



JAERI-Review
2001-029

JP0150757



食品照射の基礎と安全性

— 食品衛生・貯蔵にはたす放射線処理の可能性 —

2001年9月

伊藤 均

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

食品照射の基礎と安全性
—食品衛生・貯蔵にはたす放射線処理の可能性—

日本原子力研究所高崎研究所環境・資源利用研究部
伊藤 均

(2001年7月19日受理)

食品照射は全世界で60年以上の開発の歴史があり、安全性は十分に確認されているにもかかわらず、イメージによる誤解から普及が遅れている技術である。しかし、照射食品の許可国が51カ国1地域に増加し、アメリカや欧州連合内で照射食品が流通している状況の中で、わが国だけが食品照射に対し鎖国を続けるのは困難な状況になってきている。本報告書では食品照射の原理と応用分野、食品照射技術開発の歴史について述べるとともに、照射食品の安全性について動物試験の結果、放射線分解生成物の解析、栄養学的評価、微生物学的評価について検討し安全性に問題がないことを明らかにした。ことに、放射線分解生成物については多くの研究報告を詳細に検討し、放射線特有の分解生成物が存在しないことを明らかにした。すなわち、多くの研究成果は食品成分に対する放射線の作用は基本的に酸化分解反応であり、放射線による分解生成物は自然界で起こっている通常の酸化分解反応での生成物と大差ないことを示している。その他、食品照射実用化に必要な照射技術、検知法についても開発の現状について解説した。

The Basis and Safety of Food Irradiation
- Advantages of Radiation Treatment for Food Sanitation and Storage -

Hitoshi ITO

Department of Radiation Research for Environment and Resources
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received July 19, 2001)

The food irradiation has the history of more than 60 years in its development. However, its commercial application has not been promoted well in Japan even though the safety of irradiated foods was confirmed. Recently, relevant authorities in 52 countries have given clearance to many commodities, and irradiated foods are commercially distributed in USA and EU countries. The international situation makes some unavoidable circumstances which can not close the commercialization of food irradiation in Japan. The present report contains the basis and application of food irradiation, and history of development in the World and Japan. Moreover, the safety of irradiated foods are demonstrated from many evidences of researches in animal feeding tests, in analysis of radiolytic products, in nutritional evaluations and in microbiological studies of irradiated foods. Especially, it makes obvious from the results of many researches that unique radiolytic products can not be produced by irradiation of foods. Because main radiation effects are induced by oxidation degradation of food components as similar to natural oxidation by heating or UV light. Radiation engineering for commercial process and identification methods of irradiated foods are also presented.

Keywords : Food Irradiation, Foodborn Disease, Safety Evaluation of Irradiated Foods, Radiolytic Products, Shelf-life Extension, Disinfestation, Radiation Engineering, Identification of Irradiated Food

目 次

1.はじめに	1
2.日常生活と放射線のかかわり	2
2.1 放射線と放射能	2
2.2 日常生活に役立っている放射線	2
3.食品照射とは	7
3.1 食品照射の原理と特長	7
3.2 食品照射技術の必要性	7
3.3 放射線の種類と作用	8
3.4 放射線の生物学的効果	9
3.5 放射線量と照射効果	10
4.世界における食品照射	20
4.1 開発の歴史と現状	20
4.2 アメリカでの実用化政策	20
4.3 ヨーロッパでの統一規格	21
4.4 アジアなどでの実用化動向	22
4.5 コーデックス等国際機関の取り組み	22
4.6 照射食品実用化の現状	23
5.わが国の食品照射	28
5.1 研究開発の歴史	28
5.2 照射効果と照射技術開発	29
5.3 安全性研究	31
5.4 照射馬鈴薯の実用化	31
6.食品照射の応用分野	40
6.1 食品に対する放射線の効果	40
6.2 野菜の発芽防止	40
6.3 害虫および寄生虫の殺滅	41
6.4 食中毒性細菌の殺菌	42
6.5 腐敗菌殺菌による貯蔵期間の延長	43
6.6 香辛料・乾燥食品材料の殺菌	44
6.7 完全殺菌への応用	45
6.8 その他の応用分野	45
7.照射食品の安全性	62
7.1 安全性評価の歴史	62
7.2 誘導放射能の評価	63
7.3 放射線による食品成分の化学変化	64
7.4 放射線分解生成物による安全性評価	65

7. 5 動物を使った安全性評価 -----	67
7. 6 栄養成分への影響 -----	69
7. 7 微生物などへの影響 -----	69
7. 8 世界保健機関の結論 -----	70
7. 9 反対運動の論点への回答 -----	71
8. 照射食品の検知技術 -----	88
8. 1 検知技術の必要性 -----	88
8. 2 物理学的方法 -----	88
8. 3 化学的方法 -----	89
8. 4 生物学的方法 -----	89
9. 食品の放射線処理技術と経済性 -----	93
9. 1 吸収線量分布 -----	93
9. 2 ガンマ線照射施設 -----	93
9. 3 電子線照射施設 -----	94
9. 4 照射工程の管理と経済性 -----	95
10. おわりに -----	106
謝辞 -----	107
参考文献 -----	108

Contents

1. Introduction -----	1
2. Relationship of Radiation for Daily Life -----	2
2.1 Radiation and Radionuclides -----	2
2.2 Contribution of Radiation for Daily Life -----	2
3. Basis of Food Irradiation -----	7
3.1 Principle and Feature of Food Irradiation -----	7
3.2 Necessity of Food Irradiation Technology -----	7
3.3 Characteristics and Interaction of Radiation -----	8
3.4 Effects of Radiation on Living Organisms -----	9
3.5 Radiation Doses and Radiation Effects -----	10
4. Food Irradiation in the World -----	20
4.1 History of Development and Present Status -----	20
4.2 Policy of Food Irradiation in USA -----	20
4.3 European Directive Registration -----	21
4.4 Status for Promotion of Food Irradiation in Asia and Other Countries -----	22
4.5 Contribution to Food Irradiation by International Organizations -----	22
4.6 Commercialization of Food Irradiation -----	23
5. Food Irradiation in Japan -----	28
5.1 History of Development -----	28
5.2 Development of Radiation Effects and Radiation Engineering -----	29
5.3 Safety Evaluation of Irradiated Foods -----	31
5.4 Commercialization of Potato Irradiation -----	31
6. Application of Food Irradiation -----	40
6.1 Effect of Irradiation on Foods -----	40
6.2 Sprout Inhibition of Vegetables -----	40
6.3 Control of Insects and Parasites Infestation -----	41
6.4 Inactivation of Food Born Pathogenic Bacteria -----	42
6.5 Extension of Shelf-life by Delaying Microbial Spoilage -----	43
6.6 Decontamination of Microorganisms in Spices and Other Dried Food Ingredients -----	44
6.7 Application to Sterilization of Foods -----	45
6.8 Other Applications -----	45
7. Safety of Irradiated Foods -----	62
7.1 History of Safety Evaluation -----	62
7.2 Evaluation of Induced Radioactivity -----	63
7.3 Chemical Changes of Food Components by Radiation -----	64
7.4 Evaluation of Safety by Radiolytic Products -----	65

7.5 Evaluation of Safety by Animal Feeding Tests -----	67
7.6 Nutritional Evaluation -----	69
7.7 Microbiological Safety of Irradiated Foods -----	69
7.8 Conclusion of World Health Organization -----	70
7.9 Answers to Antagonistic Arguments -----	71
8. Identification Methods of Irradiated Foods -----	88
8.1 Necessity of Identification Methods -----	88
8.2 Physical Methods -----	88
8.3 Chemical Methods -----	89
8.4 Biological Methods -----	89
9. Engineering and Economy of Radiation Treatment of Foods -----	93
9.1 Dose Distribution in the Products -----	93
9.2 Radionuclide Source Irradiation -----	93
9.3 Accelerator Irradiation -----	94
9.4 Control of Radiation Process and Economic Evaluation -----	95
10. Conclusion -----	106
Acknowledgements -----	107
References -----	108

1. はじめに

20世紀以降、地球上の人口は急速に増加し、それに伴い自然環境の破壊や食料供給の不足が問題になってきている。人口が増加すれば当然のことながら食料増産のため農業不適地までが開発され、乱開発による砂漠化が進み、食料生産が減少し飢餓が発生するという悪循環が世界の多くの地域で起こっている¹⁾。

一方、食料貯蔵技術が進歩した現在でも収穫後の10～20%が腐敗や虫害、病原菌汚染により損失または廃棄されている。もちろん、収穫後の損失の中には輸送手段がないための損失もあるが、適切な貯蔵・殺菌技術があれば食料の多くは食品としての利用が可能である。これまで、食料の増産・貯蔵期間延長を目的として多くの農薬、保存料が開発されてきて人々の生活を豊かにしてきた。しかし、一方では薬剤類の一部は生態系の破壊とか発ガン性などが問題になっており、これまで食料貯蔵や検疫に広く用いられてきた殺虫剤の臭化メチルはオゾン層破壊物質として国際的に使用が禁止されようとしている²⁾。

近年、国際交流の活発化に伴い食中毒発生が世界的に増加しており、かつては特定地域に局在していた食中毒菌が世界各地に拡散している。また、薬剤耐性の病原菌が増加しており、食中毒の治療を困難にしている。このため、環境への悪影響がなく、食品として安全な食料貯蔵および殺菌・殺虫技術が求められている。世界保健機関（WHO）や国連食料農業機関（FAO）は、これら諸問題の解決に役立つ技術の一つとして「食品照射」に注目しており、加盟国に食品照射の実用化推進を勧告している³⁾。また、コーデックスも食品照射の規格基準を制定している。

わが国では「食品照射」という技術の存在を知らない人が多く、たとえ知っていても何か恐ろしい危険な技術と誤解している人が多いと思われる。多くの人は放射線という言葉そのものに先ず抵抗感を持つようである。しかし、人類は日常的に自然放射線とかかわりを持って生きてきておりし、日常生活の多分野でもレントゲン撮影や品種改良などで放射線の恩恵を受けている。放射線も熱と同様にその原理を理解すれば人類の生活向上に役立てることが可能である。

ここに述べる「食品照射技術」は全世界で60年以上の研究の歴史があり安全性も十分に確認されているにもかかわらず、イメージによる誤解から普及が遅れている技術である。食品照射と同じように誤解によって普及が遅れた技術として、缶詰と牛乳の加熱による殺・滅菌がある。現在では高圧加熱蒸気滅菌（完全殺菌）した缶詰を危険と言う人はいないが、缶詰技術が発明された当時は恐れる人が多く、普及するのに約100年かかっている。牛乳の場合も、消毒殺菌技術（菌数低減および病原菌の殺菌）が開発される前は、牛乳が原因で多くの子供や成人が病気にかかっていた。この技術にも反対運動が起り、普及するのに50年近くを要した⁴⁾。

21世紀になっても、世界の人口増が続き、食料難に苦しむ国が多く、食中毒も世界各地で多発している。このため、アメリカでは食中毒および検疫対策として食品照射技術の実用化を推進しており、欧州連合でも食中毒対策として食品照射に注目している。また、アメリカやヨーロッパ、アジアなどでは食品照射の実用化が急速に進んでおり、日本だけが食品照射技術に反対するのは困難になってきている。

ここでは食品の安全確保および食料貯蔵に果たす放射線処理の可能性、照射食品の安全性について解説する。

2. 日常生活と放射線のかかわり

2. 1 放射線と放射能

わが国では「放射線」と「放射能」を混同して、感覚的に拒否反応を示す人が多い。一方、レントゲン写真撮影とかラジウム鉱泉、ラドン鉱泉、宇宙線などの言葉にはそれほど抵抗感がないようである。また、「放射線」という言葉の代わりにエックス線とか電子線、ガンマ線という言葉を使えば恐ろしさも半減する人が多いと思われる。

ところで、「放射能」とは放射線を出す物質、放射性物質（放射性同位元素）を意味する場合が多く、多くの人にとっては死の灰のイメージが強い。しかし、私達の周りには表2-1に示すように食品や体内に含まれるカリウム-40や炭素-14、岩石などに含まれるラドンやラジウムなど天然の放射性物質が存在しており、宇宙からも絶えず放射線の仲間である宇宙線が降り注いでいる¹⁾。地球の深部にはラドンやラジウムなどの放射性物質が含まれており、石炭などの燃焼時にもラドンガスが微量に放出される。ラドン鉱泉は健康に良く様々な病状に効くと言われているが、一方では高濃度のラドンガスに長期間にわたりさらされると肺ガンの原因になるとも言われている。

一方、大気圏外には大量の宇宙線が飛来しており、空気層で遮断されているため地表での宇宙線量は少ないが、航空機での宇宙線の被爆は地表の数倍多いことが知られている。また、花崗岩が多い地帯では地中からの自然放射線量が一般地域の数倍高いことが知られている。

このように、私達の周囲を冷静に眺めれば、レントゲン、宇宙線、ラドン鉱泉、岩や壁からの放射線、食品や体内に含まれる天然の放射性物質からの放射線など、いたるところで放射線とかかわっている（表2-2）。ここで述べる放射線は主として電離性（イオン化）放射線を意味しているが、放射線も少量（数10ミリ・シーベルト程度）では人体に回復能力があるため遺伝子の傷は修復され、子孫への悪影響は残らないであろう。また、少量の放射線はガン発生を低減化させたり生物組織を活性化させるという報告が多くあり、遺跡などから出土する古い種子の発芽促進に放射線処理が利用されているほどである。

2. 2 日常生活に役立っている放射線

私達は太古の昔から放射線とかかわってきているが、現代文明ではいたるところで放射線の恩恵を受けている。例えば、日常なにげなく見ているテレビやパソコンに内臓されている電線の被覆材料の多くは放射線処理で耐熱性を向上させてある。また、電池用隔膜や自動車のタイヤ成型の前処理、フロッピーディスクなども放射線で加工処理したものが多い。意外なところでは、煙探知器にアメリシウム-241という放射性物質が利用されている。

放射線の強い透過力の応用では、食品中の異物検査、税関での荷物検査、航空機のエンジン損傷の有無などの非破壊検査がある。これら生活に関係している分野で利用されている放射線の種類はエックス線、ガンマ線、電子線が圧倒的に多いが、税関での麻薬検査に中性子線が利用されることもある。

放射線は農業や医療でも役立っており²⁾、私達の生活を豊かにしている。生物分野での放射線利用は表2-3に示すように分類できる。

農業分野では放射線による突然変異により耐寒性のイネ、耐病性のナシ果樹、短桿性のビールムギなどが作成され実用化されている。放射線による害虫の不妊化では沖縄県などの南西諸島や小笠原諸島に生息していたミバエ類が撲滅され農薬の散布量が低減し、本土への農産物の出荷も可能になっている。

医療分野では病巣部の早期発見などの検査に用いられるレントゲン撮影がある。この撮影に用いられるエックス線による吸収線量（放射線の被爆量）は1年間に一般人が受ける自然放射線の約20分の1である。ガン細胞を放射線で破壊しようとする場合、周囲の組織も悪影響を受ける恐れがある。このため、放射線の束を細かくするとか、ガン組織だけを周囲から集中攻撃するなどの技術が開発されている。また、ガン組織にホウ素を吸収させ中性子で照射したり重イオン線（重い原子核）を照射する技術も開発されている。輸血用血液に含まれているリンパ球は輸血先の患者組織を異物として攻撃するため、副作用により患者を死亡させることがある。このため、最近では放射線でリンパ球を殺滅させることが義務づけられている。

使い捨て医療用具、例えば注射器や透析器などの人工臓器は医療の進歩、合理化とともに急速に普及している。以前は酸化エチレンガスで滅菌（完全殺菌）されていたが、残留毒性とか作業者への悪影響が問題になり、わが国でも医療用具の50%以上は放射線で滅菌処理されている。放射線は人工臓器のような複雑な形状の製品でも内部まで完全に滅菌できるという利点があり、世界各国で利用されている。医薬品の場合も微生物汚染が問題になることがあるが、生薬類については放射線殺菌が実用化されつつある。このように放射線は日常生活の多くの分野で役立っている。

表 2-1 日常生活と自然放射線

☆ 1 年間に人が受ける自然放射線量

* 宇宙から : 0.38 ミリシーベルト

* 大地から : 0.46 ミリシーベルト

* 食品から : 0.24 ミリシーベルト

- ・エックス線撮影 : 1 回 0.05 ~ 7.1 ミリシーベルト
(胸部 0.06、頭部 0.05、胃部 0.6 ~ 2.7、腹部 3.0 ~ 7.1)
- ・原子力発電所 : 年間 0.05 ミリシーベルト
- ・職業許容被爆線量 (国際基準) : 5 年間に 100 ミリシーベルト以下
- ・人が障害を受ける危険限界線量 : 1 シーベルト
- ・人の致死被爆線量 : 7 シーベルト

1 ミリシーベルト = 0.001 シーベルト ; 1 シーベルトは
1 Gy (グレイ) とほぼ同じ吸収エネルギー量
(1 Gy = 1 ジュール / kg = 0.239 カロリー / kg)

☆ 体内の放射性同位元素の量 (体重 60kg の人の場合)

・カリウム-40 : 4000 ベクレル (カリウムの 0.012% を構成している)

・炭素-14 : 2500 ベクレル

(カリウム-40 の半減期 10 億年、炭素-14 の半減期 5730 年)

1 ベクレル : 1 秒間に放射性元素が 1 個崩壊する放射能

量
(1 ベクレル = 2.7027×10^{-11} キュリー)

表 2－2 放射線の種類

* 電離性放射線

- ・電磁波（光の仲間）：ガンマ線、エックス線

- ・粒子線：電子線（ベータ線）、アルファ線、陽子線、宇宙線、重粒子線

* 中性子線（水でエネルギーを失いやすいが、鉄は透過）

* 非電離性放射線：紫外線、可視光線、赤外線、等

表 2 - 3 生物分野における放射線利用

農業分野	食品保存と衛生化	0.02 ~ 50kGy
	切り花の検疫処理	0.3 ~ 0.5kGy
	不妊化による害虫撲滅	0.07kGy
	植物の品種改良	0.2 ~ 0.5kGy
	食品包装材の滅菌	15kGy
医療分野	医療用品の滅菌	15 ~ 30kGy
	癌治療	10 Gy 以下
	X 線診断	5×10^5 Gy 以下
	輸血用血液中リンパ球 の副作用防止	15 ~ 50 Gy
	実験動物飼料の滅菌	25 ~ 50kGy

3. 食品照射とは

3. 1 食品照射の原理と特長

食品照射 (food irradiation) とは電離性放射線により野菜などの発芽を抑制したり害虫や微生物を殺滅することにより、食品の貯蔵期間を延長したり衛生化する技術である¹⁾。食品の貯蔵手段としての放射線処理の可能性については 1916 年ころから研究されていたが、食品照射の本格的な研究は第二次世界大戦終了後からアメリカやイギリス、旧ソ連などで開始されており、国際的には 60 年以上の研究実績がある。わが国でも 1955 年（昭和 30 年）前後から研究が開始されている。食品の放射線処理の特長は以下のとく要約できる。

- ①照射による熱の発生が少なく、温度上昇がたかだか数°Cである。
- ②放射線、ことにガンマ線やエックス線は透過力が強く、包装済の製品でも内部まで均一に処理できる。
- ③薬剤のように残留することはない。
- ④栄養成分の低減が少ない。
- ⑤連續的に大量処理が可能である。

すなわち、放射線のエネルギーは食品成分などに影響（主に化学変化）を及ぼし、最終的に熱に変わり消失する。

しかし、食品中の微生物をほぼ殺菌できる 10kGy（キログレイ）の吸収線量（食品などに吸収されるエネルギー量）でも水を 2.4 °C温めるエネルギーしか与えず、凍結下でも殺菌が可能である。しかも、生鮮食品の状態で処理できるという特長がある。このため、放射線での殺菌処理を冷殺菌と呼ぶこともある。これに対し、加熱殺菌では 60 ~ 180 °Cの温度が必要であり、食品成分の化学変化も起こりやすい。

一方、放射線も万能ではなく、食品の種類によって放射線処理に限界があり、多くの生鮮野菜は発芽防止を目的とした放射線処理では効果があるが、殺虫を目的とした処理では放射線量が多くなるため代謝異常による品質劣化が起こるし、生鮮果実も殺虫を目的とした放射線処理は効果があるが、殺菌を目的とした処理では品質劣化が起こる。穀類も殺虫処理は有効であるが殺菌処理を目的とした高線量で粘度低下が起こる。しかし、肉類や魚介類、低温加熱調理食品は照射条件によっては 10kGy 以上の高線量でも品質劣化が起きないものがある。

食品や生物に対する放射線の作用は化学反応によるものであり、用いられる放射線の種類やエネルギーは限定されており放射能の生成は全く無視できる。また、食品成分の放射線による化学変化は加熱などと大差がない。

3. 2 食品照射技術の必要性

食料原料の多くは収穫直後から微生物や酵素による腐敗、害虫による食害等が進み長期貯蔵が困難である。このため、人類は古来より乾燥、塩蔵、発酵など様々な技術を開発してきた。近年では加熱殺菌技術、冷蔵、冷凍、薬剤処理技術の開発により食品の貯蔵性は飛躍的に改善されて

きている。しかし、これらの技術開発にもかかわらず、全世界では収穫後の食料の 10 ~ 20%以上が腐敗や虫害によって損失しており、食中毒による被害は増加の傾向にある。

わが国では表 3-1 に示すように、食中毒の急増は社会問題となりつつあり、欧米諸国では図 3-1 に示すように食中毒による被害はさらに著しい。食中毒急増の要因として考えられるのは、交通手段の急速な発展により各種の病原菌が遠隔地にも拡散しやすくなつたことや、食品生産の大規模・集中管理化、国際間交流の活発化、未開拓地の開拓などが関係していると思われる。一方、家畜の病気予防のために添加される抗生物質が原因した薬剤耐性菌の出現は医療面でも深刻な被害をもたらしている。

食料の長期貯蔵や殺虫に用いられていた二臭化エチルや酸化エチレンなどの薬剤は食品原料の処理に適しているが、発ガン性などの毒性物質が残留するため食品への使用が禁止になり、現在では臭化メチルや青酸ガスなどが検疫や殺虫処理に用いられている。しかし、臭化メチルは毒性の問題ばかりでなく、フロンガスと同様に強力なオゾン層破壊物質であり、2005 年から使用禁止となることが国際的に合意されている²⁾。検疫処理では当面、臭化メチルの使用が認められているが、わが国は世界一の使用国であり、アメリカが検疫処理に放射線殺虫法を導入する方針を示し多くの国も同調していることから、わが国の国際的孤立は避けられない情勢にある。

わが国は温帯から亜熱帯気候に位置しており、病害虫による被害は国際間交流および地球の温暖化とともに増加することが予想される。また、世界人口の増加、環境破壊による農業適地の減少を考慮すると³⁾、放射線処理による食料損失防止および食中毒低減技術の導入により食糧問題解決の一助とすることが期待できる。

3. 3 放射線の種類と作用

電離性放射線にはガンマ線、電子線、アルファ線、エックス線、中性子線、宇宙線などがある。この内、電子線とエックス線は機械的に発生する放射線である。この内で、食品照射に利用できるのは電子線、ガンマ線、エックス線のうち放射能を生成することができない所定のエネルギー範囲のものに限られている。

ガンマ線やエックス線は可視光線と同じ電磁波（電波もその一種）の仲間であり、図 3-2 に示すようにエネルギーは紫外線の 4 ~ 10 電子ボルト (eV) に比べ、1 万~百万電子ボルトと著しい差がある。紫外線の場合は透過力が著しく弱く、図 3-3 に示すように原子核外の電子を励起する作用があるが、電子をはじき飛ばす電離作用（イオン化）はほとんどなく非電離性放射線に属する。一方、電子線、ガンマ線、エックス線はイオン化作用を有するため、電離性放射線またはイオン化放射線と呼ばれている。放射線で生成されるイオンの寿命は千万分の 1 秒以下であり、その後、外部から自由電子が取り込まれ励起状態となり、化学反応を起こしやすい活性種（フリーラジカルまたは遊離基ともいう）を生成する。放射線の場合の活性種生成では水を分解して図 3-4 に示すように、水酸基ラジカル (·OH)、水素ラジカル (·H)、水和電子 (e_{aq}) などの水分解ラジカルを生成しやすいという特徴がある。食品や生物には水が含まれているため、主要な化学反応は水分解ラジカルによって起きる。また、酸素が共存すると過酸化ラジカル (O_2^{\cdot}) や過酸化水素 (H_2O_2) も生成する。しかし、過酸化水素は水和電子と連鎖反応を起こすため、放射

