

食品照射Q&Aハンドブック

2007年3月

社団法人 日本原子力産業協会

食品照射Q&Aハンドブック

2007年3月

社団法人 日本原子力産業協会

Q & A 目次

質問

1

食品照射とは何か。
その目的、効果、応用分野について

P.2

質問

2

放射線と放射能の相違、放射線照射による
食品成分の放射化の可能性及び放射線の単位について

P.10

質問

3

放射線の生物効果と食品照射への応用について

P.15

質問

4

わが国での食品照射研究の経緯と
今後の課題について

P.20

質問

5

諸外国での食品照射の
進展状況（許可、実用化、規制等）について

P.27

質問

6

収穫後の食料資源の取り扱いの問題点と
食品照射との関連について

P.31

質問

7

放射線の生物効果のうち、
照射生鮮野菜・果実での貯蔵性低下の
可能性と適正線量との関係について

P.34

質問

8

食品の放射線殺菌効果と
微生物相変化、病原菌の殺菌について

P.36

質問

9

香辛料の放射線殺菌効果と
実用化の必要性について

P.41

質問

10

照射食品の異臭、食味、
色調変化と完全殺菌について

P.45

質問

11

照射食品の検知（判別）法と、
消費者の選択及び流通での表示について

P.48

質問

12

動物実験における薬品、食品添加物等での投与量と
照射食品の線量、投与量の違い及び評価について

P.52

質問 13	1980年のFAO・IAEA・WHO 食品照射合同専門家委員会の10kGy以下の 照射食品の安全宣言の根拠と信頼性について	P.54
質問 14	1997年に世界保健機関が勧告した 10kGy以上の照射食品の安全宣言について	P.56
質問 15	2003年に欧州連合が出した 食品照射の安全性に関する見解について	P.58
質問 16	1986年の米国FDAの照射食品の安全性決定指針の 科学的根拠と動物実験との関連について	P.60
質問 17	照射による栄養素の破壊の可能性と、 照射食品の栄養学的評価について	P.62
質問 18	照射によるビタミン(A、B、C、D、K、E)の 破壊(含む貯蔵・調理中)の可能性と栄養学的影響について	P.63
質問 19	照射による不飽和脂肪酸の分解物生成と 消化性低下の可能性について	P.68
質問 20	照射によるアミノ酸、糖類の変化の可能性について	P.72
質問 21	照射馬鈴薯の栄養成分の変化の可能性について	P.75
質問 22	食品中の放射線分解生成物と 加熱分解生成物との比較について	P.78
質問 23	放射線照射により脂質中に生成する 2-アルキルシクロブタノン類の安全性について	P.83
質問 24	照射食品中のフリーラジカルと 過酸化生成物の可能性について	P.87
質問 25	食品中の残留農薬、食品添加物の 照射による有害化の可能性について	P.90

質問

26

糖類溶液の照射による細胞毒性、
変異原性物質生成の可能性と果実照射の安全性について

P.92

質問

27

食品包装材の照射による包装材料成分の有害化と
食品中への移行の可能性について

P.94

質問

28

米国FDAは放射線による分解生成物の内、
10%が特有の分解生成物であるとしたにもかかわらず
安全性試験なしに許可したが、その根拠について

P.97

質問

29

照射による病原性微生物（腸管出血性大腸菌、サルモネラ等）の
突然変異（毒性、耐放射線性、耐熱性増大等）の可能性について

P.99

質問

30

照射食品での微生物相変化による
ポツリヌス菌芽胞等の生残と繁殖の可能性について

P.103

質問

31

照射食品での微生物のアフラトキシン等
カビ毒産生能力増大と
カビ毒の放射線による除去の可能性について

P.105

質問

32

照射食品等による実験動物の
長期飼育試験（3世代を超える）の結果について

P.108

質問

33

食品の商業的放射線処理施設と
照射技術、経済性について

P.111

質問

34

^{60}Co 等放射性物質の輸送に伴う
周辺住民の安全確保対策について

P.115

質問

35

照射施設の安全確保対策及び運転に伴う
従業員、周辺住民の安全確保対策について

P.118

質問

36

食品照射の進展による ^{60}Co 、 ^{137}Cs の需要増大と
原子力発電開発との関連について

P.120

質問

37

使用済み（減衰後） ^{60}Co の線源の処理処分について

P.123

質問

38

米国での59kGy照射した
鶏肉の安全性評価の結果について

P.125

質問 39	照射香辛料の安全性について	P.127
質問 40	ラットへの照射飼料の投与による 生殖行動劣化の可能性について	P.130
質問 41	ラットへの照射飼料の投与による 腎臓、精巢の異常発生の可能性について	P.134
質問 42	ラットへの照射飼料の投与による 着床前死亡の増加の可能性について	P.136
質問 43	照射馬鈴薯(150Gy)によるラットのDNA合成の抑制、 アルコール抽出液での染色体異常、 優性致死の可能性について(ラジオトキシン説)	P.137
質問 44	照射馬鈴薯(60Gy)によるラットの雌の 卵巣重量変化の可能性について	P.140
質問 45	照射馬鈴薯(150Gy)によるラットの 成長抑制の可能性について	P.141
質問 46	照射馬鈴薯(150Gy)によるラットの肺、脾臓の重量変化、 冠状動脈硬化症、散在性心筋炎発生の可能性について	P.143
質問 47	照射馬鈴薯によるラットの雄の 15ヶ月目以前の死亡の可能性について	P.144
質問 48	照射玉ネギ(150、300Gy)による ラットの死亡率上昇の可能性について	P.146
質問 49	照射玉ネギによるラットの雌の卵巣、 雄の精巣重量変化の可能性について	P.147
質問 50	照射玉ネギによるマウスの肋軟骨癒合、 異常胎仔(骨格面)発生の可能性について	P.150
質問 51	照射米によるアカゲザルの雄の 甲状腺、心臓、肺、精巣重量変化の可能性について	P.152

質問 52	照射小麦による栄養失調児の染色体異常 (リンパ球にポリプロイド) 発生の可能性について	P.154
質問 53	照射小麦によるラット、サルのリンパ球の染色体異常や ポリプロイド増加及び犬の甲状腺炎発生の可能性について	P.154
質問 54	照射小麦によるラットの受胎率低下、着床前死亡率、 死亡胎仔数の増加の可能性について	P.166
質問 55	照射小麦によるマウスの 卵巣重量の変化の可能性について	P.168
質問 56	照射エビによる犬の 甲状腺炎発生の可能性について	P.170
質問 57	照射ニンジンによるラットの 成長抑制の可能性について	P.172
質問 58	照射ベーコンによる繁殖力低下、死亡率上昇、 体重減少、赤血球・ヘモグロビン減少、白内障、 腫瘍、栄養阻害因子発生の可能性について	P.173
質問 59	米国FDAがベーコン照射の許可を取り消したが、 その理由と安全性について	P.175
質問 60	照射水産練り製品によるマウスの雄の 腫瘍発生率上昇の可能性について	P.177
質問 61	照射動物蛋白質(肉、魚)による犬の繁殖力低下と マウスの心臓障害発生の可能性について	P.179

用語説明 **P.181**

略語表 **P.193**

◆ 食品照射 Q & A ◆

食品照射とは何か。 その目的、効果、応用分野について

1. はじめに

人類は長い年月をかけて、天日乾燥、調理、燻製、缶・ビン詰、冷蔵、冷凍、塩蔵、発酵、防腐剤・殺菌剤添加等の食品の保存法・殺菌法を発見、利用してきた。これらに加えて新たに放射線を利用する食品照射が登場してきている。しかし、多くの人達は新しい食品加工処理技術に対して拒否反応を示す傾向がある。たとえば、加熱蒸気によって完全殺菌（滅菌）された缶詰食品は今でこそ一般食品として普及しているが、19世紀初期のナポレオン戦争の時代に発明されて軍用食として利用されたにもかかわらず、一般に普及するのに約100年かかっている。牛乳の加熱による消毒殺菌も19世紀の半ばに開発され、生牛乳中の病原菌による小児の死亡率が加熱処理で著しく減少するなどの公衆衛生上の利点があったにもかかわらず、普及するのに50年以上かかっている。当時、牛乳の加熱殺菌に反対した理由の一つは、劣悪な品質及び不適切な生産工程をこまかす手段として加熱殺菌を用いるというものであった。この種の反対理由は現在でも固形食品の殺虫・殺菌法として優れている食品照射に対しても用いられている。

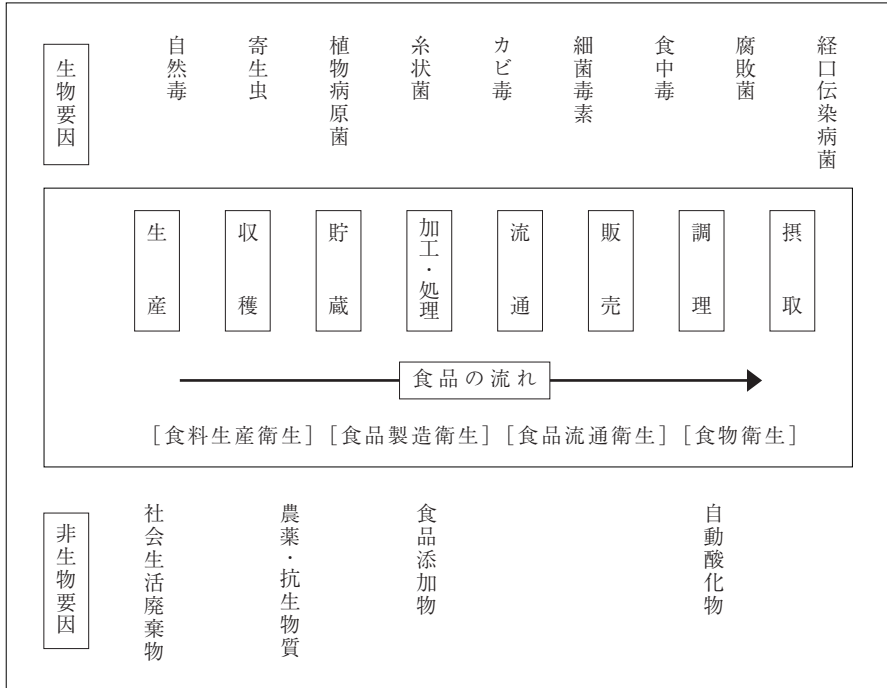
食品照射などの新しい食品加工処理技術が消費者に受け入れられ、普及するためには、処理後の食品が、①栄養価の維持等健全な状態を保持し、②毒性・病原性を含めて安全であり、③生鮮性等の食品本来の性質を維持して、④貯蔵性があり、⑤調理を含めて使いやすく、⑥経済性がある事等とされている。食品照射はこれまでの研究成果によって、一定の条件下（適正な吸収線量、照射前後の微生物汚染等の管理等）で、これらの条件を満足する優れた技術である。

2. 食品照射の意義と国際的な安全性評価の経緯

食料として農場や牧場、漁場から収穫された農産物や畜産物、水産物は貯蔵や加工、輸送等の多くの段階を経て消費者に供給される。これらの食品は図1-1に示す通り、収穫から消費に至る過程で、栄養価や衛生面で常に食品としての適正さを失う方向へ動き、劣化する。食品照射はこれら固形食品の劣化の進行を遅延させようとする技術であり、図中の生物要因の関係では、病原菌等の有害微生物の除去、植物生理機能の調整、または非生物要因の関係では薬剤、食品添加物等の代替方法として害虫除去や衛生化を行って食品の保存性等の向上を図ることを目的としている。

具体的には、食品原料や食品に γ （ガンマ）線、X（エックス）線、電子線を照射して、生鮮野菜・果実等の成熟や発芽等の生理機能をコントロールし（低線量）、更に、寄生虫や害虫ならびにカビ、腐敗性酵母菌、細菌等及び病原菌、カビ毒産生菌等を殺虫・殺菌（低・中・高線量）して収穫後の損耗防止を図り、また食品衛生の向上を図る。

図 1-1 食品の流れと食品劣化に関わる要因



食品に照射する放射線の吸収線量は、食品の種類、生理的状态、水分含有量、脱酸素下、凍結下等や表1-1にあるような処理目的によって異なる。そして、実際の照射では栄養成分の分解や異臭発生、有害成分の生成等の好ましくない変化を生じない線量を選定し、且つ、発芽抑制、熟度調整、殺虫、殺菌等の目的達成のための必要最低限の線量（適正線量）で処理することが必要である。しかし、食品照射を普及させるためには、照射食品の安全性の証明が必要であった。

1971年に健全性（食品としての安全性と栄養適性）評価のための国際プロジェクトが国連食糧農業機関（FAO）、国際原子力機関（IAEA）、世界保健機関（WHO）と米国、英国、旧西ドイツ、フランス、日本など24カ国が参加して発足し、1980年まで継続した。そして、1976年のFAO・IAEA・WHOの照射食品の健全性に関する合同専門家委員会（JECFI）は国際プロジェクトの暫定的な研究成果を基に発芽防止や殺虫、殺菌等の目的で放射線処理した食品に関して、放射線物理学や放射線化学、栄養学、毒性学、微生物学等からの専門的な検討を行い次のような結論を出した。

- 1)食品照射は冷凍や加熱等と同様な物理的な食品処理方法である。
- 2)照射食品の健全性評価を行う場合には、従来のように照射によって放射線分解生成物が生じると仮定しての食品添加物や薬剤等と同様の100倍量での安全性試験を

実施し、1日許容摂取量や安全係数の概念を適用するのは不適當であるとした。

1977年にはFAO・IAEAの飼料の放射線殺菌に関する専門家会議が開催され、50kGyまでの照射は飼料としての安全性に問題がないと勧告した。

1980年にはJECFIの会議が開催され、国際プロジェクトの成果を総括して、食品照射の健全性について以下のような結論を出した。

1) 10kGy以下の総平均線量でいかなる食品を照射処理しても毒性学的な危険性を生じる恐れはない。

2) 栄養学的、微生物学的にも特別な問題を起こすことはない。

3) 10kGy以下での照射食品の毒性試験は今後不要である。

等である。

1983年にはFAO・WHOの国際食品規格委員会（コーデックス）がJECFIの結論に基づき「照射食品に関する国際一般規格（Codex General Standard for Irradiated Foods）」及び「食品照射の実施に関する国際規範（Recommended International Code of Practice for the Operation Facilities Used the Treatment of Food）」を採択し加盟各国に受け入れを勧告した。なお、JECFI、食品規格委員会の両委員会とも再照射については原則として禁止している。

1997年には米国等で行われた10kGy以上照射された肉類の動物試験の成果や放射線分解生成物の研究結果、変異原性試験の成果を基にWHOは10kGyの上限を撤廃するように勧告した。しかし、2003年に欧州連合は10kGy以上の照射食品は一部の食品類が調べられていないという理由によって基本的に10kGy以下の照射食品についてのみ安全性を認めた。2003年の国際食品規格委員会でも基本的に10kGyまでの照射を認めている。

食品照射で利用する事ができる放射線の種類は国際的に以下のとおりに定められている。

1) ^{60}Co 、 ^{137}Cs からの γ 線、

2) 5MeV以下の機械（電子加速器）から得られるX線、

3) 10MeV以下の機械（同）から得られる電子線。

3. 放射線の生物への影響（食品を中心として）

放射線は物質に衝突すると荷電粒子（電子とイオン）を生成する。これらの荷電粒子が次々と反応して物質中の分子等にフリーラジカル（遊離基、活性種）を生成し化学反応を起こす。生物の場合には放射線によってDNA（デオキシリボ核酸）や構成分子等が切断するなどの作用を受ける。放射線の生物作用には直接作用と間接作用がある。直接作用は生物の構成分子等に放射線が直接作用して分子鎖切断、再結合等を起こす。一方、間接作用では生体内に多量に存在する水の分子に放射線が吸収される事によって水分子が活性化（活性酸素等のフリーラジカル生成）されて、DNA等に作用して分子鎖

切断、酸化等の反応を生じる。なお、水存在下ではフリーラジカルの寿命は0.001秒以下と著しく短い。

放射線の微生物等への影響は乾燥下や凍結下では直接作用が多く起こり、水分が多い室温下では間接作用が中心で直接作用も一部で起こるようである。放射線に対する感受性は高等生物ほど高く少ない線量で傷害を受けやすく、細菌やウイルスなどの下等生物では放射線に耐性である。

食品照射ではないが、熱帯、温帯等の一部の地域で農産物への種々の害虫（ミバエ等）の撲滅のために放射線で不妊化された雄を野外に散布する方法がある。わが国では約70Gyの放射線をウリミバエ、ミカンコミバエの蛹に照射して孵化後の成虫を散布して撲滅させる事業が沖縄諸島や小笠原諸島等で実施され撲滅に成功している。ラセンウジバエの撲滅も米国フロリダ半島で成功している。一方、実験動物用の無菌飼料の放射線滅菌も25～50kGyで実用化され、これまでに約40年にわたって英国や日本など多くの国で実用化されている。医療用具は約25kGyの放射線で滅菌でき、わが国でも使い捨て医療用具の70%以上が放射線で滅菌されている。海外では、化粧品放射線殺菌も行われている。

4. 食品照射の目的

食品照射の目的は食料資源の損耗を防止し、食品衛生の向上を図る事にある。食品の照射は食品成分に顕著な変化を生じないように管理し、生鮮状態などの食品本来の性質、機能などを残して処理できるという特徴がある。この事は、応用分野によっては加熱蒸気滅菌による缶詰のような完全な効果を期待しがたい面もある。このため、冷蔵や冷凍、真空包装等の既存の保存方法との組み合わせも必要となる場合もある。

食品を放射線処理するための最適な線量は食品の種類や処理目的、水分含量等によって異なってくる。照射効果のみを期待して過剰に照射すれば、食品の種類によっては好ましくない成分変化を生じて商品価値を失う事になる。反対に適正線量以下では目的とする効果が十分に得られない。更に、一旦腐敗した食品は元に戻すことはできず、産生されたカビ毒等も放射線で分解するのは困難である。栄養成分ではビタミンB₁、C、E、K、A等は高線量の放射線で分解しやすく、高線量の照射条件によっては約50%が分解することがある。また、生鮮果実や野菜を過剰に照射すると組織の軟化や褐変が起こり、照射後に微生物汚染によって腐敗が促進される事もある。

従って、食品照射の実施にあたっては、目的達成のための最小限の線量、すなわち、適正線量を決めて照射するとともに、不適切な照射を防止するために対象食品の生産、加工・製造、貯蔵等では照射工程の前後にわたって害虫の侵入を防止し、微生物汚染を防止し、処理対象食品を傷つけないように適正製造規範(GMP)に従わなければならない。

多くの食品類は10kGy以下で照射効果が十分期待でき、照射による食品の温度上昇はせいぜい2～4℃程度で、食品の成分変化も極わずかであり、放射線で微量に生じる

分解生成物も加熱調理時に生じるものと類似している。また、生鮮、冷凍等の食品本来の特性を損なうことなく殺虫・殺菌等の処理を行う事ができる。更に、放射線は食品包装材を透過するため、包装後の最終製品としての処理も可能である。

5. 食品照射の応用分野

食品照射の応用分野の概要を以下に紹介する(表1-1)

表1-1 食品照射の応用分野

目的	線量(kGy)	対象品目例
低線量照射(1kGyまで)		
* 発芽防止	0.02 ~ 0.15	馬鈴薯、タマネギ、ニンニク、ほか
* 殺虫および害虫不妊化	0.1 ~ 1.0	生鮮果実、穀類、豚肉、ほか
* 熟度調整	0.50 ~ 1.0	リンゴ、熱帯果実、ほか
中線量照射(1~10kGy)		
* 食中毒防止	1.0 ~ 7.0	鶏肉、赤身肉、魚介類、卵白、ほか
* 貯蔵期間延長	1.0 ~ 7.0	鮮魚、魚肉加工品、畜肉加工品、イチゴ、ミカン、ほか
* 菌数低減(衛生化)	5.0 ~ 10.0	香辛料、乾燥野菜、乾燥果実、飼料原料、ほか
* 物性改良	1.0 ~ 10.0	多糖類の低粘度化、乾燥野菜、ウイスキーや焼酎の熟成促進、ほか
高線量照射(10~75kGy)		
* 完全殺菌	30 ~ 75	宇宙食、免疫不全病人患者食、ハイキング用無菌食(主に肉製品)、無菌動物飼料、など

1)発芽抑制

馬鈴薯、タマネギ、ニンニク、ヤムイモ、ショウガ、栗等に低線量の放射線を照射すると発芽が抑制される。馬鈴薯、ヤムイモ等の必要線量は0.06~0.15kGyであり、タマネギ、ニンニク、シャロット等は0.02~0.12kGy、ショウガやコンニャク玉は0.04~0.10kGy、栗は約0.2kGyである。発芽の上限線量はそれ以上では腐敗されやすくなるためである。一方、麦芽生産で大麦に0.01~0.1kGy照射すると発芽が促進され、更に0.25~0.5kGy照射すると根の成長を抑制できる。

2)害虫防除

0.2~0.5kGyの低線量は卵を含むあらゆる穀物害虫を殺滅し、また、不妊化させることができる。また、乾燥果実・野菜、ナッツ、乾燥魚に0.2~0.7kGy照射することで害虫を防除できる。この場合、害虫の再侵入を防ぐための対策を講じておく事が重要である。生鮮果実の柑橘類、マンゴー、パパイア等の熱帯果実の防疫手段で蒸熱処理や燻蒸剤の代替法として果実に寄生するミバエ類やゾウムシ等の殺虫も0.15~0.25kGy

で処理できる。

3) 寄生虫の防除

寄生虫の感染は腹痛などの病気の原因や流産の原因となることがある。また、熱帯地方では寄生虫の感染によって植物人間になる場合もあるし死亡することもある。豚肉に寄生している旋毛虫は0.3kGyで感染力が失われ、0.5kGyで殺虫される。この線量では回虫、トキソプラズマ、多くの熱帯性寄生虫も殺虫される。魚に寄生しているジストマも0.5kGyで殺虫される。

4) 熟度遅延

生鮮果実・野菜等に低線量照射すると熟度が遅延される。0.3～1kGyでマンゴーは約1週間、バナナで約2週間の貯蔵期間が延長でき、マッシュルーム、アスパラガスでも1～1.5kGyの照射で熟度を遅延させることができる。リンゴやモモ、サクランボなどでも0.35～1kGyで約1.5～2倍の貯蔵期間延長が可能である。

5) 食中毒の抑制

消費者にとっても食品産業にとっても食中毒防止は重要な課題である。放射線処理は固形食品の殺菌に優れており、肉や魚介類等の生鮮食品、乾燥食品の殺菌が可能である。すなわち、非芽胞形成の食中毒性細菌の腸管出血性大腸菌O157:H7等やサルモネラ、カンピロバクター、リステリア菌、エルシニア菌、腸炎ビブリオ菌、エロモナス菌等は室温下では1～3kGyで殺菌できる。また、冷凍肉、冷凍家禽肉、冷凍されたエビ・カエルの脚等の食中毒菌も3～7kGyで殺菌できる。香辛料、ハーブ、乾燥野菜等に汚染されている大腸菌群や芽胞形成細菌のセレウス菌、ボツリヌス菌等の食中毒性細菌も5～10kGyで殺菌でき、香りや味、色調も変化しない。免疫力の低下した入院患者用の病人食や宇宙食は30～45kGyで実用化されている。

6) 食品の貯蔵期間延長

食品の腐敗や変質の原因となる微生物を殺菌し、食品の貯蔵期間を延長するのに放射線処理は有効である。必要線量は微生物の放射線感受性と微生物汚染の程度によって決定される。果実、野菜、肉、家禽肉、魚介類等の貯蔵期間は10℃以下の低温貯蔵と放射線処理との組み合わせで大幅な延長が可能である。鶏肉などは1kGyの照射でも貯蔵期間延長が可能であるし、ソーセージ、水産物製品は3kGyで大幅に延長される。香辛料等の貯蔵中のカビ発生は2～5kGyで抑制される。

6. 照射食品の流通管理

食品照射は食品に放射線を照射しても食品成分に大幅な変化を生じないように処理する事が大前提である。この事は他の処理法と比べて、処理、非処理の判別が困難な事を意味しており、違法処理の監視が困難であることが消費者の理解が得られない理由の一つになっている。このため、1988年12月にFAO、IAEA、WHOと世界貿易センター(ITC・国連貿易開発会議；UNCTAD・関税貿易一般協定；GATT)共催で開催された

「照射食品の受容、管理、貿易に関する国際会議」で、照射の履歴の有無を調べる検知技術開発の必要性が強調された。これと並行して、間接的な判定方法として低線量から高線量までをカバーできる高感度のカラーインジケータ（カラーラベル）の食品梱包物への添付が必要であるとされた。また、食品照射を実施するにあたり目的どおりの処理効果を得、かつ食品の持つ特性または商品価値を維持し、過剰照射を避け、食品成分の顕著な変化を抑えるための線量測定や照射装置の運転・管理システムの整備の必要性も強調された。照射食品の検知技術については、その後が開発が進められ国際的に10件の公定法が認められている。

一方、消費者の照射食品に対する選択権とも関連する標示の問題については、1989年4月の国際食品規格委員会食品標示部会で、①「照射処理(irradiation)」、または「イオン化処理(ionization)」のいずれかを標示し、②ロゴ・記号の添付は任意であるが、それを明確に説明する文章を付記する事等が合意された。

7. 食品照射の費用

放射線処理に伴うコストは1kg当たり0.02USドル～0.4USドルの範囲といわれる。照射コストに幅があるのは、放射線の種類や必要線量及び照射施設の利用効率、照射施設で取り扱う食品の種類、照射施設までの輸送費、食品の包装、冷蔵、または加熱等の補助的処理コストの有無が食品の種類によって異なるからである。

商業規模の照射施設の建設費は数百万USドルといわれる。そして、特定の食品を大量に照射処理すれば当然照射コストは安くなる。しかし、野菜、根菜類や果実等の農産物の場合には、収穫期との関係でその食品のみでの通年稼働は困難であり、複数共同体による多目的照射施設の方が適していると思われる。

8. 食品照射の実用化

2003年の時点では52カ国及び台湾がなんらかの食品照射を許可し、32カ国で実用化している。食品照射を大規模に実用化しているのは中国と米国であり、中国ではニンニクが8万トン以上、香辛料が2万トン以上照射されている。米国でも香辛料が6万トン以上照射され、牛肉や鶏肉等が2万トン以上、熱帯果実も数千トン照射されている。韓国や台湾でも4千トン程度の香辛料等が照射されている。また、フランスやオランダ、ベルギー等でも香辛料や冷凍魚介類、鶏肉等が数万トン照射されている。近年、東南アジア等では照射施設が多く設置されてきており、インド、タイ、ベトナム、インドネシア等では香辛料や冷凍魚介類、発酵ソーセージ等が商業照射され輸出もされている。オーストラリアや南アフリカ、カナダ、中南米のメキシコ、アルゼンチン等や東欧のハンガリーやポーランド等でも実用照射が行われており、食品照射の実用化は世界各国に広がっている。

食品照射で期待されているのは香辛料や牛肉等の赤身肉、家禽肉、魚介類等に汚染し

ている食中毒菌等の殺菌と検疫での農業害虫の殺虫処理である。先進国等の多くの国では食品の加工、流通システムが発達しており、流通過程全般にわたって冷蔵、冷凍技術が行き渡っており衛生意識も高い。しかし、現在の技術をもってしても食中毒菌や寄生虫が存在しない肉類や魚介類の生産には限界がある。また、香辛料等の放射線殺菌も衛生上重要である。一方、検疫処理で臭化メチル燻蒸が規制されたため、代替処理法として生鮮果実や輸入穀類等の殺虫処理に放射線処理の導入が期待されている。

参考資料

- 1)FAO/IAEA/WHO「照射食品の健全性に関する合同専門家委員会(JECFI)」報告書:1980
- 2)第16回「日本アイソトープ・放射線総合会議」報文集：日本原子力産業会議、1983
- 3)食品衛生研究：日本食品衛生研究協会、Vol.36.No.6.、1986
- 4)「食品照射」：FAO/WHO、1988
- 5)「照射食品の受容、管理、貿易に関する国際会議」キーノート及び国際文書：1988
- 6)国際食品規格委員会第20回食品表示部会：カナダ・オタワ、1989年4月3-7日
- 7)「照射食品の安全性と栄養適性」：WHO、1996
- 8)「食品照射の基礎と安全性」：JAERI-Review、2001

[参考] 適正製造規範 (GMP)

適正製造規範 (GMP)：WHOが1968年にGMPの制定を決議し、翌年各国に勧告。日本は1976年4月から実施した。医薬品の製造及び品質管理に関する規則で医薬品の安全性と有効性を製品の品質面で保証する基本条件である。基本姿勢として①人為的なミスの抑制、②医薬品の汚染及び品質変化の防止、③高度な品質を保証する設計を求めている。具体的には、a)定義、b)最終医薬品・製造に関する規範、c)建物、d)機械設備、e)従事者、f)原料、g)製造及び管理規準書、h)バッチ製造及び管理記録、i)製造及び管理の手順、j)製品容器と資材、k)包装及び表示、l)品質試験管理、m)出荷の記録、n)安定性、o)有効期間の設定、苦情処理等の項目を記載。食品関係でもこの考えを導入している。

放射線と放射能の相違、放射線照射による食品成分の放射化の可能性及び放射線の単位について

多くの人は「放射線」と「放射能」を混同する傾向があり、照射食品に放射能または放射線が残留していると誤解しがちである。しかし、食品などを構成する元素（原子）には化学的性質は同じでも物理的性質＝質量数等が異なる仲間があり、これらの元素を同位元素と呼んでいる。同位元素の中には物理的に不安定な状態にあって、絶えず電磁波や電子等の微細な粒子を放出して安定な他元素に変化しようとしている（この現象を崩壊という）同位元素もあり、これを放射性同位元素（R I）と呼んでいる。このR Iが放出する電磁波または微粒子は放射線と言ひ、放射線を出す性質、または、能力の事を放射能と言う。一般的には放射性同位元素のことを放射能と呼んでいる。放射線にはR Iが出す電磁波（ γ 線）と荷電粒子線、非荷電粒子線及び加速器（機械）から発生するX線と荷電粒子線等がある。

1. 放射線の種類

R Iや加速器から図2-1に示すような各種の放射線が得られる。これらの放射線のうち、 γ （ガンマ）線、X（エックス）線は電磁波放射線と呼ばれている。電磁波は広義の光のことであり、電場と磁場が一体となって振動している波であり、波長によって図2-2のように分類される。すなわち、可視光線のエネルギーが約1eV（電子ボルト）前後の範囲に対して γ 線やX線は数万eV～数百万eV（MeV）とエネルギーが極端に強く、透過力の強い電磁波である。これに対して、粒子線には原子核イオンまたは電子、素粒子があり、電磁波放射線に比べ透過力が弱い傾向がある。

わが国の放射線の定義は原子力基本法によると、 α 線、 β 線、中性子線、 γ 線、X線、1MeV以上の電子線とされている。食品照射や医療用具の滅菌では γ 線、X線、電子線のみが利用可能である。これらの放射線はイオン化作用があるため電離放射線またはイオン化放射線とも呼ばれており紫外線等と区別されている。放射線のイオン化作用で生じるフリーラジカル（活性種または遊離基）は化学反応、生物学的作用等を起こす。放射線で生じるイオンの寿命は 10^{-7} 秒以下であり、フリーラジカルは水存在下では 10^{-9} 秒以下で消滅する。

2. 放射線の単位

放射線が食品等に照射されたときの単位を吸収線量と呼んでおり、単に線量とも呼ばれている。吸収線量は放射線が食品等の物質と相互作用を行った後、その物質に吸収されるエネルギーを示す単位であり、グレイ(Gy)で表す。1Gyは物質1kg当たり1ジュール（J）のエネルギーが吸収された時の放射線量である。しかし、放射線のエネルギー

図2-1 主な放射線とその発生源

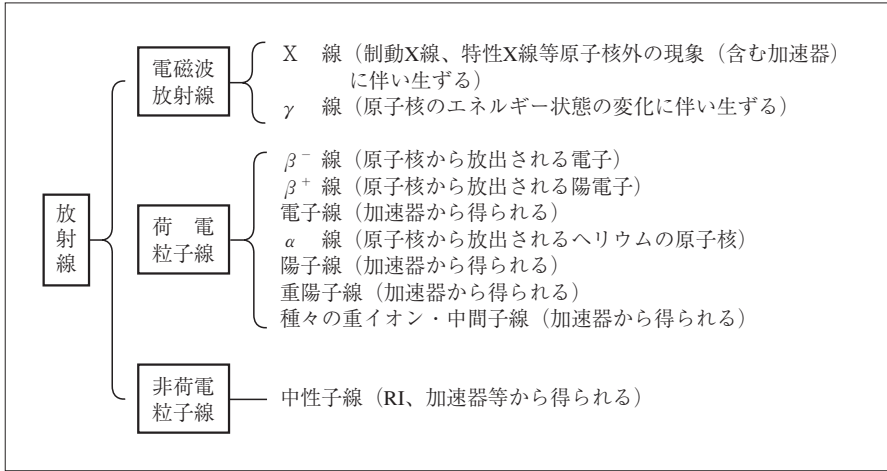
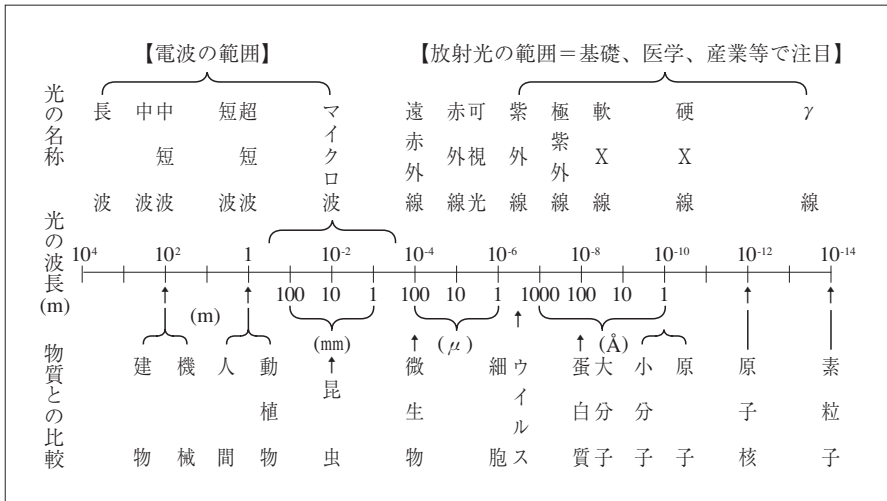


図2-2 電磁波の種類と波長及び物質との比較



吸収は小さく、1Gy=0.239カロリー(cal)/kgにすぎない。すなわち、10kGy (1,000Gy) でも水温を2~4℃上昇させるだけである。以前にはラド (rad) が使用されていたが、1rad=1/100 Gyで換算できる。食品照射とは直接関係ないが、人体等への放射線の影響はシーベルト (線量当量; Sv) という単位を用い、Gyとほぼ同じ吸収線量である。しかし、同じ吸収線量でも人体の場合には放射線の種類やエネルギーによって与える影響が異なる。Sv=Gy × 線質係数 × 修正係数である。放射線に関する一覧を表2-1に示す。

一方、食品等を照射する時の空間線量を照射線量と呼んでいる。照射線量は線源から発生する放射線の量であり、線源からの距離が離れるに従って照射線量は弱くなる。照射線量は主にγ線やX線で用いられ、空気の電離の程度で表しておりクーロン (C) / kgで表す。照射線量率は単位時間当たりの線量を表し、レントゲン (R) / hで表す。 $1R=2.58 \times 10^{-4}C/kg$ である。

放射線のエネルギーを表す単位として電子ボルト(eV)が用いられる。エネルギーの基本単位はジュール (J) であり、eVは電子 (e) が1ボルト(V)の電圧で加速される運動エネルギーを指しており、 $1eV=1.60 \times 10^{-19}J$ との関係がある。R I である⁶⁰Co (コバルト-60) は1.17及び1.33MeVの2本のγ線を放出する。¹³⁷Cs (セシウム-137) は0.662MeVのγ線を放出する。電子加速器では0.1~10MeVの電子線やX線を機械的に発生することができ、その能力はeVとワット (W) またはeVとアンペア (A)で表わされる。R I が放射線を出す能力を示す単位はベクレル (Bq) またはキュリー (Ci) で表す。これはR I が放射線を出しながら1秒間に崩壊 (放射性でない普通の元素等) に変わることをする原子核の数を表しており、1Bqは1秒間に原子核1個が崩壊している状態である。1Ciは1秒間に 3.70×10^{10} 個の原子核が崩壊している状態をいう。

表2-1 放射線に関する単位一覧

項目	単位名	記号	定義	備考
照射線量	クーロン毎キログラム	C/kg	空気1kg中に1Cのイオンを作るγ (X) 線の量	SI単位
	レントゲン	R	空気1kg中に $2.58 \times 10^{-4}C$ のイオンを作るγ (X) 線の量	$1C/kg = 3,876R$
吸収線量	グレイ	Gy	1kgあたり1Jのエネルギーの吸収がある時の線量	SI単位
	ラド	rad	1kgあたり1/100Jのエネルギーの吸収がある時の線量	$1Gy = 100rad$
線量当量	シーベルト	Sv	吸収線量 (Gy) × 線質係数 × 修正係数	SI単位
	レム	rem	吸収線量 (rad) × 線質係数 × 修正係数	$1Sv = 100rem$
放射能	ベクレル	Bq	1秒間に1個の原子核が崩壊している放射性同位元素	SI単位
	キュリー	Ci	1秒間に 3.70×10^{10} 個の原子核が崩壊している放射性同位元素。1Ciはラジウム1gの放射能にはほぼ等しい	$1Bq = 2.7 \times 10^{-11}Ci$
放射線のエネルギー	電子ボルト	eV	電子が1Vの電圧で加速されて得る運動のエネルギー	$1eV = 1.60 \times 10^{-19}J$

3. 食品照射と誘導放射能

食品照射で利用される放射線は、1) ^{60}Co 、 ^{137}Cs から放出される γ 線、2) 5MeV以下の加速器から得られるX線、3) 10MeV以下の加速器から得られる電子線の3種類である。 γ 線源として ^{60}Co と ^{137}Cs に限定しているのは、この2つの元素が産業的に利用するにあたって安定した γ 線源であるからである。また、電子線、X線の場合にエネルギー・レベルが制限されているのは、それ以上のエネルギーでは食品等の一部を放射化（R Iに変える）する可能性があるためであり誘導放射能と呼んでいる。

食品への放射線照射による誘導放射能の生成は放射線の種類、エネルギーによって異なる。すなわち、X線も電子線もエネルギーが極端に高いと原子核が励起されて中性子が放出され、誘導放射能生成の原因になる。X線のエネルギーが10MeV以下で中性子を放出する元素は ^2H 、 ^{13}C 、 ^{17}O 、 ^{18}O であり、ことに ^2H は2.22MeV、 ^{17}O は4.14MeV、 ^{13}C は4.95MeVで中性子を放出する。しかし、これら ^2H 、 ^{13}C 、 ^{17}O などの元素の中性子発生比率は著しく低く、変換される元素もR Iではない。放出される中性子は放出時のエネルギーが高い状態では放射化する能力はないが、食品中や水中で減速されてエネルギーが極めて低い熱中性子になると放射化反応が起こりやすくなる。そして、熱中性子になるまで減速されて放射化され生成される食品中のR Iは ^{38}Cl と ^{24}Na が比較的多く、 ^{42}K や ^{32}P なども極微量に生成する。しかし、天然に存在する ^{40}K や ^{14}C などの食品中の自然放射エネルギーが1kg当たり19~600Bq（ベクレル）に対し、5MeVや10MeVの電子線で誘導される放射能は70kGy照射でも0.2Bq/kg以下と報告されている。しかも、比較的生成量が多い ^{24}Na 等でも半減期は15時間以下であり、極微量に生成される ^{32}P でも14.3日である。X線も電子線も11MeV以上になると放射化される元素が増加するため、誘導放射能の量は急増する。このため、10MeV以下の電子線、5MeV以下のX線のエネルギーでの利用が妥当であろう。なお、X線が5MeV以下なのは電子線に比べてX線での中性子発生量が多いためである。しかし、照射施設に用いるコンベア等に用いる金属材料によっては放射化されやすいものがあるため、7.5MeV以上の電子線利用では放射化されにくい材料を用いるべきであろう。なお、国際食品規格委員会（コーデックス）も食品照射に用いる放射線は ^{60}Co または ^{137}Cs からの γ 線、5MeV以下のX線、10MeV以下の電子線を用いることを勧告している。

なお、食品中に存在する自然放射能はホウレンソウ89~222Bq/kg、玄米74Bq/kg、牛乳19~63Bq/kg等である。また、チェルノブイルの原子力発電所事故による日本での輸入食品の摂取限度については370Bq/kgと設定された。

参考文献

- 1)食品衛生研究：日本食品衛生研究協会、Vol.36(No.6)、1986
- 2)「照射食品の受容、管理、貿易に関する国際会議」キーノート及び国際文書：1988

- 3)「やさしい放射線とアイソトープ」：日本アイソトープ協会、1988
- 4)放射線プロセス用線源に関する研究報告会：日本原子力産業会議、1988
- 5)「食品照射」：FAO/WHO、1988
- 6)FAO/IAEA: Consultants' Meeting on the Development of X-ray Machines for Food Irradiation, Vienna, Austria, 16 ~ 18 October 1995

放射線そのものの持つエネルギーは紫外線などと比べ桁違いに大きいにもかかわらず、生物効果に与えるエネルギーは意外に小さく、完全殺菌に要するエネルギー量でも温度上昇は4~5℃程度にすぎない。この理由は、放射線の生物への作用が活性酸素などのフリーラジカルによる化学反応が中心であり、加熱殺菌のような高エネルギーで起こる分子の励起作用による化学作用でないためである。

1. 放射線によるフリーラジカルの生物作用

放射線の生物効果は遺伝子成分であるDNA（デオキシリボ核酸）に傷をつける働きが中心であり、細胞膜の損傷も起こることがある。食品や生物体は75%程度の水が含まれていることが多く、放射線の作用は主に活性酸素などの水分解ラジカルによる間接効果であり、有機物に対する直接効果（高分子内でのフリーラジカル生成等）は少ない。一方、乾燥状態や活性酸素の移動が妨げられる凍結状態では放射線の有機物に対する直接効果の影響も大きくなる。水分解ラジカルの内、活性酸素に属す水酸基ラジカル（ $\cdot\text{OH}$ ）が主に生物作用に関与し、酸素が共存すると分子状酸素や過酸化水素ラジカル（ $\cdot\text{HO}_2$ ）、スーパーオキシドラジカル（ $\cdot\text{O}_2^-$ ）、過酸化水素（ H_2O_2 ）などの活性酸素も生物作用に関与することが解っている。活性酸素は生体内でも新陳代謝で絶えず生成しているが、水酸基ラジカルなどが生物効果に関与していることは図3-1でも明らかである。ここでは、0.067Mリン酸緩衝液中に懸濁した大腸菌細胞を窒素ガス飽和と笑気ガス（ N_2O ）飽和で比較しているが、笑気ガス下で水酸基ラジカルの生成が増加すると殺菌効果が促進されることがわかる。また、窒素ガス飽和下でグリセリンを添加すると水酸基ラジカルがほとんど捕捉されるため、放射線の直接効果が中心となり著しく放射線に耐性となる。水酸基ラジカル等の活性酸素は細胞内で生成したもののみが細胞死に関与し、細胞外の活性酸素は細胞壁の損傷に関与する。一方、酸素が存在すると窒素ガス飽和下に比べ約3倍殺菌効果が促進される。乾燥された細菌やカビ孢子の場合にも酸素が共存すると比較的少ない線量で殺菌され、乾燥下でグリセリンなどの活性酸素捕捉物質が共存したり、無酸素下で照射すると著しく放射線に耐性になる。酸素による放射線感受性促進効果は癌細胞でも認められており、酸素供給量の少ない癌組織は治療に強い放射線照射が必要である。

2. 生物効果におけるDNA損傷

DNAは2本鎖で構成される巨大分子であり、DNAの1本鎖における放射線損傷の多くは図3-2に示すように一連の修復酵素系により容易に修復されるが、2本鎖の同じ

図3-1 大腸菌S2株のリン酸緩衝液中でのガンマ線感受性

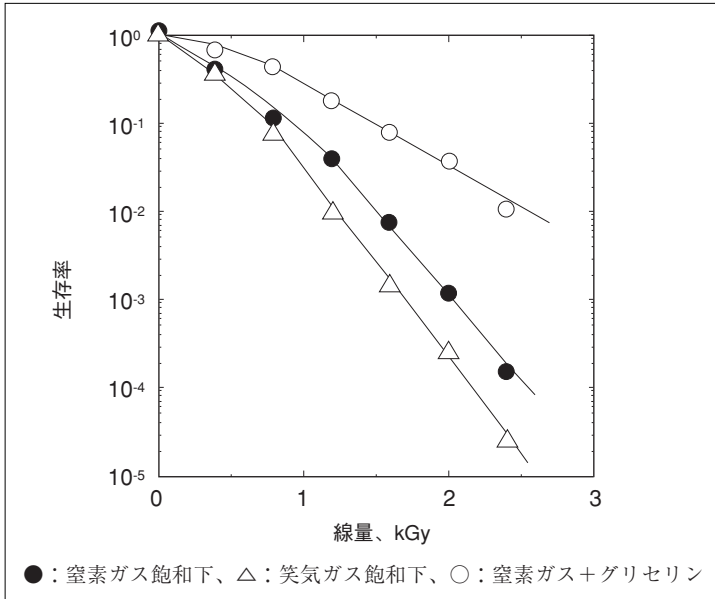
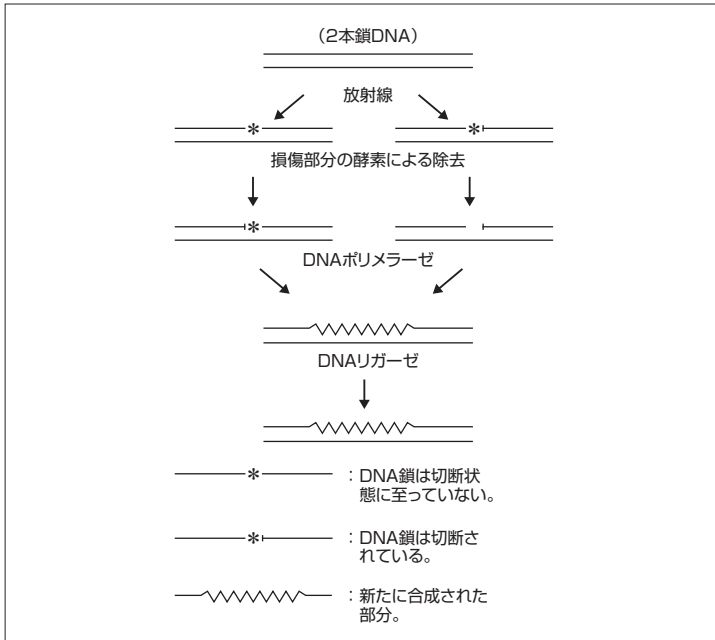


図3-2 放射線により生成したDNA損傷の修復機構



部分が同時に損傷を受けると修復の不完全または失敗が起こりやすくなり、細胞分裂能が失われたり、DNAを構成する塩基の一部が欠失または他の塩基と入れ替わることによる突然変異を引き起こす。しかし、突然変異の比率は著しく少なく、その大部分は細胞分裂能が失われることによる細胞死である。また、突然変異が起こったとしても微生物の場合には細胞内での自動的なDNAの組み替えにより親株と同じ状態にもどることが多い。なお、紫外線での生物効果もDNA損傷が中心であるが、DNA鎖の損傷は構成塩基の一つであるチミンが二量体化することが主に原因しており、大腸菌などでの突然変異発生比率や損傷DNAの修復過程は放射線と似ている。

生物に対する放射線の影響は表3-1に示すように高等生物に対しては少ない吸収線量で大きな生物効果をもたらすが、下等生物の場合には多量の線量が必要である。すなわち、生物に対する放射線の影響は基本的に細胞中のDNA含量に反比例しており、細胞当たりのDNA含量が小さいほど放射線に耐性になる傾向がある。細胞中のおおよそのDNA含量は細菌を1とすると、ウイルスで0.01~0.1、カビ（糸状菌）や酵母菌で10、昆虫で20、哺乳動物で1,000、植物で1,000~5,000である。なお、食品や生体内に含まれる酵素類は放射線に著しく安定であり、完全殺菌された生鮮食品でも酵素活性は残っており、消化酵素による腐敗が起ころであろう。また、狂牛病のプリオンも酵素と同じタンパク質の一種のため放射線に著しく耐性である。

表3-1 照射効果に必要な線量

哺乳動物に対する傷害	0.001~0.005kGy
根茎野菜類の発芽抑制	0.01~0.1kGy
寄生虫・害虫の不妊化、殺滅	0.1~1kGy
カビ類の殺菌	1~10kGy
細菌栄養細胞の殺菌	1~7kGy
細菌芽胞の殺菌	10~30kGy
ウイルスの失活	10~50kGy
酵素の失活	50~200kGy

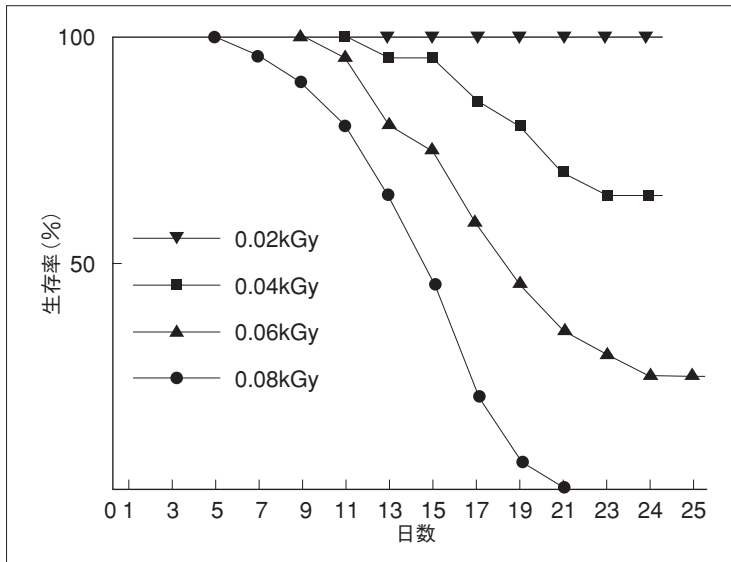
3. 発芽防止及び殺虫効果

放射線による根茎野菜の発芽抑制の原理は、発芽部の組織が他の組織に比べて放射線で障害を受けやすく、細胞分裂能が抑制されやすいためである。すなわち、一般の組織はほとんど障害を受けず生きているにもかかわらず、発芽部だけが成長できない状態になっている。根茎野菜の発芽抑制に必要な線量範囲は馬鈴薯やサツマイモ、ヤマイモで0.06~0.15kGy、タマネギ、ニンニク、シャロット、コンニャクイモで0.02~0.15kGy、ショウガで0.04~0.15kGyである。タマネギやニンニクなどでは発芽活動が始まると放射線による発芽抑制効果がなくなるが、馬鈴薯の場合には発芽の初期では発芽抑制効果が認められる。

害虫は低線量で殺虫できるが、薬剤と異なり即時に死ぬことはなく図3-3に示すよ

うに数週間かかって死亡していく。放射線の場合には1kGy以下の線量で害虫の卵、幼虫、蛹、成虫の不妊化・殺滅が可能である。一般に、害虫の卵は少ない線量で殺虫され、蛹、幼虫、成虫の順に耐性となる傾向がある。害虫を薬剤で処理する場合には神経系や呼吸系が障害を受けやすいが、放射線の場合には遺伝子が主に障害を受ける。虫の体内では生殖器官や造血器官が放射線障害を受けやすく、多くの害虫は0.07~0.5kGyで殺虫または不妊化される。害虫の殺虫線量は同じ属や類間ではほぼ同じ傾向を示し、ゾウムシ類(コクゾウムシ等)と甲虫類は0.15~0.25kGyで殺虫される。ダニ類は0.20~0.40kGy、ガ類は0.40~1.0kGyで殺虫される。海外から輸入される生鮮果実などで問題になるミバエ類なども0.15~0.25kGy、アブラムシ類は0.25~0.40で殺虫される。輸入切り花などで問題になるイモムシ類、ダニ類、アザミウマ類、カイガラムシ類も0.3~0.4kGyで繁殖を防止することができる。木材のカミキリムシ科やキクイムシ科の害虫も0.5kGy以下で殺虫できる。寄生虫の旋毛虫は0.3kGyで感染力が失われ、0.5kGyで殺虫される。サナダムシや回虫、トキソプラズマ、ジストマ、多くの熱帯性寄生虫なども0.5kGyで殺虫される。

図3-3 コクゾウムシの成虫の殺虫効果



4. 微生物等の放射線感受性

微生物の場合、芽胞(孢子)形成細菌や放射線抵抗性菌は一般微生物に比べ放射線耐性が強い。すなわち、多くの非芽胞形成の病原性細菌やカビの仲間は1~5kGyで殺菌されるのに対し、芽胞形成細菌や放射線抵抗性菌は10kGy以上照射されないと殺菌できない(表3-2)。細菌芽胞が放射線に耐性の理由は主に芽胞中のDNAが乾燥状態と

同じ状態にあり、周囲をフリーラジカル捕捉物質で覆われていることが主に関係している。放射線抵抗性菌の場合にはDNA修復酵素系が異常に発達していることが放射線耐性の主な原因になっていると思われるが、放射線抵抗性菌は食品中にはほとんど存在していない。なお、細菌芽胞は熱にも耐性であり100℃で1時間加熱しても殺菌できないが、放射線抵抗性菌は熱には耐性が低い。一方、表3-1に示すようにウイルスや酵素は放射線に耐性であるが、熱に対しては一般細菌と同様に65℃・30分で活性を失うものが多い。

表3-2 溶存空気存在下での0.067M磷酸緩衝液中の各種微生物の放射線感受性

菌種	D ₁₀ 値 (kGy)
大腸菌	0.1～0.2
緑濃菌	0.06
ネズミチフス菌	0.16
サルモネラ・エンテリテイデイス	0.16
リステリア・モノサイトゲネス	0.16
黄色ブドウ球菌	0.21
腸炎ビブリオ菌	0.035
ボツリヌス菌芽胞	1.6
枯草菌芽胞	1.4
セレウス菌芽胞	1.1
麹カビ	0.20
アスペルギルス・フラバス	0.24
酵母菌	0.36
テイノコッカス・ラジオジュランス	2.1
メチロバクテリウム・ラジオトレランス	1.4
トリコスポロン・オリーゼ	1.6

*D₁₀値：生存曲線の直線部分で90%殺菌するのに必要な線量。

参考文献

- 1)H. デル Deininger, H. ユング(代谷次男、天笠淳平訳)：放射線生物学、東京大学出版会、1974。
- 2)伊藤 均：大腸菌及び関連細菌の放射線感受性に及ぼすフリーラジカルと培養基の影響、食品照射、35、1～6(2000)。
- 3)伊藤 均、他：放射線抵抗性細菌 *Pseudomonas radiora* の放射線感受性と放射線損傷からの回復、日本農芸化学会誌、46、127～135(1971)。

