とともに、いくつかの試験では異常の結果が報告されたものがある。これらについて、WHO報告書の中では、専門委員会での解釈を示したり、その後の追試の結果を示したりすることで放射線照射による悪影響を否定している。

表2-5-4にこれらの研究の概要をWHOの解釈とともにまとめた。

初期の動物実験による毒性結果の異常の原因が、食餌中の栄養素がもともと欠乏していたり、照射によって栄養素が破壊されたりすることによるもので、照射によって生成する毒性物質の効果とは解釈されない例が報告されている。

例えば、Monsenらは、55.8kGy照射した豚肉、鶏肉をはじめとする照射食品の摂取によるマウスの心臓障害（心耳の拡張）を報告した(Monsen 1960)。しかし、その後の別の研究者による同系統のマウスを使った実験では、照射による心臓障害は確認できなかったと報告している(Thompson 1963)。また、Monsenらは追加試験を実施し、この影響は飼料中の鉄および銅の欠乏によるものだと報告した(Monsen 1965)。

別の例では、55.8kGy照射した牛肉を投与したラット雄で出血性症候群による死亡の報告がある(Malhotra et al. 1963 a)。WHOの報告書では、照射によるビタミンK3の破壊が原因であるとの解釈が示されている。なお、牛肉はビタミンKの重要な供給源ではないので、この結果は人間の栄養にとって重要ではないとも述べている。その後の研究でこの障害はビタミンKを補充すると予防することができたと報告された(Malhotra et al. 1965)。なお、56kGy照射した牛肉でのビタミンK3の破壊に伴う内出血は、Metta (1959)らによっても報告(WHOの報告書では栄養の章で扱われている)されており、ビタミンKの破壊は肉の加熱調理でも起こり、照射肉の場合と同様の症状が現れるがビタミンK3の補充で回復するとの研究もある(Matchner et al. 1966)。

<参考文献> ビタミンKの破壊に関して

- 1) Metta V.C. et al. (1959) Vitamin K deficiency in rats induced by the feeding of irradiated beef. *Journal of nutrition*, **69**, 18-22.
- 2) Matschiner et al. (1966) Vitamin K content of ground beef. *Journal of nutrition*, **90**, 331-334.

表2-5-4 異常が報告された動物実験とその関連研究

亜急性毒性試験

食品飼料(%)	動物	期間	線量	線源 照射条件	結果(コメント)	著者/参考文献	
牛肉(35%)、スターチ(35%)、シヨ糖(19%)、タラ肝油(1.5%)、小麦の胚種油(0.5%)、塩混合物(4%)、ビタミン混合物(5%)	亜急性毒性ラット SD系 メチオニン補充の影響を合わせて調査	9 週 間 13週間	55.8kGy	使用済み核燃料棒； 食品の缶詰 冷凍出荷 60°F で照射； 室温で保存	照射牛肉を与えられたラットは死亡率が有意に高かった。(非照射の子供のラットはゼロ)メチオニンの供与は死亡率を直線的に減らした。照射試料でプロトロンビン速度が低下し、メチオニン添加はプロトロンビン速度を上げた。ただしメチオニンは成長を低下させた。SD 系のラットでは、非照射試料での成ラットに出血死したものがあつた。メチオニン投与量の増加は体重増加率を直線的に減少させた。それは非照射グループより照射グループの方が顕著だった。成獣ラットは離乳期に比べて、出血性素因が強い。 WH094,99 の解釈では、照射によるビタミン K3 破壊によるもので、照射に特有の変化に起因するものでないと解釈。	Malhotra 1963a	94T 096) (99-316)
牛肉(35%) 同上	亜急性毒性ラット SD系	90 日間	55.8kGy	使用済み核燃料棒； 食品の缶詰 冷凍出荷 60°F で照射； 室温で保存	去勢された雄食餌におけるメチオニン(Met)とテストステロン(Tes)濃度の内出血死亡率の影響が調査された。メチオニンは、直線的に死亡率を低下させ、テストステロンは死亡率を上昇させた。これら2つの影響は独立。	Malhotra 1963b	94T 097) (99-315)
牛肉(35%) 同上	亜急性毒性ラット	14 週間 (試験 I), 8 週間 (試験 II)	55.8kGy	使用済み核燃料棒； 食品の缶詰 冷凍出荷 60°F で照射； 室温で保存	死亡率はビタミン K3 と DL-メチオニンで減少した。ビタミン K3 が増加したとき、プロトロンビン速度も増加した。メチオニンを0.23%添加するとメチオニン無添加に比べて速度は小さくなり、1.37%添加すると速くなった。メチオニン 1.37%添加とビタミン K3 を週に 3 回経口投与するとプロトロンビン速度は通常だった。0.23%メチオニン添加で体重増加率は有意に増加した。1.37%添加するとビタミン K3 の増加とともに直線的かつ有意に減少した。 WH099 では、照射の影響はなく、上記 1963 年の出血障害をビタミン K の破壊と解釈。	Malhotra 1965	94T 098) (99-317)

挽き豚肉 (p) (35%), パン (br)* (80%), グ リーンビーンズ (gb) (35% and 80%) エビ (sh) (35% and 80%)	亜急性毒性 ラット	84 日間	27.9kGy 55.8kGy	使用済み燃料棒; 缶詰、冷凍、 ブール中で照射; 3-8 ヶ月間室温で保管 (br) 0.25 and 0.5 kGy	55.8kGy 照射した豚肉をラットに 84 日間投与すると、血漿アラニンアミノト ランスフェラーゼの減少と体重の減少が観察された。著者が指摘してい るように、このような影響はおそらく、ピリドキシンの減少の結果であろう。 ・WH094 は食餌照射グリーンビーンズまたはエビの量に関連した影響は なく、栄養の問題という FDA の解釈を支持した。	Brin 1961a	94T 023) (99-100)
イチゴ (5%):ジュー ス (j) 粉 (p);j,	亜急性毒性 ラット ウィスター系	84 日間	5kGy 50kGy	電子線 (3 MeV) ; (j) : 冷凍保存、解凍 後等量の水と混合 ; (p) 凍結乾燥し、粉株 化後、N2 封入し保存	高線量の粉末を食べた雄のグループの成長遅延。雌と高線量ジュース を与えられたすべての動物に有意な影響なし WH099 では最終的には飼料中の既存の栄養欠乏もしくは照射に固有の ものではない栄養素の劣化によるものであると解釈	Verschuuren 1966	94T-175 (99-345)
実験動物用飼料(100%):カ ゼイン (8.5%), スキムミルク (9.4%), 澱粉 (50%), 小麦粉 (16.5%), 蔗糖 (5%), ヒマワリ 油(6%), 塩化コリン (0.1%), 塩混合 (3.5%) ビタミンの混 合物 (1%)	亜急性毒性 ラット (SD 系)	120 日間	25kGy 45kGy	コバルト60 NS PE バッグで保管	食餌の肝臓機能への影響調査。25~45kGy 照射した飼料を投与した雌 のラットの血漿中のアスパラギン酸アミノランスフェラーゼ活性が低下 ・FDA は、この現象には線量依存性がなく、試験の結果に疑問の余地 有りとの解釈。WH094 では統計的な有意差はわずか。対照の酵素活性 が通常よりも高いことを指摘。WH099 飼料中の既存の栄養欠乏か照射 に固有ではない栄養素の劣化によると解釈	Metwalli 1977	94T 102) (99-339)
アポロ宇宙食	亜急性毒性 マウス	50 日 (F1), 90 日 (F1) 30 日 (F2)	54kGy	コバルト60 ,N2 缶詰	アポロ飛行士(1968 年) の宇宙食の代表的な食餌組成を模倣し、ラッ ト飼料を乾燥、窒素下で 54kGy 照射した。照射飼料を投与したマウ スの成長が遅く、貧血の症状を示すと報告した。ただし、貧血の症 状は第 1 世代および第 2 世代の非照射飼料を食べたマウスにも現れ ている。 FDA は飼料の不適切さ、プロトコールの不規則性によりこの試験を否定 し、WH004 では FDA の見解を引用。	Luckey 1973	94T 094)
タマネギ(10%)	亜急性毒性 イス	90 日間	0.25kGy	コバルト60	体重測定や検尿ではグループ間での差異はなかった。タマネギの投与を 開始した時に貧血が見られた。実験の進行とともにより深刻なものとなっ た。また、照射タマネギのグループの方が急速に進行した。両グループと も脾臓重量の増加が見られた。また、肝臓・腎臓の色素沈着とゆるやか な白血球増加が観察された。 WH094 は、FDA の照射と関係がない影響であり、実験として 1 群の動物 数の不足という評価を支持。	Gabriel 1976a	94T 058)

固形飼料 (100%):Vetacan (肉・飼料混合物) (Vc)Vetavit (穀類・飼料混合物) (Vv)	亜急性毒性 イヌ	90 日間	25kGy	コバルト60	肉類混合試料供給において 35%の必須アミノ酸破壊と脂質酸化。穀類混合試料供給において炭水化物の破壊。しかし、餌において目立った味覚の変化はないが、試験動物は総タンパク質の低下と血清の中のクレアチンの低下を表示した。他の生物学的影響は示さなかった。 WH099 では、飼料中の既存の栄養欠乏もしくは照射に固有のものではない栄養素の劣化によると解釈。	Smid 1985	99-374
大豆油を 10%用いた実験動物用飼料 (100%)	亜急性毒性 ヒヨコ	ヒヨコ、 5 週間	6,30,60k Gy	300 kCi コバルト60; ガラス瓶に入れた大豆油 100 kCi コバルト60; 紙箱に入れた全飼料	30kGy 以上で過酸化物が多量に生成。照射飼料の脂質の自動酸化に起因すると考えられる作用や成長抑制低下。 WH099 では固有のものではない栄養素の劣化によるものであると解釈。	Takigawa 1976	99-381

慢性毒性 繁殖試験

食品飼料 (%)	動物	期間	線量	線源 照射条件	結果(コメント)	著者/参考文献	
実験動物用飼料 (100%)	慢性毒性 マウス(スイス系)	730 日間 P, F1, F2 世代	60kGy	コバルト60 6 kGy/h	栄養(ビタミン)不足によると考えられる成長と繁殖力の低下(ビタミンの補てんがない) ・照射の影響はなし(WH099 の解釈) ・成長の低下は 10%以下であり、繁殖力の問題は栄養に関係しているようである (WH094 の解釈)	Biagini 1967	94T 018) (99-359)
混合物: 豚肉 (8.8%)、鶏肉 (6%)、濃縮ミルク (19.3%)、パレイシヨ (19.3%) 人参 (43%) 湿重量あたり	慢性毒性 マウス	19 ヶ月間	55.8kGy	使用済み核燃料棒; 食品の缶詰、冷凍; 60°F で照射; 0.1kGy でパレイシヨを 照射し、5-10°Cで貯蔵	Strong A, Db, Cb. Cb 血統でマウスの心臓に心耳の拡張を起こし、17.5%が死亡。Strong A 系統の死亡率は2%。同腹のコントロール(非照射飼料を)与えられた動物に障害は認められなかった。照射エバミルクの食餌は CB マウスの 60-80%に心臓障害を引き起こした。 WH094 では、Tompson の実験で追試できなかったことを挙げこの研究の結果を否定。また、WH099 でも Monsen の続く2つのレポートの結果も加味し、心臓障害は銅欠乏によると解釈 (Monsen 1963 および 1965)。	Monsen 1960	94T 106) (99-351)

同上混合食 および エバミルク	慢 性 毒 性 マウス	860 日	55.8kGy	同上	同上実験レポートの詳細(プロジェクト全体では途中経過) 照射混合食(ビタミン補強)の実験(追試も含む)。1958 年の実験で、Cb 系統に高率の心臓障害が発生。その後、1959 年に57匹および 85 匹の動物で実験した際の心臓障害の発症は、それぞれ3匹ずつであった。後者の実験で心臓障害を発症した動物は 600 日以上の高齢。 照射エバミルクのビタミン補強効果の実験:加熱、照射、ビタミン補強の組み合わせを変え8種類の食餌で実験を行ったところ、非照射、非加熱、ビタミン補強試料の心臓障害発生率が一番低かった(22.7%)が、非照射加熱、非照射、非加熱ビタミン補強なしの食餌でも高率の心臓障害が認められた。照射エバミルクでは、ビタミン補強、加熱の有無で多少の差はあるものの総じて 60-80%の割合で心臓障害が発生した。エバミルク試料での体重増加はいずれの場合も通常の生育状態に比べて低い。	Monsen 1963	99-352
エバミルク	慢 性 毒 性 マウス				Lab Chow のコントロールを追加し、エバミルクに対して金属などの添加効果を検討する実験を追加して、心臓障害の原因を究明した最終結論。試料は照射せず、ビタミン、ミネラル添加の影響を検討。 1)エバミルクのみの食餌は3種の系統のマウスに心臓障害を起こす2) Cb 系統は遺伝的に心耳拡張の障害をおこしやすい3)高濃度の飽和脂肪酸と低率の B 群ビタミンは心臓障害の発症には無関係4)ミルクへの銅の添加は心臓障害の発症を抑制。5)ミルク食餌による貧血の発症の抑制には鉄と銅の両方が必要。 WH099 は先の心臓障害の否定の根拠としてこの論文を支持。	Monsen 1965	99-353
混合物: 豚肉 (8.8%)、鶏肉 (6%)、エバミルク (19.3%)、人参 (43%) 湿重量あたり	慢 性 毒 性 マウス	600 日間 (II) 300 日間 (III) 600 日間 (IV) 寿命(V)	55.8kGy	使用済み核燃料棒; 食品の缶詰、冷凍; 60°F で照射; 0.1kGy でバレイショを 照射し、5-10°Cで貯 蔵	Cb and Strong A (II), Cb 系統はそれ以外の試験。 Monsen の研究の反復(II);心臓障害の病気の発生を決定するために(III); 病因(IV);100%ミルクの食餌(V)。Monsen の主張する心臓障害は見つかっていない。 WH094 および 99 は照射の影響なしと解釈し、Monsen の最初の実験を否定する根拠にしている。	Tompso n 1963	94T 160) (99-354, 355) 原本なし

実験動物用飼料 (100%): 食餌 1 と食餌 2 オートクレーブあるいは、照射	繁殖 催奇形性試験 マウス	繁殖と 催奇形性 200 日間	25kGy	コバルト60; 他の条件で NS	LACA and A2G. 2 strains, 4 diets = 8 groups. オートクレーブ/照射の比較: 食餌 1 で、オートクレーブは子孫が増加; 食餌 2 で、照射は孫が増加。マウスは、オートクレーブした食餌に比べて照射した食餌に強い好みを示した。仔の数が減少したが、統計的有意差なし。 WH094 および 99 では、照射の影響なしと評価。	Porter 1970	94T 120) (99-360)
鶏肉シチュー (35%) キャベツ (35%) 乾物重量あたり	慢性毒性 ラット	730 日間 4 世代	27.9, 55.8kGy (シチュー) 0.558, 2.79kGy (キャベツ)	コバルト60 シチュー 缶詰 室温 コントロールは50F) キャベツ 34oF 保存	幼仔のラットで 19 日間 シチュー (6Mrep), キャベツ (0.6Mrep) を与えられた十二指腸細胞のアルカリフォスファターゼの低下。生育後および次世代では異常なし ・WH094 動物数が不十分。幼仔のラット以外の異常はないことを指摘。	Phillips 1961a	94T 118)
オレンジ (35%)	繁殖 催奇形性試験 ラット	2年間	1.4, 2.79kGy	オレンジ、照射後 60-90 日後 34°F で保蔵	第2世代の体重増加が照射試料でコントロールに比べて低下した。繁殖試験では、照射の有無にかかわらず、繁殖率が低かった。臓器重量、腫瘍発生、血液像などで照射の影響は認められず。 ・WH094 体重増の低下は、照射と関係ないと考えられ不適切な飼料が原因。	Phillips 1961b	94T 119)
混合物: ベーコン (8.75%), 牛肉 (8.43%), ハドック (19.15%), ハム (4.82%), 粉ミルク (5.56%), ビート (15.45%), グリーンピーズ (8.39%), 穀物 (3%) 桃 (20.45%)	慢性毒性 ラット	2 年間 P, F1-F3 世代	55.8kGy	使用済み核燃料棒; 缶詰の gb、凍らせて出荷、60°F で照射し、室温で保管	F 世代成長試験で、2 番目に生んだ動物だけを使用。4 代目 (F3) 雌で体重増加量が減少。雄ラットのチトクロムオキシダーゼ活性の増加。著者は体重減少や酵素活性変動は栄養の問題と解釈。 WH094、WH099 では照射による影響は否定。	Read 1961	94T 130) (99-314)

放射線特異的分解生成物 2-アルキルシクロブタノン類の遺伝毒性に関する研究

本章2節でも述べたように、2-アルキルシクロブタノン類（以下2-ACB）は、食品中の脂質に由来する放射線照射分解生成物である。この物質の存在が知られる以前には、照射によって食品中に生成する放射線分解生成物は、非照射食品中にも含まれる成分か、他の調理加工などによっても生成が誘発される既知の物質であるとされ、照射食品の安全性評価がなされてきた。2-ACB類の検出により、その前提が崩れることになり、現在の照射食品の安全性評価において大きな論点となっている。本項では、現在までに実施されている2-ACB類の毒性学的研究文献の整理と、国際機関、政府機関の評価について述べる。なお、関係資料は、本調査報告書 資料集Ⅱに収録した。

表 2-5-5 照射食品中に生成する 2-アルキルシクロブタノン類



脂肪酸	名称	R	略称
パルミチン酸 (C16:0)	2-Dodecylcyclobutanone (2-ドデシルシクロブタノン)	(CH ₂) ₁₁ CH ₃	2-DCB
パルミトレイン酸 (C16:1)	2-Dodec-5'-enylcyclobutanone (2-ドデセニルシクロブタノン)	(CH ₂) ₄ CH=CH(CH ₂) ₅ CH ₃	2-DeCB
ステアリン酸 (C18:0)	2-Tetradecylcyclobutanone (2-テトラデシルシクロブタノン)	(CH ₂) ₁₃ CH ₃	2-TCB
オレイン酸 (C18:1)	2-Tetradec-5'-enylcyclobutanone (2-テトラデセニルシクロブタノン)	(CH ₂) ₄ CH=CH(CH ₂) ₇ CH ₃	2-TeCB
リノール酸 (C18:2)	2-Tetradecadienylcyclobutanone (2-テトラデセニルシクロブタノン)	(CH ₂) ₄ CH=CHCH ₂ CH=CH(CH ₂) ₄ CH ₃	

この化合物（純品）に関する遺伝毒性試験は、ドイツ、カールスルーエの連邦栄養研究所のDelincéeによって開始された。現在までに報告されている2-ACB類の毒性試験は、(A)Delincée らの初期の研究 (B) EU-SCFがスポンサーとなって1999年から2001年までに実施されたフランスのルイ・パスツール大学 (ULP) とドイツの栄養生理研究所 (BFEL) のグループによるプロジェクト研究 (INTERREG II) (C) 米国で実施されている2-ドデシルブタノンの（遺伝）毒性試験の3つに大別される。これらの研究の内容を表にまとめた（表2-5-6）。