線の吸収線量に比例して蓄積することはあり得ず、最大でも 1ppm (1kg 当たり 1mg) 以下の蓄積量である。これらの水分解ラジカルの内、水酸基ラジカルや過酸化ラジカル、過酸化水素は活性酸素に属している^{4, 5)}。なお、活性種は不飽和脂質などの有機高分子では可視光線や紫外線、加熱でも簡単に生成する。また、活性種の一種である活性酸素は放射線とは関係なしに生体内の新陳代謝や脂質の酸化分解時などでも生成している。

水分解ラジカルの寿命は 1,000 分の 1 秒以下であり、放射線により不飽和脂質などに生じる活性種や過酸化物も水と接触すると 100 分の 1 秒以下で消滅し有機酸などの酸化分解物に変化する。

3. 4 放射線の生物学的効果

放射線そのものの持つエネルギーは紫外線などと比べてたちが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 °C 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による化学反応を中心であり、加熱殺菌のような高エネルギーを要する分子の励起作用による化学反応でないためである。

放射線の生物作用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、細胞膜の一部破壊も起こることがある。食品や生物体は 75%以上が水で占めら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（分子内の活性種の生成）はほとんど無視できる。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、生物への影響が大きいのは水酸基ラジカルであり、生物作用の 60 ~ 70%を占めていると報告されている⁴⁾。この水酸基ラジカルなどの水分解ラジカルは DNA 鎮切断や DNA を構成する各種成分に変化を引き起こし、主に細胞分裂能を失わせる。放射線の細胞に対する影響がタンパク質などの細胞成分への少ない損傷に比べ、予想外に大きいのは DNA が他の細胞成分より活性酸素の作用に敏感なためである。

DNA は 2 本の鎖で構成されているが、図 3-4 に示すように、DNA の 1 本鎖上の損傷は一連の酵素系によって容易に修復されるが、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ミスにより細胞分裂能が失われたり、突然変異を引き起こす^{6, 7)}。しかし、突然変異の比率は著しく小さく、その多くは細胞分裂能が失われることによって細胞死を引き起こす。

放射線による DNA 損傷修復の機構は紫外線と類似しており、事実、細菌に対する突然変異発生率は両者でほとんど差がない。

生物に対する放射線の影響は表 3-2 に示すように、高等生物に対しては少ない量の放射線（吸収線量）でも生物効果をもたらすが、下等生物の場合は多量の吸収線量が必要である。一般に生物に対する放射線の影響は DNA 含量に反比例しており、細胞当たりの DNA 含量が少ないほど放射線に耐性となる。細胞内の DNA 含量は細菌を 1 とすると、ウイルスで 0.01 ~ 0.1、カビや酵母菌で 10、虫で 20、哺乳動物で 1,000、植物で 1,000 ~ 5,000 となる。

なお、放射線の生物に対する障害は分子レベルで見ると他の処理法と比べ特異なものではない。紫外線や殺菌剤などの化学物質による生物障害は放射線と同様に DNA に傷をつける働きが中心

であり、加熱による生物障害は主にタンパク質やDNA分子の変成（立体構造の変化、例えば卵白の熱による凝固）によるものである。

3. 5 放射線量と照射効果

食品中に吸収される放射線のエネルギー単位を吸収線量または線量といい、Gy（グレイ、1ジュール／kg = 0.239 カロリー／kg）またはkGy（キログレイ、1,000Gy）が用いられている。1Gyは1シーベルトとほぼ同じ単位であり、医療関係では主にシーベルト、産業利用では主にグレイ（Gy）の単位を用いている〔注：吸収線量の単位として、以前はラド(rad)が用いられていた；1Gy = 100rad〕。

人は約7シーベルトの放射線をあびると死するといわれるが、食品照射では人が障害を受ける危険限界線量に比べ20～50,000倍の吸収線量の放射線を用いている。しかし、このことは加熱調理でも同じことが言える。例えば、人間は60℃の湯に短時間曝すだけで火傷または死に至るが、100℃の煮沸または180℃の天ぷらで揚げた食品を食べても平気であるのと同じであり、食品の殺菌・殺虫または調理に適用する多くの処理法は直接人間に適用すると有害である。

食品の放射線処理で目的とする効果を得るために、それぞれの食品に合った吸収線量になるように放射線を照射する必要がある。照射する線量が適切な量より少なければ、目的とした効果は得られない。反対に、照射する線量が過剰であれば、食品の品質劣化が起こり、食品としての商品価値が低下する。

食品に汚染している微生物の殺菌効果を調べるには図3-5の片対数グラフ（生存率が対数目盛）で示すように、それぞれの微生物の 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%殺菌するのに要する放射線量であり、その値は表3-3に示すように微生物の種類や照射時の水分含量や酸素濃度、凍結、などによって変化する。なお、微生物の中でもグラム陰性細菌の方がグラム陽性細菌より放射線耐性が弱い傾向にあり、カビ類でも穀類などに発生するカビは植物に寄生するカビより低線量で殺菌されやすいことがわかっている。また、耐熱性の胞子を有する細菌類は放射線にも耐性であり、ウイルスとほぼ同じ耐性を示す⁸⁾。

ガンマ線と電子線、エックス線による殺菌効果は基本的に同じであり、活性酸素によるDNA障害によるものである。しかし、電子線はエックス線やガンマ線に比べ单位時間当たりに照射される量（線量率）が1千～1万倍も多いため細胞内への酸素拡散速度による活性酸素生成量減少などの関係で図3-7に示すように殺菌効果などに若干差が見られるが、食品成分等への影響も含め実用的な線量の差はほとんど認められない⁹⁾。

放射線の量は熱量として測定するのが望ましいが、放射線の生物効果や食品照射の研究ではフリッケ(Fricke)鉄線量計が主に用いられてきた。これは、水溶液中の第1鉄が放射線の酸化作用により第2鉄に変わる量を計測するもので、水を多く含む系の研究に適している。フリッケ鉄線量計は主にガンマ線を用いた研究で用いられてきたが、電子加速器を用いた研究ではCTA(三酢酸セルロース)フィルム線量計が用いられている。フリッケ鉄線量計とCTAフィルム線量計は相関性が良く、微生物の放射線感受性試験でも相関性が確認されている。

表3-1 わが国における食中毒発生情況（件数）。

原因別	年別	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
腸炎ビブリオ菌		358	247	99	110	224	245	292	568	802	667	416
サルモネラ菌		129	159	144	143	205	179	351	521	630	825	512
病原大腸菌		19	30	21	37	33	20	179	176	216	315	210
カンピロバクター		19	24	28	14	31	20	65	257	439	493	454
ブドウ球菌		110	95	77	61	72	60	44	51	79	67	86
その他 *		291	227	188	185	265	175	286	387	447	330	520
合計		926	782	557	550	830	699	1,217	1,960	2,613	2,697	2198

* その他の細菌性食中毒、小型球形ウイルス、自然毒、等。

表3-2 生物の照射効果に必要な線量

哺乳動物に対する障害	0.005 ~ 0.01kGy
根茎菜類の発芽抑制	0.02 ~ 0.1kGy
害虫・寄生虫の殺滅	0.1 ~ 1kGy
カビ類の殺菌	1 ~ 10kGy
細菌栄養細胞の殺菌	1 ~ 10kGy
細菌胞子の殺菌	10 ~ 30kGy
ウイルスの不活性化	10 ~ 50kGy
酵素の不活性化	50 ~ 200kGy

表 3-3 溶存空気存在下・磷酸緩衝液（0.067 モル）
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・エンテリティデイス	0.13
グラム陽性好気性球菌	0.30
黄色ブドウ球菌	0.13
腸炎ビブリオ菌	0.035
ボツリヌス菌	1.6
枯草菌	1.4
セレウス菌	1.1
麹カビ	0.20
アスペルギルス・フラバス	0.30
植物寄生カビ	0.20 ~ 1.6
酵母菌	0.36

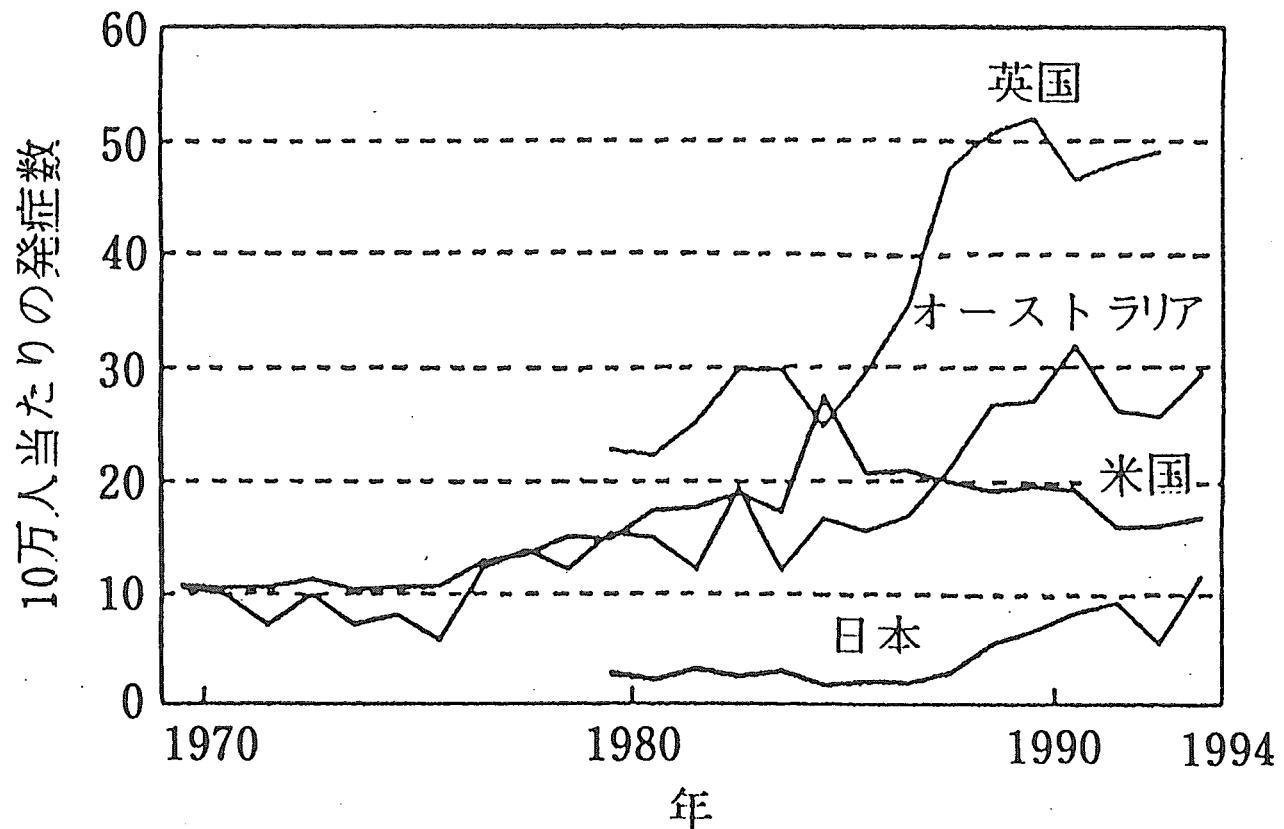


図3-1 各国における食品由来サルモネラ症の頻度（世界保健機関）

ガンマ線

X線

紫外線

可視光線

赤外線

レーダー波

ラジオ波

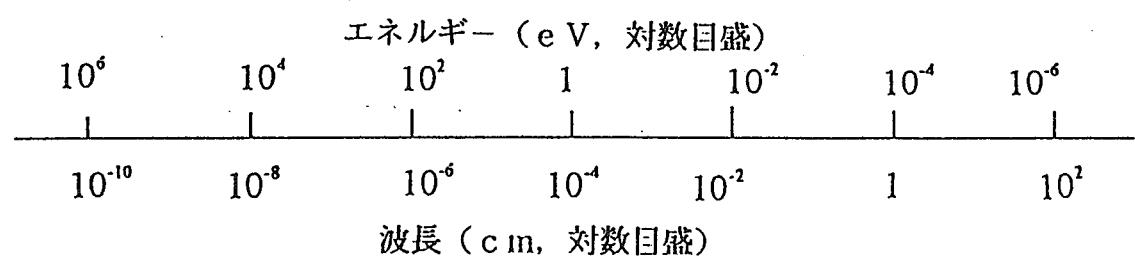


図 3-2 各種電磁波の波長及びエネルギー
(食品照射に用いられる放射線のエネルギー範囲)

- ・X線、ガンマ線: 5×10^6 eV以下
- ・電子線: 1×10^7 eV以下

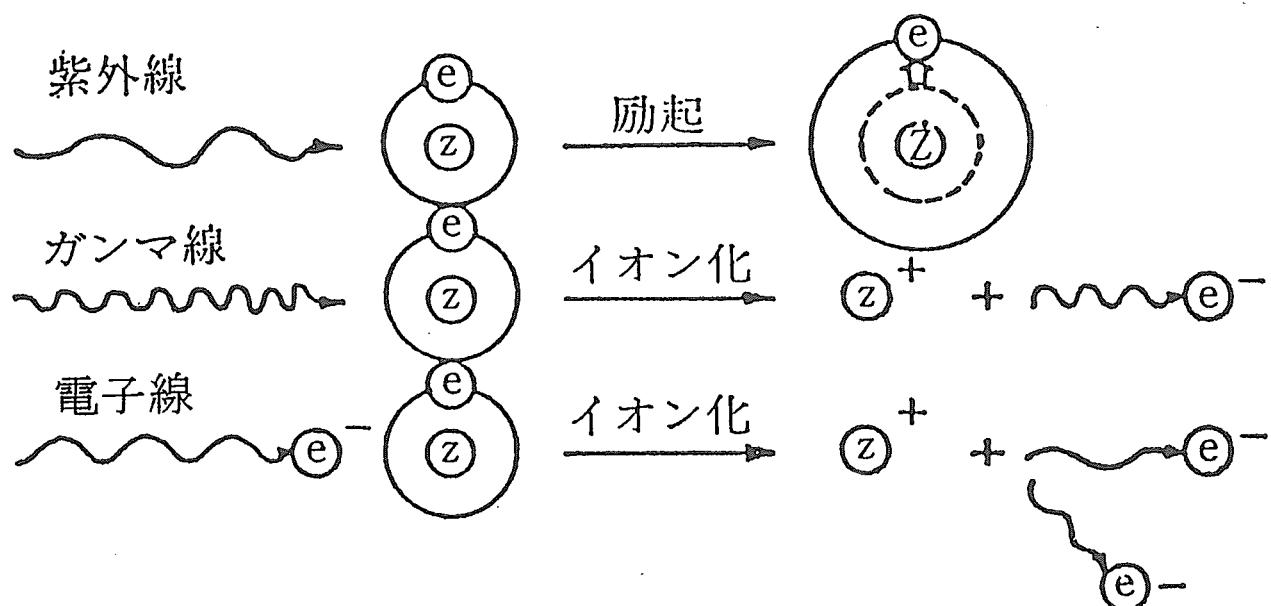
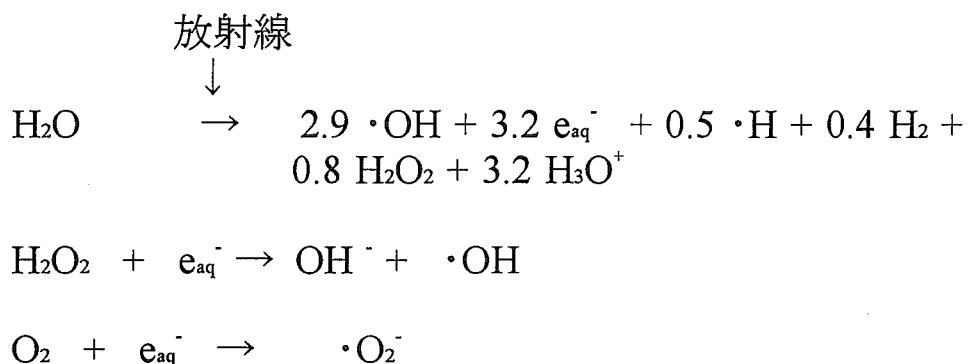
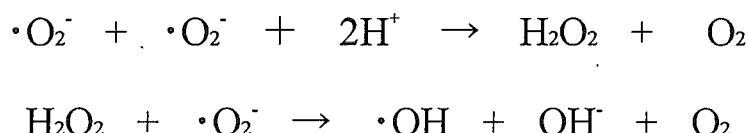


図 3-3 放射線の作用

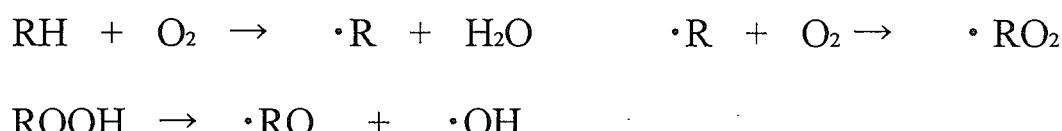
★放射線による水分解ラジカルの生成



★生体内の新陳代謝による活性酸素の生成



★脂質 (RH) の自動酸化



-
- イオンの寿命 : $10^{-10} \sim 10^{-7}$ 秒
 - 遊離基の寿命 : 水存在下 $10^{-7} \sim 10^{-3}$ 秒
乾燥下 数秒～数年
 - 活性酸素の仲間 : $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 、 H_2O_2
 - 過酸化物 : ROOH

図 3-4 自然界における活性酸素等の活性種の生成

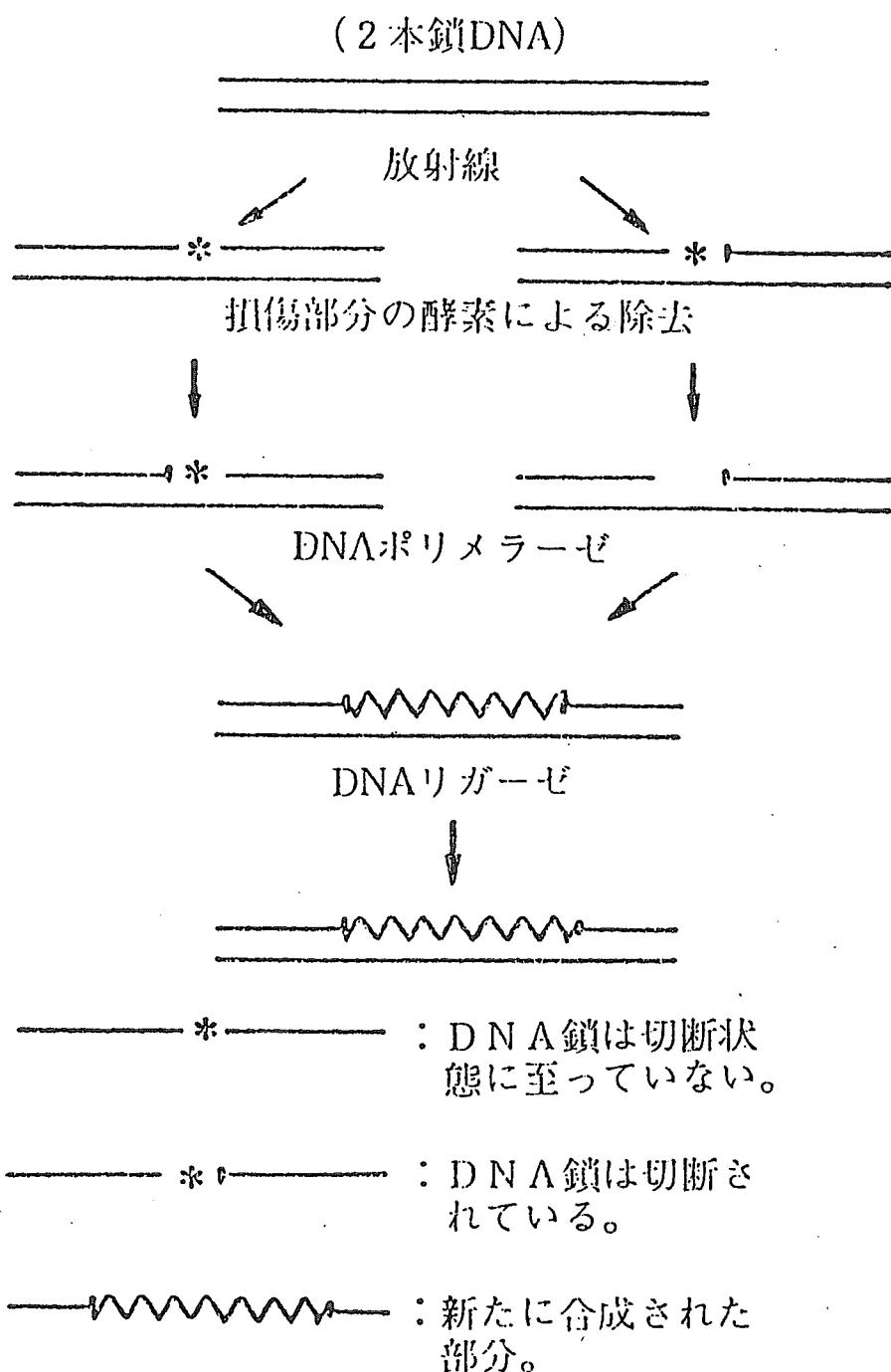


図3-5 放射線により生成したDNA損傷の修復機構

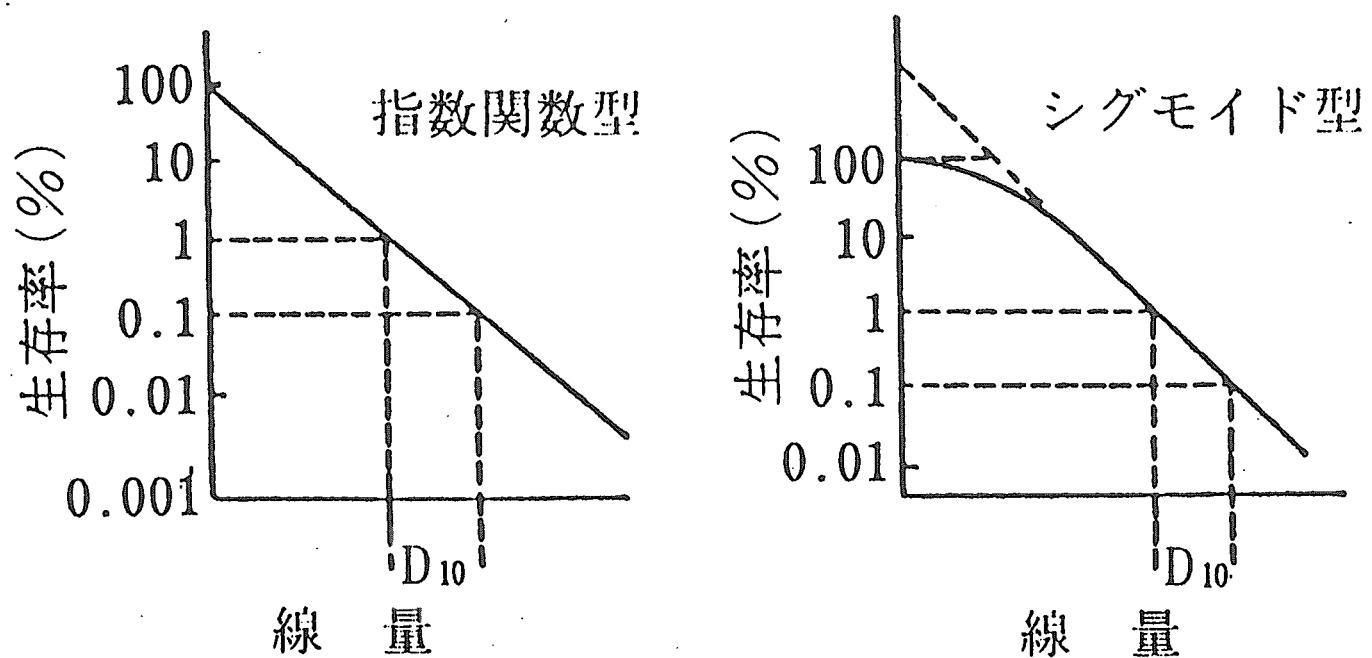
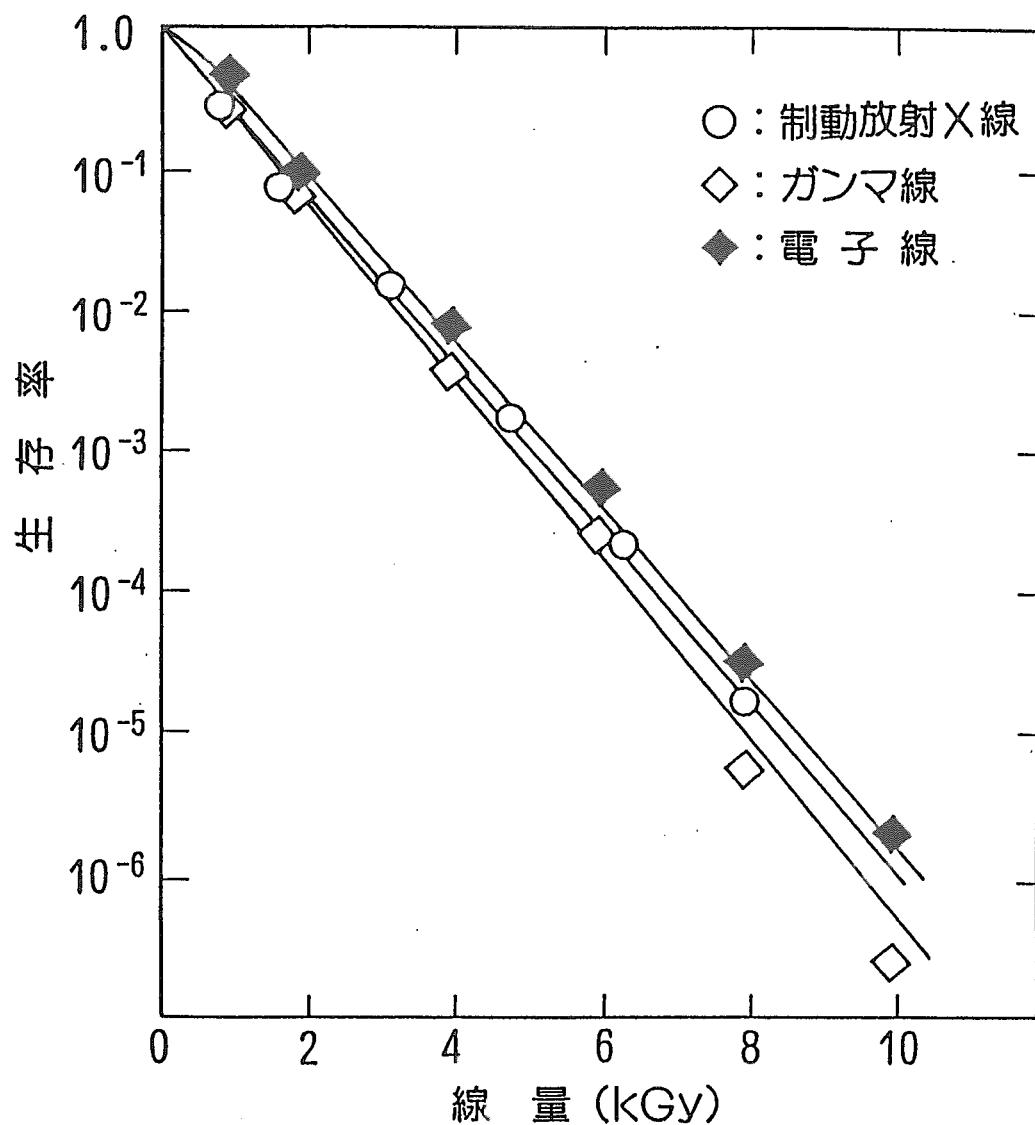