1. ナショナルプロジェクト

わが国の食品照射研究は欧米諸国より遅れ1950年代前半ころより開始され、冷凍アサリの殺菌効果、馬鈴薯やタマネギの発芽防止、各種微生物の放射線感受性試験などの基礎研究が行われた。当時は米国などで食品照射の研究が活発に行われており、1960年前後には米国、カナダ、旧ソ連等で馬鈴薯、タマネギ、小麦等の照射が許可された。

わが国では1960年代に入ると多くの研究機関や大学で研究が開始され、1965年には学会としての日本食品照射研究協議会が発足した。当時、食品照射技術が注目され

図4-1 食品照射原子力特定総合研究の研究組織

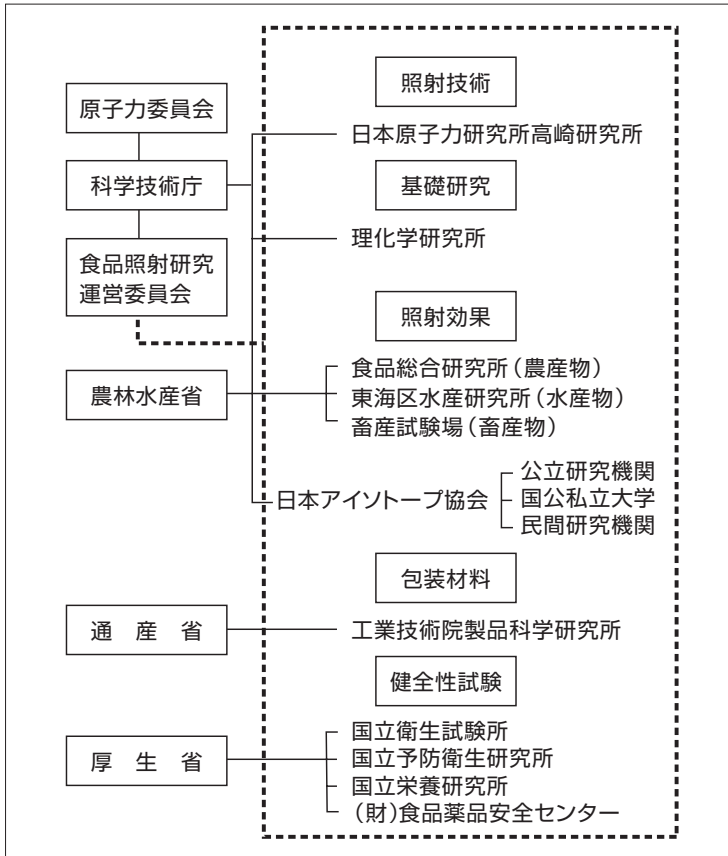


表4-1 食品照射特定総合研究結果の概要

品目 (照射目的)	放射線の種類	照射効果	効果問題等	果点判別法	健全性			実施期間年度	備考
					栄養試験	慢性毒性試験	世代試験		
馬鈴薯 (発芽防止)	γ線	70-150Gyで室温中で8カ月間発芽防止が可能	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	1967 ～ 1971	食品衛生法許可： (1972年) 実用化：(1974年)
玉ネギ (発芽防止)	γ線	20-150Gyで室温中で8カ月間発芽防止が可能	〃	〃	〃	〃	〃	1967 ～ 1978	研究成果報告済み (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の低下するものあり	〃	〃	〃	〃	1967 ～ 1979	研究成果報告済み (1983年)
小麦 (殺虫)	γ線	〃	小麦粉の粘度が低下する	〃	〃	〃	〃	1969 ～ 1979	〃
ウイーンナーソーシージ (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	〃	〃	〃	〃	1968 ～ 1980	研究成果報告済み (1985年)
水産練り製品 (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	〃	〃	〃	1969 ～ 1980	〃
ミカド (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	〃	—	〃	〃	〃	1970 ～ 1981	研究成果報告済み (1988年)
実施機関	農水省研究機関、日本原子力研究所 株式会社アイソトープ協会			国立予防衛生研究所	国立栄養研究所	国立衛生試験所	国立衛生試験所	—	—

たのは、簡単な操作で大量の食品を処理でき、生鮮状態のまま処理でき、温度上昇が殆どない点にあった。このような研究進展及び諸外国での情勢も踏まえ、国民の食生活の改善に寄与することを目的として、1965年から原子力委員会は食品照射専門部会でその推進策等の検討を行い、図4-1に示す通り1967年から旧科学技術庁、旧厚生省、農林水産省、旧通産省傘下の研究機関や公立研究機関、大学の協力体制の基に照射効果や健全性、照射技術等の原子力特定総合研究が開始された。ナショナルプロジェクトとしての特定総合研究に選ばれた食品類は馬鈴薯、タマネギ、米、小麦、ウインナーセージ、水産練り製品、温州ミカンの7品目であり、国公立の研究機関、大学によって研究が分担された。また、上記7品目の健全性試験等を行うのに必要な試料を調整するためのγ線照射施設及び共同利用施設が日本原子力研究所高崎研究所に設置された。

これらの特定総合研究では初めての研究ということもあって、実験動物への照射及び非照射食品の過剰投与による異常発生、タマネギの発芽活動開始後の照射による発芽発生、照射による異臭発生など様々な問題に遭遇した。ことに、照射タマネギの動物による毒性試験では投与量が多すぎたために非照射タマネギを含む全飼料で異常が発生し、最適投与量を求めて試験をやり直すという事態となった。このため、特定総合研究の間も1974年終了の予定が延長になり1983年まで研究が継続された。このような多分野にわたる研究によって表4-1に示すように7品目全ての食品類で健全性に問題がないことが明らかになり、照射効果もほぼ満足する結果が得られた。

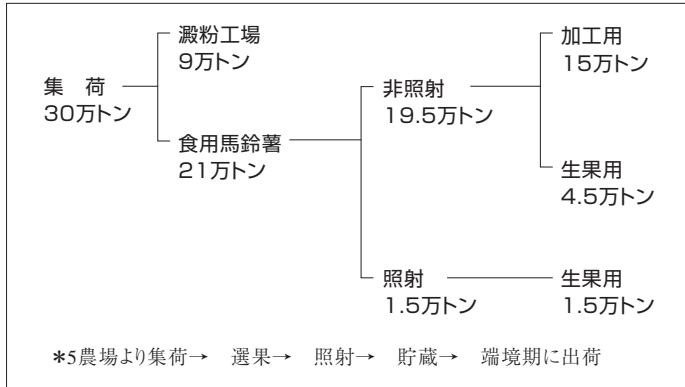
特定総合研究の進展を受けて、旧厚生省は馬鈴薯等の照射を許可する前段階として食品への放射線処理を原則的に禁止するという法令を定めた。これは、照射食品が危険ということではなく法的規制のための処置であった。この後、1972年に馬鈴薯のγ線による発芽防止処理が許可され、馬鈴薯照射施設が北海道の士幌農協に建設された。本施設は世界で初めての商業用食品照射専用施設であり、 ^{60}Co ・20万キュリー、月間1.5万トンの処理能力を持つ設計であった。本施設は1974年より運転が開始され、毎年1万トン以上が青果市場に出回り、端境期の価格安定化に寄与した。馬鈴薯照射には5農協が参加しており、商業化成功の要因としては図4-2に示すように従来の生産ラインの中間に照射施設を設置して、人件費や輸送費などの増加がほとんどなく、照射時期も10月から3月まで取れること、農協の実用化への熱意などが関係していたと思われる。

一方、世界初の照射食品実用化ということもあって、一部の消費者団体による反対運動も激しく起こった。また、1978年には乾燥野菜を不法に放射線殺菌するというベビーフード事件も起こり、食品照射反対運動に拍車を加えた。

2. ナショナルプロジェクト以後の研究

原子力特定総合研究終了後の食品照射研究者の数は大幅に減少したが、食品総合研究所、日本原子力研究所、国立医薬品食品衛生研究所などの国公立の研究機関や大学など

図4-2 土幌における馬鈴薯の集荷と利用



で基礎的な研究が継続された。一方、特定総合研究が終了前後の1980年ころより国際原子力機関と国連食糧農業機関の東南アジア・太平洋地域を中心とする食品照射RCAプロジェクトが発足し、日本も研修生の受け入れ、専門家の派遣等で協力することになった(RCA: Regional Cooperative Agreement for Research, Development and Training Related to Nuclear Science and Technology)。RCAプロジェクトには日本は3期プロジェクトが終了する1995年まで協力した。

表4-2 原子力特定総合研究終了後に行われた食品照射研究

家畜飼料の放射線殺菌	<ul style="list-style-type: none"> ・サルモネラ、糸状菌の殺菌線量は約5kGy ・家畜（雛）の飼育は良好であった ・アフラトキシン等のカビ毒は、100kGyでも分解できない
香辛料の殺菌	<ul style="list-style-type: none"> ・耐熱性細菌、糸状菌の殺菌線量は7～10kGy ・精油成分、抗菌性物質、抗酸化性物質は50kGyでも変化しない
グレープフルーツの検疫処理	<ul style="list-style-type: none"> ・1kGyのガンマ線照射で慢性毒性、変異原性に問題はなかった ・ビタミンCなど栄養成分は変化しなかった
冷凍エビの殺菌	<ul style="list-style-type: none"> ・病原性ビブリオ菌は1～2kGyで殺菌できる ・トリメチルアミン、過酸化物質は照射後にもほとんど増加しない
鶏肉・牛肉の殺菌	<ul style="list-style-type: none"> ・病原大腸菌O157、サルモネラ、リステリア菌、ブドウ球菌等は室温下1～3kGyで殺菌できる ・貯蔵期間は2～3倍に延長される
電子線、制動放射X線による殺菌効果	<ul style="list-style-type: none"> ・線量率効果により必要殺菌線量がガンマ線に比べ約10%増加することがある ・指標菌に対する散乱線、エネルギー効果による感受性の差はない(0.5～10MeV)
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・検知法は物理的方法、化学的方法、生物学的方法が開発された ・食品照射データベース（750件以上のデータ）が整備された ・切り花の検疫処理は0.4kGyで可能

1980年以後には特定総合研究では取り上げられなかった家畜飼料や香辛料、冷凍魚介類、鶏肉等の放射線殺菌効果、グレープフルーツの γ 線殺虫効果等の研究が行われ、東南アジア等からの研修生も研究に参加した。特定総合研究以後に取り上げられた主要な研究成果は表4-2に示すとおりであり、海外からも研究が評価されている。

一方、原子力特定総合研究で照射食品の健全性が明らかになったにもかかわらず、国内での食品照射反対運動は1980年以後も執拗に続けられた。これらの反対運動の論点に反論するために、旧ソ連のクチン氏らの照射馬鈴薯のラジオトキシン生成説に対しては日本アイソトープ協会が組織した研究グループが追試を行い、照射馬鈴薯にはラジオトキシンの生成はなく、研究方法そのものに問題があったことを明らかにした。さらに、日本アイソトープ協会は1986～1991年に食品照射研究委員会を組織して、国内外で問題になっている健全性の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。この研究委員会には約15に及ぶ大学、国公立研究機関の研究者が参加した。取り上げられた研究は誘導放射能、食品成分の変化、変異原性物質の誘発、微生物学的安全性であり、ポリプロイドの問題や照射糖類の変異原性、アフラトキシン産生促進効果など海外で問題視されている項目を中心に検討した。その結果、表4-3に示すように全ての項目において照射食品の健全性に問題がないことを明らかにした。

表4-3 日本アイソトープ協会・食品照射研究委員会の成果

誘導放射能	<ul style="list-style-type: none"> ・10MeVの電子線を香辛料に30kGy照射しても誘導放射能は検出されない ・X線は5MeV以下では誘導放射能の生成は無視できる
食品成分の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・照射によるタンパク質の消化性、免疫化学的性質は変化しない ・香辛料の照射による風味変化は認められない ・照射馬鈴薯のビタミンC損失は無視できる ・照射により生成される活性酸素は食品中のメラノイジンにより消去される
変異原性物質の誘発	<ul style="list-style-type: none"> ・糖を照射すると弱変異原性物質が誘発されるが生体内で無毒化される ・糖とアミノ酸混合物では照射による変異原性物質は生成しない ・照射小麦による倍数性細胞の誘発はない
微生物学的安全性	<ul style="list-style-type: none"> ・照射によるアフラトキシン等の微生物毒素産生促進効果は無視できる ・照射による有害微生物の変異誘発はない

1980年以後は食品照射施設として従来の ^{60}Co 線源の代わりに電子線や制動放射X線を使用しようとする動きが出てきたため、電子線の微生物や食品成分に対する線量率効果、散乱電子線の影響、エネルギー効果等の研究も行われた。

1990年代に入ると食中毒対策としての病原菌の殺菌効果や植物検疫への応用を目的とした切り花の殺虫効果の研究が行われた。また、照射の有無を判別する検知法研究も活発に行われ、物理的方法、化学的方法、生物学的方法で多くの有望な結果が得られ、

2000年以降も研究が続けられている。さらに、食品照射データベースが日本原子力研究開発機構で整備されており、放射線利用振興協会でも食品照射データベースが整備され、両者ともインターネットで公開されている。

3. 今後の課題

米国などでの初期の研究及びわが国の原子力特定総合研究で取り上げられた品目は全て食料品の貯蔵期間延長を目的としていた。しかし、最近の食品照射の応用は食中毒防止対策や植物検疫、薬剤処理の代替など食品の安全、衛生対策が注目されている。すなわち、牛乳などのような液状食品を除き肉製品などのような固形食品は熱伝導度の関係で加熱による衛生処理が困難であり、透過力の優れた放射線処理が適している。また、植物検疫などでも燻蒸や他の処理法は薬剤耐性虫の発生や殺虫効果が不十分などの問題があり、放射線処理法が適している。しかも、検疫処理に用いられてきた臭化メチル燻蒸は2005年以後にはオゾン層破壊物質として先進国では一部の検疫処理を除いて使用が禁止されている。

わが国では馬鈴薯の商業照射が1974年に開始され、世界で最初に食品照射の実用化に成功したにもかかわらず、その後の実用化品目は出ていない。わが国で食品照射の実用化が進展していない理由は、一般消費者による放射線と放射能の混同と反対運動が主な原因と思われる。しかし、土幌農協では33年にわたる馬鈴薯の商業照射の実績があり、このことは業界の熱意さえあれば反対運動に打ち勝って食品照射の実用化が可能であることを示している。近年、馬鈴薯以外で早急な実用化が期待されているのは香辛料の放射線殺菌とニンニクの発芽防止であろう。わが国では香辛料の殺菌は高压水蒸気による過熱殺菌法で行われているが、香りが大幅に減少し色調が変化するなどの問題がある。放射線殺菌法はこれらの問題がなく、自然な状態での殺菌が可能である。ニンニク等はこれまでは発芽防止剤が収穫前に散布されてきたが、使用できなくなったため現在は -2.5°C で低温処理されているが、常温では腐りやすくなり、放射線処理が期待されている。輸入穀類は現状では臭化メチル燻蒸が困難となったためホスフィンが使用されているが、耐性虫の発生や浸透力が不十分などの問題がある。熱帯果実はミバエ等の殺虫のため蒸熱処理されているが果実に傷害が出ている。これらの検疫処理でも放射線処理は有効である。

照射食品の健全性については国際的に研究が終了しており、反対運動が問題にしている放射線分解生成物であるシクロブタノン類は鶏肉を59kGy照射しても生成量は極微量であり、公定法による変異原性試験では陰性であり、発癌促進作用がある可能性があるという報告も大量投与の場合の事であり、食品中には制癌物質も含まれていることから問題にする必要はない。照射食品の検知技術や照射効果、照射技術については研究課題がいくらか残っているが、これらの課題は照射食品を許可する障害となるものではない。わが国での課題は消費者への照射食品受け入れのための啓蒙活動であろう。

参考文献

- 1)伊藤 均：照射食品における国内・国外の動向について、RADIOISOTOPES、36(6)、290～299(1987)。
- 2)松山 晃、降矢 強、市川富夫、内山貞夫、伊藤 均、林 徹：照射食品、総合食品安全辞典、産業調査会・辞典出版センター、842～877、1994年。
- 3)食品照射研究委員会：研究成果最終報告書、(財)日本アイソトープ協会、1992年。
- 4)伊藤 均：なぜ食品照射かーその歴史と有用性、[1] わが国における食品照射技術の開発、放射線と産業、110、36～42(2006)。

諸外国での食品照射の進展状況 (許可、実用化の現状、規制等)について

1. 諸外国における許可・実用化の動向

諸外国における食品照射の研究は1940年代初期から始められた。食品の腐敗防止を目的として多くの研究が実施されたが放射線源の入手が容易でなかったため、基礎的研究が行われた。1950年代に入ると食品照射は国家規模で研究が行われ始め、米国、旧ソ連、英国、カナダなどで研究が進められた。更に、1960年代に入ると多くの国で研究が開始され、世界の約25カ国で種々の食品に対する研究が実施された。

その結果、1950年代から1960年代後半までに米国、旧ソ連、カナダ、英国、オランダ等で馬鈴薯、タマネギ（発芽防止）、生鮮野菜・果実（殺虫・熟度調整）、乾燥果実、肉製品、病人食（殺菌）についての放射線処理が許可され、さらに、1970年代に入ると日本（1972年）の馬鈴薯を始め、フランス、イタリア、フィリッピン等、1980年代にはノルウエー、韓国、インド、インドネシア、フィンランド、デンマーク、中国、ベルギー等で許可され、食品照射の許可国は37カ国、1地域となった。一方、欧州連合が香辛料及び乾燥野菜の放射線殺菌を一括して許可したため、2003年の時点で52カ国1地域となり、世界で100品目以上の食品類が許可されている。

このように、食品照射の許可国が増加したのには、以下のような理由が考えられる。

- 1) 各国での食品衛生規制の強化（食品由来の病気と添加物からの回避等）、
- 2) 臭化メチル燻蒸等の薬剤規制が厳しくなり、植物防疫対策の代替法が求められている、
- 3) 発展途上国等における食料自給率の向上や農水産物の輸出対策としての処理技術の重要性が増したこと、
- 4) 世界保健機関等の国連機関が1980年に「10kGy以下で照射した食品の健全性に問題がない」、1997年に「10kGy以上の照射食品の健全性も問題がない」との結論を出したこと、
- 5) 国際食品規格委員会（コーデックス）が1983年に10kGyまでの照射食品の規格基準を採択し、2003年には「最高線量は正当な技術目的を達成するのに必要な場合を除き10kGyを越えるべきでない」との改訂案を採択したこと。

食品照射実用化の状況は表5-1に示すように2003年の時点で31カ国、1地域である。米国では香辛料が年間5~6万トン照射されており、牛肉挽肉も48の州の1,000以上のスーパーマーケットで販売されている。ハワイ等では熱帯果実の殺虫処理も行われており、宇宙食や病人食、軍用食の完全殺菌も実用化されている。フランスやオランダ、ベルギー等では香辛料や乾燥野菜が大量に照射されており、鶏肉や冷凍魚介類、チ

ーズ等も実用照射されている。ハンガリーやチェコ、ポーランド、ノルウエー等でも香辛料などが実用照射されている。アジアでは中国が食品照射を大規模に実用化しており、ニンニクは年間8万トン以上が照射されており、香辛料が2万トン以上、その他、肉類、生薬等も照射されている。韓国も香辛料等が年間4千トン以上照射されている。タイやベトナム、インド、インドネシア、台湾等でも香辛料や冷凍魚介類、発酵ソーセージ等が実用照射されている。カナダや南アフリカ、オーストラリア、メキシコなどの中南米諸国でも香辛料等が実用照射されている。ウクライナでは2000年の時点では旧ソ連以来の輸出用の穀類照射が継続されていたが、現状はわからない。

表5-1 食品照射を実用化している主な国

国名	食品類
アルゼンチン	香辛料、乾燥野菜
オーストラリア	香辛料
ベルギー	香辛料、乾燥野菜、冷凍魚介類
ブラジル	香辛料、乾燥野菜
カナダ	香辛料、乾燥野菜
チリ	香辛料
中国	香辛料、乾燥野菜、ニンニク、肉類等
チェコ	香辛料、乾燥野菜
フランス	香辛料、乾燥野菜、鶏肉、冷凍魚介類等
ハンガリー	香辛料、乾燥野菜等
インド	香辛料
インドネシア	香辛料、冷凍魚介類
イスラエル	香辛料、乾燥野菜等
日本	馬鈴薯
韓国	香辛料、乾燥野菜等
メキシコ	香辛料、乾燥野菜
オランダ	香辛料、乾燥野菜、冷凍魚介類、鶏肉、チーズ等
ノルウエー	香辛料、乾燥野菜
ポーランド	香辛料、乾燥野菜
南アフリカ	香辛料、ニンニク等
タイ	香辛料、発酵ソーセージ等
アメリカ	香辛料、乾燥野菜、牛肉、鶏肉、熱帯果実等
ベトナム	香辛料、冷凍魚介類
台湾	香辛料、乾燥野菜等

その他、約8カ国

2. 諸外国における主な動向

食品照射に関わる主な動向としてはF A O、I A E A、W H O等の国連機関関係の報告や勧告、国際会議開催等の他に以下のようなことも実用化に大きく関係している。

- 1)中国で1984～1985年にかけて医学生等78人のボランティアにより35種類の照射食品の試食試験が行われ、健全性が改めて実証された、

- 2)米国が1986年に1kGy以下での生鮮果実、野菜への照射、30kGy以下での香辛料等の照射を許可し、59kGy照射された鶏肉の健全性が証明された、
- 3)米国農務省が1999年に肉類照射のための規格基準を制定し、食中毒菌の殺菌のための放射線処理を許可した、
- 4)米国農務省が2000年に生鮮果実の検疫処理のための規格基準を制定し、ミバ工等の放射線殺虫処理を許可した、
- 5)欧州連合は1998年に10kGy以下での香辛料、乾燥野菜の放射線殺菌を許可し、2003年には「10kGy以下の照射食品は安全であり、香辛料等は30kGyまで安全である」と認めた事等である。

3. 国際会議での勧告事項

各国での食品照射技術の実用化の進展によって、国際間貿易の場に照射食品が登場してきている。こうした情勢を踏まえ、1988年12月にジュネーブで、FAO/IAEA/WHO/ITC-UNCTAD・GATTの共催により「照射食品の受容、管理、貿易に関する国際会議」が開催され、照射食品についての国際的な認識調整のための検討が行われた。この会議には57カ国（含む批判的な国、グループ）が参加して、食品照射技術について討論した。この討論では、食品衛生や食料保存の観点からの肯定的な意見や、安全性への懸念や反原子力に基づく批判的な意見等が出されたが、最終的に、食品照射が固形食品の病原菌汚染を低下させ、食品に由来する病気を減少させる可能性を秘めていること、また、収穫後の損耗を減少させることで、より多くの食品の供給が可能となること、更に、植物防疫手段として農産物の貿易促進に貢献すること等を確認し、以下の勧告を採択した。

- 1)食品照射を適用することが有効と思われる食品に対しては、国民の健康のために食品照射技術の利用を考慮すべきである。
- 2)食品照射が農産物の収穫後の損耗を減少させ、また、植物防疫の手段として有効である場合は、食品照射技術の利用を考慮すべきである。
- 3)食品照射の実施及び照射食品の販売の前提条件として、各国政府は食品照射及び照射食品の販売を管理するための規則を策定すべきである。特に、この規制には照射施設の登録、許可・管理、検査、照射食品に関する記録や表示、監督官の訓練、GMPの導入等に関する事項を盛り込むべきである。
- 4)食品照射を管理するための規制を策定する時には、その規制が照射食品に関する国際一般規格及び食品照射の実施に関する国際規範に盛り込まれた、国際的に合意された原則と一致するようにすべきである。また、食品照射を実施中は、各国及び国際的な規格で定めた線量測定を行い、正当な照射が行われていることを示す証拠とすべきである。
- 5)各国政府は、照射施設を離れても行政による照射食品の管理が行えるように、照射

食品の検知技術の開発のための研究を実施すべきである。この事により、照射食品の貿易を促進し、食品照射全体の管理システムに対する消費者の信頼が高まる。

- 6)貿易に供される照射食品の表示は、国際食品規格委員会の原則と一致したものであるべきである。
- 7)各国政府は、人間の健康、安全、環境の保護のために、食品照射施設の設計及び運転が国際的に合意された規格に合致した規準に従うようにすべきである。
- 8)各国政府は、特に食品照射を許可しようとしている政府は、食品照射について明瞭で適切な情報を提供するようにすべきである。その際、消費者団体を含むあらゆる関心を有している団体の参加を得るようにすべきである。

参考資料

- 1)FAO/IAEA/WHO「照射食品の健全性に関する合同専門家委員会（JECFI）報告書」：1980
- 2)「食品照射」：FAO/WHO、1988
- 3)「照射食品の受容、管理、貿易に関する国際会議」キーノート及び国際文書：1988
- 4)IAEA News Features : No. 5. December, 1988
- 5)Federal Register : Irradiation of meat food products, final rule, vol 64, No. 246, Page 72150, December, 1999
- 6)「食品照射の基礎と安全性」、JAERI-Review 2001-029、2001

収穫後の食料資源の取り扱いの問題点と
食品照射との関連について

食料として収穫された農水産物は貯蔵・流通中に絶えず劣化、すなわち、食品としての適正を失う方向に変化しつつある。そして、一旦、品質劣化や腐敗、カビ毒等で汚染された食品は放射線を照射しても元に戻すことはできない。収穫後の食品は乾燥、冷蔵、冷凍、加熱処理、塩蔵、薬剤処理等によって保存、流通している。しかし、多くの食品類は収穫前にも微生物や害虫の汚染があり、収穫後にも微生物汚染等が起こる。また、生鮮食品では発芽や熟度の進行による劣化も起こる。もちろん、このような食品の劣化の進行に対しては様々な処理法が開発されてきている。従来の処理法も完全というわけではなく、次のような問題点がある。

1)発芽防止：

2000年ころまで、わが国では収穫直前に発芽防止剤のマレイン酸ヒドラジド等を散布して発芽を防止していた。しかし、残留毒性などの問題があり、現在では使用されていない。このため、馬鈴薯では発芽時に発生される毒素のソラニンやチャコニンによる食中毒も起こっている。また、ニンニクでは -2.5°C で冷蔵して発芽を防止しているが、流通時や家庭での常温保存時に腐敗しやすくなるという問題がある。

2)穀類の殺虫：

従来、輸入穀類は臭化メチル燻蒸によって殺虫処理されてきた。臭化メチルは穀類の内部まで浸透性があり殺虫効果が優れていたが、害虫の卵は殺虫効果が不十分であった。しかし、臭化メチルはオゾン層破壊物質であるため、先進国では2005年で一部の検疫処理を除き使用禁止になった。臭化メチル代替の最も有効な薬剤はホスフィン（リン化水素）であるが、臭化メチルに比べ浸透性が低く、薬剤耐性虫が発生しやすいという問題がある。また、殺虫効果が不十分なため、輸入穀類に汚染している国内に生息していない農業害虫が侵入してくる可能性がある。

3)生鮮果実の殺虫：

生鮮果実の中には臭化メチル燻蒸ができないものも在るため、検疫処理のために輸入果実のマンゴーやパパイヤ、グレープフルーツ等の中心温度を $46.8^{\circ}\text{C} \cdot 10$ 分間加熱する蒸熱処理が行われてきている。しかし、蒸熱処理は果実が損傷を受けるという問題点がある。

4)牛肉、豚肉、鶏肉、生鮮魚介類等の冷蔵保存：

これらの食品類は 10°C 以下で冷蔵されて流通されている。しかし、これらの食品類は解体・漁獲時に微生物によって汚染されており、腐敗性菌の中には 10°C 以下の低温でも繁殖する低温性細菌のシュウドモナス、フラボバクテリウム、乳酸菌群、アシネチバクター、サイクロバクター（旧アクロモバクターまたはモラクセラ・アシネチバクタ

一) などで腐敗性酵母菌類によって2~3日で腐敗するものが多い。また、食中毒性細菌のサルモネラや腸管出血性大腸菌のO157:H7など、黄色ブドウ球菌、カンピロバクター、リステリア菌、腸炎ビブリオ菌、エロモナス菌なども汚染しており、リステリア菌やエロモナス菌は5℃前後でも増殖し、腸管出血性大腸菌やセレウス菌なども10℃前後でも増殖するものがある。従って、冷蔵庫の過信は危険である。

5) 冷凍食品：

冷凍では食品類は1年以上も保存可能であるが食味が低下するものもあり、汚染微生物は殺菌されるわけではなく、解凍時に増殖を開始する。冷凍食品は組織が破壊されやすいので解凍時には微生物は生の食材より繁殖が急速に起こりやすい。

6) 保存料による加工食品の保存：

肉製品や水産加工製品等はソルビン酸などの保存料を添加した製品が多い。しかし、ソルビン酸を添加しても乳酸菌や腐敗性酵母菌は増殖してくるため腐敗抑制効果はあまりない。しかし、食中毒菌等の増殖は抑制されるので保存料添加の効果はあるのであろう。一方、保存料添加食品を主食として摂取すると人体の腸内細菌の種類に影響を受ける恐れがあり、消化や栄養補給に有効な細菌が低減する恐れがある。また、保存料には人体に有害なものもある。ソーセージ等への亜硝酸塩の添加はポツリヌス菌の発生を抑制する目的であるが、大量の添加は発癌性物質（ニトロソアミン）の生成を促進させる。

7) 香辛料・ハーブ等の殺菌：

香辛料・ハーブ等は微生物汚染が著しい食材であり、1g当たり $10^4 \sim 10^8$ 個の細菌類、カビ類で汚染されている。香辛料等にはセレウス菌等の食中毒菌も汚染しており、熱帯で生息しているアフラトキシン等のカビ毒を産生するカビ類も多く汚染している。香辛料等をハムやソーセージ、水産練り製品等に添加するとこれらの菌による食中毒が発生する可能性がある。このため、食品衛生法では香辛料等の添加物は1g当たりの菌数が 10^3 個以下とするように義務づけている。香辛料等の殺菌には従来はエチレンオキシド燻蒸で殺菌されてきたが、発癌物質のエチレンクロロヒドリンが生成するため、わが国では使用が禁止されているし、香り成分も減少する。これに代わり、高温高圧水蒸気の $140 \sim 180^\circ\text{C} \cdot 2 \sim 5$ 秒の過熱蒸気殺菌処理法が導入されているが、香氣成分が大幅に低減し色調も変化するという問題点がある。このため、食品業界では添加物等によって過熱蒸気殺菌の欠点をカバーしている。しかし、食品添加物同士が反応して発癌性物質を生成する可能性もあり、添加物に頼ることは望ましいことではない。

8) 缶詰食品：

缶詰は $121^\circ\text{C} \cdot$ 約30分で加熱滅菌しており、半永久的に保存できるが、生鮮性が失われており、栄養成分も著しく分解される。ことに、ビタミン類や必須アミノ酸類の分解が著しい。

食品の放射線処理は上記の問題点解決に対応する技術である。しかし、食品照射の場

合にも照射しようとする食品は処理前の管理を含め微生物や害虫による汚染及び酵素活性による劣化または自然劣化を防止できるような条件下で取り扱わなければならない。特に、最終工程で放射線殺菌を行うとの理由から、途中段階での食品の微生物等の衛生管理を怠ってはならない。他の加工処理において、GMPにより求められている衛生的な食品の取り扱い、食品照射においても要求されるものである。すなわち、食品照射はGMPの代替として使用すべきでない。

不衛生に取り扱われた食品が照射されて流通することを防ぐには、照射施設または流通時における照射対象食品の品質検査を行う必要がある。不衛生に取り扱われた食品が照射されて流通することに伴う問題として最も大きいものは、微生物が産生した毒素が残留していることであり、毒素は高線量でもほとんど分解されない。更に、照射後の食品類についても微生物や害虫による再汚染がないように取り扱うことが必要である。また、包装材や生鮮食品等は照射の有無にかかわらず傷がつけられると腐敗しやすくなるので注意する必要がある。

参考文献

- 1)世界保健機関：照射食品の安全性と栄養適性、コープ出版、1996年。
- 2)伊藤 均：なぜ食品照射かーその歴史と有用性、[3] 食品の照射効果と衛生化、放射線と産業、112、36～41(2006)。
- 3)日本原子力産業会議：諸外国における食品照射の動向、「照射食品の受容、管理、貿易に関する国際会議」キーノート及び国際文書、1988年。
- 4)林 徹：臭化メチルをめぐる国際情勢と放射線照射、食品照射、31、19～21(1996)。

放射線の生物効果のうち、
照射生鮮野菜・果実での貯蔵性低下の
可能性と適正線量との関係について

生鮮野菜や果実に放射線を過剰照射すると、軟化や組織の透過性の増加を生じる。このような変化が起きると、照射後に微生物による腐敗を促進させる可能性がある。一方、放射線照射は適正線量の範囲では生鮮果実や野菜の熟度を抑制するので、適切な貯蔵条件下では非照射品よりも貯蔵期間を延長できる。果実や野菜の食味や組織に与える照射の影響は照射する線量に依存しているが、1kGy程度までは影響のないものが多い。例えば、殺菌を目的とした1kGy以上の線量を果実や野菜に照射すると多くの果実や野菜には好ましくない影響が生じる。例外としてイチゴの照射では、2kGy照射で品質劣化を起こさず腐敗性のカビ類が殺菌され貯蔵期間を延長できる。しかし、野菜や果実の照射の目的は発芽防止やミバエ等の殺虫、熟度遅延が目的であり、1kGy以下で十分である。

ところで、野菜や果実等の生鮮農産物の照射では生命力が弱り、腐敗率が低下するという指摘がある。馬鈴薯やタマネギ等は0.15kGy以上照射すると腐敗率が上昇するが、0.15kGy以下では腐敗率は非照射と差がない。すなわち、馬鈴薯等の上限線量が0.15kGyなのは、それ以上では腐敗しやすくなるためであり栄養学的問題ではない。しかし、照射した馬鈴薯は非照射品に比べて傷の治癒力が低下するために、収穫後2～3週間常温貯蔵（キュアリング）を行って収穫時の傷を完全に治癒してからγ線照射を行う必要がある。また、照射馬鈴薯は呼吸が活発になるため、呼吸や酸素欠乏や湿気を防ぐための換気が必要であり、土幌農協で実用化されている。

照射されたタマネギが腐敗されやすいという意見があるが、それは以下の事実を正しく理解していないためである。原子力委員会の食品照射研究運営会議がとりまとめた「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）の中に示し

表7-1 収穫後28日目に照射したタマネギ及び非照射タマネギの発芽率及び腐敗率（室温貯蔵区）

		収 穫 後 の 日 数					
		28	63	83	124	185	242
非照射	発芽率	0	0	6.5	23.0	67.0	86.0
	腐敗率	0	0	7.0	8.0	8.5	8.5
0.03kGy	発芽率	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5
	腐敗率	0	0	5.0	12.0	13.5	24.5
0.07kGy	発芽率	0	0	0	0	0	0
	腐敗率	0	0	0.5	12.0	14.0	24.0
0.15kGy	発芽率	0	0	1.0	1.0	1.0	1.0
	腐敗率	0	0	4.0	12.0	18.0	26.0

たデータでは照射タマネギの方が非照射タマネギよりも腐敗率が高くなっているが、これは発芽した試料を除外した後に腐敗した試料を計測したことによるものである。発芽したタマネギはほとんど腐ってしまうので、発芽した試料も対象とすると、照射試料よりも非照射試料の方が腐敗率ははるかに高くなる。表7-1に掲載されている242日後の健全なタマネギは、非照射で5.5%、0.03kGyで75%、0.07kGyで76%、0.15kGyで73%となり、非照射のタマネギと比べて照射タマネギの方がはるかに健全な試料の割合が高くなっている。

参考資料

- 1) Moy, J. M. : Radurization and Radicidation : Fruits and Vegetables in Preservation of Food by Ionizing Radiation, vol. 3, ed. Josephson, E. S. & Peterson, M. S., CRC Press, 1983.
- 2)放射線照射による玉ネギの発芽防止に関する研究報告書（資料編）、1980年。
- 3)K. Kameyama & H. Ito : Twenty-six years experience of commercialization on potato irradiation at Shihoro, Japan, Radiation Physics and Chemistry, vol. 57, 227 ~ 230(2000).

1. 微生物相変化

放射線殺菌には貯蔵期間延長を目的とした菌数低減及び食中毒菌の殺滅を目的とした消毒殺菌と缶詰と同じ目的の完全殺菌がある。放射線による消毒殺菌は菌数低減による貯蔵期間延長または病原菌の殺菌を目的としており必要線量は10kGy以下であり、完全殺菌でないため微生物相（マイクロフローラ）変化によって有害な微生物が照射後に優先的に増殖するかどうかを明らかにしておく必要があった。

食品に汚染している各種微生物の殺菌効果を調べるには図8-1の片対数グラフで示すように、それぞれの D_{10} 値を比較するのが便利である。 D_{10} 値は生存曲線の直線部分で90%殺菌するのに必要な吸収線量であり、その値は表8-1に示すように微生物の種類や照射時の水分含量、酸素濃度、凍結、フリーラジカル捕捉物質との共存状態などによって変化する。栄養細胞型細菌は放射線で殺菌されやすい菌種が多く、芽胞（耐熱性孢子）形成細菌は放射線に耐性である。

生鮮食品の貯蔵期間延長を目的とした放射線殺菌では10℃以下の低温貯蔵との組み合わせが多い。低温下で肉類や食鳥肉類、魚介類の腐敗に関与する微生物は主としてシュードモナス、フラボバクテリウム、マイクロコッカス、乳酸菌群、アシネトバクター、サイクロバクター（旧アクロモバクターまたはモラクセラ-アシネトバクター）などの細菌群と数種類の腐敗性酵母菌類である。例えば、鶏肉の場合には図8-2に示すように、非照射品は10℃で2~3日程度しか貯蔵できず上記の微生物群の他に糞便性の大腸菌群も増殖してくる。糞便性大腸菌群には腸管出血性大腸菌などの病原性細菌が含ま

図8-1 放射線照射における微生物の生存曲線

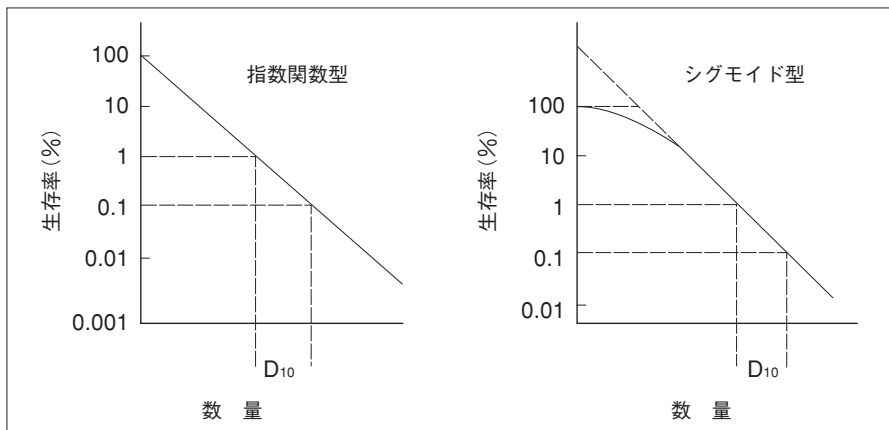


表8-1 各種環境下でγ線を照射した場合のD₁₀値の変化

菌種	磷酸緩衝液・好気下	2%グリセリン+ 1%ペプトンで乾燥	黒コショウ表面で 乾燥
バチルス・プミルス(芽胞)	1.6kGy	1.8kGy	2.2kGy
セレウス菌(芽胞)	1.1kGy	1.3kGy	1.3kGy
大腸菌 S2株	0.20kGy	1.0kGy	1.2kGy
コウジカビ	0.20kGy	0.50kGy	0.50kGy
青カビ有性胞子	0.58kGy	0.58kGy	0.58kGy

れている可能性がある。一方、γ線を1~3kGy照射すると図8-3に示すように大腸菌群は増殖せず、腐敗性微生物の増殖も抑制され6~10日も貯蔵できる。しかも、3kGyも照射すると増殖してくるのはサイクロバクターと腐敗性酵母菌だけになる。1kGyでも増殖してくるのはサイクロバクターと腐敗性酵母菌、乳酸菌群だけである。サイクロバクターや腐敗性酵母菌には病原性はない。肉製品や魚肉製品では3kGy照射で有芽胞細菌が生残する可能性があるが、10℃以下では非照射品では有芽胞細菌は増殖してくるが照射品では増殖が抑制される傾向が認められている。照射品での有芽胞細菌の増殖が低温貯蔵下で抑制されるのは芽胞の放射線損傷が低温では修復されにくいいためと思われる。

図8-2 非照射鶏肉の10℃貯蔵での各種微生物の増殖

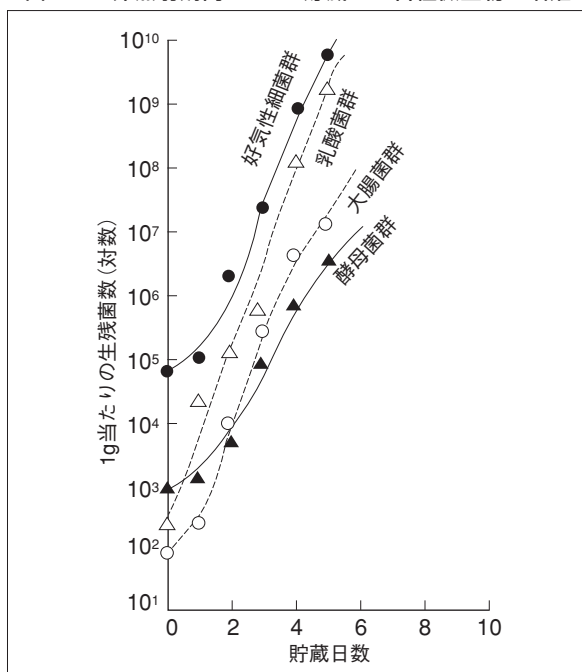
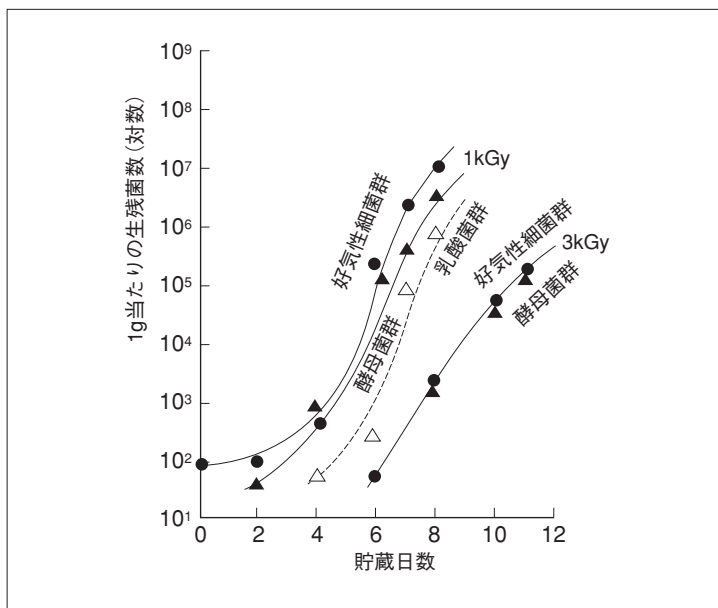


図8-3 照射鶏肉の10℃貯蔵での各種微生物の増殖



乾燥食品の場合にはアスペルギルス属やペニシリウム属の好浸透圧性のカビ類によって腐敗が起こるが、照射によって毒素産生カビが優先的に生残することはなく、水分含量を約12%以下に維持して2~5kGy照射すればカビの発生を抑制できるであろう。なお、加熱による消毒殺菌でも微生物相に変化が起こり、有芽胞細菌等が優先的に生き残る。

2. 病原菌の殺菌効果

食中毒防止対策として最も期待されているのは芽胞形成能のない食品由来の病原性細菌の殺菌である。食中毒性細菌の多くは固形食品では熱伝導度の関係から100℃でも短時間の加熱調理では殺菌できず生き残る可能性がある。また、低温貯蔵でも食中毒菌が増殖する可能性があり、食品内部まで透過力の優れた放射線で殺菌処理することが望ましい。わが国でも腸管出血性大腸菌のO157:H7等やサルモネラ、黄色ブドウ球菌、カンピロバクター、腸炎ビブリオ菌などによる食中毒の被害が多発しているが、これらの細菌類は少ない線量で殺菌可能である。食品由来の病原性細菌の殺菌効果を生鮮肉中でのD₁₀値の殺菌線量と比較すると表8-2に示すように菌種による差は少ない。実際の食品中ではサルモネラや腸管出血性大腸菌、黄色ブドウ球菌、カンピロバクター、リステリア菌、腸炎ビブリオ菌などの病原性細菌を1g当たり10⁻⁶個以下に殺菌するのに必要な線量は室温下では1~4kGy、凍結下では2~7kGyである(表8-3)。ことに、腸管出血性大腸菌やカンピロバクター、腸炎ビブリオ菌、エロモナス菌などは非凍結下

では1kGyでも十分に殺菌できる。すなわち、同じ大腸菌でも腸管出血性大腸菌は普通の大腸菌に比べて少ない線量で殺菌できる。しかし、肉類や食鳥肉の殺菌線量は室温下では2~4kGyであり、酸素共存下で照射すると3kGy以上では異臭発生や食味劣化が起こる可能性があるため脱気包装してから照射するのが望ましい。魚介類の場合には腸炎ビブリオ菌やエロモナス菌が汚染しやすいが、これらの菌は室温照射では0.75~1.5kGyで殺菌できるため、酸素共存下でも食味劣化の心配はない。なお、これらの食中毒性細菌のうち、10℃以下の低温貯蔵でも増殖する可能性があるのはリステリア菌、エロモナス菌、腸管出血性大腸菌などである。

セレウス菌、ウエルシュ菌、ボツリヌス菌は耐熱性の芽胞を形成する細菌であり、10kGy以上照射しないと完全殺菌できない。香辛料などでは7~10kGyでこれらの菌は殺菌できるが、肉製品などの滅菌ではボツリヌス菌を凍結下で殺菌する線量である30~45kGyが必要である。しかし、ウインナソーセージやカマボコでの研究結果では室温下で3kGy照射してから10℃以下で貯蔵するとセレウス菌の増殖は非照射品では認められたのが照射品ではほとんど認められなかった。従って、これらの芽胞形成細菌も低温貯蔵と照射の組み合わせにより食中毒防止が可能であろう。生牡蠣などでの小型球形ウイルス（ノロウイルス）による食中毒が多発しているが、ウイルスは放射線に耐性のため不活性化には10kGy以上の線量が必要である。しかし、ウイルスは60~70℃で加熱調理すれば不活性化するため特殊な場合を除いては放射線処理する必要性はないであろう。

表8-2 生鮮食肉中での食品由来病原性細菌の放射線感受性(室温)

菌 種	D ₁₀ 値 (kGy)
リステリア菌	0.40~0.60
サルモネラ	0.40~0.50
病原性大腸菌O157:H7	0.26~0.36
カンピロバクター	0.14~0.32
エルシニア菌	0.14~0.21
エロモナス菌	0.14~0.19

表8-3 生鮮食品中での食中毒性細菌の放射線殺菌処理

食中毒菌	低温での線量	凍結下での線量
サルモネラ	3~5kGy	4~7kGy
黄色ブドウ球菌	3~5kGy	4~7kGy
リステリア菌	3~5kGy	4~7kGy
病原大腸菌	1~3kGy	2~5kGy
カンピロバクター	1~3kGy	2~5kGy
ビブリオ菌類	0.75~1.5kGy	1~3kGy

* 低温下での殺菌は脱気包装で照射することが多い。

参考文献

- 1) P. Yutapong, D. Banati and H. Ito : Shelf life extension of chicken meat by γ -irradiation and microflora changes, Food Sci. Technol., Int., 2(4), 242 ~ 245(1996).
- 2) E. A. Murano : Irradiation of fresh meats, Food Technology, December, 52 ~ 54(1995).

1. 放射線殺菌の必要性

香辛料には微生物汚染が著しいものが多く、表9-1に示すように $10^4 \sim 10^6$ 個検出されるものが多い。香辛料の汚染細菌は主に耐熱性の有芽胞細菌である枯草菌やバチルス・プミルスなどの腐敗菌で構成されている。一方、セレウス菌などの食中毒性芽胞細菌による汚染も1g当たり $10^1 \sim 10^5$ 個検出されるという報告もある。また、枯草菌なども菌株によっては食中毒を起こすことが報告されている。また、香辛料の多くは熱帯地方で生産されるためボツリヌス菌やウエルシュ菌による汚染も考えられる。また、香辛料の多くはカビ毒産生菌によって汚染されている。香辛料も直接、食卓で食品に振りかける場合には食中毒の発生はほとんど起こらないが、加工食品に添加した場合や、調理後に保存する場合に食中毒菌が増殖して毒素を産生して食中毒を引き起こす。一昔前、欧米諸国で肉製品等での香辛料が原因した食中毒が多発したのは香辛料を殺菌処理していなかったためである。食品衛生法で食肉や魚介類等の加工に用いる香辛料等の菌数を1g当たり 10^3 個以下とするように規定しているのもセレウス菌等の食中毒対策のためである。しかし、有芽胞細菌は耐熱性であり 100°C では1時間加熱調理してもほとんど殺菌できず、 120°C で蒸気滅菌処理すれば香気成分が消失し退色も起こる。高温高圧水蒸気による気流法による過熱殺菌処理でも香気成分が低減し色調も変化する。わが国では過熱気流法による殺菌処理が行われているが、香りや退色のため加工食品に香り成分や着色剤を添加していることが多い。一方、エチレンオキsidによる殺菌が行われ

表9-1 香辛料1g当たりの微生物汚染数

試料	総細菌数	大腸菌群	好浸透圧性糸状菌	一般糸状菌
黒コショウ粉末A	5.3×10^7	1.5×10^4	6.5×10^4	5.5×10^3
黒コショウ粉末B	3.8×10^7	9.9×10^3	7.1×10^3	3.0×10^3
黒コショウ粒A	2.0×10^7	—	—	—
黒コショウ粒B	4.8×10^7	8.9×10^2	6.3×10^3	3.1×10^3
白コショウ粉末	9.2×10^4	1.7×10^2	6.3×10^3	3.1×10^3
白コショウ粒A	9.3×10^4	—	2.5×10^3	8.1×10^3
白コショウ粒B	9.8×10^5	2.0×10^6	2.9×10^4	8.1×10^3
ターメリック粉末A	3.6×10^7	5.7×10^2	2.6×10^3	8.1×10^3
ターメリック粉末B	3.1×10^6	7.5×10^1	—	—
ターメリック原料	6.7×10^5	—	—	—
ローズマリー粉末A	4.9×10^3	—	5.6×10^3	2.1×10^3
ローズマリー粉末B	2.2×10^6	5.8×10^2	7.5×10^1	1.5×10^2
ローズマリー原料	2.8×10^3	—	—	—
バシル粉末	9.0×10^6	9.0×10^2	2.8×10^2	6.5×10^2

ていたことがあったが、発癌物質が生成するため使用が認められていないし、香りが低減する。

2. 放射線殺菌効果

放射線による殺菌は図9-1に示すように過熱気流法やエチレンオキシド殺菌に比べ香氣成分の低減が全くなく、50kGyという高線量を照射しても色調や抗菌性、抗酸化性が変化しない優れた方法である。ことに、香辛料の香氣成分である精油は照射後も変化せず、品目によっては香りが強くなるものもある。図9-2に示すように香辛料中の有芽胞細菌は7~10kGyで衛生基準以下に殺菌される。ターメリックや黒コショウ等の必要殺菌線量はγ線に比べ電子線の方が約1.1倍多いが、多くの香辛料は10kGy以

図9-1 異なった殺菌処理法による黒コショウ精油成分のガスクロマトグラフ

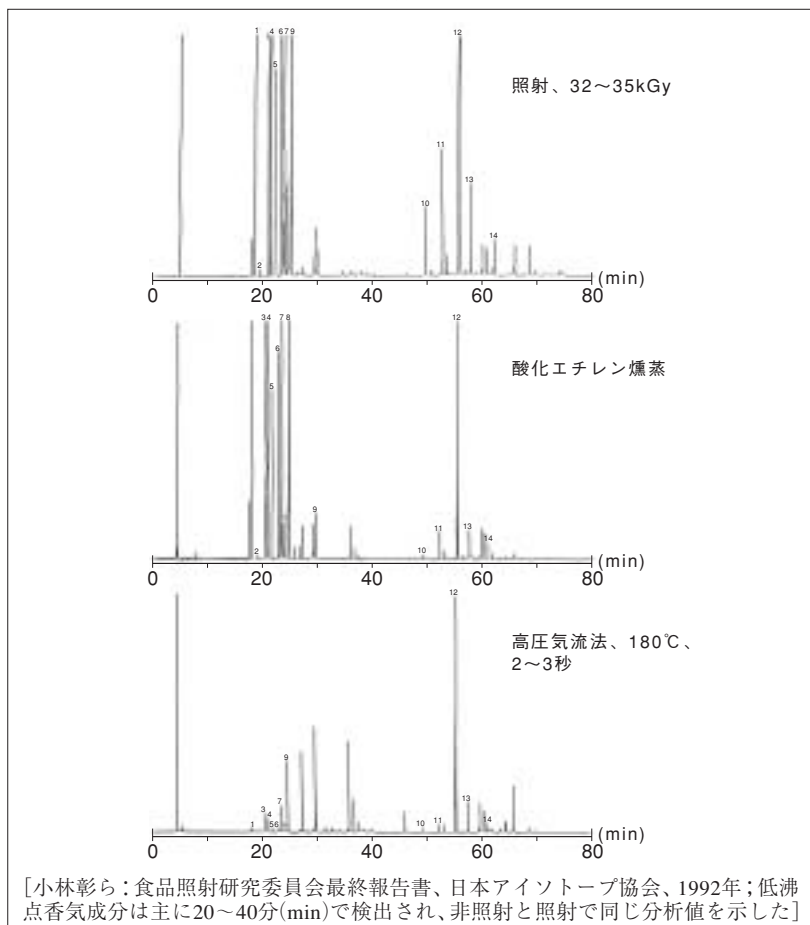
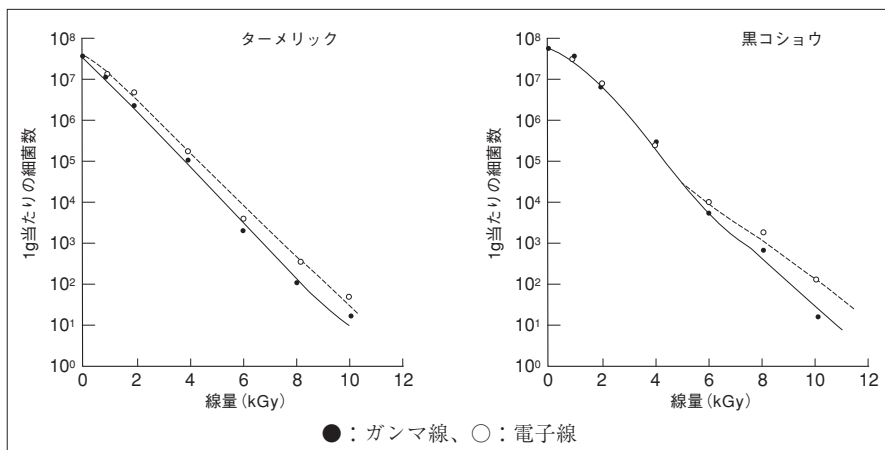


図9-2 電子線とガンマ線による香辛料の殺菌効果の比較



下で衛生基準以下に殺菌される。

香辛料の多くは吸湿性のため長期貯蔵中に好浸透圧性のアスペルギルス属（コウジカビの仲間）等のカビ（糸状菌）類によって変敗する。乾燥香辛料をポリエチレン袋に入れて夏期の高湿度下で貯蔵すると、香辛料にはカビ類が増殖してくるが、2kGyで多くの香辛料のカビ増殖が抑制され、クラフト紙袋では5kGyでカビの増殖が抑制される。香辛料にはアフラトキシンやオクラトキシン等のカビ毒を産生するカビ類も多く汚染している。ことに、アフラトキシンは強力な発癌性物質であり、これらのカビ毒を産生するカビ類は熱帯地方に多く生息している。これらのカビ類は通常の乾燥下では増殖しないが、虫が発生した場合には水分含量が増加してくるため増殖してアフラトキシン等のカビ毒を産生する可能性があるし、他の食品に添加した場合には保存条件が悪いと増殖して毒素を産生する可能性がある。これらのカビ類は2～5kGyで殺菌できる。食事の時に香辛料を直接振りかける場合に問題になる大腸菌群も多くの香辛料では2kGy程度で殺菌できる。

乾燥野菜や乾燥果実、生薬なども大腸菌群等やカビ類、有芽胞細菌による汚染が問題になるが、殺菌線量は香辛料と同じであろう。配合飼料等で問題になるサルモネラや大腸菌群も5kGyで殺菌できる。

参考文献

- 1) M. L. Juri, H. Ito, et al : Distribution of microorganisms in spices and their decontamination by gamma-irradiation, Agric. Biol. Chem., 50(2), 347 ~ 355(1986).
- 2) H. Ito and M. S. Islam : Effect of dose rate on inactivation of microorganisms in spices by electron-beams and gamma-rays

irradiation, Radiat. Phys. Chem., 43(6), 545 ~ 550(1994).