これまでに実施された研究においては、高濃度の2-ACB類を用いた条件で、以下の可能性が指摘されている。

- ・コメットアッセイによるDNA鎖切断 (in vivo投与 ラット大腸細胞)
- ・酸化的DNA障害 (アルカリアンワインディング法)
- ・細胞毒性 (微生物およびヒト培養細胞)
- ・発ガンプロモーター活性 (ラットの実験的大腸癌発がんモデル系)

ただし、サルモネラ、大腸菌を用いた変異原性試験（エームス試験）では、どのグループの研究者が実施しても陰性の結果が確認されている。

表2-5-6 2-アルキルシクロブタノン類の毒性研究

A. BFELにおける初期の研究

	試験の種類	実験内容および結果	文献 (資料番号)
(1)	遺伝毒性 細胞毒性 (<i>in vitro</i>)	材料:ラット結腸細胞およびヒト直腸細胞 2-DCB:0.3 ~1.25mg/ml (37°C,30分インキュベーション) ラットおよびヒトの結腸細胞の生存率低下、DNAの1本鎖切断(コメットアッセイ)が、2-DCBの濃度に依存して観察された。	Delincée 1998 (II-5-3 ①)
(2)	遺伝毒性 細胞毒性 (<i>in vivo</i>)	材料:ラット, 2-DCB:1.12mg / kg 体重, 14.9mg / kg 投与16時間後に結腸細胞を採取, 動物数:6匹/グループ 結腸細胞の生存率はコントロールと同様で変化がなかった。 コメットアッセイの結果、高濃度投与群で有意なDNA切断の増加。	Delincée 1999 (II-5-3 ②)

B. 独・仏プロジェクト研究 (INTERREG II)

オリジナルレポート (II-5-3 ③)

(3)	遺伝毒性 細胞毒性 (<i>in vitro</i>)	材料:ヒト結腸ガン細胞、HT29 および、HT29,cl19A 細胞 2-ACB(2-DCB、2-TCB、2-TeCB、cis、trans およびcis/transmix): 25 ~400μM(=100μg/ml) 37°C,0.5, 24, 48h処理 細胞生存率(テトラゾリウム還元法)は、30分処理、400μMでも影響なし、長時間処理で、細胞毒性が認められる。 コメットアッセイによるDNA鎖切断は、30分処理では有意に増加しない。	Delincée 2002 (II-5-3 ④) Delincée 2001 (II-5-3 ⑦) Delincée 2002 (II-5-3 ⑧)
(4)	酸化的DNA障害 (<i>in vitro</i>)	材料:ヒト HeLa細胞 および ヒト結腸ガン細胞、HT29 2-TCB、10 ~90μg/ml 2-TeCB: 10 ~60μg/ml、 2-decyl-CB、2-DCB、:10 ~40μg/ml 24h処理 DNA鎖切断および(alkaline unwinding 法)、酸化的DNA塩基修飾(Fpg 酵素処理)は、2-TCBおよび、2-TeCBでは、高濃度(細胞のコロニー 形成能が失われる濃度)においてのみ増加。2-decyl-CB、2-DCBは、 細胞に障害のない低濃度でも酸化的DNA障害を増加させた。	Pelzer 2001 (II-5-3 ⑨)
(5)	細胞毒性(細菌) エームス試験	材料:Salmonella typhimurium TA97,TA98,TA100株 2-TCB:4 ~400 μM、2-DCBおよび、2-decyl-cyclobutanone:4 ~800 μM 細胞毒性(生育阻害、および生存率の減少)が、短鎖長の2ACBに認められた。エームス試験の結果、変異原性は認められなかった。	公表論文なし
(6)	発ガン プロモーター活性 (<i>in vivo</i>)	材料:Wister系 ラット、(6匹/群) 2-TCBおよび2-TeCB 0.005% 溶液(1%Et-OH)を飲料水として投与 (~1.6mg /animal/day)。飼育3および4週に発ガン物質AOM (Azoxymethane)を投与。3および6ヶ月後に直腸を観察。 3ヶ月後の観察は、AOMのみのコントロールに比べ異常なし。 6ヶ月後には、2-TCB および 2-TeCB投与群で、腫瘍数、腫瘍サイ ズの増加。発ガンプロモーター活性の確認。	Raul 2002 (II-5-3 ⑤)
(7)	ラットの体内吸収 (<i>in vivo</i>)	材料:Wister系 ラット、(6匹/群) 2-TCB、2-TeCB 0.005% 溶液(1%Et-OH)を飲料水として投与 2-ACBの摂取量は、約1 mg /animal/day 4ヶ月飼育。飼育終了の3 日間に収集した糞、解剖後、摘出した脂肪細胞中の2-ACBを定量。 体重増加、臓器重量、解剖所見は異常なし。1日に摂取した2-ACB量 の1%未満が糞中に排泄。脂肪組織から2-ACBを検出(腸管吸収後、 脂肪組織に極少量が蓄積)糞および脂肪組織中に検出された量は摂 取量に比べ、極微量。	Horvatovich 2002 (II-5-3 ⑥)

C. 米国における研究

(8)	遺伝毒性 (変異原性試験)	材料: <i>Escherichia coli</i> 2WP2 (pkM101) および 2WP2 <i>uvrA</i> (pkM101) 2-DCB: 0~1mg/well、アロクロール誘導ラットのS9フラクション5%溶液を用いた代謝活性化法 いずれの2-DCBの濃度でも、S9フラクションの有無に関わらず各株の生存率は影響を受けず、またコロニー形成数はと溶媒対照に同等。 2-DCBは大腸菌トリプトファン復帰突然変異原性試験において突然変異を誘発しなかった。	Sommers 2003 (II-5-3 (13))
(9)	遺伝毒性 (エームス試験) (染色体内組み換え試験)	材料: <i>Salmonella</i> TA98、TA100、TA1535、TA153 (エームス試験) <i>Saccharomyces cerevisiae</i> RS112株(染色体内組換え試験) 2-DCB : 0~1mg/well 2-DCB最高濃度(1mg/well、標準プレート法の最大許容濃度5mg/plateに等価)においても、2-DCBはサルモネラ菌突然変異を誘発しない。 2-DCBはイースト菌の染色体組換えを誘発しない。	Sommers 2004 (II-5-3 (14))
(10)	遺伝毒性 (エームス試験) 急性毒性 (Microtox試験)	材料: <i>Salmonella</i> TA97、TA98、TA100、TA102、TA1535 (エームス試験) <i>Vibrio fischeri</i> (Microtox試験) 2-DCB : 1.0mg/plate (エームス試験), 2-DCBに変異原性は認められなかった。 <i>V.fischeri</i> 細胞の発光を50%減少させる効果濃度(EC ₅₀)は、陽性対照、サイクロヘキサノン、2-ノネラルより低かった。発光減少から見た検体で影響を受ける最大細胞数は2-DCBで65%であったが、他の2剤では90~100%であった。細胞の最大発光減少から見た毒性は他の2剤程強くはない。毒性の潜在リスクはあったとしても極めて低い。	Gadgil 2004 (II-5-3 (15))

なお、初期に行われたDlincéeの研究では、北アイルランドBelfastのクイーンズ大学で合成された2-ドデシルシクロブタノンが使用された(A)。この試験については、被検化合物の保管や純度が証明されていないとの批判があり、続くINTERREG IIのプロジェクト研究では新開発した合成法を用いて多種類の2-ACB類を合成し、その純度も検定した上で毒性研究に用いた(B)。なおこの研究では、多種の食品における照射による2-ACB類の生成量が測定されている。この研究結果から推定される3kGy照射、調理後の鶏肉中の2-ACB類の総量は、大まかに見積もると100gあたり40 µg 程度とされている。(Burnouf 2002)。

2-アルキルシクロブタノン類の安全性研究に関する国際機関等の見解

これまでに実施された遺伝毒性試験の結果をヒトが脂肪を含有する照射食品を摂取する際のリスクの評価に直接的にあてはめることができるかどうか、2-アルキルシクロブタノンの存在により脂質を含む照射食品の毒性学的安全性に問題が無いかについては、WHO、欧州連合食品科学委員会(EU-SCF)、カナダ保健省(Health Canada)が見解を出している。また、国際食品照射諮問グループ(ICGFI)も初期の研究についてのレビューを実施している。これらに関する文書も資料集Ⅱに収蔵した。それぞれの資料について年代順に説明する。

(1) ICGFI (1999)

この評価は、Delincéeの初期の研究(表2-5-6(A))の内容に関してなされたもので、1999年10月に行われた第16回ICGFI年次大会で、WHOの代表が毒性学の専門家3人に依頼した初期研究についてのレビュー結果として報告した。

ここでは、コメットアッセイの試験法としての妥当性、研究に用いた試薬の純度と管理が問題点として指摘された。結論としては、コメットアッセイをリスク評価に用いるのは、時期尚早で、完全なリスク評価のためには、より多くの試験研究が必要であるという見解がまとめられた。また、過去に英国で実施されたエームス試験に関する未公表データが紹介され、その結果が陰性であることからICGFIとして早急に新しい実験の実施を進める必要はないとの判断がなされた。

(2) EU-SCF (2002)

独仏のプロジェクト研究 INTERREG II (表2-5-6(B))の結果が、2002年2月にEUの食品科学委員会の会議で報告され、それを受けて、2002年7月に上記の研究レポートに対する公式見解を発表した。

EU-SCFは、プロモーター活性の発現が、発ガン物質の投与23週間後であったこと、エームス試験の結果が陰性であったこと、哺乳動物細胞を使った、*in vitro* の遺伝子変異や染色体異常の試験が行われていないこと、標準的な Feeding 試験が実施されていないことを指摘した。そして、この試験の結果に対しては、実施した*in vitro* 試験のほとんどにおいて2-ACB類の悪影響が認められたが、これらの結果から、脂質を含む照射食品中の2-ACB類をヒトが摂取することの健康リスクを評価することは適当でないと結論した。

そして、脂質を含む照射食品の安全性に関しては、これまでのSCFの考え方を踏襲し、照射食品を使って行われた、多くの動物実験に基づいてWHO/FAO/IAEAが1981年に下した、健全性についての評価結果や、「適性な条件下における照射処理は安全である」とする1986年のSCFにおける見解を再確認する、としている。

なお、ULPとBFELの研究者らは、この見解に対して彼らの実験の意図は研究であり、規制当局のリスク評価ではないので用いた試験法に対する批判はあたらないとのコメントしている (Burnouf et al. 2002b)。

(3) カナダ保健省 (Health Canada 2002)

カナダ保健省は食鳥肉、牛肉、マンゴ、エビの4品目に対し新たな評価(2002年)を実施した際、2-ドデシルシクロブタノン関連化合物に関する評価結果を公表した。

その結果、①過去の毒性学的試験(動物給餌試験)結果は容認できること ②懸念を示す試験結果は疑わしく解釈が困難であること(特に試験法の妥当性) ③2-ドデシルブタノンの摂取量の推定値は、懸念を示す論文での実験条件に比べて著しく低いこと を指摘し、放射線処理技術の応用をさらに遅らせることは適切ではないという判断を下した。

(4) WHOの見解 (WHO 2003)

WHOの見解は、2003年3月、コーデックス規格の改訂に関する最終的な議論が実施された時期に合わせて公表された。なお、本調査において IAEA の本部を訪問した際にも、この文書が2-アルキルシクロブタノンに関する公式文書として現時点でも取り扱われているという回答を得た。

WHOのこの問題に対する結論は、「長期間の動物実験とエームス試験がネガティブという結果を含む、現時点での科学的証拠に基づいて、2-DCBおよび2-アルキルシクロブタノン類は消費者の健康リスクを損ねないと判断する。WHOはこれまで、FAO/IAEA/WHOの専門家グループや各国各地域の専門家によって導き出された「照射食品は、安全で、栄養学的にも適合性がある」という結論に疑問を挟むような論拠は持っていない。」というものである。

なお、WHOはこの見解を結ぶにあたり、この化合物の毒性 / 発ガン性について残された不確定要素の解明のための研究を実施することを引き続き奨励して行くこと、照射食品に関し、公衆の健康に対するリスクの可能性を示すような新たな証拠が指摘された場合には、照射食品のリスクアセスメントを再開する意志があることを、再度表明している。

<文献：2-3 2-アルキルシクロブタノンに関する研究および評価>

1) 研究文献等

A. BFE で実施された初期の実験

- ① Delincée H. (1998) Genotoxic properties of 2-dodecylcyclobutanone a compound formed on irradiation of Food containing fat. *Radiat. Phys. Chem.*, **52**, 39-42.
- ② Delincée H. et al. (1999) Genotoxizität von 2-Dodecyl-cyclobutanon., In '5 Deutsche Tagung Lebensmittelbestrahlung' (Knörr M. et al. eds.), Karlsruhe, 11-12 November(1998), Berichte der Bundesforschungsanstalt für Ernährung, Karlsruhe, BFE-R--99-01, 262-269. (public citizen 英訳)

B. 独仏プロジェクト研究レポート

<オリジナルレポート>

- ③ Burnouf D. et al. (2002) Etude toxicologique transfrontalière destinée à évaluer le risque encouru lors de la consommation d'aliments gras ionisés - Toxikologische Untersuchung zur Risikoberwertung beim Verzehr von bestrahlten fetthaltigen Lebensmitteln - Eine französisch-deutsche Studie im Grenzraum Oberrhein, Rapport final d'étude Interreg II, projet No 3171.

<公表論文>

- ④ Delincée H. et al. (2002) Genotoxicity of 2-alkylcyclobutanones, markers for an irradiation treatment in fat-containing food - Part I: cyto-and genotoxic potential of 2-tetradecylcyclobutanone, *Radiat. Phys. Chem.*, **63**, 431-435.

- ⑤ Raul F. et al. (2002) Food-borne radiolytic compounds (2-alkylcyclobutanones) may promote experimental colon carcinogenesis *Nutr. Cancer.*, **44** (2), 88-191.
- ⑥ Horvatovich P. et al. (2002) Detection of 2-alkylcyclobutanones, markers for irradiated foods, in adipose tissue of animal fed with these substances *J. Food Prot.*, **65**(10), 1610-1613.

<Meeting Abstract>

- ⑦ Delincée H. et al. (2001) Genotoxicity of 2-alkylcyclobutanones, markers for an irradiation treatment in fat-containing food II, Cyto- and genotoxic potential of 2-tetradecenyl-cyclobutanone, Poster presented during the European Environmental Mutagen Society (EEMS) GUM Meeting, Karlsruhe Germany, 25-28 September. (Abstract published in Conference Program and Abstracts, p73, 2001.)
- ⑧ Delincée H. et al. (2002) Cyto- und Genotoxizität von 2-Alkylcyclobutanonen, Poster presented during the 39, Meeting of the German Nutrition Society, Jena Germany, 14-15 March. (Abstract published in *Proc. Germ. Nutr. Soc.*, 4, 31-32, 2002.)
- ⑨ Pelzer A. et al. (2001) Induction of oxidative DNA damage by cyclobutanones generated by irradiation of fat-containing food, Poster presented during the European Environmental Mutagen Society (EEMS) GUM Meeting, Karlsruhe Germany, 25-28 September. Abstract published in Conference Program and Abstracts, p74, 2001.

<情報、サマリー コメント (独仏研究プロジェクト) >

- ⑩ Marchioni et al. (2002)"Information about the potential toxicity of 2-alkylcyclobutanones, a group of substances exclusively formed upon irradiation of food containing fat"
<http://www.iaea.org/programmes/rifa/icgfi/documents/summary-press.pdf>
- ⑪ Burnouf D. et al. (2002) Comment on a statement of the SCF on a report on 2-alkylcyclobutanones.
- ⑫ Marchioni E. et al. (2004) Toxicological study on 2-alkylcyclobutanones—results of a collaborative study, *Radiat. Phys. Chem.* **71** (1-2), p147-150.

C. 米国の遺伝毒性試験

- ⑬ Sommers C. H. (2003) 2-Dodecylcyclobutanone does not induce mutations in the Escherichia coli tryptophan reverse mutation assay, *J. Agr. Food Chem.*, **51**, 6367-6370.
- ⑭ Sommers C. H. et al. (2004) 2-Dodecylcyclobutanone does not induce mutations in the Salmonella mutagenicity test or intrachromosomal recombination in Saccharomyces cerevisiae, *J. Food Prot.*, **67**, 1293-1298.
- ⑮ Gadgil P. et al. (2004) Mutagenicity and Acute Toxicity Evaluation of 2-Dodecylcyclobutanone, *J. Food Sci.*, **69**(9), 713-715. (抄録)

2) 国際機関 政府機関のレビュー コメント

- ⑯ ICGFI : Peer Review on the Dr. H. Delincée's Report on the genotoxicity of 2-Alkylcyclobutanone, 16th Annual Meeting of ICGFI Agenda Item 4 Room Doc No 4. ICGFI: (1999 年までの Dr Delincée のレポートに関して)
- ⑰ The European Committee : Statement of the Scientific Committee on Food on a Report on 2-alkylcyclobutanone

http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/scf/index_en.html

- ⑮ WHO : WHO Statement on 2-Dodecylcyclobutanone and Related Compounds. March 2003
(19th ICGFI 総会参加メンバーに配信) 2005 年 IAEA 訪問時にも WHO の公式見解として入手
- ⑯ Health Canada: Evaluation of the Significance of 2-Dodecylcyclobutanone and other Alkylcyclobutanones
http://www.hc-sc.gc.ca/food-aliment/fpi-ipa/e_cyclobutanone.html

照射した糖液の変異原性に関する研究

純粋な糖を照射した時に変異原性物質が生成することが報告され、これまでに多くの論議を呼んできた。この問題については様々な追試が実施され、実際の食品中においては変異原性を消失する成分が存在したり、マウスやラットを用いた実験では体内代謝によって変異原性を消失したりすることが報告されている。

純粋なブドウ糖溶液を照射すると変異原性物質が生成され、サルモネラ菌に細胞毒性を生じ (Schubert 1971)、サルモネラ菌を用いたエームス試験で変異原性物質が検出できる (Wilmer ら 1981)。また、ヒトのリンパ細胞に照射したショ糖溶液を加えると、染色体の切断が起こるとの報告 (Shaw ら 1966) や、照射したブドウ糖がキイロショウジョウバエに突然変異を起こさせるとの報告 (Rinehart ら 1965) もある。

しかし、ブドウ糖を溶液 (Aiyar ら 1977、Munzner ら 1975) で照射しても、乾燥状態 (Varma ら 1982a, 1985, 1986) で照射しても、マウスやラットを用いた試験では、変異原性を示さなかった。

Niemand は照射グルコース溶液にマンゴジュースを添加すると変異原性が低下することを報告した。なお、Den Drijver らは、成分分析の結果、照射果実や果汁成分の照射の際には、放射線分解生成物質の生成がほとんど見られないと報告している (Den Drijver 1986)。

日本においては、日本アイソトープ協会が実施した照射食品の健全性試験で、照射グルコース溶液の変異原性に関する研究が取り上げられ、照射によって誘発される変異原性はジュースなどの添加や生体内代謝で軽減化されることが示された。

糖の変異原性に関する研究文献を表 2-5-7 にまとめた。

<参考文献：照射糖液の放射線分解生成物の生成に関して>

- 1) Basson R. A. et al. (1979) A Radiation Chemical Approach to the evaluation Of The Possible Toxicity Of Irradiated Fruits Part 1 The Effect of Protection By Carbohydrates Food Chemistry, **4(2)** 131-142.
- 2) den Drijver L. et al. (1986) High-performance liquid chromatographic determination of D-arabino-hexos-2-ulose (D-glucosone) in irradiated sugar solutions. Application of the method to irradiated mango, *J. Agruc. Food Chem.*, **34**, 758-762.