図 3-6 放射線照射における微生物の生存曲線



バチルス・プミルス芽胞の制動放射X線、ガンマ線、電子線生存曲線の比較（ガラス纖維戸紙上、添加物がない状態で乾燥した場合）

図3-7 ガンマ線、X線、電子線での滅菌効果の比較

4. 世界における食品照射

4. 1 開発の歴史と現状

世界各国で食品への放射線処理が注目されたのは、放射線が優れた透過力を有し、梱包下でも確実に殺菌・殺虫が可能であり、凍結下でも殺菌でき、栄養成分の分解が少ないと見えたからである。しかし、研究の初期には過剰な放射線照射による味の悪変や異臭発生などの問題が見いだされ研究が低迷したことがあった。しかし、食味変化がほとんど問題にならない少ない量の放射線処理でも野菜の発芽防止や殺虫に有効であり、凍結下または脱酸素下での照射により食味劣化が著しく低減できることが明らかになるに従って各国での研究は活発になった。

1980年（昭和55年）にFAO（国連食料農業機関）、IAEA（国際原子力機関）、WHO（世界保健機関）の食品照射合同専門家委員会から10kGy以下の照射食品の安全宣言が出されると¹⁾、コーデックス（FAO・WHO合同食品規格委員会）は1983年（昭和58年）に10kGyまでの照射食品の規格基準を採択して加盟国に受け入れを勧告した。

また、このころよりFAO・IAEA・WHOの共同プロジェクトである国際食品照射諮問グループが発足し、食品照射の推進、規格基準作成への助言、検知法の開発、高線量照射食品の健全性評価などの活動を行ってきた。また、WTO（世界貿易機関）の食品衛生・植物防疫協定にはコーデックスの規格に従うことが明記され、国際間での照射食品流通が国際協定上からも拒否にくい状況になってきている。

2001年（平成13年）の時点で、なんらかの照射食品を許可している国は表4-1に示すように51カ国、1地域となっている。先進国では食中毒防止対策として食品照射に注目しており、発展途上国では食料損失防止対策として食品照射に注目している。

4. 2 アメリカでの実用化政策

1980年（昭和55年）以前のアメリカでは食品照射の研究は軍用食または宇宙食が主目的であった。ところが、1980年以後は一般消費者を対象とした研究が中心になった。

1980年にアメリカ厚生省の食品医薬品局は次のような食品照射に関する見解を出した²⁾。1) 1kGy以下の照射食品は人間の食用として健全である。2) 1kGy以上照射された食品の許可には4種類の遺伝毒性試験と2種類の90日間にわたる動物飼育試験での健全性のデータを必要とする。3) 香辛料など毎日の食事に占める割合が0.01%以下の食品類は50kGy以下の線量まで動物などによる健全性試験を行わなくとも安全である。

アメリカで1980年以後に食品照射が注目されるようになった背景には、地中海ミバエにより柑橘類に大きな被害が生じたこととか、二臭化エチルや酸化エチレンなどの燻蒸剤の毒性が社会問題になったことなどが大きく関係している。また、サルモネラ菌やカンピロバクターなどによる食中毒の多発対策や豚肉の寄生虫による被害を防ぐとか、加工肉製品に添加する亜硝酸塩によるニトロソアミン（発癌性物質）生成の被害を防ぐのにも放射線処理が有効と考えている。

1984年（昭和59年）2月には食品医薬品局の食品照射の規格基準案が提案され、1986年（昭

和 61 年) 4 月には 1kGy 以下の生鮮果実および野菜類の照射、30kGy 以下の香辛料類の照射が許可になった。それと同時に、規格基準に対する国民からの各種コメントに対する回答が公表された。食品医薬品局は照射食品の健全性評価において、409 の健全性に関する研究報告を検討し、そのほとんどの論文が線量が記載されていないとか、動物試験用の対象飼料が不適当、試験動物数が少なすぎる、添加物が加えてあるなどの理由で除かれ、5 つの論文から照射食品の健全性を評価し、他の論文も健全性評価の参考にしたと述べている³⁾。また、1984 年(昭和 59 年)には 59kGy 照射された冷凍鶏肉の健全性試験で安全性に問題がなかったという結果が報告され、アメリカ政府の食品照射政策に大きな影響を与えた。

その後、アメリカでは 1993 年(平成 5 年)にハンバーガーの挽肉が原因の病原大腸菌 O157:H7 感染で 4 人の死者が発生した。1997 年(平成 9 年)には病原大腸菌 O157:H7 汚染で 2500 万ポンドのハンバーガーが廃棄処分されるなど食中毒事故が次々に起こった⁴⁾。また、アメリカ国内ではサルモネラ菌やカンピロバクター、病原大腸菌 O157、リストリア菌などの食中毒による死者が年間 5 千～1 万人と報告されており、社会問題になっている。

このため、アメリカ政府は食中毒防止対策として食品照射に注目し、食品医薬品局は 1997 年(平成 9 年)12 月 3 日に赤身肉の照射を許可した。ただし、実際の照射を許可するためには、農務省食品安全検査局の規格基準制定が必要で、1999 年(平成 11 年)12 月に最終案が告示された。この規格は、1) 最高線量は冷蔵肉(食鳥肉を含む) 4.5kGy、冷凍肉 7.0kGy、2) 照射の目的は病原大腸菌 O157、サルモネラ菌、リストリア菌、などの食品由来の病原菌および寄生虫の殺滅、3) 放射線処理は H A C C P (危害分析・重要管理点) システムの一部として行う、4) 表示はわかりやすくし、照射の目的を記載する、などである⁵⁾。食品安全局の規格基準は 2000 年(平成 12 年)2 月 26 日に批准され、実用照射が始まっている。

なお、H A C C P とはアメリカが 1960 年(昭和 35 年)代初期に宇宙開発で使用する食品製造の衛生規準として開発したものであり、現在では世界各国の食品製造の衛生規準になっている。

また、アメリカでは検疫処理で使用されている臭化メチルの代替法として放射線処理を検討している。アメリカは広大な国土を有しているため、異なる州間で検疫が必要なことがある。かつては二臭化エチルが検疫処理に使用され、多くの果実に適用されていたが、発ガン性がわかり禁止になった。このため、臭化メチルや蒸熱処理、低温処理が行われている。しかし、これらの処理法は青果物の品質劣化が著しいため、放射線法が有望視されるようになった。2000 年(平成 12 年)5 月 25 日には農務省は外国産の熱帯果実 7 種類のミバエ類およびマンゴー象虫の殺虫処理を目的とした規格基準を提案した。この提案もまもなく批准される見込みであり、ハワイやフロリダ産の熱帯果実は放射線処理されて米国各州に出荷されている。

米国食品医薬品局は 2000 年 7 月に殻付生卵のサルモネラ菌の放射線殺菌を許可した。これらのアメリカの動きは日本にも今後大きな影響を及ぼすと考えられる。

4. 3 ヨーロッパでの統一規格

欧州連合では通貨統合をはじめ様々な分野で規格の統一が進められているが、食品照射についても規格基準の統一が進められている。

1998年（平成10年）12月8日に欧州議会と閣僚理事会の調停委員会において「食品に対する放射線照射に係わる欧州連合指令」が合意された。この規制では、照射の条件、照射施設の許可と管理、表示の義務などの指令と、照射できる食品類など実施に関する指令からなっている⁴⁾。1998年には香辛料とハーブ、乾燥野菜が許可されたが、2000年（平成12年）には食中毒防止を目的とした鶏肉、冷凍エビ、カエルの足、卵白、乾燥果実、発芽穀類などの照射許可が提案された。しかし、欧州連合の許可リストからはずされた食品類は今後照射できなくなる可能性があり、アメリカとの規格基準の相違から国際的な紛争が予想されるため、当面は欧州連合としての許可提案を延期し各国の判断にまかせることになった。

欧州連合内ではフランス、オランダ、ベルギー、イギリスなどが食品照射の推進に前向きであるが、ドイツでは「緑の党」が食品照射に否定的である。一方、欧州消費者連盟は表示の義務を要求しているが、食品照射そのものについては否定していない。

4. 4 アジアなどでの実用化動向

アジア地域では10カ国が食品照射の許可を出しているが、その形式、方法も国によって異なっており、統一性に欠けている。1997年（平成9年）にASEANは食品照射に関する規格基準の草案を策定した。さらに、1999年（平成11年）にはソウルにアジア・太平洋地域14カ国の政府代表（日本は欠席）が集まり、食品照射の統一規格を採択し、その内容はコーデックスの規格に植物防疫を目的とした照射を加えたものであった⁴⁾。オーストラリアとニュージランドは食品照射について長いこと態度を保留していたが、1999年（平成11年）に共通の規格基準を制定し食品照射実用化に向けて動き出した。すでに、輸出用食品については照射が行われており、国内用にも許可が得られようとしている。

カナダや中南米諸国でも食品照射実用化が着実に進展しており、香辛料や熱帯果実、肉類の照射が注目されている。

南アフリカ共和国、中東諸国でも食品照射への取り組みが進んでおり許可国が増加している。東ヨーロッパ諸国も共産圏崩壊の混乱から立ち直りウクライナなどの穀類照射も継続され、チエコ、ハンガリー、ポーランドなどで実用照射が行われている。

4. 5 コーデックス等国際機関の取り組み

コーデックス（FAO・WHO合同食品規格委員会）は1970年（昭和45年）代から食品照射の規格基準を制定している。1983年（昭和58年）にはWHOの10kGy以下の照射食品の安全宣言を受けて、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た。さらに、1997年（平成9年）にWHOが10kGyの上限線量を撤廃すると、1999年（平成11年）のコーデックス総会でWHO勧告にそった一般規格改正が承認され、規格基準改正作業が開始された。コーデックスの新しい規格では、それぞれの食品に適した上限線量が設定され、食品照射はHACCPのプロセスとして行われることが明記されている。

WHOは食品衛生の観点から食品照射を推進すると表明してお⁶⁾ FAOは食料の損耗防止対策

から食品照射推進に協力している。FAO・IAEA・WHOの共同プロジェクトである国際食品照射諮問グループは時限プロジェクトであったが⁵⁾、2000年（平成12年）の総会で永久プロジェクトとして存続することが承認され加盟国も表4-2に示すように46カ国になっている（日本は未加盟）。

4. 6 照射食品実用化の現状

食品照射実用化の動きは1980年（昭和55年）頃から活発となり、発展途上国でも食品照射研究が開始され、1990年（平成2年）以降は多くの国で実用化されはじめている。食品照射許可国は2001年（平成13年）の時点で51カ国1地域になり、100品目以上の食品類が許可されている。表4-3に示すように、食品照射実用化が活発な国はアメリカ、フランス、オランダ、ベルギー、中国、南アフリカである。

アメリカでは香辛料が年間4～5万トン照射されており、牛肉挽肉も2000年3月から照射されはじめ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。アメリカではタイタン社の電子加速器が食品照射用に使用されはじめ、アイオワ州ミネアポリスの照射施設では大量の牛肉が放射線で殺菌処理されている。宇宙食や病人食、軍用食などの照射も行われており、鶏肉についても大量照射が計画されている。アメリカの大手のカーギルフーズ、ハスキンミート、タイソンフーズ、デルモンテフーズなどの肉製造会社やマクドナルドなどの食品会社も食品照射に参入しつつあり、食品照射は食品加工処理技術として定着しつつある。また、食品業界では殻付卵や調理済食品、魚貝類の放射線殺菌の実用化についても検討している。熱帯果実の放射線殺虫処理もフロリダとハワイで行われており、多くの州に流通している。

フランスでは年間1万トン以上の冷凍鶏肉が電子線殺菌されており、香辛料や冷凍魚貝類の放射線殺菌も大規模に行われている。オランダやベルギーでも香辛料や冷凍魚貝類、チーズなどの放射線殺菌が大規模に行われており、ハンガリーやチェコ、ポーランド、ウクライナ、デンマーク、ノルウェー、イギリスなどでも実用照射が行われている。このため、欧州連合で食品照射推進に消極的なドイツにも照射食品が流通し、東ヨーロッパ諸国にも照射食品が流入している。

アジアでは、中国が食品照射を大規模に実用化している。この内、ニンニクは年間約7万トン照射されており、香辛料が2万トン、その他肉類、焼酎、生薬などの照射も行われている。韓国やタイ、インドネシア、インドなどでも香辛料が照射されており、シンガポールも食品照射に肯定的に変わっている。台湾でも中国同様に様々な食品類が照射されている。

カナダや中南米諸国でも食品照射の実用化に熱心であり、香辛料が主な照射対象物である。南アフリカやイスラエルも香辛料などの照射が大規模に行われており、輸出にもまわされている。

表 4-1 世界の食品照射許可の現状（国別の照射食品の種類）

地域	国名	照射食品												その他	
		スペイス	乾燥食材・食品	タマネギ	ジャガイモ	食鳥肉	卵製品	生鮮果実	エビ	ニンニク	乾燥果実	赤身肉	米	小麦	冷凍食品
アジア ・大洋州	日本				●										
	バングラデシュ	●		●	●			●	●	●		●			
	中国	●	●	●	●			●	●	●	●	●			
	インド	●		●	●	●			●	●		●		●	
	インドネシア	●		●	●				●	●			●	●	●
	イラン	●													
	イスラエル	●	●			●		●		●			●		長期保存食
	大韓民国	●	●	●	●					●					
	パキスタン	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	フィリッピン	●		●						●					
	シリア	●		●	●	●		●					●	●	
	トルコ	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	
	タイ	●		●	●	●		●	●	●			●	●	発酵豚肉
西欧	ベトナム	●		●	●										
	台湾	●	●	●	●	●	●	●			●				
	オーストラリア	●													
	アイルランド	●	●												
	オーストリア	●	●												
	ベルギー	●	●	●	●				●						
	デンマーク	●	●												
	ドイツ	●	●												
	ギリシャ	●	●												
	フィンランド	●	●												
	フランス	●	●	●		●	●		●	●		●	●	●	チーズ
	ハンガリー	●	●	●	●	●									ワインコルク
	イタリア	●	●	●	●					●					
	ルクセンブルグ	●	●												
	オランダ	●	●			●			●						● 病人食
	ノルウェー	●	●												

ヨーロッパ	ポルトガル	●	●											
	スペイン	●	●		●	●								
	スエーデン	●	●											
	イギリス	●	●		●		●	●	●		●	●	●	病人食

地域	国名	照射食品												その他		
		スペイ ス	乾燥 食材 ・食 品	タマ ネギ	ジャ ガイ モ	食鳥 肉	卵 製品	生鮮 果実	エビ	ニン ニク	乾燥 果実	赤身 肉	米	小麦	冷凍 食品	
東欧	ロシア			●	●	●		●				●	●			
	ウクライナ	●	●	●		●		●			●		●	●		穀類一般
	クロアチア	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
	チェコ	●	●													
	ポーランド	●	●	●					●							
	ユーゴスラビア	●	●	●	●	●	●			●		●	●	●		
北米	カナダ	●	●	●	●								●			
	アメリカ	●	●		●	●	●	●	●	●			●	●	宇宙食	
中米	キューバ	●		●	●			●	●			●				
	メキシコ	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●		
南米	アルゼンチン	●	●	●	●					●	●				ココアパウダー	
	ブラジル	●		●	●	●		●				●	●			
	チリ	●		●	●	●	●					●	●			
	コスタリカ	●		●	●			●				●	●			
	ウルグアイ				●											
アフリカ	エジプト	●	●													
	ガーナ	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
	南アフリカ	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	長期保存食	
照射食品毎の国数		48	35	30	29	22	9	19	13	18	14	5	19	20	8	

出典：IAEAホームページ（<http://www.iaea.org/icgfi/database>）、2001年現在

表4-2 國際食品照射諮問グループ加入国リスト

アルゼンチン	キューバ	イスラエル	シリア
オーストラリア	エクアドル	イタリア	南アフリカ
バングラデシュ	エジプト	マレイシア	タイ
ベルギー	フランス	メキシコ	トルコ
ブラジル	ドイツ	オランダ	ウクライナ
カナダ	ガーナ	ニュージーランド	イギリス
チリ	ギリシャ	パキスタン	アメリカ
中国	ハンガリー	ベルギー	ベトナム
クロアチア	インド	フィリピン	ユーゴスラビア
コスタリカ	インドネシア	ポーランド	リビア
韓国	イスラエル	ポルトガル	(以上46カ国)
ブルガリア	モロッコ	チュニジア	

表 4-3 食品照射を実用化している主な国

国名	食品類	推定処理量（トン／年）
アルゼンチン	香辛料、乾燥野菜	740
ベルギー	香辛料、冷凍魚介類	15,000
カナダ	香辛料等	5,000
チリ	香辛料等	450
チェコ	香辛料等	1,200
中国	ニンニク、香辛料等	80,000 以上
フランス	香辛料、乾燥果実、鶏肉等	25,000
ハンガリー	香辛料等	1,000
インドネシア	香辛料等	4,000
イスラエル	香辛料等	1,200
日本	馬鈴薯	15,000
韓国	香辛料、朝鮮ニンジン粉末	3,000
オランダ	香辛料、冷凍魚介類、チーズ	30,000
メキシコ	香辛料等	4,600
ポーランド	香辛料等	400
南アフリカ	香辛料、ニンニク等	12,600 以上
タイ	発酵ソーソージ、香辛料	1,000
ウクライナ	穀類	100,000 以上
イギリス	病人食、香辛料	若干量
米国	香辛料、牛肉、鶏肉、果実、等	60,000 以上

その他、約 10 カ国

5. わが国の食品照射

5. 1 研究開発の歴史

わが国での食品照射研究は昭和 30 年（1955 年）ころから大学や国公立の研究機関で基礎的な研究が開始された。初期の研究は鮮魚の貯蔵期間延長とか野菜の発芽防止、穀類の殺虫、微生物の放射線感受性、成分変化などが小規模に行われていた。しかし、海外での研究の進展に刺激されて、昭和 40 年（1965 年）には研究者の学会である食品照射研究協議会が発足し国内の情報の交流、研究発表による意見の交換が行われるようになった。原子力委員会はこれら国内の研究発展および海外の動向を参考にして昭和 42 年（1967 年）に食品照射の原子力特定総合研究を発足させた。この時代は食料の安定確保が大きな関心ごとであり、研究項目は全て食品の貯蔵性延長を目的とするものであった。食品照射を実用化するためには、1) 各種食品に対する照射効果、2) 食品としての安全性の確認、3) 経済的に可能な照射技術の開発が必要であり、本プロジェクトには図 5-1 に示すような国公立の研究機関や大学などがそれぞれ専門分野の研究を分担した¹⁾。

原子力特定総合研究で取り上げられた品目は国の経済や生産者、消費者に重要な影響を与える可能性のある 7 品目であり、表 5-1 に示すように馬鈴薯とタマネギの発芽防止、米および小麦の殺虫、ワインナソーセージと水産練製品の殺菌処理による貯蔵期間延長、温州ミカンのカビ防止である。本研究プロジェクトの結果は以下のようである。

- (1) 馬鈴薯とタマネギは 0.02 ~ 0.15kGy で発芽防止または遅延効果があり、米・小麦では 0.2 ~ 0.5kGy の殺虫線量で食味劣化はほとんど起こらず、たとえ若干の変化が起こっても貯蔵中に元に戻ることを明らかにした。しかし、小麦では製麺性が低下するというデータが得られている。
- (2) ウインナソーセージでは、包装材料と照射前の脱酸素工程を組み合わせることにより、3 ~ 5kGy の照射で 10 °Cでの貯蔵期間を 2 ~ 4 倍延長できることを明らかにした。
- (3) カマボコでは卵白を添加すると食味低下が起こるため、添加物の工夫が必要である。
- (4) 温州ミカンは 50 万電子ボルトの低エネルギーの電子線で 1.5 ~ 2kGy 照射すれば約 4 °C の条件で 3 ヶ月の貯蔵が可能である。
- (5) 動物試験などの健全性試験は表 4-1 に示すように、7 品目とも全て健全性に問題がなく食品として安全であることを明らかにしている。
- (6) 照射コストは、発芽防止と殺虫処理は経済的に十分引き合う可能性があり、殺菌処理も同様に引き合う可能性がある。

なお、食品照射の原子力特定総合研究は昭和 58 年（1983 年）に終了し、研究成果のまとめも終了している¹⁾。

原子力特定総合研究が活発に行われた昭和 42 年（1967 年）から昭和 50 年（1975 年）当時は、アメリカでの食品照射研究は低迷しており、わが国は食品照射研究の先進国になった。昭和 47 年（1972 年）に馬鈴薯の発芽処理が認可され、世界で初めての馬鈴薯照射施設が北海道に建設

された。本施設はコバルト $60 \cdot 30$ 万キュリー(1.1ペタベクレル)のガンマ線照射装置である。昭和49年(1974年)より運転が開始され、年間1~1.5万トンの照射馬鈴薯が3~5月の端境期に出荷され、世界で初めて食品照射の実用化に成功した。

一方、世界初の食品照射実用化ということもあって、一部消費者団体による反対運動も激しく起こった。この運動はマスコミの「放射能ジャガイモ」との誤報も重なって拡大し、その後の食品照射低迷の原因ともなった。また昭和53年(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が起り、日本の食品照射研究に大きな打撃を与えた。

原子力特定総合研究終了後は食品照射の研究者が大幅に減少し、研究を継続しているのは独立行政法人食品総合研究所や厚生労働省国立医薬品食品衛生研究所、日本原子力研究所、東京都産業研究所などの公立研究機関や大学関係のみとなっている。食品総合研究所では照射食品の検知法の研究や電子線殺菌効果の研究が行われ、国立医薬品食品衛生研究所や東京都産業研究所では検知法の研究が主に行われている。日本原子力研究所では家畜飼料のサルモネラ菌や輸入冷凍エビの腸炎ビブリオ菌の殺菌、香辛料の殺菌効果と成分変化、食肉の病原大腸菌O157の殺菌などの研究を行った。また、日本原子力研究所では平成元年(1988年)から食品照射データベースの整備を行い、750件以上のデータが平成10年(1998年)よりインターネットで公開されている(食品照射データベースのアドレス：<http://takafoir.taka.jaeri.go.jp/>)。