- 3)金子信忠、伊藤 均、他：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(1975)。
- 4)小林彰夫、他：放射線殺菌による香辛料の風味変化、食品照射研究委員会・研究成果最終報告書、90 ~ 98、日本アイソトープ協会、1992年。

1. 異臭発生

肉類を過剰照射すると異臭が発生する。この異臭は照射臭またはケモノ臭とも呼ばれており、主に食肉製品や魚介類を過剰に照射することによって発生し、穀類等でも希に認められることがある。この照射臭と似た臭いは肉類を日光にさらすときにも発生するもので、主として脂質とタンパク質の分解による揮発性物質である。牛肉や豚肉などの照射臭の主要な成分は炭化水素、カルボニル化合物、アルコール類、メルカプトン類などの硫黄化合物であると報告されている。照射臭が殊に発生しやすいのは牛乳と卵であり、室温で1kGy照射しても明確に認められる。一方、牛肉、豚肉、ソーセージ、生鮮魚介類などは食中毒菌の殺菌線量である2~3kGy程度の空気存在下での照射では照射臭はほとんど発生せず、脱酸素下で照射すれば5kGyでも照射臭の発生は抑制できる。また、脱酸素下・-20~-40℃の凍結下で照射すれば50kGyでも照射臭の発生が抑制できると報告されている。

香辛料やコーヒー豆、緑茶などは10kGy以上照射しても香りは変化しないか、照射によって好ましい香りが強くなるものが多い。香りが強くなる原因は照射によって精油成分等が抽出されやすくなるためと思われる。一方、1kGy以下の照射食品の場合には照射による異臭発生はほとんど問題にならない。

2. 食味への影響

卵白やエビなどの魚介類を過剰照射すると苦味が認められることがある。苦味の原因は疎水性ペプチドが生成することによると報告されており、タンパク質類の一部が放射線で分解して低分子のペプチドを生成する際に疎水性ペプチドも生成するのであろう。しかし、食肉や魚介類の多くは表10-1に示すように2~3kGy程度の線量では食味の変化が認められないものが多いし、脱酸素下や凍結下で照射すれば食味の変化は著しく

表10-1 生鮮魚介類の食味変化が無視できる適正線量と低温下での貯蔵期間

魚種	適正線量 (kGy)	貯蔵期間 (氷藏下での日数)
タラ	1.5	18
サバ	3.5	30
シタビラメ	1.0~4.0	20~25
ハマグリ	8.0	
カキ	2.0	
エビ	2.0	5~14
カニ	2.0~2.5	14~28
ロブスター	2.5	10~18

抑制される。また、照射による苦味対策としてポリリン酸塩やグルタミン酸、アスパラギン酸、香辛料等を添加して苦味をマスキングすることが有効である。

その他、食味の一つとして重要なテクスチャー（噛みごたえ）も重要であるが、食肉や魚介類の場合には5kGy以下では問題にならない。また、5kGy以上の照射が必要な場合にもポリリン酸塩の添加によってテクスチャーの低下を抑制できる。しかし、澱粉製品では1kGy以下の殺虫線量でも粘度低下が問題になるものがある。これは、澱粉等の多糖類は放射線で低分子化しやすいためである。

3. 色調への影響

食品類の多くは放射線を照射しても急激な色調変化は起こらない。たとえば、香辛料を50kGyという高線量照射しても色調変化は無視できる。しかし、肉類や魚介類の中には照射によって赤変、褐変、退色などを起こすものがある。たとえば、鶏肉や豚肉を3kGy以上照射すると肉眼でも赤色度が明確に増加する。一方、牛肉やカツオ、マグロなどでは3kGy以上の線量で赤褐色に変化する。生鮮肉の照射による赤色度増加はタンパク質の一種ミオグロビンと分子状酸素の反応により形成されるオキシミオグロビンが増加するためである。一方、牛肉などが赤褐色に変化するのにはオキシミオグロビンの他にメトミオグロビンが増加するためである。

ウインナーソーセージなどを空気存在下で照射すると退色が認められることがある。食肉や魚肉製品で照射による退色が起こるのはカロチノイドやポルヒリン環が放射線で酸化分解するためである。しかし、これらの色調変化も牛肉や鶏肉、ソーセージ等を脱気包装することによって5kGy以上の照射でも防ぐことができる。

また、穀類などを過剰照射するとメイラード反応により褐変化することがある。

4. 放射線による肉類等の完全殺菌

肉類や魚介類などの食品は前述のように10kGy以上の高線量では異臭が発生し、味も低下する。また、これらの食品を放射線で完全に殺菌しても、酵素活性が残っているため室温貯蔵では酵素による腐敗が進行する。しかし、これらの食品も脱気包装して凍結下で照射すると異臭発生や味の低下が抑制される。従って、これらの原理を利用すると放射線で完全殺菌された食品の製造が可能となる。食品の放射線殺菌を行う場合、ポツリヌス菌が放射線に耐性のため殺菌の指標とされており凍結下では30kGyで完全に殺菌される。また、細菌芽胞やサルモネラ等の殺菌線量は凍結下では室温照射に比べて2倍程度であるが、栄養成分の放射線耐性は凍結下では室温照射の約10倍になる。

放射線により完全殺菌された食品を製造する工程は、先ず肉類にポリリン酸塩を0.5%以下の濃度になるように添加して、肉類または野菜類などを70~75℃で調理して酵素やウイルスを失活させ、次ぎにプラスチックまたはアルミホイルなどの包装材で真空包装する。これを-20~-40℃に凍結して放射線を30~45kGy照射して、室温にも

どせば無菌食品になる。放射線で完全殺菌された食品は高圧蒸気滅菌食品の缶詰に比べてビタミン類や必須アミノ酸類の分解が少ないため、免疫不全の病人食として適しており、オランダ、英国、米国などで病人食として広く利用されて良好な治療成績をあげている。米国では宇宙食や軍用食としても放射線で完全殺菌された食品が利用されているし、南アフリカやイスラエルでは長期保存食として利用されている。

参考文献

- 1)C.Merritt Jr., et al. : Chemical changes associated with flavour in irradiated meat, J. Agric. Food Chem., 23(6), 1037 ~ 1041(1975).
- 2)W. M. Urbain, et al : Food Irradiation, Radiation pasteurization of fresh meat, Isotopes and Radiation Technology, 9(3), 288 ~ 291(1975).
- 3)K. E. Nanke, et al. : Color characteristics of irradiated vacuum-packaged pork, beef and turkey, J. Food Science, 63(8), 1001 ~ 1006(1990).
- 4)A. Anellis, et al. : Low-temperature irradiation of beef and methods for evaluation of a radappertization process, Appl. Microbiol., 30(5), 811 ~ 820(1975).

照射食品の検知（判別）法と、
消費者の選択及び流通での表示について

照射食品は薬剤処理と異なり食品中に残留化学物質がなく、放射線照射により化学変化が起こったとしても加熱調理や自然劣化によって起こる変化と大差がない。従って、通常の化学分析では照射食品の検知は困難である。照射食品の検知は迅速に分析でき、必要な試料が少なくすみ、適用できる線量範囲が広く取れ、安価に分析できることが望ましい。さらに、検知と同時に大まかな吸収線量が推定できることが望ましい。わが国では原子力特定総合研究において検知技術の研究が行われたが、明確な成果は得られなかった。海外でも1970年代までは信頼できる技術は開発できなかった。しかし、1980年代に入ると国際的に食品照射の実用化が開始され、検知技術も新しい観点から開発されるようになった。また、国際プロジェクトも組織され、物理的方法、化学的方法、生物学的方法で多くの有望な検知技術が開発されてきた。1988年の「照射食品の受容、管理、貿易に関する国際会議」で照射食品の検知の必要性が確認され、1990～1994年にはIAEA並びに欧州連合によって検知技術の国際プロジェクトが進められた。これらの成果に基づき、欧州連合は1996年に5つの分析法 [ESR（フリーラジカルによる検知）法2種、TL（熱ルミネッセンスによる検知）法、化学分析法2種] を制定し、2003年には新たな分析法も追加して合計10種類をヨーロッパ標準分析法として採択した（表11-1）。国際食品規格委員会（コーデックス）も化学分析法（炭化水素法、シクロブタノン法）、ESR法、TL法、光励起発光法、DNAコメットアッセイ法、微生物学的検知法の9種を公的分析法として採用している。

照射食品ではフリーラジカルが生成され、銻物質には結晶変化が起こり、DNA鎖の切断、脂質の分解などが起こる。これらの変化を検知法に用いるには、1）放射線特有の変化であり、2）変化が長期にわたり安定に存続する、3）線量の相関性がある、4）試料によるばらつきが少ない、などが重要である。主な分析法は以下のとおりである。

【物理的方法】

物理的な検知法としてはESR法、TL法、光励起発光法、電気インピーダンス法などがある。

照射された食品中にはフリーラジカルが生成するが、多くの食品中には水が共存しているため、すぐに消失してしまう。しかし、食品中に微量に混在している骨片や乾燥食品中のセルロース中のフリーラジカルは安定であり、これをESR（電子スピン共鳴）法で測定することができる。ESR法では骨片やセルロースを含む試料を十分に乾燥してから測定する必要があり、1～25kGy照射された鶏肉の骨片や香辛料で数ヶ月の期間にわたり検知することが可能である。

TL法は食品中に微量に混在する砂などの銻物の結晶が照射によって自由電子と正孔

表 11-1 欧州連合標準法(CEN)と国際規格委員会(Codex)標準法との関係

方法	CEN規格番号	分析対象(線量値:kGy) (限界下限線量)	Codexの 位置づけ
炭化水素法(GC)	EN1784(1996、 2003改訂)	鶏肉(0.5)、豚肉(0.5)、牛肉(0.5)、チ ーズ(0.5)、マンゴ(0.3)等	Type II、 2001
2-アルキルシクロブタノ ン法(GC/MS)	EN1785(1996、 2003改訂)	鶏肉(0.5)、豚肉(0.5)、チーズ(1)、サ ケ(1)等	Type III、 2001
骨のESR測定法	EN1786(1996)	鶏肉(0.5)、肉(0.5)、魚(0.5)、カエル の足(0.5)等	Type II、 2001
セルロースのESR測定法	EN1787(1996、 2000改訂)	パプリカ粉末(5)、ピスタチオナッツ の殻(2)、イチゴ(1.5)等	Type II、 2001
糖結晶のESR測定法	EN13708 (2001)	乾燥パパイヤ(3)、乾燥マンゴ(3)、乾 燥イチジク(3)、干しブドウ(3)	Type II、 2003
熱ルミネッセンス測定法 (TL)	EN1788(1996、 2001改訂)	ハーブ・香辛料類(6)、エビ(1)、貝類 (0.5)、生鮮(1)及び乾燥野菜果物(8)	Type II、 2003
光励起ルミネッセンス測定 法(PSL)	EN13751(2002)	ハーブ・香辛料類(10)、貝類(0.5)	Type III、 2003
直接フィルター蛍光/ 平板法による微生物測定法 (DEFT/APC)	EN13783(2001)	ハーブ・香辛料類(5)	Type III、 2003
DNAコメットアッセイ法 (スクリーニング)	EN13784(2001)	鶏肉(1)、豚肉(1)、植物細胞(種子類) (1)	Type III、 2003(スク リーニング)
リムルス試験/グラム陰性 菌数法(LAL/GNB)	EN14569(2004)	鶏肉	

* 限界下限線量：標準法としての妥当性検証済み。

が生じ、これに70~400℃の温度を加えると発光する現象を利用したものである。1985年頃より照射香辛料の検知法として有望であると報告されるようになった。熱ルミネッセンスで測定するTL法による香辛料の検知には前処理なしにそのまま測定する方法(直接法)、鉱物質を抽出する方法(抽出法)、抽出した鉱物質の校正照射(1kGy)の前と直後の発光量の比を測定する方法(標準化法)がある。この中で、直接法は短期的には検知が可能であるが3ヶ月以上の貯蔵では検知が困難であるとされている。抽出法は3ヶ月から1年貯蔵でも検知が可能であるが、完全な検知は困難とされている。一方、標準化法では1kGy前後では90%、5kGy以上では100%の検知が可能であり、長期貯蔵でも検知が可能である。

光励起発光法はTL法と似ており、前処理なしに試料の測定ができるという利点がある。この測定原理は珪酸塩やカルシウムなど食品中の無機物に強い光が当たると照射後に準安定状態にあった電子が発光中心の正孔と再結合する際に発光する現象を利用するもので、0.4kGyでも測定可能である。光励起発光法では香辛料や乾燥野菜を4ヶ月貯蔵でも測定可能であるが、長期貯蔵では測定は困難である。

香辛料などに含まれる澱粉などの多糖類は照射により粘度が低下する。この変化を回

転粘度計で測定することによって多糖類を多量に含む食品類の検知が可能である。例えば、5～10kGy照射した黒コショウなどの10%水懸濁液をpH12.5に調整してから100℃・30分沸騰してから測定すると非照射に比べて粘度が著しく低下する。電気インピーダンス（交流電気抵抗）の測定は照射馬鈴薯の検知技術として有望視されている。

【化学的方法】

食品の照射による分解生成物の分析から検知する方法として、脂質の放射線分解によって生成する揮発性炭化水素を分析する炭化水素法がある。加熱調理でも炭化水素が生成するが、放射線ではヘキサデカン及びヘプタデカン等の生成が多いことを利用した検知法であり、肉類やチーズ、マンゴー、パパイア等に適用できる。2-アルキルシクロブタノン類は脂質を照射した場合に微量に生成し、照射食品で主に生成するため検知に応用できる。ただ、生成量が極微量なため特殊な分析装置が必要であり、しかも低線量に応用しにくいという欠点がある。

【生物学的方法】

馬鈴薯やタマネギ、ニンニク等では発芽能や発根能の観察が最も確実な検知法であるが、収穫前に発芽防止剤が散布されている可能性もあるため、薬剤の検出作業との組み合わせが必要であろう。また、馬鈴薯の発芽部を組織培養して形態的变化を観察する方法もある。生鮮果実の種子は0.1kGy以上の照射で発芽率が低下する。この原理を利用するとグレープフルーツやレモン等の種子を有する果実の検知が可能である。この方法は検知に6～14日かかるのが欠点であるが、ジベレリン添加などによって発芽促進処理をすれば短期間での検知が可能である。

照射後に生残する微生物の種類を比較すると照射の有無をある程度検知することが可能である。ことに、肉類や魚介類では1kGy以上照射するとサイクロバクターと腐敗性酵母菌が10℃以下の貯蔵で優先的に増殖してくるので検知が可能である。香辛料の場合には直接フィルター蛍光観察法とプレートによる生残菌数測定と比較によって検知が可能である。また、芽胞形成細菌の耐熱性が低下することを利用した検知も可能である。

細胞内のDNAのコメットアッセイ法は照射によって起こるDNAの断片を電気泳動にかけて彗星のように見える尾の長さを顕微鏡で観察する方法である。この方法はDNAを含んでいるあらゆる食品に適用できる。しかし、DNAの断片化は他の処理法でも起こるため、スクリーニング法として使われ、他の検知法との組み合わせが必要である。

照射食品も調理されてしまえば検知が困難になるため、現時点では約90%が照射の有無の検知が可能であろう。このため、食品が照射されたか否かということを知るには詳細な照射時の記録と線量測定の結果が必要である。食品を照射時に一緒に線量計を添付して常時線量測定を行うことによって、照射工程を監視し、放射線量を制御することができる。土幌農協の馬鈴薯照射施設では線量計が添付されて照射されており、年に数回、北海道の保健所が独自に線量測定を行って、適正な線量が照射されているか否かを

チェックしている。

流通業界や消費者にとっては食品が照射されているか否かを知る唯一の方法は、表示である。包装食品の表示に関する国際食品規格委員会の国際一般規格（Codex Alimentarius Standard for the Labeling of Prepackaged Foods）において、電離放射線で処理した食品に対して、その旨を記した表示を行う必要性が述べられている。照射食品の表示のためのマークとして、図11-1に示すようなロゴマーク（ラジュラマーク）が国際的に用いられている。また、表示とともに、およその照射線量分かるカラーインジケータ（カラーラベル）の添付も照射食品の管理に役立つと思われる。

1989年の国際食品規格委員会の会合では、照射食品の表示について次のように決定した；「①放射線処理された食品は食品名の近くにわかりやすいように照射処理されたことを表示するべきである。ロゴマークの添付は任意であるが、照射された食品にロゴマークを添付することにより照射されていることを明確に示すことができる、②もし、照射物が他の食品材料の一つとして非照射の材料とともに使用されるなら、使用材料リストに照射済み材料が用いられていることを表示するべきである、③もし、食品材料が照射済みの生鮮原料から製造された場合には、放射線処理の旨を表示するべきである」。

なお、1991年の世界貿易機関の衛生及び植物検疫に関する協定（SPS協定）では、食品衛生及び植物検疫は国際食品規格委員会の一般規格に従うことが明記されている。この一般規格の中には食品照射の規格基準も含まれている。

また、ISO/TC34（国際標準下／食品専門委員会）では食品照射工程の適正規範が作成されつつある。

参考文献

- 1) International Colloquium : Identification of Irradiated Foodstuffs, Karlsruhe 24 ~ 25, October, 1973. (Commission of the European Communities, Luxembourg), 1974.
- 2) 等々力節子：照射食品の検知技術、FFIジャーナル、209(12)、1064 ~ 1068 (2004)。
- 3) Health Impact : Identification and Dosimetry of Irradiated Foods, ISH-Heft, 125, 1988.
- 4) 国際食品規格委員会第20回食品表示部会（カナダ・オタワ、1989年4月3-7日）。

図11-1
照射食品の代表的マーク
(International Symbol
for Irradiated Food)



動物実験における薬品、食品添加物等での投与量と照射食品の線量、投与量の違い及び評価について

実験動物による照射食品の毒性試験が困難な点は以下の通りである。

- 1)複雑な成分からなる食品の試験であり、薬物試験の場合のように安全係数を求めるために、実験動物飼料に過剰の照射食品を添加するのは不適當である。
- 2)照射によって生成するかもしれない放射線分解生成物の濃度を高めるために、実用線量に比べて過剰の線量で照射することは、実用線量では生成しないか、無視できる程度のある種の分解生成物の問題を派生し、栄養成分の減少を生じる可能性がある。
- 3)照射食品の飼育試験は薬物試験の場合と異なり無菌環境下でできないため、実験誤差が生じやすい。
- 4)照射と同じように物理的な食品加工法と考えられる加熱や冷凍でも、実験動物による毒性試験法が確立されていない。

食品照射は、研究の初期から、食品中に何らかの化学物質を新たに作り出す可能性があるとして食品添加物と同じ100倍量の照射食品を動物に与える試験が実施された。この考えによると、必要線量の10倍以上を照射して、過剰の照射食品を動物に投与する必要がある。例えば、米国陸軍が行った照射肉類の動物試験では飼料組成の約50%が過剰照射された肉類で占められ、ビタミン等の栄養バランスも無視されたものであり、それが原因しての動物の異常が多く観察された。1976年のFAO・IAEA・WHO食品照射合同専門家委員会は、「食品照射は加熱や冷凍と同じように物理的な処理法であり、食品添加物としての扱いは適当でない」として動物試験方法についても検討を行った。このころになると、放射線分解生成物も解明されてきたため、毒性試験における飼料への試験食品の添加率は適量を過大に越えて添加したり、実用線量を過大に越えた線量で試験食品を照射することは適当でない」と結論した。

わが国では照射食品の動物を使った毒性評価は1967～1983年の原子力特定総合研究とその後に行われたγ線を1kGy照射したグレープフルーツで行われた。馬鈴薯やタマネギ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、表12-1に示すように過剰投与による飼育試験が行われた。その結果、飼料中に乾燥タマネギを25%投与した場合には非照射及び照射試験区とも動物に血液等の異常が生じた。すなわち、人換算では1日に平均的に摂取する333倍または450倍もの乾燥馬鈴薯や乾燥タマネギを飼料に添加したことになる。このため、タマネギでは動物に異常が生じない2または4%添加で試験をやりなおさざるを得なかった。そして、このような問題点も含めて試験結果を評価して、特定総合研究で取り上げられた7品目及びグレ

ープフルーツではマウス、ラット、サルによる慢性毒性試験、繁殖試験（3世代試験、催奇形性試験）で照射食品を摂餌したことによる異常は認められなかったと結論している。

表12-1 7品目の健全性試験におけるラットの照射食品摂取量と人摂取の場合との比較

食 品	試験線量(kGy)	ラット		人換算	
		添加量 (w/w%)	生重量 (g/kg/日)	換算摂取量 (g/人/日)	日常摂取量 (g/人/日)
馬鈴薯	0.15, 0.3, 0.6	35	134	8000	24
タマネギ	0.07, 0.15, 0.3	2~25	156	720~9000	20
米、小麦	0.5, 1	40~50	25	1200~1500	21
ウインナソーセージ	6	2~5	7	160~400	9
水産練製品	4.5	5	11	600	16
温州みかん	1.5	3	15	900	75

* w/w%：飼料中の添加%

参考文献

- 1) Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee on the Wholesomeness of Irradiated Food(JECFI) : Report of meeting on the wholesomeness of irradiated food, WHO Tech. Rept. Series No. 604, 1976 ; FAO Food and Nutrition Series No. 6, 1977.
- 2) 藤巻正生／監修：食品照射の効果と安全性、日本文化振興財団、1995。

1980年のFAO・IAEA・WHO 食品照射合同専門家委員会の10kGy以下の 照射食品の安全宣言の根拠と信頼性について

食品を介する疾病や食料資源の損失防止への対策として世界保健機関（WHO）や国連食料農業機関（FAO）は国際原子力機関（IAEA）と共に食品照射に積極的に取り組んできている。表13-1に示すように、照射食品の安全性と栄養適性を評価する健全性評価を国際的に行おうとする動きは1961年のFAO・IAEA・WHOによる合同専門家委員会のころから始まった。この会議では照射食品の健全性評価は食品添加物と同じ考えで行うことが合意された。この当時は放射線による分解生成物がどのような物質が解っていなかったため食品添加物と同じと見なされた。そして、1971年には健全性評価のための国際プロジェクトが国際機関を中心として、わが国や米国、英国、フランス、旧西ドイツなど24カ国が参加して開始された。この国際プロジェクトによって放射線分解生成物の種類や組成も明らかになってきたため、1976年のFAO・IAEA・WHO合同専門家委員会は「食品の放射線処理は加熱や冷凍と同じ物理的処理であり、食品添加物としての扱いは妥当でない」とする見解を示した。1977年にはFAO・IAEAの飼料の放射線殺菌に関する専門家会議が開催され、50kGyまでの照射は飼料としての安全性に問題がないと勧告した。1980年のFAO・IAEA・WHOの専門家会議は国際プロジェクト終了の成果及び1976年、1977年の会議の結果を総括して、「10kGy以下の総平均線量でいかなる食品を照射しても、毒性的、栄養学的及び微生物学的に全く問題のないこと、ならびに、今後はこの線量以下で照射した個々の食品の健全性試験は不要である」という結論を出した。

この1980年の結論について、食品照射推進派の人達が国連機関を利用して作り上

表13-1 照射食品の健全性評価に関する国際機関の取り組み

年	内容
1961	FAO・IAEA・WHO合同専門家委員会：照射食品の健全性評価は食品添加物と同じ基準で行う。
1971	照射食品の健全性評価のための国際プロジェクト発足、1980年まで。
1976	FAO・IAEA・WHO合同専門家委員会：食品照射は加熱調理と同様の物理的処理法であり、食品添加物としての扱いは妥当でないと勧告。
1977	FAO・IAEAの飼料の放射線殺菌に関する専門家会議で50kGyまで照射された動物飼料の安全性は問題でないと結論。
1980	FAO・IAEA・WHO合同専門家委員会：10kGy以下の照射食品は健全であると宣言。
1983	FAO・WHO合同国際食品規格委員会：10kGy以下の照射食品の一般規格を採択。
1992	WHOの専門家委員会：10kGy以下の照射食品の健全性を再確認。
1997	WHOの専門家委員会：10kGy以上の高線量照射食品についても健全であると宣言。
2003	FAO・WHO合同国際食品規格委員会：最高線量は正当な技術目的を達成するのに必要な場合を除いて10kGyを超えるべきでない。

げた非科学的な結論であるとの指摘が国内の一部の人から出されている。しかし、国際プロジェクトは国際機関及び各国政府が合意して発足したものであり、国際会議に出席した人達は国際プロジェクトに加入していた各国の公立研究機関からの専門家である。また、1980年の会議は国際プロジェクトの総括をしたものであり、日本政府も各加盟国と同様に会議開催に責任のある会合である。この会議が権威ある証拠には、1983年に開催されたFAO・WHO合同の国際食品規格委員会（コーデックス）が1980年の専門家委員会の結論を基に「照射食品に関する国際一般規格」と「食品照射実施に関する国際規範」を採択していることである。また、1980年の結論を基に1988年にはFAO、IAEA、WHOと世界貿易センター共催で「照射食品の受容、管理、貿易に関する国際会議」が開催され、各国政府代表及び消費者団体も参加している。この会議では1980年の結論を基に検知技術の開発の必要性や表示の問題が討論された。欧州連合も1980年の結論を基に照射食品が安全であると結論づけている。

1980年の報告には照射食品の健全性に関して多くの課題が残っていたのに安全と結論しているのは非科学的であるとの指摘があるが、当時の動物を使った食品の毒性試験は主に10kGy以下しか得られていなかったことと、放射線分解生成物の多くは加熱調理でも生成するが一部の微量成分は完全には明らかになっていなかったため、10kGyを上限線量としたわけである。1980年の結論を再評価するために、WHOは1992年に専門家会合を召集し、最新のデータで評価しても照射食品が安全であると結論した。さらに、WHOの専門家会議は1997年に放射線分解生成物の最新の研究成果及び米国の照射鶏肉の毒性試験の結果等を基に10kGyの上限を撤廃するように勧告した。このように、1980年の専門家委員会の結論は国際的に権威があり、結論も科学的であり、一部に引用文献がなかったのは国際プロジェクトの生のデータを総括したためである。事実、その後多くの関連報告書が学会誌等に掲載されている。

参考文献

- 1)川嶋浩二、林 徹、河端俊治（訳）：WHO技術報告シリーズNo.659 照射食品の健全性・FAO・IAEA・WHO合同専門家委員会（1980）報告、食品照射、16巻、89～111(1981)。
- 2)世界保健機関：照射食品の安全性と栄養適性、コープ出版、1996年。

1997年に世界保健機関が勧告した 10kGy以上の照射食品の安全宣言について

1997年にFAO・IAEA・WHO専門家グループによる会合がジュネーブで開催され、食品照射の10kGyの上限の撤廃を勧告した。1980年の合同専門家委員会開催当時は、安全性に関する10kGy以下のデータが主に得られており、多くの応用分野は10kGy以下であったため、10kGy以下についての安全性を勧告したわけである。しかし、その後、10kGy以上照射された食品の安全性を証明する放射線化学的、栄養学的、微生物学的、毒性学的、物理学的データが蓄積されてきたため、最高線量が必要かどうかを検討する必要性が生じた。このため、国際食品照射諮問グループ（FAO・IAEA・WHO合同設立組織）を中心に10kGy以上の照射食品の安全性が評価されてきた。

食品の放射線化学の研究で放射線分解生成物について評価したところ、生成物の量とか種類は食品の化学組成によって決まり、生成量は線量に依存して直線的に増加する傾向にあることがわかった。また、同じような食品成分では照射によって同じような化学反応を起こすことがわかっている。例えば、凍結下で10kGy以上照射されたハムや豚肉、鶏肉のESRスペクトルは似ており、放射線分解生成物も似ている。放射線分解生成物の全ての生成量は1kGyの照射によって最大で1kg当たり30mgと計算されており、その多くは自然界に存在しているか加熱調理でも生成することが明らかになっている。すなわち、食品の主要成分である脂質、タンパク質、糖類の放射線分解生成物は主に酸化還元反応によって生成され、加熱調理や酸化劣化でも生成する。また、非揮発性の脂質とタンパク質ラジカルの結合によって生成する高分子の反応生成物は消化時に酵素によって加水分解する。また、放射線特有の分解生成物としては2-アルキルシクロブタノン類があるが毒性は認められていない。

栄養学的には高線量照射してもタンパク質や脂質、糖類の栄養価は影響を受けないが、ビタミン類、ことにビタミンB₁が分解されやすい。しかし、加熱調理と比較して照射食品中のビタミン量は同じか、それよりも分解されにくい傾向がある。また、放射線で分解されやすいビタミンB₁でも一部が分解しても必要摂取量を満たしている。

微生物学的評価では、微生物の突然変異は紫外線と同じ程度であり、ウイルスでも突然変異は起こらない。微生物毒素の照射による促進効果も認められていない。放射線抵抗性菌も芽胞形成細菌と同じ程度の放射線耐性であり、高線量照射後に生残菌が生育する可能性はない。

毒性学的評価では米国で行われた59kGy照射された鶏肉の毒性試験の結果やオランダで行われた74kGy照射された豚肉製ハムの繁殖試験の結果、人体試験などの結果で異常は認められなかったと結論している。

これらの結果を基に、専門家グループは高線量照射された食品は加熱滅菌された食品

と同様に安全であると結論した。

参考文献

- 1) Joint FAO/IAEA/WHO Study Group : High-Dose Irradiation of Food Irradiated with Doses above 10kGy, World Health Organization, Geneva, 1999.
- 2) 世界保健機関：照射食品の安全性と栄養適性、コープ出版、1996年。

2003年に欧州連合が出した
食品照射の安全性に関する見解について

欧州連合の食品科学委員会は1987年に照射食品の毒性および栄養学的性質ばかりでなく、食品の放射線処理後に生存している可能性がある病原性または腐敗する可能性がある生物体についても検討した。しかし、本委員会では10kGy以上の滅菌（完全殺菌）を目的とした食品類（例えば牛肉や家禽肉類）の多量のデータについてはほとんど検討しなかった。なぜなら、これらの高線量処理食品は商業的にはほとんど応用される可能性がないように思われたためである。その結果、表15-1に示す10kGy以下で照射された食品類は健全であると勧告した。

しかし、その後、食品照射の安全性のデータが蓄積されてきたため、2003年に食品科学委員会は再度、照射食品の健全性について検討した。その結果、10kGy以下照射された食品類についての毒性学的、栄養学的データは1986年当時に比べ著しい進歩が見られないため、1987年に示した食品の照射線量と類別（表15-1）は維持されるべきであると結論した。なぜなら、それらの食品類については毒性学的、栄養学的、微生物学的、照射技術的なデータが得られているからである。また、照射食品の人間による臨床的な研究でも照射食品を食べたことによる異常は認められていない。しかし、総平均線量10kGyではいかなる食品も安全で健全であるという最高線量を変更するのに十分なデータは得られていない。すなわち、10kGy以上照射された食品類の健全性に関する多くの研究は欧米諸国で用いる食品類についての安全性を確認したものであり、他の地域で用いられている一部の食品類については照射後の成分変化や毒性のデータが得られていない。このため、照射食品が10kGy以上の線量で許容できる食味変化の照射条件や放射線分解生成物量の低減技術、毒性評価等の研究が引き続き必要であり、それらの条件が完結すれば10kGy以上についても安全と認めるであろうとしている。従って、現在の時点では香辛料と乾燥葉味料、乾燥野菜調味料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。

表15-1 欧州連合が許容する食品の類別と照射線量

食品の種別	総平均線量 (kGy)
1. 果実	2まで
2. 野菜	1まで
3. 穀類	1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まで
6. 魚および貝類	3まで
7. 生鮮肉	2まで
8. 食鳥肉	7まで

参考文献

- 1) Science Committee on Food in EU : Revision of the opinion of the Scientific Committee on Food on the irradiated of food, European Commission, Health and Consumer Protection Directorate-General SCF/CS/NF/IRR/24 Final, 24 April 2003.
- 2) Science Committee for Food : food-science and techniques ; Report of the Scientific Committee for Food (Eighteenth series), Commission of the European Communities, Directorate-General, Report EUR 10840 EN, ISBN 92-825-6983-7, Luxembourg, 1987.

1986年の米国FDAの照射食品の安全性決定指針の科学的根拠と動物実験との関連について

米国FDAの照射食品の安全性評価の基本的考え方とその由来及び動物実験との関連についての見解はFederal Register（1986年4月18日付）Supplementary InformationのなかのII.Comments A.Safetyの項に述べられている。

FDAは1960年代には照射食品の化学的変化や栄養価についての情報が少なく安全性評価にとまどったが、1979年、FDAは食品部照射食品委員会（BFIFC）を設置した。この委員会は照射食品に関する従来の政策をレビューし、照射食品の安全性を評価するのに最適な毒性学的試験方法の条件を確立する事を主目的とした。従来の放射線化学データを調べた結果や照射食品が全食事中に占める役割等を考慮して、次のように結論した。

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。

$$\text{収率 (in m mol/kg)} = \text{線量 (krad)} \times G\text{値} \times 10^{-3}$$

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

$$1\text{kGyでの収率} = 30\text{mg/kg食品}$$

$$= 30\text{ppm}$$

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、更に、そのうち単一のURP濃度は1ppm以下と推定。

3)例えば、ナツメグ（香辛料）のように食事中で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の消費にとって安全であると考える。

このBFIFCの結論はFDAによって承認された。BFIFCは1980年7月の最終報告書の中で、図16-1のような「照射食品の安全性決定の指針」を示している。

FDAの食品部は照射食品タスクグループ（Irradiated Food Task Group）を設置、従来の照射食品の毒性学的データについて安全性を否定するデータをも含めて詳細に検討した。そして次のように結論した。

1)照射食品についての研究は毒性学的に有害な結果を示していない。

2)1kGyより少ない線量で照射した食品についての従来の毒性試験方法は毒性学的に意味のある解答を与えるとは期待できない。これは次のような理由に基づいている。

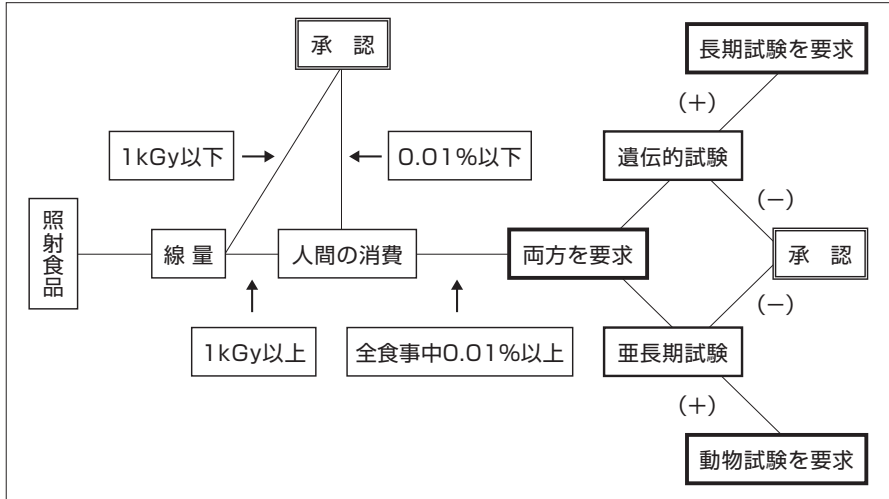
①高レベルの非照射及び照射食品の給餌によって実験動物が栄養的に著しく不均衡（アンバランス）な状態を生じて潜在的な毒性がマスクされる、

②照射食品中の有毒な放射線分解生成物の濃度が低い、

③照射食品中の潜在的なURP濃度があまりに低く、従来の毒性学的試験方法では感度が十分ではない。

従って、タスクグループは1kGy以下の線量で照射された食品については、安全性証明のため、従来のような毒性試験は必要でないと結論した。

図16-1 照射食品の安全性決定の指針



以上のBFIFC及びタスクグループの結論にもとづき、FDAは1kGyを超えない線量で照射した食品は人間の消費にとって安全であると結論した。更に、FDAは30kGy以下の線量は食事中で0.01%を超えない乾燥植物性食品（香辛料等）の殺菌に十分であり、毒性試験データは安全規制上必要ないとした。

これらの考え方の根底には1960年代と異なり、食品成分に関連した照射による化学変化及び放射線化学一般の実験的知見が豊富に蓄積された事が重要な支えとなっている。

参考資料

- 1)FDA : Irradiation in the Production, Processing, and Handling of Food : Final Rule, Federal Register, April 18, 1986

照射による栄養素の破壊の可能性と、
照射食品の栄養学的評価について

われわれが食品から摂取する一般栄養素は、水分、エネルギー、蛋白質、脂質、ビタミン、無機質である。これらのうち水分と無機質は化学的、物理的な変化は別にして、栄養素としては、照射を含めて加工・調理の段階で変化しない（無機質）か、しても問題とならない（水分）。従って、エネルギー、蛋白質、脂質、ビタミンについて照射の影響を明らかにする必要がある。照射食品の栄養学評価は食品中の栄養成分の分析、動物の成長及び生理機能に与える影響等の試験を基に総合的に評価されてきた。

質問18、19、20において順次これらについて解説するが、結論としては以下の通りである。

- 1) エネルギーの大部分を占める糖質については、実際の食品中での分解のG値が低い事と、エネルギーは、いわゆる必須栄養素ではない事から問題とする事はない。
- 2) 蛋白質については、必須アミノ酸の分解による栄養素の低下を考慮する必要がある。特に、必須アミノ酸であるトリプトファン、シスチン及びシステインは、照射に対して感受性が高い。牛肉への照射の結果では、20kGyの照射でシスチン及びシステインの30%が分解する。しかしながら、牛肉の含硫アミノ酸のスコアは150以上であり、30%分解されてもアミノ酸スコアに影響はない。更に、日本人の食品の制限アミノ酸は一般にリジンであり、リジンが照射に対して安定である事から、照射食品の蛋白質の栄養価は問題とならないといえる。
- 3) ビタミンは、照射食品において最も考慮すべきものである。ビタミンは条件によって照射に対して感受性が高い事と、AやB₂等は摂取量が所要量を大きく上廻ってはいないからである。これらについては照射対象食品毎に個別に検討する必要がある。

わが国において実用照射している馬鈴薯について、照射による生理活性の変化によりビタミンCの減少が認められるが、貯蔵後に非照射のものと差がなくなる事から問題とされない。

なお、食品の成分変化に伴う毒性物質の生成あるいは抗原性の変化は、健全性評価にとって重要であるが、栄養の問題ではないのでここでは割愛する。

参考資料

- 1) 日本アミノ酸組成表：科学技術庁、1986

照射によるビタミン（A、B、C、D、K、E）の破壊（含む貯蔵・調理中）の可能性と栄養学的影響について

食品中に存在するビタミンは、化学構造として二重結合を持つもの（A及びE等）、硫黄原子を持つもの（B₁等）、酸化還元されやすいもの（C等）が多く、加熱、放射線照射等の物理的処理、酸化等の化学的処理に対して、極めて敏感である。又、これらはその後の貯蔵あるいは加工によっても大きく変化する。従って、照射した食品から摂取するビタミンの栄養学的価値を評価するためには、実際に摂取される状態でのビタミン量を把握する必要がある。

肉のビタミンの例：

図18-1に豚肉のチアミン（B₁）に対する照射（2MeV電子線）の影響を示した。18℃の室温で照射した場合、5kGyの照射で非照射に対して50%に低下する事がわかる。照射時の温度が低いとこの低下はある程度制御できる。図18-2に示したように、-20℃の凍結状態で照射すると照射による分解率は、0℃以上の場合の約3分の1にとどまる。

しかしながら、豚肉は生食するのではなく必ず加熱調理して摂取する。従って、加熱調理によるビタミンの減少を考慮する必要がある。表18-1に、加熱調理によるビタミンの減少を示した。加熱調理（例えば、煮る等）するとB群のビタミンは大幅に減少す

図18-1 豚肉中のビタミンB₁の低温（凍結下）照射での保護効果（2MeVでの電子線で照射）

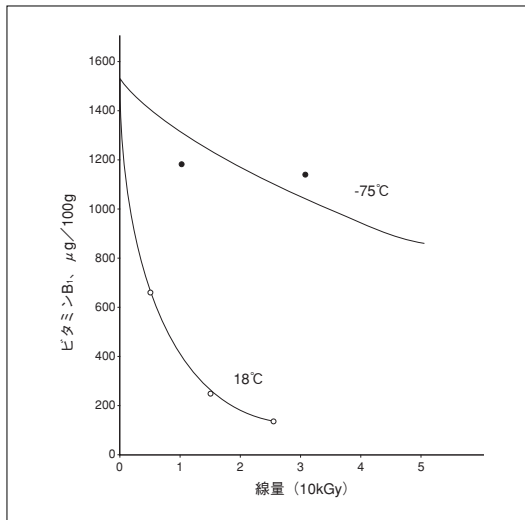
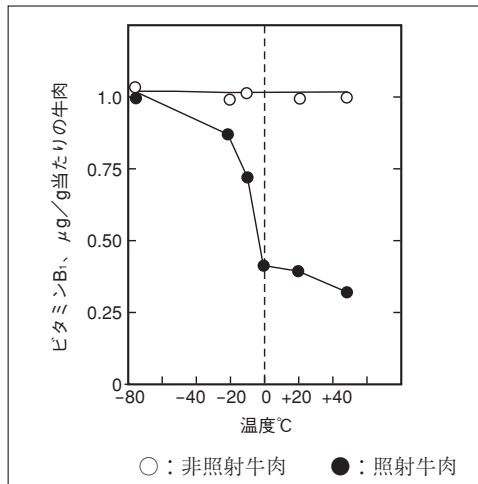


図 18-2 異なった温度下で10kGy照射した場合の牛肉挽肉中のビタミンB₁の分解 (2MeV電子線で照射)



る事がわかる。

同じような結果は、ハムにおいても示されている。表18-2にハムのビタミンB群に対する照射及び加熱滅菌の影響を示した。常温で放射線殺菌 (35~44kGy) したハムのチアミンは、対照の4%まで減少するが、加熱滅菌を行なっても33%に減少する。なお、穀類や野菜、生鮮果実等の放射線処理は0.5kGy以下の殺虫または発芽防止であり、チアミンの分解は10%以下にすぎない。肉類や魚介類も脱酸素下・室温で照射すれば5kGy以下ではチアミンの分解は20~50%であり、凍結下では50kGyで50%以下である。

脂溶性ビタミンは、水溶性ビタミンより安定である。表18-3は、大麦の α -トコフェロール (ビタミンE) に対する照射 (電子線10kGy) の影響を示したものである。照射時温度が20°Cの場合、減少は24%に止まる。

以上の事をまとめると、照射により食品中のビタミン、特に水溶性ビタミンは減少するが、凍結状態で照射すれば減少は抑制できる。又、照射による減少は、加熱による減少に匹敵しうるものである。

日本の場合、国民栄養調査 (1987年度) では、水溶性ビタミン (B₁、C) の摂取量は、所要量を大幅に上廻っており (それぞれ163、250%)、たとえ、照射によりビタミンの一部が損なわれたとしても、国民全体の栄養摂取に及ぼす影響はほとんどないといってよい。例えば、1987年の国民栄養調査によれば豚肉からのビタミンB₁の摂取量は0.23mg人/日で、これは全摂取量の17%であり、照射により、例え50%に低下したとしても、全体のビタミンB₁摂取量からすると8%しか低下しない。

表 18-1 豚肉分析結果【調理後の豚肉の栄養成分:可食部100g中】

部 位	調理法	エ ネ ル ギ ー		水 分	蛋 白 質		脂 質	炭水化物		灰 分	無 機 質				ビ タ ミ ン					
		kcal	K J		糖 質	糖 質		カルシウム	鉄		ナトリウム	カリウム	レチノール	カロチン	効 力	A	B ₁	B ₂	ナイアシン	C
うで かた	網焼き	326	1,364	22.9	24.4	0	0	1.1	4.7	238	0.83	72.3	401	11	37	0.94	0.23	9.77	*	
	フライパン焼き	348	1,456	51.3	19.6	28.2	0	0.9	3.9	182	0.60	54.2	304	11	37	0.73	0.17	7.20		
か	煮込み	279	1,167	57.5	21.1	20.2	0	1.2	6.6	196	0.82	66.7	360	10	33	1.10	0.26	0.76		
	網焼き	287	1,201	58.6	18.1	22.4	0	0.9	3.7	172	0.84	61.2	315	8	27	0.91	0.21	6.21		
た	フライパン焼き	335	1,402	53.3	18.5	27.3	0	0.9	6.8	167	0.80	56.3	306	9	30	0.93	0.23	6.67		
	厚切り	300	1,255	57.6	17.5	24.0	0	0.9	4.4	159	0.73	59.9	323	12	40	0.86	0.18	5.92		
ロ	薄切り	297	1,243	58.5	16.7	24.1	0	0.7	4.2	141	0.67	42.5	217	13	43	0.72	0.18	5.11		
	ブロック	294	1,230	58.0	18.0	23.2	0	0.8	4.4	148	0.75	52.6	263	11	37	0.78	0.18	4.48		
1	煮込み	124	335	81.9	8.3	9.5	0	0.3	3.8	53.2	0.34	19.1	83.9	4	13	0.16	0.06	1.69		
	から揚げ	357	1,494	43.0	25.5	23.8	6.3	1.4	8.1	235	1.23	96.5	457	11	37	0.73	0.23	8.30		
ス	衣揚げ	453	1,895	38.8	21.9	38.3	0	1.0	4.5	182	0.71	51.0	331	9	30	0.92	0.22	5.55		
	網焼き	261	1,092	59.6	20.9	18.4	0	1.1	5.4	202	0.63	52.4	372	6	20	0.86	0.17	6.66		
ロ	厚切り	232	971	61.9	22.3	14.7	0	1.1	5.3	196	0.41	56.8	382	9	30	0.85	0.13	9.16		
	薄切り	281	1,176	58.0	20.1	20.9	0	1.0	6.1	190	0.53	61.6	354	9	30	0.76	0.16	6.44		
1	厚切り	267	1,117	59.3	20.6	19.1	0	1.0	4.9	181	0.36	52.5	353	12	40	0.76	0.12	8.39		
	薄切り	259	1,084	61.5	18.5	19.2	0	0.8	5.7	158	0.49	45.2	259	15	50	0.72	0.12	6.00		
1	ブロック	227	950	62.9	21.8	14.3	0	1.0	6.5	167	0.38	43.2	318	9	30	0.85	0.13	8.57		
	煮込み	115	481	82.9	7.9	8.7	0	0.5	4.9	73	0.19	26.6	147	6	20	0.23	0.06	2.98		
ス	から揚げ	384	1,607	38.0	26.7	25.1	8.7	1.5	9.7	242	0.62	90.9	493	19	63	0.61	0.19	9.35		
	衣揚げ	353	1,477	45.2	29.5	24.3	0	1.0	11.5	181	0.70	40.8	247	14	47	0.64	0.17	6.00		

表 18-1 (続き) 豚肉分析結果【調理後の豚肉の栄養成分:可食部 100g中】

部位	調理法	エネルギー kJ	水分	蛋白質	脂質	炭水化物		無機質			ビタミン									
						糖	繊維質	灰	カルシウム	リン	鉄	ナトリウム	カリウム	レチノール	カロチン	A効力	B ₁	B ₂	ナイアシン	C
		kcal	(.....)	g	g	g	g	g	mg	mg	mg	μg	μg	IU	(.....)	(.....)	(.....)	(.....)		
ば	網焼き	364	48.6	20.9	29.3	0.1		1.1	6.4	187	0.72	62.8	321	7		23	0.94	0.24	7.18	
	フライパン焼き	380	48.6	18.3	32.1	0.1		0.9	5.0	165	0.62	56.1	285	12		40	0.77	0.20	5.89	
	ゆでる	薄切り	373	52.1	13.8	33.5	0		0.6	4.5	106	0.46	37.3	173	13		43	0.59	0.15	3.89
		ブロック	378	52.2	12.7	34.5	0		0.6	5.1	103	0.44	35.1	142	20		67	0.54	0.13	3.42
ら	煮込み	162	78.9	6.5	14.3	0		0.3	4.0	66.5	0.23	28.0	130	8		27	0.24	0.09	2.19	
	から揚げ	455	1,904	35.0	20.9	36.0	7.0	1.1	6.1	177	0.69	65.9	302	19		63	0.80	0.23	5.91	
	網焼き	薄切り	178	745	64.3	27.9	6.4	0	1.4	7.4	248	0.99	57.5	436	φ		—	1.43	0.32	10.77
		厚切り	143	598	70.6	23.5	4.7	0	1.2	5.1	223	0.67	44.3	409	φ		—	1.22	0.22	10.15
も	薄切り	薄切り	176	736	66.6	24.7	7.6	0	1.1	6.8	215	0.82	54.4	367	φ		—	1.19	0.25	9.03
		厚切り	156	653	69.9	22.4	6.5	0	1.2	5.0	218	0.60	41.1	362	φ		—	1.28	0.22	9.92
	ゆでる	薄切り	133	556	71.9	23.5	3.6	0	1.0	5.4	174	0.71	30.0	260	φ		—	1.13	0.23	7.46
		ブロック	159	665	66.8	27.5	4.6	0	1.1	5.0	179	0.76	24.3	216	φ		—	1.07	0.25	8.94
も	煮込み	角切り	61	255	87.6	9.8	2.1	0	0.5	2.3	90.1	0.29	26.3	175	φ		—	0.35	0.11	3.74
		角切り	225	941	54.0	28.5	7.4	8.6	1.5	6.8	274	0.71	45.1	402	φ		—	1.26	0.25	10.66
	から揚げ	薄切り	338	1,414	44.2	33.6	20.8	0	1.4	6.3	277	1.14	61.9	440	φ		—	0.76	0.24	8.08
		衣揚げ	150	628	69.4	24.2	5.1	0	1.3	5.4	202	1.48	71.1	397	φ		—	0.85	0.27	8.73
と	網焼き	薄切り	164	686	68.5	23.3	7.0	0	1.2	5.2	201	1.44	65.7	461	φ		—	0.92	0.25	8.48
		角切り	229	958	53.7	30.9	7.9	5.9	1.6	7.2	270	1.83	71.5	486	φ		—	1.05	0.28	10.53
	から揚げ	角切り	275	1,151	53.6	28.6	16.4	0	1.4	8.3	232	2.05	54.1	336	φ		23	0.75	0.33	7.31
		衣揚げ																		

1.大カロリー (Cal=1,000cal) からKcalへ単位を改め、KcalからKJへの換算は、FAO/WHOに依り、1Kcal=4.184KJ。

2.*印は四訂日本食品標準成分表において、あらかじめ0、又は、微量程度と判断されたので、分析しなかった。

表18-2 異なった温度条件下で滅菌線量を照射したハム中のビタミンB群の残存量。

線量、kGy	照射温度、℃	ビタミンB ₁	ビタミンB ₂	ナイアシン	ビタミンB ₆
35 ~ 44	-80±5	69%	110%	65%	87%
35 ~ 44	5±5	6%	93%	86%	87%
35 ~ 44	室温	4%	98%	85%	55%
45 ~ 56	-80±5	88%	122%	76%	92%
蒸気滅菌	缶詰条件	33%	108%	46%	53%

表18-3 カラスムギ中のビタミンEの照射温度による残存量； α -トコフェロール、mg/100g(5MeVの電子線で空気存在下のポリエチレン袋中に包装して1kGy照射)。

照射温度、℃	非照射での含量	照射後の含量	分解率、%
50	6.5	3.5	46
20	7.4	5.6	24
5	7.5	6.2	17
-72	7.7	6.6	14
-180	7.6	7.1	7

参考資料：

- 1)G. Wilson: J. Sci. Food Agric., 10, 295, 1959

照射による不飽和脂肪酸の分解物生成と消化性低下の可能性について

食品の脂質を構成する脂肪酸のうち、不飽和結合をもつ脂肪酸（リノール酸、リノレン酸等）は、不飽和結合が酸化されやすい。放射線照射による脂肪酸の変化は、標品脂質単独、天然の脂質単独並びに食品中の脂質において調べられている。

当然、共存物があれば分解並びに放射線分解生成物のG値は異なるが、いずれの場合も分解経路に差はない。

1. 標品脂質における分解機構：

脂質の中で中性脂肪であるトリグリセリドは、図19-1に示される位置で切断される。切断された結果、生成する放射線分解生成物は表19-1に示されるものである。

これらは、W. W. Nawarらによって詳細に調べられている。低分子量のアルカンは、脂質を含んだ食品の、いわゆる照射臭の原因物質である。又、表19-2に示されるように照射により生成する物質は、加熱によって生成する物質と本質的に差はない。