表2-5-7 照射した糖溶液（糖結晶）の変異原性に関する研究論文

食品の種類	研究の対象	線量	処理条件	コメント	著者/参考文献	
ショ糖溶液: (20%)	ヒト リンパ球 24h および 72h 処理	20kGy	コバルト60, 2% 溶液、 20%濃度で照射 数ヶ月間、 室温か 5℃で保管し、使用前 に塩水で希釈	影響あり ヒトリンパ球培養細胞で染色体切断。純粋炭水化物溶液の放射線 化学的变化に起因する。(分解物の)濃度は酸化物の濃度に応じ て増加する。	Shaw 1966	94T 150 (99-391)
培養液 (ショ糖)	ショウジョウバエ 12 日間 優性致死率、 伴性致死率、 F3 世代の致死率	1.5、 5.0、30 kGy	エックス線 (25 MeV 電子 (600 mA) タングステンコンパ ータ、) 10kGy /min; (低線 量照射、250kVp と 15mA50Gy/分の条件)	優性致死:F1 の生存の減少がない。F3 伴性致死効果が増加。伴 性劣性致死効率が全ての線量で一貫してわずかに(2 倍程度)増 加した。検出可能な線量依存性はなし。投与前に照射食品を保管 することは伴性劣性致死を減少させた。F3 の致死率はエックス線 照射とコントロール間で有意差はなかった。	Rinehart 1965	94T 142 (99-419)
培養液、ショ糖 (30%)、 DNA	ショウジョウバエ 伴性劣性致死試験	1.5, 5, 30kGy	エックス線 (25 MeV 電子 (600 mA) タングステンコンパ ータ、) 10kGy /min; ルーサ イト小瓶中、照射直後か 3 週 間後使用;媒体で 10%希釈	照射の影響なし オートクレーブしたショ糖か DNA 培養液は、変異原性の誘発作用 有り(照射されてもされなくても)。オートクレーブしないショ糖は変 異原性の誘発作用なし。	Rinehart 1967	94T 143 (99-420)
ショ糖溶液	ソラマメ 染色体異常試験	20kGy	5.5krad/min 照射後 pH を調整	影響あり。純粋炭水化物溶液の照射で誘発された化学(変化)に 起因する染色体変化。	Bradley 1968	94T 021) (99-392)
ショ糖溶液	サルモネラ菌 LT2 細胞毒性	20kGy	100Gy/min	酸素飽和状態で照射したショ糖溶液に細胞毒性(が認められた。 H ₂ O ₂ の影響ではない。	Schubert 1967	94T 147)
ショ糖溶液	細胞毒性 Sallmonella typhimurium LT2	1-50kGy	コバルト60, 6.7krad/min 25℃ 嫌気条件	pH 調整せず嫌気条件で照射したショ糖溶液でサルモネラ菌の生 育阻害が線量に依存して観察された。照射後に溶液をオートクレー ブすること、さらに阻害が拡大。照射によるショ糖溶液中のカル ボニル化合物の濃度とサルモネラ菌の初期倍加時間(世代時間) との間に直線関係を確認。ブドウ糖、D-フルクトース、D マンノ ース、L-ラムノース、D ガラクトースおよび D フコースを照射してオート クレーブした場合にもショ糖と同程度の生育阻害。(照射によって 生成したカルボニル化合物の特性を分析し、糖のエノール化を介 したα、β不飽和カルボニル化合物の生成が示唆された。)	Schubert 1971	F10506

ショ糖溶液 (10%)	ラット肝臓細胞 (in vitro)および ラット (in vivo)	5kGy	コバルト60, 14.5 krad 室温照射 -18℃で2-3週間貯蔵 pH 調整	①ラット肝細胞スライスの代謝活性に対する照射ショ糖の影響 (in vitro) および②14-C ラベルショ糖溶液を照射後ラットに経口投与しトレーサー実験 (in vivo)①照射糖液の分画成分は、コハク酸酸化、ミトコンドリアの共役的リン酸化反応を阻害。脂質、タンパク質、DNA の合成阻害。無酸素下、凍結状態での糖液の照射では毒性が低下②ショ糖液を8週間経口投与したラットでは有害な影響なし。14-C ラベルしたショ糖液の投与実験は、照射分解生成物のラット体内での速やかな代謝を示唆。	De 1969	Q34-07
ショ糖、リボース 溶液	サルモネラ菌 変異原性	20kGy	コバルト60, 4.5 kGy/h; 空気中、N ₂ 10分で密閉; ドライアイス; 25週間まで6-8度で保管	影響あり 純粋炭水化物溶液の放射線誘導化学(変化)に起因する変異原の誘発作用有り。変異原性は照射後糖溶液を保存すると低下。 宿主経路試験では、復帰突然変異体の増加はない。	Aiyar 1977	94T 001) (99-393)
	マウス (宿主経路試験)					
リボース、 2-デオキシリボース	サルモネラ TA100,TA98、(エームス試験)	10kGy	0.13kGy/min N ₂ ,O ₂ または N ₂ O 飽和	照射した糖類に変異原性 サルモネラ TA100 においては、照射によるマロンアルデヒド以外のアルデヒド (non-MDA) の生成量と照射2-デオキシリボースの変異原性との間に相関が認められた。照射した2-デオキシリボース溶液を加熱すると変異原性は減少した。非照射の2-デオキシリボース溶液をオートクレーブしても変異原性は認められなかった。	Wilmer 1981	94T 186)
ショ糖、果糖、ブドウ糖、麦芽糖溶液、およびモデルマンゴ	サルモネラ菌	5-50kGy	コバルト60, 17 kGy/h; 密封されたアンプル、 O ₂ 高濃度下, 25℃	影響あり 供与5菌株のうち1つの菌株(TA100)において、純粋な照射糖液に変異原性がみられた。複合形のモデルであるマンゴの系では変異原は誘発されない。また、グルコース溶液にマンゴ(ジュース)を加えると照射糖液の変異原性が減少した。	Niemand 1983	99-383
動物飼料(糖液)	マウス 9-45日 宿主経路試験	45kGy	電子線	宿主経路試験。変異原性の誘発作用なし。 30日経過後、水のかわりに照射グルコース溶液。 サルモネラ・ティフィムリウムのヒスチジン栄養要求菌株での照射食品の変異原性活性はなかった。	Munzner 1975	94T 109) (99-416)

ブドウ糖(結晶)	マウス スイス系 7 日 および 8 週間	2, 5, 20, 50kGy	コバルト60, 57 Gy/min; ポリエチレンバッグ、大気下、 25℃	影響なし 結晶状態の糖を照射 10%溶液として経口投与、優性致死試験にお いて変異原性の誘発作用なし。	Varma 1982a	99-398
ブドウ糖(結晶)	ショウジョウバエ 伴性劣性致死試験	2, 5, 20, 50kGy	コバルト60, 57 Gy/min; ポリエチレンバッグ、大気下、 25℃	影響なし 伴性劣性致死の頻度はどの線量においても変化せ ず。変異原性の誘発作用なし。	Varma 1982b	99-399
ブドウ糖(結晶)	マウス スイス系(グループ 毎に 6 匹)	0.2, 2.0, 20, 50kGy	コバルト60, 57 Gy/min; ポリエチレンバッグ、大気下、 25℃	影響なし 宿主経路試験。変異原性の誘発作用なし。	Varma 1985	99-400
ブドウ糖(結晶)	マウス スイス系 小核試験	0.2, 2.0, 20, 50k Gy	コバルト60, 57 Gy/min; ポリエチレンバッグ、大気下、 25℃	影響なし 骨髄細胞における小核試験と染色体異常試験を含む。体細胞、 生殖細胞における変異原性の誘発に関する作用なし。	Varma 1986	94T 174) 99-401)
ブドウ糖、フルク トース、ショ糖 (1%)	サルモネラ TA104 (エームス試験)	5-30kG y	コバルト60, 試験管中	サルモネラ菌 TA104 を用いてエームス試験を行うと線量に依存し た復帰突然変異のコロニーが増加した。線量に依存し、糖液中の ジカルボニル化合物が増加した。照射グルコースの変異原性は野 菜や果実のジュース添加で軽減された。	川岸 1992	TJ-30
ブドウ糖 (1-30%)	サルモネラ菌 (復帰突然変異) CHL 細胞 (染色 体異常試験) マウ ス(小核試験)	10 kGy (5-30k Gy)	コバルト60, 118.6Gy/min～ 143.2Gy/min 試験管中	復帰突然変異試験および、染色体異常試験で照射糖液の変異原 性が認められた。変異原活性は S-9 ミックスの添加により減少また は消滅し、生体成分による不活性化が示唆された。マウスによる小 核試験の結果は陰性であった。照射グルコースによる染色体異 常誘発はマンゴジュースの添加によって完全に抑制。	祖父尼 1992	TJ-31
ブドウ糖(1%)	サルモネラ菌 TA98, TA100, TA102, エームス 法および Niemand 法	0.01-20 kGy	コバルト60, 通気条件および試験管中	エームス法(プレインキュベーション法)では変異原性は検出され なかった。Niemand らの方法(糖液と菌液を1:1で混合し 37℃で 数時間プレインキュベーション)10kGy 照射糖液で、TA100、およ び TA102 株に変異コロニー数の増加が認められた。S-9 ミックスの 存在下では変異原性は減少した。	坂本 1992	TJ-32
ブドウ糖溶液 (培養液中で 1%)	細胞毒性 E. coli A4-1 and S2 B. subtilis IAM1069 S. cerevisiae	16kGy	コバルト60, 4.0kGy/h; 酸素飽和および通気状態	S.cerevisiae の生育に照射の影響なし。E.coli は、酸素飽和した培 養液の照射で生育速度低下。B.subtilis の著しい生育阻害が酸素 飽和の照射で認められた。微生物の生育阻害は培養液の pH 低 下によると考えられ、照射後の培養液の pH を 7.0-7.2 まで中和す ると B.subtilis の生育阻害は観察されなかった。	伊藤 2003	FI0362

照射小麦による倍数性の変化に関する研究

照射小麦粉を動物に長期間与えると倍数性細胞（ポロプロイド）を誘発するという報告、また栄養失調の子供に照射小麦を与えると倍数性細胞が高くなるという報告があることから、この問題は遺伝毒性試験の中でも論議を呼び、多くの追試験が実施された。また政府機関の評価でもこの問題は取り上げられた。論議になった文献をまとめた。

この問題の論争は、1970年代のインドでの報告が起点になっている。Bhaskaram (1975)は、新鮮な照射小麦(0.75 kGy)を4～6週間(42日)摂取した栄養不良のインドの子供のリンパ細胞に倍数性の誘導について報告した。その場合、照射後数週間保存した小麦においてはこの結果は確認されなかった。その後、ラット、マウスおよびサル(Vijayalaxmiら 1975, Vijayalaxmi 1975, Vijayalaxmi 1976, 1978)に同様の結果が報告された。また、Renner (1977)は、10～100kGy照射して滅菌した飼料を与えたチャイニーズハムスターの骨髄細胞について検討した。染色体の構造的な異常に関する影響は観察されなかったが、45kGy照射した飼料を24時間投与した時に倍数細胞が4～5倍増加した。この試験では、非常に高い線量が照射されたが、30～100kGyの線量範囲では、倍数細胞の出現率の線量依存性は認められなかった。

その後の動物実験 (Georgeら 1976, Reddiら 1977, Teshら 1977)では、これらの結果を追試することができないとされている。さらにラット、チャイニーズハムスター(田中ら 1992)の研究において、照射小麦の摂取による倍異数性細胞の増加は示されなかった。また、細胞数を増加させて実験を行ったスイスのグループ(Maierら 1993)も、照射小麦を摂取している90日間に倍数性細胞の蓄積はないとして照射小麦の消費がヒト健康の危険をもたらさないと結論を下している。

オリジナルデータの文献の内容を(表2-5-8)に整理した。なお、この問題に関する参考文献、解説を以下に挙げる。

<参考文献：照射小麦の倍数細胞関連> (総説,解説)

- 1) 田中憲穂(2004) 照射食品の生物学的安全性評価, FFI Journal, **209(12)** 1079-1087.
- 2) Vijayalaxmi et al. (1989) A review of the studies on the wholesomeness of irradiated wheat, conducted at the national Institute of Nutrition India, *Radiat.Phys, Chem.*, **34(6)** 941-952.
- 3) Frohberg H. et al. (1975) In vivo cytogenetic investigation in bone-marrow of rats, Chinese hamsters and mice treated with 6-mercaptopurine, *Archives of toxicology* **33**, 209-224. (倍数細胞自然発生率と薬剤による誘発に関する考察)
- 4) Armendaraz M et al. (1971) Chromosome abnormalities in severe protein calorie malnutrition, *Nature*, **232**, 271-273. (低栄養と倍数細胞自然発生率に関する考察)
- 5) 放射線利用振興協会：照射小麦摂取による染色体異常誘発の可能性, 放射線利用技術試験研究データベース <http://www.rada.or.jp/database/home4/normal/ht-docs/member/synopsis/020234.html>

表2-5-8 照射小麦の倍数性細胞（倍数細胞）の変化に関する論文

食品の種類 (飼料中の%)	研究の種類 /期間	線量	処理条件	コメント	著者/参考文献	
小麦 (照射直後および 照射後保存)	ヒト 摂食試験 42日間	0.75 kGy	コバルト60 アルミニウム のコンテナ 0.75 kGy/h	3つのグループ試験; ①.照射直後の小麦,②.照射後保存した小麦 ③非照射の小麦 照射直後の小麦を食べた子供は、4人に倍数細胞が観察された。(0.8% at 4週間、1.8% at 6週間)照射後保管しておいた子供は①の子供に比べ倍数細胞の数は非常に少なく、③の子供にはほとんど観察されなかった。	Bhaskaram (1975)	94T 017)
小麦(70%) 照射20日後	ラット 12週間	0.75 kGy	コバルト60 アルミニウム のコンテナ 0.75 kGy/h	低蛋白質(5%)および蛋白質量(18%)の飼料群において、照射小麦の影響を調べた。低蛋白質のみの影響で、染色体の切断や欠失が増加、照射はこのような染色体異常に関与しない。照射小麦を与えた動物で蛋白質のレベルに関わりなく倍数細胞が増加する。照射小麦を3カ月間貯蔵すると、照射の影響は観察されなかった。この試験で、対照動物の倍数細胞の出現率は、0～0.05%であった。照射飼料での倍数細胞の出現率は0.4～0.7%に上昇。ただし倍数細胞の数は少なく、これらの結果は、統計学的に、他の研究者が正常なラットの骨髓細胞で観察している範囲内。	Vijayalaxmi (1975a)	94T 180)
小麦(70%) 照射20日後	ラット 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12週間	0.75 kGy	コバルト60 0.75 kGy/h	上記実験条件で、倍数細胞出現率のタイムコースをとった。染色体の損傷の発生率の増加は観察されなかったが、倍数細胞が経時的に増加。	Vijayalaxmi (1975b)	94T 176)
小麦(70%) 照射後 15-18 日以内 照射後3ヶ月貯蔵	マウス 12週間	0.75 kGy	コバルト60 アルミニウム のコンテナ	2匹のマウスからなるグループに、照射後20日および3ヶ月貯蔵の小麦を与え骨髓細胞の染色体を分析した。照射直後の小麦を与えられた2匹のマウスは、倍数細胞の出現率が増加。照射後に貯蔵した小麦を与えたマウスでは、倍数細胞の出現率の増加は観察されなかった。	Vijayalaxmi (1976a)	94T 177)
小麦(70%) 照射後20日以内 12週間貯蔵	サル 4および10ヶ月	0.75 kGy	コバルト60 アルミニウム のコンテナ 0.75 kGy/h	3つのグループ試験 1.非照射の小麦 2.照射直後の小麦 3.照射後保存した小麦 照射直後の小麦を食べたサルにおいて倍数細胞の増加が観察された。1. 86% 10ヶ月 照射後保管しておいた小麦を食べたサルでは倍数性の増加は認められなかった。照射コムギの食餌を切り替えると倍数性細胞の頻度は7ヶ月後にはコントロールのレベルに低下した。	Vijayalaxmi (1978)	94T 178)

実験動物用飼料: ペレット	チャイニーズハムスター 42日間	45kGy	10 MeV 電子線; 解放系アルミニウムトレー	3つのグループで試験 1.コントロール(非照射)m=25, 2.照射(6週間)n=26 3.照射(1日絶食後1日)n=25 染色体異常(構造異常)の増加はみられなかったが、45kGy照射した飼料を投与した時、24時間以内に倍数細胞が増加した。照射食品の投与を中止したとき、倍数細胞は最大6週間以内に通常レベルに戻った。また、照射後、投与前に6週間保管したら倍数細胞は増加しなかった。	Renner (1977)	94T 137) (99- 417)
小麦(70%) 実験2はグループ 毎に割合を変える	ラット 56日間	0.75 kGy	コバルト 60 3.0 krad/min 6.3 krad/min	骨髄における倍数細胞の発生頻度は非照射・照射小麦の違いはなく、照射後24時間以内にラットに与えた時でさえ、違いはなかった。	George (1976)	94T 062)
小麦粉(70%)	ラット 84日間 食物摂取量、 倍数細胞、 小核細胞、 優性致死試験	0.75 kGy	コバルト60、 ガンマ線 Air 雰囲気下 0.75 kGy/hr	食物消費量、体重変化、死亡率に対する処理食品の影響はなかった。倍数細胞の数だけでなく、倍数細胞を示すラットの数もまた照射小麦粉の影響を受けなかった。同様に小核細胞の発生もテストダイエットの影響を受けなかった。優性致死試験も繁殖か卵子受精、受精卵の発育、生存に対して照射小麦の悪い影響を示さなかった。	Tesh (1977)	94T 158' (94T 158 1980)
小麦粉(60%)、	マウス 360日間 優性致死試験、染色 体再構成試験、	0.2、 2 kGy	コバルト 60 1.12-1.26 krad/min	a.コントロール普通の餌 b.照射小麦(0.2 kGy) c.照射小麦(2 kGy) 優性致死試験・特異座突然変異試験・オスの染色体再構成試験・生殖細胞生存率試験の結果は、遺伝学的・細胞遺伝学的影響を示さなかった。	Reddi (1977)	94T 136)
小麦 (33%) (新鮮な状態で照射した)	チャイニーズハムスター (72時間) ラット(12週間)	0, 7.5, 15, 30 kGy (ハムスター) 0.75kGy (ラット)	コバルト 60; N2, 空気中	食餌がN ² か空気中で照射された後72時間では、チャイニーズハムスターの骨髄細胞の中の倍数細胞、網状赤血球の小核形成に差はなし。 0.75kGyで照射した小麦粉を6週間と12週間与えたラットの末梢血での小核の分析。	田中 (1992)	99- 413
小麦 (70%)	マウス 90日間	0.25、 0.75、 2.25 kGy 0.97-1.0 1kGy/h	コバルト 60;	骨髄細胞および肝臓細胞の倍数性およびフローサイトメトリーによる細胞周期の分析の結果、骨髄細胞における0.6%までのG2/M-期の増加、および肝臓細胞の1.1%までの8C核の減少が認められた。この研究で観察された変化では、90日間の摂食中に倍数性細胞の蓄積は認められなかった。観察された細胞周期と倍数性に対する小さな影響は、食事制限の影響として解釈することができる。照射小麦の消費が人間に健康の危険をもたらさないことが結論される。	Maier (1993)	FI073 8

照射バレイショのアルコール抽出物の変異原性に関する研究

ソ連のKopylovらは、バレイショのアルコール抽出物がマウスの生殖細胞に対して変異原性を示すとの論文を公表した。このとき照射バレイショ中に生成する物質をラジオトキシンと命名し、その存在が植物性の照射食品の実用性を損ねると指摘した(Kopylov 1972)。

この問題は論議を呼び、いくつかの追試がなされた。I F I Pプロジェクトの中で、カナダのBio Research LaboratoryのLevinskyらが、ソ連の研究者の抽出法を再現して実施した優性致死試験では、異常は認められなかった(Levinsky 1973, 1975)。またバレイショ（加熱）およびバレイショ抽出物を用いた優性致死試験では、照射による異常は認めらず、さらに、5世代のわたる慢性毒性および繁殖試験を実施しても異常は認められなかった。(Zajcev 1975)。これ以外の研究グループが実施した優性致死試験以外の染色体異常試験や小核試験の結果においても、照射による影響は認められなかったとしている(Hossain 1976, Zaitsev 1978)。

日本においても、原子力特定総合研究において、照射バレイショのアルコール抽出物を用いた変異原性試験が実施されている。これらの試験では、抽出物の精製法をソ連の研究者の方法に習って実施し、その分析を実施したほか、優性致死試験、復帰突然変異、プロフェージ誘導試験、染色体異常試験、小核試験など様々な変異原性試験を実施し、いずれの結果においても照射による悪影響は認められなかったとしている(Shinozaki 1981, Shibuya 1982, Ishidate 1981)。

バレイショ（抽出物）の変異原性に関する研究文献を表2-5-9にまとめた。

<参考文献>解説等

- 1) 戸部満寿夫 他(1991) 照射馬鈴薯の安全性「食品照射の効果と安全性」、監修： 藤巻正生、(財)日本原子力文化振興財団、p68-70.