5. 2 照射効果と照射技術開発

わが国は欧米諸国と異なり夏期の湿度が高く、しかも細長い列島に亜熱帯から亜寒帯気候を含むという特徴があるため、農産物流通のための独自の照射効果の研究が必要である。これまでの照射効果、照射技術の研究成果は以下のように要約できる²⁾。

1) 根茎野菜の発芽防止

馬鈴薯は0.06~0.15kGyの照射で約8ヶ月の貯蔵が可能である。放射線照射した馬鈴薯は非照射のものに比べて傷の治癒力が低下するため、収穫後2~3週間貯蔵(キュアリング)して傷を完全に治癒してから照射する必要がある。また、照射馬鈴薯は呼吸が活発になるため、十分な換気が必要である。タマネギも収穫後の乾燥などの処理が必要である。タマネギは0.02~0.15kGyで発芽防止できるが、発芽活動が始まっている照射は効果がない。わが国ではニンニクやコンニャク芋の発芽防止の研究も行われている。

2) 穀類の殺虫・殺菌効果

米や小麦は0.2~0.5kGyで殺虫されるが、蛾類はコクゾウ虫類より放射線に耐性であった。玄米を殺虫線量照射して夏期条件で3ヶ月貯蔵すると非照射に比べ玄米の発芽力が著しく高く保持されカビ発生も少なかった。照射小麦の製パン性は変化しなかったが、製麵性は低下した。

そば粒を1~5kGy照射して殺菌すると製麵後の貯蔵性が延長され、製麵性は変化しないが粘りが若干低下した。小麦粒表面の耐熱性細菌の殺菌ではソフトエレクトロンで表面だけ殺菌する技術が開発されている。

3) ウインナソーセージ、水産練製品の殺菌

ウインナソーセージはソルビン酸などの保存料が添加されているにもかかわらず、2～3日で腐敗する。保存料無添加のウインナソーセージをガス透過性の少ないポリエチレン・セロハン、ナイロンなどの包装袋に窒素ガス置換して3～5kGy 照射すると食味低下なしに10℃・7～12日の貯蔵が可能である。カマボコやサツマ揚などは3kGy で10℃・7日の貯蔵が可能である。非照射のウインナソーセージやカマボコなどには貯蔵中にセレウス菌やエロモナス菌などの食中毒性細菌が発生してきたが、照射品には発生しないか著しく発生が抑制された。

4) ミカンやイチゴのカビ防止

ミカンの表皮にはカビが侵入して腐敗の原因になる。電子線で果皮内部に侵入したカビを殺菌すればカビ発生を抑制できる。温州ミカンは放射線で食味劣化が起こりやすいが果皮表面部の照射では食味への影響はない。カビは1.5～2kGy で殺菌され、4℃で約3ヶ月貯蔵できる。イチゴもカビ発生のため数日しか貯蔵できない。ガンマ線を2kGy 照射すると10℃で約7日の貯蔵が可能であり食味への影響もない。

5) 香辛料、生薬の殺菌

香辛料や生薬の耐熱性細菌は7～10kGy で1g当たり1000個以下に殺菌される。香辛料や生薬は貯蔵中にカビが発生しやすいが5kGy でカビの発生を防止できる。香りや薬効、静菌効果を示す精油成分は放射線に安定で50kGy でも変化しない。

6) 肉類、魚貝類の病原性細菌の殺菌

食中毒菌のサルモネラ菌や病原大腸菌 O157、リストリア菌、エロモナス菌などは冷蔵下の肉中では1～2kGy で殺菌され、凍結下では3kGy で殺菌される。魚貝類に汚染している腸炎ビブリオ菌などの病原性ビブリオ菌は冷蔵下では1～2kGy、凍結下で3kGy で殺菌できる。

7) 家畜飼料の殺菌

家畜飼料で問題になるのはサルモネラ菌などの病原性細菌の汚染と貯蔵流通中のカビ増殖による栄養価低減、カビ毒产生、病原性カビ発生である。これらの病原性細菌やカビ類は5kGy で殺菌可能である。また、照射による栄養価低減も認められない。

8) 照射技術の開発

ガンマ線では45cm 厚のダンボール箱に馬鈴薯、タマネギ、米、小麦、ウインナソーセージ、カマボコを詰めて均一照射技術の開発が行われた。線源からの距離10～34cm で線量均一度は2.0以下で照射可能である。北海道士幌農協の馬鈴薯照射施設では巨大なコンテナー（98cm 厚×164cm 巾×130cm 高）が使用されるため線源より4m の距離で照射することにより均一度約2.0で照射する技術が開発された³⁾。その他、サイロ方式で穀類を連続照射する技術も開発されている。

電子線照射では温州ミカン表面を低エネルギー電子線（0.5MeV）で均一に照射する技術が開発された。また、制動放射X線による青果物の連続照射技術も開発されている⁴⁾。

5. 3 安全性研究

わが国では照射食品の安全性試験は原子力特定総合研究で大規模に行われた以外に日本アイソトープ協会で組織した研究がある。原子力特定総合研究の初期には安全性研究は動物を使った長期飼育試験と世代試験が中心であった。

長期飼育試験では、照射食品を添加した飼料を純系のラットやマウスの雌雄30～40匹に与え、1週間に2～3回体重を測定し、定期的に血液検査を行った。さらに、2年間飼育している間の死亡率と死因を調べた。また、動物を解剖して臓器重量を測定し、顕微鏡で組織学的観察を行った。しかし、長期飼育試験や世代試験は、個々の動物の個体差によるデータのバラツキがあり多数の動物を使用しないと信頼できるデータが得られにくいという問題点がある。また、照射食品の投与量が多すぎると特定の食品の過剰投与による障害が生じ、栄養バランスの乱れが生じることがある。原子力特定総合研究ではこれらの問題点を解決しながら研究が行われ、各品目とも安全性に問題がないことを明らかにしている²⁾。

昭和50年（1975年）以降になると染色体やDNAなどの遺伝子に与える影響を直接調べる遺伝毒性試験法が開発されてきて、動物の個体差による影響が少ないデータが得られるようになった。この新しい方法で原子力特定総合研究で取り上げられた品目について安全性評価試験が行われたが（表5-2）、全ての試験項目で非照射食品と照射食品で差が認められず、安全性に問題のないことが明らかになった³⁾。

日本アイソトープ協会の研究プロジェクト（昭和61年～平成4年；1986～1992年）では放射線分解生成物など国際的に安全性が議論になっている項目や栄養学的評価、微生物学的安全性についての研究が大学や公的研究機関で行われ、照射食品の安全性は最新の試験法で評価しても問題がないことを明らかにした。また、国立衛生試験所（現国立医薬品食品衛生研究所）は、ガンマ線を1kGy照射したグレープフルーツの動物を使った長期飼育試験、世代試験を実施し、安全性に問題がないことを明らかにしている。

5. 4 照射馬鈴薯の実用化

昭和47年（1972年）8月、厚生省告示第285号によって、食品衛生法の一部が改正され、馬鈴薯の放射線照射による発芽防止が許可された。翌昭和48年（1973年）には農林水産省による「農産物放射線照射利用事業」として北海道十勝の士幌町にコバルト-60をガンマ線源とする実用照射プラントが建設され、昭和49年（1974年）春から照射馬鈴薯が市場流通することになった。

士幌農協など十勝地区の農業は気候上、馬鈴薯栽培や酪農に頼らざるを得ないため、農業生産の集団化と集荷基盤の強化による共販体制の確立、さらには生産物の高度利用化が積極的に行われてきた。当時、士幌農協を中心とする近隣4町5農協は、馬鈴薯を基幹作物として、澱粉工場

や加工処理工場を建設し、さらには大規模な貯蔵倉庫群を有していた。このような条件下で、さらに馬鈴薯の付加価値を上げることを目的として照射施設の建設に踏み切った³⁾。

照射プラント（現状では約 15 万キュリー）は馬鈴薯加工コンビナートの中に完全に組み込まれた形で存在しており、図 5-2 に示すような集荷と貯蔵、照射が行われている。集荷された食用馬鈴薯のうち、全体の約 2 割が照射され、翌年の 3 月以降の端境期に青果市場に出荷される。照射馬鈴薯はダンボール表面に図 5-3 に示すように照射済みの標示が印されている。

照射プラントは図 5-4 に示すように、線源を中心とするターンテーブル上で約 1 時間照射され、いったん照射室を出てから反転して再照射するという構造になっている。照射用コンテナー（1.5 トン入り）は農場での収穫、選別、貯蔵に用いられており、照射プラントはこのような処理プロセスの一部として設置されている。馬鈴薯の照射は 10 月上旬から翌年 3 月初旬の休眠期中に行われる（図 5-5）。

士幌での馬鈴薯照射は 28 年続いているが、この間、照射馬鈴薯反対運動が起り照射事業継続の上で様々な困難に直面してきた。その中で、食品照射研究活動が低迷した昭和 55 年（1980 年）代の照射事業継続への献身的な貢献をした故亀山健二氏は日本の食品照射にとって最大の功労者である。亀山氏や農協の人達は日本各地に照射馬鈴薯の販路を拡大し、最近では消費者の中に照射馬鈴薯に理解を持つ人達も増加し、士幌の照射プラントでは毎年 1 万～ 1.5 万トンの馬鈴薯が青果用に照射されている。しかし、ポテトチップやスナック製品などの加工用馬鈴薯には照射馬鈴薯は使用されておらず、非照射馬鈴薯やマレイン酸ヒドラジド（発ガン性あり）で芽止めしたものを使用している。

表5-1 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・問題点	判定法	健全性試験				実施期間年度	備考
					栄養試験	慢性毒性試験	世代試験	変異原性試験		
馬鈴薯 (発芽防止)	γ線	70-150Gy で室温中 で 8 ヶ月間発芽防止 が可。	特になし	実用的な方法は 見あたらなかつた	影響無	影響無	影響無	影響無	1967 -1971	食品衛生許可： 1972 年 実用化：1974 年
タマネギ (発芽防止)	γ線	20-150Gy で室温中 で 8 ヶ月間発芽防止 が可。	"	"	"	"	"	"	1967 -1978	研究成果報告済 (1980 年)
米 (殺虫)	γ線	200-500 Gy 照射で殺虫効果 は完全。殺菌効果も ある。	品種により照 射後の食味が 低下するもの あり。	"	"	"	"	"	1967 -1979	研究成果報告済 (1983 年)
小麦 (殺虫)	γ線	"	小麦粉の粘度 が低下する。	"	"	"	"	"	1968 -1980	"
ワイン・ソーセージ (殺菌)	γ線	3-5kGy の照射、10℃ 貯蔵で貯蔵期間を 3- 5 倍延長できる。	酸素透過性の 小さい包装材 料で窒素ガス 封入が条件	"	"	"	"	"	1968 -1980	研究成果報告済 (1985 年)
水産練製品 (殺菌)	γ線	3kGy の照射、10℃ 貯蔵で貯蔵期間を 2- 3 倍延長できる。	特なし。	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	"
みかん (表面殺菌)	電子線	70-150Gy で室温中 で 8 ヶ月間発芽防止 が可。	"	—	"	"	"	"	1970 -1981	研究成果報告済 (1988 年)
実施機関	農水省研究機関、 日本原子力研究所、 (社) 日本アイソトープ協会				国立予防衛生 研究所	國立 衛生 試験所	(財) 食品 薬品 安全 センタ	—	—	

※各研究成果報告書は食品照射データベースで入手可能である。

原研ホームページ・アドレス:<http://takafoir.taka.jaeri.go.jp/>

(伊藤均:『放射線殺菌と食品の安全性』,食品と容器,第34巻,12号.)

表 5-2 食品照射特定総合研究で行われた遺伝毒性試験と実施年度

食品名	細菌		動物細胞		哺乳動物		
	遺伝子 突然変異	宿主 経由	遺伝子 突然変異	染色体 異常	染色体 異常	小核 試験	優性 致死
タマネギ	1977	1977	1978	1977	1977	—	1977
米	1978	1978	1978	1978	1978	—	1978
小麦	1979	1978	—	1979	—	1979	1979
ウインナーソーセージ	1980	1980	—	1980	—	1980	1980
水産練製品	1980	1980	—	1980	—	1980	1980
みかん	1981	—	—	1981	—	1981	1981
馬鈴薯	1981	—	—	1981	—	1981	1981

* 主に（財）食品薬品安全センターで実施。

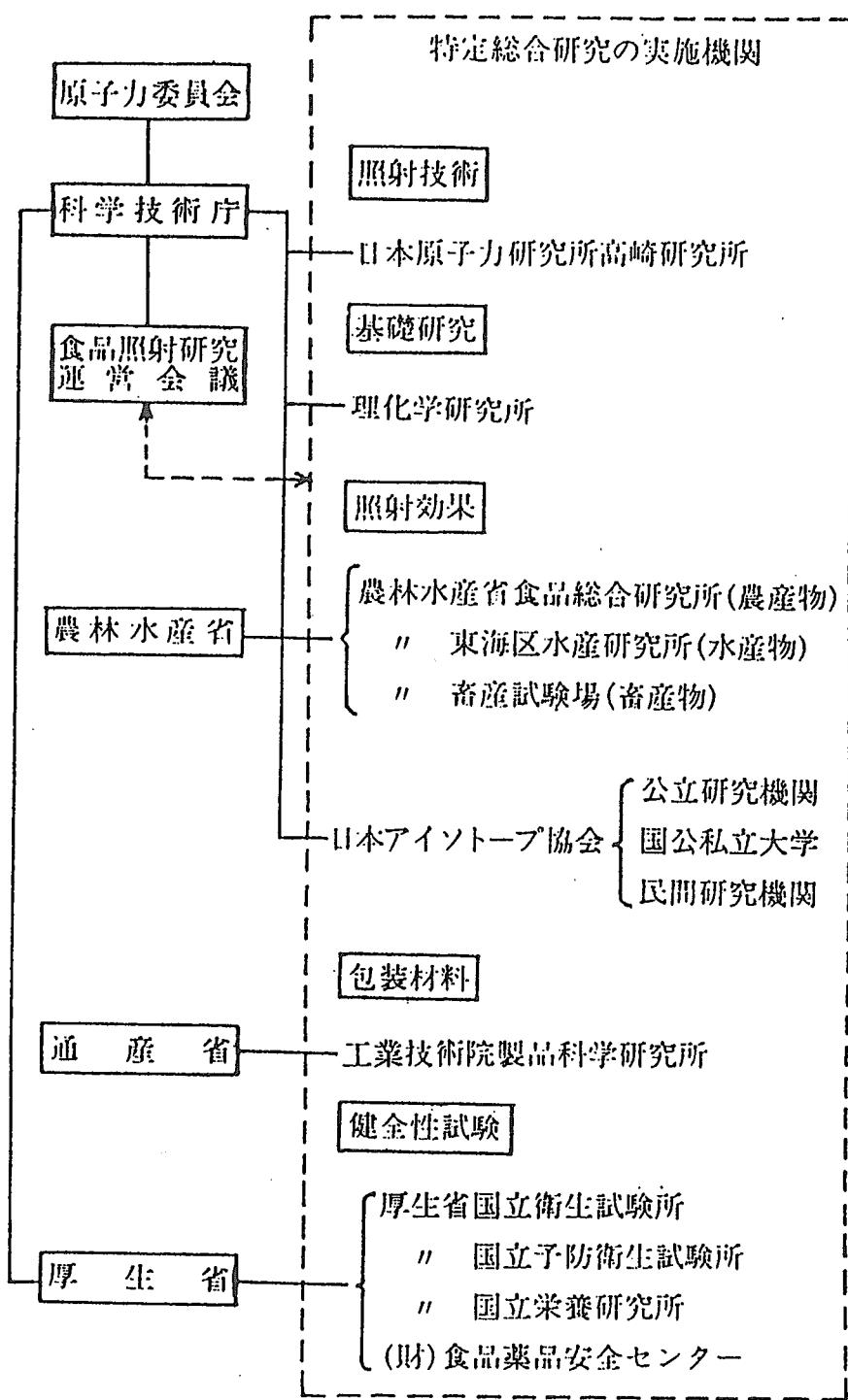
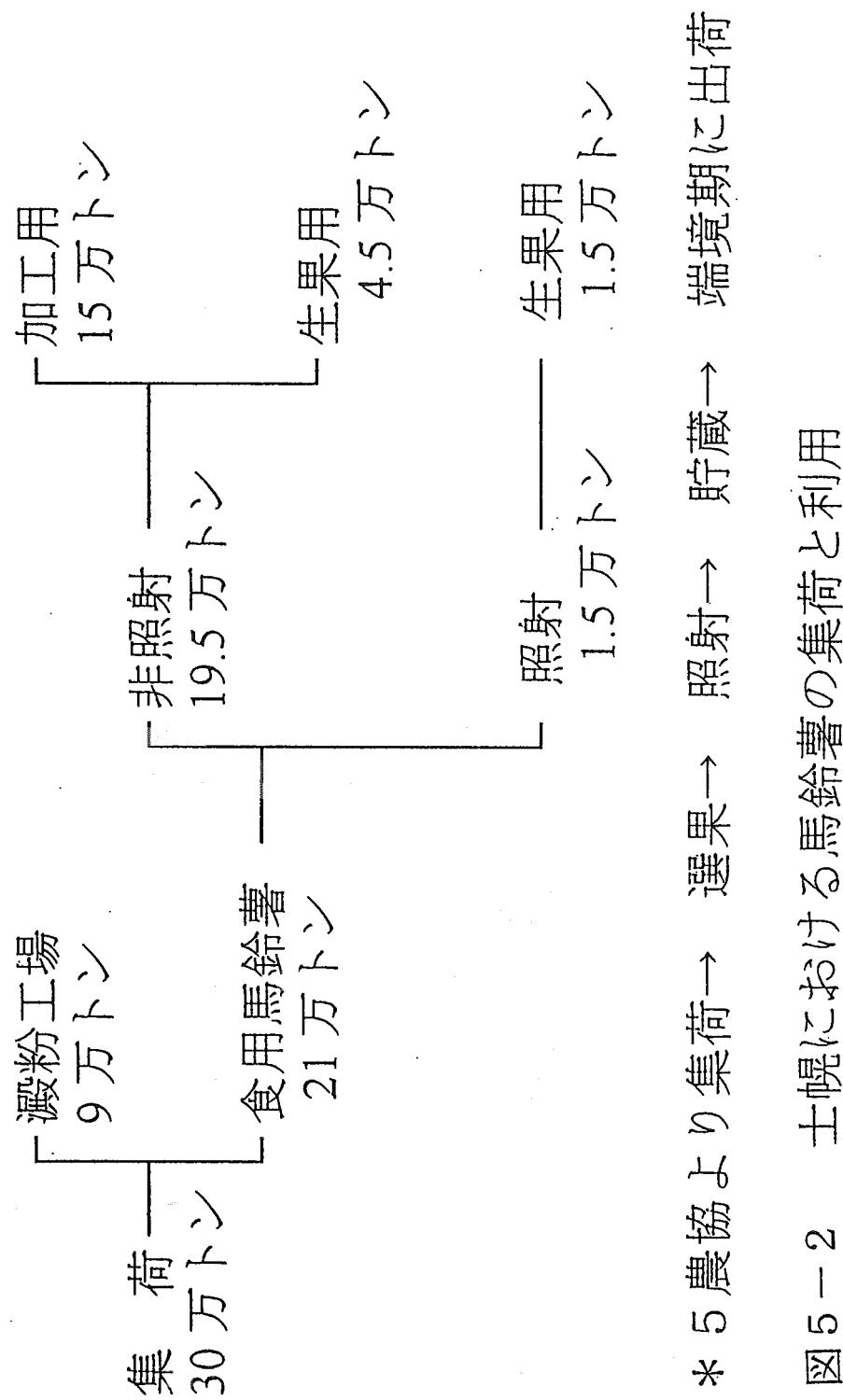