図19-1 照射によるトリグリセリドの切断位置

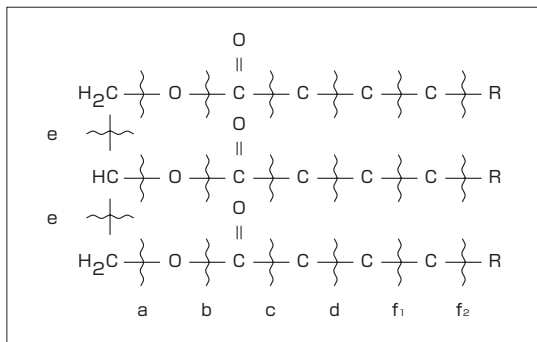


表19-1 予想されるトリグリセリド(脂質)の放射線分解生成物。

分解される位置	主要な生成物	再結合生成物
a	C _n 脂肪酸類、プロパンジオール・ジエステル類、プロパンジオール・ジエステル類	C _n 脂肪酸エステル類、アルカンジオール・ジエステル類、2-アルキル-1,3-プロパンジオール・ジエステル類、ブタントリオール・トリエステル
b	C _n アルデヒド類、ジグリセリド類、オクソ-プロパンジオール・ジエステル類、2-アルキルシクロブタノン類	ケトン類、ジケトン類、オクソアルキルエステル類、グリセリルエステル・ジエステル類、グリセリルエステル・テトラエステル類
c	C _{n-1} アルカン類、C _{n-1} 1-アルケン類、ホルミルジグリセリド類	長鎖炭化水素類、短鎖の脂肪酸類を有すトリグリセリド類
d	C _{n-2} アルカン類、C _{n-2} 1-アルケン類、アセチルジグリセリド類	炭化水素類、長鎖または短鎖の脂肪酸類を有すトリグリセリド類
e	C _n 脂肪酸メチルエステル類、エタンジオール・ジエステル	C _n 脂肪酸エステル類、アルカンジオール・ジエステル類、エリスリトール・テトラエステル
fi	C _{n-x} 炭化水素類、短鎖の脂肪酸類を有すトリグリセリド	炭化水素類、長鎖の脂肪酸類を有すトリグリセリド類

i : 1,2, . . . , n-3

x : 3からn-1までの炭素数

表19-2 脂質のモデル物質トリカブロインを真空下で加熱または照射した場合の分解生成物の比較 ($\mu\text{モル}/100\text{g}$)。

分解生成物	加熱 270℃、1時間	照射 60kGy
エタン	3.0	20
エセン	1.4	14
プロパン	10.4	12
プロペン	7.2	4
ブタン	2.0	10
1-ブテン	62.7	39
ペンタン	100	181
1-ペンテン	4.5	14
ヘキサナール	8	172
メチルヘキサノエート	4	39
ヘキサノイック酸	4,396	1,220
2-エチルシクロブタノン	—	39
2-オクソプロピルヘキサノエート	237	25
6-ウンデカノン	449	70
2-オクソヘプチル・ヘキサノエート	60	30
1,2-プロパンジオール・ジカプロエート	9	324
1,3-プロパンジオール・ジカプロエート	44	45
1,3-プロパンジオール・ジカプロエート	7	221
2,3-プロパンジオール・ジカプロエート	35	32
2-オクソ-1,3-プロパンジオール・ジカプロエート	2	—
ジカプリン	2,939	295

2. 天然の脂質における分解：

天然の脂質に対する照射の影響はE. D. Willsらによって詳細に調べられている。

彼らは、ラード、コーン油、ココナツ油、ニンシ油について2~10kGyの γ 線照射を行ない、脂質を構成する脂肪酸の変化を調べている。その結果、飽和脂肪酸ではほとんど変化は生じないが、不飽和脂肪酸が減少する事を認めている。一例をあげれば、ニンシ油に含まれる全ジエン含有量は、対照の1.9%に対して、2kGy照射物では1日後で1.7、10日貯蔵後(4℃)で1.3%に、10kGy照射物では3日貯蔵後で1.4、18日貯蔵後(同)では0.4%に低下する。この減少と並行して、過酸化物価の上昇がみられる。

非照射油を4℃で14日間貯蔵後の過酸化物価は23.5 ($\mu\text{モル}\cdot\text{マロンアルデヒド}/\text{g}$)であるが、2kGy照射物を同条件で貯蔵したものは230.5であり、10kGyでは281.7である。

彼らは、次いで、過酸化物価の上昇に対する抗酸化剤添加の効果を調べている。ニンシ油と澱粉との混合物(1:9)に没食子酸プロピル(PG)、ブチルヒドロキシアニソール(BHA)、ジブチルヒドロキソトルマン(BHT)、ノルジヒドログアヤル酸(NDGA)、ジフェニールパラフェニレンジアミン(DPPD)を0.001~0.1%の濃度で添加し、1~20kGyの γ 線照射を行ない、過酸化物の生成を調べている。その結果、0.01%の添加で、5kGyまでの照射によって起こる過酸化物の生成を抑制できる事、0.1%添加で、20kGyまでの照射によって起こる過酸化物の生成を抑制できる事を明らかにした。更

に、貯蔵中の過酸化物価の上昇は、照射後に抗酸化剤を添加する事で抑制できる事を明らかにした。

3. 鶏ヒナを用いた実験：

滝川らは、大豆油を含む（10%）飼料を γ 線照射し、鶏のヒナに与えたときの影響をみている。

照射線量は6、30、60kGyであり、照射直後の過酸化物価は、対照の0.3に対して、各々2.1、410、1,890に上昇した。この飼料を3週間貯蔵すると過酸化物価は、対照の15に対して、各々38、1,353、1,371に上昇した。

これらの飼料で鶏ヒナを2週間飼育したときの飼料効率、対照の0.59に対して、6kGy照射では0.58と変化はなく、30kGy照射では0.33、60kGy照射では0.25と低下した。又、飼料の代謝エネルギー量及び消化率も有意に低下した。しかし、油以外の成分に60kGy照射しても、発育の低下は認められなかった。

以上の事をまとめると、不飽和脂肪酸を多く含んだ脂質の酸化は照射により促進され、過酸化物価の上昇が起こる。しかし、鶏ヒナを用いた試験からは、6kGyの照射では、ほとんど影響がない事を認めた。又、抗酸化剤（PG、BHA、BHT、NDGA等）の添加や脱酸素包装、凍結下では、酸化が抑制できる事がわかった。

参考資料：

- 1) C. T. Hammer, E. D. Wills: Int. J. Radiat. Biol., 35(4). 323-332, 1979
- 2) E. D. Wills: 同誌, 37(4). 383-401, 1980
- 3) E. D. Wills: 同誌, 37(4). 403-414, 1980
- 4) 滝川明宏、壇原宏、大山嘉信：日本畜産学会報、47(5). 292-302, 1976

食品中のアミノ酸及び糖類に対する照射の影響は、照射により生成する一次ラジカルによる放射線化学的影響と、放射線の生物学的効果による代謝変動に分けて考慮する必要がある。

屠殺後の肉類、魚介類あるいは水分含有量の低い穀類、豆類等については、生物学的効果を考慮する必要はないが、青果物等収穫後生理が継続しているものは、生物学的効果が中心となる。

1. 蛋白質の放射線化学：

水溶液中で蛋白質が照射されると生じる変化は、第1に3次元構造の変化であり、いわゆる変性を起こし、溶解度が減少する。更に、蛋白質表面領域に存在するアミノ酸残基の中で、硫黄原子を含むもの、あるいは芳香環をもつものが分解する。その結果、他のペプチド鎖との間で新たな架橋が生成する。一般にアミノ酸残基の放射線分解は、酸化的に進行するので、酸素の存在が放射線による蛋白質の変化に大きな影響をもつ。表20-1にゼラチン水溶液を酸素存在下で照射したときの放射線分解生成物のG値を示した。

乾燥状態では、蛋白質は放射線に対して極めて安定である。しかも、実際の食品では、フリーラジカル捕捉物質が共存しており、蛋白質の放射線化学的反応はほとんど起きない。

表20-1 酸素共存下のゼラチン水溶液をγ線照射したときの分解生成物。

分解生成物	100eV生成量、G値
全カルボニル化合物	0.89
α-ケト酸類 (α-ケトグルタリク)	0.40 0.05
アンモニア	1.25
アミド	0.95
遊離物	0.30
過酸化水素	1.24
過酸化有機物	0.38

*ゼラチン濃度=1%；線量=2.5 x 10¹⁹eV/ml

2. 牛肉の蛋白質に対する照射の影響：

表20-2に牛肉をγ線あるいは電子線で照射した際の蛋白質のアミノ酸、特に、照射による影響を受けやすいトリプトファン、ヒスチジン、シスチン及びシステインの分解率を示した。20kGyの照射でトリプトファンが13%、シスチン及びシステインが

30%分解する。

表20-2 牛肉中のアミノ酸含量に対する線量率の影響(蛋白質100g当たりのアミノ酸量、g)。

線量 (kGy)	トリプトファン			ヒスチジン			シスチン/システイン		
	24MeV電子線		γ線	24MeV電子線		γ線	24MeV電子線		γ線
	200 μA	20 μA		200 μA	20 μA		200 μA	20 μA	
0	1.703	1.703	1.703	3.43	3.43	3.43	1.27	1.27	1.27
20	1.510	1.498	1.477	3.20	3.33	3.44	0.82	0.92	0.89
40	1.485	1.515	1.475	—	3.32	3.41	0.74	0.88	0.84
60	1.480	1.505	1.475	3.03	3.33	3.46	0.74	0.83	0.84

3. 糖の放射線化学：

糖の水溶液の照射による分解は、放射線化学的な興味から多くの研究がなされている。表20-3にグルコースの稀薄水溶液を酸素存在下で照射した際の放射線分解生成物のG値を示した。

蛋白質と同様に実際の食品では、フリーラジカル捕捉物質が共存しており、糖に放射線化学的反応はほとんど起きない。

4. コーンスターチに対する照射の影響：

澱粉は、共存物質がほとんど含まれていない純粋な系である。従って、殺菌レベルの放射線照射によっても澱粉分子の分解が起こる。表20-4は、水分含有量が12~13%のコーンスターチを10kGy照射した時の放射線分解生成物を示したものである。分解の最終生成物であるギ酸の生成量が最も多く、100mg/kg生成する。

5. 生物学的影響による糖の変化：

青果物の馬鈴薯は、低線量の照射により糖合成系酵素が誘導されショ糖が蓄積される事が知られている(質問21参照)。しかしながら、エネルギー源としての炭水化物量には変化はない。

以上の事をまとめると、実際の食品に10kGy程度を照射した場合、蛋白質の栄養価及び炭水化物のエネルギー値に大きな影響はないと結論される。

表20-3 酸素共存下でのグルコース水溶液 (5 x 10⁻³M) のγ線分解。

No.	分解生成物	G値		
		N ₂ O-O ₂	O ₂	O ₂ または空气中
1	D-グルコン酸	0.90	0.37	0.4
2	D-アラビノーヘクソスウロース	0.90	0.48	
3	D-リボヘクソス-3-ウロース	0.57	0.33	
4	D-キシロヘクソス-4-ウロース	0.50	0.31	
5	D-キシロヘクソス-5-ウロース	0.60	0.23	
6	D-グルコヘクソジアルドース	1.55	0.79	
7	D-グルクロン酸	0.05	n.d.	0.9
8	D-アラビノース	0.07	0.015	
9	D-アラビノン酸	0.03	0.015	
10	キシロペントジアルドース	0.07	0.02	
11	D-キシロース	0.01	0.02	
12	L-スレオテトロジアルドース	0.20	0.12	
13	D-エリスロース	0.01	0.01	
14	D-エリスロン酸	0.01		
15	D-グリセルアルデヒド	0.06	n.d.	
16	D-グリセリン酸	0.07	n.d.	
17	グリオキザール	0.11	n.d.	
18	グリオキシリク-グリコリン酸	0.4	n.d.	
19	ホルムアルデヒド	0.12	0.07	
20	蟻酸	0.6	0.2	
21	過酸化水素	3.0	3.0	
22	水素	0.37	n.d.	
23	炭酸ガス	n.d.	二次産物	
24	D-アラビノーヘクソロン酸	二次産物	n.d.	

n.d. : 未検査

表20-4 水分含量12~13%のトウモロコシ澱粉を空気存在下で10kGy照射した時の主要な放射線分解生成物。

放射線分解生成物	濃度 (mg/kg)
蟻酸	100
アセトアルデヒド	40 (8kGyまで)
マルトース	9.3
グリコアルデヒド	9
過酸化水素	6.6 (1~4kGy)
グルコース	5.8
グリセルアルデヒド/ジヒドロキシアセトン	4.5
アセトン	2.1 (20kGy以上)
マロンアルデヒド	2

参考資料 :

- 1) Stein. G. and Tomkiewicz. M. : Radiation Res., 43, 25, 1970
- 2) Schuchman, M. N., and Von Sonntag. C., : J. Chem. Soc., 1978, 1958

照射による馬鈴薯の栄養成分の変化については、特定総合研究（質問4参照）において詳細に調べられている。馬鈴薯の発芽防止線量は0.06～0.15kGyであるが、特定総合研究においては0.6kGyまでの照射を行なった試料のビタミンB₁、B₂、C、炭水化物を化学的に調べるとともに、ラットを用いた栄養試験を行なった。

1. ビタミンB₁について：

照射によるB₁の低下は、照射30日後に測定した値では、0.3kGy照射物が対照の90%、0.6kGy照射物が85%である。貯蔵中に、馬鈴薯のB₁は減少するが、その減少速度は対照の方が大きく、照射120日後では、ほぼ同程度となる。

2. ビタミンB₂について：

照射によるB₂の低下は、照射30日後に測定した値では、0.3kGy照射物が対照の93%、0.6kGy照射物が83%である。B₁と同様、貯蔵中に馬鈴薯のB₂は減少し、120日後では、対照と照射物との間に有意の差は認められない。

3. ビタミンCについて：

照射による馬鈴薯の生理活性の変化により総ビタミンC量はあまり変化しないが、アスコルビン酸量はデヒドロアスコルビン酸に変わるため大きく低下する。照射30日後の測定結果では、対照の100%に比較して、アスコルビン酸量は0.15kGy照射物が62%、0.3kGy照射物が59%、0.6kGy照射物が53%に低下した。しかし、馬鈴薯の貯蔵中のアスコルビン酸の低下は、非照射のものの方が著しく、照射90日後では、照射物とほぼ同程度、120日後ではむしろ照射物の方が高い値を示した。また、江指らは非照射と照射馬鈴薯で調理による総ビタミンC損失率に有意差のないことを明らかにした。

4. 炭水化物について：

照射による馬鈴薯の還元糖量は若干増加する。例えば、照射直後の還元糖量は、対照の0.15%に対して、0.3kGy照射物で0.20%に増加する。又、貯蔵中に少しずつ減少していくが、その減少程度は対照の方が大きい。一方、澱粉は、照射直後は対照と照射物との間に差はないが、貯蔵中に、対照がやや増加していくのに対して、照射物はやや減少していく。

5. 人工消化試験：

蒸煮した馬鈴薯の酵素（ジアスターゼ）による消化率をインビトロ（試験管内）実験で調べた結果、照射により人工消化率は低下する事がわかった。例えば、照射直後において、対照は12.5（遊離グルコース量）であるのに対して、0.3kGy照射物は10.4であった。この理由は照射馬鈴薯の方が、硬度を保っているためと判断された。これは、馬鈴薯を蒸煮した後の澱粉の α 化度を測定する事で裏付けられた。

6. 幼ラットを用いた栄養試験：

幼ウィスター系雄ラットに10%濃度で馬鈴薯粉末を混合した試料を4週間にわたって与え、飼育試験を行なった。その結果、体重増加率、飼料効率、蛋白質効率（PER）、みかけの消化吸収率、臓器重量、後腹壁脂肪の脂肪酸組成、肝臓成分のいずれも対照と照射区（0.07、0.15、0.3kGy）との間に有意の差は認められなかった。

特定総合研究以外の実験報告としては、参考資料に示すものがある。照射によるビタミンCの減少については、多くの報告がある。いずれも貯蔵後には対照と変わらなくなる結果を得ている。

林らは、照射馬鈴薯における糖代謝について報告している。馬鈴薯のショ糖含有量は照射直後は影響を示さないが、貯蔵中に増加する。0.15kGy照射区では、照射1週間後に0.9%にまで上昇する（対照は0.2%）。その後減少し、4週間後には対照と同程度であった。2kGy照射すると、照射2週間後に1.8%まで上昇し、4週間後も同レベルであった。彼らはこの現象を、照射によるショ糖合成酵素活性の変化によると説明している。

田島らは、照射馬鈴薯のアミノ酸（蛋白質及び遊離）組成に及ぼす照射の影響を調べている。0.15kGyの照射は、馬鈴薯の蛋白質アミノ酸に、有意の影響を与えない。遊離アミノ酸は、照射直後には、そのパターンに変化がみられるが、90日貯蔵後には変化は消失し、対照と差がなくなった。

以上の事を総合すると、馬鈴薯の主要栄養成分である炭水化物、蛋白質、ビタミンについては、炭水化物、蛋白質は照射によりほとんど影響を受けない事、ビタミンではCのアスコルビン酸量が照射による生理活性の変化により減少するが、貯蔵中の減少はゆるやかで、数週間の貯蔵後は非照射と同じ量を保つ事から、照射によって馬鈴薯の栄養価が損なわれる事はないと結論できる。ラットによる栄養試験でもこの事は確認されている。

参考資料：

- 1)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）：食品照射研究運営会議、6、1971.
- 2)Preservation of Food by Ionizing Radiation, Vol. 3, p. 172, CRC, press,

1983

3)林徹：博士論文

4)M. Fujimaki, M. Tajima, T. Matsumoto : Agric. Boil. Chem., 32, 1228,
1968

5)江指隆年ら：ガンマ線照射ジャガイモの貯蔵後の調理がビタミンC損失におよぼす
影響，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

1. 放射線による食品成分の化学変化

NawarやEliasらの報告によると、食品に γ 線、X線、電子線を照射すると著しい量のフリーラジカル（遊離基または活性種）が生成され化学反応に寄与する。食品には水が含まれているためフリーラジカルの多くは水酸基ラジカル（ $\cdot\text{OH}$ ）、水和電子（ e_{aq}^- ）、水素ラジカル（ $\cdot\text{H}$ ）などの水分解ラジカルで占められ、主に酸化反応に寄与する。一方、酸素が共存すると分子状酸素や過酸化水素ラジカル（ $\cdot\text{HO}_2$ ）やスーパーオキシドラジカル（ $\cdot\text{O}_2^-$ ）、過酸化水素（ H_2O_2 ）も生成され酸化反応を促進する。なお、これらのフリーラジカルは 10^{-9} 秒以内に消滅し、比較的安定な過酸化水素は水和電子と連鎖反応を起こすため、吸収線量に比例して蓄積することはあり得ず、食品中では $1\text{mg}/\text{kg}$ 以下の蓄積量であり、しかも急速に分解してしまう。このため、食品成分の放射線化学反応は水分解ラジカルによる寄与が大きく、主に分子鎖切断と酸化分解反応を起こし、還元反応も起こる。

Nawarの報告では、食品成分の放射線分解生成物の多くは脂質によるものであり、タンパク質は放射線に対して比較的安定であると述べている。脂質の多くは水分解ラジカルの寄与よりも分子鎖内に生成されたフリーラジカルによる反応が中心であり、自動酸化反応、分子内結合反応、脱炭酸反応、脱水素反応などが起こる。タンパク質の場合には水酸基ラジカルと水素ラジカルによる水素引き抜き反応と還元的脱アミノ反応が起こる。また、分子鎖が切断されて低分子のポリペプチドが生成される。球状タンパク質では架橋反応により高分子タンパク質を生成することもある。低分子糖類は水分解ラジカルとの反応により有機酸やアルデヒド類、ケトン類を生成し、多糖類は低分子糖類を生成しやすい。

2. 食品成分の放射線分解生成物

食品の揮発成分としては非照射の場合にも加熱調理や酸化により分解生成物が生成される。一方、牛肉などを照射することにより約65種類の放射線分解生成物が分離されている（表22-1）。米国食品医薬品局（FDA）は食品を 1kGy 照射すると最大で $30\text{mg}/\text{kg}$ が生成すると推定している。一方、牛肉を 56kGy 照射しても分解生成物は約 $10\text{mg}/\text{kg}$ にすぎないとの報告もある。食品の主要成分の脂質、タンパク質、糖類に対する放射線の影響は各成分で異なるが、 50kGy の高線量でもその影響は極めて小さく各種分解生成物の量は $\mu\text{g}\sim\text{mg}/\text{kg}$ の微量である。

Nawarの報告によると、脂質の放射線分解生成物は分子鎖切断による脂肪酸類やエステル類、脂肪酸の還元的切断による炭化水素化合物に属すアルカン類、アルケン類、

表22-1 牛肉を50kGy照射した場合の揮発性分解生成物

アルカン類 (直鎖飽和炭化水素)	アルデヒド類 (続)	脂肪酸類 (続)
Heptane	Tetradecanal	Octadecanoic acid
Octane	Tetradecenal	Octadecenoic acid
Nonane	Pentadecanal	ジオールエステル類
Decane	Hexadecanal	(水酸基2個を有する
Undecane	Hexadecenal	アルコールエステル)
Dodecane	Octadecanal	2-Hydroxy propyl hexa-
Tridecane	Octadecenal	decanoate
Tetradecane	エステル類	1,2-Tetradecanoyl propanediol
Pentadecane	Me-dodecanoate	diesters
Hexadecane	Me-tetradecanoate	Hexadecanoyl, tetradecanoyl
Heptadecane	Me-pentadecanoate	1,2-propanediol diesters
アルケン類 (直鎖不飽和炭化水素)	Me-hexadecanoate	1,2-Hexadecanoyl propanediol
Nonene	Me-hexadecenoate	diesters
Decene	Me-heptadecanoate	1,3-Hexadecanoyl propanediol
Undecene	Me-octadecanoate	diesters
Dodecene	Me-octadecenoate	Tetradecanoyl, octadecenoyl
Tridecene	Et-tetradecanoate	1,2-propanediol diesters
Tetradecene	Et-tetradecenoate	Hexadecanoyl, octadecenoyl
Pentadecene	Et-pentadecanoate	1,2-propanediol diesters
Hexadecene	Et-hexadecanoate	Hexadecanoyl, octadecanoyl
Heptadecene	Et-hexadecenoate	1,2-propanediol diesters
アルカダイエン類 (二重結合2個を有する	Et-octadecanoate	Glyceril-1-tetradecanoate-2-
直鎖の不飽和炭化水素)	Et-octadecenoate	octadecanoate or isomers
Decadiene	Pr-octadecanoate	1,3-Diplamitin
Dodecadiene	Pr-octadecenoate	1,2-Octadecenoyl propanediol
Tridecadiene	(Me-メチル、Et-エチル、	diesters
Tetradecadiene	Pr-プロピル)	ラクトン類
Pentadecadiene	アルコール類	(環状分子内エステル)
Hexadecadiene	Hexanol	γ-Palmitolactone
Heptadecadiene	Decanol	ζ-Palmitolactone
アルキン類 (三重結合を有する	Undecanol	γ-Sterolactone
不飽和炭化水素)	Tridecanol	ζ-Sterolactone
Decyne	Tetradecanol	γ-Oleolactone
Undecyne	Hexadecanol	ζ-Oleolactone
Dodecyne	Octadecanol	ケトン類
アルデヒド類	脂肪酸類	(カルボニル基が2個の
Hexenal	Heptanoic acid	炭化水素化合物)
Nonanal	Octanoic acid	2-Pentadecanone
Undecanal	Nonanoic acid	2-Heptadecanone
Dodecanal	Decanoic acid	Butyl tridecenyl Kctone
	Tetradecanoic acid	Palmitone
	Tetradecenoic acid	16-Tritriaconta-24-enone
	Pentadecanoic acid	
	Hexadecanoic acid	
	Hexadecenoic acid	
	Heptadecanoic acid	

アルカデイエン類、アルキン類、酸化分解によるアルデヒド類やアルコール類などである。これらの分解生成物は非照射食品中にも含まれており、多くの分解生成物は線量に比例して増加する傾向がある。

タンパク質の分解生成物はアンモニアや有機酸、芳香族化合物、メルカプタン類などであり、嫌氣的包装または凍結下での照射では高線量でも分解生成物は極微量である。また、アミノ酸と糖が反応してメラノイジン（黒褐色色素：醤油や味噌などの色素）を生成することもある。

グルコースなどの単糖類を照射すると有機酸類、アルコール類、アルデヒド類、ケトン類などを生成する。多糖類を照射すると低分子糖類や単糖類が生成されやすく、有機酸類やアルデヒド類なども微量に生成される。糖類の場合、照射条件によって分解生成物の量が著しく変化し、澱粉を乾燥下・酸素気流中で10kGy照射すると弱変異原性のマロンジアルデヒドが2mg/kg生成され、ホルムアルデヒドが20mg/kg生成される。しかし、通常の食品中では共存物質により放射線化学反応が抑制されるため10kGy照射してもホルムアルデヒドは2mg/kg以下にすぎない。

ビタミン類の場合は、放射線による分解反応は酸化分解が中心であり、加熱調理と似ている。また、水溶液中では低線量でも分解するが食品中では安定であり、鶏肉を凍結下で59kGy照射しても各種ビタミン類はほとんど分解しない。DNAの場合は分子鎖切断が中心であり、DNAを構成する塩基の酸化分解も若干起こる。

3. 放射線特有の分解生成物

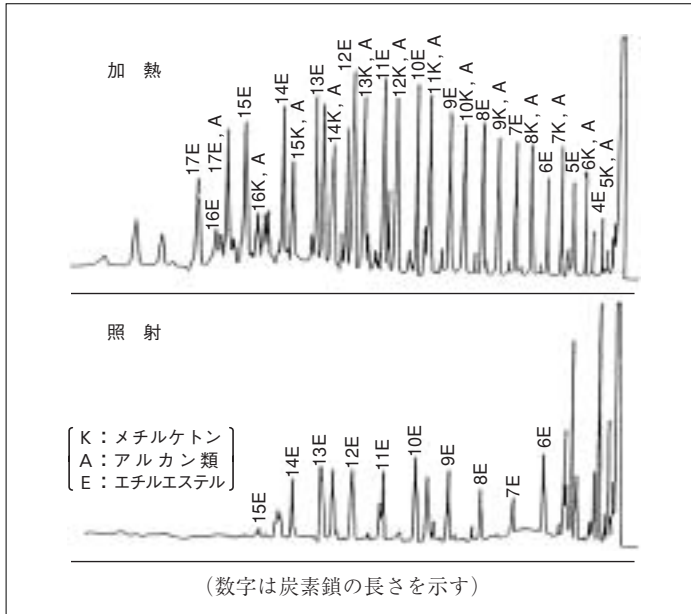
米国陸軍Natick研究所では牛肉を50kGy照射することにより65種類の揮発成分が分離されている。米国食品医薬品局は、この内63種類が放射線分解生成物であり、1980年の時点では10%が放射線特有の分解生成物と見なした。その後、直鎖炭化水素化合物のウンデシン、ペンタデカジエン、ヘキサデカジエンのみが非照射食品中に検出されないと評価した。しかし、米国陸軍の1981年の報告では、これらの化合物は非照射の牛肉や鶏肉などからも微量に検出され、照射により若干増加する程度であると述べている。また、1997年のWHO専門家グループの見解では、これらの化合物は非照射食品中に比較的多く存在する類似化合物より炭素数が1個少ない化合物であり、非照射食品中にも微量に存在するという。その後、脂質の放射線分解で生成される2-アルキルシクロブタノン類のみが放射線特有の分解生成物とされた。しかし、本化合物は加熱調理などで分解されやすく、体内に吸収されにくく、変異原性がないことが明らかにされている。また、生成量も鶏肉を59kGyの高線量照射しても約1.7μg/gと微量である。

4. 加熱分解生成物との比較

食品の放射線分解生成物は基本的に加熱分解生成物と似ていると報告されているが、

これは主に脂質についての結果である。Nawarの報告によると、脂質のモデルとしてステアリン酸エチルエステルを180℃・1時間（天ぷら温度）と120kGyで比較したところ、図22-1に示すように各種炭素数の炭化水素化合物、アルデヒド類、エステル類などが生成され、加熱の方が分解物の種類や量が多い傾向が認められている。また、アミノ酸やポリペプチド化合物を170℃・1時間処理したものと60kGy照射を比較した場合も揮発性物質は加熱の方が多かったと報告している。

図22-1 脂質のモデル物質メチルステアリン酸の加熱（180℃、1時間）および照射（120kGy）による揮発性分解生成物の比較



タンパク質やアミノ酸を加熱調理して生じる「こげ」には強い変異原性を示す3-アミノ-5H-ピリド [4,3-b] インドールや3-アミノ-1-メチル-5H-ピリド [4,3-b] インドールなどが生成することが報告されている。また、グルコースなどの糖類を高温で加熱すると強い変異原性を示す5-ヒドロキシマルトールなどが生成するし、グルコースとアミノ酸の加熱反応により強い変異原性を示すヘテロサイクリックアミン（複素環化合物）が生成される。

一方、タンパク質やアミノ酸を高線量照射しても変異原性物質の生成は報告されていない。坂本の報告によると、アミノ酸水溶液を10kGy照射しても変異原性物質は誘導されず、糖とアミノ酸の混合水溶液を10kGy照射しても変異原性物質は誘導されなかったと述べている。一方、糖とアミノ酸の混合水溶液を121℃・1時間処理すると変異原性物質が検出されている。川岸らの報告では糖水溶液を30kGyまで照射すると弱

変異原性を示す α -ジカルボニル化合物のグルコソシオンやグリオキザール、マロンジアルデヒド等が生成するが、動物個体を用いた実験では変異原性を示さなかったと述べている。水溶液中での照射は食品中に比べ数倍も放射線化学反応が起こりやすく、加熱調理と比較しても放射線照射では変異原性物質の誘導が少ないことを示している。

このように、放射線で起こる化学反応は加熱や通常の酸化分解反応でも起こり、通常存在しない化合物が生成される可能性はほとんどない。

参考文献

- 1) W. W. Nawar : Volatiles from food irradiation, Food Reviews International, 2, 45 ~ 78(1986).
- 2) C. Merritt Jr. : The analysis of radiolysis products in meats and meat substances, Food Irradiation Information, No. 10, 20 ~ 33(1980).
- 3) C. Jo and D. U. Ahn : Volatiles and oxidative changes in irradiated pork sausage with different fatty acid, Journal of Food Science, 65, 270 ~ 275(2000).
- 4) P. S. Elias and A. J. Cohen (Ed.) : Radiation Chemistry of Major Food Components, Elsevier, 1977.
- 5) C. Merritt Jr. : Radiolysis compounds in bacon and chicken, Final report, Natick, 1982.
- 6) Joint FAO/IAEA/WHO Study Group : High-Dose Irradiation ; Wholesomeness of Food Irradiated with Doses above 10kGy, WHO Technical Report Series 890, Geneva, 1999.
- 7) 坂本京子 : 糖・アミノ酸混合物の変異原性に対するガンマ線照射の影響、食品照射研究委員会研究成果最終報告書、192 ~ 203、日本アイソトープ協会、1992年。
- 8) 川岸舜朗、他 : 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、135 ~ 149、日本アイソトープ協会、1992年。
- 9) 吉田大輔 : 蛋白質などの熱分解産物と変異原性、化学と生物、17、18 -19(1979)。

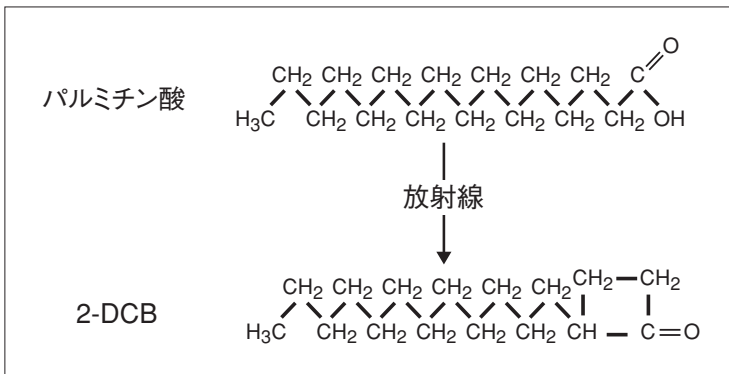
放射線照射により脂質中に生成する
2-アルキルシクロブタノン類の安全性について

1. はじめに

2-ACB（2-アルキルシクロブタノン）類は脂質を多く含む照射食品に生成する放射線に特有な分解生成物として知られている。2-ACB類で最も多く生成するのは2-DCB（2-ドデシルシクロブタノン）であり、図23-1に示すようにパルミチン酸のアシル基-酸素結合部の放射線による分解作用によって生成する。

ドイツの研究によると、ラット及びヒトの組織培養細胞で2-DCBにDNA切断能が示され、弱い変異原性の可能性が疑われた。しかし、2-ACB類と同様にビタミンCやルチンなどにも同じような作用があるし、パルミチン酸そのものにもDNA鎖切断能があることが知られている。また、ドイツで行われたDNA鎖切断に関する実験は通常の照射牛肉や鶏肉に含まれる2-ACB類の1,000～10,000倍の濃度でのものであり、細胞死が起こる濃度では染色体の切断が起こるとの指摘もある。また、DNA鎖切断の実験は電気泳動によるコメットアッセイ法によるものであり変異原性試験としては不確実な試験法であり、観察された1本鎖切断は生体内で日常的に生じており容易に修復され、突然変異をもたらさないとの指摘もある。

図23-1 パルミチン酸と2-ドデシルシクロブタノン(2-DCB)の構造



さらに、59kGy照射された鶏肉での慢性毒性試験や世代試験、変異原性試験では動物等に異常が認められなかったことから、通常の照射食品中の2-ACB類の濃度では変異原性がなく、毒性もないか極微弱であると世界保健機関や米国食品医薬品局は結論している。しかし、癌細胞を用いた実験で2-DCB添加によってDNA鎖切断による細胞死が著しく起こるとの報告もあるため、変異原性や発癌促進効果などが調べられている。

2. 変異原性試験

大腸菌変異株によるトリプトファン復帰変異は短期の変異原性（遺伝毒性）試験法として国際的に認められている。Sommersの研究では2-DCBの0.05～1.0mgを変異株に作用させ、培養液にラット肝抽出液を作用させたものと作用させないもので比較したが濃度による影響は認められず、復帰変異は認められなかった。なお、ラット肝抽出液S9は酵素反応での代謝活性化により変異原性を示す化学物質の検出に使用されている。

一方、ネズミチフス菌として知られるサルモネラ・タイフィムリウム変異株による復帰変異はエームス試験法として国際的に用いられてきている。Burnoufら、Sommersら、Gadgilらが2-ACB類の試験に用いた数株の変異株はDNA鎖断片を入れ替えるフレームシフト変異や塩基対置換の点突然変異を検出できる。その結果、表23-1に示すようにラット肝抽出液の有無にかかわらず、2-DCB等の変異原性は認められなかった。

表23-1 サルモネラ変異株のエームス試験による5%S9抽出液有無での2-DCBの変異原性評価

菌株	S9処理	2-DCB／ヒスチジン復帰コロニー数					変異剤
		0mg	0.05mg	0.10mg	0.50mg	1.00mg	
TA98	-	4.00±0.50	3.83±0.33	3.5 ± 0	3.67±0.17	3.33±0.88	111±4.16
	+	3.33±0.44	2.33±0.67	1.83±0.33	2.00±0.29	2.83±0.17	92.2±3.25
TA100	-	16.2±1.64	16.2±1.30	19.2±0.67	17.0±0.76	16.8±1.83	159±8.26
	+	13.2±3.09	9.67±1.59	16.2±4.32	13.7±1.17	14.2±3.17	205±4.49
TA1535	-	3.50±0.29	1.50±0.29	2.17±0.17	2.83±0.17	3.50±0.76	126±4.07
	+	2.16±0.67	1.17±0.44	1.50±0.29	1.67±0.73	1.33±0.44	91.2±7.91
TA1537	-	2.00±0.29	1.83±0.44	2.00±0.76	2.17±0.17	1.33±0.60	54.4±5.84
	+	1.17±0.33	0.50±0.29	1.67±0.73	1.0 ±0.29	1.50±0.29	42.8±1.59

* 変異剤：S9処理が無しの場合はTA100とTA1535にはメチルメタンスルホン酸、TA98とTA1537には2-ニトロフルオレンを用い、S9処理では全株とも2-アミノアンスラセンを用いた。復帰コロニー数は3回実験の平均値。

酒酵母菌の変異株はエームス試験では検出できない突然変異誘起可能または誘起不能の発癌性物質を検出することができる。Sommersらは2-DCBを0.63～5.0mg/mlとなるように酵母菌に作用させ染色体組み替え試験を行ったが、組み替え比率は2-DCB未添加と大差がなく発癌性を示さないことを明らかにした。

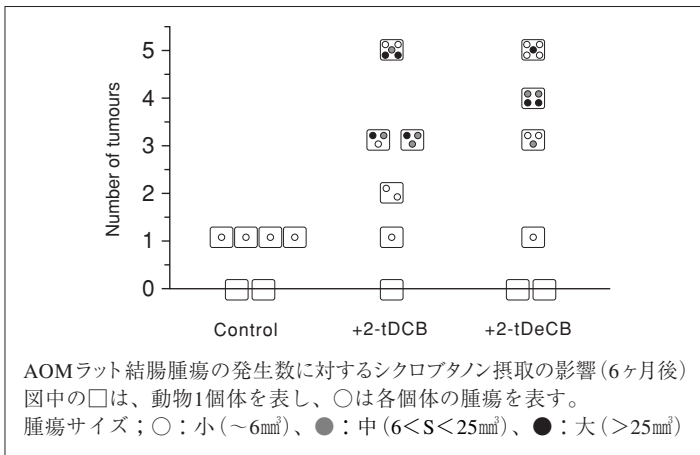
大腸菌変異株によるDNA損傷を誘導する遺伝子による変異原性試験は復帰変異原性試験では検出できないDNAの損傷を引き起こす変異原性物質を検出できるが、Sommersらの研究では2-DCB濃度への依存がなく、変異原性は認められなかった。また、DNAの酸化損傷を検出できる変異原性試験でも陰性であった。

これらの結果は、2-ACB類にはDNA損傷による変異の誘発や染色体内の組み替え能がないことを示している。

3. 発癌促進試験

Raulらはウイスター系ラット、各群6匹を用いて、0.005%(wt/vol、ラット1匹当たり1日に約1.6mgの摂取量)の2-TCB (2-テトラデシルシクロブタノン) 及び2-TeCB (2-テトラデク-5' -エニルシクロブタノン) を6ヶ月にわたって毎日与えた。2-ACB類摂取開始後3週間、4週間目に化学発癌物質のアゾキシメタンを全ての動物群に投与した。その結果、2-ACB類投与による急性毒性は認められなかった。発癌物質投与による前癌状態を示す障害の程度は3ヶ月後には2-ACB類投与群と未投与群の間で差が認められなかった。一方、6ヶ月後には前癌状態を示す障害が2-TeCB投与群で有意に増加した。腫瘍の発生は6ヶ月飼育群のみに認められ腫瘍の発生固体数は4~5匹で2-ACB未投与群も含む各群での差は認められなかったが、2-ACB類を摂取した動物群での腫瘍の総数は未投与群に比べ約3倍増加した。図23-2に示すように、2-TCB群では6匹中4匹、2-TeCB群では6匹中3匹の動物結腸に複数の腫瘍が発生した。これらの実験は2-ACB類それ自身が発癌性を有するのではないが、発癌物質投与による大腸癌の発生を促進する可能性があるものと結論した。この結果に対し、米国食品医薬品局は6匹の動物での結果は信頼性がなく、得られた結果があいまいであり、用いた動物はこの種の実験には適当でなく、人間が摂取する可能性のある量の1,000倍も投与していると指摘している。Raulらも脂肪酸のステアリン酸やオレイン酸には癌抑制効果があり、実際の照射食品中では2-ACB類の生成量が極微量であるのに対し、脂肪酸の量が圧倒的に多いため、人間の健康に問題を及ぼすことはあり得ないと述べている。

図23-2 2-ACB類による発癌プロモーターの可能性



参考文献

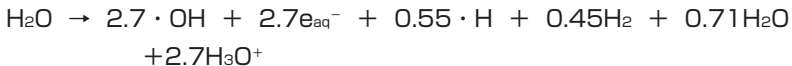
- 1)C. H. Sommers : 2-Dodecylcyclobutanone does not induce mutation in the Escherichia coli tryptphan reverse mutation assay, J. Agric. Food Chem., 51, 6367 ~ 6370(2003).
- 2)C. H. Sommers and R. H. Schiestl : 2-Dodecylcyclobutanone does not induce mutations in the Salmonella mutagenicity test or interchromosomal recombination in Saccharomyces cerevisiae, Journal of Food Protection, 67, 1293 ~ 1298(2004).
- 3)P. Gadgil and J. S. Smith : Mutagenicity and acute toxicity valuation of 2-dodecylcyclobutanone, Journal of Food Science, 69, C713 ~ C716(2004).
- 4)C. H. Sommers and W. J. Mackay : DNA damage-inducible gene expression and formation of 5-fluorouracil-resistant mutants in Escherichia coli, Journal of Food Science, 70, C254 ~ C257(2005).
- 5)F. Raul et al : Food-borne radiolytic compounds (2-alkylcyclobutanones) may promote experimental colon carcinogenesis, Nutrition and Cancer, 44, 188 ~ 191(2002).
- 6)H. Delincee et al : Genotoxicity of 2-dodecylcyclobutanone, a compound formed on fat-containing food treated by ionizing radiation, Final Report to ICGFI (Project 96 CT 2950).
- 7)Federal Register : Rules and Regulations, vol. 70, No. 157, Tuesday, August 16, 2005.

1. フリーラジカル

1) 水分の多い食品

照射食品中のフリーラジカル（遊離基または活性種）生成の種類や量は水分の多い食品か、または、水分の少ない食品かによって異なる傾向を示す。水分を多く含む系においては、 γ 線、X線、電子線の照射効果は水分子のイオン化によって生じるラジカルによる間接的な影響が大きい。

水分子の照射による生成物は次式のように水酸基ラジカル（ $\cdot\text{OH}$ ）、水素ラジカル（ $\cdot\text{H}$ ）、水和電子（ e_{aq}^- ）などである。



一方、酸素が共存すると分子状酸素や過酸化水素ラジカル（ $\cdot\text{HO}_2$ ）、スーパーオキシドラジカル（ $\cdot\text{O}_2^-$ ）、過酸化水素（ H_2O_2 ）も生成され酸化反応を促進させる。なお、これらのフリーラジカルは0.001秒以内に消滅し、比較的安定な過酸化水素は水和電子と連鎖反応を起こすため、吸収線量に比例して蓄積することはあり得ず、食品中では1mg/kg以下の蓄積量であり、しかも急速に分解してしまう。水分解ラジカルの内、水酸基ラジカルや過酸化水素ラジカル、スーパーオキシドラジカル、過酸化水素は活性酸素とも呼ばれ、生体内でも水酸基ラジカルやスーパーオキシドラジカル、過酸化水素が絶えず生成している。また、脂質の自動酸化でも水酸基ラジカルなどが生成している。

水酸基ラジカルは放射線を照射した際に生成する主要なラジカルであり、食品成分に多くの影響を与える。例えば、アルコール類、炭化水素類、カルボン酸類、エステル類、アルデヒド類、ケトン類、アミノ酸類、脂肪属化合物等のC-H結合から水素を引き抜いたり、OH基付加反応をする。チオール（SH）化合物からも水素を引き抜き、その反応定数は大きいといわれている。また、タンパク質や核酸のように芳香族部分と脂肪属部分とから成っている化合物でも付加的及び引き抜き反応が起こる。反応生成物は有機ラジカルを生じるが、水酸基ラジカルの場合には非選択的に反応する。

その他、反応性が高いラジカルとしては水和電子があり、水酸基ラジカルよりも選択的であり、芳香族化合物、カルボン酸類、アルデヒド類、ケトン類、チオール類等に付加する。

2) 水分の少ない食品

水分含有量の少ない系、即ち乾燥食品や油性食品等では、水分の多い食品に比べて高線量照射しないと成分変化が起こりにくいが、この場合は、直接食品成分と反応して有機ラジカルや他の反応性に富んだ化学種を生成する可能性がある。水分含有量の多い系

よりも複雑で変化に富んでおり、生成物には不飽和度の高い分子も含まれるし、C-H及びC-C結合の開裂によるラジカルも生じる。他の化合物への励起エネルギー転移もある。

3) 生成有機ラジカル

照射による食品への直接作用、または、水分解ラジカルによる間接作用によって生じる有機ラジカルは酸または塩基の両方の性質を有しており、生成後にプロトン化及び脱プロトン化を受けることが多い。例えば、芳香族アミノ酸の電子付加は、水溶液中で生じた後、急速にプロトン化される。一方、アルコール類の照射によって生じるアルコキシ・ラジカルは、他のアルコール類分子から水素原子を抜き取るとともに新たなラジカルを生じる。また、多くの脂肪属ラジカルはチオール類から容易に水素原子を引き抜くので、逆にチオール類は脂肪属ラジカルを生成する分子に対して保護効果を示す。一方、分解反応を起こしうるものとしては炭水化物があり、別の炭水化物分子から水素原子を引き抜くことも可能であり、連鎖反応をもたらす。有機ラジカルは2重結合に付加する可能性は小さいが、酸素と反応しやすく、しばしば過酸化ラジカルを生成し、不飽和脂質で重要な問題となることがある。

食品の放射線分解生成物の多くは脂質からのものであり、タンパク質は放射線に対し比較的安定である。脂質の場合は水分解ラジカルの寄与よりも分子鎖内に生成したラジカルによる反応が中心であり、自動酸化反応、分子内結合反応、脱炭酸反応、脱水素反応などが起こる。タンパク質の場合は水酸基ラジカルと水素ラジカルによる水素引き抜き反応と還元的脱アミノ反応が起こりやすい。球状タンパク質では架橋反応により高分子タンパク質が生成することもある。低分子糖類は水分解ラジカルとの反応により有機酸類やアルデヒド類、ケトン類を生成し、多糖類は低分子糖類を生成しやすい。

4) 実際の食品中のラジカル

照射の結果、食品中にフリーラジカルが生じ、化学的変化が起こることは明白である。しかし、一般にラジカルは極めて寿命が短く、水分の多い食品では照射後0.001秒以内に消滅する。長寿命ラジカルは骨、表皮、種などの水分が少ない部分に存在している。しかし、このような安定ラジカルも咀嚼などの過程で水と接触すると0.01秒以内に急速に消滅する。なお、フリーラジカルは不飽和脂質などでは可視光線や紫外線照射、加熱調理などでも簡単に生成され、ポテトチップなどからはフリーラジカルが多く検出される。

2. 過酸化物の生成

食品照射による過酸化物で問題となるのは、脂質の過酸化物であろう。飽和脂肪酸エステルと不飽和脂肪酸エステルの照射による過酸化物の生成では明らかに不飽和脂肪酸エステルの方が大きい。過酸化物は放射線を照射しなくとも脂質などの酸化劣化で生成し、食品の劣化を知るのに過酸化物価として調べられている。放射線で食品中に生成す

る過酸化物はppmレベルであり、水存在下で分解するため人体への危険性はない。天然の脂質を照射した時に生成する過酸化物の量は脂質の組成や照射の条件によって大きく変化する。すなわち、酸素存在下で大線量照射すれば過酸化物は多く生成するが、1kGy以下の生鮮食品の照射や乾燥下、凍結下、脱酸素下での10kGy以上の照射でも過酸化物の生成はわずかであろう。

参考文献

- 1)P. S. Elias and A. J. Cohen (Ed.) : Radiation Chemistry of Major Food Components, Elsevier, 1977.
- 2)W. W. Nawar : Volatiles from food irradiation, Food Reviews International, 2, 45 ~ 78(1986).
- 3)中山 勉、児玉昌彦：発癌・制癌と活性酸素、化学と生物、23、771 ~778 (1985)。
- 4)S. Uchiyama and M. Uchiyama : J. Food Sci., 46, 113 (1981).