表2-5-9 照射バレイショ抽出物の変異原性に関する論文

食品の種類	研究の種類/期間	線量	処理条件	コメント	著者/参考文献	
バレイショ(アルコール抽出物) 品種(Lorkv 種)	マウス 優性致死試験	0.1kGy	セシウム 137 (549 R/min) 照射 24 時間0~4℃保存2時間、95%エタノール(pH2.0)抽出、濃縮物=ラジオトキシン	照射 24 時間後、0-4℃で2時間冷却し、-5℃で95%エタノール中でpH=2.0の条件で120分ホモジナイズし、攪拌抽出した。これをろ過後、アルコールがなくなるまでアルゴン気流下で濃縮し、フラスコ中に密封した。(この抽出物をラジオトキシンとした)この濃縮試料をもちいて優性致死試験を実施したところ経口投与後、1,3,5、週後の着床後の死亡胚の出現率が、21.5、22.2、21.1%に増加した。一方対照のそれは、1.7、1.7、2.1%であった。以上から、照射バレイショのアルコール抽出物がマウス生殖細胞に優性致死突然変異を誘発すると結論した。	Kopylov 1972 (露語)	R-1
同上	上記ラジオトキシンの化学分析	同上	同上	ラジオトキシン(濃縮物)の分析(ペーパークロマトグラフィー、およびカラムグラフィーラジオトキシンをオルトキノン類と報告。	Kuzin 1974 (露語)	R-2
バレイショ(アルコール抽出物) 品種(Lorkv 種)	マウス(生殖細胞)	0.1kGy	セシウム 137 (540R/min) 照射 24 時間、40 日、90 日後に抽出	照射後保存(40 日、90 日)または調理(加熱)により雄マウスの生殖細胞への変異原性は消失する。	Osipova 1974 (露語)	94T 114)
バレイショ(アルコール抽出物) 品種(Lorkv 種)	ラット骨髓細胞 染色体異常試験	0.1kGy	セシウム 137 (540R/min) 照射 24 時間、1、4 ヶ月後に抽出	生のバレイショ抽出物による変異原性(染色体異常)は、バレイショの貯蔵および加熱により減少。	Osipova 1975 (原文露語)	94T 115)
バレイショ(アルコール抽出物) 品種 (Katahdin)	マウス 7 日間 優性致死試験	0.123kGy	コバルト 60 (55rads/min) 照射後 0-4℃で1夜貯蔵、24時間以内に抽出	皮付きバレイショを95%エタノール(pH2.0)中でホモジナイズを行ない、-5℃にて120分間攪拌した。その後アルコール分画を取り出し、アルコールが完全に除去されるまで20℃でロータリーエバポレーターで濃縮、アルゴンガス置換により酸素を除去。この濃縮液をマウスに投与し、優性致死試験を実施。妊娠率、着床数、初期および晩期の致死数に有意な差はなく、照射による変異原性は認められなかった。	Levinsky 1973 IFIP レポート)	94T 090)
					Levinsky 1975 IFIP 内容の論文化	94T 089)

バレイショ (蒸煮)	ラット 優性致死試験	0.2kGy (ガンマ) 0.3kGy (電子)	コバルト 60 7.4rad/s) 電子線 (500rad/s) 照射後 3 ヶ月貯蔵、	照射、貯蔵後のバレイショを加熱して 10g/dayで投与。ガンマ線照射、電子線照射試料いずれも優性致死率の有意な増加は認められず。	Zajcev 1975	94T 189)
(アルコール抽出物)	マウス 7 日 優性致死試験	0.1kGy	コバルト 60 (11.7rad/sec) 40 および 90 日貯蔵、 加熱後抽出	優性致死試験の結果、照射 40 日後、90 日後のバレイショからの抽出物ともコントロールとの間に死亡着床数に有意差なし。		
(蒸煮)	ラット 慢性毒性 世代試験 (5世代)	0.3kGy	電子線	生存率、血液タンパクレベル、酵素活性、臓器重量、発ガン性、繁殖製について照射による毒性効果を認められず。		
バレイショ(生)	マウス 5 日間 (骨髄細胞) 染色体異常試験	0.1kGy	コバルト 60 0.1kGy 照射 24 時間 後、生および調理	非照射のバレイショを投与した場合と比較して、染色体異常 (架橋、切断) の頻度に有意な増加は認められず。	Zaitsev 1978	FI0745
バレイショ(アルコール抽出物)、 クロロゲン酸、	ラット 骨髄細胞 (小核試験)	0.1kGy	電子線 (10MeV)	照射直後および 24 時間後のバレイショ抽出物、および照射クロロゲン酸を用いた小核試験の結果はいずれも陰性。	Hossain 1976	FI0491
バレイショ(アルコール抽出物) 品種:ダンシク	照射バレイショ抽出 物の遺伝毒性試験 (日本) の試料の調 製と分析	0.15kGy	コバルト 60 (H); 450Gy/h, (L); 57Gy/h 照射後 24h4、24℃	ラジオトキシンについて報告した Kuzin の方法に従ってアルコール抽出を実施。バレイショから得られた最終濃縮液は pH=3~4 で、Kuzin によって報告された、“ラジオトキシン” に相当する α -キノン類は、HPLC およびペーパークロマトグラフのいずれによっても検出されなかった。	Shinozak i 1981	FI0489
バレイショ(アルコール抽出物) 品種:ダンジャク	優性致死試験マウス(BDF1) 7 日 (1 日 2 回経口投与)	0.15kGy	高線量率 (H); 450Gy/h,	優性致死試験の結果: 陰性、陰性対象 (蒸留水)、陽性対照 (ジメチルベンゾアントラセン)、非照射および照射バレイショ抽出物を 9 週齢の雄マウスに投与し、4 日間隔で 56 日間交配した。交配期間の全てにおいて、非照射群および照射群とも対照と比較して有意な生存着床数の減少は認められなかった。	Ishidate 1981	FI0245
バレイショ(アルコール抽出物)	サルモネラ菌 (復帰突然変異) E. coli (プロファージ誘導試験) CHL 細胞 (染色体異常試験) マウス (小核試験)	0.15kGy	高線量率 (H); 450Gy/h, 低線量率 (L); 57Gy/h	サルモネラ菌を用いた、ヒスチジン要求性並びにストレプトマイシン依存性に関する復帰突然変異の結果は陰性。プロファージ誘導試験の結果は陰性。ほ乳類培養細胞を使った染色体異常試験の結果およびマウスを用いた in vivo 小核試験の結果も全て陰性。アルコール抽出物による変異原性は認められなかった。	Shibuya 1982	FI0485

照射香辛料に関する毒性学的研究

香辛料類の放射線照射は、実用化が最も進んでいる。香辛料類に関しては、香辛料に元来存在する成分の影響も考慮に入れないと毒性試験の解釈が難しくなる。I F I Pにおいてはハンガリーを中心に研究が進められた。この概要と経過は、Food Irradiation Information (Barna 1975, Farkas 1975, FAO/IAEA 1977)にまとめられている。このプロジェクトで扱った香辛料はスパイスミックス（パプリカ55% 黒コショウ14%、オールスパイス9% コリアンダー9%、マジョラム7%、クミン4%、ナツメグ2%の割合で混合したもの）、黒コショウおよびパプリカの3つに大別される。予備試験として非照射のスパイスミックスを2～25%の割合で混合した食餌をラットに食べさせ実験が可能な混合比を検討したところ、摂食量の低下と生育速度の低下が認められ、特に高含量のスパイスミックスを与えたラットの体重減少が起こった。そこで、当初の長期投与試験の計画が見直され、短期間の遺伝毒性（変異原性試験）と化学分析による成分変化を中心に研究がまとめられた。その他の研究グループの実験として、オニオンパウダーやパプリカの変異原性試験が実施されている。また、最近では、韓国で香辛料、生薬類を使った遺伝毒性試験が実施されている。日本においても日本ラジオアイソトープ協会の実施した照射食品の健全性試験プロジェクトの中で、コショウ、赤トウガラシ、パプリカ、ナツメグの変異原性試験（エームス試験）が実施されている。

香辛料類の毒性学のおよび成分変化に関する文献については、いくつかの総説（ICGFI 1992, Schuettler 1984, 1992）にも解説されている。

香辛料の毒性研究に関して収集できたオリジナル論文の内容をまとめた（表2-5-10）。

<参考文献> 総説等

- 1) Barna J. (1975) To Study the wholesomeness of irradiated spice, *Food Irradiation Information*, **4**, 48.
- 2) Anon (1977) Spices-a new approach, *Food Irradiation Information*, **7**, 67-68.
- 3) Farkas J. (1975) Progress in Food Irradiation, *Food Irradiation Information*, **4**, 11.
- 4) Schuettler C. et al. (1990) (Chemical, sensory and toxicological studies on irradiated spices. I. Review.) *Fleischwirtschaft*, **70** (4), 431-436, 439-440.
- 5) Schuettler C. et al. (1984) Irradiation of spices-chemical, sensory, microbiological and toxicological (Bundesgesundheitsamt, Berlin. Inst. fuer Strahlenhygiene.)
- 6) IAEA (1992) Irradiation of spices, herbs and other vegetable seasonings A compilation of technical data for its authorization and control (IAEA Tec DOC 639). International Consultative Group on Food Irradiation Vienna IAEA Tec DOC 639.

表2-5-10 照射香辛料、ハーブ、生薬類の毒性に関する研究論文

食品の種類 (飼料中の%)	研究の種類 /期間	線量	処理条件	コメント	著者/参考文献	
スパイスミックス* 2～25%	ラット 18ヶ月	照射なし		動物投与試験の予備試験として、香辛料ミックスを割合を変えて飼料に配合してラットに投与し、動物実験が実施できる香辛料の量を求めた。摂餌量、摂水量、体重、死亡率を計測するとともに組織病理学的な観察を行った。その結果、香辛料ミックスを2%あるいは5%添加した飼料では香辛料添加の影響は認められなかったが、15%あるいは25%添加した飼料では香辛料の影響が観察され、特に飼育初期における体重の増加が少なかった。香辛料ミックスを飼料に25%添加しても、死亡率への影響は観察されなかった。	Barna 1974 (IFIPR19)	S-05
パプリカ	マウス	50kGy	コバルト60;好 気性、 常温下	宿主経由試験では、復帰突然変異体の増加なし	Central Food Research Institute 1977	99-388 IFIP R44
	サルモネラ菌			変異原性誘発作用なし		
スパイスミックス* (25%): 胡椒 (pep) (3.5%), マイルドなパプリ カ (pap) (25%);	ラット 15日間 催奇形性 繁殖試験	15kGy	コバルト 60 照射週間以内 照射後90日保 存の2種類の 実験	CFY アルビノ雌ラット。処理したグループの子孫に催奇形学的異常なし。照射したブラックペッパーとパプリカを与えられたグループの水腎症の発生のわずかな増加は食餌に関連していないと考えられた。	Eotvos (IFIPR52)	94T 093 (99-337)
スパイスミックス* (25%) 黒コショウ(3.5%)	ラット CFY 6日間	0, 5, 15kGy	コバルト60;好 気性、常温下	NHDIR. ラットの血液による大腸菌プロファージ誘導試験では陰性。	Farkas 1981b	99-411
スパイスミックス* (25%)	サルモネラ菌	15, 45kGy	コバルト 60、 好気性、常温	変異原性誘発作用なし	Farkas 1981a	94T 052 (99-389)
	ラット CFY 6日	5kGy 15kGy	コバルト60;好 気性、常温	照射されたスパイス抽出物と照射されたスパイスが与えられたラットの尿のエーム ス試験陰性		

スパイスミックス* (25%)	ラット SD 系 優性致死試験	15kGy	コバルト 60 0.5 kGy/h NS; 照射 5-9 日後の試 料	NHDIR. 優性致死試験では、照射されたスパイスグループとコントロールで差はなし	Barna 1986	99-412
パプリカ (20%)	マウス スイス系 小核試 験 12日	30kGy	コバルト 60 3.1 kGy/h 照射 8-18 日 後に使用	NHDIR. 小核試験では、小核を有する赤血球の値や、骨髓抑制の指標となる多染性赤血球の比は、全てのグループ間で差はない。	Chaubey 1979	99-410
オニオンパウダー	プロフェージ誘導試験 E.Coli K12 GY 5027 envAuvrB (λ), E.Coli K12 GY 5022 envAuvr ⁺ (λ)	5,10kGy Air	コバルト 60 7kGy/h 照射後4℃貯 蔵3ヶ月	IFIP の香辛料の健全性試験の一環。オニオンパウダーとして 55mg および 22mg に各々相当する抽出物および酵素消化物を用いてプロフェージ誘導試験を実施。陽性コントロールとして用いた aflatoxinB1 (1 μg) streptozotocin (1 μg) の両方は、プロフェージ誘発をしたが、非照射および照射オニオンパウダーにおけるプロフェージの誘導頻度には統計的な有意差はなかった。	Farkas (1982)	FI0287
オニオンパウダー	エームス試験 サ ルモネラ TA 98 お よび TA 100 TA1535 TA1537 TA1538	5,10kGy Air	コバルト 60 7kGy/h 照射後 2-4 週 間4℃貯蔵	オニオンパウダー 水抽出物および酵素消化物によるエームス試験(代謝活性化法)の結果、照射による変異原性物質の誘導は認められなかった。	Farkas 1981C	S-10
オニオンパウダー (10%)	サルモネラ菌	13.6kGy	コバルト 60 常温 金属缶の中に 開封プラスデ ックバック	変異原性誘発作用なし	Münzer 1981	94T 110 (99-387)
	チャイニーズハムスター マウス			姉妹染色分体交換試験では、ハムスターと 3 品種のラットで陰性		
オニオンパウダー (24.5%)	ショウジョウバエ 2 日 伴性劣性致 死	1.5, 9.5, 15kGy	コバルト 60 NS	伴性劣性致死試験で、照射による有意な変化は認められなかった。	Mittler 1982	94T 105)

生薬(ジンセン) (Korean RedG ingseng) エタノール抽出物	エームス試験サルモネラ菌 TA 98 および TA 100 TA102 小核試験 (CHO)	5,10kGy	コバルト60	サルモネラ TA 98、TA 100 および TA 102 の中の復帰突然変異(代謝活性法によるエームス試験)およびチャイニーズハムスターの卵巣細胞の小核テスト。突然変異誘発性は、検知されなかった。Invitro 系での遺伝毒性は示されなかった。	Jo 1997 (韓国語)	FI0606
黒コショウ ナツメグ パプリカ 赤トウガラシ	エームス試験サルモネラ菌 TA 98 および TA 100 TA102	1, 10kGy	コバルト60	4種のスパイスについて超臨界流体抽出物、さらに黒コショウについては、50%エタノール抽出物を調製しエームス試験を実施した。黒コショウのエタノール抽出物および超臨界抽出物のどちらも TA98 に対して代謝活性化法で弱い変異原性を示した。これは、コントロールも含めた全ての試料に見られ、変異原性の強さに対する線量依存性はなかった。赤トウガラシでは非照射の試料で TA98 に対して代謝活性化法で弱い変異原性を示したが、照射試料では見られなかった。	坂本 1992	S-13
カンゾウ (Glycyrrhizae Radix) チンピ (Aurantii Nobilis Pericarpium) サイコ (Bupleuri Radix)	エームス試験サルモネラ菌 TA 98 および TA 100 TA102 小核試験 (CHO)	10kGy	コバルト60	サルモネラ TA 98、TA 100 を用いた復帰突然変異(代謝活性法によるエームス試験)およびチャイニーズハムスターの卵巣細胞の小核テスト。突然変異誘発性は、検知されなかった。	Jo 2001 (韓国語)	FI0510
黒コショウ (サフロール)	サルモネラ菌 TA 98 および TA 100	10,20,30 kGy	コバルト 60 0.8Gy/s	スターアニス、クミン、黒コショウおよびシヨウガ中のサフロールの定量。サルモネラ菌 TA 98 および TA 100 によるエームス試験により純粋なサフロールおよび黒コショウの精油成分に細胞傷害性があることが証明された。黒コショウを洗浄後 70℃ 30min で乾燥するか高線量(20 および 30 kGy)の照射は、黒コショウの中のサフロール含量を 90%以上の低下させた。(照射コショウを用いたエームス試験は実施していない)	Farag (1997)	FI0509

*スパイスミックス：パプリカ 5 5 % 黒コショウ 1 4 %、オールスパイス 9 % コリアンダー 9 %、マジョラム 7 %、クミン 4 %、ナツメグ 2 %

<収集文献一覧> 本調査を通じて収集した毒性試験関連文献の一覧を掲載した。

A. 総説、単行本等

著者	掲載年	表題	雑誌名	巻(号)	頁	文献 ID
Diehl J. F.	1995	Safety of irradiated food. 2nd ed(照射食品の安全性)	(New York,Marcel Dekker.)			
Diehl J. F.	1990	Safety of irradiated food. (照射食品の安全性)	(New York,Marcel Dekker.)			94C 012)
Döllstädt R. et al.	1991	Gesundheitliche Verträglichkeit mit sehr hohen Dosen bestrahlten Tierfutters (独語)	In: Lebensmittelbestrahlung-1, Gesamtdeutsche Tagung. Institut für Sozialmedizin und Epidemiologie des Bundesgesundheitsamtes	1	168-177	99-378
Moutschen J.	1973	La cyto-toxicité et la mutagénicité des aliments irradiés	Food Irradiation Information	2	51-64	FI0503
Brodsky W. Y. et al.	1977	Cell polyploidy: its relation to tissue growth and function	International review of cytology	50	275-332	94T 022)
Luckey T. D. et al.	1973	Apollo diet evaluation: a comparison of biological and analytical methods including bioisolation of mice and gamma irradiation of diet	Aerospace medicine	44	888-901	94T 094)
Fernandez M. et al.	1984	Genetic risk of irradiated food consumption evaluated theoretically and experimentally	Environmental and Experimental Botany	24 (4)	311-319	FI0592
Chanhan P.	1974	Assessment of irradiated foods for toxicological safety - Newer methods -	Food Irradiation Information	3	20-38	FI0513