図 5-1 食品照射特定総合研究の研究組織



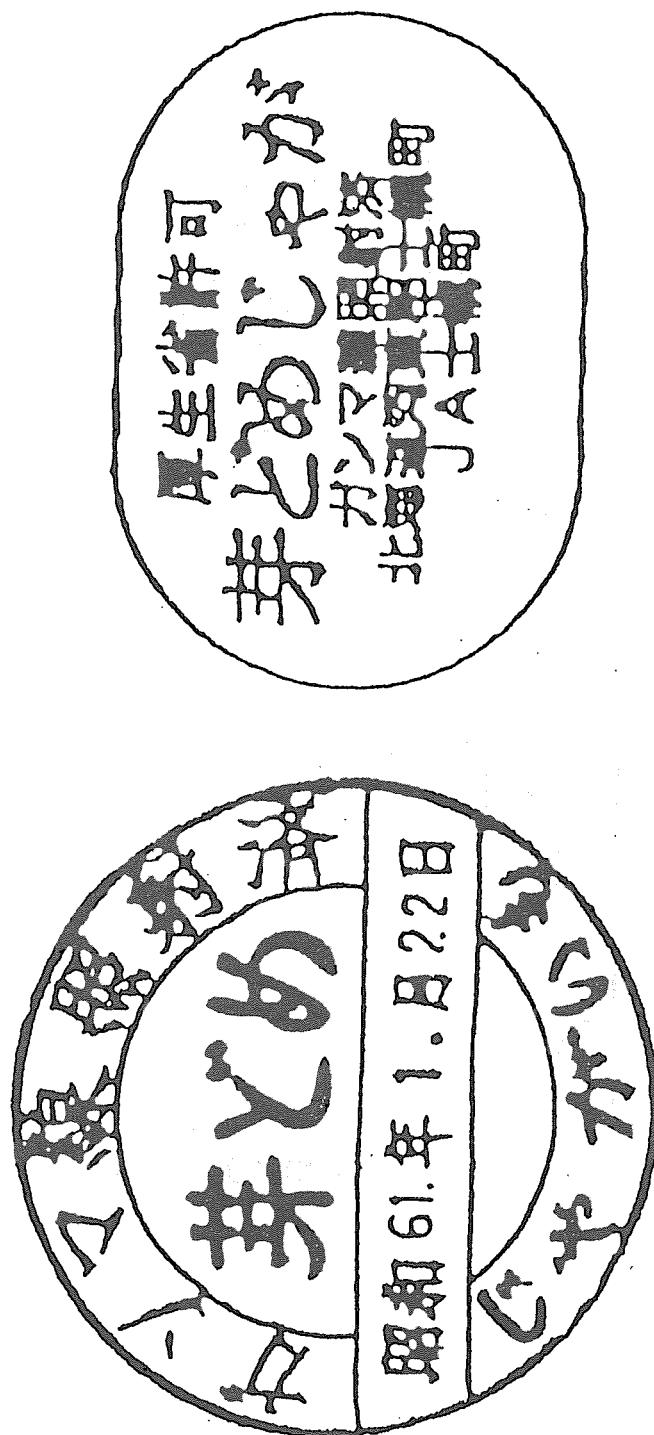


図5-3 照射馬銃薬の標示

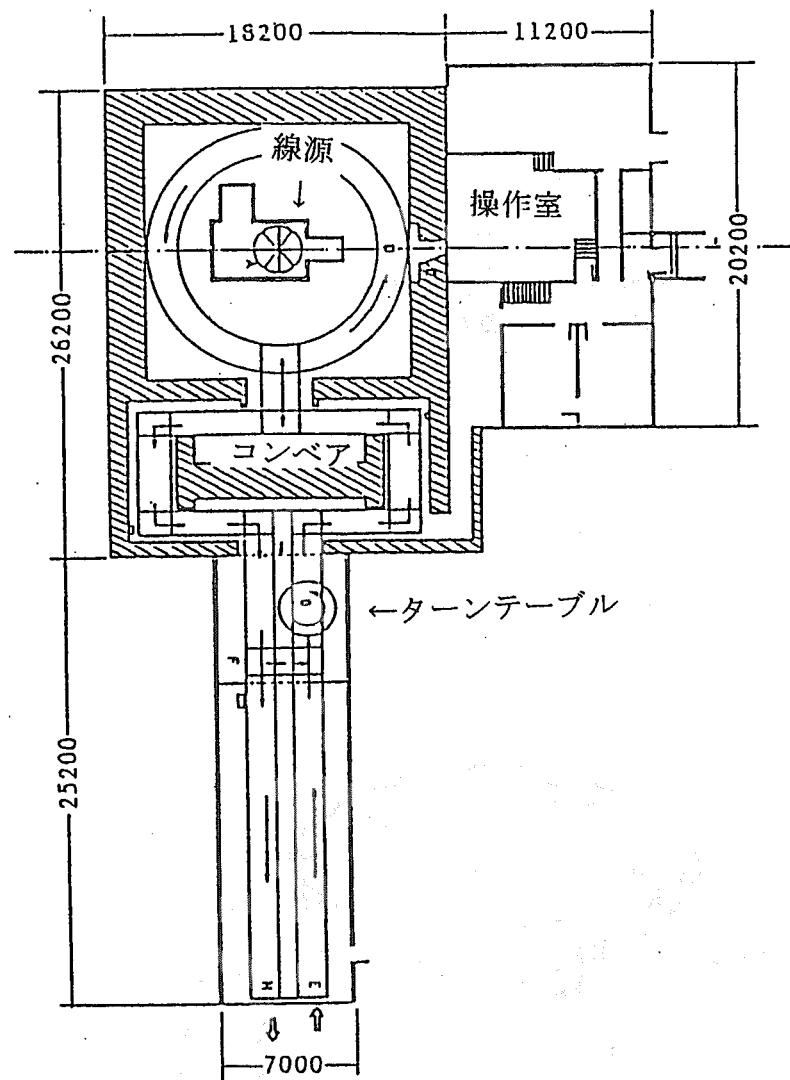


図5-4 土幌のコバルト-60 ガンマ線照射装置平面図（長さ
mm）。

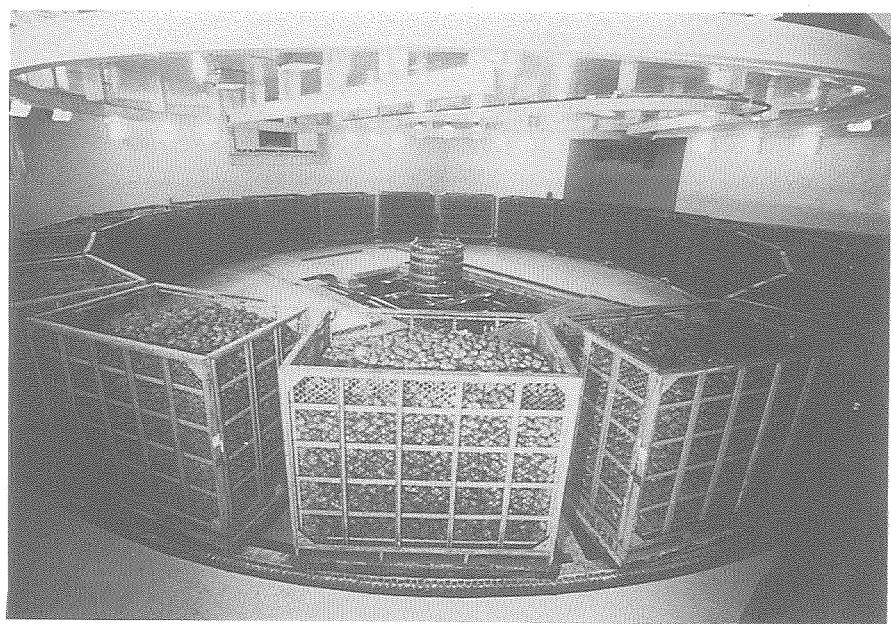


図5-5 土幌コバルト-60 ガンマ線照射装置における大型コンテナでの
馬鈴薯照射風景。

6. 食品照射の応用分野

6. 1 食品に対する放射線の効果

食品への放射線処理は表 6-1 に示すように低線量、中線量、高線量処理に大きく分類することができる¹⁾。

低線量処理は 0.02 ~ 1kGy の吸収線量で野菜の発芽防止とか果実や穀類の殺虫、肉類の寄生虫殺滅などを目的としており、照射による品質や栄養成分の変化もほとんど認められず、照射コストも薬剤処理と同程度か安価になると思われる。

中線量処理は 1 ~ 10kGy で主に畜肉や魚肉、香辛料、乾燥野菜、などの殺菌を目的としている。中線量では耐熱性の枯草菌やセレウス菌、ボツリヌス菌などの有芽胞細菌（耐熱性の胞子を形成する細菌）の完全殺菌が困難なため、サルモネラ菌などの食中毒菌の殺菌とか貯蔵期間延長を主に考えている。畜肉や魚貝類は常温、空気存在下で照射すると異臭が発生したり、食味が低下する限界線量があり、無酸素下とか、凍結など照射条件を工夫する必要がある。また、包装材も 1kGy 以上で異臭を発生しやすいものがあり、ポリエチレンや塩化ビニル製品はさけるべきであろう。生野菜などは放射線殺菌処理が困難であり、加熱による酵素失活との組み合わせが必要であろう。カビ類の多くは薬剤に耐性であるが、放射線では殺菌されやすく、1 ~ 5kGy で殺菌可能である。

高線量処理は 20 ~ 75kGy で商業的な完全殺菌を目的としている。米国ではハムやベーコンなどが有望とされており、ボツリヌス A 型菌の完全殺菌線量より必要線量が決められている。高線量処理では宇宙食やハイキング食、免疫不全患者食が有望とされている。

6. 2 野菜の発芽防止

低線量の放射線を照射すると、馬鈴薯、タマネギ、ニンニク、ショウガ、コンニャク芋、シャロット、ヤムイモ、栗などの発芽が抑制される。馬鈴薯（図 6-1）やヤムイモの発芽抑制に必要な線量は 0.06 ~ 0.15kGy であり、タマネギ（図 6-2）、ニンニク、シャロット、コンニャク芋の発芽抑制に必要な線量は 0.02 ~ 0.15kGy、ショウガは 0.04 ~ 0.15kGy である。栗の場合は 0.2kGy で発芽が抑制される。放射線による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に弱く細胞分裂が抑制されるためである。

馬鈴薯の場合、発芽が始まるとソラニンという毒性物質が蓄積され、人体に有害である（昔は馬殺しと恐れられていた）。放射線による発芽抑制は貯蔵期間の延長だけでなく、品質を保持し、ソラニン含量の少ない馬鈴薯を消費者に提供できるという利点がある²⁾。

馬鈴薯は休眠中に照射すると発芽が抑制されるが、発芽部以外の組織はほとんど放射線の影響を受けない。しかし、品種や収穫地によっては照射馬鈴薯の方が非照射のものよりも、調理した時に黒ずむことがある。わが国での経験では、十分に成熟していない馬鈴薯を照射すると組織が放射線で障害を受けやすく、内部が黒ずむことがある。このため、馬鈴薯の商品価値を落とさないために収穫後の選別、収穫時に受けた機械的な傷の治癒（キュアリング）処理をして、成熟した状態の馬鈴薯を照射することにより発芽が抑制され、品質も非照射馬鈴薯より優れたものが得

られている。例えば、北海道産の馬鈴薯を1月に本州に輸送すると、非照射馬鈴薯は発芽活動が始まるため、食味が低下するが、照射馬鈴薯では現地と同じ食味を維持している。

一方、馬鈴薯を0.15kGy以上の線量で照射すると貯蔵中に腐敗しやすくなり、ことに大量貯蔵時に腐敗が著しい。また、0.15kGy以下の照射馬鈴薯でも通常8ヶ月が貯蔵限界である。なお、照射馬鈴薯も日光があたる状況に放置されると、馬鈴薯そのものが茎であるため表皮で光合成活動が始まり1年以上腐敗しない可能性がある。しかし、この場合にはソラニンの蓄積の心配がある。

照射直後の馬鈴薯は放射線で生じた組織の障害を治癒するために遊離糖が蓄積されるが、15°C以上の温度で約2週間貯蔵することにより遊離糖が消費され、加工用に使用できるようになる。一般に、照射馬鈴薯は5～10°C、90%の湿度で貯蔵されている。馬鈴薯に多く含まれるビタミンCは照射後も変化せず、調理後の残存量も非照射品と差がないことが明らかにされている³⁾(表6-2)。

最近はマレイン酸ヒドラジドなどの発芽抑制剤が収穫直前に散布されて、発芽抑制する農家が増えているが、マレイン酸ヒドラジドは発ガン性があり、食品衛生法で使用が禁止されている。しかし、収穫前の散布は食品衛生法が適用されないというのが行政側の考え方である。一方、マレイン酸ヒドラジドを収穫後の馬鈴薯に直接散布するよりも収穫前に散布する方が馬鈴薯内部への吸収量が多い可能性があるとの指摘も専門家の間にある。

タマネギやニンニクなどは発芽活動が始まる前に照射しないと発芽抑制効果がなく、内芽が枯れて黒ずむことがある。タマネギなどの場合も照射前のキュアリング処理が重要である⁴⁾。わが国ではタマネギの収穫前にマレイン酸ヒドラジドが散布されているため、照射の必要性がないと言われているが、消費者団体の中には薬剤より照射の方がましという意見もある。中国や南アフリカではニンニクの照射が大規模で行われており、輸出も行われている。

6. 3 害虫および寄生虫の殺滅

一般に薬剤殺虫の場合、害虫の卵や蛹の殺虫効果は不十分である。また、多くの薬剤は食品内部への浸透力が弱いため、効率的な害虫駆除に適していない。臭化メチルは果物の内部まで浸透できる殺虫剤であるが、この場合も卵の殺虫効果は不十分であるし、果物の種類によっては品質が劣化する。

放射線の場合には比較的少ない放射線量で害虫の卵、蛹、幼虫、成虫の不妊化、殺滅が可能である¹⁾。放射線による殺虫は図6-3に示すように、照射直後に即死するのではなく数日かけて徐々に死滅するのが特徴であり、即死させるためには3～5kGyの高線量が必要である。一般に、害虫の卵は放射線で最も殺虫されやすく、蛹、幼虫、成虫の順に耐性となる。薬剤の場合の殺虫は呼吸系や神経系に作用するが、放射線は遺伝子に作用する。多くの害虫は0.07～0.5kGyで不妊化し子孫を残す能力が失われる。また、不妊化線量より多く照射されると、成虫や幼虫は1～2週間の間に運動能力、摂飢能力が低下し、徐々に死滅していく。害虫の必要殺虫線量は同じ属や類間でほぼ同じ傾向を示すことが報告されており¹⁾、ゾウムシ類と甲虫類、ミバエ類は最も少ない量の放射線で殺虫され、必要殺虫線量は0.15～0.25kGyである。アブラムシ類やダニ類の殺虫

線量は 0.25 ~ 0.40kGy である。一方、蛾類は放射線に耐性であり、必要殺虫線量は 0.4 ~ 1kGy である⁵⁾。線虫類については研究例が少ないため明確でないが、2kGy 以上必要である。

乾燥した果実、穀類、ナッツは害虫による被害を受けやすく、薬剤の場合には頻繁に燻蒸処理を行う必要がある。放射線の場合、害虫による再汚染を防止できるように包装してから、処理することにより長期にわたり害虫の被害を防止することが可能になる⁶⁾。わが国の研究では、米や小麦のコクゾウ、ココクゾウ、ノメシコクガ、コクヌストモドキは 0.2 ~ 0.5kGy で殺虫できる⁷⁾。

放射線殺虫は柑橘類、マンゴー、パパイヤ等の熱帯果実や亜熱帯果実のミバエ類やゾウムシ類の殺虫に有効である（表 6-3）。現状では、これらの果実は蒸熱処理（果実の中心温度 46.8 °C、10 分間）、低温処理（-0.6 ~ 1 °C、12 ~ 14 時間）及び臭化メチル燻蒸処理、青酸ガス薰蒸処理で殺虫されている。しかし、蒸熱処理や低温処理は果実の品質低下をもたらすし、薬剤処理も果実によっては適用できないものがあるし、殺虫が不完全とか、薬剤残留の問題がある。生鮮果実を照射すると、グレープフルーツなどの柑橘類は 0.5kGy 以上で食味などの品質低下が若干起こるが、パパイヤやマンゴー、リンゴなどは表 6-4 に示すように品質低下がほとんど起こらないと報告されている⁸⁾。一方、生鮮野菜の多くは検疫処理を目的とする放射線処理では線量が高いため代謝異常による品質低下を起こす可能性がある。

輸入切り花などで問題になる蛾、イモムシ、毛虫、ダニ、アブラムシ、アザミウマ、カイガラムシは 0.3 ~ 0.4kGy で繁殖を防止できる⁹⁾。切り花の中には照射により障害を受けるものがあるが、糖液に浸けるなどの処理により回復できる。木材のカミキリムシ科、キクイムシ科の害虫も 0.5kGy 以下で殺虫できる。

寄生虫については、豚肉に寄生している旋毛虫やトキソプラズマの原因になるプロトゾアは 0.5 ~ 0.7kGy で殺虫される。また、サナダムシや魚に寄生しているジストマも 0.5kGy 程度の線量で殺虫される¹⁰⁾。しかし、他の寄生虫類についてはまだ研究がほとんど行われていない。

6. 4 食中毒性細菌の殺菌

食品由来の細菌類によって引き起こされる食中毒は消費者にとっても食品産業にとっても大きな問題である。牛、豚、羊などの肉類や鶏や七面鳥などの食鳥肉で問題になるのはサルモネラ菌や病原大腸菌、カンピロバクター、エルシニア菌、黄色ブドウ球菌、リストリア菌による食中毒である。日本でも、最近はサルモネラ・エンテリティデイスという食中毒菌が海外より侵入し、生卵などが原因した食中毒が猛威をふるっている。これらの食中毒性細菌は 15 °C 以上で増殖して食中毒を引き起こす。毒素型食中毒菌である腸炎ビブリオ菌やブドウ球菌、セレウス菌、ウエルシュ菌などは 1 万 ~ 10 万個以上に増殖すると食中毒を引き起こす。一方、病原大腸菌 O157 などの腸管出血性大腸菌とかカンピロバクターは 100 個前後で発症する。サルモネラ菌は 1 万 ~ 10 万個で発症することが多いが、小児や高齢者、病人は 100 個前後でも発症することがある。病原大腸菌 O157 とかエルシニア菌、セレウス菌、ボツリヌス E 型菌などは 10 °C 前後の温度でも増殖するし、リストリア菌は 5 °C でも増殖するため、冷蔵庫に長期保存した食品でも食中毒が発生する可能性がある。

食中毒防止対策として放射線処理が期待されているのは低線量で殺菌できるサルモネラ菌や病

原大腸菌などの病原性細菌である。これら食中毒性細菌の放射線殺菌効果を D_{10} 値（生存曲線の直線部分で 90% 殺菌するのに要する線量）で比較すると表 6-5 及び表 6-6 に示すように菌種による差が少ない。従って、サルモネラ菌や病原大腸菌 O157、黄色ブドウ球菌、カンピロバクター、リステリア菌、エルシニア菌などの病原性細菌を 1 g 当たり 10 万分の 1 個以下に殺菌するのに必要な線量は 0 ~ 10 °C の低温照射では 1.5 ~ 3kGy、凍結下で 4 ~ 7kGy である¹¹⁾。病原大腸菌 O157 の牛肉中での殺菌線量は図 6-4 に示すように低温下では 1 ~ 1.5kGy であり、凍結下で 2 ~ 4kGy である¹²⁾。また、病原大腸菌 O157 の多くの分離株は一般大腸菌に比べ少ない量の放射線で殺菌されやすい¹³⁾。しかし、肉類や食鳥肉は酸素共存下での照射は食味劣化が起こりやすいため、脱気包装してから照射するのが望ましい。一方、殻付卵のサルモネラ菌は 3kGy 以下で殺菌でき、食味低下も無視できると報告されている。しかし、食中毒性細菌から產生されるタンパク質性毒素は放射線に著しく耐性のため、肉類や卵などの放射線処理は菌の増殖がほとんど起こっていない生鮮物の段階で行われるべきである。

魚貝類の場合、エビやカニ、貝類による食中毒は腸炎ビブリオ菌が原因となる場合が多い。腸炎ビブリオ菌による食中毒はわが国では常に上位を占めてきており、最近では東南アジアからの輸入魚貝類に腸炎ビブリオ菌やコレラ菌などの病原性ビブリオ菌が検出されることが多い。また、エロモナス菌は魚貝類に広く分布しており、10 °C 以下でも増殖する可能性がある。病原ビブリオ菌やエロモナス菌は比較的少ない線量で殺菌可能であり、0 ~ 10 °C における照射では 0.75 ~ 1.5kGy、凍結下で 3kGy で殺菌できる¹⁴⁾。魚貝類や肉類は空気存在下、低温で照射すると、表 6-7 に示すような食味低下を起こす限界線量があるが、食中毒防止を目的とする放射線処理では食味低下は問題にならない。しかし魚貝類の場合、放射線での殺菌処理は氷中または 3 °C 以下・無包装下で行うべきである。なぜなら、脱気包装下では放射線耐性のボツリヌス E 型菌が低温でも増殖する可能性があるためである。なお、フランスやベルギー、オランダでは剥き身エビに汚染しているサルモネラ菌の放射線殺菌が冷凍下で行われている。

セレウス菌やウエルシュ菌、ボツリヌス菌は耐熱性の芽胞を形成する細菌であり、10kGy 以上照射しないと殺菌できない。しかし、ワインナソーセージやカマボコでの研究結果では室温下 3kGy 照射と 10 °C 貯蔵の組み合わせによりセレウス菌の増殖が抑制された¹⁵⁾。従って、これらの耐熱性細菌についても低温貯蔵と 3kGy 程度の殺菌処理の組み合わせによりある程度食中毒防止が可能であろう。

最近、生牡蠣での小型球形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 0 ~ 10 °C の照射では 10kGy 以上必要である。しかし、0 ~ 10 °C の照射では食味劣化が著しいため、凍結下で照射する必要がある。ウイルスの場合、DNA ウィルスより RNA ウィルスの方が放射線に耐性であり、図 6-5 に示すようにウイルスを完全に不活性化するには凍結下で 30kGy 必要である¹⁶⁾。一方、ウイルスは 60 ~ 70 °C で加熱調理すれば不活性化するため、生牡蠣などでも特殊な場合を除いて放射線処理する必要はないと思われる。なお、狂牛病の原因となっているプリオൺはタンパク質性病原体のため、放射線による不活性化は困難であろう。

6. 5 腐敗菌殺菌による貯蔵期間の延長

食品の腐敗は肉類、食鳥肉、魚貝類やその加工食品のハムやソーセージ、水産練り製品などで急速に起こる。加工食品の場合は保存料の添加により貯蔵期間を延長しているものが多い。放射線による腐敗菌の殺菌は保存料と異なり、菌数を低減することにより貯蔵期間を延長することを目的としている。肉類や食鳥肉、魚貝類およびその加工品は低温貯蔵と放射線殺菌を組み合わせることにより貯蔵期間を大幅に延長できる。図6-6は保存料無添加のウインナーソーセージの貯蔵期間延長効果を示したものであるが、非照射品は10℃で2～3日しか貯蔵できないのに対し、3～5kGy照射と包装材、窒素ガス封入との組み合わせにより7～12日貯蔵が可能になる¹⁷⁾。しかも、この線量では食中毒性細菌の増殖は認められなくなる。カマボコやサツマ揚、鶏肉の場合にも同様な効果が認められている。しかし、貯蔵期間延長を目的とする放射線殺菌処理は食中毒性細菌の殺菌より線量が多いため、照射による食味低下防止のための脱酸素包装とか窒素ガス置換包装などの工夫が必要である¹⁷⁾。一方、フランスやベルギーでは真空包装した燻製鮭の照射が1～2kGyで実用化されており、低温下で約6週間の貯蔵が可能と報告されている。

イチゴやミカンのカビ防止のための放射線処理も有望である。イチゴの場合、2kGyの照射により貯蔵期間が2～4倍延長できる。また、ミカンの場合も低エネルギーの電子線で表皮に侵入したカビを殺菌することにより貯蔵期間を約2倍延長できる¹⁸⁾。

6. 6 香辛料・乾燥食品材料の殺菌

香辛料や乾燥野菜は微生物汚染が著しい食材である。香辛料の多くは表6-8に示すように1g当たり10万～1億個の細菌で汚染されているが、これは収穫前からの共生微生物が多くを占めている¹⁸⁾。玄米や蕎麦でも収穫前の共生細菌が約1千万個検出されるし、野菜でも共生微生物による汚染が著しい。これらの食品も直接食べる場合には腸内での菌の増殖の可能性が低いので問題がないが、食品加工に用いる場合に菌が増殖して腐敗や食中毒の原因になる可能性がある。ことに香辛料の場合には、収穫・乾燥時に土壌からの微生物汚染も起こり、枯草菌の仲間ばかりでなく、食中毒を起こすセレウス菌やウエルシュ菌、ボツリヌス菌などの耐熱性細菌（100℃・30分でも殺菌が困難）による汚染が著しく、食品加工の上で大きな問題である。

また、香辛料の多くは吸湿性があるためカビが発生しやすく、しかもアフラトキシンやオクラトキシンなどのカビ毒を産生するカビで汚染されていることがある¹⁸⁾。このため、貯蔵・流通中の管理が悪いとカビ発生による品質劣化ばかりでなくカビ毒が産生される可能性がある。カビ毒には表6-9に示すようにアフラトキシンなどの強力な発癌性物質が多く、わが国のような夏期の高温・高湿の気候でカビ毒が産生されやすい。

香辛料の耐熱性細菌は図6-7に示すように7～10kGyで1g当たり1,000個以下に殺菌される^{18, 19)}。1g当たり1,000個以下の基準は食品衛生法で定められており、肉製品や魚肉製品のセレウス菌やウエルシュ菌等の耐熱性細菌による食中毒防止を目的としている。香辛料に汚染しているカビ類は2～5kGyで殺菌され、図6-8に示すように高湿度下でも増殖してこない。香辛料の香り成分である精油は50kGyの高線量でも変化せず、気流式過熱蒸気殺菌法のように香気成分が著しく減少したり^{20, 21)}（図6-9）、香辛料特有の色調が変化することがない。また、香辛料の抗菌活性（菌の増殖を抑制する能力）や抗酸化活性（食品の酸化による劣化を防ぐ能力）

も 50kGy で変化しない²²⁾。なお、アフラトキシンなどのカビ毒は放射線に著しく安定で 100kGy でも分解しないため、放射線処理はカビが発生しない原料の段階で行うのが望ましい。

乾燥野菜や乾燥果実も微生物汚染が著しく、放射線殺菌が有望である。この場合も、大腸菌やサルモネラ菌等の殺菌を目的とするため、5～10kGy の線量が必要であろう。

小麦粉等の澱粉原料も耐熱性細菌の汚染が食品加工の上で問題である。澱粉の耐熱性細菌の汚染は 1 g 当たり 1,000 個以下のため、殺菌線量は 2～5kGy と思われる。しかし、澱粉の場合は 1kGy 以上の線量で粘度低下が著しいため、食品加工の目的によっては適用できない可能性がある。

6. 7 完全殺菌への応用

肉類や魚貝類などの食品は 10kGy 以上の高線量を照射すると異臭が発生したり味が低下する。これは共存する酸素による影響が大きい。また、これらの食品を放射線で完全に殺菌しても、酵素類は活性を保っているため酵素による腐敗が進行する。しかし、これらの食品も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になる。食品の放射線殺菌を行う場合、ボツリヌス菌が放射線に最も耐性のため殺菌の指標菌とされている。細菌芽胞は凍結下でも室温下でも殺菌線量はほとんど差がなく、サルモネラ菌などの非芽胞形成細菌も凍結下での放射線耐性は室温照射の 2 倍程度しか増加しない。一方、食品の栄養成分は凍結下では室温照射の約 10 倍耐性となる。

放射線による完全殺菌食品を製造する工程は、先ず肉類または野菜などを 70～75 °C で調理して酵素を失活させ、次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、マイナス 30 °C 前後に凍結して放射線を 30～50kGy 照射して、室温にもどせば無菌食品になる²³⁾。放射線による無菌食品は高压蒸気滅菌食品に比べビタミン類などの栄養成分の低減がほとんどないため、免疫不全の病人食として適しており、オランダ、イギリス、米国などで病人食として広く利用され良好な治療成績をあげている。米国では宇宙食としても放射線で滅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。

6. 8 その他の応用分野

1) 生鮮果実の熟度遅延

比較的低線量の放射線は生鮮果実の熟度を抑制して貯蔵期間を延長することが可能である。例えば、リンゴを 0.5～1kGy 照射すると 4 °C 前後で約 6 ヶ月貯蔵できる。マンゴーやバナナ、キノコなどでも貯蔵期間の延長が可能である。

2) 酒の熟成促進

焼酎やウイスキーなどの蒸留酒は熟成に数年必要であるが、放射線を数 kGy 照射すると数ヶ月の熟成で飲酒可能になる。また、乾燥野菜を数 kGy 照射すると水戻しが良くなるという応用もある。