1. 残留農薬

有機塩素系化合物などの農薬は食品中に微量に残留しているが、放射線によって起こる反応は主に水和電子 (e_{aq}^-) と水酸基ラジカル ($\cdot OH$) によって起こる脱塩素反応や脱臭素反応である。放射線によって起こる化学反応は塩素や臭素を解離しやすく、解離したこれらのハロゲン元素は水和電子や水酸基ラジカルを消滅させる働きがある。従って、解離した塩素や臭素が食品成分と反応する可能性はほとんど考えられない。ところで、有機塩素系化合物などの農薬は有機溶剤や水溶液中では放射線で比較的分解しやすいが、食品中では分解しにくい。例えば、DDTを水溶液中で照射すると表25-1に示すように3kGyで5%分解する。PCBもDDTと類似しており、水溶液中での分解活性は 3.8×10^{-6} または $5.4 \times 10^{-6} (\text{mol L}^{-1}) / \text{kGy}$ である。有機塩素系化合物の殺虫剤であるBHCは水溶液中でも放射線に安定であり、3kGy照射しても0.3%しか分解しない。デイルドリンやアルドリンなども放射線に安定である。

表25-1 水溶液中の殺虫剤に3kGy照射後の分解率、%

殺虫剤	分解率	分解活性 ($\text{mol L}^{-1}) / \text{kGy}$
パラチオン	20	8.5×10^{-6}
BHC	0.3	3.4×10^{-7}
デイルドリン	0.7	9.7×10^{-7}
DDT	5	4.6×10^{-6}
バラコート	17.8	6.5×10^{-5}
メチルパラチオン	0.5	1.2×10^{-5}
マラチオン	1	5.1×10^{-6}

有機リン酸化合物のパラチオンやマラチオンなどは射線で分解されやすいものもあれば分解しにくいものもあり、水溶液中では3kGyで0.5~20%分解する。

一方、実際の食品中ではBHCやDDTは40~80kGy照射してもほとんど分解しないと報告されている。他の報告でも、25~48kGy照射しても各種殺虫剤は非照射に比べて変化しなかったと述べている。

一方、照射した農薬類の毒性評価の研究はほとんど行われていない。ことに、動物を用いた長期飼育試験は全く実施されていない。DDTをステアリン酸トリグリセライドと1:2の割合で混合して、280kGy照射して、ラットに与えた。その結果、死亡計数LD50に非照射群と照射群で差が認められなかったと報告されている。また、100ppb濃度のPCB水溶液を100kGy照射して非照射したものとエビの飼育効果を比較したところ、100kGy照射ではPCBが92%分解されたため毒性が大幅に低減したと

の報告もある。事実、25～48kGy照射しても農薬の残存量はほとんど変化しないことから、照射による毒性は増加しないと結論することができる。

2. 食品添加物

食品添加物に対する放射線照射の影響については原子力特定総合研究で実施された水産ねり製品での結果がある。

カマボコ中の調味料のイノシン酸水溶液に γ 線を10kGy照射すると63%が分解したのに対し、カマボコ・ホモジネート中ではほとんど分解しなかった。そして、食品成分のタンパク質や脂肪酸類等にイノシン酸に対する保護効果が認められた。なお、イノシン酸添加したカマボコを108kGy照射して分解生成物抽出物の変異原性を調べたが、陰性であった。

カマボコに添加されるトリポリリン酸、ポリリン酸、ピロリン酸は照射に対して安定であり、水溶液中でも安定であった。

カマボコ中のグルタミン酸は照射によってわずかに減少する程度であり、ソルビン酸カリウムは3kGy照射後に20℃で25日貯蔵した場合に33%減少した。しかし、カマボコ中では放射線に安定であった。また、ウインナソーセージの研究では硝酸塩や亜硝酸塩は5kGy照射で変化しなかったと報告されている。

以上のように、食品中の食品添加物は食品成分による保護効果等により分解が少ないことがわかる。

参考文献

- 1) F. L. Lepine : Effects of ionizing radiation on pesticides in a food irradiation perspective, J. Agric. Food Chem., 39, 2112 - 2118(1991).
- 2) S. Bachman and J. Gieszczyńska : Effect of gamma irradiation on pesticides residue in food products, Agrochem. ; Fate Food Environ., Proc. Int. Symp. IAEA and FAO, Rome, IAEA-SM-263/19 p. 313 - 315, 1982.
- 3) 浜田盛承、他：水産大学校研究業績、30、39(1981)。
- 4) 石崎睦雄、他：食衛誌、16(4)、230(1981)。
- 5) 食品照射研究運営会議：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）、昭和60年。

1. 細胞毒性

米国等での食品照射反対運動では1969年にSchubertが報告した総説「照射食品及び食品成分の変異原性と細胞毒性」を反対運動の論拠の一つに用いている。この総説では1%糖含有培養液等を照射すると微生物や植物細胞、哺乳動物細胞、原生動物細胞に対して細胞毒性や変異原性を示すと述べている。

わが国では酒酵母菌や大腸菌、芽胞形成細菌の枯草菌を用いて1%糖培養液に γ 線を照射したものと蒸気滅菌したもので生育能に及ぼす糖分解物の影響が調べられている。糖培養液はグルコース10g、 NH_4NO_3 1g、 K_2HPO_4 1g、 NaCl 0.5g、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5gに蒸留水1Lを加え、pH7.4に調整したものとグルコース10g、ポリペプトン2g、 NaCl 0.5g、 K_2HPO_4 0.3gに蒸留水1L加え、pH7.4に調整したものを用意した。照射は通気瓶中で酸素を通気しながら γ 線を16kGy照射したものと溶存空気平衡下で16kGy照射したものを培養に用いた。酒酵母菌を30℃・ペプトン添加培養液中で振とう培養したところ、蒸気滅菌したものと比較して酸素通気照射したのも、溶存空気平衡下で照射したのも生育に差は全く認められなかった。一方、大腸菌2株を培養した場合にはペプトン添加の有無にかかわらず蒸気滅菌した培養液に比べ照射培養液での生育が若干抑制された。ことに、酸素通気下で照射した培養液での生育の抑制が明確に認められた。

枯草菌をペプトン無添加培養液で培養すると、蒸気滅菌したものでは菌の生育が認められたのに対し、照射培養液では両者とも生育が著しく抑制されるか、ほとんど認められなかった。この場合の培養液のpHは蒸気滅菌したもので6.4に対し、溶存空気平衡下照射で6.2、酸素通気下で6.0であった。一方、ペプトン添加培養液では蒸気滅菌したものでは生育が活発であったが、溶存空気平衡下照射や酸素通気照射では生育が明確に抑制され細胞毒性があるように推察された。この場合の培養液のpHは蒸気滅菌処理で6.8に対し、溶存空気平衡で6.6、酸素通気下で6.4に低下した。そこで、各処理培養液のpHを7.0~7.2に再調整してから培養したところ各培養液による生育に差は全く認められなくなった。このことは、枯草菌が他の菌種に比べpH変化に対して敏感なことを示し、大腸菌も比較的敏感であり、酵母菌は低いpHで生育が良好なことを反映している。枯草菌は化学物質の細胞膜透過性が高い菌であるが、pHを調整すれば生育に差が認められなかったことは、照射糖液に細胞毒性がないことを示している。また、グルコース以外にもキシロースとラクトースの培養液（処理前のpHは7.4）について蒸気滅菌と溶存空気平衡下照射によるpH変化を比較したところ、蒸気滅菌ではグルコースはpH低下が少ないが、キシロースではpH低下が6.0と著しく起こり、ラクトース

は照射グルコース培養液と同じ程度のpH低下であった。照射の場合には糖の種類による差は少なく、キシロースでもpHは6.7～6.8であった。照射または加熱によるpH低下は糖類が分解して主に有機酸に変わるためであろう。

2. 変異原性

川岸らはグルコースやフラクトース、サッカロースを30kGyまで照射すると弱変異原性を示す α -ジカルボニル化合物のグルコソソ、グリオキザール、マロンジアルデヒドが生成するが、その他の変異原性物質の生成も考えられると述べている。しかし、照射糖液の変異原性は野菜や果実ジュースで抑制されている。一方、祖父尼らはグルコース1%水溶液を10kGy照射してサルモネラ・タイフィムリウム変異株を用いたエームス試験、組織培養細胞による染色体異常試験、マウスによる小核試験で変異原性を調べている。その結果、グルコース照射溶液はエームス試験及び染色体異常試験で変異原性を示したが、ラット肝抽出物のS9混合液（肝臓をすりつぶしたもので、酵素反応で代謝活性化させることにより変異原性を誘導する化学物質の検出に用いられる）の添加で変異原性は減少または消滅した。一方、マウスを用いた小核試験では変異原性は認められなかった。また、照射グルコースにマンゴー果汁を加えると変異原性は完全に抑制されている。坂本らはマンゴーに1kGy照射してエームス試験で変異原性を調べたが陰性であった。

以上の結果から、高線量照射された糖液には弱い変異原性を示す物質が生成するが、果実抽出物の添加で変異原性は抑制され、照射果実では変異原性を示さないことが明らかとなった。また、動物個体を用いた実験では照射グルコースは変異原性を示さなかった。このことは、照射果実の健全性に問題がないことを示している。

参考文献

- 1) J. Schubert : Mutagenicity and cytotoxicity of irradiated foods and food components, Bull. Wld. Hlth. Org., 41, 873 ~ 904(1969).
- 2) 伊藤 均 : 照射糖培養液の微生物生育に及ぼす影響、食品照射、38、6 - 10(2003)。
- 3) 川岸舜朗、他 : 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、135 ~ 149、日本アイソトープ協会、1992年。
- 4) 祖父尼俊雄、他 : 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、150 ~ 181、日本アイソトープ協会、1992年。
- 5) 坂本京子、他 : ガンマ線照射スパイス・マンゴーの変異原性、食品照射研究委員会・研究成果最終報告書、204 ~ 211、日本アイソトープ協会、1992年。

1. 包装材の照射効果

食品包装材によって照射の前に密封すれば照射後の微生物や害虫汚染を防止できるだけでなく、脱酸素状態での照射も可能である。しかし、これらの包装材を食品照射で利用するためには、照射時の包装材の変化や安全性を解決しておく必要がある。ここでは、代表的な包装材について放射線照射の影響について考察する。

1) ポリエチレン

河村らの報告ではポリエチレンを50kGyまで照射すると酸化防止剤無添加材試料では10kGyで照射臭が若干生成し、50kGyで明確に認められた。揮発性物質としては2-ブタノン、2-プロパノール、2-メチル-2-プロパノール、酢酸、プロピオン酸等が照射により生成した。一方、酸化防止剤のBHTを添加したポリエチレンでは照射臭の発生は抑制される傾向が認められた。また、引っ張り強度は50kGyでも変化しなかった。色調は無添加試料では50kGy照射後も半透明で変化しなかったが、酸化防止剤を添加した試料では黄色味を帯びるようになった。しかし、臭いについては無添加試料では10kGyでは無視できるのに対し、BHT添加試料では非照射でもBHT臭が認められた。

2) ポリプロピレン

無添加剤試料では照射により多くの揮発性物質が生成したが10kGyでは照射臭は無視できる程度であった。ポリエチレンで検出される分解生成物以外に2-ペンタノン、4-メチル-2-ペンタノン、2,4-ペンタジオン等も検出された。BHTを添加すると揮発性物質の生成は抑制された。引っ張り強度はポリエチレンと対照的に大幅に低下し、10kGyでも破断が生じた。色調もBHT添加で黄色味を帯びた。

3) ポリスチレン

ポリスチレンは放射線に安定であり、照射による揮発性物質の生成も少なかった。引っ張り強度も50kGyでも低下せず、BHT添加試料でも照射による異臭の発生は無視できる程度であった。

4) 結論

以上の結果及び医療用具素材の照射による劣化試験の結果から、多くのプラスチック類は有害物質の生成がなく酸化防止剤の添加によって分解物の生成を抑制できることが明らかである。また、芳香族化合物系のプラスチック類は放射線に耐性の傾向がある。しかし、塩化ビニル製品やポリエチレンなどは15kGy以上の高線量照射で照射臭が生じ、それが食品に移行して食品による照射臭と誤解される可能性があり注意が必要である。また、セロファン-ポリエチレン包装材のように5kGy

以上の照射で通気性増大などの劣化を起こしやすいものもあるため使用条件に注意が必要である。しかし、一般の照射食品は10kGy以下のため多くの包装材は照射による影響はないであろう。香辛料などのように殺菌線量が10kGy前後では包装材は異臭発生など材質劣化の少ないものを選ぶ必要がある。ナイロン系の包装材は比較的異臭発生が少ないと思われる。

2. 米国の食品包装材の照射に関する規格・基準

米国では1977年に食品包装材の照射に関する規格、基準を定めており、以下の条件で製造、使用されるならば安全としている。

1) 線量は原則として1Mrad (10kGy) (使用できる包装材材料は下記のものに限定)

- ①硝化綿、又は、塩化ビニリデン共重合体を塗布した規格に適合するセロハン、
- ②規格に適合するグラシン紙、
- ③規格に適合するワックス塗布板紙、
- ④規格に適合するオレフィン基ポリマーから作られるポリオレフィンフィルム。但し、使用できる添加物は以下の物質に限られている。

クエン酸ナトリウム、ラウリル硫酸ナトリウム、ポリ塩化ビニル、エルシン酸アミド、リノレイン酸アミド、パルミチン酸アミド、ステアリン酸アミド、BHA、BHT、プロピオン酸カルシウム、プロピオン酸ナトリウム、石油ワックス、非晶性ポリプロピレン、ステアリン酸アルミニウム、ステアリン酸カルシウム、ステアリン酸マグネシウム、ステアリン酸カリウム、ステアリン酸ナトリウム、トリエチレングリコール、ミネラルオイル。

又、塩化ビニリデン以外にアクリル酸、アクリロニトリル、イタコン酸、アクリル酸メチル、メタクリル酸メチルを一つ以上使用した塩化ビニリデン共重合体が85%以上のコーティング材。

- ⑤未漂白硫酸パルプから作られるクラフト紙でロジンやミョウバンが使用されているもの。これは50krad (500Gy) 未満の照射の粉体の容器としてのみの使用に限られる。
- ⑥ポリエチレンテレフタレートフィルム。これに使用できる物質は、ポリオレフィンフィルムで使用が認められている物質、コーティング材並びにポリエチレンを使用したコーティング材。
- ⑦スチレン基ポリマーから作られるポリスチレンフィルム。このフィルムには適合する補助物質の使用が認められている。
- ⑧塩素含有量が30~32重量%の塩素系ゴム基ポリマー。但し、ヘプタンを用いる還流温度下で2時間抽出した場合の最大抽出分が2重量%である塩酸ゴム製フィルム。

⑨塩化ビニリデン含有量が70%以上の塩化ビニリデン・塩化ビニル共重合体。粘度の規格がある（0.50～1.50センチポイズ）。

⑩ナイロン11

2) 6Mrad (60kGy) 未満のγ線、又は、X線の照射を行なってもよい包装材は下記のものに限定。

①濃硫酸で処理し、中和後蒸留水にて完全に洗浄したしみ止めをしていない水薄紙から作られるセルロース材料で構成されるパーチメント紙。

②規格に適合するポリエチレンフィルム。

③規格に適合するポリエチレンテレフタレートフィルム。

④規格に適合したナイロン6フィルム。

⑤塩化ビニルが88.5～90.0重量%で酢酸ビニルが10.0～11.5重量%の基ポリマーで最大揮発性成分（105℃、1時間加熱）が3.0%を超えず、指定された方法による粘度が0.30センチポイズのフィルム。

なお、上記①～⑤までの指定補助物質としては以下の通りである。

エルシン酸アミド、リノレイン酸アミド、パルミチン酸アミド、ステアリン酸アミド、BHA、BHT、プロピオン酸カルシウム、プロピオン酸ナトリウム、石油ワックス、非晶性ポリプロピレン、ステアリン酸アルミニウム、ステアリン酸カルシウム、ステアリン酸マグネシウム、ステアリン酸カリウム、ステアリン酸ナトリウム、トリエチレングリコール、ミネラルオイルである。添加量は1%未満であり、非晶性ポリプロピレンは2%未満である。

参考資料：

- 1) 河村葉子、他：酸化防止剤含有ポリエチレン、ポリプロピレン及びポリスチレンに対するガンマ線照射の影響、食品照射、38、11～22(2003)。
- 2) FDA：Federal Resister, 42, p. 14635, 1977
- 3) 徳岡敬子、石谷考佑：日本食品工業学会誌、33(1), 70, 1986
- 4) 日本包装技術協会：“食品包装便覧”、p. 158, 1988
- 5) 食品包装法規研究会日報：“食品包装と衛生規格”日報、p. 365, 1989
- 6) 小野勇：放射線と産業、38, 4, 1987
- 7) 辻楠雄：医科機器学、57(1), 15, 1987
- 8) FDA：Code of Federal Resister, 21, ch. 1. p. 370～371. Apr. 1, 1987
- 9) Joint FAO/IAEA/WHO Study Group：High-Dose Irradiation, Wholesomeness of Food Irradiated with Doses above 10kGy, WHO Technical Report Series 890, Geneva, 1999.

米国FDAは放射線による分解生成物の内、10%が特有な分解生成物であるとしたにもかかわらず安全性試験なしに許可したが、その根拠について

米国陸軍での高タンパク質食品の放射線滅菌の研究で、牛肉を50kGy照射することにより63種類の放射線分解生成物が分離された。この分解生成物の内、23種類は加熱滅菌した対象試料からも分離された。米国FDA（食品医薬品局）は1kGyの照射で最大で30ppmの放射線分解生成物が生じ、63種類の10%が放射線特有の分解生成物と考え、6種類だけが非照射食品中から検出されないと判断した（1980年）。しかし、6種類の成分は他の食品揮発成分と似ていた。

その後の追試で、FDAは63種類の内、3種類（アンデシン、ペンタデカジエン、ヘキサデカジエン）だけが非照射食品中に認められないと評価した。しかし、米国陸軍は1981年の報告で、これらの化合物は非照射の牛肉や鶏肉などからも微量に検出され、照射により若干増加する程度であると述べている。また、WHO専門家グループの見解では、これらの化合物は非照射食品中に多く存在する化合物より炭素数が1個少ない化合物であり、非照射食品中にも微量に存在すると述べている。

しかし、FDAは1kGyの照射で放射線に特有の分解生成物は合計3ppm生成すると仮定し、食品の天然の成分はppmレベルでは十分に潜在的毒性を検出できないと考えた。しかも、放射線特有の分解生成物は既知の食品成分に似ており、毒性的にも類似していると判断された。従って、このような線量域での照射食品は動物による毒性試験を行わなくても人間の消費にとって安全であるとFDAは判断し、1986年に1kGy以下の照射食品と食事に占める照射食品の比率が0.01%以下の香辛料類について30kGyまで無条件で許可を下した。

照射食品の揮発性成分の分解生成物の分析結果は、放射線による化学反応が特有なものでないことを示している。脂質やタンパク質による反応で二量体や架橋反応物が生成することがある。しかし、これらの反応生成物は酵素による加水分解で分解される。現在では、放射線特有の分解生成物としては脂質から生成される2-アルキルシクロブタノン類が問題にされているが、変異原性は認められておらず、生成量も極微量で鶏肉を59kGy照射しても約 $1.7\mu\text{g}/\text{g}$ にすぎない。

一方、FDAは1982年までの入手可能な毒性試験の報告400件以上について評価を行った。この評価では線量が記載してないとか、試験動物数が少なすぎるとか、非照射の対象がなかったなど不適切な試験結果は除外された。そして、適切な試験結果からの評価に基づき、90日間の亜慢性毒性試験、3世代の繁殖試験、300～999日間の慢性毒性試験のいずれでも3～93kGy照射した食品での異常は認められなかったと結論している。また、1984年には59kGy照射された鶏肉の毒性試験の結果がFDAから報告され、健全性に問題のないことが明らかにされた。なお、オランダでも37または

74kGy照射された豚肉製ハムの繁殖試験や3または6kGy照射された鶏肉の慢性毒性試験でも動物に対する異常は認められなかったと報告されている。ハンガリーでは15kGy照射した混合香辛料等を飼料中に25%加え、ラットを14日間飼育した結果でも催奇形性や体重増での照射の影響は認められていない。

参考文献

- 1)FDA : Recommendation for evaluating the safety of irradiated foods, Final report, Washington, DC, July 1980.
- 2)C. Merritt, Jr. : Radiolysis compounds in bacon and chicken, Final report, Natick, 1982.
- 3) Joint FAO/IAEA/WHO Study Group : High-Dose Irradiation ; Wholesomeness of Food Irradiated with Doses above 10kGy, WHO Technical Report Series, Geneva, 1999.

照射による病原性微生物(腸管出血性大腸菌、サルモネラ等)の突然変異(毒性、耐放射線性、耐熱性増大等)の可能性について

1. 放射線の生物に対する作用

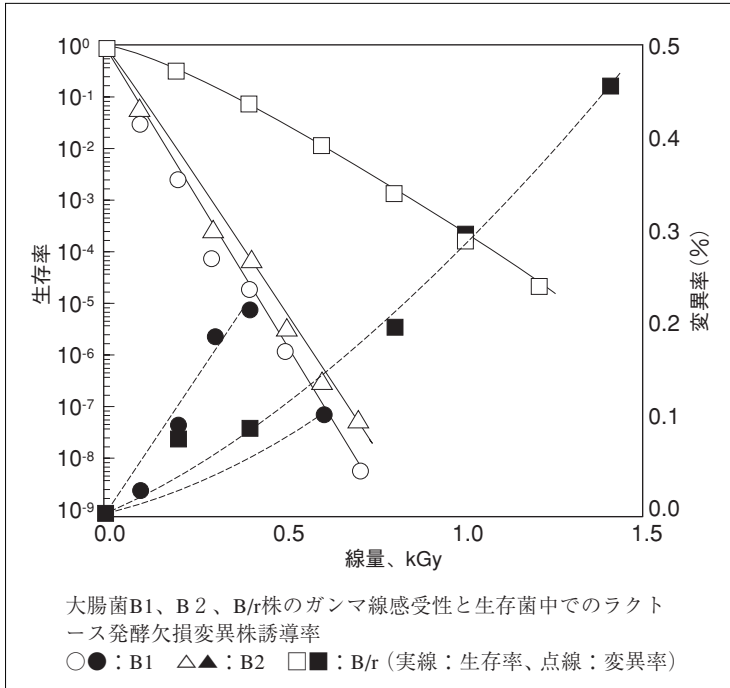
放射線の生物に対する作用は紫外線と類似しており、遺伝子、即ちDNAの損傷を引き起こす。紫外線の場合にはDNA鎖の損傷は構成塩基の一つであるチミンが二量体化することが主に原因しているが、放射線の場合には水の放射線分解で生じる水酸基ラジカル($\cdot\text{OH}$)などの活性酸素等の間接作用によるDNA鎖切断が主に関係している。放射線によって起こるDNA損傷のほとんどは1本鎖切断であるが、その多くは一連の酵素系によって容易に修復される。しかし、2本鎖の同じ部分が同時に損傷を受けると修復の不完全または失敗が起こりやすくなり細胞分裂能が失われたり、DNAを構成する塩基の一部が欠失または他の塩基と入れ替わることによる突然変異を引き起こす。しかし、突然変異の比率は著しく小さく、その大部分は細胞分裂能が失われることによる細胞死である。また、微生物の場合には突然変異が起こったとしても細胞内での自動的なDNAの組み替えにより元にもどることが多い。なお、微生物の突然変異は薬剤処理や紫外線、凍結乾燥、加熱処理でも起こることがわかっている。

2. 微生物に対する突然変異

食品を放射線で処理する場合、生き残った微生物等が突然変異によって病原菌などの有害菌に変わったり、薬剤耐性菌と同じように放射線に耐性となるかどうかを明らかにしておく必要があった。放射線により誘発される突然変異のほとんどは紫外線やアルキル試薬などの作用と同様にDNAの修復ミスによる欠損変異であり、巨大細胞が出現したり、異なった種類の新たな遺伝子が誘導される可能性はほとんどない。すなわち、遺伝子操作のように外部から新しい遺伝子を取り入れることによる変異とは異なり、遺伝子の一部が欠損または置換することによる変異である。大腸菌について γ 線と紫外線による乳糖発酵能欠損変異誘発について調べたところ、両者とも突然変異誘発率は大差がなく図29-1に示すように生存率が 10^{-6} 程度の線量でも0.01~0.5%であった。また、アミノ酸合成欠損変異も同程度誘発されたが、変異の多くは不安定で簡単に変異前の状態にもどってしまった。

一方、サルモネラ・タイフィムリウム(ネズミチフス菌)を生存率 10^{-6} 程度になるまで照射して、生き残った菌を再培養して5回繰り返して生存率 10^{-6} 程度になるように照射したが、放射線耐性は増加しなかった。さらに、照射を繰り返すと一部の細胞が放射線に耐性となったように見えたが、これは単細胞が分裂能を失って菌糸状になったために起こった現象であり、これらの菌体を照射せずに繰り返し植え継ぐことにより菌糸状細胞は消失し放射線感受性も元にもどった。また、6回以上の繰り返し照射を行う

図29-1 放射線による大腸菌の突然変異発生率



と栄養要求性変異株が増加したが、サルモネラの血清型(分類のための指標)は変化しなかった。Davisらもサルモネラ・タイフィリウムを84回繰り返し照射したが同じような結果を得ている。

ボツリヌス菌について照射後の毒素産生促進効果を調べたが、促進効果は認められなかった。また、腸管出血性大腸菌の多くの分離株について照射後のベロ毒素産生効果を調べても促進効果は認められなかった。

アフラトキシンなどのカビ毒を産生する糸状菌(カビ)を照射すると産生量が2~3倍に増加する変異株も出現することがあるが、変異株の90%以上は毒素産生能が低減するか失われてしまう。毒素産生能が増大する変異株の出現は1~5%程度であり、産生能が増大した変異株も純粋分離しないで植え継ぐと毒素産生能は変異前と同じ程度に低下してしまう。酒酵母菌を照射すると発酵能を失った小コロニーが約1%出現することがあるが、生存競争に勝てず死に絶えてしまう。ウイルスの場合も放射線によるDNA型またはRNA型ウイルスの損傷は紫外線と類似しており、ウイルスの病原性が変化する可能性はほとんどない。昆虫や植物の場合にも放射線による突然変異は生存競争力が弱い劣性変異が圧倒的に多い。

3. 放射線耐性の誘導

放射線に比較的抵抗性の強いサイクロバクター（旧モラクセラ-アシネトバクターまたはアクロモバクター）について放射線抵抗性株の粗DNAを1/6程度の放射線感受性変異株に転移させたが、アミノ酸合成能等の遺伝子は転移したが放射線耐性の増加は認められなかった。このことは、放射線耐性の遺伝子が他の微生物に移行することは自然界では簡単には起こり得ず、薬剤耐性菌のプラスミドが他の菌に移行する現象とは異なっていることを示している。一方、抗生物質耐性菌などの放射線感受性は非耐性菌と同じか高感受性であり、照射による抗生物質耐性変異株の出現もない。

放射線抵抗性細菌としてデイノコッカス・ラジオジュランスやメチロバクテリウム・ラジオトレランス（旧シュウドモナス・ラジオリ）などが知られているがこれらの菌は突然変異で誘発されたものではない。また、これらの菌は病原性がなく毒素産生能もなく、一般細菌に比べ増殖が遅く食品の腐敗力も弱い。酵母菌でも黒酵母菌やトリコスポロン・オリゼなどが放射線抵抗性菌として知られているが、植物寄生菌であり食品の腐敗にはあまり関与していない。

芽胞細菌などを1kGy以上照射すると耐熱性が低下するが、生残菌を再培養すると耐熱性は元にもどる。

以上のように微生物等を照射しても残存菌等に突然変異による病原性誘導や毒素産生の促進、放射線耐性増大、薬剤耐性増大、耐熱性増大が誘導されることはない。

参考文献

- 1) H. デルデインガー、H. ユング（代谷次男、天笠淳平訳）：放射線生物学、東京大学出版会、1974。
- 2) 瀧上真智子、伊藤 均：Escherichia coliのガンマ線および紫外線感受性と突然変異誘発について、食品照射、30、11～16(1995)。
- 3) 伊藤 均、他：繰り返し照射によるSalmonella typhimuriumの放射線抵抗性の誘導、食品照射、24、12～15(1989)。
- 4) R. Davies and A. J. Sinskey：Radiation-resistant mutants of Salmonella typhimurium LT2；Development and characterization, J. Bacteriol., 113, 133～144(1973)。
- 5) H. Ito and H. Iizuka：Genetic transformation of Moraxella-like psychrotrophic bacteria and their radiation-sensitivity, Agric. Biol. Chem., 47, 603～605(1983)。
- 6) 伊藤 均、他：Aspergillus parasiticusとAspergillus flavusのアフラトキシン産生に及ぼす低線量照射の影響、食品照射研究委員会・研究成果最終報告書、235～244、日本アイソトープ協会、1992年。
- 7) 小崎俊次、坂口玄二：ボツリヌス菌芽胞に対するガンマ線照射の影響、食品照射研

- 究委員会・研究成果最終報告書、224 ～ 234、日本アイソトープ協会、1992年。
- 8) 菊池 祐、伊藤 均：低線量照射による微生物毒素産生能の変化に関する研究、ペロ毒素を産生する腸管出血性大腸菌 *Escherichia coli* O17:H7 に及ぼす影響、食品照射、36、23 ～ 25(2001)。
- 9) 伊藤 均：薬剤耐性細菌の放射線殺菌効果、食品照射、41、9 ～ 13(2006)。
- 10) H. Ito, et al. : Isolation and identification of radiation-resistant cocci belonging to the genus *Deinococcus* from sewage sludges and animal feeds, *Agric. Biol. Chem.*, 47, 1239 ～ 1247(1983).
- 11) H. Ito and H. Iizuka : Taxonomic studies on a radio-resistant *Pseudomonas*, *Agric. Biol. Chem.*, 35, 1566 ～ 1571(1971).
- 12) H. Ito, et al. : A new radio-resistant yeast of *Tricosporon oryzae* nov. sp. isolated from rice, *Agric. Biol. Chem.*, 38, 1597 ～ 1603(1974).
- 13) J. W. Drake (鈴木けんし監訳) : 突然変異の分子生物学、丸善株式会社、1973年。
- 14) M. Isldar and G. Bakale : Radiation induced mutagenicity and lethality in Ames tester strains of *Salmonella*, *Radiation Research*, 100, 396 (1984).
- 15) 伊藤 均：照射細菌芽胞の耐熱性変化、食品照射、36、1 ～ 7(2001)。

照射食品での微生物相変化による
ボツリヌス菌芽胞等の生残と繁殖の可能性について

食品照射は、根茎野菜の発芽防止や果実及び穀類等の殺虫などを目的とした低線量照射、殺菌による衛生化や貯蔵期間延長を目的とした中線量照射、缶詰と同じ完全殺菌を目的とした高線量照射に分類することができる。

1kGy以下の低線量照射では殺菌効果はほとんど期待できないので微生物相変化は起こらない。また、高線量照射では完全殺菌のため微生物相変化は関係ない。一方、中線量照射は菌数低減による衛生化を目的とした病原菌の殺菌や貯蔵期間延長を目的としており、必要線量は10kGy以下であり、微生物相変化が問題になる。しかし、生鮮肉類や魚介類の10kGy以下の放射線殺菌は低温貯蔵との組み合わせが多い。低温貯蔵で肉類や魚介類の腐敗に関与する微生物は主にシュウドモナス、フラボバクテリウム、マイクロコッカス、アシネトバクター、乳酸菌類、サイクロバクター（旧モラクセラアシネトバクターまたはアクロモバクター）などの腐敗性細菌群と数種類の腐敗性酵母菌類である。例えば、鶏肉等を照射するとシュウドモナスやフラボバクテリウム、マイクロコッカス、アシネトバクター、大腸菌群など多くの腐敗性細菌や病原菌は2~3kGyで菌数が急減し、腐敗性酵母菌や乳酸菌群も4~6kGyで菌数が著しく低減する。これに対して、放射線に比較的抵抗性の強いサイクロバクターは10kGy以上でも生残するが、低温で増殖する腐敗菌であり病原性はない。鶏肉等を1~3kGy照射して10℃で貯蔵すると非照射では増殖してくるシュウドモナス等の腐敗性細菌や大腸菌群の増殖がなくなり、主にサイクロバクターや腐敗性酵母菌が増殖してきて貯蔵期間も2~5倍延長される。なお、サルモネラやカンピロバクター、腸管出血性大腸菌、腸炎ビブリオ菌、エロモナス菌、コレラ菌、黄色ブドウ球菌、リステリア菌などの非芽胞形成細菌は1~3kGyで殺菌されるため、1~5kGy照射された肉類や魚介類を10℃以下で貯蔵する限り食中毒の発生は起こらないであろう。

一方、食肉加工品や魚肉加工品では香辛料等の添加物からの汚染微生物の影響が出ることがある。例えば、保存料無添加のウインナーソーセージでも製造条件によっては耐熱性食中毒菌で有芽胞細菌のセレウス菌が10℃の保存条件で非照射品に増殖することがある。有芽胞細菌は放射線に耐性のため10kGy以下では生き残ると思われるが、ウインナーソーセージを3kGy照射するとセレウス菌は増殖しなかった。また、カマボコでも3kGyでセレウス菌などの有芽胞細菌の増殖が抑制される傾向が認められている。この原因はセレウス菌等の芽胞の放射線損傷が低温では修復されにくいためであろう。一方、20℃貯蔵では3kGy照射でもセレウス菌の増殖が急速に起こった。食中毒菌の有芽胞細菌のボツリヌス菌やウエルシュ菌なども中線量照射した食肉加工品や魚介類に増殖してくる可能性があるが、10℃以下の低温貯蔵と組み合わせれば増殖は抑制されるであ

ろう。なお、芥子レンコン事件のように真空パックを過信して管理が悪いために起こったボツリヌス中毒のような事故が照射食品でも起こる可能性はあるが、3kGyの放射線殺菌ではボツリヌス菌芽胞の90%以上は殺菌されるため、10℃以下の低温貯蔵と組み合わせるかぎり、その可能性は低いと思われる。

乾燥食品の場合にはアスペルギルス属やペニシリウム属の好浸透圧性糸状菌（カビ）類によって腐敗が起こるが、照射によって毒素産生の糸状菌類が優先的に生残することはなく、水分含量を12%以下と少なめに維持して2~5kGy照射すれば糸状菌の発生を抑制できるであろう。

放射線殺菌処理と同じような微生物相変化は100℃での加熱調理でも起こる。この場合も、有芽胞細菌のセレウス菌やボツリヌス菌等が選択的に生き残り、管理が悪いと食中毒を起こす可能性がある。肉製品や魚肉製品等にはソルビン酸塩や亜硝酸塩等の保存料を添加することが多いが、貯蔵中に微生物相変化が起こり、主に乳酸菌群と腐敗性酵母菌が増殖してくる。しかし、保存料は特定の微生物群を抑制するが、一方では摂食後に腸内細菌に悪影響を与える可能性がある。すなわち、個人差はあるが糞便1g当たりで約1,000億個、100種類の腸内細菌のバランスに悪影響を与えたり、人体に悪影響を与える可能性がある。

参考文献

- 1)H. Ito and T. Sato : Changes in the microflora of vienna sausages after irradiation with gamma-rays and storage at 10℃, Agric. Biol. Chem., 37, 233 ~ 242(1973).
- 2)P. Yutapong, D. Banati and H. Ito : Shelf life extension of chicken meat by γ -irradiation and micoflora changes, Food Sci. Technol., Int., 2(4), 242 ~ 245(1996).
- 3)M. L. Juri, H. Ito, et al : Distribution of microorganisms in spices and their decontamination by gamma-irradiation, Agric. Biol. Chem., 50(2), 347 ~ 355(1986).
- 4)相磯、他：食品衛生学、朝倉書店、1966。

1. カビ毒の問題

食料・飼料の汚染微生物である糸状菌（カビ類）の中には、生物の生育に障害性を示す生理活性物質を産生する特定の菌株がある。これら有毒2次代謝産物200～300種類を総称してカビ毒（Mycotoxin）と呼んでいる。しかし、食品衛生上重視されているカビ毒は、実際に家畜・家禽等に何らかの障害を示すとか、疫学的にヒトへの急性あるいは慢性毒性が明らかにされたものを指している。カビ毒のヒトを含む動物への障害は肝臓毒、腎臓毒、神経毒、皮膚炎物質等や繁殖障害、消化管機能障害、造血機能障害、免疫機能障害等と多様であるが、化学構造の相関は見られない。

過去に世界的に食生活を通じて発生したカビ毒症の主なものは、麦角中毒、食中毒性無白血球症、麦の赤カビ中毒、黄変米による肝臓障害、光過敏性皮膚炎、アフラトキシン肝臓がん等がある。特に、アフラトキシンは実験動物フッシャー系ラットにおける強力な経口発癌性を示している。すなわち、飼料中にアフラトキシンB₁を1ppm投与すると10%、50ppmで75%、100ppmで100%発癌している（アフラトキシンにはB₁、B₂、G₁、G₂等16種類がある）。

アフラトキシン産生菌はアスペルギルス・フラバスまたはアスペルギルス・パラシチカスの一部の菌株であり、水分含量が20%以上、30℃前後で増殖しやすい。主に、熱帯または亜熱帯地方の米、トウモロコシ、落花生、ピスタチオナッツ、香辛料などで生育してアフラトキシンを産生する。一方、温帯地方でもアスペルギルス・ベルシコウラが産生する弱い発癌性のステリグマトシスチンが15%以上の水分含量の米などに蓄積することがある。

2. アフラトキシン産生の促進効果

アスペルギルス・フラバスに低線量の放射線を照射するとアフラトキシンの産生を促進する作用があるとの報告がインドから出されたことがあった。すなわち、アフラトキシンを産生する菌株を蒸気滅菌した小麦に接種した後でγ線を0.5～2.5kGy照射して培養すると、非照射に比べてアフラトキシン産生量が1.5～2.0倍増加すると報告した。この報告は国際的に大きな問題となり、糸状菌の孢子接種量説や突然変異説などが出されたが明確な結論は出されなかった。わが国での研究では蒸気滅菌された白米や黒コシヨウ、赤トウガラシにアフラトキシン産生株を接種してからγ線を1kGy照射すると、アスペルギルス・パラシチカスでは非照射に比べアフラトキシンB₁、G₁産生量が赤トウガラシ、黒コシヨウ、白米の順に1.2、1.7、1.9倍に増加し、アスペルギルス・フラバスでは1.1、1.3、1.4倍に増加した。これらの結果は赤トウガラシでアフラトキ

シン産生量の増加が照射試料で少ないことから、澱粉の低分子化等の成分変化が関係していることを示している。このことは、5kGy照射した白米を用いてアスペルギルス・フラバスを照射せずに接種・培養した場合のアフラトキシン産生量が非照射米に比べて2.8倍に増加したことから明らかである。一方、アフラトキシン産生株を蔗糖を多く含む液体合成培地に接種してからγ線を0.05～1.2kGy照射すると低線量の0.05kGyで刺激効果によりアフラトキシン産生量が約1.5倍に増加したが、0.4kGy以上では産生量が低減している。低線量でアフラトキシン産生量が増加するのはホルミシス効果によるものであり、紫外線などの物理作用でも起こる現象であり、次世代には継続されないことも確認されている。また、ホルミシス効果は不安定であり、繰り返し実験を行っても再現性が得られにくく、アフラトキシン産生量が0.05kGyでも非照射と大差ない場合もある。なお、黒コショウや赤トウガラシでのアフラトキシン産生量は白米に比べ0.01～0.4%と低い傾向にある。

3. カビ毒の放射線による分解効果

食品内に産生されたアフラトキシン等のカビ毒は放射線に対して非常に安定で、半乾燥または乾燥条件下で100kGy以上照射してもほとんど分解せず、蒸留水中では10kGy程度で分解可能なことが報告されている。従って、カビ毒で汚染されてしまった食品類を放射線処理で除去することは不可能である。

アスペルギルス・フラバス群等のカビ毒産生菌は一般のアスパルギルス属やペニシリウム属と放射線感受性は似ており、2～5kGyで殺菌され、貯蔵・流通中の繁殖を防止することが可能である。香辛料の多くは熱帯または亜熱帯地域で生産されているため、アフラトキシン産生菌やオクラトキシン産生菌が多く検出され、微量の汚染ながらアフラトキシン等のカビ毒汚染が問題になっている。香辛料を添加した2次加工品の流通・貯蔵時にはカビ毒産生菌が増殖してカビ毒汚染が起こる可能性があり、香辛料をあらかじめ殺菌しておくことが食品衛生上重要である。

参考文献

- 1) H. Ito, et al. : Effect of storage studies of microorganisms on gamma-irradiated rice, *Cereal Chem.*, 48, 140 ~ 149(1971).
- 2) 粟飯原影昭、矢野信礼：食品衛生の微生物、朝倉書店、1970。
- 3) T. Kume, H. Ito, et al. : Radiosensitivity of toxigenic *Aspergillus* isolated from spices and destruction of aflatoxins by gamma-irradiation, *Radiat. Phys. Chem.*, 34(6), 973 ~ 978(1989).
- 4) H. Ito, et al. : Identification of osmophilic *Aspergillus* isolated from rice and their radio-sensitivity, *Agric. Biol. Chem.*, 37(4), 789 ~ 798(1973).
- 5) M. L. Juri, H. Ito, et al : Distribution of microorganisms in spices and

their decontamination by gamma-irradiation, Agric. Biol. Chem., 50(2), 347 ~ 355(1986).

- 6) H. Ito, et al. : Aflatoxin production by microorganisms of the *Aspergillus flavus* group in spices and the effect of irradiation, J. Sci. Food Agric., 65, 141 ~ 142(1994).
- 7) E. Priyadarshini and P. G. Tulpule : Effect of graded doses of γ -irradiation on aflatoxin production by *Aspergillus parasiticus* in wheat, Food & Cosmetics Toxicology, 17, 505 ~ 507(1979).
- 8) G. E. Mitchell : Influence of irradiation of food on aflatoxin production, Food Technology in Australia, 40, 324 ~ 326(1988).
- 9) 伊藤 均、他 : *Aspergillus parasiticus* と *Aspergillus flavus* のアフラトキシン産生に及ぼす低線量照射の影響、食品照射研究委員会・最終成果報告書、235 ~ 244、日本アイソトープ協会、1992年。

照射食品等による実験動物の
長期飼育試験（3世代を超える）の結果について

原子力特定総合研究で指定された7品目（馬鈴薯、タマネギ、米、小麦、ウインナーセージ、水産練り製品、温州ミカン）と旧厚生省が行った1kGyの γ 線を照射したグループフルーツについて、マウスによる3世代（親、子、孫の他、ひ孫）にわたる試験を実施した。その結果、各世代について、一般状態、体重、摂餌量、繁殖生理値（交配率、妊娠率及び妊娠末期胎児の性別、体重、外形異常等）、新生子の離乳時の検査（生存率、陪検所見及び臓器重量等）並びに胎仔、新生子の骨格を検査し、3世代にわたる影響について検討したが、照射食品によるとみられる悪影響は認められなかった。

3世代を越える飼育試験は実施されていないが、その理由は各国の食品添加物、薬剤、化学物質等の安全性試験のガイド・ラインの多くが2世代試験で十分なためである。

近年、動物実験の分野では無菌（Specific Pathogen Free = SPF）動物が多用されており、飼育環境の中に病原性微生物を持ち込む危険性を防ぐため、放射線滅菌（ ^{60}Co の γ 線滅菌）が用いられている。その理由は、滅菌方法として以前から用いられていた高圧蒸気滅菌に比べて、放射線滅菌は栄養素の損耗や嗜好性的変化が少なく、実験動物の繁殖成績及び成長発育が良好なためである。

放射線滅菌飼料を実験動物の分野で利用する際の研究で3世代以上にわたる試験としては、Leyらの25kGy照射した飼料をラットに5年間にわたる繁殖試験、Richardsonらによる27.9kGy照射飼料をラットで4世代にわたる飼育及び繁殖試験、岩藤らによる30及び60kGy照射飼料による3世代試験等の報告がある。これらの報告では、飼育や繁殖に照射による悪影響は認められていない。

わが国でも実験動物用飼料の放射線滅菌が実用化されて約40年になるが、大手実験動物生産業者では、SPF動物を生産する親種として無菌動物を維持しているが、現在の世代数はマウスで60世代以上、ラットで30世代以上となっている。なお、これらの親種の無菌動物の飼育には50kGyの滅菌飼料が用いられている。ラットやマウスなどの世代交代は短期間に進むため、30～60世代が100%放射線処理された飼料で繁殖して悪影響がないことも照射食品の安全性を証明する証拠になっている。

参考文献

- 1)〔独〕日本原子力研究開発機構：食品照射データベース、
<http://takafair.taka.jaeri.go.jp/>。
- 2)F. J. Ley, et al : Sterilization of laboratory animal diets using gamma radiation, Lab. Anim., 3, 221 ~ 254(1969)。
- 3)L. R. Lichardson and R. Brock : The nutritional value of a synthetic diet

sterilized by gamma rays, as measured by reproduction and life span of rats, J. Nutrition, 65, 353 ~ 360(1958).

4)岩藤誠吾、他：実験動物、19、77 ~ 81(1970)；21、189 ~ 204(1972)。

(参考：「毒性試験法の解説」抜粋：化学工業日報社編)

3.多世代試験の概要：

多世代試験は雄及び雌動物に被験物質を2世代以上にわたり哺乳動物に投与し、親世代の生殖能力及び次世代を含む後世代の発生に及ぼす有害作用を明らかにしようとするものである。

この試験のものは、古く1949年に米国で化学物質を3世代にわたり飼料に混ぜて影響を見ようとする事が提唱された事に始まる。1959年に米国FDAで試験方法の指針がだされたが、それ以降3世代にわたり被験物質を投与し、各々の世代で第1産仔ではなく第2産仔を次世代を得るための交配に用い、第3世代第2産仔の検索をもって終了する3世代2産仔試験が主流であった。

その後、この方法の簡便化が提唱され、2世代でしかも第1産仔を交配する2世代1産仔試験が各国で行なわれるようになった。第2産仔は第1産仔より一般に発生が安定している、第1産仔より感受性が高い、又、第1産仔と第2産仔の二つの試験成績を比較する事ができる等の利点があげられよう。しかし多くの多世代試験の成績の評価から、ほとんどの場合有害反応は第2世代までに示されているという報告もある。又、被験物質の蓄積性が大きいものを除いて、経験上第1産仔を用いて十分な情報が得られると考えられている。

本試験指針で提唱されている試験法は、スクリーニングとして比較的短期で行ないうる2世代1産仔試験をあげているが、本試験法Ⅳ-5 (p.165) に述べられているように、第2産仔以降を得るためにF₀及びF₁の交配を繰り返し行なう検査又は、F₂について性成熟期以降の長期間観察、更には、F₃を得るため交配と生殖能の検査を行なう事が必要に応じ施行されるべきであろう。なお、多世代試験は一般に生殖・発生について何かが悪いという事をおおよそを知る1次のスクリーニング試験であり、更に何がどの位障害されるか等のより解析的な試験が必要となる。

多世代試験法の指針としては、米国環境保護庁 (EPA) の農薬及び化学物質のガイドライン (2世代1産仔)、米国FDAの食品添加物ガイドライン (2世代1産仔と3世代2産仔の二つがある)、経済協力開発機構 (OECD) の化学物質ガイドライン (2世代1産仔) がある。

わが国では、農林水産省の農薬 (2世代1産仔) と飼料添加物 (2世代2産仔) のガイドラインがある。各々物質の種類や当局の考え方の差によって若干詳細な点で差異が認められるが、基本的には大きな差はない。本指針は米国EPAの化学物質ガイドラインに最も類似しているといえよう。但し、EPAでは多世代試験を「生殖及び受胎能への影響」(Reproduction and Fertility Effects) 又、催奇形成試験を「発生毒性試験」(Developmental Toxicity Study) と称している。

これらの既存のガイドラインを参照して被験物質のヒトへの関わり合いを考慮して、適切な変法を採用する事は、得られた試験成績が正しく評価されるものであれば差し支えない。むしろ示された試験基準に沿って機械的に試験を施行した単なる検定に終らないように注意すべきである。但し、本試験法指針と大きく異なる試験企画については、その部分について変法を採用する理由を報告書に明記する必要がある。

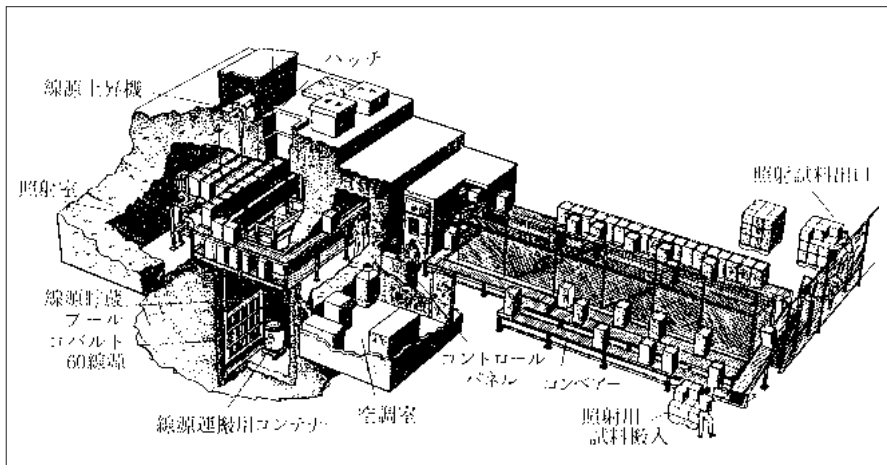
1. γ 線照射施設

γ 線を放出する放射性物質は多種類あるが、商業用照射線源として広く用いられているのは ^{60}Co であり半減期は5.2年である。 ^{60}Co は金属状の天然 ^{59}Co を重水型原子炉に1年以上入れ中性子を照射して製造される。実際の線源は1mm角程度の粒状または直径6mm、長さ25mmの棒状であり、ステンレス鋼パイプに密封した状態で使用している。

大規模な γ 線照射装置は図33-1に示すように、 ^{60}Co 線源が水中に格納できるように工夫されている。 γ 線は水深4.5m以上で遮断されるため、プールの深さは6~7mで十分である。照射室は約2m厚のコンクリートで遮蔽されており、室外へ放射線が漏れないように工夫されている。 γ 線源は昇降装置で自動的に上昇し、照射用梱包物は自動的にコンベアで連続的に迷路を通して照射される。 γ 線などの放射線は照射室の入り口を迷路にしておけば、外部に漏れることがなく、作業員への被爆の恐れはない。また、照射室内での作業中に線源が誤って上昇しないように設計されており、照射室内の作業中に放射線が少量でも漏れると感知器が警報を鳴らすように工夫されている。

商業的な照射装置は図33-1に示すように梱包物をホークリフトで照射容器に入れる方式が多く、線源強度は50~200万キュリー（18~37ペタ・ベクレル）である。1日当たりの処理量は香辛料を10kGy照射する場合で20~30トン、線量均一度は約1.5である。処理コストは香辛料では1kg当たり約50円である。北海道札幌の馬鈴薯照射施設では線量が0.06~0.15kGyのため照射コストは1kg当たり2~3円である。

図33-1 商業用コバルト60ガンマ線照射施設



2. 電子線・X線照射施設

電子線は電子が電界により高エネルギーを与えられたものであり、テレビのブラウン管と同じ原理で発生される。電子線は高真空中で発生された電子が加速管内の高電圧下で加速され高いエネルギーを与えられてから、金属箔（通常チタン箔）を通して外部に取り出される。商業用加速器の方式は主に静電加速方式と高周波加速方式に大別できる。

静電加速器は直流高電圧により電子にエネルギーを与える方式であり、出力が大きい装置が得られやすい。しかし、電子のエネルギーは5MeV（百万電子ボルト）以下であり、梱包状より薄い包装食品や粒状、粉末などの食品原料の照射に適している。

高周波加速器は高周波を使用して電子を繰り返し加速するもので出力は比較的小さいが、10MeVなどの高エネルギーの加速が容易にできる。線形加速器とロードトロン加速器が普及しており、梱包状の食品の照射に適している。

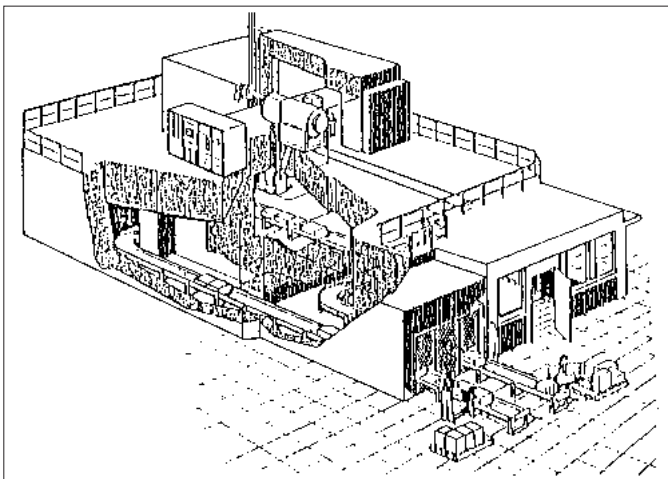
商業用電子加速器は図33-2に示すように梱包した香辛料や冷凍鶏肉、牛肉などを連続的に照射でき、照射室の遮蔽・安全管理はγ線照射装置と同じである。

電子線を重金属のタングステン板またはタンタル板に照射すると制動放射X線が発生する。3~5MeVの制動放射X線はγ線より透過力が良好であるが、転換効率が5MeVの電子線でも約7%であり、実際の照射に利用できるのは1%程度とされている。しかし、照射方法を工夫すれば発生する電子線の約6%を利用できると報告されている。

香辛料を例にとれば、10MeVの電子加速器で10kGy照射する場合には、20cm厚の梱包物は線量均一度が約1.5で照射でき、電流20mAで1時間当たり40~50トンの処理が可能であり、照射コストも1kg当たり約20円になる。

制動放射X線ではγ線と同じ梱包物の照射が可能であり、1時間当たり約4~5トンの処理が可能でγ線より処理量が多いが、照射コストはγ線より高くなる可能性がある。

図33-2 高エネルギー電子加速器でのコンベアによる連続照射



3. 吸収線量測定と照射技術

食品の照射効果は吸収線量に依存するので、食品の梱包物は各部位でほぼ均一の線量が照射される必要がある。γ線やX線の場合には透過力が優れているので厚い梱包物でも照射ができるが、電子線は比較的透過力が弱いいため薄い梱包物にする必要がある。

γ線やX線では線源に近い部分の梱包物は大量の放射線を吸収し、遠い位置では少ない量の放射線を吸収する。このような線量分布の差を少なくするためには梱包物を反転して再照射する必要がある。梱包物中の最大吸収線量と最低吸収線量の比を線量均一度と呼んでいる。食品照射の場合、照射効果に必要な最低線量と品質劣化を起こす限界線量があり、線量均一度はこの範囲で決めるべきである。

γ線やX線の場合、照射対象物を線源から距離をはなして照射すると幅が1m近い梱包物でもほぼ均一に照射することが可能である。しかし、この場合には線源の利用効率が低くなり経済的に不利である。線源近くでも照射対象物を多方面から照射するように工夫すれば線量均一度を良くすることも可能である。

電子線は透過力が弱いいため反転照射しても梱包物の厚さを薄くしておく必要がある。電子線でも10MeVのエネルギーでは比重1で約20cm厚の梱包物がほぼ均一に照射でき、5MeVでは約5cm厚の梱包物の照射が可能である。しかし、3MeV以下のエネルギーでは主に粒状または粉状食品しか照射に適さないであろう。

照射工程における線量管理は照射食品の品質管理法として重要である。食品照射の研究ではフリック鉄線量計が主に用いられてきており、商業照射でもフリック鉄線量計との整合性が必要である。食品照射の工程管理に利用できる線量計は表33-1に示すような線量計が候補例である。すなわち、発芽防止線量である0.02~0.15kGyでは希釈操作なしに吸光度を測定できるフリック鉄線量計が最適であろう。0.2~1kGyの殺虫処理等にはガフクロミックやアラニン線量計が適している。1~10kGyの殺菌処理にはガフクロミックやアラニン、ラジオクロミック線量計が適している。30~45kGyの滅菌線量ではセリックセラスやPMMA（ポリメチルメタアクリレート）、CTA（三酢酸セルロース）などが用いられる。

また、照射工程の管理には梱包物の表面にカラーラベル（カラーインジケータ）を添付して、照射によって色が変わるようにして、非照射物と混同しないように工夫する必要がある。カラーラベルも線量範囲によって発色の程度が異なるので、照射目的に適したカラーラベルを用意しておく必要がある。

表33-1 食品照射の工程管理に利用できる線量計の候補

0.02~0.15kGy	野菜の発芽防止	フリック
0.2~1kGy	殺虫処理、熟度調整	ガフクロミック、アラニン
1~10kGy	食中毒菌の殺菌、香辛料の殺菌	ガフクロミック、アラニン、ラジオクロミック
10~50kGy	完全殺菌、等	セリックセラス、PMMA、CTA等

参考文献

- 1)伊藤 均：食肉製品における電子線殺菌の可能性、月刊フードケミカル、6月号、23～27(1998)。
- 2)須永博美、伊藤 均、他：植物検疫を目的とした食品照射技術の検討、JAERI-Tech 99-046、1999年。
- 3)世界保健機関・国連食料農業機関（林 徹訳）：食品照射、光琳、1989年。
- 4)放射線利用振興協会・大線量測定委員会編：工業照射用の電子線量計測、地人書館、平成2年。

放射性物質の輸送については、国土交通省及び文部科学省の規制のもとに行なわれている。国内の放射性物質の輸送を規制している法令は、IAEAの規則に準じて定められている。これらの関連法令を遵守する事により、輸送に従事する者及び周辺住民の安全が守られている。

輸送にあたっては、まず文部科学省が放射性物質が収納された輸送容器が設計通りに製作されているか、輸送容器が技術基準に合っているかを審査する。又、国土交通省も輸送方法が適当であるかを確認する。そして公安委員会が輸送の届け出を受けて、安全輸送のための指導や指示を行なう事になっている。

1. 輸送用容器：

放射性物質は、その強さや量（≒危険度）に応じて異なる容器に入れるように規制されている。大量の⁶⁰Co線源の輸送には、BM型輸送容器が使用される。容器は輸送中に予想される衝突、転落、火災等の事故に際して、線源が破損したり、放射線が漏洩したりしないように、厳重な試験に合格したものでなければならない。このため、輸送容器は以下の一般及び特別の2つの基準を満足していなければならない。

1)輸送容器についての基準：

①一般の試験条件下での基準：

- ①表面の許容最大放射線率：2mSv/時
- ②放射性物質の許容漏出量：260kBq/時
- ③表面の温度：50℃以下
- ④表面の汚染：3.7MBq/cm²以下

②特別な試験条件下での基準：

- ①表面から1mでの許容最大放射線率：10mSv/時
- ②放射性物質の許容漏出量：26GBq/週

2)試験条件：

①一般の試験条件：

- ①水の吹きつけ試験：輸送中の雨（50mm/時）に相当する水を1時間吹きつける。
- ②自由落下試験：取り扱い中の落下、輸送中の耐衝撃性：
5トン以下の容器は1.2mの高さから最大の破損を生じる姿勢で落下。
- ③圧縮試験：積み重ねた場合の耐圧縮性を試験。容器自重の5倍の荷重をかけて24時間放置。

④貫通試験：鋼棒のようなもの（重量6kg、直径3.2cm）を、1mの高さから容器の最も弱い部分に落とす。

⑤環境試験：38℃の環境に1週間放置。

②特別な試験条件：

①落下試験Ⅰ：9mの高さから最大の衝撃を受けるように落下。

②落下試験Ⅱ：直径15cmの鋼棒上へ高さ1mから落とす。

③耐火試験：800℃の環境に30分間保つ。

④浸漬試験：深さ15mの水中に8時間浸漬する。

2. 放射線の被ばく管理：

1)容器に関わる放射線量率：

①表面：2mSv/時以下

②表面から1m：100 μ Sv/時以下

2)車輻に関わる放射線量率：

①車輻の表面：2mSv/時以下

②車輻の前面、後面及び両側面から1m離れた位置：100 μ Sv/時以下

③車輻の運転者席等通常乗車する位置：20 μ Sv/時以下

輸送に従事する者の被ばく線量は実態的には一般人に対する法定の被ばくの限度を下回っているが、これを確認するために線量計等の着用が定められている。周辺住民に対する影響は、もちろん運転者以下である。

3. 輸送の方法：

安全確保のため輸送方法が定められている。

1)標識及び表示：

輸送物表面に標識（2カ所）及び表示をつける。

①標識の内容：

①放射性物質が収納されている事

②放射性物質の種類

③放射性物質の量

④輸送物表面における放射線量率

⑤輸送指数

②表示の内容：

①総重量

②B型の文字

③耐水、耐火性のある三葉マーク

2)輸送物の取り扱い：

- ①取り扱い場所：関係者以外の人が通常立入る場所での積み込み、取り卸しの禁止。
- ②混載制限：火薬、高圧ガス等の危険物との混載禁止。
- ③積載制限：輸送指数は50以下。
- ④固縛：移動、転倒、転落等を生じないよう固縛する。
- ⑤書類の携行：輸送物の種類、量、取り扱い方法、運搬上の注意、事故時の措置を記載。

3)輸送の安全の確認：

国土交通大臣、又は、指定運搬物確認機関による輸送方法等の安全性の確認が必要。
公安委員会へ輸送の経路、日時等を届け出る。

4)携行物：消火器、ロープ、ロープスタンド、赤旗、放射線測定器、保護具等。

参考資料：(放射性物質の輸送に関わる法令等)

- 1)放射性同位元素等車輛運搬規則（昭和52年11月17日運輸省令第33号）
- 2)放射性同位元素等の事業所外運搬に係る危険時における措置に関する規則（昭和56年5月18日運輸省令第22号）
- 3)放射性同位元素等に係る指定運搬方法確認機関に関する省令（昭和56年5月18日運輸省令第24号）
- 4)放射性同位元素等の運搬の届出に関する総理府令（昭和56年5月16日総理府令第30号）
- 5)放射性同位元素等又は放射性同位元素によって汚染された物の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示（昭和55年11月18日科学技術庁告示第9号）

照射施設の安全確保対策及び運転に伴う従業員、 周辺住民の安全確保対策について

放射線利用施設に働く従業員及びその周辺住民の安全を守るために、施設の建設、運転等は放射線障害防止法によって厳しく規制されている。施設の建設並びに使用開始にあたっては、以下の手順により、文部科学省に設置許可申請を行ない、更に、施設の運転開始前に使用前検査に合格する必要がある。（電子加速器の場合も同様）