B. 研究文献（日本で実施した原子力特定総合研究報告書は除く）

著者	掲載年	表題	雑誌名	巻(号)	頁	文献 ID	食品
Blood F. R. et al.	1966a	Feeding of irradiated beef to rats	Toxicology and applied pharmacology	8	235-240	99-318	牛肉
Blood F. R. et al.	1966b	Feeding of irradiated chicken, beef, and pineapple jam to dogs	Toxicology and Applied Pharmacology	8	241-246	94T 019) (99-367)	牛肉 鶏肉 パイナップル(ジャム)
Calandra J. C. et al.	1961	The carcinogenic properties of irradiated foods	Chicago,IL, Industrial Bio-Test Laboratories (USArmy Contract No. DA-49-007-MD-895).			99-350	ビーフシチュー
Clarkson T. B. et al.	1964	The effect of control-ground beef and irradiated 5.58 Megarad-ground beef consumption on reproductive performance in the beagle	US Army,unpublished contract report DA-49-193-MD-2098		CI1-CI10	94T 038) (99-365)	牛肉
Deichman W. B.	1961	Long-term dog and rat feeding experiment employing irradiated milk and beef stew(c-ration)	Final Report. (unpublished document; US Army Contract No. DA 49-007-MD-785).			99-366	ビーフシチュー)

Deichman n W. B.	1963	Mouse carcinogenicity study	(unpublished document; US Army Contract No.DA-49-007-MD:781) (DA-49-007-MD-789)			99-348	混合物 (牛肉な ど)
Kang I. J. et al.	1998	Genotoxicological and acute toxicological safeties of gamma irradiated beef	J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.	30 (4)	775-780	FI0469	牛肉
Kim J. H. et al.	1999a	Effects of gamma-irradiated beef feeding on antioxidative defense systems in experimental hepatocarcinogenesis	J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.	28 (3)	646-653	FI0662	牛肉
Kim J. H. et al.	1999b	Effects of gamma-irradiated beef feeding on preneoplastic hepatic lesion, cytochrome P450 system and microsome glucose 6-phosphatase activity in rat hepatocarcinogenesis	J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.	28 (3)	638-645	FI0663	牛肉
Kline B. E. et al.	1959	The possible carcinogenicity of irradiated foods	US Army,unpublished contract report No.DA-49-007-MD-583		K11-K122	94T 156)	牛肉混合 物
Loosli J. K. et al.	1964	Components of ionized irradiated meats injurious to reproduction	US Army contract No.DA49-193-MD-2097		L1-L13	94T 092) (99-375)	牛肉
Malhotra O. P. et al.	1963a	Effect of methionine and age of rats on the occurrence of hemorrhagic diathesis in rats fed a ration containing irradiated beef	Journal of Nutrition	80	85-90	94T 096) (99-316)	牛肉 デンブ
Malhotra O. P. et al.	1963b	Methionine and testosterone effect on occurrence of hemorrhagic diathesis in rats	American jJurnal of Physiology	205	1089-1092	94T 097) (99-315)	牛肉
Malhotra O. P. et al.	1965	Effect of methionine and vitamin K3 on hemorrhages induced by feeding a ration containing irradiated beef	Toxicology and applied pharmacology	7	402-408	94T 098) (99-317)	牛肉
Mittler S.	1979	Failure of irradiated beef and ham to induce genetic aberrations in Drosophila	International journal of radiation biology	35(6)	583-588	94T 103) (99-395)	牛肉 ハム
Monsen H.	1963	Heart lesions in mice	(unpublished document; U S Army Contract No. DA-49-007-MD-794).			99-352	牛肉 エ バミル
Münzner R.	1983	Investigations on the mutagenic potential of fried meat (独語)	Fleischwirtschaft	63 (4)	611-613	99-394	牛肉 豚肉 羊肉
Radomski J. L. et al.	1965	Chronic toxicity studies on irradiated beef stew and evaporated milk	Toxicology and applied pharmacology	7	113-121	94T 124) (99-326)	ビーフシ チュー無 糖練乳
Reber E. F. et al.	1960	The effects of feeding irradiated beef to dogs I .Growth	American journal of veterinary research	21	367-370	94T 132) (99-363)	牛肉
Reber E. F. et al.	1962	The effects of feeding irradiated beef to dogs II .Reproduction and pathology	American journal of veterinary research	23	74-76	94T 134) (99-364)	牛肉
Wasserman R. H. et al.	1955	Effect of feeding dogs the flesh of lethally irradiated cows and sheep	Science	121	894-896	94T 183)	牛肉 羊肉
Dahlgren R. R. et al.	1978	Hamster teratology study	US Army,unpublished contract report DAMD-17-76-C-6047		1-40	94T 040) (99-379)	鶏肉
Kang I. J. et al.	2001	Four-week oral toxicity study of gamma irradiated chickens in mice	J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.	30 (2)	234-238	FI0467	鶏肉

Phillips A. W. et al.	1961	Long-term feeding studies: irradiated chicken stew (cs) and cabbage (c)	US Army unpublished contract report No.DA-49-007-MD-783		PH1-PH64	94T 118)	鶏肉
Phillips A. W. et al.	1961	Long-term rat feeding studies: irradiated chicken stew and cabbage	US Army Contract No. DA-49-007-MD-783			99-325	鶏肉 キャベツ
Proctor B. G.	1974	To determine the presence of carcinogenic substances in irradiated chicken by oral administration of the test food to mice throughout their entire life span	Food irradiation information	3 (Suppl.)	18	94T 122)	鶏肉
Renner H. W. et al.	1982	An investigation of the genetic toxicology of irradiated foodstuffs using short-term test systems. III- In vivo tests in small rodents and in Drosophila melanogaster	Food and chemical toxicology	20	867-878	94T 140)	鶏肉 魚肉, 乾燥ナツメヤシ
Thayer DW et al.	1987	Toxicology studies of irradiated-sterilized chicken	Journal of food protection	50(4)	278-288	94T 159)	鶏肉
Thomson G. M. et al.	1977	Mouse teratology study	US Army unpublished contract report No.DAMD-17-76-C-6047			94T 161) (99-356)	鶏肉

Brin M. et al.	1961a	Effects of feeding X-irradiated pork to rats on their pyridoxine nutrition as reflected in the activity of plasma transaminase	Journal of Nutrition	75	35-38	94T 023)(99-100)	豚肉
Brin M. et al.	1961b	The effects of feeding irradiated pork, bread, green beans, and shrimp to rats on growth and on five enzymes in blood	Toxicology and Applied Pharmacology	3	606-617	94T 025) (99-330)	豚肉 エビ グリーンピース
Brin M. et al.	1961c	Effects of feeding X-irradiated pork to rats, on their thiamine nutrition as reflected in the activity of erythrocyte transketolase	Journal of Nutrition	75	29-34	94T 024)	豚肉
Bubl E. C. et al.	1960	The growth, breeding and longevity of rats fed irradiated or non-irradiated pork	Journal of nutrition	70(2)	211-218	99-328	豚肉
Cheng K. W. et al.	1983	Investigation of the wholesomeness of gamma irradiated fresh pork - long-term animal feeding studies (Abstract)	Radiation physics and chemistry	22(3-5)	792	99-373	豚肉
Kang I. J. et al.	1999	Hygienic quality and genotoxicological safety of gamma irradiated pork	J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.	28 (5)	1092-1098	FI0468	豚肉
Monsen H.	1960	Heart lesions in mice induced by feeding irradiated foods	Federation proceedings	19	1031-1034	94T 106)(99-351)	豚 鶏肉 ミルクパレ イショ他
Hickman J. R.	1975	To obtain data in support of the use of radiation for the elimination of salmonellae from frozen horse meat	Food Irradiation Information	5 (Suppl.)	91-92	94T 066)	肉類(馬肉)
Kamal'din ova Z. M. et al.	1977	A study of possible mutagenic activity of raw and fried bfff irradiated with gamma-rays and its influence on yhe reproductive function of white rats (露語)	Voprosy Pitaniya	2	53-59	FI0007	肉類
McCay C. M. et al.	1960	Effect of irradiated meat upon growth and reproduction of dogs	Federation proceedings DA-49-007 MD-600	19	1027-1030	99-371	肉類

Dixon M. S. et al.	1961	Influence of irradiated bacon lipids on body growth, incidence of cancer, and other pathologic changes in mice	Journal of food science	26	611-617	94T 048) (99-347)	ベーコン
Hale M. W. et al.	1960	Growth, reproduction, mortality, and pathologic changes in dogs fed gamma-irradiated bacon for two years	US Army,unpublished final contract report No.DA-49-007-MD-780.		1-36	94T 063) (99-362)	ベーコン キャベツ
Mead J. F. et al.	1959	Effect of ionizing radiation on the nutritive and safety characteristics of foods	unpublished document U.S. Army Contract No. DA-49-007-MD-579			99-312	ベーコン フルーツコン ポート

Anukaran hanonta T. et al.	1981a	Wholesomeness study of irradiated salted and dried mackerel in rats	IAEA Technical Document No.256		7-42	94T 007)	魚(サバ)
Anukaran hanonta T. et al.	1981b	Wholesomeness study of irradiated salted and dried mackerel in rats	IAEA (Summarized Technical Report,IAEA contract 1609/RB and 1609/R1/RB).		7-42	94T 006)	魚(サバ)
Aravinda kshan M. et al.	1978	Studies on the safety evaluation of radurized indian mackerel	IAEA-SM-221/27	II	53-61	94T 008)	魚(サバ)
Benakis A. et al.	1977	Effect of feeding irradiated fish on the drug-metabolizing liver enzymes in rats	Toxicology and Applied Pharmacology	42	553-560	FI0480	魚
Benson H. G. et al.	1980	Long-term feeding studies in mice fed a diet containing irradiated fish. II. 90-Day toxicity study.	Toxicology letters	7	103-105	FI0010	魚(タラ)
Chaubey R. C. et al.	1978	Mutagenicity evaluation of irradiated indian mackerel in swiss mice	IAEA-SM-221/68	II		94T 032)	魚(サバ)
Dela Rosa A. M. et al.	1989	The effect of gamma-radiation on smoked fish using short-term mutagenicity assays	Mutation Research	223	303-307	FI0205	(燻製) 抽出物
Dent N. J. et al.	1975	90-day toxicity and reproductive toxicity of irradiated European plaice (Pleuronectes platessa)	IFIP Technical Report IFIP-R41			94T 081)	魚(ヒラメ)
Dent N. J. et al.	1977	An investigation of the elevated serum alkaline phosphatase levels in rats fed irradiated fish diets	IFIP-R42			94T 045)	魚(タラ)
Fegley H. C. et al.	1976	To examine the wholesomeness of irradiated soft-shell clams (Mya arenaria) in dogs	Food Irradiation Information	6 (Suppl.)	111-112	94T 053)	貝
Giese W. et al.	1976	Pasteurization of fish meal by irradiation (II)The safety of feeding fattening swine with fish meal pasteurized by irradiation	Zbl. Vet. Med. B	23	769-778	FI0708	魚
Hickman J. R.	1975	To establish the toxicological safety of skin-on cod fillets that have been irradiated in order to extend the chilled (0~4℃) storage life when fed to rats	Food Irradiation Information	5 (Suppl.)	96-97	94T 065)	魚(タラ)
Hossain M. M. et al.	1981	Studies on wholesomeness of irradiated shrimp and carp	IAEA Technical Document No.265		43-65	94T 075)	魚介類
Impellizz eri J. et al.	1978	1.Multigeneration reproduction study 2.Mutagenicity study 3.Teratolgy study	IFIP Technical Report IFIP-R49			94T 077)	魚(タラ, スズキ)
Impellizz eri J. et al.	1979	Studies in mice fed a diet containing irradiated fish Eighty-week feeding study	IFIP Technical Report IFIP-R50			94T 078)	魚(タラ, スズキ)

Joner P. E. et al.	1978	Mutagenicity testing of irradiated cod fillets	Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie	11(4)	224-226	94T 085)(99-382)	魚(タラ)
Joner P. E. et al.	1980	Mutagenicity testing of irradiated herring fillets	Lebensmittel Wissenschaft und Technologie	13(6)	293-296	99-386	魚(ニシン)
Nadkarni G. B.	1980	Wholesomeness studies in rats fed irradiated Indian mackerel	IFIP Technical Report R-54		1-59	94T 111)	魚
Phillips A. W. et al.	1961	Long-term rat feeding studies: irradiated shrimp and oranges diet	Final Report. 1961 (unpublished document; U SArmy Contract No. DA-49-007-MD-791).			99-331	エビ オレンジ
Phillips B. J. et al.	1980	An investigation of the genetic toxicology of irradiated foodstuffs using short-term test systems-II. sister chromatid exchange and mutation assays in cultured chinese hamster ovary cells	Food and Cosmetics Toxicology	18	471-475	FI0896	魚, 鶏肉(抽出)
Shatrov et al.	1985	Toxicological evaluation of gamma ray-treated fresh fish in an experiment on rats(露語)	Voprosy pitaniia	4	64-66	FI0887	魚
Shillinger I, Osipova IN	1970	The effect of fresh fish, exposed to gamma radiation on the organism of albino rats (露語)	Voprosy pitaniia	29 (5)	45-50	94T 152)	魚
Vakil U. K.	1975	To study the wholesomeness of feeding dehydro-irradiated shrimps to rats	Food irradiation information	4(Suppl.)	49-51	94T 166)	エビ
van Logten M. J. et al.	1972	The wholesomeness of irradiated shrimp	Food and cosmetic toxicology	10	781-788	94T 170)	エビ
Van Petten L. E. et al.	1980	Long-term feeding studies in mice fed a diet containing irradiated fish I. Multigeneration reproduction, mutagenicity, teratology, and longevity studies	Toxicology Letters	7	97-101	FI0009	魚(タラ)
Yook H. S. et al.	2004	Genotoxicological safety of gamma-irradiated salted and fermented anchovy sauce	J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.	33 (7)	1192-1200	FI0482	アンチョビー(乾燥)
Yoshikawa K. et al.	1982	Bacterial mutagenicity tests on irradiated foods (fish-meat cake, wiener and orange juice)	衛生試験所報告	100	110-119	FI0102	カマボコ, ウインナー他
Zaitsev A. N. et al.	1981a	Effect of being fed gamma-irradiated fish on embryogenesis and the chromosomes of white rats(露語)	Voprosy pitaniia	6	61-63	FI0893	魚
Zaitsev A. N. et al.	1981b	Mutagenic properties of irradiated fresh fish in a chronic experiment(露語)	Voprosy pitaniia	4	19511	FI0894	魚
Kim M. J. et al.	2003	Safety evaluation on mutagenicity of white layer cake containing gamma-irradiated egg white	J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.	32 (7)	1172-1175	FI0604	卵
Monsen H.	1965	Heart lesions in mice	(unpublished document; US Army Contract No. DA-49-007-MD-794			99-353	エバミルク

Renner H. W. et al.	1973	Safety of high concentrations of free radicals in irradiated foodstuffs(独語)	Zbl. Vet. Med. B	20	648-660	94T 138) (99-343)	粉ミルク
Renner H. W. et al.	1973	Mutagenicity of irradiated foodstuffs with the dominant lethal test(独語)	Humangenetik	18	155-164	94T 139) (99-421)	粉ミルク

Aravindakshan M. et al.	1980	Ninety-day feeding and reproduction study on irradiated onion in rats	IFIP-R59		1-18	94T 010)	タマネギ
Bone J. F.	1963	The growth, breeding, longevity and histopathology of rats fed irradiated or control foods (histopathological studies)	US Army contract report DA-49-193-MD-2064			94T 020) (99-321)	ニンジン
Gabriel K. L. et al.	1976a	To study the effects of radurized onions when fed to beagle dogs	Food Irradiation Information	6(Suppl.)	116-117	94T 058)	タマネギ
Gabriel K. L. et al.	1976b	To study the effects of radurized onions when fed to albino rats	Food Irradiation Information	6(Suppl.)	118-119	94T 059)	タマネギ
Goud S. N. et al.	1982	Mutagenicity testing of irradiated onions in mice	INT. J. Radiat. Biol.	41 (3)	347-349	FI0027	タマネギ
Hattori Y. et al.	1979	Mutagenicity tests of irradiated onions by Escherichia coli mutants in vitro	Mutation Research	60	115-119	94T 064)	タマネギ
Hilliard W. G.	1974	To provide clinical, haematological and pathological observations during an 18-month trial of feeding onion-incorporated diets, whether irradiated or non-irradiated, to dogs for determination of any imparted toxicity	Food Irradiation Information	3(Suppl.)	24	94T 071)	タマネギ
Hilliard W. G. et al.	1966	Long-term effects of feeding irradiated onion to dogs	Food and Cosmetic Toxicology	4	557-583	94T 072)	タマネギ
van Kooij J. G. et al.	1978	Application of the Ames mutagenicity test to food processed by physical preservation methods	IAEA-SM-221/42	Vol. II	63-71	94T 168)	ニラセロリ ネギニン ジン
van Logten M. J. et al.	1971	The wholesomeness of irradiated mushrooms	Food and cosmetic toxicology	9	379-388	94T 169)	マッシュ ルーム
van Petten G. R. et al.	1966	Effect of feeding irradiated onion to consecutive generations of the rat	Food and cosmetic toxicology	4	593-599	94T 173)	タマネギ
Baev Il et al.	1981	Investigation of wholesomeness studies of feeding irradiated diet to mice	IAEA Technical Report No.256		81-101	94T 014)	トウモロコシ ナッツ プラム
Bhaskaram C. et al.	1975	Effects of feeding irradiated wheat to malnourished children	the American Journal of Clinical Nutrition	28	130-135	94T 017)	小麦