3) 飼料の衛生化

飼料原料である魚粉や骨粉にはサルモネラ菌や大腸菌が汚染しており、家畜の幼動物や雛の病気の主原因となっている。この対策として、抗生物質が大量に使用されているが、これが薬剤耐性菌を誘発して医療の上で大きな問題になっている。魚粉の場合、これらの細菌は 5kGy で殺菌でき、照射飼料による雛の生育も良好であった。穀類原料に発生するカビは飼料の栄養価を低減させ、カビ毒も产生する。これらのカビも 5kGy で殺菌できる。食品工場で大量に副生される「おから」などの食品廃棄物も熱風乾燥後に、約 5kGy の放射線で殺菌することにより家畜飼料に利用できるであろう²⁴⁾。

飼料用原料として輸入されるトウモロコシなどの穀類には雑草種子が混入しており、家畜の糞を通じて農地に散布されて発芽し農業や家畜に大きな被害を与えていた。この外来雑草種子は 2kGy 以上で繁殖が防止できる。家畜飼料にはサルモネラ菌や病原大腸菌なども混入しているため、3～5kGy 程度照射することにより、家畜飼料にかかわる多くの問題を解決できる。

実験用無菌動物の飼料は 30～50kGy で滅菌処理されており、わが国でも 30 年以上使用されてきている²⁵⁾。実験動物用飼料は以前は蒸気滅菌処理されていたが、動物の生育が悪いとか死亡率が高いいため、放射線滅菌に切り替えられた。放射線滅菌法の欠点は処理コストが高いことであり、電子線滅菌などの導入によりコスト低減の工夫が必要であろう。

4) ソフトエレクトロン技術

最近開発されたソフトエレクトロンによる穀類表面の微生物、ことに耐熱性細菌を殺菌する技術も今後注目される技術である²⁶⁾。この場合は電子線のエネルギーが極端に低いため、穀類表面の微生物しか殺菌されないが、穀類内部に放射線が透過しないため、澱粉の粘度低下が起こらないという利点がある。また、種子表面に付着した病原大腸菌 O157 などの殺菌にも応用可能である。

表 6 - 1 食品照射の応用分野

目 的	線量 (kGy)	対象品目例
<u>低線量照射 (1 kGyまで)</u>		
* 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	0.10 ~ 1.0	生鮮果実、穀類、豚肉、ほか
* 熟度調整	0.50 ~ 1.0	熱帶果実、ほか
<u>中線量照射 (1 ~ 10 kGy)</u>		
* 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、など
<u>高線量照射(10 ~ 75 kGy)</u>		
* 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)、無菌動物用飼料、など

表 6-2 照射馬鈴薯の調理後の総ビタミンC残量、mg／100g
 (江差隆年、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)。

調理方法	照射馬鈴薯	非照射馬鈴薯
調理前	6.56	7.78
晒す(水中3分)	5.81	6.86
サラダ油で揚げる(3分)	5.26	6.54
蒸す(20分)	4.56	4.24
煮る(20分)	2.71	3.33
電子レンジ加熱(10分)	4.81	4.78

*照射、非照射で有意差は認められない。

**馬鈴薯は5°Cで5ヶ月貯蔵後の試料。

表 6-3 生鮮果実に寄生させたミバエ類の蛹化阻止線量、及び羽化阻止線量

害虫の種類	果実の種類	供試虫数	蛹化阻止線量(kGy)	羽化阻止線量(kGy)
ミカンコミバエ	パ・パ・イヤ	143,000	1.20	0.206
	アボガド	27,000	0.45	0.219
	多種類の果実 ^(a)	55,000	0.40	0.028
カリミバエ	多種類の果実 ^(b)	44,000	1.40	0.156
	パ・パ・イヤ	40,000	0.30	0.250

(a) : レイシ、サクランボ、セイヨウスモモ、タンジェリン、グアバ、(b) : パオナイヤ、トマト、キュウリ

表 6-4 各種生鮮果実の放射線に対する感受性

放射線による感受性	生 鮮 果 実 の 種 類
(A) 軽度の感受性	リンゴ、サクランボ、ナツメヤシの実、イチゴ、モモ、マンゴー、ロンガン、ネクタリン、トマト、グアバ、ランプータン、ラズベリー、マスクメロン、タマリオ。
(B) 中程度の感受性	アプリコット、バナナ、チュリモヤ、イチジク、グレープフルーツ、キンカン、ライチ、ビワ、オレンジ、トケイソウの実、ナシ、パイナップル、ライム、タンゲロー、タンジールオレンジ。
(C) 強度の感受性	アボガド、キュウリ、サヤインゲン、トゲハレイシ、ライム、オリーブ、ブドウ、サボディラ、レモン、コショウ、アメリカカカボチャ。
(D) 不明	キウイフルーツ、ザクロ。

表 6-5 市販の各種食肉より分離した大腸菌 O157:H7 株と関連株の放射線感受性

分離株	分離源	混合 O 血清	O157	H7	ソルビトール 分解性	D ₁₀ 値*
A4-1	牛肉	—	—	—	—	0.06
A4-2	牛肉	+	+	+	+	0.06
C1	鶏肉	+	+	+	—	0.06
LC1-2	鶏肉	+	—	—	+	0.15
IID959	標準株	+	+	+	—	0.12

*0.067M 磷酸緩衝液中の値。

表 6-6 生鮮食肉中の食品由来病原性細菌の放射線感受性
(低温照射)

菌種	D ₁₀ 値 (kGy)
リステリア菌	0.40 - 0.60
サルモネラ菌	0.40 - 0.50
病原大腸菌 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 6-7 生鮮魚貝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 (氷蔵下での日数)
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

表 6-8 香辛料中 1 g 当たりの微生物汚染数

香辛料試料	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 A	9.2×10^4	1.7×10^2	6.3×10^3	3.1×10^3
白コショウ粉末 B	-	-	-	-
白コショウ粒 A	9.3×10^4	-	2.6×10^3	8.1×10^3
白コショウ粒 B	9.8×10^5	2.0×10^6	2.9×10^4	1.7×10^4
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	-	-	-
バジル粉末	9.0×10^6	9.0×10^2	2.8×10^2	6.5×10^2

表6-9 食品貯蔵中のカビ発生により產生するカビ毒

カビ毒	カビの種類	汚染食品	標的臓器	備考
アフラトキシン	<u>A. flavus</u> (熱帯に多く分布)	ピーナツ、トウモロコシ、香辛料、生薬等	肝臓	強烈な肝発癌性物質
ステリグマトキシン	<u>A. versicolor</u> (温帯にも多く分布)	米、麦等	肝臓	肝発癌性物質
オクラトキシン	<u>A. ochraceus</u> (温帯にも多く分布)	トウモロコシ、香辛料、生薬、穀類等	肝臓、腎臓	腎機能を強く障害
ルテオスカイリン	<u>P. isulanicum</u> (温帯にも多く分布)	米等	肝臓	黄変米原因物質
シリニン	<u>P. citrinum</u>	穀類	腎臓	

A. : Aspergillus (アスペルギルス属)、 P. : Penicillium (ペニシリウム属)

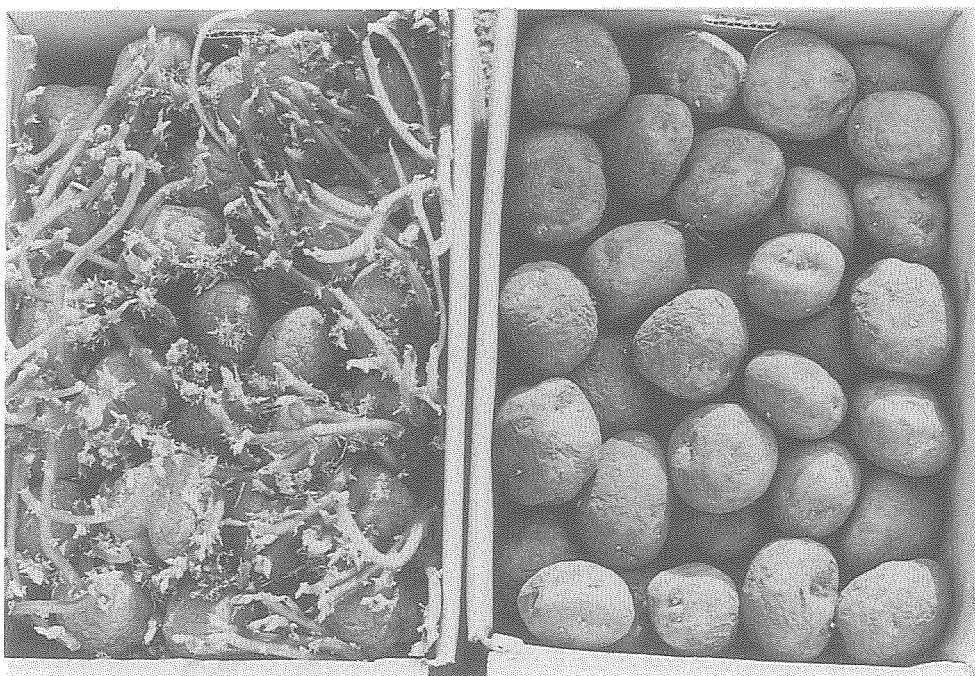


図 6-1 馬鈴薯をガンマ線照射後、室温で8ヶ月貯蔵したもの。



図 6－2 タマネギをガンマ線照射後、室温で8ヶ月貯蔵したもの。

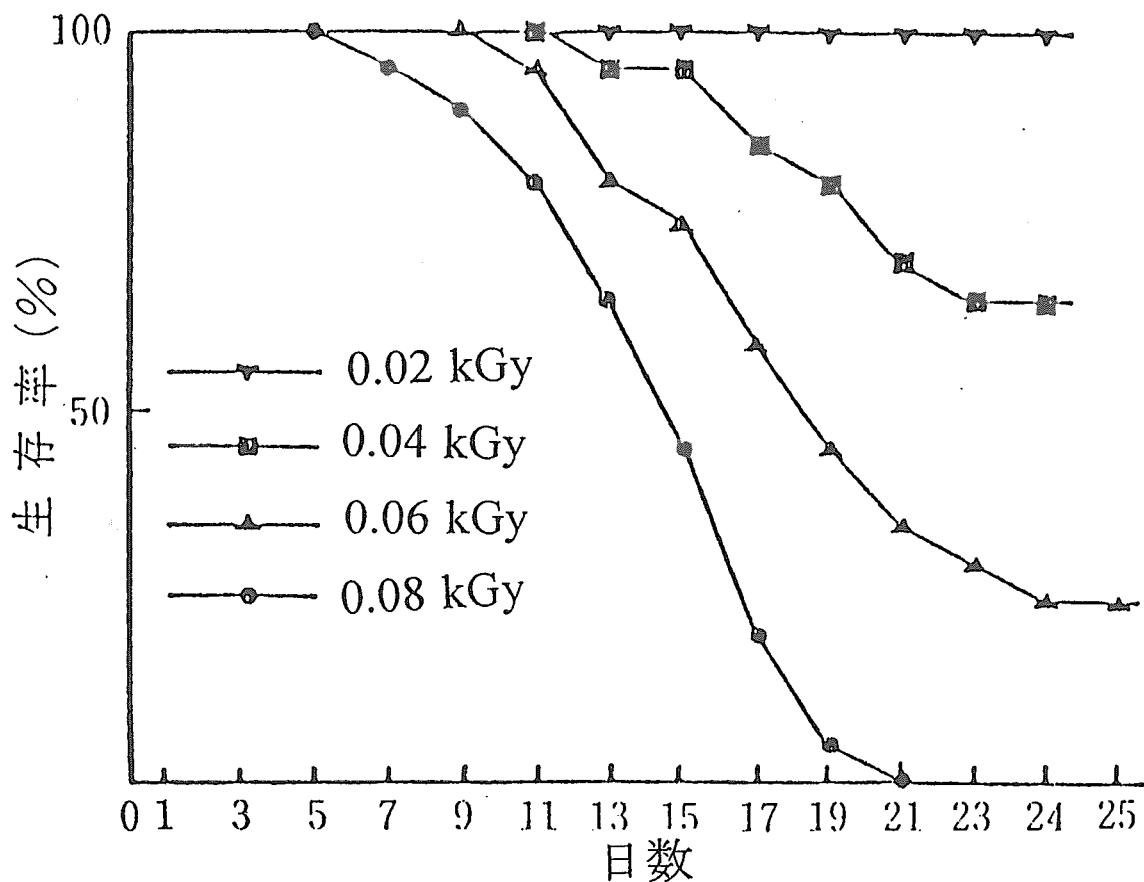


図 6-3 コクヅウ虫の成虫の殺虫効果

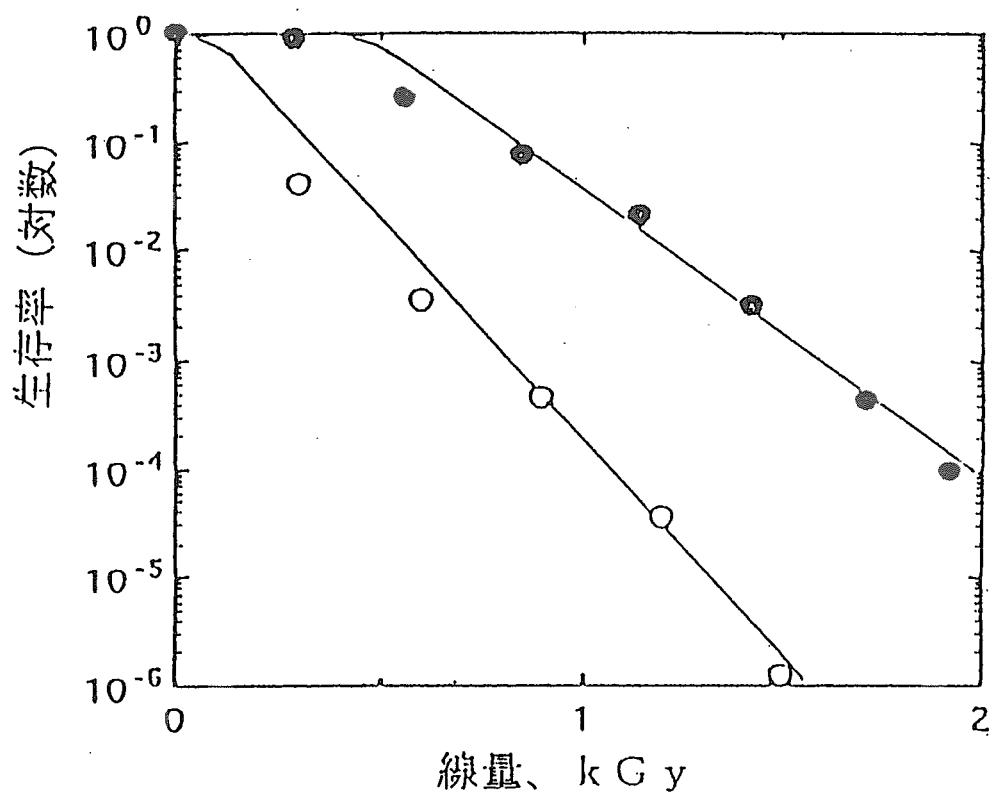


図 6-4 病原大腸菌 O157:H7・IID959株の牛肉
ひき肉中での放射線殺菌効果
(○: 室温下で照射, ●: ドライアイス凍
結下で照射)

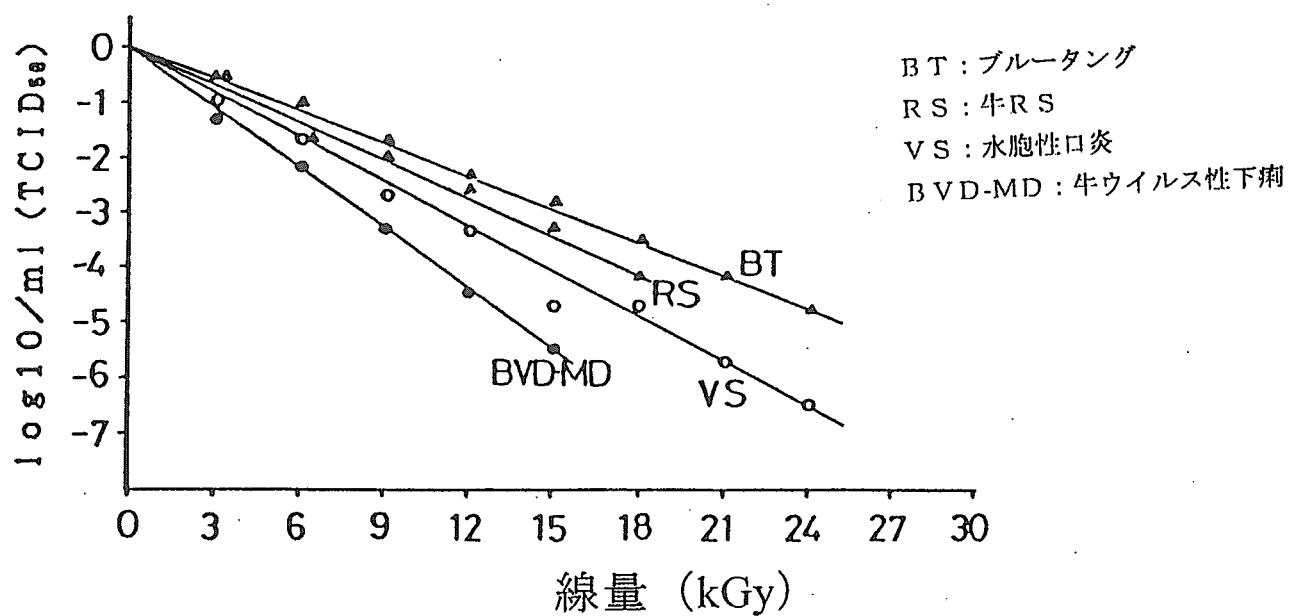


図 6-5 ドライアイス凍結下でのガンマ線照射による
各種RNAウイルスの不活性化。

[野々宮孝ら：食品照射 27巻、19-26(1992)]

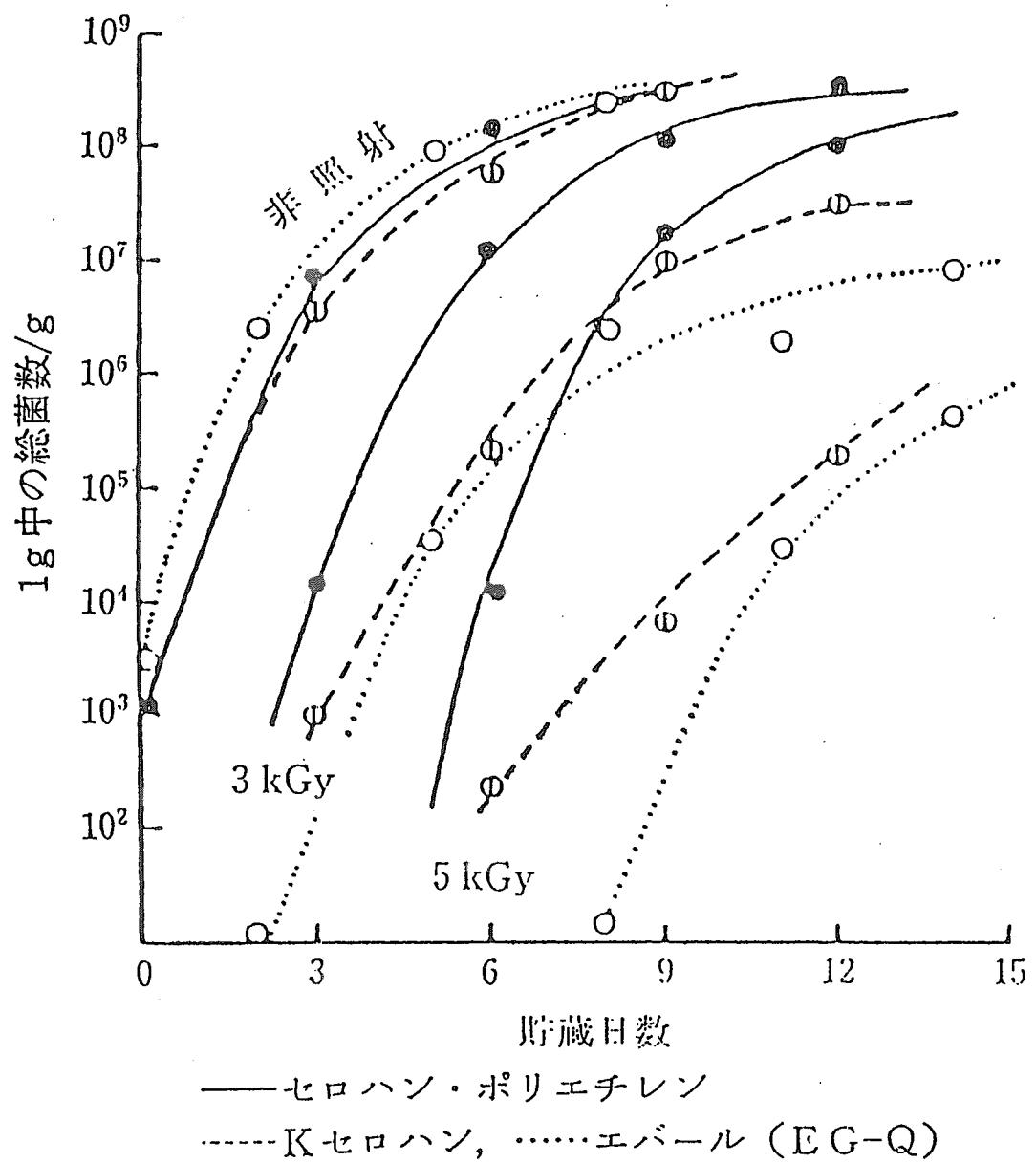


図 6-6 各種包装包中に嫌気的条件下で包装したウイ
ンナーソーセージの照射後の変敗抑制効果
(10°C で貯蔵した場合)