1. 照射施設の建設・運転に関わる手続き：

1)施設設置許可の申請：

下記事項を申請書に記載し、文部科学大臣の許可を受ける。

- ①RI等の種類、量、使用の場所及び使用施設の構造、設備。
- ②貯蔵施設の位置、構造、設備及び貯蔵能力等。

2)施設検査：

使用施設について運転開始前に文部科学大臣の検査（使用前検査）を受け、これに合格した後でなければ使用できない。

3)使用届出：

使用（運転）開始前に文部科学大臣に届け出る。

2. 従事者に対する安全対策：

以下を守る事によって、従事者の安全は確保される。

1)遮蔽された室内（照射室）で⁶⁰Co線源は使用される。人が常時立入る場所において人が被ばくする恐れのある線量当量が、1cm線量当量が1週間につき1mSv以下となるように遮蔽壁等を設ける。

これによって年間被ばく線量は国際放射線防護委員会（ICRP）勧告の50mSv／年以下に抑えられる。

2)照射室の出入口で人が常時使用するものには、照射中である事を自動的に表示する装置を設置する。又、照射中みだりに人が入る事を防止するインターロックを設ける。

3)外部放射線に関わる線量当量が、300 μ Sv／週を超える恐れのある場所を管理区域とし、人がみだりに立ち入らないように柵等の設備を設ける。

4)照射室、管理区域の境界に設ける柵等、人がみだりに立ち入らないようにするための施設には標識をつける。

5)インターロックを設けた照射室で照射する場合、搬入口、非常口等の出入口の扉を外から開閉できないようにする。又、万一、室内に閉じ込められた場合はその人

が容易に脱出できるように内部から開閉できるようにしておく。

6)管理区域に入る時は個人線量計を着用し、被ばく線量を測定する。

7)管理区域内に放射線エリアモニターを設置し、常時放射線量を監視する。

さて、放射線障害防止法に関する事故・トラブルのうち、国内の食品照射施設では、稼動開始後の初期に作業員が好奇心で照射室に入ったために143mSvの線量を被爆したことがあるが、当該作業員は健診で異常はなかった。また、その後施設は改善され、従事者への教育・訓練も徹底されたこともあって、以降の事故発生は報告されていない。

3. 周辺住民に対する安全対策：

その事業所の外に放射線や放射性物質が漏洩しないように厳しく規制されている。

1)事業所の境界における1cm線量当量が $250\mu\text{Sv}/3\text{ヶ月}$ 以下になるように遮蔽壁等を設けなければならない。これによって被ばく線量は、一般人の線量当量限度 $1\text{mSv}/\text{年}$ 以下に抑える事ができる。

2)線源格納プール等から排出される水中の ^{60}Co の放射能は、排水口出口、又は、敷地境界で $4 \times 10^{-1}\text{Bq}/\text{cm}^3$ 以下になるように処理しなければならない。

通常、プール水は浄化装置を通して循環、再利用され外部に放出されない。

3)照射室内の空気中には照射によりオゾンが発生するが、その濃度が高くないように照射室は常時換気される。又、排気口におけるオゾン濃度は低いので、健康に影響はない。

参考資料：(照射施設の建設・使用に関わる法令等)

1)放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律(昭和32年法律第167号)

2)放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行令(昭和35年政令第259号)

3)放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則(昭和35年総理府令第56号)

食品照射の進展による ^{60}Co 、 ^{137}Cs の需要増大と原子力発電開発との関連について

JECFI及び国際食品規格委員会が、食品照射で使用する事を承認している放射線は、① ^{60}Co 、又は、 ^{137}Cs からの γ 線、②エネルギーレベルが5MeV以下の電子加速器から発生したX線、③10MeV以下の電子加速器から発生した電子線である。

現在、わが国で食品照射用線源として食品衛生法で許可されているのは ^{60}Co からの γ 線だけであり、北海道・士幌町農業協同組合では馬鈴薯の発芽防止のための実用照射を行なっている。なお、医療用具の場合、 ^{60}Co からの γ 線と電子加速器からの電子線照射（*電子線は1991年4月26日より）が薬事法で許可されており、表36-1の通り、現在、40種類の医療用具での実用照射が行なわれている。

表36-1 放射線滅菌が許可されている医療用具（許可順不同）

* 使捨て注射筒	* 絹縫合糸	* 血液加温コイル
* 使捨て注射針	* 腸線縫合糸	* 人工心肺用ろ過器
* 手術用ゴム手袋*	* ポリアミド縫合糸	* 月経処理用タンポン
* 翼付注射針	* 外科用メス	* ブラッドランセット
* 静脈カテーテル	* 外科用替刃	* ガーゼ付絆創膏
* 縫合糸	* ポリエステル縫合糸	* 骨セメント構成品
* 鍼	* 気管支カテーテル	* 膜型血漿成分分離器
* 頭皮静脈針	* 延長用チューブ	* 採血管
* 栄養チューブ	* 新生児骨髄針	* 採血針
* 多用途チューブ	* ヘッセル氏臍帯クリップ	* 人工関節
* 子宮内避妊リング	* 心臓弁リング	
* 尿道カテーテル	* 輸血用ろ過器	
* 2Wayバルンカテーテル	* ホローファルバー型ダイアライザー	
* コイル型ダイアライザー	* 血液ガス測定用採血器具セット	
* キール型ダイアライザー	* 輸血セット（硫酸バリウムポリマー粉末）	

上記放射線の内、X線、電子線は機械的・電気的に得られる放射線であり、スイッチのオン/オフで操作でき、線源補充の必要がない等の長所がある上、X線変換を含めて加速器技術が進歩して、近年、食品や医療用具の分野でもこれを利用しつつある。

γ 線は、RIが安定同位元素（SI）へ変化（崩壊）していく過程で放出されるものであり、最初のRIの量が半分になるまでの期間（又は時間）を半減期という。RIを商業的に利用し大量、且つ、均一な照射を行なうには、一定量の放射線源の確保とともに、半減期の関係から定期的な線源補充が必要である。

^{60}Co は、天然にあるCoの安定同位元素、 ^{59}Co を原子炉で中性子照射して得られる。 ^{60}Co の半減期は約5.2年である。

世界の ^{60}Co 市場の約80%を賄うといわれるノルディオンインターナショナル社（NI社＝元カナダ原子力公社(AECL)）は、同じくカナダの電力会社のオンタリオハイドロ社と契約し、 ^{60}Co の大量生産を行なっている。なお、 ^{60}Co の生産は必ずしも発電炉である必要はなく、必要な中性子が一定期間確保できるのであれば研究炉でも生産が可能である。更に、生産効率の問題を考慮しなければ、中性子等が得られる加速器による生産も可能といわれている。従って、 ^{60}Co の確保にあたっては、前述の通り、必ずしも原子力発電の推進が前提条件であるとはいえない。 ^{60}Co の半減期は約5.2年であり、商業規模の照射施設が当初の処理能力を維持していくためには、年間約10%の ^{60}Co の補充が必要となる。

表36-2 商業用 γ 線・ \times 線・電子線照射施設（除く放射線化学専用）

所有者名	所在県名	放射線の種類	用途
士幌町農業協同組合	北海道	γ 線	食品照射(馬鈴薯)(自)
ニッショウ(株)	秋田県	γ 線	医療用具滅菌(自)
ラジエ工業(株)	群馬県	γ 線・電子線	医療用具滅菌・改質(受)
日本電子照射サービス(株)	茨城県 大阪府	電子線・ \times 線	〃
日本照射サービス	茨城県	γ 線	〃
ホギメデイカル(株)	茨城県	電子線	医療用具滅菌(自)
テルモ(株)	山梨県	γ 線・電子線	〃
アトムメデイカル	静岡県	電子線	〃
(社)日本アイソトープ協会	滋賀県	γ 線	医療用具滅菌・改質(受)
(株)コーガアイソトープ	滋賀県	γ 線	〃
原子燃料工業(株)NFIサービス	大阪府	電子線・ \times 線	〃
日本メデイカルサプライ(株)	広島県	γ 線	医療用具滅菌(自)
旭メデイカル(株)	大分県	γ 線	〃
日本シャーウッド(株)	静岡県	電子線	〃
東郷メデイキッド(株)	宮崎県	電子線	〃

^{137}Cs を大量に入手するには、原子力発電所からの使用済み燃料から、新たに燃料として利用できる ^{239}Pu や残存 ^{235}U 等の有用元素と現在の技術力では利用し難い不要元素に分離する工程（使用済み燃料再処理）で得るのが適している。従って、原子力発電の進展に伴って ^{137}Cs の潜在的保有量は増大する。しかし、半減期が30.17年と ^{60}Co の約6倍との長所にも関わらず、現段階では、 ^{137}Cs を実用的な大線源として利用している例はあまり見られない。

その理由として以下の事があげられる。まず、

- 1) ^{137}Cs からの崩壊当たりの γ 線数が ^{60}Co の半分以下（ ^{60}Co の2.0に対して ^{137}Cs は0.85）である事、

2)エネルギーも約半分 (^{60}Co の1.17, 1.33MeVに対して ^{137}Cs は0.662MeV) であり、大線源施設とするには線源の形態や照射施設を大型化しなければならない。その結果、線源自体が γ 線の自己吸収を起こし、放出された γ 線の有効利用ができない事、

3)線源の化学形態が塩化物で潮解性がある、線源の格納に特別の配慮が必要となる (^{60}Co は金属化合物であり水中格納が可能) とともに、非密封状態で、わずかではあるが昇華するといわれている事等である。

放射線化学関係を除いて、わが国にある商業規模の放射線照射施設の多くは ^{60}Co からの γ 線利用であったが、最近、5MeV、10MeV級の電子加速器が医療用具等の滅菌用に商業的に導入されている(表36-2)。 ^{137}Cs に関して、既存の照射施設の線源を ^{60}Co から ^{137}Cs へと変更する事は技術的に容易ではない。

参考資料

- 1)第17回「日本アイソトープ・放射線総合会議」報文集：日本原子力産業会議，1985
- 2)放射線プロセス用線源に関する研究会報告書：日本原子力産業会議，1988.

1. 現状：

わが国で商業規模の実用照射が開始されてから40数年以上が経過し、極く初期に装荷された線源は放射線の強度が著しく減衰している。通常、 ^{60}Co 線源は初期の強度が1桁程度減衰しても、再カプセリングや棒状線源の配置密度を高める事によって有効に使用できる。

線源の頒布は、全て日本アイソトープ協会を通じて実施されており、同協会では少量であれば照射施設の廃止等で不用になった線源の回収、保管を行なっている。

2. 将来：

減衰が著しくなれば利用効率が低下し、実質的に利用できなくなるので、何らかの対策が必要となる。対策としては、

- 1)保管する、
- 2)廃棄する、
- 3)再利用する、
- 4)返却する等が考えられる。

以下に述べる理由から、当面は各施設においてプール中に保管し、その間に、購入先のNI社と交渉し減衰線源の引き取りを求めるのが現実的な対策であろう。

1)保管：

^{60}Co 線源は容積はあまり大きくないので、線源格納プールの一隅を利用すれば安全に保管できる。原子力発電所の使用済み燃料をプール中で30~40年間安全に貯蔵している実績があるので、二重にステンレスでカプセリングされた ^{60}Co 線源もこの程度の期間であれば、安全に保管できるものと考えられる。但し、この場合プールの水質は、高純度に維持されなければならない。又、著しく長期にわたって水中に保管するのは最善とはいえないので、将来、なんらかの対策をたてる必要がある。

2)廃棄：

^{60}Co 線源は減衰した後も放射能レベルは非常に高く、簡単には処分できない。低レベル放射性廃棄物としての処理・処分は困難である。

3)再利用：

原理的には減衰した ^{60}Co 線源を原子炉で再照射して比放射能を高めれば、再利用できる。 ^{60}Co 線源を生産している施設であれば、減衰線源のハンドリングはそ

れほど難しくはなく、再照射は可能であろう。

しかし、わが国でこれを行なうには、 ^{60}Co 生産に適した原子炉のない事等から困難である。

4)返却：

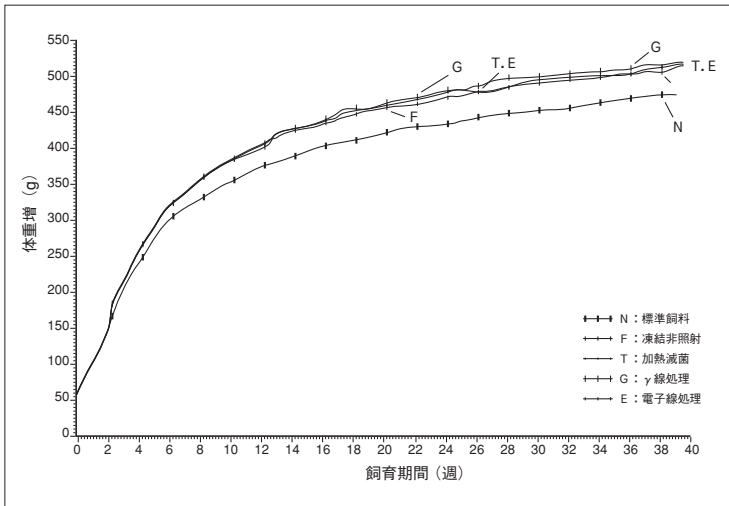
NI社は同社のプラントを導入したところ、又は、同社の水質検査に合格したプールで線源を格納しているところに対しては、減衰した線源の引き取りサービスをするとしている。現段階では、これが最も現実的な方法であろう。

1. ラルテック社が行った毒性試験

1984年に米国食品医薬品局（FDA）はラルテック社で行われた59kGy照射した冷凍鶏肉での毒性試験で健全性に問題がないことを明らかにした。ラルテック社が行った毒性試験は膨大な数の動物数と規模の大きさから統計学的に優れていると国際的に評価されている。この試験は最初、米国陸軍、その後、米国農務省が支援して実施された。この試験には約134トンの鶏肉が使用された。本試験では照射鶏肉を35%含む飼料をラット、マウス、ハムスター、ウサギ、ビーグル犬に与える慢性毒性試験（280～999日）、優性致死試験、世代試験、発癌性試験等が行われた。例えば、慢性毒性試験のラットの飼育試験では各群とも雌雄115～175匹の動物が用いられた。そして、図38-1に示すように40週の飼育期間中の体重増はγ線、電子線、加熱滅菌、非照射で差が全く認められず、他の試験項目でも照射による悪影響は認められなかった。なお、国際的な毒性評価での動物飼育試験の標準はラットやマウスでは雌雄30～50匹であり、照射食品での個体差によるデータのばらつきが見られることが多い。

催奇形性試験では、照射した鶏肉をハムスター、ウサギ、ラット、マウスに投与したが子孫に奇形学的な影響は認められなかった。

図38-1 59kGy照射した凍結鶏肉の雌ラットによる体重増加曲線



優性致死試験では照射鶏肉を投与した動物で照射による影響は認められなかった。また、変異原性試験でも照射の影響は認められなかった。

2. マウスの発癌性試験

マウスを用いた慢性毒性・発癌性試験では睪丸腫瘍と糸球体腎臓症の増加及び生存率の低下がラルテック社で観察した。しかし、FDAによる再評価の結果では非照射群でも腫瘍が認められ、照射による発癌性の証拠はないと結論された。すなわち、全部の睪丸細胞の試験スライド標本がFDAの食品安全応用栄養学センターで再検査された。FDAとラルテック社の観察の相違は非照射の試験マウスで観察された腫瘍が同じ原因で発生したかいなかというものであった。FDAの観察結果では、次ぎのような結果が得られた。

標準飼料	1/105
凍結鶏肉	2/159
加熱滅菌鶏肉	1/109
γ線照射鶏肉	3/107
電子線照射鶏肉	4/106

この結果に基づき統計的な分析が行われたが、これらの腫瘍は死亡をまねかない種類であった。統計的な結果は睪丸の腫瘍の標準偏差値は全て約0.05以下であり、腫瘍の発生は照射した食品を摂取したのではなく、他の要因によるものであることを示している。すなわち、全ての睪丸腫瘍は一樣でなく、照射鶏肉による毒性を示す他の障害が見られないことから、FDAは照射鶏肉を摂取することによる発癌性を示す証拠は見出されないと結論した。

さらに、FDAはマウスの糸球体腎臓症の増加と生存率の低下は照射によるものではなく、鶏肉飼料の高タンパク質含有量が原因であると結論した。

参考文献

- 1) D. W. Thayer, et al., : Toxicology studies of irradiated-sterilized chicken, J. Food Protec., 50(4), 278 ~ 288(1987).
- 2) Science Committee for Food : food-science and techniques ; Report of the Science Committee for Food (Eighteenth series), Commission of the European Communities, Directorate-General, Report EUR 10840 EN. ISBN 92-825-6983-7, Luxembourg, 1987.
- 3) 世界保健機関 : 照射食品の安全性と栄養適性、コープ出版、1996年。
- 4) FDA : Federal Register, vol. 51, No. 75, 13386(1986).

香辛料にはもともと変異原性物質が含まれている品目があり、刺激性成分が含まれているため、動物を使った慢性毒性試験は一般的には困難である。また、香辛料の種類は94種類以上あり、一つずつの動物試験は困難である。このため、米国食品医薬品局（FDA）は放射線分解生成物の種類と量及び人間の1日当たりの最大推定摂取量から判断して許可している。すなわち、FDAは1日当たりの摂取量は食品全体の0.01%より少ないとの推定により30kGyまでの線量を許可している。これは、殆どの放射線分解生成物は非照射食品や加熱調理食品中にも存在しており、未知の分解生成物が生じるとしても100万分の1以下の量であり、このレベルでは毒性学的な評価は不可能であるとの結論から出されている。また、欧州連合や多くの国々は1980年のFAO・IAEA・WHO合同専門家委員会の「10kGyまでの照射食品は安全である」との結論に基づき許可を出している。一方、催奇形性試験や変異原性試験がハンガリーや日本アイソトープ協会食品照射研究委員会で実施されている。

わが国での研究でも香辛料の精油成分は50kGy照射しても殆ど変化せず、たとえ分解するとしても1~2%以下であると結論している。黒コショウを80kGy照射すると、過酸化価は非照射に比べると1kg当たり0.43ミリモル増加し、ヨウ素価は1.58ミリモル低下し、酸価は0.18増加した。このことは、微量であるが照射によって脂質等の不飽和結合が酸化され、過酸化物を生成し、それが主として有機酸に分解することを示している。また、ナツメグを50kGyまで照射しても脂肪酸組成と量はほとんど変化しなかった。この結果は、香辛料の分解生成物はFDAが想定したより微量であり、10kGyまたは30kGyでも微量であることを示している。なお、香辛料の抗酸化性も抗菌性も50kGy照射でも変化しない。すなわち、香辛料は乾燥状態のため放射線による分解反応は50kGyでも無視できる程度である。また、放射線で分解されやすいビタミン類についても、オニオン粉末やパプリカ中のビタミンCやカロチノイドも20kGy以上でも変化しないと報告されている。

ここでは、催奇形性試験や変異原性試験の結果について紹介する。

1) 催奇形性試験

ハンガリーの研究によると、パプリカ（カプサイシン含量0.9mg/g）、黒コショウ、混合香辛料（パプリカ55%、黒コショウ14%、コリアンダー9%、オールスパイス9%、マジョラム7%、クミン4%、ナツメグ2%）に γ 線を15kGy照射してから、照射後2週間以内のもの及び照射後90日間貯蔵したものを動物実験に供した。パプリカは25%、黒コショウは3.5%、混合香辛料は25%となるように飼料に混合した。動物は近親交配していないCFYアルビノラットを用いた。妊娠させた雌ラットに6~15日

間にわたり混合香辛料を与え、催奇形性を比較した。その結果、妊娠獣の行動、摂餌率は照射されたパプリカ、黒コショウ、混合香辛料群と非照射のパプリカ、黒コショウ、混合香辛料群で差が認められず、胎子数や胎子に対する悪影響も認められなかった。また、胎子の骨格の発育や他器官の発育にも照射、非照射による差は認められなかった。さらに、長期間貯蔵した場合にも照射、非照射による影響は認められなかった。この結果は各香辛料試料に催奇形性がないことを示している。

2) 優性致死試験及び小核試験

ハンガリーでは優性致死試験及び小核試験により照射香辛料の安全性が評価されている。

優性致死試験では、混合香辛料（前記と同じ組成）を15kGy照射し、飼料に25%混合してCFYラットの雌に3ヶ月間にわたって給餌した。その結果、照射飼料群も非照射飼料群も妊娠後の胎細胞への変異原性（遺伝毒性）は認められなかった。しかし、黒コショウ3.5%を飼料に混ぜると繁殖性に若干影響が現れるが、照射飼料群と非照射飼料群の間での差は認められなかった。

小核試験はパプリカについて行われ、30kGy照射後に飼料中に20%となるように混合してマウスに給餌して12日間飼育した。そして、分析した結果、骨髄での細胞分裂活性への照射の影響は認められなかった。

3) 微生物変異株による変異原性試験

ハンガリーでは大腸菌K12株系の変異株を用いて黒コショウ、混合香辛料（前記と同じ組成）でのプロファージ誘発試験を行った。これらの香辛料材料は0.5及び15kGy照射し、黒コショウは3.5%、混合香辛料は25%を飼料に混合し、3ヶ月齢のCFYラットで6日間飼育した。飼育後、ラットの血液を採取して大腸菌のプロファージ誘発能を非照射飼料群と比較した。その結果、一般動物飼料と比較しても照射、非照射の香辛料飼料群でのプロファージ誘発能に有意の差は認められなかった。

サルモネラ・タイフィムリウム変異株を用いたエームス試験による変異原性試験はハンガリー及びわが国で行われている。ハンガリーではエームス菌TA1535、TA1537、TA1538、TA98、TA100を用いた復帰変異試験が行われた。この研究では、パプリカ、黒コショウ、混合香辛料（前記と同じ組成）に5、15、45kGyの γ 線を照射して、ラットに摂餌させた後の尿、または各香辛料試料の抽出液を直接用いて変異原性を調べた。その結果、照射、非照射にかかわらず変異原性に差は認められなかった。

わが国では、日本アイソトープ協会食品照射委員会でエームス菌による変異原性試験が行われた。この試験では代表的な香辛料である黒コショウ、赤トウガラシ、ナツメグ、パプリカが取り上げられた。香辛料試料は1または10kGy照射後、抽出液についてラット肝抽出液S9の作用の有無による復帰変異が調べられた。その結果、ナツメグ及びパプリカは照射の有無にかかわらず変異原性は認められなかった。一方、黒コショウ及び赤トウガラシは弱い変異原性が認められたが、照射による変異原性の増大は認められ

なかった。

以上の結果は香辛料を高線量照射しても変異原性物質の誘導がなく、毒性物質生成もないことを示している。

参考文献

- 1)日本原子力産業会議(訳)：食品製造・加工・出荷における放射線照射；最終規則、1986年4月18日 米国厚生省食品医薬品局、原子力資料 第189号、p.1～55(1986)。
- 2)金子信忠、伊藤 均、他：香辛料の精油成分および脂質に対する γ 線照射の影響、日本食品工業学会誌、38巻(11)、1025～1032(1991)。
- 3)Anonymous：Teratogenic studies on albino rats fed diets containing either irradiated ground black pepper, mild paprika or spice mixture, IFIP-R-52. international project in the field of food irradiation, Karlsruhe(1979).
- 4)J. Barna：Genotoxicity test of irradiated spice mixture by dominant lethal test, Acta Alimentaria, 15, 47～56(1986).
- 5)R. C. Chaubery, et al.,：Cytogenetic studies with ground paprika as evaluated by the micronucleus test in mice, Acta Alimentaria, 8, 197～201(1979).
- 6)J. Farkas and E. Andrassy：Prophage λ induction of blood of rats fed irradiated spices, Acta Alimentaria, 10, 137～142(1981).
- 7)J. Farkas, et al.,：Evaluation of possible mutagenicity of irradiated spices, Acta Alimentaria, 10, 129～135(1981).
- 8)坂本京子、他：ガンマ線照射スパイス・マンゴーの変異原性、食品照射研究委員会・研究成果最終報告書、204～211、日本アイソトープ協会、1992年。

質問 40

ラットへの照射飼料の投与による 生殖行動劣化の可能性について

実験動物は医学、生物学、生化学、栄養化学、放射線生物学、食品や薬品の安全性試験等の進歩に重要な役割を果たしている。これら実験動物の確保にあたっては、生産方法と飼育条件の整備とともに、飼料の無菌化も実験動物の衛生管理のうえで重要な課題となる。

実験動物用の飼料は、急性毒性試験、慢性毒性試験、生殖試験、発癌性試験等を実施するうえで不可欠な環境因子であり、飼料素材の配合を変化させず、実験動物に必要な栄養素を含有し、重金属・残留農薬を含まず、更に、微生物学的にクリーンである事等が条件である。一般的に実験動物用飼料は素材からペレットへの加工工程で70～80℃短時間加熱処理されているが、なお、 $10^3 \sim 10^6$ 個/gの各種微生物に汚染されている（図40-1及び図40-2）。

わが国でも実験動物用飼料への実用的な放射線滅菌は既に40年の歴史を有し、400トン/年以上利用されていると思われる。【英国では40年以上前で既に1,200トン/年。現在、欧米先進国のほとんどが無菌（SPF）実験動物用の飼料を放射線滅菌】

これまでの実績等から、 ^{60}Co からの γ 線の25～50kGy照射によって、本来の目的である飼料の微生物制御も十分であり、包装後放射線処理するため、処理後の再汚染を確実に防止できる。そして、放射線処理飼料の摂取に起因すると思われる障害や異常発生も認められず、又、対象実験動物の生殖機能劣化の可能性や懸念は十分に否定されている。

1. 滅菌飼料の栄養面への影響：

実験動物用飼料は家畜・ペット用に比し、所定の実験目的遂行のため飼料中の微生物の存在が問題となる。特に、SPF実験動物では特定の微生物の存在が許されず、この結果、たとえ栄養的価値を損なう事があっても、なんらかの滅菌処理が要求されている。

滅菌方法としては、従来から最も多く用いられてきたオートクレーブによる熱処理方法、エチレンオキシドガス（EOG）による方法、近年普及してきている放射線処理方法がある。この内、EOG法は飼料深部への滅菌効果と残留性の問題を有しており、ほとんど利用されなくなっている。オートクレーブ処理と放射線処理飼料について、栄養素、例えば、アミノ酸への影響を見ると表40-1の通りである。必須アミノ酸の減少はオートクレーブ法に比し放射線滅菌法のほうが少ない。

但し、照射線量の上昇によるアミノ酸への影響は避けられず、食品照射と同様、飼料原料の微生物の一次汚染管理と適正線量の照射が不可欠になる。

次に、放射線照射によるビタミン含有量への影響を表40-2に示す。動物の多くは、

図40-1 実験動物用ペレット状飼料の殺菌効果

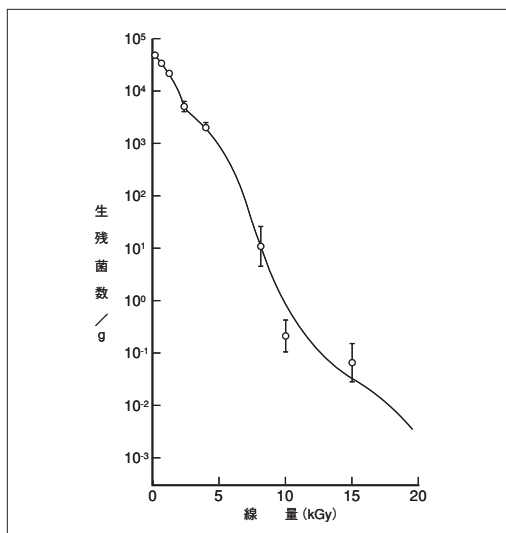
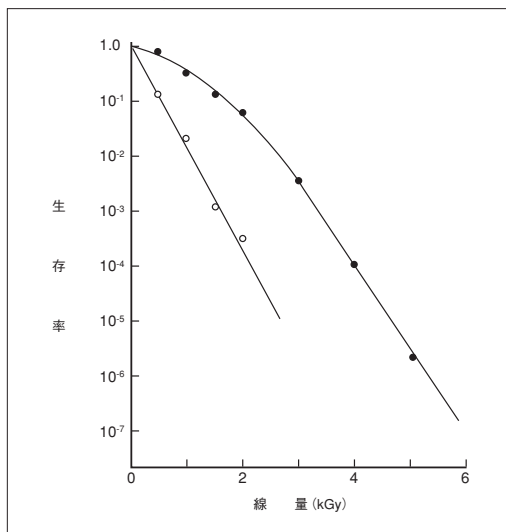


図40-2 乾燥状態でのサルモネラ菌（黒丸）及び大腸菌（白丸）の殺菌効果



通常飼料摂取により必要なビタミンを体内で合成する等して確保しているが、実験動物の場合、消化管内にいつさいの微生物の存在を許さないため、必須ビタミンも滅菌飼料に依存せざるをえない。このため、他の栄養素と同様、飼料中のビタミン変化も最小限に押えた滅菌法の採用が不可欠である。表40-2に見られるように必須ビタミンの場合でも、放射線滅菌飼料の方が実験動物用飼料への影響を最小限とする事ができる。

表40-1 未滅菌・放射線・オートクレーブ滅菌CL-2飼料100gr当りの
リジン・アルギニン・バリン・メチオニン量（単位：g）

	リジン	アルギニン	バリン	メチオニン
未処理 CL-2 飼料	1.544	1.547	1.355	0.709
放射線滅菌 CL-2 飼料				
(10kGy)	1.494	1.494	1.226	0.588
(20kGy)	1.468	1.515	1.268	0.602
(30kGy)	1.464	1.504	1.285	0.575
(40kGy)	1.424	1.473	1.274	0.585
(50kGy)	1.442	1.447	1.309	0.587
(60kGy)	1.423	1.454	1.257	0.541
(70kGy)	1.406	1.467	1.308	0.529
(80kGy)	1.423	1.459	1.250	0.603
(90kGy)	1.347	1.453	1.227	0.561
オートクレーブ滅菌CL-2飼料(127℃,30分間処理)	1.204	1.398	1.211	0.609

ビタミンに関してハンガリーに、25kGy照射処理によるビタミンの分解は、カロチンが13%、ビタミンAが22%、ビタミンEが5%、ビタミンCが21%であるのが、オートクレーブ処理ではビタミンAが53%、ビタミンEが44%、ビタミンCが100%分解したとの実験結果がある。

表40-2 実験動物用飼料中のビタミン含有量の変化

	無処理 (対照)	放射線処理 (30kGy)	放射線処理 (60kGy)	蒸気処理 (120℃、20分)
ビタミンB ₁	23.8 γ g/g	23.0	21.0	8.8
ビタミンB ₂	39.7 γ g/g	39.6	39.9	36.4
ビタミンB ₆	8.64 γ g/g	8.04	7.08	5.20
ビタミンB ₁₂	0.0107 γ g/g	0.00738	0.00712	0.00388
イノシトール	0.56mg/g	0.56	0.54	0.44
葉酸	2.24 γ g/g	2.00	2.10	1.28
ビタミンA	22IU/g	19	18	18
ビタミンE	340 γ g/g	310	320	320

注) 1 γ g = 1 μ g

2. 無菌ウイスターラットでの繁殖試験の結果（1産仔～4産仔の平均値）：

オートクレーブ法による高压蒸気滅菌飼料は、外観的には黒褐色化し、硬く、ペレットが交互に付着するのに対して放射線滅菌飼料ではこのような変化はない。又、双方の処理方法によるSPF動物用飼料を無菌ウイスターラットに同時に投与した結果、放射線滅菌飼料の方が嗜好性に優れており摂取量が著しく多かった。この原因としては、オートクレーブ処理飼料では加熱処理によって、飼料が有していた香味や味を損なった事やペレットが硬化してラットが食べにくくなったことなどが理由として考えられる

無菌ウイスターラットの雌10匹、雄5匹（第4産仔まで）を用いてオートクレーブ滅菌処理飼料と放射線滅菌処理飼料の投与による繁殖試験の結果は、表40-3の通りである。

表40-3 無菌ウイスターラットの繁殖試験（第1～第4産仔平均）

滅菌処理飼料	雌数	妊娠率	平均産仔数	離乳率	生産指数
高圧蒸気滅菌飼料（126℃、30分）	10匹	40.9%	11.9匹	90.0%	17.5
放射線滅菌飼料（ ⁶⁰ Coγ線50kGy）	10匹	70.6%	10.7匹	94.5%	28.6

妊娠率はオートクレーブ法の方が40.9%であるのに対し放射線法の方が70.6%であった。平均産仔数は前者が11.9匹であるのに対して後者は10.7匹とやや低かった。離乳率は前者が90%であるのに対して後者が94.5%であった。そして、生産指数（雌1匹の生涯生産動物数）は前者が17.5匹であるのに対して、後者は28.6匹と放射線処理飼料を与えた方が繁殖性が高いとの結果を示した。

参考資料：

- 1)放射線と産業：No.24、放射線照射振興協会、1983
- 2)IAEA：Decontamination of Animal Feeds by Irradiation, STI-TUB-508, Vienna, 1979

- 1) 0、27.9及び55.8kGyで照射した合成飼料をラットに4世代にわたり投与し、成長、寿命及び繁殖成績について調べたが、照射による影響は見られなかった。
- 2) 照射により生成されるフリーラジカルを高濃度に含んだ照射粉乳（45kGy）を飼料中に35%の割合で添加してラットに与えた。3年間にわたり6世代（延456匹）に対してその慢性的影響について、成長、血液学的、生化学的及び病理組織学的に、更に、繁殖性及び妊娠生理値についても検討した。しかし、照射飼料投与による慢性毒性あるいは発癌性を示す影響は見られなかった。
- 3) 0、0.2及び2kGy照射小麦を75%の割合で飼料中に添加して、ラットに2年間投与する試験を4世代にわたり行なった。体重、摂餌量、臓器重量及び死亡率に影響は見られなかった。
- 4) 5kGy照射卵を25%の割合で飼料中に添加してラットに3世代にわたり3年間投与した後、慢性毒性を調べた。体重、死亡率、生殖性、繁殖性については照射による影響は見られなかった。
- 5) 2.5から56kGyで照射した飼料をラットに20ヵ月間与え病理組織学的に調べたところ、照射飼料投与群で精巣重量の有意な増加が見られた。これは間質の変性によるものであり、用量相関性があったという報告がある。しかし、この報告では、群毎に見られる症状の例数及び重量の実測値が明らかにされていない。
- 6) 上記と同様の条件でラットによる照射飼料の慢性的影響を調べたところ、腎臓で糸球体、ボウマンのう、尿管管の変性が照射の用量に依存して認められたとしているが、この報告でも群毎の症例数の記載がない。

以上のように、慢性毒性及び繁殖性に関する4つの報告では、照射による影響は認められていないが、上記5)及び6)の報告（旧ソ連のデータ）では、照射による精巣及び腎臓への影響が示されている。しかし、照射による毒性が見られたとするこれらの報告には上記の通り、具体的な症例数の記載がなく不明な点も多いところから、毒性議論上引用する事には問題があると思われる。

参考資料：

- 1) Richardson, L. R. et al : A Long-Term Feeding Study of Irradiated Foods Using Rats as Experimental Animals Am. Inst. Nutrition, 19, 1023-1027, 1960
- 2) Renner, H. W. et al : Zur Frage der Gesundheitlichen Unberdenklichkeit

Hoher Konzentrationen von Freien Rdikalen in Bestrahlten Lebensmitteln. Zbl. Vet. Med., 20, 648-660, 1973

- 3)Hickman, J. R. et al : Rat Feeding Studies on Wheat Treated with Gamma-Radiation II. Growth and Survival. Fd. Cosmet. Toxicol., 2, 175-180, 1964
- 4)Morre, J. G. et al : Etude de la Toxicite Aigue et Chronique des OEUFS CONGELES, en Bidons, Irradiated a 0.5 Megarad. Revue General du Froid, 8, 805-813, 1972
- 5)Ivanov, A. E. et al : Pathomorphological Changes in the Testes of rats fed on Products Irradiated with γ -Rays. Bull. Exp. Biol. Med., 91, 232-234, 1981
- 6)Ivanov, A. E. et al : Pathomorphology of the Kidney in Rats after Prolonged Ingestion of Irradiated Foods. Bull. Exp. Biol. Med., 85, 236-238, 1978

25kGy照射飼料を8週間摂取させたマウスを用い、優性致死試験（精子、又は、卵子の染色体異常のため、受精卵が着床前に死に至る障害を調べる試験で、陽性の場合には変異原が生殖細胞に作用して染色体の障害を起こしている事を意味する）を行なった報告では、着床痕跡数及び胚死亡数について変化は認められず、又、着床前死亡数、受精率及び生存胎仔数においても照射による影響は見られていない。

参考資料：

- 1) Chauhan, P. S. et al : Dominant Lethal Mutations in Male Mice Fed γ -Irradiated Diet. *Fd. Cosmet. Toxicol.*, 13, 433-436. 1975

照射馬鈴薯(150Gy)によるラットのDNA合成の抑制、
アルコール抽出液での染色体異常、
優性致死の可能性について(ラジオトキシン説)

ソ連のV.A.Kopylovらは、照射馬鈴薯のアルコール抽出物がマウスに対して変異原性を示し、これがラジオトキシン(同氏らが照射馬鈴薯中に生成されているとした仮想有害物質)生成に由来するもので、照射馬鈴薯の摂取によりラジオトキシンが動物の性細胞に対して変異誘発作用を及ぼす可能性があるとして指摘するとともに、この事は研究面だけでなく食品照射の実用上にも重要な問題点になるであろうと警告した。参考資料1)では食品照射という言葉は使用されていないが、この実用分野、特に、馬鈴薯を含む植物性食品材料の照射は好ましくないという事を著者らが意味している事は明白である。

同氏らの実験では、馬鈴薯を10krad(100Gy)の γ 線で照射して24時間後に、0~4℃で2時間冷却し、-5℃で95%エタノール(pH2.0)中でホモジェナイズし、同じく-5℃で120分間攪拌しながらアルコール抽出した。濾過後、アルコールが完全になくなるまでアルゴン気流中(脱酸素、20℃)で濃縮し、フラスコ中に密封して、調製後6時間以内の新鮮なものを実験に用いた。

この濃縮試料液を用いて、マウスによる優性致死試験を行なった。その結果によれば、照射馬鈴薯からの試料を雄マウスに経口投与してから、第1、3、5週後に着床後死胚率が上昇し、各々21.5、22.2、21.1%であった。これに対応する非照射の対照試料群Iでは各々4.1、4.1、4.0%、同じく非照射の対照群IIでは1.7、1.7、2.1%であった。これらの値から計算される死胚誘発率は第1週で27~30%、第3週で23~26%、第5週で21~33%(参考資料1)の表2では33%でなく23%になっている)で、照射馬鈴薯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事を述べている。

本論文の背景として注目すべき点は、著者らが放射線の生物に対する変異誘発作用を、遺伝物質構造への直接的損傷とラジオトキシン生成による間接的作用によるものであるとしている点である。即ち、放射線生物作用機構の一部として毒素説を唱えている。そして、この事は、動物の生殖細胞に対する照射の優性致死突然変異だけでなく、植物や大腸菌のような細菌における変異誘発にもあてはまるとしている。従って、照射した食品材料の飼料を与えると動物に遺伝子突然変異、染色体異常やその他の直接的放射線作用に特有の生物効果を誘発するという事に注目したのである。

しかし、この馬鈴薯のアルコール抽出物による優性致死突然変異誘発説は2つの研究(参考資料2)、3)において否定され、又、小核試験(参考資料4)においても変異誘発は認められなかった。

現在では、放射線生物作用は細胞DNA及びそれに密接に関連する機構への照射効果

による説明が基本となっており、毒素説は過去のものとなっている。

Zajcevらは馬鈴薯を γ 線で20krad (200Gy) もしくは電子線で30krad (300Gy) 照射して、発芽防止をはかる場合の変異誘発効果、毒性、繁殖力への影響を研究した。

- 1)上記の条件下で照射した馬鈴薯の給餌によるラットにおける優性致死は非照射馬鈴薯の対照群に比べて増加しなかった。交配は6週間まで行なった。
- 2)10krad (100Gy) の γ 線を照射した馬鈴薯を40日及び90日間貯蔵した後、100°C、15分間蒸煮し、Kuzinらと同じ方法で90%エタノールで抽出、この抽出物についてマウスによる優性致死試験を行なった結果、着床後死胚率は照射、対照両群間に差が認められなかった。
- 3)電子線で30krad (300Gy) 照射した馬鈴薯をラットに給餌して5世代にわたる毒性試験を行なった結果、生存率、血液蛋白レベル、酵素活性、臓器重量、発癌性、繁殖性について、照射による毒性効果を認めなかった。

以上、Zajcevらのラット及びマウスでの優性致死試験では、馬鈴薯は照射後加熱及び貯蔵されているが、Kuzinらの実験結果と異なり変異誘発は認められなかった。Kuzinも後に照射馬鈴薯中のラジオトキシンは加熱及び貯蔵によって失われるので、照射馬鈴薯の消費に不安を抱く必要はないという見解を発表している。

I.N.Osipovaは10krad (100Gy) の γ 線を照射後貯蔵したナマ、又は、調理した馬鈴薯から調整した抽出物の変異原性を研究した。照射後24時間における95%エタノールでの抽出物には雄マウスの生殖細胞に変異誘発作用を及ぼすが、調理したり照射後40日及び90日間貯蔵した馬鈴薯からの抽出物には変異原性が認められなかったと報告した。

参考資料2)、3)では、照射後24日間でナマの馬鈴薯から調製したエタノール抽出物にも、優性致死試験における変異原性は認められなかった。優性致死試験におけるマウス1群の頭数は参考資料1)では5頭であったのが、3)では30頭と実験方法にも一部改善が加えられた。

参考資料：

- 1)V. A. Kopylov, I. N. Osipova and A. M. Kuzin : 7th Mutagenic Effect of Extracts form Gamma-Irradiated Potatoes Tubers on the Sex Cells of Made Mice, Radiobiologija, 12, 524, 1972
- 2)H. V. Levinsky and M. A. Wilson : Mutagenic Evaluation of an Alcoholic Extract form Gamma-Irradiated Potatoes, Fd. Cosmet. Toxicol. 13, 243, 1975
- 3)T. Shibuya, T. Murota, S. Iwahara, K. Hashimoto, A. Minegishi, D.

Hogetus and A. Matsuyama : Mutagenicity Studies on Alcohol Extracts form Gamma Irradiated Potatos/Dominant Lethal Test in Mice, Radioisotope, 31, 74, 1982.

- 4)M. M. Hossain, J. W. Huismans and J. F. Diehl : Mutagenicity Studies on Irradiated Potatoes and Chlorogenic acid ; Micronucleus Test in Rats, Toxicology, 6, 243 1976
- 5)A. N. Zajcev, J. I. Shillinger, Z. M. Kamaldinova and I. N. Osipova : Toxicologic and Hygienic Investigation on Potatoes Irradiated with Beam of Fast Electrons and γ -Rays to Control Sprouting, Toxicology, 4, 267, 1975
- 6)I. N. Osipova : Investigation of Possible Mutagenicity of Extracts Obtained form Irradiated Potatoes Depending upon its Cooking and Time of Storage, Veprosy Pitaniya, 1, 78, 1974

照射馬鈴薯 (60Gy) によるラットの雌の
卵巣重量変化の可能性について

60krad (600Gy) 照射群 (P-60) で、6ヵ月目に卵巣の実重量 (実測値) 及び比重 (体重比) が対照群及び非照射群 (P-0) に比べて有意の減少を示した (表44-1)。

しかし、他の検査時期では、P-60群は3ヵ月目及び24ヵ月目に増加を示し、12ヵ月目では減少傾向が認められた。つまり、卵巣重量の経時的推移には一定の傾向が認められない。更に、病理学的検査においても何らの変化も見られなかった。薬剤の場合には卵巣重量が減少すると病理学的検査でも萎縮などの異常が認められることから、本結果は照射の影響でないとは判定できる。

表44-1 照射馬鈴薯投与ラットの卵巣重量の変化

月数	群	対照	非照射	0.15kGy	0.30kGy	0.60kGy
3ヵ月目	匹数	5	5	5	5	5
	実測値	77.50 ±25.70	75.90 ±26.06	101.70 ±19.94	89.80 ±46.21	96.10 ±29.89
	体重比	32.60 ±12.89	33.79 ±14.12	46.40 ±13.15	41.52 ±21.81	42.62 ±12.31
6ヵ月目	匹数	5	5	5	5	5
	実測値	67.7 ±8.1	68.3 ±18.2	69.5 ±16.1	66.8 ±24.6	44.8**(*) ±7.6
	体重比	26.96 ±3.58	25.99 ±6.37	28.34 ±6.01	26.46 ±10.79	17.74**(*) ±2.75
12ヵ月目	匹数	5	5	5	5	5
	実測値	56.7 ±28.8	60.8 ±25.7	73.2 ±55.4	49.2 ±11.1	43.7 ±3.73
	体重比	21.38 ±9.81	22.71 ±9.73	25.11 ±18.07	18.08 ±3.44	16.02 ±2.83
24ヵ月目	匹数	10	9	8	8	11
	実測値	92.1 ±61.8	155.6 ±57.0	213.0 ±53.6	90.0 ±35.8	124.5 ±44.2
	体重比	26.56 ±14.89	47.17 ±35.36	67.05 ±37.68	33.54 ±13.98	42.25 ±13.19

単位：実測値：mg、体重比：mg/100g体重。

**：P<0.01；対照群と比べ有意差あり。(*)：P<0.05；非照射群と比べ有意差あり。

非照射=P-0、0.15kGy=P-15、0.3kGy=P-30、0.6kGy=P-60

参考資料：

- 1)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)：食品照射研究運営会議、6、1971

照射馬鈴薯（150Gy）によるラットの成長抑制の可能性について

雄では非照射群と全ての照射群（P-15、P-30、P-60）が10週目頃より対照群に比べ体重増加が抑制された（図45-1）。増加率で見ると、P-60群が53週目以降対照群に比べ有意に低かった（表45-1）。

又、雌では70週目頃よりP-30群及びP-60群が非照射群に比べ低い値を示した（図45-2）。増加率でもP-30及びP-60群が対照群及び非照射群に比べ有意に低かった（表45-1）。

しかし、これらの体重あるいは体重増加率の数値には線量と変化の間に用量関係が認められない。又、血液形態学、血清生化学、病理学等の諸検査の結果には、体重増加の抑制に結び付くような影響は認められない。

過去多くの毒性試験の経験から、体重に検体投与が起因すると思われる変化があれば、定期的実施した血液形態学的検査、血清生化学的検査及び臓器重量を含む病理学的検査の結果にも、検体の種類によって異なるが、何らかの変化が見られるものが多い。このような場合に生物学的意義があるものとする。

例えば、旧国立衛生試験所安全性生物試験センター毒性部で実施した塩基性炭酸銅のラットを用いた12ヵ月間投与試験では、体重増加の抑制が雄の最高用量群（2,000 ppm群）で認められた。そして血清生化学的検査において、トランスアミナーゼ（GOT、GPT）、あるいは乳酸脱水素酵素の活性値に明らかな上昇が見られ、肝臓を組織学的に観察したところ、肝細胞の壊死が見られた。この実験では塩基性炭酸銅の投与により肝臓の機能低下が起り、同時に体重増加の抑制を起こしたものと推察された。

図45-1 雄の体重曲線

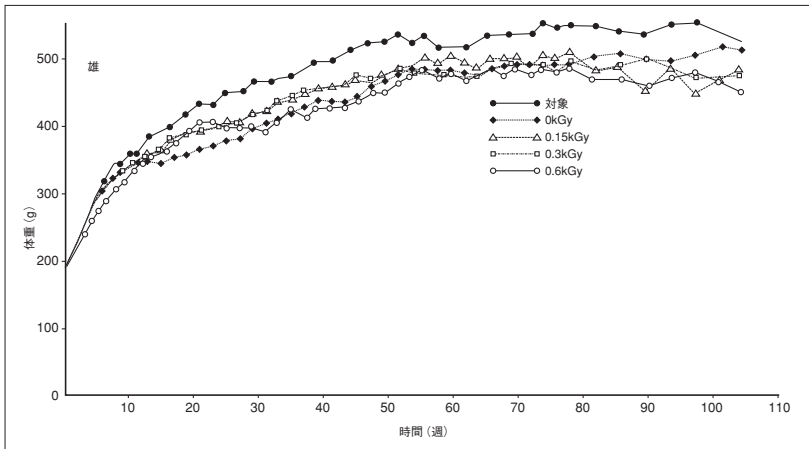


図45-2 雌の体重曲線

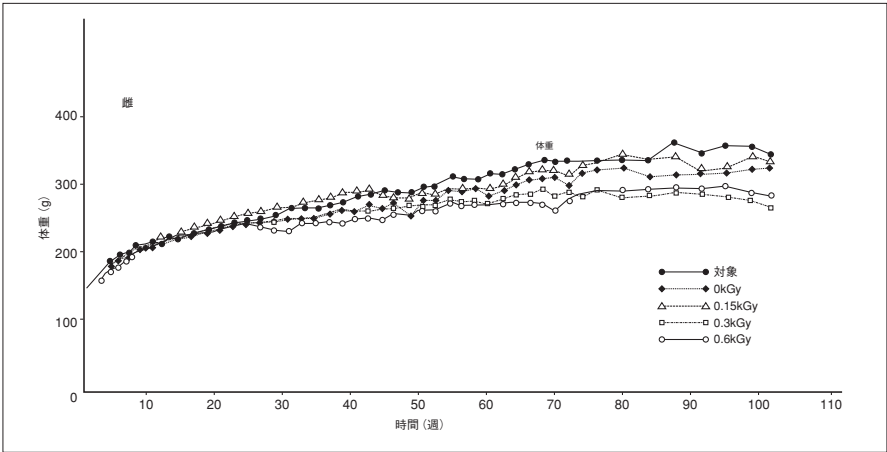


表45-1 体重増加率

		例数	53週		例数	81週		例数	105週	
雄	対 照	15	175.9	± 36.7	12	196.6	± 31.5	10	189.7	± 39.5
	非照射	14	168.8	± 62.2	11	193.9	± 79.8	7	193.3	± 68.3
	0.15kGy	15	142.7*	± 47.2	8	160.8	± 45.7	3	176.2	± 29.5
	0.3kGy	12	138.2**	± 20.0	9	141.1**	± 39.6	4	158.0	± 37.2
	0.6kGy	13	147.8*	± 47.3	10	150.7**	± 29.9	7	140.4**	± 19.6
雌	対 照	15	102.3	± 27.2	13	127.4	± 31.5	11	137.8	± 54.6
	非照射	13	92.9	± 15.5	13	124.7	± 50.1	9	130.4	± 36.2
	0.15kGy	14	95.1	± 19.3	11	139.8	± 35.1	8	124.5	± 45.4
	0.3kGy	14	83.4	± 28.6	13	92.0**	± 28.1	8	84.6*(*)	± 33.3
	0.6kGy	13	74.7*	± 27.3	12	93.6*	± 43.9	11	90.9*(*)	± 40.1

$$\text{体重増加率} = \frac{\text{測定時の体重} - \text{当初の体重}}{\text{当初の体重}} \times 100$$

* > 0.05 ** > 0.01 対照群に対して (*) > 0.05 (**) > 0.01 非対照群に対して
 非照射 = P-0, 0.15kGy = P-15, 0.3kGy = P-30, 0.6kGy = P-60

以上、照射馬鈴薯による体重増加の抑制は他の検査結果との関連性がないことから、照射馬鈴薯による影響とは考えられない。

参考資料：

- 1)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）：食品照射研究運営会議、6、1971

照射馬鈴薯(150Gy)によるラットの肺、脾臓の重量変化、冠状動脈硬化症、散在性心筋炎発生の可能性について

60krad (600Gy) 照射馬鈴薯投与群 (P-60) の雌の肺の実重量及び比重量が3、12ヵ月目に非照射群と比べ有意に増加した。12ヵ月目では対照群とも有意差が見られた。

しかし、これらの数値には用量関係は認められない。さらに6、24ヵ月目では有意差はなく、経時的にみて一定の傾向はない。更に、肺重量の増加を示唆するような変化は肉眼的にも組織学的にも認められない。このことから、雌のP-60群での肺重量の増加は偶発的なものと思われる。

脾臓重量は表46-1に示すように、対照群と非照射群及び照射各群の間並びに観察時期との間で一定の傾向は認められない。又、いずれの時期でも照射に起因すると見られる病変は観察されない。

表46-1 脾臓重量の変化

観察時期	実重量	比重量	
3ヵ月目	↑ (P-15)	↑ (P-15)	↑、↓：対照群に比べ有意に増加、 又は、減少 (↓)：非照射群に比べ有意に減少 —：有意差なし
6ヵ月目	—	↑ (P-60)	
12ヵ月目	—	—	
24ヵ月目	(↓) (P-30)	—	

以上のように、照射馬鈴薯をラットに投与しても肺及び脾臓に影響を与えないものと推察される。

参考資料：

- 1)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)：食品照射研究運営会議、6、1971

照射馬鈴薯によるラットの雄の
15ヵ月目以前の死亡の可能性について

照射馬鈴薯投与実験における15ヵ月目以前の死亡数は以下のものである。

- 対照群……………1匹
- 非照射群……………0匹
- 15krad (150Gy) ……5匹
- 30krad (300Gy) ……5匹
- 60krad (600Gy) ……3匹

表47-1 自然死亡動物の剖検所見

検査例数		雄					雌				
		対照	P-0	P-15	P-30	P-60	対照	P-0	P-15	P-30	P-60
部位及び種類		5	7	12	11	8	5	7	7	7	4
脳下垂体	出血								1		
側頭部	膿瘍			1							
肺	肺炎	4	5	9	10	7	3	4	5	5	4
肝	腫張			1	1	1				1	
	腫瘤								1		
	褪色		1	2	3		1	1		1	
	壊死							1		1	
	囊虫	1									
胃	褪色	1			1						
	脾						1	1	1		
	肥大				1						
	萎縮				1			1	1	1	
	血腫			1							
	腫瘤			1							
副腎	肥大					1	1				
腸	充出血									1	
腸間膜リンパ節	腫瘤		1			1		1	1		
卵巣	囊腫									1	
膀胱	結石			1							
	血腫					1					
腹腔	腹水貯留			1	1			1		1	
胸腔	胸水貯留						1				
頸部	腫瘤				1					1	
腹部	腫瘤							1	2		
肛門周囲	腫瘤						1				

非照射=P-0、0.15kGy=P-15、0.3kGy=P-30、0.6kGy=P-60

又、死亡初発時期は、対照群は15ヵ月目、非照射群は18ヵ月目、15krad (150Gy) 群は15ヵ月目、30krad (300Gy) 群は6ヵ月目及び60krad (600Gy) 群は12ヵ月目である。

15ヵ月目までの死亡数及び死亡の初発時期には、用量関係が認められない。途中死亡動物の剖検所見(表47-1)では、各群共に肺炎像がほとんどの動物に見られ、照射に起因すると思われる変化は見出されない。更に、3、6及び12ヵ月目に実施した定期的剖検でも肺炎像が散見される。なお、この肺炎像の発生数には群間で一定の傾向は認められない。