Bronnikova I. A. et al.	1973	Research on the mutagenic and cytotoxic properties of irradiated foodstuffs (露語)	Voprosy pitaniya	32 (4)	46-50	94T 026)	小麦
Bronnikova I. A. et al.	1972	Hygienic evaluation of diets consisting largely of vegetable products subjected to gamma-irradiation(露語)	Voprosy Pitaniya	31 (4)	74-80	FI0504	穀類(小麦, トウモロコシ) 豆
Bugyáki L. et al.	1968	Do irradiated foodstuffs have a radiomimetic effect? II. Trials with mice fed wheat meal irradiated at 5 Mrad (仏語)	Atompraxis	14	112-118	94T 030) (99-361)	小麦
Bugyáki L.	1973	To study the effect of feeding irradiated wheat flour to mice	Food irradiation information	2(Suppl.)	VII-VIII	94T 029)	小麦
Chauhan P. S. et al.	1977	Evaluation of freshly irradiated wheat for dominant lethal mutations in Wistar rats	Toxicology	7	85-97	94T 035)	小麦
Delcour-Firquet M. P.	1985	The effects of irradiated wheat flour on C57CL mice (III) Effect on hepatic and pancreatic enzymes	Journal de Toxicologie Clinique et Experimentale	5 (2)	113-119	FI0739	小麦
Delcour-Firquet M. P.	1983	Effects of irradiated wheat flour in the AKR mouse (I) Effects on longevity, morbidity and pathology	Toxicological European Research	5 (1)	7-15	FI0741	小麦粉 (穀類)
Delcour-Firquet M. P.	1983	Effects of irradiated wheat flour in the AKR mouse (IV) Effects on reproduction	Toxicological European Research	5 (1)	27-30	FI0742	小麦粉 (穀類)
Delcour-Firquet M. P.	1983	Effects of irradiated wheat flour in the AKR mouse (III) Effects of activity of hepatic and pancreatic enzymes	Toxicological European Research	5 (1)	23-26	FI0743	小麦粉 (穀類)
Delcour-Firquet M. P.	1986	Effects of irradiated flour on C57Bl mice (IV) Effects on reproduction	Journal de Toxicologie Clinique et Experimentale	6 (3)	157-173	FI0740	小麦粉 (穀類)
Delcour-Firquet M. P. et al.	1983	Effects of irradiated wheat flour in the AKR mouse (II) Effects on hematology and activity of a serum enzyme	Toxicological European Research	5 (1)	17-21	FI0744	小麦粉 (穀類)
George K. P. et al.	1976	Frequency of polyploid cells in the bone marrow of rats fed irradiated wheat	Food and Cosmetic Toxicology	14	289-291	94T 062)	小麦
Hickman J. R. et al.	1964	Rat feeding studies on wheat treated with gamma-radiation I. Reproduction	Food and Cosmetic Toxicology	2	15-21	94T 067)	小麦
Kim S. K. et al.	1973	Studies on the wholesomeness of gamma-irradiated rice (I) On the weight gain, reproduction ratio, mortality and growth rate after weanling of mice	Korean J. Food Sci. Technol.	5 (3)	149-152	FI0500	穀類(小麦, 米)

Koch F. et al.	1993	Effect of feeding 10 kGy irradiated barley on hematological and lipid metabolism parameters in growing quail (独語)	In: lebensmittelbestrahlung -2, Gesamtdeutsche Tagung. Karlsruhe, Bundesforschungsanstalt für Ernährung		110-116	99-377	大麦
Maier P. et al.	1993	Cell-cycle and ploidy analysis in bone marrow and liver cells of rats after long-term consumption of irradiated wheat	Food and Chemical Toxicology	31 (6)	395-405	FI0738	小麦粉 (穀類)
Moran E. T. et al.	1968	Effect of cobalt-60 gamma-irradiation on the utilization of energy, protein, and phosphorus from wheat bran by the chicken	Cereal chemistry	45	469-479	94T 107) (99-82)	小麦 (ふすま)
Murthy P. B. K.	1981	Sister-chromatid exchanges in mice given irradiated wheat	Toxicology	20	247-249	FI0495	小麦
Paynter OE	1959	Long-term feeding and reproduction studies on irradiated corn and tuna. (照射したトウモロコシとマグロの長期投与試験および繁殖試験)	US Army contract report No.DA-49-007-MD-788			94T 117)(99-332)	トウモロコシ
Reber E. F. et al.	1959	The effects of feeding irradiated flour to dogs I .Growth	Toxicology	1	55-60	94T 131)	小麦
Reber E. F. et al.	1961	The effects of feeding irradiated flour to dogs II .Reproduction and pathology	Toxicology and applied pharmacology	3	568-573	94T 133)	小麦
Reddi O. S. et al.	1972	Effect of irradiated wheat on germ cells in mice	Indian journal of medical research	60 (10)	1543-1546	94T 135)	小麦
Reddi O. S. et al.	1977	Lack of genetic and cytogenetic effects in mice fed on irradiated wheat	International journal of radiation biology	31 (6)	589-601	94T 136)	小麦
Reddy P. P. et al.	1978	Studies on the mutagenic and cytogenetic effects of irradiated wheat in mice	Journal of Nuclear Agriculture and Biology	7 (3)	81-86	FI0075	小麦
Sialy R. et al.	1976	Effect on the reproductive functions of female rhesus monkeys of feeding irradiated wheat flour and potato diet	INT. J. Radiat. Biol.	29 (6)	555-564	FI0024	小麦 バレイショ
Tanaka N. et al.	1992	Induction of polyploids in bone marrow cells and micronuclei in reticulocytes in Chinese hamsters and rats fed with an irradiated wheat flour diet	The Japan Isotopes Association		212-220	99-413	小麦
Tesh J. M. et al.	1980	To investigate the effects of feeding an irradiated wheat flour diet on the incidence of polyploidy and micronucleated polychromatic erythrocytes in bone marrow cells of rats and to assess mutagenic potential by means of the dominant lethal assay	Food irradiation information	10(Suppl.)	183-184	94T 158)	小麦
Tesh J. M. et al.	1977	Studies in rats fed a diet incorporating irradiated wheat	IFIP R45				小麦
Truhaut R. et al.	1976	The toxicological evaluation of irradiated maize starch by long-term studies in the rat	European Journal of Toxicology	9 (6)	347-356	FI0030	トウモロコシ
Vakil U. K.	1975	To study the wholesomeness of feeding gamma-irradiated Red winter wheat flour to mice	Food irradiation information	4(Suppl.)	55	94T 165)	小麦

Vakil U. K.	1975	To study the Wholesomeness of feeding gamma-irradiated red winter wheat flour to rats (chronic study)	Food irradiation information	4(Supp l.)	53-54	94T 167)	小麦
Vijayalax mi	1975b	Cytogenetic studies in rats fed irradiated wheat.	International Journal of radiation biology	27	283-285	94T 176)	小麦
Vijayalax mi	1976a	Genetic effects of feeding irradiated wheat to mice	Canadian journal of genetics and cytology	18	231-238	94T 177)	小麦
Vijayalax mi	1978	Cytogenetic studies in monkeys fed irradiated wheat.	Toxicology	9	181-184	94T 178)	小麦
Vijayalax mi et al.	1975a	Chromosomal aberrations in rats fed irradiated wheat	International journal of radiation biology	27(2)	135-142	94T 180)	小麦
Vijayalax mi et al.	1976b	Dominant lethal mutations in rats fed on irradiated wheat	International journal of radiation biology	29(1)	93-98	94T 179)	小麦

Brownell L. E. et al.	1959	Growth, reproduction, mortality, and pathologic changes in rats fed gamma-irradiated potatoes	US Army contract report DA-49-007-MD-581			94T 027)	バレイショ
Burns C. H. et al.	1961	Necrotizing arteritis in rats used in a toxicity study of irradiated potatoes	US Army contract report DA-49-007-MD-581		1-16	94T 031)	バレイショ
Hossain M. M. et al.	1976	Mutagenicity studies on irradiated potatoes and chlorogenic acid; micronucleus test in rats	Toxicology	6	243-251	FI0491	バレイショ
Ishidate M. et al.	1981	Mutagenicity studies on alcohol extracts from gamma-irradiated potatoes - test for biological activities in bacterial and mammalian cell systems -	Radioisotopes	30 (12)	662-668	FI0245	バレイショ
Jaarma M et al.	1966	On the wholesomeness of gamma-irradiated potatoes III. Feeding experiments with rats	Nutritito et dieta	8	296-308	94T 084)	バレイショ
Jaarma M. et al.	1964	On the wholesomeness of gamma-irradiated potatoes	Acta veterinaria scandinavica	5	238-256	94T 082)	バレイショ
Jaarma M. et al.	1966	On the wholesomeness of gamma irradiated potatoes II. Feeding experiments with pigs	Nutritito et dieta	8	109-129	94T 083)	バレイショ
Kopylov, V.A, et al.	1972	On the mutagenous effect of extracts from gamma-irradiated potato tubers on sex cells of mouse males	Radiobiologia	12 (4)	524-528	R-1	バレイショ (アルコール抽出)
Kuzin, V. A et al.	1974	Problem on Radiation Storage Mthod for Potatoes used for Food	USSR Academy of Science Pushino-an-Oke				バレイショ (アルコール抽出)
Levinsky H. V. et al.	1973	A study of the mutagenic effects of an alcoholic extract of irradiated potatoes in the mouse	IFIP Technical Report IFIP-R9			94T 090)	バレイショ
Levinsky H. V. et al.	1975	Mutagenic evaluation of an alcoholic extract from gamma-irradiated potatoes	Food and cosmetic toxicology	13	243-246	94T 089)	バレイショ (抽出物)
Osipova I.N.	1974	Investigation of the possible mutagenicity of extracts from irradiated potatoes as a function of storage and cooking(露語)	Voprosy pitaniya	33 (1)	78-81	94T 114)	バレイショ (抽出物)

Osipova IN et al.	1975	Influence of the storage and culinary treatment of irradiated potatoes on the cytogenetic activity of potato extracts(露語)	Voprosy pitanija	34 (4)	54-57	94T 115)	ハレインヨ
Palmer A. K. et al.	1975	Reproduction and longevity of rats fed an irradiated potato diet	IFIP Technical Report IFIP-R25		1-102	94T 076)	ハレインヨ
Shibuya T. et al.	1982	Mutagenicity studies on alcohol extracts from gamma-irradiated potatoes - dominant lethal test in mice -	Radioisotopes	31 (2)	74-77	FI0485	ハレインヨ
Shillinger YI,Kamal dinova ZN	1973	The wholesomeness of potatoes irradiated with an accelerated electron beam and gamma-irradiation for the purpose of inhibiting sprouting. (露語)	Voprosy pitanija	32 (6)	50-55	94T 151)	ハレインヨ
Shinozaki Y. et al.	1981	Mutagenicity studies on alcohol extracts from gamma-irradiated potatoes - preparation of samples and their chemical analysis in -	Radioisotopes	30 (12)	655-661	FI0489	ハレインヨ
Swaminathan M. S. et al.	1962	Cytological aberrations observed in barley embryos cultured in irradiated potato mash	Radiation research	16	182-188	94T 153)	ハレインヨ
Wolf A.	1983	Problem of the so-called radiotoxins	Z. ges. Hyg.	29 (9)	518	FI0890	ハレインヨ (抽出物)
Zaitsev A. N. et al.	1978	Cytogenetic activity of freshly irradiated potato(露語)	Voprosy pitanii	3	61-63	FI0745	ハレインヨ
Zajcev A. N. et al.	1975	Toxicologic and hygienic investigation of potatoes irradiated with a beam of fast electrons and gamma-rays to control sprouting.	Toxicology	4	267-274	94T 189)	ハレインヨ

Bernardes B. et al.	1981	Short-term toxicity studies of irradiated black beans (P.Vulgaris)	IAEA Technical Document No.256		67-80	94T 016) (99-414)	黒豆(マメ類)
Larson P. S. et al.	1957	Long-term dog feeding tests on irradiated green beans and fruit compote	US Army Contract No.DA-49-007-MD-786			99-368	豆
Loaharanu S.	1978	Feeding studies of irradiated foods with insects	IAEA-SM-221/67	Vol. II	113-131	94T 091)	黒豆 イワシ、コーヒー豆
Rattray E. A. S. et al.	1974	Toxicity of kidney beans (Phaseolus vulgaris L.) to conventional and gnotobiotic rats	J. Sci. Fd Agric.	25	1035-1040	FI0026	インゲン豆
Richardson L. R. et al.	1960	A long-term feeding study of irradiated foods using rats as experimental animals	Federation Proceedings(DA-49-007-MD-582 exp05755~05760)	19(4)	1023-1027	99-323	豆(グリーンピース)
Takyi E. E. K. et al.	1981	Short-term toxicity study of irradiated cocoa beans in rats	Journal of the science of food and agriculture	32	933-940	94T 155)	カカオ豆
Takyi E. E. K. et al.	1981	Short-term toxicity study of irradiated cocoa beans in rats	Journal of the Science of Food and Agriculture	32 (9)	933-940	FI0072	ココア
Zimmering S. et al.	1992	Irradiated cocoa tested in the wing spot assay in Drosophila melanogaster	Mutation Research	281	169-71	FI0516	ココア

Anon	1976	To study the toxicological effects of feeding irradiated bananas to rats	Food Irradiation Information	6 (Suppl.)	109	94T 002)	バナナ
Anon	1976	To investigate the wholesomeness of irradiated bananas fed to dogs	Food Irradiation Information	6 (Suppl.)	107	94T 003)	バナナ
Blood F. R. et al.	1963	Long-term monkey feeding experiment on irradiated peaches, whole oranges and peeled oranges	Nashville, TN, Departments of Biochemistry and Pathology, Vanderbilt University School of Medicine, 1963 (USArmy Cont No. DA-49-007-MD-779 and DA-49-193-MD-2286).		Bl1-Bl72	99-376	モモ オレンジ
Chopra V. L. et al.	1963	Cytological effects observed in plant material grown on irradiated fruit juices	Radiation Botany	3	1-6	94T 037)	リンゴ(果汁) オレンジ(果汁)
Drijver L. D. et al.	1986	High-performance liquid chromatographic determination of D-Arabinose-2-ulose (D-glucosone) in irradiated sugar solutions: Application of the method to irradiated mango	Journal of Agricultural and Food Chemistry	34	758-762	94T 044)	マンゴ 放射線分解生成物
Gabriel K. L. et al.	1977a	To study the effects of radurized sweet cherries, apricots and prune-plums when fed to albino rats	Food Irradiation Information	7(Suppl.)	138-139	94T 060)	サクランボ アンズ他
Gabriel K. L. et al.	1977b	To study the effects of radurized sweet cherries, apricots and prune-plums when fed to dogs	Food Irradiation Information	7(Suppl.)	140-141	94T 061)	サクランボ アンズ他
Horton G. M. J.	1976	The effects of low-dose gamma-irradiation on the wholesomeness of mangoes (<i>Mangifera indica</i>) as determined by short-term feeding studies using rats.	British Journal of Nutrition	35	67-75	FI0617	マンゴ
Lee H. J. et al.	2001	In vitro genotoxicological safety of fresh vegetable-extract juice by gamma irradiation	J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.	30 (6)	1227-1236	FI0494	ジュース
Mäkinen Y. et al.	1967	Cytotoxic effects of extracts from gamma-irradiated Pineapples	NATURE	214	413	Q34-06	パイナップル
Phillips A. W. et al.	1961	Long-term rat feeding studies: irradiated oranges	Final contract report, US Army contract No.DA-49-007-MD-791			94T 119)	オレンジ
Raltech Scientific Services	1979	Toxicology studies on rats fed a diet containing 15% irradiated Kent mangoes	IFIP Technical Report IFIP-R51		1-33	94T 125)	マンゴ
Raltech Scientific Services	1981	Toxicology studies in rats fed a diet containing 15% irradiated Kent mangoes Two-year feeding study	IFIP Technical Report IFIP-R58		1-77	94T 126)	マンゴ
Ross S. T. et al.	1970	Cytological effects of juice or puree from irradiated strawberries	Journal of food science	35	549-550	94T 145)	イチゴ(ジュース, ピューレ)
Schubert J. et al.	1973	Irradiated strawberries-chemical, cytogenetic, and antibacterial properties	Journal of agricultural and food chemistry	21 (4)	684-692	94T 148) (99-390)	イチゴ

Susheela K. et al.	1997	Irradiation of Ananas comosus: shelf life improvement, nutritional quality and assessment of genotoxicity	Biomedical Letters	56	135-144	FI0056	パイナップル
Tinsley I. J. et al.	1963	The growth, reproduction, longevity, and histopathology of rats fed gamma-irradiated peaches	Toxicology and applied pharmacology	5	464-477	99-327	モモ
Verschuuren H. G. et al.	1966	Ninety day rat feeding study on irradiated strawberries	Food irradiation	7	A17-A21	99-345	イチゴ

Anon	1977	Spices - a new approach	Food Irradiation Information	7	67-68	S-02	スパイス
Barna J.	1974	Report on preliminary studies relating to investigation of the wholesomeness of irradiated spices	IFIP-R19			S-05	スパイス
Barna J.	1975	To Study the wholesomeness of irradiated spice mixture in the rat	Food Irradiation Information (Suppl.)	4	48	S-01	スパイス
Barna J.	1979	Compilation of bioassay data on the wholesomeness of irradiated food items	Acta Alimentaria	8 (3)	205-315	S-100	スパイス
Barna J.	1983	Mutagen ineffectiveness of irradiated spice mixture in DLT	Mutation Research	113 (3-4)	231	S-14	スパイス
Barna J.	1986	Genotoxicity test of irradiated spice mixture by dominant lethal test	Acta alimentaria	15(1)	47-56	99-412	スパイスミックス
Central Food Research Institute.	1977	Mutagenicity testing of irradiated ground paprika	IFIP-R44			99-388	スパイス (パプリカ)
Chaubey R. C. et al.	1979	Cytogenetic studies with irradiated ground paprika as evaluated by the micronucleus in mice	Acta alimentaria	8 (2)	197-201	99-410	スパイス (パプリカ)
Farag S. E. A. et al.	1997	Degradation of the natural mutagenic compound safrole in spices by cooking and irradiation	Nahrung	41 (6)	359-361	FI0509	スパイス
Farkas J. et al.	1980	Testing of genetically active substances in irradiated spices by Microbiological method	Acta Aliment.	9 (1)	92	S-09	スパイス
Farkas J. et al.	1981a	Evaluation of possible mutagenicity of irradiated spices	Acta Alimentaria	10(2)	129-135	94T 052) (99-389)	スパイスミックス
Farkas J. et al.	1981b	Prophage lambda induction (Inductest) of blood of rats fed irradiated spices	Acta alimentaria	10(2)	137-142	99-411	スパイスミックス
Farkas J. et al.	1981c	A study of possible mutagenicity of irradiated onion powder by salmonella/mammalian-microsome tests	Acta Alimentaria	10 (3)	209-213	S-10	スパイス
Farkas J. et al.	1982	Investigations on the possible genotoxic effect of irradiated onion powder by means of prophage induction (inductest)	Acta Alimentaria	11 (3)	245-251	FI0287	スパイス (オニオンパウダー)
Jo S. K. et al.	1996	Genotoxicological safety of the gamma-irradiated Korean red ginseng In vitro	J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.	25 (3)	491-496	FI0606	生薬(ジンセン)
Jo S. K. et al.	2000	Stability in immunomodulation activity of irradiated Angelica gigas Nakai	J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.	29 (1)	134-139	FI0799	スパイス

Jo S. K. et al.	2001	Genotoxicological safety of hot water extracts of the gamma-irradiated glycyrrhizae radix, Aurantii nobilis pericarpium and Bupleuri radix In vitro	J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.	30 (6)	1237-1245	FI0510	生薬(カンゾウ、チンピなど)
Eotvos	1979	Teratogenic studies on albino rats fed diets containing either irradiated ground black pepper, mild paprika or spice mixture	IFIP Technical Report IFIP-R52		1-22	94T 093)(99-337)	スパイスミックス
Mittler S. et al.	1982	Failure of irradiated onion powder to induce sex-linked recessive lethal mutations in Drosophila melanogaster	Mutation research	104	113	94T 105)	スパイス (オニオンパウダー)
Münzner R. et al.	1981	Mutagenicity testing of irradiated onion powder	Journal of food science	46	1269-1270	94T 110)(99-387)	スパイス (オニオンパウダー)
坂本	1992	ガンマ線照射したスパイスとマンゴの変異原性試験	食品照射研究委員会研究成果最終報告書、日本アイソトープ協会		204-211	S-13	スパイス
Yu Y. B. et al.	2000	Evaluation on the safety of gamma-irradiated Angelica gigas Nakai: stability of active components and safety in genotoxicity test	J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.	29 (2)	300-306	FI0605	生薬(オニノタケ)