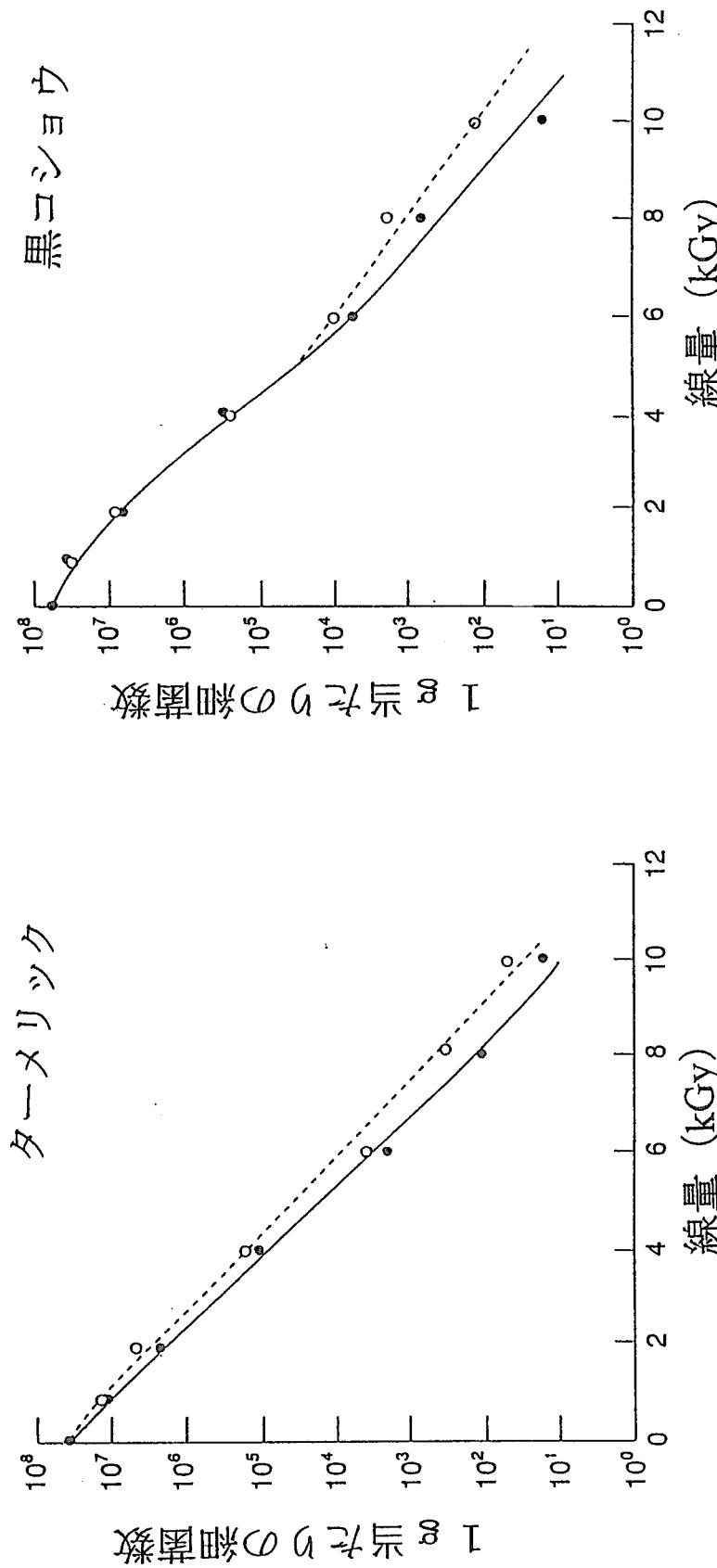


図 6-7 電子線とガンマ線による香辛料の殺菌効果の比較。
 ●：ガンマ線、○：電子線

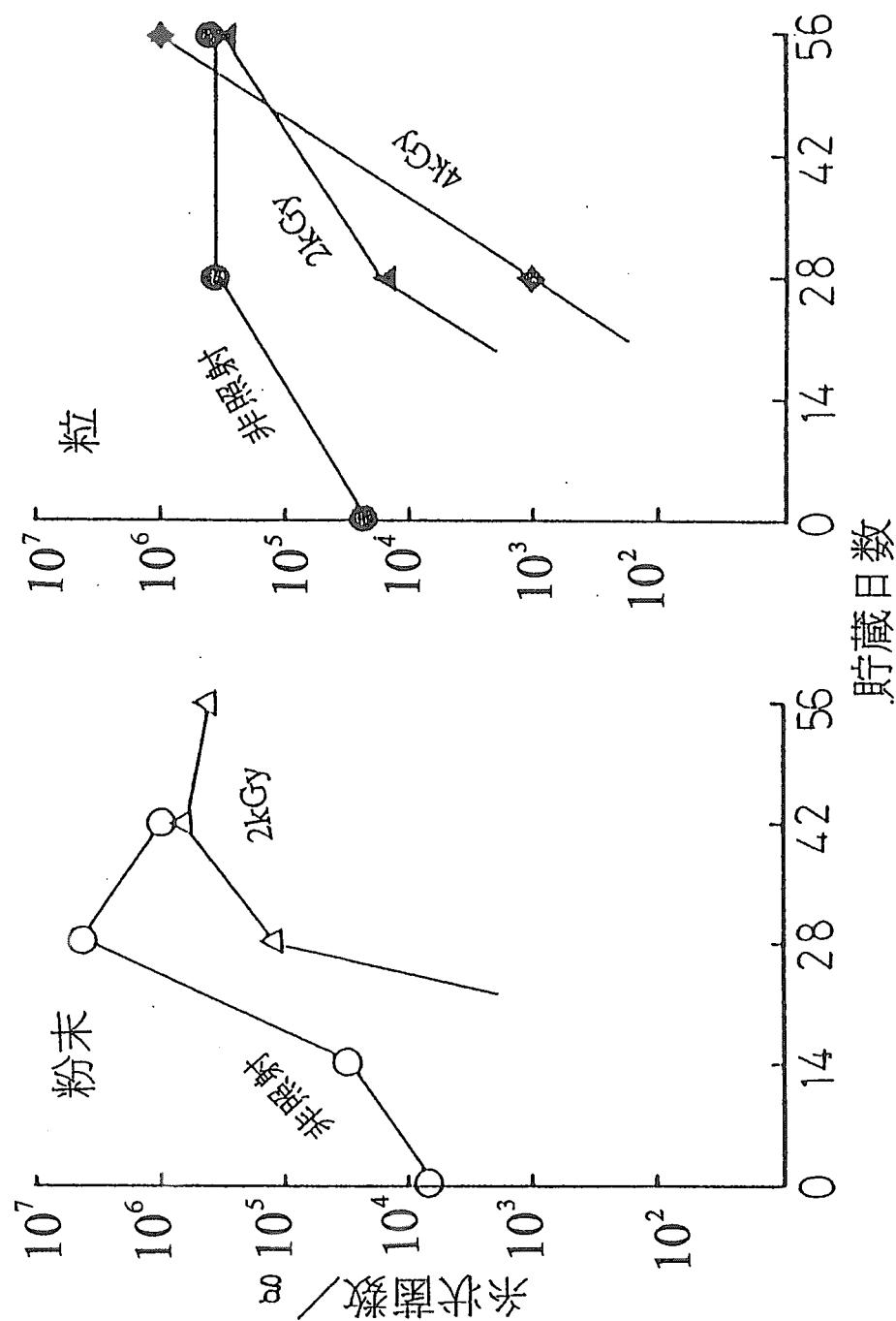


図 6-8 照射による貯蔵中の黒コシヨウの糸状菌(カビ)抑制効果(37°C、湿度90~93%)。

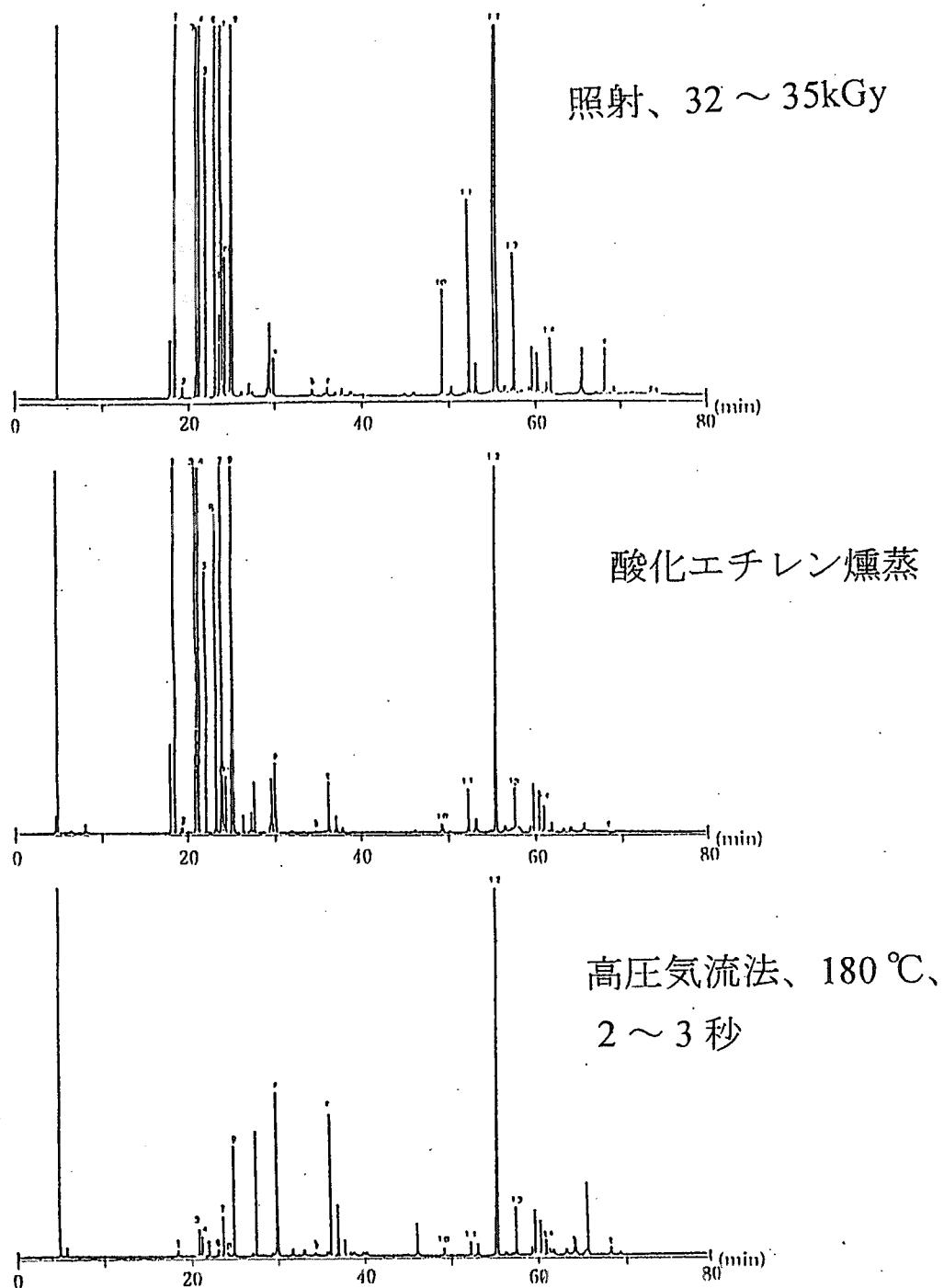


図 6-9 異なった殺菌処理法による黒コショウ精油成分のガスクロマトグラフ。

[小林彰ら：食品照射研究委員会最終報告書、日本アイソトープ協会、1992年；低沸点香氣成分は主に20～40分(min)で検出され、非照射と照射で同じ分析値を示した]

7. 照射食品の安全性

7. 1 安全性評価の歴史

食品の放射線処理は人類の歴史上きわめて新しい技術であるため、その安全性および栄養価、微生物学的安全性を証明する必要があった。この広義の安全性を健全性（wholesomeness）とよんでいる。照射食品の健全性の確認のためには、①誘導放射能の生成の有無、②毒性物質生成の有無、③発癌性物質生成の有無、④栄養価の破壊の程度、⑤子孫に及ぼす影響の検討、⑥生残微生物の有害性の有無、が必要とされてきた¹⁾。

食品照射研究が発足した当初は、放射線による食品成分への影響が明らかになつていなかつたため、食品添加物の安全性評価と同じ100倍量の照射食品を動物に与える試験が行われていた。この考えによると、必要線量の10倍以上照射したり、過剰の食品を動物に投与する必要がある。例えば、アメリカ陸軍が行った照射ベーコンの動物試験では飼料組成の約50%が照射ベーコンで占められ、ビタミン等の栄養バランスも無視したものであった。過去に問題となつた動物試験は特定食品の過剰摂取や栄養バランス無視の影響によるもののが多かつた。また、照射食品の健全性評価の基準も確立されていなかつた。

表7-1に示すように、照射食品の健全性評価を国際的に行おうとする動きは1961年（昭和36年）のFAO（国連食料農業機関）、IAEA（国際原子力機関）、WHO（世界保健機関）による合同専門家委員会のころから始まつた。この会議では照射食品の健全性試験は食品添加物と同じ基準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かわかつていなかつたため食品添加物と同じ扱いとなつた。

しかし、各国で行われていた健全性試験には統一性が取れていなかつたため、1970年（昭和45年）には照射食品の健全性評価のための国際プロジェクトがわが国やアメリカ、西ドイツ、フランス、イギリスなど24カ国が参加して開始された。この頃になると、放射線分解生成物の分析技術が急速に進展し、1976年のFAO・IAEA・WHO合同専門家委員会では国際プロジェクトでの放射線化学研究などの成果を基にして、「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取り扱いは妥当でない」とする見解を示した²⁾。この見解は食品の放射線分解生成物が通常の酸化分解生成物と大差ないことがわかつてきしたことによるものである。

1977年（昭和52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³⁾、放射線滅菌された飼料による無菌の実験用動物の飼育試験や家畜動物の試験、ビタミンなどの分析試験、微生物学的安全性評価などの結果から、「50kGyまでの照射は動物飼料としての安全性に問題がない」ことを明らかにした。

1980年（昭和55年）のFAO・IAEA・WHOの合同専門家委員会では、国際プロジェクトの動物試験の成果や放射線殺菌された動物飼料の成果、放射線分解生成物の分析結果を基にして、「10kGy以下の総平均吸収線量でいかなる食品を照射しても、毒性学的、栄養学的および微生物学的にまったく問題のないこと、ならびに、今後はこの線量以下で照射した個々の食品についての健全性試験は不要である」という結論を出した⁴⁾。しかし、国際合同専門家委員会の勧告

にもかかわらず、食品照射の実用化は予想どおりに進展しなかったため、WHOは1980年以降に行われた健全性試験を再評価しなおして1992年（平成4年）に10kGyの安全宣言が正しかつたと再確認した⁶⁾。続いて、1997年（平成9年）にはWHOは最新の放射線分解生成物の研究成果や遺伝毒性試験（変異原性試験）の成果を基に、10kGyの上限線量を撤廃するように勧告した⁶⁾。

アメリカ厚生省食品医薬品局（FDA）は1960年（昭和35年）代初期には照射食品の健全性について従来の基準によりアメリカ陸軍での動物試験結果に問題がないとしていたが、1968年（昭和43年）に既に許可されていた照射ベーコンの許可を取り消した。この理由は、食品医薬品局の健全性評価の基準が厳しくなり、1963年（昭和38年）に許可された時には健全性が証明されていたと思われていた動物試験の結果が、新しい基準では不十分と判断されたためである。その後、最初に照射ベーコンの許可を申請したアメリカ陸軍は、新しい基準により放射線殺菌した牛肉の健全性を証明するための研究を行い、健全性に問題がないことを証明した。1984年（昭和59年）には59kGy照射した鶏肉の健全性試験で食品としての安全性に問題がなかったとの結果が食品医薬品局より報告され、アメリカの食品照射実用化政策に大きな影響を与えた⁷⁾。

7. 2 誘導放射能の評価

世界各国では食品照射に用いる放射線はFAO・WHO合同規格委員会（コーデックス）の食品照射の規格基準に従って、ガンマ線、エックス線、電子線に限定している⁸⁾。本規格基準では、食品照射に用いる放射線のエネルギーは、ガンマ線はコバルト-60からの117万及び133万電子ボルトの電磁波（光）とセシウム-137からの62万電子ボルトの電磁波、エックス線は5百万電子ボルト（5MeV）以下と定められており、電子線は千万電子ボルト（10MeV）以下と定められており、このエネルギーレベル以下では誘導放射能（放射性物質）の生成は無視できるとしている⁹⁾。

エックス線（ガンマ線も含む）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ることにより中性子が放出され、中性子と食品を構成する元素の原子核とが反応して誘導放射能を生成する可能性がある。しかし、上記の上限エネルギーで誘導される放射能は食品1kgにつき1000分の1ベクレル程度であり、食品中に含まれるカリウム-40や炭素-14などの自然放射能の20万分の1以下にすぎないことが明らかになっている。また、誘導される放射能も短寿命なものが多く数日で消滅してしまう。

食品照射で利用することが期待されるエックス線は電子線をタンタルやタングステンなどの重金属に照射して発生される制動放射線（重金属の核外電子場を電子線が通過するとき発生する電磁波）である。しかし、制動放射エックス線の5百万電子ボルト（5MeV）での転換効率は約7%にすぎない。転換効率を上げるには上限エネルギーを上げる必要がある。最近の研究によると、7百50万電子ボルト（7.5MeV）では転換効率は14%となり、しかも誘導放射能の生成は無視できること報告されている。すなわち、5百万電子ボルトのエックス線を食品に照射して発生する中性子数に比較して7百50万電子ボルトのエックス線では中性子数は1.5倍増加するにすぎない。この中性子によって食品中の元素が放射化される量を見積もっても10kGy照射で食品1kg当たり

0.04 ベクレルにすぎず、しかも誘導放射能は短時間で消滅するものが多く、比較的長寿命のナトリウム-24 等も数日で消滅してしまう。食品 1kg に含まれる自然放射能は 40 ~ 600 ベクレルのため、誘導放射能の生成は無視することができる¹⁰⁾。しかし、照射施設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り、放射化されにくい材料を用いる必要があろう。制動放射エックス線の上限エネルギーを 7 百 50 万電子ボルトにする動きはコーデックスやWHOにないため、当分実用化は無理と思われるが、食品以外の応用から検討するべきであろう。

7. 3 放射線による食品成分の化学変化

1) 放射線による化学作用の機構

放射線による化学反応の特徴は図 3-4 に示したように水を分解して活性種である水酸基ラジカル ($\cdot \text{OH}$)、水素ラジカル ($\cdot \text{H}$)、水和電子 (e_{aq}) などの水分解ラジカルを生成しやすい。また、酸素が存在すると過酸化ラジカル ($\cdot \text{O}_2^{\cdot}$) や過酸化水素 (H_2O_2) も生成する。しかし、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ない。食品中でも 1ppm (1kg 当たり 1mg) 以下の蓄積量であり、過酸化水素は不安定のため食品中に残留することはあり得ない^{11), 12)}。

食品には水分が含まれているため、放射線による化学反応には水分解ラジカルの寄与が大きく分子への直接作用は少ない。すなわち、食品成分に対する放射線の化学作用は基本的に水分解ラジカルによる加水分解と酸化分解反応であり、還元反応も若干起こる¹³⁾。また、不飽和脂質などの共役二重結合を有する有機高分子に直接作用して活性種を生成する点は可視光線や紫外線、熱処理と類似している。

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された活性種による反応が中心であり、酸化反応、分子間結合反応、脱炭酸反応、脱水素反応が起こる¹⁴⁾。しかし、同じような化学反応は可視光線または加熱でも起こっている。

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である。また、タンパク質分子内の炭素と窒素間の結合が切断されて低分子のポリペプチドを生成する。球状タンパク質では分子間の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。しかし、タンパク質は比較的放射線に安定で、鶏肉などを 0 °C で 30kGy の高線量照射してもアミノ酸組成はほとんど変化しないと報告されている¹⁵⁾。

単糖類の分解反応は水分解ラジカルによる有機酸、アルデヒド類、ケトン類の生成であり、低分子糖類は单糖類を生成し、澱粉などの多糖類は低分子糖類を生成する。

2) 化学変化に及ぼす照射条件の影響

食品の温度や酸素の存在の有無、水分含量の多少も放射線化学反応に大きな影響を与える。食品中に酸素が多量に存在すると酸化分解反応が促進され、酸素濃度が低いと分解反応は著しく抑制される。乾燥食品での放射線による分解反応は水が多量に含まれる食品に比べ 10 分の 1 程度であり、酸素の有無も分解反応に大きく関係してくる。凍結状態の食品では水分解ラジカルの拡散が困難なため、水分解ラジカル同士の反応が他の食品成分への反応より起こりやすく、食品成

分の分解反応は乾燥食品の場合と同様に著しく抑制される。

このように、食品成分に対する放射線の影響は同じ食品でも酸素の存在量の相違、乾燥下、凍結下などによって異なるため、ある条件で行われた動物試験の結果は他の条件下で照射された同じ食品には適用できないという問題が生じる。この問題に対応するためには、放射線により生成する分解生成物の情報を活用する必要がある¹⁶⁾。1970年（昭和45年）以降の放射線分解生成物の評価法の進歩により膨大な量の経費のかかる動物試験の必要性を減らすことができ、照射食品の安全性について信頼性の高い評価を行うことができるようになった。

7. 4 放射線分解生成物による安全性評価

1) 食品成分の放射線分解生成物の量と種類

放射線による食品成分の分解生成物の分析による安全性評価の研究は1970年（昭和45年）頃からアメリカや西ドイツ、イギリスなどで開始された。しかし、実用的な照射条件での食品の放射線分解生成物は極微量である¹⁷⁾。このため、実用照射の10倍以上照射したり、高酸素濃度下または水溶液中など放射線分解反応が起こりやすい条件で研究が行われた。

多くの研究によると、放射線による食品成分の分解生成物は加熱調理と類似しており非照射食品中にも存在し、食品全体の放射線分解生成物の量は牛肉を56kGy照射しても食品1kg当たり10mg(10ppm)以下にすぎないと報告されている⁴⁾。しかも、分解生成物は単糖類、アミノ酸類以外ではアルカーン（直鎖の飽和炭化水素）類、アルケーン（直鎖の不飽和炭化水素）類、アルカデイエン（二重結合2個を有する直鎖の炭化水素）類、エステル類（有機酸類とアルコール類の化合物）、脂肪酸類、アルデヒド類、有機酸類、アルコール類、アミド類、メルカプタン類、芳香族化合物、アンモニア、水素、炭酸ガス、一酸化炭素などが微量に生成され、そのほとんどが酸化分解物であり各分解生成物の量は食品1kg当たり1mg(1ppm)以下であり、通常の食品中にも含まれている。

たとえば、澱粉からのホルムアルデヒドの生成について検討してみると、高濃度の酸素存在下での生成量は10kGy照射で20ppm以下、空気存在下の照射では2ppm以下であり、酸素濃度が低い通常の食品では検出不可能である¹⁸⁾。しかも、ホルムアルデヒドは非照射の乾シイタケや魚の燻製に6～360ppm含まれている。同様に、他の分解生成物についても似たようなことが言える。

また、脂質の放射線分解生成物の種類は図7-1に示すように、モデル系としてステアリン酸エチルを対象にして加熱処理（180℃；天ぷら温度、1時間）とガンマ線照射（120kGy）を比較した場合、揮発性の分解生成物量は加熱処理の方が多く、アルカーンなどの生成物も加熱の方がはるかに多いことを示している¹⁴⁾。放射線による脂質の分解機構は可視光による自動酸化機構と類似しており、不飽和脂肪酸類を含む脂質の方が飽和脂肪酸類を含む脂質に比べ酸化分解が起こりやすい。一方、放射線によって生成される分解物は加熱に比べ高分子量の生成物が多い傾向が認められており、放射線の分解機構は紫外線に類似している。

2) 食品主要成分の放射線分解生成物

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分解反応により生成され、加熱調理や自然酸化劣化でも生成されることが明らかになっている。

脂質の分解物は分子鎖切断による脂肪酸やエステル類（＊主に脂質の一部が分解した脂肪酸エステル類、脂質もエステルの一種である）、脂肪酸の還元的切断によるアルカーン類、アルケーン類、アルカダイエン類、酸化分解によるアルデヒド類や有機酸などが微量に生成され、これらの物質は非照射の食品や加熱調理食品中にも検出される¹⁴⁾。

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、アミド、メルカプタン類などであり生成量は微量である。また、アミノ酸と糖類が反応してメラノイジンを生成することもある（メラノイジンは醤油などの褐色物質であり、加熱で生成しやすい）。わが国で行われた糖とアミノ酸混合物の放射線処理と加熱調理による反応生成物の変異原性（発ガン性）試験では、放射線処理法では変異原性物質の生成が認められないのに対し、加熱調理では変異原性物質が生成されやすいという結果が得られている¹⁵⁾。

糖類の場合は有機酸類やアルコール類、アルデヒド類、ケトン類等を微量に生成する。一方、糖類の水溶液を 10kGy 以上照射すると放射線による酸化分解反応が起こりやすいため弱変異原性（発ガン性）物質が微量に生成されるが、生体内では変異原性は発現されず、果汁で無毒化されることがわが国の研究で明らかにされている¹⁵⁾（＊加熱処理や放射線処理などで生じる一部の分解生成物は弱変異原性を示すが生体内では酵素などの働きにより無毒化されるものが多い、生鮮果汁でも無毒化される）。なお、単糖類の中には加熱で有機酸などに分解しやすいものが多く褐色のカラメルを生成するが、放射線では単糖類の分解性に大きな差は認められずカラメルの生成もない。

ビタミン類の場合、放射線による分解は酸化分解が中心であり加熱調理による分解と似ている。また、水溶液中では分解しやすいが、食品中では安定である。DNA の場合に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が生成量は微量である。

3) アメリカ食品医薬品局の安全性評価の指針

アメリカの食品医薬品局は 1986 年（昭和 61 年）に 1kGy 以下の一般食品の照射と 30kGy 以下の香辛料類の照射を許可した。その理由は、食品中に生成する放射線分解生成物の量は 1kGy 照射の場合、最大に見積もっても 1kg 当たり 30mg 以下であり、その分解生成物の 90% は非照射食品にも存在しており、残りの放射線特有の分解生成物は 3mg 以下であること、香辛料の場合には 1 日当たりの摂取量が食品全体の 0.01% より少ないため 30kGy まで問題ないと述べている¹⁸⁾。また、放射線特有の分解生成物の多くも通常の食品分解生成物と類似しており、1kGy 以下の照射食品の場合には個々の成分について動物を使った毒性学的安全性を評価するには濃度が低すぎると結論している¹⁹⁾。

すなわち、食品中には天然の変異原性（発ガン性）物質であるアルカロイド系成分や加熱調理などで生成するニトロソアミンやベンゾピレンなどの発ガン性物質が微量に含まれており、エチルアルコールや糖の酸化分解物等にも微弱な変異原性があることが知られており、百万分の 1 以下の濃度で生成している分解生成物の動物などによる安全性評価は意味がないというのが食品医薬品局の見解である。

4) 放射線特有の分解生成物と安全性

放射線特有の分解生成物については、その後 FDA は脂質の照射により微量に生成される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述べている⁵⁾。しかし、アメリカの大学や陸軍などでの研究ではこれらの化合物は非照射の牛肉などから検出されており照射により若干増加する程度であると報告している¹⁴⁾。アメリカ陸軍はベーコンやハム、鶏肉、豚肉、牛肉の放射線分解生成物について大規模な研究を行っており、食品医薬品局の政策にも大きな影響を及ぼしているが、1982 年の最終報告書で各食品での分解生成物の種類に差はなく、放射線特有の分解生成物は存在しないと結論づけている²⁰⁾