以上、15ヵ月目以前の死亡動物数及び死亡初発時期に群間で一定の傾向がないことから、特に、照射により死亡の発現が早くなるという事はないものと推察される。

また、死亡の原因としては肺炎が考えられる。

参考資料：

- 1)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)：食品照射研究運営会議、6,1971

照射玉ネギ(150、300Gy)による
ラットの死亡率上昇の可能性について

玉ネギ25%添加のラット各群の死亡数は、雄で5~10例、雌で5~11例の範囲にあり、全体的に性差は認められない。

雄では、150Gy及び300Gyの両群が、対照及び非照射群に比べ有意差を示す。

150Gyと300Gyの死亡率は、各々約61%と65%とほぼ等しく、用量反応関係は認められない。又、これらの値は当時の飼育条件下でのウイスター系ラットの死亡率66.7~75.0% (参考資料2) と比べても高くなく、通常の変動範囲に収まる。又、他の検査項目、即ち体重、血液形態学的検査、血清生化学的検査、臓器重量、病理組織学的検査のいずれにも照射の影響を示唆するような変化は認められなかった。

又、雌では、死亡率は70Gyで最も高く、以下150Gy、非照射、300Gy、対照群の順で、用量反応関係は認められず、その他の検査でも照射の影響を示唆する所見を見ない。

以上の事から、照射玉ネギ(150Gy、300Gy)の摂取とラットの死亡率との間には一定の相関は認められず、照射玉ネギの摂取によって死亡率が上昇する事は考えられない。

参考資料：

- 1)放射線照射による玉ネギの発芽防止に関する研究成果報告書(付録)：食品照射研究運営会議、7,1980
- 2)関田、他：ラットにおける制限食に関する研究—成長、死亡率及び生化学的变化について、東京獣医畜産学雑誌、26、43,1978

玉ネギ25%添加によるラットの雄の精巣重量の変化については表49-1に示す通りである。

精巣重量で認められる変化のうち、対照群に対して見られる有意差はいずれも比重量の増加である。この変化は非照射群及び照射群に共通して認められる変化で、これは玉ネギを25%添加した飼料を摂取したためと考えられる体重増加の抑制に起因すると考えるのが妥当で、照射の影響を示唆するものではない。非照射群と照射群の比較では、6及び12ヵ月目の150Gy群の実重量並びに12ヵ月目の70Gy群の比重量が有意な減少を示す。しかし、150Gy群の減少は対照群とは有意差を認めない変化であり、又、70Gy群の減少は逆に対照群に対して有意に高い変化である。このように非照射群に対して認められた有意の減少は照射の影響を示唆するような変化とは考えられない。更に、変化に用量関係も認められず、又、実重量及び比重量の両者に同時に有意差を認める変化ではない事等からも照射の影響を示唆するような成績とは考えられない。

卵巣重量では、表49-2に示すように照射の影響を示唆するような結果は認められない。

以上、本実験では照射の影響を示唆するような成績は認められなかった。

表49-1 照射玉ネギ投与ラットの精巢重量の変化

群	対 照	非 照 射	7 0 G y	1 5 0 G y	3 0 0 G y	
3 カ 月 目	匹数	5	5	5	5	
	体重 (g)	367.0 ± 41.0	321.0 ± 28.7	332.4 ± 20.3	346.0 ± 17.2	347.4 ± 40.9
	実測値 (g)	2.65 ± 0.25	2.80 ± 0.23	2.85 ± 0.11	2.90 ± 0.27	2.79 ± 0.17
	比体重 (g%)	0.73 ± 0.12	0.87 ± 0.05*	0.86 ± 0.07	0.84 ± 0.11	0.81 ± 0.06
6 カ 月 目	匹数	5	5	5	5	
	体重 (g)	441.8 ± 31.3	388.0 ± 45.7	366.4 ± 29.0**	381.8 ± 27.0**	400.0 ± 22.4*
	実測値 (g)	2.97 ± 0.42	3.33 ± 0.34	2.97 ± 0.20	2.81 ± 0.29(*)	2.90 ± 0.34
	比体重 (g%)	0.67 ± 0.09	0.88 ± 0.14*	0.81 ± 0.05*	0.74 ± 0.05	0.74 ± 0.03
12 カ 月 目	匹数	5	5	5	5	
	体重 (g)	515.8 ± 35.8	409.2 ± 56.3**	435.4 ± 33.0**	417.6 ± 39.9**	473.8 ± 64.7*
	実測値 (g)	2.84 ± 0.34	3.14 ± 0.19	2.88 ± 0.32	2.91 ± 0.11(*)	3.16 ± 0.29
	比体重 (g%)	0.55 ± 0.07	0.79 ± 0.10**	0.66 ± 0.07**	0.70 ± 0.05**	0.68 ± 0.11
24 カ 月 目	匹数	10	9	10	6	
	体重 (g)	508.7 ± 71.8	408.2 ± 37.5**	424.0 ± 44.1**	434.7 ± 48.2*	390.4 ± 40.9**
	実測値 (g)	2.96 ± 0.43	3.16 ± 0.40	2.92 ± 0.50	3.34 ± 0.67	2.79 ± 0.42
	比体重 (g%)	0.59 ± 0.07	1.01 ± 0.70	0.69 ± 0.12*	0.78 ± 0.18**	0.72 ± 0.06**

(*P<0.05、**P<0.01；対照群と比べ有意差あり。*)P<0.05；非照射群と比べ有意差あり)

表49-2 照射玉ネギ投与ラットの卵巣重量の変化

群	対 照	非 照 射	7 0 G y	1 5 0 G y	3 0 0 G y	
3 カ 月 目	匹数	5	5	5	5	
	体重 (g)	227.0 ± 15.0	215.2 ± 20.7	210.0 ± 14.8	215.2 ± 19.4	217.6 ± 25.3
	実測値 (mg)	77.5 ± 25.7	75.0 ± 25.9	101.0 ± 39.0	103.3 ± 29.1	104.0 ± 16.8
	比体重 (mg%)	34.6 ± 13.2	34.7 ± 10.0	47.8 ± 17.3	48.3 ± 13.2	48.4 ± 10.4
6 カ 月 目	匹数	5	5	5	5	
	体重 (g)	252.0 ± 18.0	235.8 ± 27.2	222.4 ± 20.5*	232.0 ± 20.4	227.0 ± 10.5*
	実測値 (mg)	67.7 ± 8.1	71.7 ± 24.3	55.3 ± 24.7	65.7 ± 4.4	59.6 ± 12.8
	比体重 (mg%)	27.0 ± 3.6	29.9 ± 7.2	25.9 ± 14.6	28.5 ± 3.4	26.4 ± 6.9
12 カ 月 目	匹数	5	5	5	5	
	体重 (g)	263.2 ± 20.5	245.0 ± 15.4	240.8 ± 12.8	236.2 ± 10.6	271.2 ± 34.0
	実測値 (mg)	56.7 ± 28.8	50.9 ± 12.7	42.8 ± 19.5	37.6 ± 9.0	62.8 ± 33.1
	比体重 (mg%)	21.4 ± 9.8	21.0 ± 6.0	17.8 ± 7.7	16.0 ± 3.9	22.1 ± 9.8
24 カ 月 目	匹数	10	6	4	5	
	体重 (g)	334.7 ± 50.6	239.8 ± 37.0**	219.3 ± 25.4**	245.0 ± 20.2**	239.1 ± 38.3**
	実測値 (mg)	92.1 ± 61.8	111.6 ± 94.0	70.3 ± 23.0	111.1 ± 63.7	106.4 ± 49.1
	比体重 (mg%)	26.6 ± 14.9	48.3 ± 40.8	31.9 ± 9.7	45.2 ± 24.7	46.1 ± 22.7*

*P<0.05、**P<0.01：対照群と比べ有意差あり

参考資料：

1)放射線照射による玉ネギの発芽防止に関する研究成果報告書 (付録)：食品照射研究運営会議、7.1980

照射玉ネギによるマウスの肋軟骨癒合、異常胎子（骨格面）発生の可能性について

骨格検査では、照射玉ネギ（150Gy）2%を添加した実験で、第2世代の末期胎子の頸肋及び新生子の肋軟骨癒合の出現率が対照群（玉ネギを含まない飼料で飼育）及び非照射群に比べ高い値を示す。しかし、有意差を認めない事、又、下記の理由によりこれらの出現率の変化は正常の変動範囲内とされ、照射との関連性は否定された。

本実験での末期胎子での頸肋の出現率は表50-1に示す通り、対照群においても20.0～83.9%の範囲を示し、頸肋の出現率に大きな変動がある事が示されている。照射群の出現率は20.0～41.2%であり、この変動範囲内にある。又、3世代目の出現率では照射群だけが低いという傾向は見られない。更に、300Gy照射した玉ネギを4%添加した飼料を摂取させた実験でこのような変化は認められない。

表50-1 照射玉ネギ投与マウスの次世代試験における頸肋の出現率

時期	群	照射玉ネギ2%添加			照射玉ネギ4%添加		
		F ₁ 世代	F ₂ 世代	F ₃ 世代	F ₁ 世代	F ₂ 世代	F ₃ 世代
末期胎子	対照	33.3	20.0	83.9	41.0	60.6	53.5
	非照射	27.1	19.2	3.3	41.4	38.9	55.0
	150Gy	20.4	41.2	40.6*			
	300Gy				49.4	46.1	49.5
新生子	対照	30.3	15.0	61.9			79.5
	非照射	67.3	46.7	8.6			70.9
	150Gy	47.6	68.9	59.8(*)			
	300Gy						82.4

*P<0.05：対照群と比べ有意差あり。(*P<0.05：非照射群と比べ有意差あり)。

表50-2 照射玉ネギ投与マウスの次世代試験における肋軟骨癒合の出現率

時期	群	照射玉ネギ2%添加			照射玉ネギ4%添加		
		F ₁ 世代	F ₂ 世代	F ₃ 世代	F ₁ 世代	F ₂ 世代	F ₃ 世代
新生子	対照	12.1	15.0	28.6			9.1
	非照射	6.1	17.8	25.7			2.6
	150Gy	19.0	31.1	22.5			
	300Gy						11.8

肋軟骨癒合の出現率は表50-2に示す通りである。対照群での出現率は9.1～28.6%の変動範囲を示しており、第2世代新生子での照射群（150Gy）での発生率31.1%はこの範囲よりかけ離れた値ではなく、変動範囲内のバラツキと考えるのが妥当である。

又、第3世代では、逆にわずかではあるが、対照群及び非照射群に比べて照射群(150Gy)での出現率が低い値を示す。なお、頸肋は胎仔で発生率が高く、成長に伴い消滅するし、頸肋のデータはバラツキが多いので動物試験では重要な検査項目ではない。

参考資料：

- 1)放射線照射による玉ネギの発芽防止に関する研究成果報告書(付録)：食品照射研究運営会議、7,1980

照射米によるアカゲザルの雄の 甲状腺、心臓、肺、精巣重量変化の可能性について

1kGyの照射群において、甲状腺、心臓及び肺の比重量が非照射群に比べて有意の低下が認められた。しかし、対照群と比べて有意差はなく、実重量ではこれらの臓器に各群間で有意差はなかった。

これは、非照射群の体重が他の2群と比べて17%程度と低かったため非重量が大きくなり、照射群との間で差を示したものと考え（非照射群は実験当初より体重増加量が他の2群に比べ悪い（図15-1））。

又、組織学的検査（表51-1）で甲状腺、心臓にはなんらの変化も認められない。更に、肺では、肺泡の泡沫細胞浸潤、炭粉沈着、肺泡壁の肥厚及び腺腫様増殖を認める。これらの変化は各群に共通して見られ、その発生数は群間で差はない。

精巣重量は、非照射群の比重量が他の2群に比べて高い数値を示したが、群間で有意差はなく、更に、実重量でも有意差は見られない。組織学的検査においては3群とも変化を認めない。

以上の事を勘案すると、照射米をアカゲザルに投与しても、甲状腺、心臓、肺及び精巣に影響を与えないと結論される。

図51-1 体重増加量

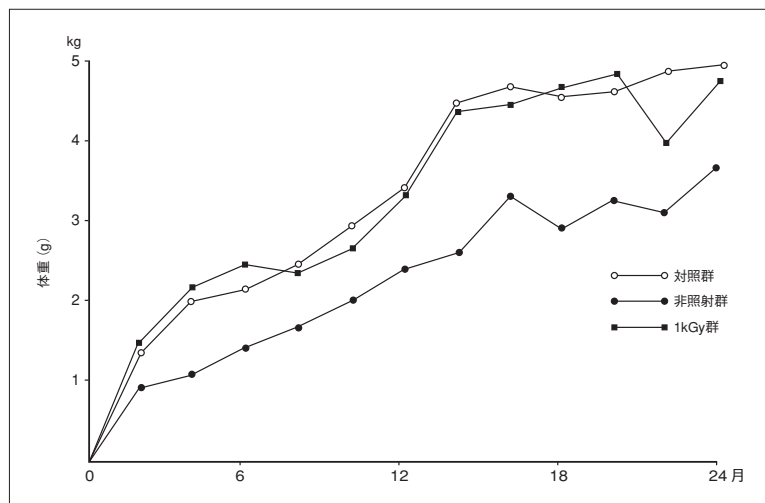


表51-1 照射米による組織学的所見

臓器	所見	対照群 動物数 5	非照射群 5	1kGy群 5
脳	偽神経細胞食現象	±	1	
下垂体				
甲状腺				
胸膜				
心				
肺	肺胞			
	泡沫細胞浸潤	+		1
	炭粉沈着	± 1		
		+	2	1
	肺胞壁肥厚	+	3	
腺腫様増殖		++ 1	2	2
		+	1	
肝	限局性壊死	±	1	1
	空胞化	± 3		
		+		1
	円形細胞浸潤	±	1	
腎	尿管			
	上皮性円柱	±	1	
	硝子様円柱	±	2	
	間質			
	円形細胞浸潤	±	1	
脾				
副腎	骨質			
	石灰沈着	+ 2		1
		++		1
膵				
顎下腺				
胃	粘膜下組織			
	円形細胞浸潤	±	1	
小腸				
大腸	粘膜下組織			
	円形細胞浸潤	±		1
精巣				
精囊				
膀胱				
骨髄				
腸間膜リンパ節				
脊髄				
座骨神経				
骨格筋				

±：極軽度 +：軽度 ++：中等度

参考資料：

- 1)放射線照射による米の殺虫に関する研究成果報告書（付録）：食品照射研究運営会議、12,1983

照射小麦による栄養失調児の染色体異常 (リンパ球にポリプロイド) 発生の可能性について

照射小麦によるラット、サルのリンパ球の染色体異常や ポリプロイド増加及び犬の甲状腺炎発生の可能性について

上記の2つの質問は本質的に同様趣旨のものであるのでまとめて解説する。これらの研究はいずれもインドのハイデラバードにある国立栄養研究所 (NIN) の科学者により発表されたものである。

1. Bhaskaramらは蛋白/カロリー栄養失調児15人を5人ずつ3群にわけ、非照射小麦 (N)、Freshly irradiated小麦 (F I)、Stored irradiated小麦 (S I) を与えた。毎日の食事は4g蛋白質/kg体重、200kcal/kg体重で、20g小麦/kg体重を含み、約2g/kg体重の蛋白質が小麦により提供された事になる。蛋白質の他の部分は乾燥スキム・ミルク (脱脂乳) によった。子供達はこのような食事を6週間与えられた。照射は⁶⁰Coのγ線を用いて、75krad (750Gy) /hの線量率で、合計75krad (750Gy) の線量を与えた。照射後小麦はF I群では3週間以内に、S I群では12週間貯蔵後に食事として与えた。

表52-1 小児における照射小麦含有食事によるポリプロイド細胞発生率 (%)
[C. Bhaskaram & G. Sadasivan, Am. J. Clin. Nutr., 28, 130, 1975]

	非照射小麦	貯蔵しない照射小麦 ^(a)	12週間貯蔵した照射小麦
0週	0	0	0
2週	0	0 (0.4) ^(b)	0
4週	0	0.8 (1.2)	0 (0.6)
6週	0	1.8 (3.8)	0.6 (0.8)

^(a) 照射3週間以内に食事に添加。

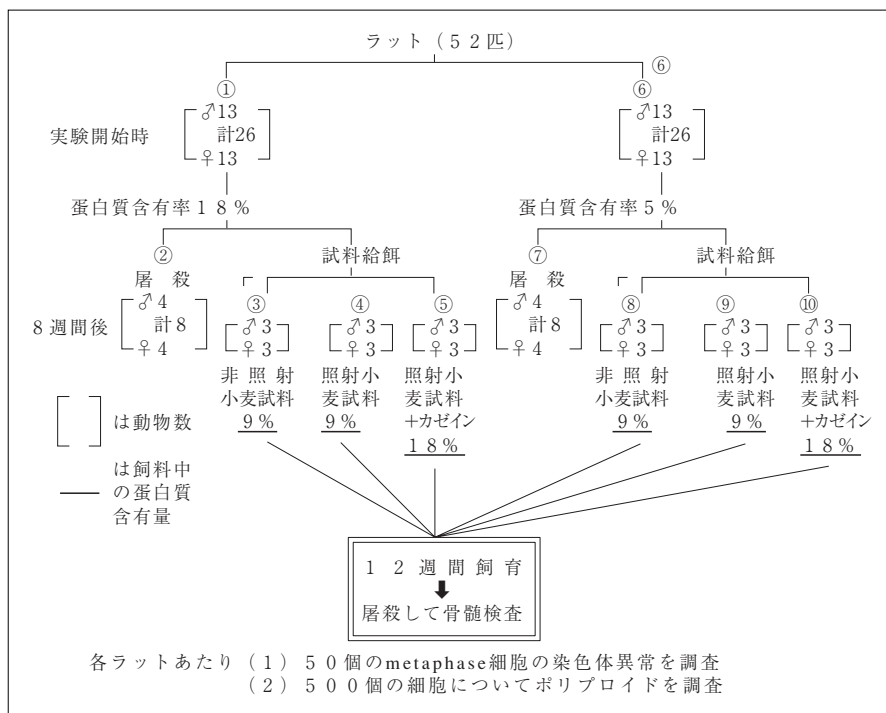
^(b) ()内の数字は明確なポリプロイド細胞以外の異常細胞も含めた細胞数。

検査は体重増加、血清アルブミン量、ヘモグロビン量を測定したが、末梢血液リンパ球を培養してポリプロイド細胞数を0、2、4、6週間後に測定した。調査対象の細胞数は100個/人で、各群総計500個の細胞を調査した。ポリプロイド細胞を調査した結果を表52-1に示すが、著者は次のようにまとめた。

- 1) F I群の5人のうち4人にポリプロイド細胞の誘発・増加が4週間以後認められ、平均誘発率では4週間後で0.8%、6週間後には1.8%に増加した。
- 2) 更に、これらの染色体数を容易に計数できる細胞にその他の異常細胞を加えると、4週間後及び6週間後には各々1.2%及び3.8%となる。
- 3) 非照射小麦を与えたN群の値はいずれも0。

- 4) S I 群ではポリプロイド細胞及び異常細胞ともにF I 群に比べかなり少なかった。
- 5) 照射小麦を与える期間が長い程、ポリプロイド細胞の増加は大きく、照射小麦を食事から除くとポリプロイド細胞は次第に消失する。
- 6) これらの観察はポリプロイド細胞の出現は照射小麦を与えた事による事を明らかに示している。
- 7) 上記3群の間に染色体異常の差異はなかった。
- 8) ポリプロイド細胞誘発の機構は解からないが、照射の結果、小麦中にコルヒチン様物質が生成し、これは貯蔵によって消失するのかもしれない。ポリプロイディ（染色体の変化＝多倍数性）の生物学的重要性は正確には解からないが、ヒトの新生物中、照射後、ウイルス感染中や老化において認められているという。同一研究所から最近、優性致死や染色体異常誘発の報告もあり、照射小麦の変異原性の疑問について慎重な研究が必要であると論述した。

図53-1 骨髓細胞の染色体異常及びポリプロイド調査に使用したラット



2. Vijayalaxmiら (1975年) は同様に照射小麦を給餌したラットの骨髓細胞の染色体異常及びポリプロイド細胞の出現を調査した。52匹のラットを2群 (各群26匹、雌雄各13匹) に分け、8週間にわたり、各々18%及び5%の蛋白質を含む飼料を与

え、各群の雌雄を各々4匹ずつを屠殺（図53-1の②、⑦）し、低蛋白食の染色体への影響を調べる対照として使用した。

残りの動物は1群雌雄各3匹計6匹に分けて6群をつくり、非照射小麦（③、⑧）、照射小麦（④、⑨）、照射小麦+カゼイン（⑤、⑩）含有飼料で飼育した。小麦は飼料中に70%添加した。12週間の飼育後、動物を屠殺して骨髓細胞の染色体を検査した。染色体異常は各ラット当たり50個のmetaphase細胞について、ポリプロイドは500個の細胞について調査し、データは統計処理した。

表53-1 ラットにおける染色体異常に及ぼす食事中蛋白質含有量の影響
[Vijayalaxmi & G. Sadasivan, Int. J. Radiat. Biol., 27, 135, 1975]

	18%蛋白質含有飼料で飼育した動物群 (%)	5%蛋白質含有飼料で飼育した動物群 (%)
染色体の切断・欠失	2.77	13.75
ポリプロイド細胞	0	0.05

表53-2 ラットにおける骨髓染色体異常に及ぼす照射小麦給餌の効果
[Vijayalaxmi & G. Sadasivan, Int. J. Radiat. Biol., 27, 135, 1975]

	18%蛋白質含有飼料			5%蛋白質含有飼料		
	非照射小麦	照射小麦	照射小麦+カゼイン	非照射小麦	照射小麦	照射小麦+カゼイン
染色体の切断・欠失	4.33	6.33	3.00	9.33	9.33	5.00
ポリプロイド細胞	0.00	0.60	0.43	0.10	0.67	0.63

実験結果を表53-1及び表53-2に示す。著者らはこれらの実験結果を次のようにまとめている。

- 1)5%蛋白質給餌は18%蛋白質給餌に比べ染色体異常の発生率は高く、栄養不足自体が染色体に構造的変化を生ずる事を示している。
- 2)飼料中の蛋白質含有率が18%から9%へ低下すると、染色体異常の発生率は増加し（2.77%→4.33%及び6.33%）、蛋白質含有率が5%から9%へ上昇すると、染色体異常発生率は減少（13.75%→9.33%）する。同様に、5%蛋白質含有飼料から蛋白質含有率18%の照射小麦+カゼイン飼料に切替えた場合、染色体異常発生率は5%となり減少する。
- 3)5%蛋白質含有飼料で飼育したラットでは、次の飼料に混入させた小麦を照射してもしなくても染色体異常は同率（9.33%）であるが、18%蛋白質含有飼料で飼育したラットでは照射小麦を添加した方が染色体異常発生率が高い。蛋白質欠乏が染色体異常に及ぼす効果は明らかに照射小麦の効果よりもその程度が大きい。
- 4)ポリプロイド細胞は18%蛋白質含有飼料では0であるが、5%では4,000細胞中に2個（0.05%）認められた。従って、蛋白質のレベル自体はポリプロイド発生

には影響しない。

5)飼料中の蛋白質含有量に関係なく、次の小麦添加飼料による飼育では、照射小麦添加の方が非照射小麦添加よりポリプロイド発生率が高い。又、照射小麦にカゼインを添加した場合も同じようにポリプロイド細胞数が増加した。

以上は同じNINからの論文である。これに対して他の研究所や政府等の追試及びNINの論文に対する批判と評価を紹介する。

追試-1

J. M. Tesh, E. S. Davidson and S. Walker(Life Science Research, Stock, Essex, England)and A. K. Palmer, D. D. Cozens and J. C. Richardson (Huntingdon Research Centre, Huntingdon, Cambridgeshire, England): Studies in Rats fed a diet Incorporating Irradiated Wheat 1. Incidence of Polyploid Configuration in Bone Marrow Cells, 2. Incidence of Micronucleated Polychromatic Erythrocytes in Bone Marrow Cells, 3. Dominant Lethal Assay, IFIP-R45,(1977)

1. 骨髄細胞におけるポリプロイド発生の実験結果の要約：

- 1)小麦はNINと同様、⁶⁰Co γ線 で75krad (750Gy) 照射し、70% (重量比) 飼料に添加した。照射と給餌の間隔は2、4、8週とし、生命科学研究所 (LSR) とハッチンドン研究所 (HRC) の両研究所で2連研究として行なった。
- 2)非照射小麦粉と照射後2週間以内の照射小麦粉を添加した実験飼料を12もしくは14週間給餌した後、屠殺し、骨髄標本を作成して各ラットの500個のmetaphase細胞についてポリプロイド発生を計数した。実験中には飼料摂取量、体重、死亡率には照射による変化は認められなかった。
- 3)照射小麦からの小麦粉に起因するポリプロイド細胞発生率の増加やポリプロイド細胞を少なくとも1個有するラットの匹数の変化はいずれも認められなかった。これはNINのラット骨髄に関する実験結果を支持しない。(表53-3、表53-4)

表53-3 ポリプロイドの発生率 (%)

群	調査したラット数	計数者		調査したラット数	計数者	
		No.1	No.2		No.1	No.2
非照射小麦粉入り飼料-I	13	0.154	0.047	13	0.215	0.093
照射後2週間の小麦粉入り飼料	14	0.186	0.074	17	0.118	0.047
非照射小麦粉入り飼料-II	15	0.067	0.014	15	0.147	0.040

備考：各ラットあたり500個のmetaphase細胞を調査。SPFラットを使用
計数者No.1はLSR、No.2はHRC

表53-4 500個細胞あたり少なくとも1個のポリプロイド細胞を
含むラット数【() 内%】

群	雄		雌	
	計数者No.1	計数者No.2	計数者No.1	計数者No.2
非照射小麦粉入り飼料-I	5/13 (38.5)	3/13 (23.1)	7/13 (53.8)	4/13 (30.8)
照射後2週間の小麦粉入り飼料	7/14 (50.0)	4/14 (28.6)	8/17 (47.1)	4/17 (23.5)
非照射小麦粉入り飼料-II	4/15 (26.7)	1/15 (6.7)	8/15 (53.3)	3/15 (20.0)

2. ラット骨髓細胞の小核試験：

CD系統のSPFラットを用いて、雌雄各15匹合計30匹を1群として、非照射小麦、照射後2、4、8週間の小麦を添加した。4種の飼料を用いて4群をつくり、12週間飼育した。12週間後に屠殺して小核を誘発した細胞を計数した結果、照射小麦による小核誘発の増加を認めなかった。(表53-5)

表53-5 照射小麦粉による小核誘発の試験

群	ラット性別	調査したラット数	各ラット、多染性赤血球2,000個あたりの小核誘発頻度	
			平均	範囲
非照射小麦粉入り飼料-I	雄	15	1.67	0~5
	雌	15	1.33	0~3
照射小麦粉入り飼料	雄	15	1.33	0~3
	雌	15	1.67	0~4
非照射小麦粉入り飼料-II	雄	5	1.60	0~3
	雌	5	1.00	0~2
研究室標準(陰性対照)		175	1.19	0~6

備考：小麦 γ 線照射の線量は750Gy、小麦粉の飼料への添加量は70%（重量比）

3. 優性致死試験：

照射小麦の変異原性をCD系統の雄ラットを用いて調査した。雄ラットは次の5群に分けられて、12週間試験飼料で飼育した。

表53-6 CD系統雄ラットによる照射小麦の変異原性試験

群	試験飼料	雄ラット数
1	対照：非照射小麦粉入り飼料	15
2	照射小麦粉入り飼料を短期給餌	15
3	照射後8週間の小麦粉入り飼料	15
4	照射後4週間の小麦粉入り飼料	15
5	照射後2週間の小麦粉入り飼料	15

備考：小麦の照射は ^{60}Co の γ 線で75krad（750Gy）いずれの小麦も製粉して飼料に70%（重量比）添加。

ついで、各雄ラットは試験飼料による飼育終了後、第7日目から2~3匹のバーজন雌ラットと交配させ、交配期間は標準研究室飼料を給餌した。雄ラットは毎週最高

5日間雌ラットと交配させ、5日目の終りには雌ラットを離し、各雄ラットは次週のはじめに新しい雌ラットと交配させ、同様の操作を合計10週間繰り返した。但し、第1群は6週間である。

各群の雌ラットの半分は妊娠5日目、残りの半分は20日目に屠殺し、卵を取出し、受精や発生の正常性を検査した。(表53-6)

その結果「小麦の照射は優性致死突然変異を雄ラットの生殖細胞に引き起こすような変化を生じない」と結論した。又、体重増加、交配能力、繁殖率にも照射の影響は認められなかった。

4. チャイニーズ・ハムスターを用いたポリプロイドと小核の分析

田中は7.5～30kGy照射した小麦をチャイニーズ・ハムスターに給飼したが、48時間及び72時間後の末梢血中の小核は増加せず、ポリプロイドも非照射群と比べて増加しないことを明らかにした。また、ラットを照射小麦で6～12週間飼育しても小核やポリプロイドの増加がないことを明らかにした(表53-7)。

表53-7 照射小麦粉の経口投与によるチャイニーズ・ハムスター骨髓細胞でのポリプロイド誘発

線量、kGy	給餌期間(時間)	動物数	分析細胞数	小核を有する細胞	ポリプロイド、%
非照射	72	6	13200	10	0.076
7.5 (窒素中)	72	6	13200	5	0.038
15 (窒素中)	72	6	13200	20	0.152
30 (窒素中)	72	6	13200	21	0.159
7.5 (空气中)	72	6	13200	7	0.053
15 (空气中)	72	6	13200	24	0.182
30 (空气中)	72	6	13200	20	0.152

表53-8 Group Mean Date for Females Killed on Day 5 and Day 20 Post-Coitum

Group 1: Control; Non-Irradiated Wheat-Based Diet
 Group 2: Single Short Exposure to Irradiated Wheat-Based Diet Followed by Recovery
 Group 3: Wheat-Based Diet 8 Weeks Post-Irradiation
 Group 4: Wheat-Based Diet 4 Weeks Post-Irradiation
 Group 5: Wheat-Based Diet 2 Weeks Post-Irradiation

Week	Group	Day 5										Day 20									
		Corporalutaea		Eggs		Comments			Corporalutaea	Implantation	Viable foetuses			Resorptions			Implantation loss(%)				
		Recovered	Cleaved	Morulae	Blastocysts	a	b	c			d	♂	♀	Total	Early	Late	Total	Pre-*	Post-		
1	1	14.0	11.1	10.9	5.3	5.3	0.2	0.2	0.0	0.1	16.4	14.7	7.8	6.6	14.4	0.3	0.0	0.3	8.8	1.7	
	2	13.8	10.8	10.6	5.0	5.6	0.3	0.0	0.0	0.0	14.9	12.7	7.2	5.1	12.3	0.1	0.3	0.4	13.0	3.1	
	3	15.4	12.1	12.0	4.1	7.8	0.1	0.0	0.0	0.1	15.5	13.9	7.2	6.5	13.6	0.3	0.0	0.3	9.6	2.0	
	4	14.3	10.6	10.5	3.5	6.8	0.2	0.2	0.0	0.0	15.5	14.0	6.3	7.5	13.8	0.2	0.0	0.2	8.8	1.4	
	5	16.2	10.9	10.6	4.3	6.1	0.3	0.1	0.0	0.2	16.5	14.8	6.5	7.4	13.8	1.0	0.0	1.0	8.0	6.7	
2	1	15.6	12.0	11.5	4.5	6.7	0.5	0.3	0.0	0.0	14.3	12.9	6.7	5.9	12.6	0.3	0.0	0.3	6.1	2.5	
	2	16.0	14.3	13.7	4.8	8.8	0.7	0.0	0.0	0.2	16.0	14.4	6.4	7.3	13.8	0.6	0.1	0.7	5.0	4.6	
	3	14.5	11.8	11.3	5.5	5.5	0.5	0.1	0.0	0.2	15.1	13.9	7.1	6.6	13.7	0.1	0.0	0.1	2.7	1.5	
	4	14.8	13.3	12.4	4.4	7.5	0.9	0.1	0.0	0.4	15.1	14.1	7.2	6.6	13.8	0.2	0.1	0.4	0.0	2.5	
	5	16.3	13.4	12.5	5.7	6.5	0.8	0.2	0.0	0.2	14.7	13.7	7.2	6.3	13.5	0.3	0.0	0.3	0.0	2.0	
3	1	14.9	11.8	10.6	3.5	6.8	1.2	0.0	0.3	0.0	15.6	14.3	7.5	6.6	14.2	0.2	0.0	0.2	0.0	1.1	
	2	16.2	12.2	10.8	4.3	5.7	1.3	0.1	0.8	0.1	15.8	13.9	6.8	6.4	13.3	0.5	0.2	0.7	1.2	4.8	
	3	15.1	12.7	11.3	3.6	6.6	1.4	1.1	0.0	0.0	15.1	13.7	6.7	6.9	13.6	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	
	4	16.1	12.6	11.7	5.5	5.4	0.9	0.5	0.1	0.1	15.6	14.1	6.9	6.8	13.7	0.3	0.1	0.5	2.6	3.3	
	5	15.1	11.7	10.7	4.6	6.1	1.0	0.0	0.0	0.0	15.0	14.4	7.0	7.0	14.0	0.3	0.1	0.4	0.0	2.7	
4	1	14.7	10.4	9.9	3.6	5.9	0.5	0.4	0.0	0.0	16.3	14.5	6.9	6.8	13.7	0.6	0.3	0.8	6.1	5.7	
	2	18.3	14.8	14.5	6.2	8.3	0.3	0.1	0.0	0.0	16.3	13.7	5.8	7.4	13.2	0.4	0.1	0.5	14.2	3.7	
	3	16.1	13.4	12.9	5.9	6.9	0.6	0.1	0.0	0.0	15.8	14.2	6.0	7.7	13.7	0.3	0.2	0.5	6.5	3.3	
	4	16.2	13.9	13.4	5.0	8.0	0.5	0.1	0.3	0.0	15.0	14.3	6.6	6.3	12.9	1.4	0.0	1.4	1.9	9.6	
	5	17.9	13.6	12.6	3.8	8.7	1.0	0.1	0.0	0.0	16.6	14.8	8.7	5.8	14.4	0.3	0.1	0.4	3.8	2.8	
5	1	15.2	9.6	9.4	3.3	5.8	0.2	0.2	0.0	0.1	15.3	13.7	6.7	6.7	13.4	0.3	0.0	0.3	8.7	2.8	
	2	16.2	10.4	9.9	4.0	5.5	0.5	0.4	0.0	0.0	14.0	12.9	5.4	6.4	11.9	1.0	0.0	1.0	3.1	7.2	
	3	18.8	11.3	10.8	3.5	7.3	0.5	0.0	0.1	0.0	15.5	13.6	6.2	6.4	12.5	1.1	0.0	1.1	8.6	8.0	
	4	18.3	13.6	12.7	5.1	7.0	0.9	0.3	0.2	0.3	14.4	12.2	5.6	6.5	12.2	0.1	0.0	0.1	8.6	0.6	
	5	16.2	12.9	12.4	4.8	7.3	0.4	0.1	0.1	0.1	15.9	14.5	6.8	7.2	14.0	0.5	0.0	0.5	6.4	3.2	

a-Unfertilised ova. b-Retarded cleavage(<12 cells). c-Irregular cleavage. d-Disintegrating ova. *-Corrected for losses due to non-fertilization of ova.

表53-9 Group Mean Date for Females Killed on Day 5 and Day 20 Post-Coitum

Group 1: Control; Non-Irradiated Wheat-Based Diet
 Group 2: Single Short Exposure to Irradiated Wheat-Based Diet Followed by Recovery
 Group 3: Wheat-Based Diet 8 Weeks Post-Irradiation
 Group 4: Wheat-Based Diet 4 Weeks Post-Irradiation
 Group 5: Wheat-Based Diet 2 Weeks Post-Irradiation

Week	Group	Day 5										Day 20									
		Corporaluthea		Eggs		Comments			Corporaluthea	Implantation	Viable foetuses			Resorptions			Implantation loss(%)				
		Recovered	Cleaved	Morulae	Blastocysts	a	b	c			d	♂	♀	Total	Early	Late	Total	Pre-*	Post-		
6	1	14.5	11.4	10.4	2.9	7.3	1.0	0.0	0.2	0.0	15.9	14.1	7.0	6.8	13.8	0.2	0.2	0.3	2.4	2.2	
	2	15.3	12.3	11.9	5.0	6.6	0.4	0.1	0.3	0.0	18.4	13.6	6.4	6.9	13.3	0.4	0.0	0.4	23.6	2.8	
	3	16.5	13.6	13.2	3.8	9.0	0.4	0.3	0.0	0.0	15.5	13.5	5.9	7.3	13.2	0.3	0.0	0.3	9.7	2.3	
	4	16.5	12.8	11.8	5.2	6.4	1.0	0.1	0.0	0.1	16.7	15.0	6.8	7.7	14.5	0.5	0.0	0.5	2.2	3.3	
	5	14.8	10.9	10.8	2.8	7.7	0.2	0.3	0.0	0.0	15.5	14.7	6.1	8.1	14.2	0.3	0.2	0.5	4.4	3.4	
7	2	16.3	11.4	11.1	3.4	7.5	0.3	0.0	0.3	0.0	18.0	16.3	8.2	7.4	15.7	0.6	0.1	0.7	7.4	4.1	
	3	16.6	11.9	11.4	4.1	6.9	0.5	0.1	0.1	0.1	16.7	14.0	5.2	8.0	13.2	0.8	0.0	0.8	12.5	6.0	
	4	15.0	11.0	10.8	3.1	7.4	0.2	0.4	0.0	0.0	15.6	12.4	5.3	6.3	11.5	0.8	0.1	0.9	20.0	7.1	
	5	14.6	11.0	10.6	2.5	7.5	0.4	0.3	0.2	0.1	15.1	13.4	7.4	5.6	13.0	0.4	0.0	0.4	8.6	3.2	
	8	2	14.5	12.5	11.5	5.7	5.7	1.1	0.0	0.0	16.2	14.3	7.0	7.1	14.1	0.2	0.0	0.2	2.9	1.6	
3	15.4	11.7	11.5	3.5	7.9	0.2	0.0	0.0	0.1	15.0	13.5	6.7	6.6	13.3	0.2	0.1	0.2	7.9	1.7		
4	15.1	11.2	10.2	3.0	6.9	1.1	0.1	0.1	0.0	15.4	14.1	6.7	7.0	13.9	0.1	0.0	0.1	0.0	1.1		
5	14.3	12.5	12.1	5.8	5.9	0.4	0.2	0.1	0.0	15.6	14.2	7.1	6.9	14.1	0.1	0.0	0.1	5.9	1.0		
9	2	14.0	10.5	9.9	4.6	5.2	0.5	0.0	0.1	0.0	15.5	13.8	6.5	6.7	13.3	0.5	0.1	0.5	5.9	3.9	
	3	13.9	11.2	10.2	2.5	6.8	0.9	0.8	0.0	0.1	15.8	13.5	6.3	6.6	12.9	0.4	0.2	0.6	7.3	4.3	
	4	15.0	13.0	12.7	5.0	7.5	0.3	0.1	0.0	0.1	15.2	12.9	5.8	6.1	11.9	0.8	0.2	1.0	13.0	7.7	
	5	14.8	11.8	11.1	3.0	7.7	0.8	0.1	0.2	0.0	15.0	13.5	5.5	7.7	13.2	0.3	0.0	0.3	4.5	2.3	
	10	2	14.0	11.5	11.3	3.0	7.8	0.3	0.0	0.1	15.4	14.0	8.0	5.4	13.4	0.6	0.0	0.6	7.5	4.0	
3	14.6	11.5	11.0	2.9	7.9	0.5	0.0	0.0	0.2	16.3	13.6	6.6	6.3	12.9	0.5	0.2	0.7	13.4	4.9		
4	14.9	12.5	11.8	3.8	7.8	0.7	0.1	0.2	0.0	15.2	13.8	6.9	6.5	13.4	0.3	0.1	0.3	3.6	2.4		
5	15.6	12.4	12.0	4.3	7.7	0.4	0.0	0.0	0.0	14.6	12.8	6.8	5.0	11.8	1.0	0.0	1.0	10.0	7.8		

a-Unfertilised ova. b-Retarded cleavage(<12 cells). c-Irregular cleavage. d-Disintegrating ova. *-Corrected for losses due to non-fertilization of ova.

追試-2

K. P. George, R. C. Chaubey, K. Sundaram and A. R. Gopal-Ayengar: Frequency of Polyploid Cells in the Bone Marrow of Rats fed Irradiated Wheat, *Fd. Cosmet. Toxicol.* Vol. 14, p. 289, -291. 1976

1群6匹の各ラットにつき3,000個の細胞を調査した。4群の試験群に照射小麦を、4群の対照群に非照射小麦を与えた。ポリプロイド細胞の平均数のバック・グランド値は約0.226%（各群約40個に相当）である。貯蔵もしくは非貯蔵（照射直後の）の小麦を給餌した影響はないと結論した。その生データはインド政府委員会（Government Committee of India）のKesavan教授とSukhatme教授によって点検され、良質のデータであると認められた。

ヒトにおけるポリプロイド細胞誘発に関する中国の研究

その後、中国において、照射食品を摂食したヒトにおけるポリプロイド細胞誘発を調べる研究が行なわれた。その概要を紹介すると、総計382人のヒト被験者（ボランティア）のポリプロイディ試験は7つの試験（各試験は19～70人の医学生を含む）で行なわれたが、そのいくつかはF I小麦を使用した食事を用いた。これら7つの試験結果を個別に、あるいは一緒にプールして評価しても非照射、照射群の間に有意差は認められなかった。7つの試験結果を一緒にプールした場合、試験前は非照射群、照射群のポリプロイド細胞発生率は各々0.22%、0.36%、試験後は非照射群が0.29%、照射群0.26%、平均値の標準偏差（即ち標準誤差）は0.23%である。従って、相対的発生率の非照射群での増加は $0.29\% - 0.22\% = 0.07\%$ 及び、照射群での減少は $0.26\% - 0.36\% = -0.10\%$ は統計的に有意ではなかった。

インド政府委員会の評価

P. C. Kesavan(School of Life Sciences of Jawaharlal Nehru University, New Delhi)とP. V. Sukhatme(Maharashtra Association for Cultivation of Science, Poona, India)をメンバーとするインド政府委員会はNINの実験データを調査した結果、「実験計画は十分なものでなく、従って実験結果は不正確だ。また、NINに残されていた標本を観察しなおしたところ観察値が間違っていたので、……NINのデータは照射小麦の変異原性を示す事はできなかった、と結論する」という見解をとりまとめた。

米国FDAの見解

1986年4月18日付Federal Registerに述べられたFDAの見解を紹介する。

NINによって行なわれた実験で、研究者はポリプロイディ（染色体の変化）は照射小麦を与えられた動物とヒトに対する毒性結果であると主張したが、インド政府の前記委員会は、実験技術、実験計画の妥当性、実験データ、NINの科学者の解釈について検討した。その結果、これらのデータは相互に矛盾する（例えば、染色体異常の誘発について）ばかりでなく、生物学的に確立された事実（対照群のポリプロイド発生率が0ではなく、ある値を示す事、ヒト末梢血液リンパ球では0.1～1%）とも異なるものであると結論した。

データをこのような矛盾から生ずる偏りを修正すると、ポリプロイド増加と照射小麦の摂取と関連しているという証拠はないとインド政府委員会は結論した。FDAはこのインド委員会の結論に同意する。

又、1988年12月30日付のFederal Registerで、この問題での公聴会開催に関する健康エネルギー研究所（HEI）の請求に対して、FDAの1986年決定に反対する証拠の提出がないので、開催請求を却下した。この中でNINの一連の照射小麦のポリプロイディ誘発についての論文をめぐる問題点とFDAの見解を詳述している。このなかで、1986年のFDAオムニバス規則では、NINの実験データでは増加したポリプロイディは、照射小麦の摂食に起因するという事はいえないとFDAは結論しているのであって、HEIがいうようにFDAはNINのデータが不正確であるといっているのではなく、又、そのような主張は規則づくりでの論点ではないという事を述べている。

HEIは、前述のインド政府委員会の結論に反対する意見があり、NINの研究が有効だとして、NINがインド政府に対して通信した事を述べたが、FDAがNINのデータを発表したSrikantiaにその記録の提供を求めたのに対し、提供されず、同氏の研究の有効性を主張する返事だけがFDAにきたという事情が述べられている。

又、インド政府委員会の見解では、照射小麦を摂食しない子供のポリプロイド発生率が0.0%と異常に低い事、栄養失調状態の子供の細胞は研究当初、ポリプロイド細胞を正確に計数できない状態であった事、1.8%というポリプロイド発生率（F I小麦摂食6週）は健康人の通常値の範囲内だという事を述べている。

英国政府諮問委員会

（英国）照射・新規食品に関する諮問委員会（ACINF）の照射食品の健全性に関する報告書（1986年）に対する一般からの6,000通に上るコメントの中にポリプロイディ誘発に関するものがあり、これに対し、ACINFが見解を述べている。ACINF報告書の中で、食品、消費者製品及び環境における化学物質の毒性に関する委員会（COT）は栄養失調児が照射小麦を摂食した場合に、ポリプロイド細胞が増加するというNINの実験結果は、照射食品による有害な影響とは考えないし、観察された効果は栄養失調からの回復に伴う生理学的変化に関係しているように見受けられる。この子供の研究での1群の人数（5人）や各群の調査した細胞数（100細胞）は少ない。照射小麦を与えた

群で観察されたポリプロイド細胞の誘発は正常な範囲内であり、対照群の発生率は期待される値よりも低い値（0）である。ラットとサルでもポリプロイド細胞の増加が報告されたが、それらの知見は、その後の動物試験では確かめられていない。いずれにしてもポリプロイド増加の毒性学的重要性は不確かであり、優性致死突然変異のような毒性効果や姉妹染色体交換のような細胞遺伝学的な異常は、照射食品を与えられた動物では報告されていない。最近382人のヒトについて照射小麦を含む照射食品が与えられたが、ポリプロイドの増加は認められていない。

カナダ政府の見解

カナダの消費者協議会（CCA）のStanding Committeeの食品照射への質問に対するカナダ政府の反応を示す報告書に述べられた見解を紹介する。

照射小麦の摂食による効果を確認する動物飼育試験を行なうべきであるという意見に対して、Health Protection Branchの毒性学者や国際的科学機関等により、インドのNINの研究が検討されたが、これらNINの研究は有害性を示してはいないという事で一般的に同意されている。これは次のような事実にもとづいている。

- 1) 栄養失調児は適当な試験対象とは思われない。何故ならば、栄養失調単独で染色体異常を誘発するからである。しかも栄養失調のタイプと程度によって染色体異常の誘発のバック・グランド値は栄養失調児の間で変動するからである。インドの栄養失調児の染色体異常誘発のバック・グランド値についてのデータはなかった。
- 2) 照射小麦を与えられた栄養失調児のリンパ球でポリプロイディが増加する（1.8%）が、非照射小麦を与えた子供では0.0%という事実は異常である。メキシコの栄養失調児はリンパ球での染色体異常誘発率（12～21%）は、十分に栄養を摂取した子供のバック・グランド発生率（2～4%）に比べて高いという報告がある。

又、前述の中国のヒトについての試験、チャイニーズ・ハムスターに照射した鶏肉、ナツメヤシ、魚肉を与えた場合の骨髓細胞、チャイニーズ・ハムスターに20kGy照射の市販飼料を与えた試験でもポリプロイディ、あるいは、他の染色体異常の誘発は認められていない。従って、750Gy照射の小麦の摂食による健康被害を示す証拠はないと結論し、追加研究が必要とは考えないと述べている。

以上の照射小麦摂食とポリプロイド細胞誘発問題について以下の事がいえる。

- 1) 陽性データの原報告はNINのSadasivanらのグループだけである。
- 2) 実験データが他の科学者や米国、英国、カナダ政府関係者によって不備を批判されているのに、追加実験による反論がなされていない。
- 3) 米国FDAの1986年オムニバス規則（1kGy以下は動物実験するまでもなく一般的

に食品の安全性には問題がない)の主旨に反する原報者グループの実験データはどうして得られたのか。しかも単一の報告ではなく一連の論文が発表されているのである。

4)ポリプロイディ誘発の毒性学的意味はまだよく解っていない。

参考資料：

- 1)A. Brynijolfsson: Comments on Studies on Polyploid in Humans and Animals Fed Freshly Irradiated Wheat
- 2)A. Brynijolfsson: Results of Feeding Trials of Irradiated Diets in Human Volunteers: Summary of the Chinese Studies Report at the FAO/IAEA Seminar for Asia and the Pacific on the Practical Application of Food Irradiation, Shanghai People's Republic of China, 7-11, April, 1986
- 3)Dai Yin: An Introduction to Safety Evaluation of Irradiated Foods in China. To be Published in the Proceedings of the FAO/IAEA Seminar for Asia and the Pacific on the Practical Application of Food Irradiation Held in Shanghai, 7-11, April, 1986
- 4)FDA: Federal Register, April, 18, 1986
- 5)FDA: Federal Register, December, 30, 1988
- 6)The Response of the Advisory Committee on Irradiated and Novel Foods (ACINF) to comments received on the "Report on the Safety and Wholesomeness of Irradiated Foods" (HMSO-ISBN 0 11 321059 0)
- 7)Comprehensive Federal Government Response to Report of the Standing Committee on Consumer and Corporate Affairs on the Question of Food Irradiation and the Labelling of Irradiated Foods, Sept. 1987
- 8)H. W. Renner et al: Fd. Chem. Toxicol., 20, 867, 1982
- 9)H. W. Renner: Toxicology, 8, 213, 1977
- 10)田中憲穂：照射小麦粉飼料給飼によるチャイニーズ・ハムスターおよびラット骨髓細胞における倍数性細胞の誘発と末梢赤血球中の小核誘発、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、212-219、1992年

照射小麦によるラットの受胎率低下、着床前死亡率、死亡胎仔数の増加の可能性について

P. S. Chauhanらはラットによる世代試験で第3世代の雄ラットを用いて小麦粉を含む照射飼料による優性致死試験を行なった。14～15週令の雄ラットを次の4群に分けて給餌した。

- 1)貯蔵した実験室飼料を与えた陰性対照群：
- 2)非照射試験飼料を与えた（陽性）対照群：
- 3)0.2Mrad（2kGy）照射した試験飼料を与えた試験群：
- 4)2.5Mrad（25kGy）照射した試験飼料を与えた試験群：

試験飼料には小麦粉53.5%が含まれていたが、各雄ラットを毎週2頭のバージン雌ラットと交配させ、毎週交配用雌ペアを取替え、3週間にわたり交配させた。更に、交配を第6週にも行なわせた。雌ラットには交配のため雄ラットのケージにいる間は各群の試験飼料を与え、雄ラットから引き離れた後は通常の飼料に戻した。雄ケージから出してから11日後に雌ラットを屠殺して、受胎率、着床前死亡率、死亡胎仔数を求めた。

実験結果によれば、調査した1、2、3、6週の全てにおいて、上記4群の間に受胎率の有意差は認められなかった。着床前死亡率の平均値は、照射試験飼料群の値は非照射試験飼料の値よりも低かった。又、雌ラットあたりの死亡胎仔数の平均数は試験期間を通じて4群の間で差がみられなかった。第2週には非照射試験飼料群の胎仔死亡数は最大となった。

以上、照射した試験飼料の給餌による変異原性の誘発は認められなかったと結論された。

又、著者らはウイスター系ラットで優性致死変異試験を行い、照射小麦の変異原性を調査した。上記の研究と同じく⁶⁰Co γ 線 で750Gy照射した小麦を70%飼料に混ぜて3つの実験を行なった。

P. S. Chauhanらはウイスター系ラットを用い、75krad（750Gy）照射小麦の飼育による優性致死試験についても検討している。実験群を3群にわけ、1群では照射小麦を1週間のみ与え他の2群では、各々6週間及び12週間与え、その後5～8週間にわたり無処理の雌と交配している。

投与期間及び動物数は、1983年に発表された国際的基準（国際変異原・ガン原物質防護委員会（ICPEMC））を必ずしも満足するものではないが、少なくとも第3群

(12週間投与)については評価し得るものと判断される。提出されたデータによれば、生存胎子数、死亡着床数にも有意と思われる変化は認められない。一方、死亡胚をもつ雌数は5週群で有意に増加し、又、妊娠率は1週群で有意に低下してはいるが、これらの変化は、いずれも単発的なものであり、生存胎子数あるいは死亡着床数の変動を伴ってはいない。ICPEMC委員会によれば、このような場合には、総合的に陰性であると判定するよう指導されている。

本論文の著者らは優性致死試験の分野でかなり豊富な経験をもっており、本実験成績が陰性であると結論されている点から、特に問題はないと思われる。

なお、照射小麦(最高5krad(500Gy))については本邦においても優性致死に関する同様な実験(マウス)が行なわれており、その結果も陰性に終わっている。

以上の実験結果を総合すると、現在までのところ、照射小麦にはラットに対する優性致死作用を誘発するような所見は得られないと結論されよう。

参考資料：

- 1)P. S. Chauhan, M. Aravindakshan, A. S. Aiyar and K. Sundaram: Studies on Dominant Lethal Mutations in Third Generation Rats Reared on an Irradiated Diet, Intern. J. Radiat. Biol. 28, 215, 1975
- 2)P. S. Chauhan, M. Aravindakshan, N. S. Kumar, V. Subba Rao, A. S. Aiyar and K. Sundram: Evaluation of Freshly Irradiated Wheat for Dominant Lethal Mutations in Wistar Rats, Toxicology, 7, 85, 1977
- 3)渋谷徹ら：科学技術庁報告、1982

照射小麦によるマウスの卵巣重量の変化の可能性について

参考資料1)によると臓器重量について次のように報告されている。

f) 離乳時の検査について：

ロ) 臓器重量：

生殖器：雌雄とも照射群（2kGy）、非照射群間及び各世代間に一定の傾向が見られない。又、離乳期臓器重量（表55-1参照）では、卵巣重量が実重量の平均値で照射群、非照射群間に最大12%減少（F₂）の差があり、F₁及びF₃においては、いずれも7%の減少あるいは増加が見られている。体重比重量ではいずれも照射群で13~14%の減少（F₁、F₂）及び増加（F₃）が見られている。

上記の結果と3世代にわたる体重、繁殖生理値、妊娠末期の検査及び骨格検査の結果を総合し、「照射によると考えられる明らかな傾向は認められなかった」と小括している。このように結論づけた経過として、次のような点を考慮に入れたと思われる。

卵巣重量の測定は、特に、マウス、ラット等の小動物の場合、バラツキを生じやすい項目の一つである。小動物を用いた他の実験でも、平均値で約10~20%の差の見られる事が多い。本報告でも卵巣重量に差が認められたが、それは14%以下の変動であり、照射・非照射両群間の差が大きいものであるとは考えられない。

本実験は3世代にわたるものであるが、上記の結果の通り、F₁~F₃を通して増加あるいは減少の一定傾向が認められていない。又、F₁世代で照射群の卵巣重量が低値を示しているが、F₂以降の出産胎仔数、体重、哺育率、新生子の奇形等次世代に及ぼす影響は見られていない。

ラットを用いた照射小麦の慢性毒性試験でも、卵巣重量において照射・非照射両群間にマウスと同程度の差が認められているが、組織学的には毒性影響が観察されていない。

表55-1 離乳期臓器重量

		雄						雌					
		体重(g)	肝(g)	腎(g)	精巢(mg)	体重(g)	肝(g)	腎(g)	卵巢(mg)				
実	非照射		0.79 ± 0.02	0.20 ± 0.04	62.0 ± 18.2		0.77 ± 0.19	0.19 ± 0.04	5.83 ± 1.49				
	照射		0.84 ± 0.19	0.22** ± 0.04	66.2 ± 21.0		0.77 ± 0.18	0.21* ± 0.04	5.41 ± 1.63				
重	非照射		0.70 ± 0.23	0.02 ± 0.05	47.1 ± 19.8		0.73 ± 0.21	0.22 ± 0.05	6.53 ± 1.90				
	照射		0.75 ± 0.31	0.20 ± 0.07	46.8 ± 23.2		0.71 ± 0.23	0.22 ± 0.05	5.80 ± 2.02				
量	非照射		0.79 ± 0.19	0.22 ± 0.04	55.6 ± 14.9		0.71 ± 0.18	0.22 ± 0.04	6.12 ± 1.57				
	照射		0.76 ± 0.16	0.20** ± 0.03	57.3 ± 16.9		0.69 ± 0.18	0.22** ± 0.04	6.55 ± 2.04				
比	非照射	12.3 ± 2.1	6.35 ± 0.77	1.61 ± 0.16	497 ± 102	12.0 ± 2.0	6.36 ± 0.78	16.3 ± 0.17	50.2 ± 10.9				
	照射	13.1 ± 2.2	6.40 ± 0.86	1.69* ± 0.23	504 ± 156	12.4 ± 2.3	6.12 ± 0.61	1.73* ± 0.20	43.7 ± 9.7				
重	非照射	10.5 ± 2.9	6.47 ± 1.07	1.93 ± 0.23	430 ± 127	11.0 ± 2.6	6.32 ± 0.73	1.96 ± 0.22	57.8 ± 14.4				
	照射	11.5 ± 3.8	6.28 ± 0.95	1.77 ± 0.19	379 ± 129	11.0 ± 2.4	6.23 ± 0.76	1.94 ± 0.22	49.2 ± 14.9				
量	非照射	12.4 ± 2.2	6.33 ± 0.74	1.82 ± 0.20	455 ± 106	11.9 ± 2.2	5.69 ± 0.77	1.84 ± 0.24	51.4 ± 12.6				
	照射	12.0 ± 1.7	6.29 ± 0.75	1.75* ± 0.22	477 ± 119	11.2 ± 1.9	6.19 ± 0.78	1.78 ± 0.21	57.9** ± 16.1				

*P<0.05、**P<0.01で非照射に比べ有意差あり

参考資料：

1)放射線照射による小麦の殺虫に関する研究成果報告書(付録)：食品照射研究運営会議、8、1983

照射エビの毒性試験については、次に示すようにラットによる4世代にわたる試験及び90日間の経口投与試験の結果、並びにイヌの甲状腺に関する自然発生病変が報告されている。

この報告では27.5～55.8kGy照射したエビを飼料中に35%添加したところ、イヌの甲状腺が非照射で17.4%に対し、照射部で27%であったという。この報告に対して以下の研究が行われている。

- 1)ラットによる4世代連続投与試験について、2.5kGyで照射したエビを乾燥重量で25%の割合で飼料中に添加し、1群240匹の雄及び297匹の雌に与え、非照射群と比較した。摂取量、体重については照射による影響はみられなかった。又、受精率、出生時の異常あるいは哺乳中の死亡はみられておらず、寿命についても照射による変化は認められていない。
- 2)1群雌雄各10匹のラットに1.5あるいは3.0kGyで照射したエビを2.8及び28%の割合で飼料中に添加し、90日間与えた。体重、摂取量、血液学的検査値及び生化学的検査値について変化は認められていない。又、臓器重量や病理組織学的検査においても照射によると考えられる変化はみいだされていない。
- 3)50頭のビーグル犬を対象に、その自然発生病変について組織学的検討を行ない、生後より5年以上にわたり、経時的にまとめたところ、甲状腺炎が1歳未満で約26%、それ以降では75%以上の動物で認められたと報告されている。

このように、照射エビについては、これを経口摂取したラットでの病理組織学的検査を含めて明らかな毒性が見られていない事、加えてビーグル犬では生後比較的早期より、しかも高率に甲状腺炎が自然発生病変として認められる事から、イヌによる長期毒性試験で認められた甲状腺炎(リンパ節性)増加の所見を毒性指標として利用する場合には、その出現率や程度を詳細に吟味する必要がある。即ち、イヌによる長期毒性試験で認められた甲状腺炎(リンパ節性)増加の所見が、照射エビの毒性を示していると考えた事は妥当ではない。

参考資料：

- 1)Intl. Project in the Field of Food Irrad. : Wholesomeness Studies with Dehydro-Irradiated Shrimps. Food Irradiation Information, No.5, 89-90. 1975
- 2)von Logten, M. J. et al., : The Wholesomeness of Irradiated Shrimps.