Anon	1987	Safety evaluation of 35 kinds of irradiated human foods	Journal of Radiation Research and Radiation Processing	5 (1)	395-404	94T 005)	食品(多品目)
Bierman E. L. et al.	1958	Short-term human feeding studies of foods sterilized by gamma radiation and stored at room temperature	US Army Edical Nutrition Laboratory, unpublished document Report No.224			94N 004)(99-429)	食品(多品目)
Kline B. E. et al.	1959	The possible carcinogenicity of irradiated foods	unpublished document U.S.Army Contract No. DA-49-007-MD-583			99-313	混合物
Levina A. I. et al.	1978	Pathobmorphology of the kidneys ib rats after prolonged ingestion of irradiated foods	Bulletin of Experimental Biology and Medicine	85 (2)	236-238	FI0076	混合物
Radomski JL et al.	1965	A study of the possible carcinogenicity of irradiated foods	Toxicology and applied pharmacology	7	122-127	94T 123) (99-349)	混合物
Read M. S. et al.	1961	Successive generation rat feeding studies with a composite diet of gamma-irradiated foods	Toxicology and applied pharmacology	3	153-173	94T 130) (99-314)	混合物
Read M. S. et al.	1958	Short-term rat feeding studies with gamma-irradiated food products	Journal of nutrition	65	39-51	94T 129) (99-320)	混合物

Anderson D. et al.	1981	Irradiated laboratory animal diets Dominant lethal studies in the mouse	Mutation research	80	333-345	99-408	飼料
Aravinda kshan M. et al.	1978	Multigeneration feeding studies with an irradiated whole diet	IAEA-SM-221/69	II	41-51	94T 09) (99-338)	飼料
Biagini C. et al.	1967	Growth and fertility of mice fed an irradiated diet for two years (伊語)	Giornale de medicina militare	117	347-368	94T 018) (99-359)	飼料

Chauhan P. S. et al.	1975	Studies on dominant lethal mutations in third generation rats reared on an irradiated diet	Int. J. Radiat. Biol.	28(3)	215-223	94T 033) (99-404)	飼料
Chauhan P. S. et al.	1975	Dominant lethal mutations in male mice fed gamma-irradiated diet	Food and Cosmetic Toxicology	13	433-436	94T 034) (99-405)	飼料
Endoh D. et al.	1989	Micronucleus test in mice fed on an irradiated diet	Jpn. J. Vet. Res.	37	41-47	FI0877	飼料
Eriksen W. H. et al.	1972	The effect on pre-implantation death of feeding rats on radiation-sterilized food	Int. J. Radiat. Biol.	22 (2)	131-135	94T 051) (99-415)	飼料
Ivanov A. E. et al.	1981	Pathomorphologic changes in the testes of rats fed gamma ray irradiated products (露語)	Biulleten' eksperimental'noi biologii i meditsiny	91 (2)	233-236	FI0895	飼料
Johnston-Arthur T. et al.	1975	Mutagenicity of irradiated food in the host mediated assay system	Studia biophysica	50	137-141	99-403	飼料
Johnston-Arthur T. et al.	1979	Investigation on irradiated standard diets and their extract components on the possible mutagenic effect in the 'host mediated assay' using Salmonella typhimurium G46 and TA 1530 (独語)	Die Bodenkultur	30	95-107	99-407	飼料
Léonard A. et al.	1977	Mutagenicity tests with irradiated food in the mouse	Strahlentherapie	153(5)	349-351	94T 088) (99-406)	飼料
Levina A. I. et al.	1978	Renal pathomorphology of rats fed irradiated food products over a long period (露語)	Biulleten' eksperimental'noi biologii i meditsiny	85 (2)	230-232	FI0898	飼料
Medawar P. B. et al.	1976	Alteration of the immune response in mice by dietary factors: effects of irradiating, autoclaving and essential fatty acid deficiency of rodent diets(proceedings)	Proceedings of the Nutrition Society	35	147A-148 A	FI0899	飼料
Metwalli O. M.	1977	Study on the effect of food irradiation on some blood serum enzymes in rats	Z. Ernährungswiss.	16	18-21	94T 102) (99-339)	飼料
Moutschen-Dahmen M. et al.	1970	Pre-implantation death of mouse eggs caused by irradiated food	International journal of radiation biology	18(3)	201-216	94T 108) (99-402)	飼料
Münzner R. et al.	1975	Mutagenicity testing of irradiated laboratory animal diet by the host mediated assay with S.typhimurium G46(独語)	International journal of radiation biology	27 (4)	371-375	94T 109) (99-416)	飼料
Münzner R. et al.	1976	Mutagenicity testing of irradiated laboratory animal diet by the host mediated assay with S. typhimurium TA 1530 (独語)	Zbl. Vet. Med. B	23	117-121	99-418	飼料
Phillips B. J. et al.	1980	Genetic toxicology of irradiated foodstuffs using short-term test systems. 1.digestion In vitro and the testing of digests in the Salmonella typhimurium reverse mutation test	Food and Cosmetics Toxicology	18	371-375	FI0208	飼料
Reddy P. P. et al.	1981	Micronucleus test in mice fed on irradiated whole diet	INT. J. Radiat. Biol.	39 (2)	217-219	FI0517	飼料

Renner H. W.	1977	Chromosome studies on bone marrow cells of Chinese hamsters fed a radiosterilized diet	Toxicology	8	213-222	94T 137) (99-417)	飼料
Saint-Lébe L.	1979	Irradiation of commercial diets for axenic and heteroaxenic rats and mice(仏語)	Rec. Méd. vét.	155 (10)	805-810	99-336	飼料
Šmíd K. et al.	1985	Effect of radiation-treated feeds on some biochemical indicators of nutrition level achieved with energy nutrients(デンマーク語)	Veterinární medicína	30 (9)	531-541	99-374	飼料
Strik J. J. T. W. A.	1986	Toxicological investigations on irradiated feed in pigs (チェコ語)	Tijdschrift voor Diergeneeskunde	111 (5)	240-243	99-380	飼料

Aiyar A. S. et al.	1977	Studies on mutagenicity of irradiated sugar solutions in Salmonella typhimurium	Mutation Research	48	17-27	94T 001) (99-393)	糖液
Bradley MV et al.	1968	Low pH of irradiated sucrose in induction of chromosome aberrations	Nature	217	1182-1183	94T 021) (99-392)	糖液
Bugyaki L. et al.	1963	Have irradiated foods radiomimetic effect? I. Experiment on Escherichia coli C 600 (lambda) Ivsogene(仏語)	Atompraxis	9	194-196	99-384	培地
Chopra V. L.	1969	Lethal and mutagenic effects of irradiated medium on Escherichia coli	Mutation Research	8	25-33	Q34-09	培養液
Chopra V. L.	1965	Tests on Drosophila for the production of mutations by irradiated medium or irradiated DNA.	Nature	208(13)	609-700	94T 036) (99-409)	培地
De A. et al.	1969	Biochemical Effects of Irradiated Sucrose Solutions in the Rat	Radiation Research	37	202-215	Q34-07	糖液
Diehl J. F. et al.	1978	Radiolysis of Carbohydrates and of Carbohydrate-Containing Foodstuffs	J. Agric. Food Chem.	26 (1)	15-20	Q34-03	デンプン, 糖
Ito H.	2003	Effects of microbial growth in irradiated sugar media	Food Irradiation, Japan	38	6-10	FI0362	糖液
Kesavan P. C. et al.	1966	Cytotoxic and radiomimetic activity of irradiated culture medium on human leukocytes	Cytotoxic and Radiomimetic Activity of Irradiated Culture Medium	35 (16)	403-404	94T 086)	培養液
Kesavan P. C. et al.	1969	Mutagenic effects of irradiated culture media in Drosophila Melanogaster	Indian Journal of Genetics and Plant Breeding	29 (2)	173-183	FI0084	培養液
Moutschen J. et al.	1965	Cytological effects of irradiated glucose	Radiation Botany	5	23-28	Q34-05	糖液
Niemand J. G. et al.	1983	A study of the mutagenicity of irradiated sugar solutions: implications for the radiation preservation of subtropical fruits	Journal of agricultural and food chemistry	31	1016-1020	99-383	糖液
Rinehart R. R. et al.	1965	Mutation in Drosophila melanogaster cultured on irradiated food	Genetics	52 (6)	1119-1126	94T 142) (99-419)	培養液
Rinehart R. R. et al.	1967	Mutation in drosophila melanogaster cultured on irradiated whole food or food components	International journal of radiation biology	12(4)	347-354	94T 143) (99-420)	糖液 培養液

Schubert J. et al.	1971	Cytotoxic radiolysis products of irradiated α,β -unsaturated carbonyl sugars as the carbohydrates	Nature New Biology	233	199-203	FI0506	糖液
Schubert J. et al.	1967	Hydroxyalkyl peroxides and the toxicity of irradiated sucrose	International journal of radiation biology	13 (5)	485-489	94T 147)	糖液
Shaw M. W. et al.	1966	Effects of irradiated sucrose on the chromosomes of human lymphocytes In vitro	Nature	211(17)	1254-1256	94T 150) (99-391)	糖液
Swaminathan M. S. et al.	1963	Mutations: incidence in drosophila melanogaster reared on irradiated medium	Science	141	637-638	94T 154)	培養液
Truhaut R. et al.	1978	Different approaches to the toxicological evaluation of irradiated starch	IAEA-SM-224/14	Vol. II	31-39	94T 164)	デンプン
Varma M. B. et al.	1982	Non-induction of dominant lethal mutations in mice fed gamma-irradiated glucose	International journal of radiation biology	42(5)	559-563	99-398	糖(粉)
Varma M. B. et al.	1982	Mutagenic effects of irradiated glucose in Drosophila melanogaster	Food and chemical toxicology	20	947-949	99-399	糖(粉)
Varma M. B. et al.	1985	Lack of mutagenicity of irradiated glucose in Salmonella typhimurium using host-mediated assay	Experientia	41	396-397	99-400	糖(粉)
Varma M. B. et al.	1986	Lack of clastogenic effects of irradiated glucose in somatic and germ cells of mice	Mutation research	169	55-59	94T 174) (99-401)	糖液
Vijayalaxmi	1980	Sister chromatid exchanges in human peripheral blood lymphocytes grown in irradiated medium	International journal of radiation biology	37(5)	581-583	99-385	培養液
Wilmer J. et al.	1981	Mutagenicity of gamma-irradiated oxygenated and deoxygenated solutions of 2-deoxy-D-ribose and D-ribose in Salmonella typhimurium.	Mutation research	90	385-397	94T 186)	糖液
坂本京子 他	1992	ガンマ線照射グルコースの変異原性	食品照射研究委員会研究成果最終報告書、日本アイソトープ協会		182-191	TJ-32	糖液
川岸舜朗	1992	ガンマ線照射糖液の変異原性およびその抑制	食品照射研究委員会研究成果最終報告書、日本アイソトープ協会		135-149	TJ-33	糖液
祖父尼俊雄 他	1992	ガンマ線照射グルコースについての変異原性試験	食品照射研究委員会研究成果最終報告書、日本アイソトープ協会		150-181	TJ-34	糖液
坂本京子 他	1992	Influence of gamma-ray irradiation on the mutagenicity of maillard reaction products formed between sugars and amino acids	食品照射研究委員会研究成果最終報告書、日本アイソトープ協会		192-203	S-37	糖アミノ酸
Khan A. H. et al.	1965	Mutagenic effect of irradiated and unirradiated DNA in Drosophila	Nature	208(13)	700-702	94T 087)	DNA
Szekely J. G. et al.	1992	An evaluation of the genotoxicity of O-tyrosine, a proposed marker for irradiated food	Journal of Food Protection	55 (12)	1006-1008	FI0573	アミノ酸, たんぱく質

Tagigawa A. et al.	1976	Gamma ray irradiation to semi-purified diet - peroxide formation and its effects on chicks	Japanese journal of zootechnical science	47(5)	292-302	99-381	油脂
Becker R. R. et al.	1956	Nutritional and biochemical effects of irradiation	Food technology	10	61-64	99-333	バター脱脂粉乳他
Lang K.	1963	Toxicity of irradiated fat	Food and cosmetics toxicology	1	125	99-344	脂質
McKee R. W. et al.	1959	The influence of irradiated lipids on the incidence of spontaneous mammary carcinoma and hepatoma in strains A He and C3 H mice	US Army contract report DA-49-007-MD-579			94T 101) (99-346)	脂質
Kimbrough R. D. et al.	1971	Gamma-irradiation of DDI: Radiation products and their toxicity	Journal of Agricultural and Food Chemistry	19 (5)	1037-1038	FI0601	農薬
Szekely J. G. et al.	1991	The effect of gamma-irradiation on the toxicity of malathion in v79 and molt-4 cells	Environmental and Molecular Mutagenesis Supplement	19	72	FI0579	農薬
Kahl R.	1984	Synthetic antioxidants: biochemical actions and interference with radiation, toxic compounds, chemical mutagens and chemical carcinogens	Toxicology	33	185-228	FI0512	添加物

Delincée H. et al.	1998	Genotoxic properties of 2-dodecylcyclobutanone, a compound formed on irradiation of food containing fat	Radiation physics and chemistry	52	39-42	99-427	(CB)
Delincée H. et al.	1999	Genotoxicity of 2-dodecylcyclobutanone	Federal Nutrition Research Institute BFE-R-99-01 Food Irradiation Fifth German Conference			CB- 03	(CB)
Gadgil P. et al.	2004	Mutagenicity and acute toxicity evaluation of 2-Dodecylcyclobutanone	J. Food Sci.	69 (9)	713-716	CB- 01	(CB)
Marchioni E. et al.	2004	Toxicological study on 2-alkylcyclobutanones - results of a collaborative study	Radiation Physics and Chemistry	71	145-148	CB- 04	(CB)
Rao C. V.	2003	Do irradiated foods cause or promote colon cancer?	Nutrition and Cancer	46 (2)	107-109	FI0845	(CB)
Raul F. et al.	2002	Food-borne radiolytic compounds(2-alkylcyclobutanones) may promote experimental colon carcinogenesis	Nutrition and Cancer	44 (2)	189-191	FI0848	(CB)
Sommers C. H.	2003	2-Dodecylcyclobutanone does not induce mutations in the Escherichia coli tryptophan reverse mutation assay	J. Agric. Food Chem.	51 (21)	6367-70	FI0302	(CB)
Sommers C. H. et al.	2004	2-Dodecylcyclobutanone does not induce mutations in the Salmonella mutagenicity test or intrachromosomal recombination in Saccharomyces cerevisiae	Journal of Food Protection	67 (6)	1293-1298	FI0298	(CB)

3. 放射線照射食品の安全性に関する文献等の 収集・整理等の調査に関する考察

3-1 調査に関する検討会

検討会の構成

本調査においては、その考察に本分野の有識者（5名程度）から構成される検討会を設置し、収集する文献の範囲や整理方法についての意見を聴取するとともに、文献の分析と今後必要な試験等に関する議論を行った。

前章までに述べたように、WHOをはじめ多くの政府機関においては、照射食品の安全性を考える上で、次の観点での検討を行っている。

- ①化学的安全性：誘導放射能の有無、照射副産物の有無とその産生量および化学的性質
- ②毒性学的評価：照射食品および照射副産物の毒性
- ③微生物学的安全性：照射による食品中の微生物叢の変化および毒素産生の変化
- ④栄養学的適合性：照射に伴う栄養価の変動(食品としての適性が失われていないか)

そこで、本検討会においては、毒性学、食品化学、微生物学、放射線化学の各分野における専門家を選んで構成し、安全性評価に関する情報収集ができるよう配慮した。

検討会委員

小林泰彦	日本原子力研究所 高崎研究所	(誘導放射能、微生物学的安全性)
関田清司	国立医薬品食品衛生研究所	(毒性学的安全性 一般・生殖毒性)
田中憲徳	食品薬品安全センター	(毒性学的安全性 遺伝毒性)
宮原 誠	国立医薬品食品衛生研究所	(化学的安全性、栄養学的適合性)
等々力節子	食品総合研究所	(国際機関等評価、総括)

事務局 独立行政法人 食品総合研究所 企画調整部

林 徹	企画調整部長
小林秀誉	企画科 (事務局)

オブザーバー

三木 朗、 岡本 博 (食品安全委員会事務局 評価課)

- ・第1回検討会を2004年12月20日、第2回検討会を2005年3月23日に実施し、第1回検討会では、調査の計画についての説明と、文献収集範囲、整理方法等に関する討議。第2回検討会では、文献収集状況に関する経過報告、今後安全性評価を実施する際の論点、本調査実施後に残された課題等に関する討議を実施した。

検討会の内容

文献の収集範囲

(1) 国際機関、各国政府機関などの評価レポート

照射食品の安全性については、過去40年以上にわたる研究が実施され、世界保健機関（WHO）や米国食品医薬品庁（FDA）等の各国政府当局が、既に評価した結果が存在する。そこで、照射食品の安全性評価においては、これらの評価機関における評価結果レポートの検討が非常に重要である。このほか最近になって、オーストラリア/ニュージーランド、およびカナダ政府が新たな食品に対して照射処理の安全性の評価を実施した。

これらの状況を考慮して、今回は以下の機関の評価レポートを収集することにした。

- 1) 世界保健機関（WHO）
- 2) 欧州連合-食品科学委員会（EU-SCF）
- 3) 英国農務省
- 4) 米国食品医薬品庁（FDA）
- 5) カナダ保健省（Health Canada）
- 6) オーストラリア/ニュージーランド食品基準機関（FSANZ）

(2) 研究論文、実験データ

上述の評価レポートの中でも、WHOが1999年に出版した、10kGy以上を照射した食品の健全性について評価レポート（資料I-1-5）、および1994年に出版された10kGy以下の安全性の再評価結果（資料I-1-4）は特に重要である。またWHOの評価後の文献情報のアップデートも必要である。なお、今回の調査の目的は、安全性評価や文献レビューではなく、情報の集約、資料の保存と整理が第一の目的である。

これらのことに留意し、収集の段階での個別資料の取捨選択は行わず、次の範囲に該当するものを出来るだけ網羅的に収集することを基本姿勢とした。

- ・WHOの2つのレポートの評価に用いたデータ（誘導放射能、化学的、微生物学的、毒性学的安全性についての章の引用文献）の収集。今回は、容器包装、検知技術は扱わない。
- ・WHOの評価の後のフォローアップとして、FSTA、BIOSIS、Medlineのデータベースを利用した文献検索を実施し、主に1995年以降の文献の収集。

文献の整理方法

(1) 国際機関、各国政府機関等の評価レポート

- ・照射食品の安全性評価部分の翻訳を作成してオリジナル資料とともに資料集に収録する。また、各国の評価手法の特徴を明らかにし、報告書にまとめる。
- ・WHOの1999年のレポートについては、内部資料として翻訳を作成する。