Food Cosmet. Toxicol., 10, 781-788. 1972

- 3) Oghiso, Y. et al., : Histopathological Studies on Distribution of Spontaneous Lesions and Age changes in the Beagle. J. Vet. Sci., 44, 941-950. 1982

照射ニンジンを与えたラットの成長速度は減少したが、一方では、産仔については高率の繁殖性を維持していた。照射ニンジン中のカロチンの生物学的力価は、 β -カロチン含有量の減少によって説明できる程度より大きく損なわれた。

次に行なわれた研究は、ニンジンを6ヵ月間凍結貯蔵すると照射ニンジンのカロチンの生物学的力価は損なわれないし、照射ニンジンを経過したものを12ヵ月間冷凍貯蔵後に与えても成長減退のみられない事が示された。従って、照射自体は成長減退やカロチンの生物学的力価の減少の原因ではないとされた。室温貯蔵のニンジンは酸敗臭やゼリー状残留物を有し、細菌汚染を示唆していたが、これが成長抑制、カロチン利用阻害の効果をもたらしたものと考えられる。つまり長期にわたる室温貯蔵によるニンジンの腐敗が原因であったと考えられる。

参考資料：

- 1) I. J. Tinsley, E. C. Bubl, J. S. Butts and J. F. Bone : The Growth, Breeding, Longevity and Histopathology of Rats Fed Irradiated or Control Foods, Final Report, Contract No. MD-580, OTSG, 1961
- 2) I. J. Tinsley : Carotene Biopotency in Rations Containing Gamma-Irradiated Carrots and Liver Sytochrome Oxidase and Ingestion of Irradiated Meat, Final Report, Grant No. G42, OTSG, 1965

**照射ベーコンによる繁殖力低下、死亡率上昇、
体重減少、赤血球・ヘモグロビン減少、白内障、
腫瘍、栄養阻害因子発生の可能性について**

これらはいずれも米国陸軍のハム照射許可申請の際に、FDAが陸軍のデータを検討して提起した照射食品の健全性に対する疑問点である。米国議会原子力合同委員会公聴会の記録によると、FDAのAssociate Commissioner for ScienceのD.Banes博士は次の諸点をあげている。なお、このFDAの評価、疑問は照射ハムそのもののデータに対してではなく、その許可申請の基礎となった照射ベーコン、豚肉及び缶詰モモのデータを再評価した結果、提起されたものである。

- 1)繁殖性についての統計的に有意な照射による有害効果、例えばカリフォルニア大学ロスアンゼルス校(UCLA)のラットによる研究では、照射ベーコンを含む飼料では1Xレベルで子孫の減少は20%を超える。照射豚肉を与えたイヌでは離乳仔数が有意に減少した。又、豚肉を与えたラットでは5つの研究のうち、1つの研究だけが繁殖性での有効効果を示さず、他の3つの研究では体重、子孫数が減少し、もう1つの研究は報告が不完全であった。
- 2)死亡率、体重、赤血球数、ヘモグロビン量についての照射の有害効果は、これらはそのような傾向がみえるという見掛上の効果である。例えば、照射ベーコンを含む飼料を与えたラット2Xレベルでの死亡率の増加や、照射豚肉を与えたイヌの赤血球数の減少である。これと同じ効果は照射豚肉もしくはベーコンを与えたラットでも認められた。
- 3)照射食品を含む飼料を与えた動物で白内障と腫瘍の発生が多い兆候を示した。例えば、照射ベーコンを与えたラットに悪性腫瘍の発生率が高かったが、一部の結果では明瞭ではなかった。ラットによる1つの研究では、照射豚肉を与えた52頭中脳下垂体癌をもつもの3頭に対し非照射対照群26頭中では0であった。
- 4)照射・非照射食品を混ぜた場合、非照射食品中の必須栄養素に対するきつ抗作用を有する因子が照射食品中に生成する可能性がある。更に、照射食品について観察される照射の効果が、単なる照射によるビタミン損失に起因するものかどうかを示すために計画した酵素系についての研究は、単純にビタミン欠乏に帰する事ができない追加効果を示すようにみえる。

以上の疑問点のうち、特に重要視されるのは1)の繁殖性の問題で、他の疑問点はそのような傾向がみえるという程度、あるいは十分に実験的に調べられていないという事であった。FDAはいくつかの実験計画上の欠点、例えば、実験動物数(特にイヌ)や腫瘍の調査部位、眼の疾患の検査が不十分な事等を指摘している。

これに対して、米国陸軍はFDAの指摘した4つの疑問点について次のように述べた。

- 1)について、ラットの試験を行なった時は繁殖が一般によくなく、問題点は基本飼料のビタミン不足によるものと思われ、照射によるとはいえない。最近の研究によっても鶏肉に比べ豚肉のビタミンB₁の照射損失の大きい事が示されている。しかし、FDAの疑問に十分答えるためには新しい動物飼育試験が必要である。
- 2)について、各パラメータは統計的に有意差を認め難い。
- 3)について、当時の実験データでは満足に答えられない。疑問点は照射によるとは思われないがFDAの要求に答えるには新たに追加試験が必要である。
- 4)については、何ら科学的証拠はない。推測以外にほかならない。

実験動物数が少なすぎるという事も含めて、照射ハム申請データの評価をめぐる論議の基本的な原因は、FDAが自らいうように、1955年に米国の照射食品の健全性試験が発足する時に合意したプロトコールではなく、科学の進歩を考慮した新しい審査基準の採用という方針変更により、照射ハム申請データ評価をめぐる論議の基本的な原因があるといえよう。

その後、1971年にFDAとの協議による新しいプロトコールによって肉及び肉製品（牛肉、豚肉、鶏肉、ハム）照射の第2次健全性試験が発足した。又、FDAは1979年から正式に照射食品の健全性評価方法を確立するための作業を開始した。

米国FDAがベーコン照射の許可を取り消したが、その理由と安全性について

米国陸軍のハム照射の許可申請に対して、FDAは照射ハム及びそれに関連して提出された照射ベーコンや照射牛肉のデータには有害性の可能性を示すものがあり、提出データは照射ハムが安全である事を証明していないと1968年4月19日に通告した。

これに対して、申請者はFDAが新たに提示した質問に十分応えるデータの持合せはなく、要求に応えるには、追加動物実験を行わなければならないという理由で、ハム照射の許可申請を取り下げ、又、FDAは後述するように、これと関連するベーコン照射の許可をも取り消した（1963年）。米国議会原子力合同委員会の公聴会の記録によると、これは照射ハムが安全ではないという事ではなく、提出された毒性試験のデータは照射ベーコンが安全であるという事を証明していないという事をFDAは発言している。この米国議会の記録を中心にその間の事情を説明する。

米国陸軍は1954年以来、動物実験による毒性試験を行ってきた。FDA等関係政府機関と協議して作成したプロトコルに従って、ラットによる8週間の短期毒性試験でハムを含む46品目について、有害性がない事を確かめ、次いで5.6Mrad（56kGy）照射した21品目について、ラット、マウス、イヌ、サルを用いる長期毒性試験を行なった。この試験で用いた飼料への照射飼料添加量は短期試験と同様35%で、2年間もしくは数世代にわたり成長、繁殖率、寿命、泌乳、発癌、病理組織学的所見、代謝変化のパラメータについて調査した。この長期試験では豚肉とベーコンは調べたが、ハムは加工の程度からみて両者の中間であり、且つ、当初FDAが用意した、試験データを、同じような組成をもつ食品に外挿してもよいという方針に沿って、長期試験ではハムを試験品目としなかった。

FDAの提示した主な課題は以下の通りである。

- 1)照射ハムの許可申請の中にハムを照射したデータがない。
- 2)照射ハム申請の基礎になった照射ベーコンと豚肉の長期毒性試験データを、学問の進歩を考慮した観点で検討すると、繁殖性、発癌性、赤血球数、抗ビタミン作用について疑問がある。特に、繁殖性が問題で、その他の論点は傾向が認められるという程度であって、統計的に有意だという事ではないとFDAは述べた。

これらを要約すると、「照射ハムが安全ではない」という事ではなく「申請された試験データは照射ハムが安全であるという事を証明していない」、即ち、安全性の証明には不十分であるというのがFDAの見解であった。

これに対して短期、長期の毒性試験を担当した陸軍（軍医部）は、1966年のカー

ルスルーエでのFAO/IAEA共催の食品照射シンポジウムで発表したように、毒性は認められないし、FDAの要求は審査方針の変更によるもの（例えば、長期試験で照射ハムのデータがない等）であり、新たに追加試験をしなければデータでもって答えられないとして、陸軍は1968年7月3日付でFDAに対して、ハム照射の申請取り下げを通告するとともに、追加の動物実験については検討中であるが、FDAの要求に沿ったプロトコール作成についての協力を要請した。この陸軍のハム照射の申請取り下げに伴い、FDAは既に許可していたベーコン照射の許可を取り消した。又、健全性試験に関して陸軍と協力してきた原子力委員会も1966年に申請したイチゴの照射（微生物による腐敗防止）の許可申請を1967年に取り下げている。当時の許可申請をめぐる混乱を反映している。

照射豚肉についての研究はビタミンへの影響も含めて、その後長期間にわたり研究され、寄生虫防除目的（3kGy以下）での豚肉照射はFDAから許可された。

当時の議会公聴会記録によるとFDAのAssociate Commissioner for Science、FDAは、FDAの審査基準の変更は、動物実験の実施中に行なわれたが、安全性評価の変更は、常に最新の科学情報に基づくものでなければならない、というFDAの新基本方針を述べている。すなわち、「マイナスの結果を見いだせない」との観点から許可していたものが、「危険性がないことを積極的に証明する必要がある」というように変わった。

このように方針を変更したFDAは、照射食品の評価方法を確立する努力を1979年から正式に開始し、ユニークな化学的評価方法ともいべきものをつくりあげている。（質問16参照）

又、このような米国内における論争は、健全性評価に関して一国内だけの議論に止まらず、国際協力による健全性評価を推進する機運を助長したといえる。具体的にはJECFIや食品照射に関する国際協力プロジェクト（IFIP）の活動を促したのである。

参考資料：

- 1)"Status of the Food Irradiation Program"米国議会原子力合同委員会ヒアリング：（1968年7月18日及び30日、記録）
- 2)N. Raica Jr., D. L. Howie : "Food Irradiation" Proc. FAO/IAEA Intern. Symposium on Food Irradiation, Karlsruhe, IAEA. p. 119, 1966.

照射水産練り製品によるマウスの雄の腫瘍発生率上昇の可能性について

参考資料1)によると、腫瘍発生率については次のように報告されている。

e)腫瘍発現状況及び発生率：

雄では非照射及び照射（4.5kGy）両群とも12ヵ月目より、雌では非照射群で10ヵ月目より、照射群（4.5kGy）で11ヵ月目より腫瘍の発生を見た。腫瘍発生率は、雄で非照射群で実験期間中に死亡した46例中26例及び屠殺した3例中2例の計28例（57%）、照射群で実験期間中に死亡した44例中27例及び屠殺した4例中2例の計29例（60%）である。雌では非照射群で実験期間中に死亡した44例中33例及び屠殺した4例中4例の計37例（77%）に、照射群で実験期間中に死亡した48例中32例及び屠殺した1例の合計33例（67%）である。

この腫瘍発生状況及び発生率の成績と実験期間中死亡した動物の組織学的検査並びに試験全体で認められた変化を総合し、「照射・非照射の両群間に明らかな差はない」としている。

腫瘍発生に関するグラフでは、非照射群に比べ照射群で若干腫瘍発生率が高く見えるのは事実である。しかし、照射により食品中に発癌物質が生じたか否かといった毒性評価を行なう上で、次に述べるような判断も重要である。

- 1)腫瘍の発生時期が対照群に比べ早まったか。
- 2)腫瘍の発生率が有意に上昇したか。
- 3)発生した腫瘍は悪性あるいは使用した動物で特異的なものか。

上記の様な点を本報告書について見ると、腫瘍発生が認められた時期は12ヵ月目からであり、両群間に差はない。次に腫瘍発生率については検査した各時期とも有意差が認められない。又、認められた腫瘍は報告書にもある通り、そのほとんどが肺の腺腫であり、実験に使用したマウスで頻繁に認められるものである。しかも、上に述べた現象にはいずれも性差が見られない。

このように腫瘍発生については、照射により明らかに上昇したとはいいい難く、しかも組織学的検査以外の血液、生化学検査の結果からも腫瘍の発生を裏付けるデータは得られていない。

これらを総合して考察すると、殺菌を目的とした4.5kGyの放射線照射水産練り製品は、マウスには発癌性を有しないと考えられる。

図60-1 雄の生存率と腫瘍発生率

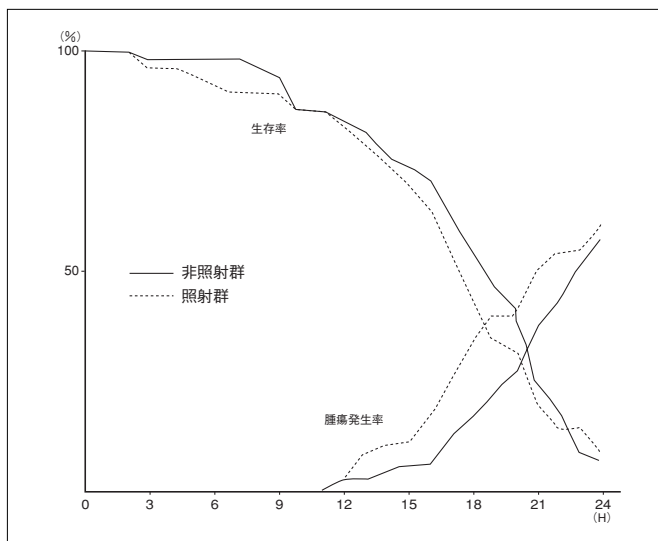
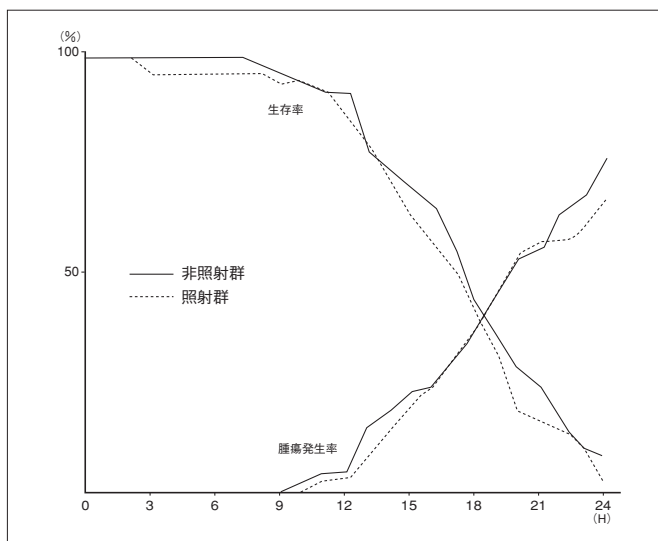


図60-2 雌の生存率と腫瘍発生率



参考資料：

1)放射線照射による水産練り製品の殺菌に関する研究成果報告書(付録)：食品照射研究運営会議、12, 1985

照射動物蛋白質（肉、魚）による犬の繁殖力低下とマウスの心臓障害発生の可能性について

1955年から開始された米国陸軍（軍医部）の照射食品の健全性試験において、イヌによる最初の長期毒性試験で、照射牛肉を与えると繁殖力が低下すると報告された。これはビタミンE欠乏によるものと推測された。その後、2つの再試験が行なわれた。各群雌雄各々2頭を使用した先の試験にかわり、再試験では各群雄3頭、雌15頭を用いた。牛肉は10MeVの電子線で5.58Mrad (55.8kGy) 照射し3年間飼育した。その結果は2つの再試験とも非照射群と繁殖力に差がなかった。

ただ1つの試験で、最初の発情が、照射群では 322.8 ± 46.4 日であったのに対して、非照射群では 454.8 ± 94.0 日であるという差が認められた。しかし、他のイヌの試験の全てで、最初の発情日は同じであったので、この再試験の有意性を評価する事はできないとRaicaらは述べている。

又、照射食品の発癌性試験中、心臓障害を調査する目的で設定された研究A（100%照射、5.58Mrad (55.8kGy)、非照射ビタミン添加）の飼料3のマウス試験（豚肉、鶏肉等）で、心臓障害が照射群に多発すると報告された。これを検証するため、同じストックの系統マウス約5,000頭を用い、別の研究室で再試験を行なった。その結果、最初に報告された心臓障害は一つも認められなかった。

これらの動物から作成された125,000の組織標本や800,000の系統的心臓切片の検査等から、照射食品は心臓障害の原因にはならないと結論された。なお、他の障害が認められたが、全ての群で同頻度の発生率であった。又、このような心臓障害は非照射ミルク飼料によっても容易に発生する事が報告されている。

参考資料：

- 1) N. Rica, Jr., and D. L. Howie : Review of the United States Army Wholesomeness of Irradiated Food Program (1955-1966), Food Irradiation (Proc. of Joint FAO/IAEA Intern. Symposium on Food Irradiation in Karlsruhe, 6-10, June, 1966, pp. 199.
- 2) C. M. McCay and G. L. Rumsey : Effect of Irradiated Meat upon Growth and Reproduction of Logs, Federation Proc. 19, 1027, 1960
- 3) J. K. Loosli, C. M. McCay, A. C. Stevens and J. W. Kenney : Components of Ionized Irradiated Meats Injurious to Reproduction. Final Report, Contract No. MD-2097 OTSG, 1964
- 4) T. B. Clarkson and A. F. Moreland : The Effect of Control-Ground Beef and Irradiated 5.58Mrad Ground Beef Consumption on Reproductive

Performance in the Beagle. Final Report, Contract No. MD-209A, OTSG, 1963

- 5)H. Monsen : Heart Lesions in Mice Induced by Feeding Irradiated Foods, Federation Proc.19,1029,1960
- 6)S. W. Thompson, R.D. Hunt and J. F. Ferrell : Hislopathology of Mice Fed Irradiated Foods, U. S. Army Medical Research and Nutrition Laboratory Report No. 279, 1963
- 7)H. Monsen : Statement Before the Congressional Subcommittee on Research, Development and Radiation, Review of AEC and Army Food Irradiation Programs p.32, U.S.Government Printing Office, Washington,D.C.,1962

◆ 用語説明 ◆

目次

Ames(エームス)試験	183
活性酸素	183
芽胞(孢子)	184
形質導入	184
検知法	184
催奇形性試験	185
小核試験	185
蒸熱処理法・低温処理法	186
世代試験	186
染色体異常試験	186
適正製造規範(GMP)	187
特異的放射線分解生成物(URP)	187
毒性試験	188
倍数性細胞(ポリプロイド)	188
フリーラジカル	189
変異原性	189
変異原性試験	189
放射能と放射線	190
優性致死試験	191
ラジオトキシン	191

Ames試験(エームス試験：微生物を用いる遺伝子突然変異試験)

遺伝子突然変異を検出する代表的な試験がAmes試験で、微生物であるサルモネラ菌(*Salmonella typhimurium*)を用いる。この菌(野生型)はアミノ酸の一種であるヒスチジンを合成できるが、これを合成できない突然変異株では培地にヒスチジンがないと生育できない。この株を変異原性物質で処理すると再び突然変異が生じて元の菌株のようにヒスチジンがなくても生育できるようになる。これを復帰突然変異という。

Amesらはこのような突然変異を検出するためにTA 1535、TA 1537、TA 1538、TA 98、TA 100等の菌株を開発したため、このような菌株を用いる試験をAmes試験と呼ぶ。復帰突然変異試験には大腸菌株(*try⁻*)も用いるが、その時にはヒスチジンではなく、トリプトファンの生合成能を指標とする。

上述の菌株を化学物質と混和してから、寒天培地の入ったシャーレにまき、一定時間培養する。化学物質に変異原性があれば、突然変異を起こした菌が増殖して多数のコロニーをつくる。化学物質で処理しない場合でも自然突然変異によりコロニーが出現するので、これらの数よりも通常2倍以上のコロニーが出現した場合に、その化学物質に変異原性があると判定している。

変異原性物質には直接DNAに作用して変異原性を示すものもあるが、ある種の変異原性物質は代謝酵素によって別の物質に変換してから、つまり代謝活性化を受けてからDNAに作用して変異原性を示すものがある。一般に微生物ではこれらの代謝酵素を持たないため、代謝酵素の豊富な哺乳類の肝臓、主にラット肝臓のホモジネート(S 9)を用いる。酵素活性を高めるための誘導剤で前処理したラットから調製し、更に、反応を補助する物質を加えて反応液(S 9 mix)とし、これと化学物質と混和して菌体の処理を行う(代謝活性化法)。

活性酸素

三重項酸素($^3\text{O}_2$)の還元によって生成するラジカルやペルオキシド、光増感反応によって生成する一重項酸素($^1\text{O}_2$)等の酸素の活性種を活性酸素という。酸素から水への四電子還元過程の中間体、スーパーオキシドアニオンラジカル(スーパーオキシドと略称、 O_2^-)、過酸化水素(H_2O_2)とヒドロキシラジカル(水酸基ラジカル、 $\cdot\text{OH}$)と一重項酸素を狭義の活性酸素とっている。しかし、不飽和脂質の過酸化反応で生成するペルオキシド(ROOH)、ペルオキシドラジカル($\text{ROO}\cdot$)やアルコキシラジカル($\text{RO}\cdot$)も広義には活性酸素と理解されている。これら活性酸素も過酸化水素とペルオキシドを除けば、他は全てラジカルである。これらのラジカルの寿命は短く、0.001秒以内に消滅する。生体において酸素は代謝過程の末端で電子の受容体となり、その結果、活性酸素を生成する。これらは生命現象にとっては有害な活性種であり、生成と同時に種々の消去系(酸化還元系)が関与して水や三重項酸素へ移行させる。生体においてこれら活性酸素の消去に関与する酸素としてはスーパーオキシドジスムターゼ(SOD)、各種ペルオキシターゼやカタラーゼが存在する。酸素系以外にもアスコルビン酸、トコフェロール等の低分子化合物も活性酸素を消去させる。又、カロチンは一重項酸素を速やかに消去して三重項酸素へ戻す役割を果たしている。このような消去系の活性が低下し、消去物質のレベルが低下する事は活性酸素に起因する生体の老化、疾病を誘導するものと考えられる。

前述したように大気中で生存する生物は実に多種類の活性酸素生成系と消去系を合わせ持つ

ている。食品の場合も全く同様である。しかし、本来消去系を持たない加工食品では、適当な抗酸化物質（活性酸素捕捉、消去物質）が存在しなければ急速な品質劣化をきたす。このように生体や食品では活性酸素の生成と消去はごく普遍的な事であり、むしろ放射線照射による活性酸素の生成と反応は極めて限られた場合にのみ起こるものである。

芽胞（孢子）

糸状菌は主に無性孢子により子孫を残していくが、菌種によっては有性孢子により子孫を残すものもある。無性孢子、有性孢子とも菌糸に比べ各種環境に安定なものが多いが、放射線感受性については各器官による差はあまり認められない。ことに無性孢子である分生子の場合には放射線感受性は菌糸と類似している。一方、有性孢子は厚膜の子嚢壁を有するため、若干抵抗性となるが乾燥下では分生子との差はほとんど認められない。なお、穀類等の乾燥食品の腐敗菌であるAspergillusやPenicillium属は放射線抵抗性が弱く2~5kGyで殺菌できるが、植物寄生性糸状菌の中には10kGyでも生残するものがある。

細菌における芽胞形成菌は好気性のBacillus属と嫌気性のClostridium属に大別される。Bacillus属では炭疽菌、Clostridium属では破傷風菌のようにヒト、動物に致死性の疾病を起こす菌の他、セレウス菌、ボツリヌス菌、ウエルシュ菌等の食中毒の原因菌も含まれる。芽胞は乾燥、加熱、消毒剤等に強い抵抗性を示し、乾燥した土壌でも長期間の生存が可能である。

芽胞は増殖できないが、培養条件によっては芽胞は発芽し、増殖可能な栄養型細胞に変化する。栄養型細胞は他の無芽胞菌と同様、放射線での殺菌を比較的容易に行う事ができる。水懸濁液中の芽胞の放射線に対するD₁₀値（生残菌数が10%になる線量値）は1~2kGyであるが、食品中では食品成分の保護作用により一般に抵抗性が強くなる事が明らかになっている。

形質導入

形質とは生物の分類の指標となる形態的要素の事で、遺伝学では各種の遺伝的性質をさしている。形質導入とは各種の宿主細菌細胞の性質（例えば栄養要求性、糖発酵能、薬剤抵抗性、抗原特異性等の染色体小片）を有する遺伝的形質がプラスミド（核外遺伝子）DNAまたはバクテリオファージ等の仲介で、一つの細胞から他の細胞へ移行する事を言う。この形質導入は遺伝子組換えや細菌の遺伝学的解析、特に、染色体の小部分内での微細構造の解析に広く利用される。形質導入は普遍型なものや特殊型に分類される。前者は細菌のいずれの遺伝子でも形質導入が見られる。後者は各ファージに応じて導入される遺伝子が限定されていて、宿主染色体上の特定の位置に挿入される溶原性ファージが誘発を受けて増殖する際にその近傍の宿主遺伝子を取り組む。この時運ばれる形質は限られている。

検知法

検知法とは、市場に流通するであろう照射食品に対して、食品成分の化学的変化やラジカル生成等の物理的変化を調査し、放射線照射の有無や線量等の履歴を調査する方法で判別法ともいう。最近の国際機関における検知法への期待は、照射線量の推定ではなく、適正な表示への牽制等規制サイドへの支援技術の一つとして照射の有無が判定できればよいとしている。

本来、食品照射では食品成分に顕著な変化を生ずる事がないような線量範囲で実施されているため、従来は分析しても有意な変化は検出できないとして研究が中断していた。その後、各国での食品照射の実用化の進展や、また、一部批判的な人々が検知法がなく適正、または、過剰照射の判別が不可能と指摘した事、さらには近年の各種分析機器、技術の進歩からごく微少な食品の変化の検出も可能となり、規制当局による適正管理、規制の担保のために検知技術開発の必要性が国際的に要請された。このため、IAEAやECが中心となってこのためのプロジェクトが1990年代に行なわれた。

現在、馬鈴薯での電気伝導度測定法、香辛料等での熱ルミネッセンス法、骨付肉、エビの殻等でのESR（電子スピン共鳴：electron-spin resonance）法、肉類の脂質誘導体分析法、種子の発芽能等が開発されている。

催奇形性試験

催奇形性とは、医薬品等の化学物質や食品照射等新たな食品処理方法の実施にともなって変化したと予想される食品成分が、胎子の発生過程に作用し、先天性異常を引き起こす性質をいい、この性質を持つ物質を催奇形性物質という。この性質の有無を調査するのが催奇形性試験である。狭義には胎子に対する奇形発生作用をさすが、広義では胎子の死亡、発育不全、機能的・生化学的障害をもさす。

胎子の発育段階のうち、特に各器官が分化、形成される時期の感受性が高いが、先天性異常の大半は原因不明であり、明らかに環境化合物が原因とされるのは2~3%以下、奇形で1%以下といわれる。催眠剤サリドマイドが契機となって医薬品等の催奇形性への関心が高まり、食品照射では、変異原（性）と同様、放射線照射により変化すると予想される食品成分について試験が行なわれている。

小核試験

動物個体を用いる染色体異常試験としては、マウス等のげっ歯類の骨髓を用いる染色体異常試験が代表的であるが、現在は骨髓の赤血球を用いる小核試験が最も一般的な方法として多用されている。

染色体異常の誘発に伴い、切断によって着糸点のない断片が生じ、これが細胞分裂の際に取り残されて、独立した小さな核、つまり小核を形成する。一方、骨髓では赤芽球から赤血球への分化の過程で、核が細胞外に放出されて、核を持たない赤血球となる。この時赤芽球に小核があると、赤血球となった時に残された小核は大きな核がないために容易に識別できる。このように染色体異常から由来した小核を赤血球で観察するのが小核試験である。

小核試験では一般にマウスを用い、化学物質を腹腔内に投与するが、必要に応じて胃内や静脈内に投与する。投与用量や標本作製時間は化学物質によって異なるので、予め予備実験を行って設定する。投与後適切な時期に動物を屠殺し、大腿骨より骨髓を取り出し塗抹標本作製し、固定染色後顕微鏡で観察する。赤血球には未成熟な多染性赤血球（PCE:Polychromatic erythrocytes）と成熟した正染性赤血球（NCE:normochromatic erythrocytes）とがあり、小核を持つPCEの出現頻度を求めた後に、統計処理法を用いてその出現頻度の有意差検定を行い、小核誘発性の有無を判定する。

最近、蛍光色素であるアクリジン・オレンジ（AO）を用いる方法、特にAOによる超生体染色法が開発され、骨髓に加えて、尾静脈の微量の血液を用いて網赤血球に現れる小核を観察する事が可能となった。このため、動物を屠殺する事なく、同一の動物から経時的に採血する事ができ、標本作製時間の吟味の必要がなくなり、動物数を少なくする事ができる。又、ラットへも利用できるため、他の毒性試験と実験動物を共用する事ができる等、きわめて利点が多い。

蒸熱処理法・低温処理法

両方法とも、熱帯果実等の害虫防除で利用されていたEDB（発癌性の高い化合物）の代替処理方法として開発された。その利用は処理対象果実によって使い分けられている。

蒸熱処理法（ペーパーヒート）は、飽和水蒸気を利用して生果実の中心温度を40℃以上まで加温して、一定時間その状態を保持し生果実の表皮等にいる害虫の成虫、幼虫、卵を駆除する方法である。一方、低温処理法（コールドトリートメント）は処理施設内で生果実の中心温度を0℃～2℃程度まで下げ一定時間その状態を保持して同じく生果実の表皮等にいる害虫の成虫、幼虫、卵を駆除する方法。同方法採用後も技術改良が行なわれているが、基本的には、生果実に対して緩やかといえども温度ショックを与えるため、果実の過熱や低温障害を生ずる可能性が大きいといわれている。

世代試験

世代試験とは、医薬品等の化学物質や食品照射等新たな食品処理法の実施にともなって変化したと予想される食品成分等を試験対象の実験動物に何世代かにわたって投与し、その物質の遺伝的影響等を調査する試験である。従来は数多くの世代試験が実施されてきたが、現在では、遺伝的に異常を生ずる時は第2～第3世代目で細胞組織学的に異常の兆候が観察できるとして、国際的に2世代で、親を含めても3世代の試験で十分とされている。

人間の食品ではないが、海外に照射飼料による5年間の実験動物の繁殖試験のデータがあり、異常は見られていない。動物実験では特定病原菌のいない無菌動物（SPF動物）が要求されている事から、大手の実験動物の生産業者の中には25kGy～50kGyの線量での滅菌飼料で、マウスで40世代以上（10年間）、ラットで20世代以上（7年間）のSPF動物を飼育、維持している例もあり、いずれも照射飼料による影響は認められていない。

染色体異常試験

染色体は遺伝子つまりDNAの担い手であり、分裂している細胞であれば、植物、動物を問わず観察できる。しかし、組織培養の技術が導入されて以来、容易に染色体観察ができる事から、ヒトを含めた高等哺乳類の培養細胞を用いる事が多い。細胞を変異原性物質で処理すると、染色体の一部がちぎれ（切断）、その結果として断片が生じる。又、切断が誤って修復されるといわれる交換型異常が生じる。これらは染色体の形の変化であり、構造異常と呼ばれている。ある種の変異原性物質では染色体の数の変化（数的異常）をもたらしものがあり、染色体の数が数本増えたり減ったり、あるいは全体の数が2倍、3倍、…と増える事もある。このような染色体の構造異常、数的異常を検出するのが染色体異常試験である。

用いる代表的な細胞としては、チャイニーズ・ハムスター由来の細胞株（CHL、CHO、V79等）やヒト末梢リンパ球があげられる。

CHL細胞を用いる試験法の概略は以下の通りである。盛んに細胞が増殖しているシャーレに、溶媒に溶解または懸濁した化合物を添加して、24及び48時間連続処理し、直ちに染色体標本を作製する。微生物を用いる遺伝子突然変異試験で述べたように、S9 mixを用いる代謝活性化法も行う。但し、S9 mixには細胞毒性があるので、処理時間は6時間とし、その後新しい培養液で18時間培養した後、染色体標本を作製する。これらの標本を顕微鏡下で観察し、染色体異常の種類と出現頻度を記録する。染色体異常は構造異常と数的異常に分けて各々集計し、出現頻度が10%以上の場合に、その化学物質に染色体異常誘発性があると判定している。

適正製造規範（GMP）

WHOが1968年に医薬品等の安全性と有効性を確保するための基本条件として、医薬品等の製造や品質管理に関する規則、即ち、適正製造規範（GMP）制定の必要性を決議、翌1976年に加盟各国へ勧告した。日本は1976年から実施している。近年、食品加工等でもこの考え方を導入しようとしている。同規範は基本的に、人為的なミスの抑制、医薬品の汚染防止、品質変化の防止、高度な品質を保証する設計を要求するとともに、具体的には、最終医薬品ならびに製造に関する規制、建物、機械設備、従事者、原料、製造及び管理基準書、バッチ製造及び管理記録、製造及び管理手順、製品容器と資材、包装及び表示、品質試験管理、出荷の記録、安定性、有効期間の設定、苦情処理等の項目を規定している。

食品照射では、処理対象食品の最終的な衛生化手段として安易に放射線を照射するのではなく、生産・加工の各段階での管理の徹底、即ち、適正製造規範（GMP）を遵守し、放射線処理にあたっては照射効果と食品への影響を最小限に抑えるための必要最低限である適正線量で実施する事が要請されている。

特異的放射線分解生成物（URP）

放射線照射に特異的な分解生成物の事をURPと言う。放射線を食品に照射するとURPが生じる可能性があると考えられ、長年にわたりURPの検索が行われた。しかし、放射線照射により生成する化合物は数多く観察されているが、そのほとんどは自然界に存在するものや加熱等の処理によっても生成するものであり、放射線照射によって特異的に生成する化合物は限られている。仮に、URPが生成されるとしても、その照射食品中での存在量がわずかであると推定されるために、照射食品を過剰投与しても現在の毒性試験では検出できない。なお、URPの生成量は線量に比例すると考えられている。

そこで、米国厚生省食品医薬品局（FDA）は、以下のように、放射線化学的にURPの毒性を評価している。食品を1kGy照射すると放射線分解生成物は約30ppm生成すると推定した。このうちの90%は天然にも存在するものであり、残りの10%（3ppm）がURPである可能性がある。しかし、これは幾つかの化合物の合計であり、個々のURPの存在量は1ppm以下であるとしている。このような事情を踏まえ、具体的な線量と摂取量を考慮して照射食品の毒性を判断しなければならない。現在、FDAは1kGy以下の青果物の照射、30kGy以下の香辛料の照射等を許可している。なお、2-アルキルシクロブタン類がURPとして問題になっているが変

異原性は認められていない。

毒性試験

毒性試験とは、新たに開発された医薬品や食品添加物、及び、食品照射等新たな食品処理法の実施にともない変化したと予想される食品成分等の人体への影響（安全性）をチェックするための試験をいい、実験動物にその物質を摂取させ、又、培養細胞等と反応させて、生体への影響を調査する。

毒性試験の種類としては慢性毒性試験、急性毒性試験があり、更に、変異原（性）試験（優性致死試験、小核試験、エームス試験等）、催奇形性試験、世代試験等がある。

なお、動物飼育による毒性試験では1回の投与による死亡や中毒症状等を調べる急性毒性試験と、長期間投与による各種の生体機能障害発生等を調べる慢性毒性試験を行う。

倍数性細胞（ポリプロイド）

染色体異常の一種で、染色体の数が変化する数的異常の一つが倍数性（polyploidy）であり、もう一つが異数性（aneuploidy）である。正常の体細胞の染色体数は2倍性で、ヒトでは46本であるが、生殖細胞（卵子、精子）は半数体（23本）となり、授精によって再び2倍体（46本）となる。一方、染色体異常では染色体の数が3倍、4倍…と倍加して3倍性（69本）細胞、4倍性（92本）細胞……となるが、このような細胞を倍数性細胞という。倍数性の特殊なものとして、核内倍加（endoreduplication）がある。

異数性は染色体の数が1～数本増加、又は、減少するもので、染色体数が低下した低2倍性（hypodiploid）や増加した高2倍性（hyperdiploid）細胞がある。

これらの数的異常は細胞分裂の機構に対する障害や細胞融合によって生じるもので、紡錘糸の機能障害等による細胞核の分裂異常により3倍性細胞や4倍性細胞が生じる。細胞質分離の障害により2核細胞が生じて、4倍性細胞となる事もある。1～数本の染色体の不分離（non-disjunction）による不均等な染色体再配分によって異数性細胞が生じる。核内倍加はG2期から分離期への移行障害により直ちに次の細胞周期に入る事により生じると考えられている。

数的異常の意義については論議が多いが、特に倍数性については植物や魚等には種あるいは亜種の進化の過程に関与している事等から、自然な生物現象であるとの見方もある。しかし、ヒト先天性異常個体や特に自然流産等に倍数性に関与しているとの指摘もあり、ヒトの遺伝的障害に関連する可能性がある。

一方、異数性については先天異常、自然流産の重大な成因である事は明かである。更に、近年発癌のメカニズムと関連して注目されている。発癌抑制遺伝子を担っている染色体が異数性によって失われる事が発癌の活性化につながる事が明かになりつつあり、異数性の検出の重要性が指摘されている。

しかし、異数性の内、低2倍性は染色体標本の作製の際に細胞破壊による人為的な産物と判別が極めて困難である。又、株細胞を用いる場合には、ある程度染色体数にバラツキがあり、一般に異数性を検出する事は困難である。異数性を検出する適切な試験系の開発が望まれている。

フリーラジカル

単にラジカル、又は、遊離基（活性種）とも言う。1個、又は、それ以上の不対電子（1電子のみで一つの原子軌道、又は、1つの分子軌道を占有する電子を指す）を持ち、独立して存在できる化学種の事を指している。これらは、例えば・H、・OH、・CH₃というように表される。フリーラジカルは熱、光、放射線等の作用で分子が均等開裂（homolysis）して生ずる。又、酸素の1電子還元で生ずるスーパーオキシドもフリーラジカルである。これらは一般には極めて反応性に富み、速やかにラジカルを消失する方向で反応する。しかし、酸素のような不安定なラジカルも存在する。酸素分子は不対電子2個を有する三重項のビラジカルである。ラジカルの反応は次の三つに分けられる。

- 1)ラジカルが生成する反応（initiation）、分子の均等開裂や分子間の電子授受でラジカルが生成する。
- 2)ラジカルが他の物質と反応して新しいラジカルを生成（増殖）する反応（propagation）、ラジカルの種類は変わるがラジカル全体の数は変化しない。この反応は適当な基質があれば、ラジカル間の反応でラジカルが消失しない限り連鎖反動的に続く。この過程はラジカルの反応では最も特徴的なものである。
- 3)このようにして生成したラジカルがラジカル間の再結合、又は、不均化反応（disproportionation）によってラジカルを消滅させる反応（termination）がある。これによってラジカルは新しい生成物を与える。

フリーラジカルは一般に不安定で寿命は短く、ラジカルの捕捉、消去系と遭遇し易い環境では速やかに消去される。特に生体のような多量の水を包含する系ではラジカルは容易に消去されるし、又、蛋白質、アミノ酸、糖類、不飽和脂質等は全てラジカル捕捉剤でもある。従って、照射食品においても、照射時には多量のラジカルが生成するが、極めて短時間のうちにそのほとんどは消失する。稀には比較的安定なものが生成する事もあるが、水の添加や加熱で容易に消去される。なお、フリーラジカルは照射だけでなく加熱や、又、生体内でも生成・消滅している事が分かっている。

変異原性

変異原性は遺伝子の基本構造であるDNAに障害が生じ、これによってDNAの塩基配列の変化による遺伝子突然変異、あるいはDNAの担い手である染色体の変化つまり染色体異常等が生じ、正常とは異なる生物（細胞）をもたらす性質である。そのため変異原性試験は微生物等を用いてDNAに対する損傷を調べる試験から、実験動物等を用いて生まれてくる子供に対する影響を調べる試験まで多岐にわたっている。

変異原性試験

変異原性試験は基本的に次の3つを指標とする系に分類する事ができる。

- 1)遺伝子突然変異、
- 2)染色体異常、
- 3)DNA損傷、

これらの試験系では、各々微生物から高等哺乳類まで様々な生物種を用いている事から、試験の種類も多い。主な試験を以下に列挙するが、上記の3分類に含まれないものもある。又、これらの試験の中には方法の改良が行われているものもあり、さらにバイオテクノロジーを利用して新しい高感受性菌株やトランスジェニックマウス等が開発されている。

1. 遺伝子突然変異を指標とする試験：

- ①微生物（サルモネラ菌、大腸菌等）を用いる復帰変異試験
- ②哺乳類培養細胞を用いる遺伝子突然変異試験
- ③ショウジョウバエを用いる伴性劣性致死試験
- ④マウスを用いるスポット・テスト
- ⑤マウスを用いる特定座位試験

2. 染色体異常を指標とする試験：

- ①哺乳類培養細胞を用いる染色体異常試験
- ②ゲッ歯類の骨髓細胞を用いる染色体異常試験
- ③マウスを用いる小核試験
- ④ゲッ歯類の生殖細胞を用いる染色体異常試験
- ⑤ゲッ歯類を用いる優性致死試験
- ⑥マウスを用いる相互転座試験
- ⑦酵母を用いる染色体異常（異数性）試験
- ⑧植物を用いる染色体異常試験

3. DNA損傷を指標とする試験：

- ①微生物を用いるファージ誘発試験
- ②微生物を用いるDNA修復試験（Rec-assay）
- ③哺乳類細胞を用いる不定期DNA合成（UDS）試験
- ④哺乳類細胞を用いる姉妹染色分体交換（SCE）試験

4. その他の試験：

- ①酵母を用いる体細胞組換え及び遺伝子転換試験
- ②マウスを用いる精子形態異常試験
- ③哺乳類培養細胞を用いる形質転換試験

放射能と放射線

原子核が自発的に放射線を放出して他の原子核に変化する能力を放射能と言う。放射能を持つ核種を放射性核種と言う。一般に物質が放射能を持つと言う事は、物質内に放射性核種が含まれている事を指す。放射能と言う用語は、性質の他に、量的表現にも用いられ、単位時間内に起こった原子核崩壊の回数として定義される。放射能のSI単位はベクレル（Bq）で表され、1Bqは1秒間に原子核崩壊が1回起こる事を示す。これは古い単位であるキュリー（Ci）に代わり用いられている。1Ci=3.7×10¹⁰Bqである。

放射性核種の崩壊に伴い、エネルギーを持った粒子あるいは電磁波が放出される。これを放射線と言う。放射性核種から放出される放射線にはアルファ (α) 線、ベータ (β) 線、ガンマ (γ) 線があり、 α 線の場合はヘリウム核の流れ、 β 線は β 崩壊をする放射性核種から放出される電子の流れで、ともに不安定な原子核が安定な原子核に変わる際原子核から放出される。又、加速器で人工的に発生させる高速電子ビームは電子線と呼ぶ。 γ 線は原子核のエネルギー準位間の転移により、原子核から放出される電磁波である。同じように、波長の短い電磁波で物理的本性は γ 線と同じであるが、人工的に機械で発生させるものはエックス (X) 線といい、高速電子を金属ターゲットに衝突させて発生させる。

これらの放射線の内、食品照射に利用できるのは、照射による放射能の誘導の危険を避けるため、 ^{60}Co や ^{137}Cs の崩壊により発生する γ 線と加速器から得られる10メガ電子ボルト (MeV) 以下のエネルギーの電子線及び5MeV以下のX線に限定される。このような範囲の放射線を食品に照射しても放射能の誘導は無視できるので、適正な製造基準により作られた照射食品は放射能汚染食品ではない。放射線照射と放射能汚染は区別しなければならない。

放射線の線量は照射された物質に吸収されるエネルギー量により定義される。そのSI単位はグレイ (Gy) であり、これは1kgの物質が照射された際の1ジュール (J) のエネルギー吸収として定義されている。グレイは現在、以前に用いられたラド (rad) に代わって用いられており、1radは物質1gあたり100エルグ (erg) のエネルギー吸収量と定義されており、1J=10⁷ergであるから、1kGy=100radとなる。食品照射に用いられる線量は通常、キログレイ (kGy) の領域である。(1kGy=1,000Gy)

なお、放射線のエネルギーについては、使用される放射線自体が持っているエネルギーと照射に際して食品に吸収される放射線のエネルギー量、即ち、線量を区別する事が必要である。例えば、10MeVの電子線を線量3kGyで照射して殺菌効果を調べたというように記述する。

優性致死試験

優性致死試験も、変異原 (性) の有無を調べる試験方法の一つであり、優性致死とは、医薬品等の化学物質が精子または卵子に作用して染色体異常を発生させ、これが受精卵の発生を止めたり異常を生じて死に至らせる障害をいう。

普通の致死突然変異ではその遺伝子が結合した胚のみが死亡するのに対して、優性致死突然変異では染色体異常が他の結合の受精卵の胚でも死亡する。従って、この種の染色体異常現象そのものは次の世代に伝達されず集団から排除される運命にあり、遺伝影響の面では重要なファクターではない。しかし、この誘起性が認められたという事は、この突然変異原が生殖細胞に作用し染色体に障害を与えた証拠であり、化学物質等の突然変異性スクリーニング法としてこの試験が実施されている。

ラジオトキシン

ラジオトキシンとは、照射馬鈴薯中に生成されると予想された仮想有害物質の事をいう。1972年にソビエトの研究者M. クチンらが、照射馬鈴薯のアルコール抽出液がマウスの生殖細胞に対して変異原 (性) を示したのはラジオトキシンによるものであり、この事は食品照射の研究面で重要な問題になるであろうと警告した。これに対して日本を始め各国での追跡試験

が実施され、その結果、いわゆるラジオトキシンの生成と有害性は再現できず、今日ではこの説は科学的に否定されている。

(注) 日本での7品目の試験結果や海外での実用線量で処理した照射食品に関わる各種健全性試験に基づく総合評価では、異常は観察されていない。

◆ 略語表 ◆

ACINF	Advisory Committee on Irradiated and Novel Foods	(英国) 照射・新規食品に関する諮問委員会
ADI	acceptable daily intake	1日許容摂取量
ADMIT	Analytical Detection Methods for Irradiation Treatment of Foods	食品の照射処理の検出法に関する研究(プロジェクト)
AECL	Atomic Energy of Canada LTD.	カナダ原子力公社
BFIFC	Bureau of Foods Irradiated Food Committee	(米国) 食品部照射食品委員会
BHA	butylated hydroxy anisole	ブチルヒドロキシアニソール(抗酸化剤の一つ)
BHT	dibutyl hydroxy toluene	ジブチルヒドロキシトルエン(抗酸化剤の一つ)
CCA	Consumer and Corporate Affairs (Canada)	(カナダ) 消費者協議会
CIPC	chloroprotham	クロロプロファム
COT	Committee on Toxicity of Chemicals in Food, Consumer Products and Environment	(英国) 食品、消費者製品及び環境における化学物質の毒性に関する委員会
DNA	deoxyribonucleic acid	デオキシリボ核酸
DPPD	diphenyl-p-phenylene diamine	ジフェニルパラフェニレンジアミン(抗酸化剤の一つ)
EC	(Commision of the) European Communities	欧州共同体
EDB	ethylene dibromide	二臭化エチレン
EO(G)	ethylene oxide (Gas)	エチレンオキシド(ガス)
ESR	electron spin resonance	電子スピン共鳴
FAO	(United Nations) Food and Agriculture Organization	国連食糧農業機関
FDA	Food and Drug Administration (US Department of Health and Human Services)	(米国厚生省) 食品医薬品局

FIPCOS	Food Irradiation Process Control School	食品照射工程管理スクール
GATT	General Agreement on Tariffs and Trade	関税貿易一般協定
GC/MS	gaschromato graphy / mas spectrometry	ガスクロマトグラフィ／質量分析
GMP	good manufacturing practice	適正製造規範
GOT	glutamic-oxaloacetic transaminase	グルタミン酸オキサロ酢酸トランスアミナーゼ
GPT	glutamic-pyruvicacetic transaminase	グルタミン酸ピルビン酸トランスアミナーゼ
HEI	Health and Energy Institute	(米国) 健康エネルギー研究所
HRC	Huntingdon Research Center	(英国) ハンティンドン研究所
IAEA	International Atomic Energy Agency	国際原子力機関
ICPEMC	International Commission for Protection against Environmental Mutagens and Carcinogens	国際変異原・ガン原物質防護委員会
ICRP	International Commission on Radiological Protection	国際放射線防護委員会
IFIP	International Project in the Field of Food Irradiation	食品照射に関する国際協力プロジェクト
IR	infrared	赤外線
IRFIF	International Register of Food Irradiation Facilities	食品照射施設の国際登録制度
ITC	International Trade Center (-UNCTAD/GATT)	国際貿易センター
IU	international unit	1国際単位
JECFI	Joint (FAO/IAEA/WHO) Expert Committee on Irradiated Food	FAO/IAEA/WHO 照射食品の健全性に関する合同専門家委員会

LSR	Life Science Research	(英国) 生命科学研究所
MB	methyl bromide	臭化メチル
MH	maleic hydrazide	マレイン酸ヒドラジド
NDGA	nordihydroguaiaretic acid	ノルジヒドログアヤレティック酸 (抗酸化剤の一つ)
NI	Nordion International INC.	ノルディオインターナショナル社
NIN	(Indian) National Institute for Nutrition	(インド) 国立栄養研究所
PG	propyl gallate	没食子酸プロピル(抗酸化剤の一つ)
RI	radioisotope	放射性同位元素
RNA	ribonucleic acid	リボ核酸
SI	stableisotope	安定同位元素
SPF	specific pathogen free	特定菌の無菌(動物)
UCLA	University of California-Los Angeles	カリフォルニア大学ロスアンゼルス校
URP	unique radiolytic products	特異的放射線分解生成物
USDA	US Department of Agriculture	米国農務省
USDOE	US Department of Energy	米国エネルギー省
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development	国連貿易開発会議
WHO	World Health Organization	世界保健機関

食品照射Q&Aハンドブック
2007年3月

監修・発行 社団法人 日本原子力産業協会
〒105-8605 東京都港区新橋2-1-3 新橋富士ビル5階
電話：03-6812-7109（国際・産業基盤強化本部）
FAX：03-6812-7110 <http://www.jaif.or.jp/>

監修協力 伊藤 均 元日本原子力研究所 主任研究員

非売品