(2) 安全性についての研究論文、実験データ

- ・収集した論文についての一覧表リストを作成して報告書にまとめる。
- ・文献収集を網羅的に実施しており、その点数が多いので今回の調査において整理出来る範囲が限定される。そこで、収集（候補）文献のリストを検討会で検討し、各分野に於いて優先的に整理すべき事項について次のようにまとめた。

1. 誘導放射能:

- ＊基本的に文献数は限られているので、収集できるものを最大限リストアップする。
なお、検討会での参考意見として次の2点が指摘された。
- ・電子線照射(10MeV)した食品（香辛料）中の誘導放射能を実測した研究として、大阪府立大学の古田先生の論文は重要である。
- ・最近実施された、エックス線のエネルギーの評価の結果のフォローは重要である。

2. 化学的安全性

放射線による化学的成分変化について解説した総説（単行本）の収集と内容理解、研究文献の分析、整理では、以下の観点が重要である。

＊物質的に注目する必要があるもの

- ・2-アルキルシクロブタノン類
- ・アレルギーの観点から蛋白質の変化について言及した論文
- ・ホルムアルデヒド（アレルギーとの関連も重要）

＊現時点で論文が出版されていないが、加熱による生成物としての報告があることから、放射線照射による生成の可能性とその量についての情報収集が必要と考えられるものとして、次の2つの物質が挙げられる。

- ・アクリルアミド
- ・フラン化合物

3. 栄養学的適合性

栄養学的適合性については、Diehl の Safety of Irradiated Foods (2nd ed 1995)に良くまとめられている。この本については、食品安全委員会に収蔵し、資料として利用できるようにしておく。

＊WHOの1999年のレポート以降で、特定の栄養素の破壊について言及した論文については、内容整理を行う必要がある。

4. 微生物学的安全性

＊WHOの2つの総説の中に引用された文献よりも新しい新規検索文献の中に大きく問題となる文献はなかった。

＊WHO等の報告書では、取り上げられた微生物学的安全性においての問題点は解決されているとされるが、過去に論点となった文献および総説の収集は重要である。

＊この項目に関しては収集した文献について以下の観点での分類整理を行う。

1. 照射によって特定の有害微生物を食品中に増す危険性について記述した文献（ボツリヌス菌が増えることがこれにあたる）
2. 照射によって微生物の突然変異が誘発される危険性に関する文献
3. マイコトキシン等の毒素産生能が変化する（増強または低下する）文献
4. 微生物の放射線抵抗性が増す危険性について言及した文献
5. 病原微生物等の特性変化に関する文献
6. その他微生物学的安全性にかかわる文献
7. 単なる微生物の放射線死滅効果に関する文献（ここでは除外の対象とする）

5. 毒性学的安全性

①一般・生殖毒性

動物実験レベルの照射食品の安全性については国際機関WHO等の見解がまとめられ、その中では解決された問題とされている。従って、文献の重要度としては、

＊第一に国際機関およびFDAの総説を整理する。

＊時間的余裕があれば、WHOレポートの中で取り上げられた、毒性発現を認めた文献とそれを否定した文献を収集整理する（供覧できる状態にしておく）。

＊新しい化学物質の毒性研究、放射線分解生成物2-アルキルシクロブタノンの毒性については、整理する必要がある。

②遺伝毒性

＊化学的に注目される物質に関する遺伝毒性文献はきちんと収集整理すべきである。

- ・2-アルキルシクロブタノン類
- ・照射グルコース（糖）の変異原性

＊倍数性細胞の誘発：この問題については、インドのグループの照射小麦の報告に端を発し、その後の数名の研究者によって追試なども行われ、結果的に照射した小麦に倍数性細胞を誘発する可能性はないと結論されているが、一連の議論に係る文献を整理しておく必要がある。

その他： 産業的な意味合いから香辛料、ハーブ類の毒性評価、化学変化については重点的にまとめておく必要がある。

以上の点を考慮して、第2章に示した文献の整理を実施した。

文献収集状況

調査期間を通し、以下の数の文献を収集した（総説も含まれる）。

国際機関・政府資料	26件	化学的安全性	151件
誘導放射能	17件	栄養学的適合性	50件
微生物学的安全性	92件	毒性学的安全性	296件

WHOのレポートで引用している文献の全てについて、今回の調査の期間中に収集を完了していない。リファレンスにあげられた全ての文献を完全に収集することは難しい。が、毒性試験の文献の中で、重要度が高いと考えられるラルテックの実施した毒性試験の報告書について、一部はすでに国内所有しているが、より完全な形での収集を目指して、米国農務省の東部研究所に複写を依頼している。

また、FDA等の評価根拠に用いられている文献で未収集のものがある。この中で、重要と思われるのは、オランダ（CIVO）で実施された鶏肉の動物試験の報告書が挙げられる。これらについては、今後できるだけ入手努力をしておくことが重要である。

文献収集整理に関する今後の課題

検討会の中で、今後の調査やその結果の活用について以下の意見が提出された。

- ＊ 照射食品に用いる容器包装に関する諸外国の規制、安全性に関する文献は、別途取りまとめる必要がある。
- ＊ 上記に指摘した2-アルキルシクロブタノンの安全性研究、フランやアクリルアミドに関する研究なども含め、文献の収集については、今後もフォローアップしてゆくことが必要である。
- ＊ 収集した文献の保管場所を確保し、1箇所にまとめておくことが重要である。
（今回の収集文献に関しては、当面、食品総合研究所で保管する。他機関にある文献や将来にわたる保管方法については、関係機関との調整が必要である。）

3-2 照射食品の安全性評価に関する今後の課題

本調査では、放射線照射食品の安全性について、国際機関および各国政府がこれまでに実施してきた安全性（健全性）評価結果に関する報告書の収集と評価手法の分析、および、その評価に用いたオリジナルデータの収集と分類、整理を実施した。

文献収集と整理の結果を総括して、今後の安全性評価に際して必要な事項を考察した。本調査における検討委員の意見をそれぞれの担当項目について述べる。

総論：照射食品に関する一般的な評価に関して

日本では、1967年から開始された原子力特定総合研究において、当時、放射線照射技術に対するニーズがあると判断された7品目を選定し安全性評価を実施した。その結果選定された7品目については「食品照射運営会議」の評価結果が提出され、安全性についての結論が出された。そして、1972年にはこの評価結果をもって食品衛生法においてバレイショの例外的な放射線照射が認められている。

日本が原子力特定総合研究を実施した時期は、I F I Pのプロジェクト研究など1980年のJ E C F Iに向けて国際的にも活発に研究が実施され、日本の（原子力特定総合研究の）安全性研究の成果も多数の国際会議の場で発表され討議された。そのような意味において、日本で過去に実施した安全性試験は国際的にも十分評価を受けてきたといえる。

本報告書の1章でのべたように、日本でバレイショ照射が許可された後、1980年にJ E C F Iの結論が出され、さらに1983年のコーデックス規格が制定されたことで、放射線照射食品に対する国際的な評価が定まった。欧米では、その後1986年～1987年頃にかけて、EUの食品科学委員会やF D A、英国、カナダなどで放射線照射食品に対する全般的な評価や評価基準の整備と体系的な規制改正などが実施され、ほとんどの機関で、1980年のJ E C F Iの結論を容認している。

その後、1997年にWHOは10kGyを越えた高線量の照射をした食品の安全性を宣言した。米国（F D A）、カナダ保健省(Health Canada)では新たな照射食品の安全性の評価の場において、WHOの照射食品の安全性に関する見解への意見表明がなされているほか、2001年になって新たに食品の放射線照射を認めたオーストラリア・ニュージーランドの評価においても、一般的な照射食品の安全性についてWHOの見解を基にした考察を実施している。また、EUの食品科学委員会は、2003年に、1986年の評価をリバイスして放射線照射食品に対するEUの立場を表明している。

一方、日本においては原子力特定総合研究を実施して以来の社会的変化に対応した食品照射技術の必要性および照射食品の安全性に対する評価が、明確になされていない。

そこで、今後日本において新たに食品照射技術や放射線照射食品に対する評価の実施が求められる場合には、有識者からなる専門調査会などを開催し、まず、これまでにWHOやFDAの専門家が実施した評価において用いたデータの範囲や方法およびその結果を、十分に分析検討することが重要であると考えられる。その上で、一般に放射線照射食品の安全性をどのように評価するか、わが国としての評価手法を決定することが重要であると考えられる。（等々力節子）

誘導放射能

食品への放射線照射によって、食品の構成元素が放射性同位元素に変換される現象、すなわち食品の放射化による誘導放射能の過程は、放射線の種類とエネルギーに依存する。考慮すべき最も重要な物理学的過程としては、高エネルギー光子による核異性状態への原子核の励起と光核反応、そして光核反応により生じた中性子の捕獲反応が挙げられる。

光核反応については、食品照射に用いられる放射線の内、コバルト60のガンマ線（最大エネルギー：1.33 MeV）およびセシウム137のガンマ線（同：0.66 MeV）は光核反応の閾値よりも十分に低いため、食品を構成する元素の放射化は起こらない。5 MeV以下のエックス線および10 MeV以下の電子線では、 ^2H （閾値：2.23 MeV）、 ^{13}C （同：4.95 MeV）、 ^{17}O （同：4.14 MeV）および ^{18}O （同：8.04 MeV）の閾値を上回り、 (γ, n) 反応が起こりうる。反応によって生成する核種はそれぞれ ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O および ^{17}O であるから、直接放射性核種が生成する訳ではないが、同時に発生する2次中性子が他の元素に捕獲されることによる放射化の問題は残る。

原子核の励起エネルギーが陽子や中性子の結合エネルギー以下の場合、原子核はいったん励起された後に再びガンマ線を放出して元の基底状態に戻る。多くの場合、この (γ, γ') 反応の過程は非常に短時間（1億分の1秒以下）で終了するが、 $^{111\text{m}}\text{Cd}$ （半減期：48.5 m）のように準安定準位をとり半減期が1分以上の核異性体もある。

以上のように、照射によって極微量の誘導放射能が生成する可能性はあるものの、その生成量が非常に少ないため、照射食品を直接測定してもその検出は不可能と思われる。実際、食品中に元々含まれているウラン系列、トリウム系列に属する核種や ^{40}K などの自然放射能と比較して、有意に増加したことを検出できた例はない。唯一、黒コショウ、白コショウの構成元素の中からCu、Zn、Cd、Sn、Sb、Cs、Baを選んで、その硫化物（Baについては BaSO_4 ）をコショウの重量の20%添加して10 MeV電子線で100 kGy照射した実験により、照射直後のガンマ線測定で $^{111\text{m}}\text{Cd}$ や $^{137\text{m}}\text{Ba}$ などの短寿命の核種のピークを見出したが、数日後には検出限界以下に減衰したとの報告がある。

従って、食品中の自然放射性核種の濃度との比較において、実用線量の照射により新たに生じる誘導放射能のレベルは極めて低いとされている。ただし安全性評価の観点では、誘導放射能に対する文献情報の整理は常に重要な課題と考えられる。（小林泰彦）

化学的安全性

化学的安全性については、本報告書前章で述べられているように、I F I P（国際食品照射プロジェクト）の研究において、様々な食品の主要成分についての基礎的な化学変化が研究され、ケミクリアランスの概念が形成された。ただし、WHOの2つの報告書に引用されている文献の多くは、主要食品成分の照射による化学変化について言及しており、特定の食品から照射によって生成する放射線分解生成物を網羅的に同定するような研究を実施した例は限られている。米国陸軍研究所が実施した照射鶏肉と照射ベーコンの揮発成分に関してのみ言及した研究がその代表的なものである。

本調査においては時間的な制約もあり、食品の種類を特定して生成する放射線分解生成物を総覧して評価出来るような収集情報の整理が完了していない。そこで、今後の評価に際しては、食品別に照射によって生成する化学物質の種類と量について、今一度、整理しなおす必要があるだろう。その際、I F I Pや米国陸軍等の研究が終了した1980年初頭より後の分析化学的手法の発展や、種々の化学物資に対する毒性や発ガン性に関する研究情報の蓄積を考慮することが重要である。特にホルムアルデヒドのようなアレルギーを誘発する可能性の高い化合物や、ベンゼン、キシレン、トリハロメタン、過酸化水素など発ガン性物質については、現段階で化学的安全性の観点で問題とされる量が照射食品中に生成するとの報告はないが、消費者等からの懸念に答える意味でも、これらの物質の生成量を食品ごとに明確にしておく必要があるだろう。

さらに今日では、かつて認識されなかった食品中の成分間反応に由来する問題が食品の加熱処理などにおいても議論されている。放射線によって高分子性食品成分は分解や重合するが、これらの不揮発性反応生成物とアレルギー性、アクリルアミドの生成、フランの生成等との関連において、さらに安全性を確認調査することも必要だろう。（宮原 誠）

栄養学的適合性

今回の調査で明らかになったように、照射によって三大栄養素はほとんど影響を受けないと考えられるが、微量成分の喪失は十分に配慮する必要がある。食のパターンは個性があり、調理加工の方法も異なるので国民栄養調査のような画一的な数字を用いて、どのビタミンがどの食品に依存しているかを明確に知ることは困難だろう。乳幼児等のようにビタミン不足が大きな影響をもつ層もあることを配慮しつつ、今後照射食品の品目拡大の要求に応えるためには、放射線量に応じて食品ごとに、どの程度ビタミンが減少するののかの確に把握する必要があるだろう。そして、照射の対象とされる食品の（日本の）食事全体に対する摂取割合を推定する方法を検討し、その食品の照射によるビタミン損失の影響を評価することが必要である。（宮原 誠）

微生物学的安全性

微生物学的な安全性については、照射による毒素産生能の変化や突然変異といった一般的に想起される疑問点において、実用的な条件で処理した照射食品の安全性を否定するような研究は現在のところ見あたらない。

今後、特定の食品についてのリスク評価が実施される場合には、第一にその食品の放射線照射がどのような（微）生物学的ハザードの軽減を目的としているのか、また、その目的達成のために必要な照射の条件を、処理の前後の流通、貯蔵方法等の条件もふくめて明確にすることが必要であろう。そして、評価の対象となる食品に潜在する微生物の種類（対象食品における微生物叢）を検討し、想定される照射条件においてそれらの微生物が残存して貯蔵期間中に増殖する可能性について、特にボツリヌス菌のような危険性のある細菌に留意して、検討する必要がある。最終的に、食品の微生物叢全体に与える照射の影響と目的とする（微）生物学的効果とのバランスを総合的に判断することが重要である。

（小林泰彦）

一般・生殖毒性

毒性学的安全性に関しては、変異原性試験、中・長期毒性試験、発がん性試験、生殖試験などの諸試験を網羅した膨大な数の毒性試験が行われている。これらの膨大な試験結果に対する毒性学的安全性評価は世界保健機関（WHO）や米国食品医薬品庁（FDA）等の各国政府当局により行われている。FAO/IAEA/WHO食品照射の健全性に関する合同専門家委員会は、毒性学的影響を示唆した試験結果についても評価したうえで、放射線照射した食品にヒトの健康障害を引き起こす可能性を示す証拠は見られないとの見解を取っている。

一方、照射された食品の一部には過酸化物の増加なども既知のことである。また、2-アシルシクロブタノンなどの放射線特異的分解物の生成も明らかになっている。しかし、照射食品そのものを添加した飼料を与えた動物を用いた種々の毒性試験から、これらの物質が原因物質とした毒性証拠は現時点では、検出されてない。なお、シクロブタノンの問題については、今後も積極的に情報を収集していく必要があると考える。

わが国の放射線照射食品に対する安全性評価手順や方法は明確になっていない。そこで、有識者による専門委員会などを組織し、第一に、国際機関やFDAでの評価内容を本調査で収集した資料などと併せて十分に分析・検討することが重要と考える。その上でわが国の放射線照射食品に関する安全性に関する基本的な考えや評価手順を整理することが重要と考える。（関田清司）

遺伝毒性

照射した食品によって遺伝毒性が発現するか否かについては、発がん性や子孫への影響することを考慮すると極めて重要な問題である。前章にも詳述されているように、これまで照射ジャガイモや小麦粉について陽性の報告があり、これらの報告に対する確認実験もなされている。

照射バイレシヨでは、Kopylov ら（1972）により、そのエタノール抽出物がマウスにおいて優性致死を誘発するとの報告がなされた。照射によって毒物(ラジオトキシン)ができるためと説明されたが、1群あたりの雄マウスも5頭と少なく（通常は、15～30頭）、また、マウスの系統も定かでないことから、試験条件に問題があったと解釈されている。その後、彼らは加熱貯蔵中にラジオトキシンの毒性は消滅する事を報告し、分析化学的な方法でも検出できなかったとしている。一方、I F I P（International Project in the Field of Food Irradiation, Karlsruhe, Germany）がカナダに依頼（Bio-Research Laboratories Ltd.）して行った試験でも陰性の結果が得られている。わが国（Shibuya ら 1992）では、照射や抽出条件等を Kopylov の論文に合わせ、各1群30頭の雄マウスを用いる本格的な優性致死試験が実施されたが結果は陰性であった。小麦による倍数性細胞の誘発に関しては、Bhaskaram(1975)の報告では栄養不良の子供達に照射直後の小麦を食べさせた場合、リンパ球の倍数性細胞が6週目にピークになり、その原因として、貯蔵すると分解するようなコルヒチン様の物質がガンマ線照射により生成される可能性をあげている。Vijayalaxmi（1975）らは、0.75kGyの放射線を照射した小麦を含む飼料をマウス、ラット、サルなどに長期間与えると倍数性細胞を誘発するという報告をしている。一方、Renner(1977)は照射後3日以内に照射飼料を与えた場合、非照射群に比べて倍数性細胞が増加し、照射6週間保存した後に飼料を与えた場合にはその影響がないことを報告している。わが国でも、チャイニーズハムスターやラットにおいて、ポリプロイドや小核誘発を指標に調べられたが、全て陰性の結果であった。

倍数性細胞の誘発に関しては、DNA切断を基点とする染色体の構造異常誘発の場合と異なり、紡錘体の形成に関わるチューブリンタンパクが標的とされている。倍数性細胞の存在は肝細胞では通常の状態でも観察され、また、用いる細胞株によりその頻度が高くなることも報告されており、倍数性細胞のガン化に果す役割やその生物学的な意義が十分に解明されている訳ではない。

近年論点となっている2-アルキルシクロブタノン類に関しては、遺伝毒性に関してエンドポイントの異なる試験系において多数の報告はない。現在得られているデータでは、エームス試験の結果がすべて陰性であり、in vivo コメットアッセイ（ラット結腸）や酸化的DNA障害を見る試験で陽性となっている。後者の二つの試験系はごく初期のDNA障害をみる試験系であり、修復可能な障害も検出されてくることから、この結果をもって遺伝毒性ありとはいえない。よって、遺伝毒性の評価をするには培養細胞を用いる染色体異常試

験や突然変異試験など、より高次の試験系のデータが必要とされる。特に、in vivo コメントアッセイに関しては、標本作成法によっては臓器によっては自然切断が生じ再現性が得られないとの報告があり、試験法自体のバリデーションが必要とされている。また、プロモーターとしての可能性に関しては、形質転換試験や代謝共同試験など、それを示唆する in vitro 試験データもあわせた総合的な評価がなされるべきであろう。（田中憲穂）