(注：食品医薬品局の照射食品の安全性評価の指針提案は 1980 年に行われた)。

その後、脂質の放射線分解で生成されるアルキルシクロブタノン類が放射線特有の分解生成物として微量に生成されると報告され、アルキルシクロブタノン類の一一種である 2-ドデシル・シクロブタノンの弱変異原性の有無がドイツなどで問題になったが、ドイツの結果は実験方法に問題があり細菌などを使った変異原性（発ガン性）試験により否定されている²¹⁾。しかも、これらの化合物は脂質の高温処理でも微量に生成されると報告されている⁶⁾。

食品中での放射線化学反応は分子鎖切断や酸化分解反応が中心であり分解生成物は加熱調理と似ており、加熱調理に比べ芳香環化合物や複素環化合物（ベンゾピレンやイミダキノリン等）の生成が少ない。従って、放射線による分解生成物は加熱調理による分解生成物と同様に人体に無害であるというのが WHO の見解である⁶⁾。

5) 食品中の残留農薬への影響

食品中の残留農薬と放射線分解生成物との反応により有害物質が生成する可能性についても検討しておく必要がある。農薬の多くは塩素または臭素系の化合物である。放射線による化学反応では塩素または臭素などのハロゲン元素は残留農薬から解離しやすく、解離したハロゲン元素は活性種を消滅させやすい。これに対して、熱処理では塩素または臭素と食品成分が反応して新しい化合物を生成する可能性がある。多くの研究によると、水溶液中の農薬は放射線で分解されやすく脱ハロゲン化されるが、食品中では殆ど分解されないと報告されており分解率も 10kGy で百万分の 1 以下である²²⁾。また、遊離した塩素や臭素と食品成分の放射線分解生成物が反応して新しい化合物を生成したり、残留農薬と放射線分解生成物が反応する可能性もほとんどない。

7. 5 動物を使った安全性評価

1) 動物を使った飼育試験

1950 年（昭和 25 年）代後半から世界各国で多種類の照射食品について、種々の動物を用いた安全性試験が行われた。これらの試験では主に純系のラットやマウスなどを用いた長期飼育試験（慢性毒性試験）や 3 世代繁殖試験（世代試験）が行われた。しかし、丸ごとの食品は成分組成が不均一で変動しやすいため動物試験が困難である。すなわち、餌に試験用食品を加えると、試験動物の栄養バランスの乱れが生じやすく、毒性学的影響の判定が困難である。

初期の動物試験は食品添加物等の化学物質と同じ 100 倍量の安全性評価の立場から、特定食品

の過剰摂取や栄養のバランスを十分に検討しない研究が多く、本格的な研究は 1970 年（昭和 45 年）代以降に持ち越された¹⁾（表 7-2）。1976 年（昭和 51 年）になると放射線分解生成物の情報が蓄積されてきたため、動物試験に用いる飼料中の照射食品の添加量や線量は実用条件にそった範囲で安全性を評価するべきであるとの国際的合意が得られた。そして、1970 年代に行われた多くの照射食品の動物試験の成果と放射線分解生成物の研究により WHO などの国際機関の合同専門家委員会は 10kGy 以下の照射食品の健全性に問題のないことを宣言した⁴⁾。

2) 遺伝毒性試験

食品添加物などの安全性試験では、動物を使った長期飼育試験と世代試験、催奇形性試験が重視されてきたが、最近では組織培養した動物細胞や細菌を用いた遺伝毒性試験が重要視されるようになってきている。遺伝毒性試験を大別すると、（1）試験管内試験として、細菌に対する突然変異誘発試験（エームス試験；サルモネラ菌や大腸菌突然変異株による復帰変異試験）と哺乳類培養細胞に対する染色体異常試験、などがある。（2）生体内試験では、骨髄細胞または生殖細胞の染色体異常試験（小核試験も含む）、劣性あるいは優性致死試験がある。世界各国で様々な照射食品について遺伝毒性試験が行われているが、表 7-3 に示すように照射による悪影響は認められていない⁵⁾。

3) アメリカでの照射鶏肉の安全性試験

1984 年（昭和 59 年）にはアメリカのラルテック社で行われた冷凍鶏肉を平均線量 59kGy 照射したときの動物を使った安全性試験の結果が食品医薬品局より報告され、健全性に問題ないことが明らかにされた。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、ウサギおよびビーグル犬に与える長期動物飼育試験（280～999 日）、優性致死試験、世代試験、エームス菌やショウジョウバエによる遺伝毒性試験が行われた⁷⁾。例えば、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。その結果、図 7-2 に示すように 40 週の飼育期間中の体重増はガンマ線、電子線、加熱で差は全く認められず、その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、国際的な動物試験の標準はラットで雌雄 30～50 匹であり、個体差によるデータのバラツキが見られることが多い。

アメリカの照射鶏肉の動物試験の結果および放射線分解生成物の分析結果はアメリカばかりではなく WHO の照射食品の健全性評価にも大きな影響を与え、10kGy の上限線量撤廃の理由になった。

4) 放射線滅菌された実験動物用飼料での飼育効果

わが国やイギリスなどの先進国では実験用 SPF（特定の病原菌がない状態）動物や無菌動物などの飼料の放射線滅菌処理が 25～50kGy で実用化になって 30～40 年たっているが²³⁾、図 7-3 に示すように蒸気滅菌処理より良好な飼養成績を示している。ここで、蒸気滅菌した飼料でラットの体重増が抑制されたのは飼料ペレットが硬化してラットが食べにくい状態になっていることも原因しているが、蒸気滅菌に対し硬化しにくいペレットでも放射線滅菌飼料の方が体重増が優れている。ラットなどの世代交代は短期間に進むため、60～100 世代が 100% 放射線処理

された飼料で繁殖されてきていることも照射食品の安全性を証明する証拠になっている。

7. 6 栄養成分への影響

照射食品の栄養評価は、食品中の栄養成分の影響、動物の成長およ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。

照射によって食品中に生じる栄養変化は、加熱、冷凍、乾燥などの食品加工処理で起こる変化と基本的に差がないことが明らかになっている。食品の主要な栄養成分である澱粉などの多糖類は放射線により分子鎖が切断されやすいが、エネルギー源としての栄養価が低下するわけではない。タンパク質は放射線に安定であり、10kGy 以上の高線量でもアミノ酸組成はほとんど変化しない。また、免疫化学的性質も変化しない。脂質は放射線で酸化劣化が起こりやすいが、酸素濃度を低減すれば、高線量照射でも酸化劣化は無視できる。

栄養成分のうち、最も分解が起こりやすいのはビタミン類である。しかし、表7-4に示すように凍結下の鶏肉中での高線量照射によるビタミン類の低減は蒸気滅菌処理と大差がないという結果が得られている⁶⁾。また表7-5に示すように、高線量照射した実験動物用飼料の結果ではビタミンB1は加熱処理の方が分解されやすいという結果が得られている²³⁾。

世界各国のこれまでの研究を総括すると、1) 1kGy 以下の低線量では栄養成分の低減はほとんど問題にならない、2) 1 ~ 10kGy でも脱酸素下での照射では栄養成分の低減はほとんど起こらない。しかし、空気存在下での照射または貯蔵ではビタミンB1などの損失が起こることがある。3) 10 ~ 75kGy 照射では、脱酸素および凍結下で照射するため、食味低下も起こらず、栄養成分の破壊も少ない。4) ビタミン類については、ビタミンB群はビタミンB1やビオチンが放射線で分解されやすいが、加熱と大差がない。脂溶性ビタミンではビタミンDは放射線に安定であるが、ビタミンAやEは分解されやすい。葉酸は比較的放射線に安定である。ビタミンCは放射線で分解されやすいが、加熱に比べると著しく安定である。

照射食品は加熱調理して摂取する場合が多いが、この場合にも照射と加熱による栄養成分の分解促進効果は認められていない。

7. 7 微生物などへの影響

1) 放射線耐性菌の安全性

食品の放射線処理は高線量での完全殺菌処理を除いて、残存微生物への影響についても調べておく必要がある。ことに、懸念されるのは、1kGy 以上の殺菌処理で残存する有害な微生物が優先的に増殖して悪影響を及ぼすかどうかについてである。鶏肉を放射線照射して 10 °Cで貯蔵すると、図7-4に示すように、非照射品では腐敗性グラム陰性細菌群や乳酸菌群、大腸菌群、酵母菌群など様々な微生物が増殖していく²⁴⁾。しかし図7-5に示すごとく、1kGy 照射で大腸菌群は増殖しなくなるが、他の腐敗性微生物群は増殖していく。また、3kGy 照射すると腐敗性グラム陰性細菌群や腐敗性酵母菌群は増殖していくが、乳酸菌群は増殖しなくなり病原性細菌も検出できなかった。同じような結果はウインナーソーセージやカマボコなどでも得られており、照射

後に生残して増殖してくる微生物は普通の腐敗菌であり、照射により増殖が遅延されるだけである。

高線量照射で生残する放射線抵抗性細菌として、デイノコッカス属やシュウドモナス・ラジオラ（メチロバクテリウム・ラジオトレランス）が知られている^{25, 26)}。これらの細菌は発見当時は突然変異で発生したと思われていたが、現在では自然界に広く分布していることが明らかになっており、食品貯蔵中にも増殖することはほとんどなく、病原性もないことにより問題にする必要がないことが判明している。真菌類にも黒酵母菌などの放射線抵抗性菌が存在するが腐敗や病原性がないことが明らかになっている。

2) 放射線の微生物毒素産生への影響

アフラトキシンなどのカビ毒を産生するカビなどが照射により毒素産生能が増大するかどうかの研究も行われており、図7-6に示すように照射後の生残菌の方がカビ毒産生量が低減する傾向を示している。また、突然変異で産生能が増大する菌も若干検出されることがあるが、数代後には元にもどるため生態系への影響は考えられない¹⁵⁾。

ボツリヌス菌や病原大腸菌 O157 についても照射の影響が調べられているが、毒素産生促進効果は認められていない。

低線量照射するとカビ毒産生が若干促進されることがあるが、同じような現象は紫外線などの他の処理法でも見られ、単なる刺激効果であり、次世代への影響は見られない¹⁵⁾。

3) 放射線による突然変異

大腸菌について、ガンマ線と紫外線での突然変異による乳糖発酵能欠損変異誘発について検討したが、両者とも突然変異誘発率は大差がなく、高線量照射でも 0.6%以下であった。放射線や紫外線で起こる突然変異は遺伝子の欠損によるものが多く、発生率も少なく元の親の性質に復帰しやすい²⁷⁾。また、多くの突然変異菌は生存競争力が弱いため、正常な微生物に比べ生き残りにくい。同じことはウイルスについても検討されているが、ウイルスの型が変異することは考えられない。昆虫や植物に放射線が照射された場合には生存競争力が弱い劣性変異が多く、変異により巨大生物が発生することはないことである。

7. 8 世界保健機関の結論

1980 年の照射食品の健全性に関する F A O ・ I A E A ・ W H O 合同専門家委員会の結論、1992 年の W H O の 10kGy 以下の照射食品の再評価による安全性の確認、および 1997 年の 10kGy の上限線量撤廃宣言に見られるように、W H O は食品照射の推進に熱心に取り組んできている。

W H O の見解によると、食品照射は食品の疾病などからの安全確保と食料資源確保の上で重要であり、人類の栄養確保および健康管理に重要な役割をはたすと期待している。

W H O は過去 60 年以上にわたる世界各国での研究成果を総括して以下のような結論を出している⁶⁾。すなわち、適正な製造条件で加工処理された照射食品は、

(A) 照射処理は動物試験などの健全性評価の結果から、人間の健康に有害な影響を及ぼすこと

はなく、食品成分への大きな影響も認められない。

(B) 食品の放射線処理は、消費者への突然変異による微生物学的危険性の増大をもたらしたり、照射後に生残する微生物による危険性はない。

(C) 食品の放射線処理は、ほとんど全ての食品を放射線処理したとしても個人および集団の栄養状態を悪化させるほどの影響はない。

7. 9 反対運動の論点への回答

わが国での食品照射反対運動は照射馬鈴薯実用化直後から活発になった。反対運動は原子力特定総合研究の動物試験で得られた動物の個体差または誤差程度の結果を拡大解釈したり、特定の食品の過剰摂取によって起こった異常を照射のせいにする、などを主要な論点にしている。

一般に、生物の実験ではデータにバラツキが生じるのはやむおえないことであり、微生物のように大量の細胞数を扱える実験でもちょっとした実験条件の変動でデータにバラツキが生じる。まして、動物試験では個体差ばかりでなく飼育環境の影響も受けやすい。さらに、照射食品の動物試験の場合には照射食品を混合した給餌飼料そのものが無菌でないため、無菌環境下での飼育が困難である。また、丸ごとの食品を餌に添加するため、動物に栄養バランスの乱れが生じやすい。このため、動物試験では、①問題となる現象に用量関係（食品照射では線量との相関性）が認められるか、②飼育期間を通じて一定の傾向が認められるか、③世代試験を通じて各世代に一定の傾向が認められるか、④他の要因があるために見かけ上の異常が認められるか、という4点について考察する必要があると動物試験の専門家達は指摘している²⁸⁾。

これら動物試験の問題点および放射線化学反応の知見から、反対運動の主要な論点について以下のように回答することができる。

1) 照射馬鈴薯の飼育試験で雌ラットの体重増が減少した。

ラットの体重増が減少したというデータは表7-6に示すものである。この表はラットを53週飼育したときの各群の個々の生存動物13～14匹を飼育開始時にさかのぼって表にしたものである。この表で見ても、全体での体重増加率と線量との相関性は認められず、薬剤の場合のような用量との相関性は認められない。また、個々の動物の個体差が大きいため、少ない数での結果は信頼性が低いことを示している例である。一方、飼育開始時30匹での全体の動物数での体重増は、図7-7に示すように60週前後までは各群とも体重増に大差が認められないが、70週以後で差が生じ、非照射より0.15kGy照射の方が体重増が良好であり、続いて0.6kGy、0.3kGyとなり線量との相関性がない。しかも、ラットの70週以後は老齢期に入っている、生残動物数も少ないので個体差の影響が出やすくなる。ラットの雄の場合も、表7-6に示すように照射による影響があると誤解されるような結果が得られているが、飼育開始時30匹での体重増曲線では70週以後でも照射と非照射群での差は認められていない。各国の照射食品を用いた長期飼育試験での体重増への影響は図7-7と同じ方法で行っており、表7-6は参考データとして扱うべきである。なお、薬剤の場合には用量が多いと体重増の減少が明確に認められ血液検査や病理学的検

査でも異常が認められるのに対し、照射馬鈴薯では線量との相関性が認められず、血液検査や病理学的検査でも異常が認められないため照射による影響とは考えられないというのが実際に試験を実施した研究者達の見解である。一方、マウスでも同様な試験が並行して行われたが、体重減などの異常は認められていない。フランスで行われた照射馬鈴薯のマウスの飼育試験でも、飼育開始時・各群、雌雄各 75 匹での試験結果でもデータのバラツキはあるものの、照射による体重増の減少は認められていない。

2) 照射馬鈴薯の飼育試験でラットの卵巣重量が減少した。

ラットの卵巣重量（5 匹の平均値）と体重比（体重 100 g 当たりの重量）を図 7-8 に示す。この試験では、0.6kGy 照射群の 6 ヶ月のみが対照群および非照射群と比較して統計学的に有意に減少したが、これ以外の期間では有意の差はみられず、飼育期間を通じて一定の傾向は観察されていない。卵巣重量の測定には個体差や個人差による測定誤差も考えられ、有意に減少した卵巣についての組織学的観察を行っても異常は認められていない。薬剤の場合、卵巣重量が減少すると組織学的観察でも萎縮などの異常が認められることから、本結果は照射による影響ではないと判定できる。

3) 照射タマネギで飼育したマウスで骨の異常が認められた。

照射タマネギを 2%または 4%添加した飼料を与えたマウス胎児や新生児の剝肋（骨の変異）を観察すると、表 7-7 に示すように、第一世代（F 1）、第二世代（F 2）、第三世代（F 3）でそれぞれ異なる傾向が観察されている。反対運動が問題にしている、照射タマネギ 2%添加第 2 世代の胎児について取り上げると、剝肋出現率は対象群（タマネギを加えない標準飼料）が 20%であるのに対し、非照射タマネギ添加で 19%、0.15kGy 照射タマネギ添加 41%となり、0.15kGy で奇形出現率が高いように見える。しかし、第一世代では逆の傾向が観察され非照射群の方が照射群より奇形発生率が若干高く、第三世代では対象群での奇形が著しいという結果が得られている。一方、4%添加タマネギでの試験結果では対象、非照射タマネギ、照射タマネギ群で剝肋の発生率に大きな差は認められていない。剝肋は胎児で発生率が高く、成長に伴い消滅するし、剝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。しかし、このような部分的なデータのみを取り上げて反対の根拠にするのが反対運動の常套手段である。

4) インドの国立栄養研究所で栄養失調児に照射小麦を与えたところ血中の倍数性細胞（ポリプロイド；染色体異常の一種）の出現率が高かった。

インド国立栄養研究所で実施された照射小麦を栄養失調児に与えた研究は反対運動によって利用されてきている。0.75kGy 照射した小麦を栄養失調児に 4 ~ 6 週間与えたところ、非照射小麦や照射してから 12 週間貯蔵した小麦を与えた栄養失調児と比べ、表 7-8 に示すように、血液中の倍数性細胞の出現率が高かったというものである。インド政府の専門家委員会は国立栄養研

究所に残されていた標本を観察しなおし観察値が間違っていることを指摘し、照射の影響はないと結論した²⁹⁾。また、国際機関は実験設定そのものに問題があり、栄養失調児では倍数性細胞の異常が起こりやすいと指摘している。中国においては、ボランティアの学生ら 78 人に 35 種の照射食品を食べさせてその影響を調べた。その結果、表 7-9 に示すように血中の倍数性細胞の増加は観察されなかった。インドの研究は研究者が食品照射に不信感を持って行ったものであり、科学的な根拠がない例である。

5) 食品中にはフリーラジカルやペロキサイドが生成し、発ガン性のホルムアルデヒドが生成され危険である。

フリーラジカル（活性種）は水分解ラジカルである活性酸素が殺菌作用や食品成分の酸化作用に関与しているが、水存在下では寿命が 1000 分の 1 秒以下で消滅するため残留することはあり得ない。乾燥食品を照射した場合、フリーラジカルが若干残留しているが、水存在下で 100 分の 1 秒以下で消滅してしまう。なお、放射線とは関係なく、ポテトチップなどの油で揚げた乾燥食品や焼き魚には照射直後の乾燥食品よりはるかに大量にフリーラジカルが検出されるが健康に影響はない。

ペロキサイドとは過酸化水素や食品が分解した過酸化物のことと思うが、過酸化水素は食品中では生成量が少なく（1ppm 以下）、急速に分解してしまうため、残留の可能性はない。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、食品の劣化を調べるために過酸化物値として調べられている。過酸化物は不安定で水存在下で有機酸などに分解する。放射線で食品中に生成される過酸化物は 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。

ホルムアルデヒドは澱粉などを高濃度酸素の共存下で照射すると生成するが、実際の照射では生成量が少なく検出困難である。魚の燻製や乾しシイタケでは 6 ~ 360ppm も含まれており、放射線分解生成物としての安全性を議論することは意味がない。

表 7-1 照射食品の健全性評価に関する国際機関の取り組み

年 次	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。
1970	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 年迄。
1976	FAO/IAEA/WHO 合同専門家委員会：食品照射は加熱処理と同様に物理的処理法であり、食品添加物として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に問題がないと結論。
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 専門家委員会：10kGy 以下の照射食品の健全性を再確認。
1997	WHO 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。

表 7-2 各国で行われた動物での代表的な長期毒性試験。

食品	動物	期間	線量	影響	実施国 (年)
馬鈴薯 (35%)	ラット、マウス	730 日	0.6kGy	なし	日本 (1971)
馬鈴薯 (35%)	マウス	742 日	0.1-0.12kGy	なし	フランス (1974)
香辛料 (混合 25%)	マウス 催奇形性	15 日	15kGy	なし	ハンガリー (1979)
豚肉	ラット、犬	4 年	74kGy	なし	オランダ (1983)
鶏肉	ラット、マウス、犬	730 日	59kGy	なし	アメリカ (1984)

表 7-3 各国で行われた動物を使った代表的な遺伝毒性試験。

食品	遺伝毒性試験	線量	影響	実施国 (年)
香辛料 (混合)	優性致死試験 (ラット)	15kGy	なし	ハンガリー (1986)
小麦	小核試験 (チャニース・ハムスター)	30kGy	なし	日本 (1992)
鶏肉	優性致死試験 (マウス)	59kGy	なし	アメリカ (1978)
オニオンパウダー	染色体異常試験 (チャニース・ハムスター、マウス)	13.6kGy	なし	ドイツ (1981)

表7-4 冷凍鶏肉中のビタミン含量の照射及び加熱による分解の比較

ビタミン	未処理	加熱滅菌	59kGy 照射
ビタミンB1(mg/kg)	2.31	1.53	1.57
ビタミンB2(mg/kg)	4.32	4.60	4.46
ビタミンB6(mg/kg)	7.26	7.62	5.32
ニコチニ酸(mg/kg)	212.9	213.9	197.9
パントテン酸(mg/kg)	24.0	21.8	23.5
ビオチン(mg/kg)	0.093	0.097	0.098
葉酸(mg/kg)	0.83	1.22	1.26
ビタミンA(IU/kg)	2716	2340	2270
ビタミンD(IU/kg)	375.1	342.8	354.0
ビタミンK(mg/kg)	1.29	1.01	0.81
ビタミンB12(mg/kg)	0.008	0.016	0.014

[M. H. Thomas et al.: *J. Food Sci.*, 46, 824 - 828 (1981)]

表7-5 実験動物用ペレット状飼料中のビタミン含量の変化

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

表 7-6 照射馬鈴薯を与えたラットの体重増加率

	群	5 3 週	8 1 週	1 0 5 週
雄	対 照	175.9 ± 36.7	196.6 ± 31.5	189.7 ± 39.5
	非 照 射	168.8 ± 62.2	193.9 ± 79.8	193.3 ± 68.3
	0.15kGy	142.7 ± 47.2 **	160.8 ± 45.7 **	176.2 ± 29.5
	0.3kGy	138.2 ± 20.0 *	141.1 ± 39.6 **	158.0 ± 37.2
	0.6kGy	147.8 ± 47.3	150.7 ± 29.9	140.4 ± 19.6
雌	対 照	102.3 ± 27.2	127.4 ± 31.5	137.8 ± 54.6
	非 照 射	92.9 ± 15.5	124.7 ± 50.1	130.4 ± 36.2
	0.15kGy	95.1 ± 19.3	139.8 ± 35.1 **	124.5 ± 45.4 *(*)
	0.3kGy	83.4 ± 28.6 *	92.0 ± 28.1 **	84.6 ± 33.3 *(*)
	0.6kGy	74.7 ± 27.3	93.6 ± 43.9	90.9 ± 40.1

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

* >0.05 ** >0.01 対照群に対して
 (*) >0.05 (**) >0.01 非照射群に対して

(放射線照射による馬鈴薯の発芽防止に関する研究成果報告書(付録)、1971)

表 7-7 dde系マウスの次世代試験における頸肋の出現率

時 期	群	I . 照射玉ねぎ 4 %添加			II . 照射玉ねぎ 2 %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	対 照	41.0	60.6	53.5	33.3	20.0	83.9
	OkGy	41.4	38.9	55.0	27.1	19.2	3.3
	0.15kG · y				20.4	41.2	40.6
	0.3 kG · y	49.4	46.1	49.5			
新 生 仔	対 照			79.5	30.3	15.0	61.9
	OkGy			70.9	67.3	46.7	8.6
	0.15kG · y				47.6	68.9	59.8
	0.3 kG · y			82.4			

(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)、1980)

表7-8 照射小麦を摂取した子供の染色体のポリプロイド出現率(%)

	非照射小麦	照射小麦(照射直後) ^{a)}	照射小麦(12週間貯蔵)
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)

(Am.J.Clin.Nutr., 28, 130 (1975))

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

表7-9 35種の照射食品を摂取した学生の染色体のポリプロイド出現率(%)

	人数	摂取前	摂取後	摂取前後差
照射	35	0.66±0.77	3.51±1.95	2.85±1.82
非照射	35	0.86±0.88	2.86±2.32	2.00±2.59

(食品照射、25、39 (1990))

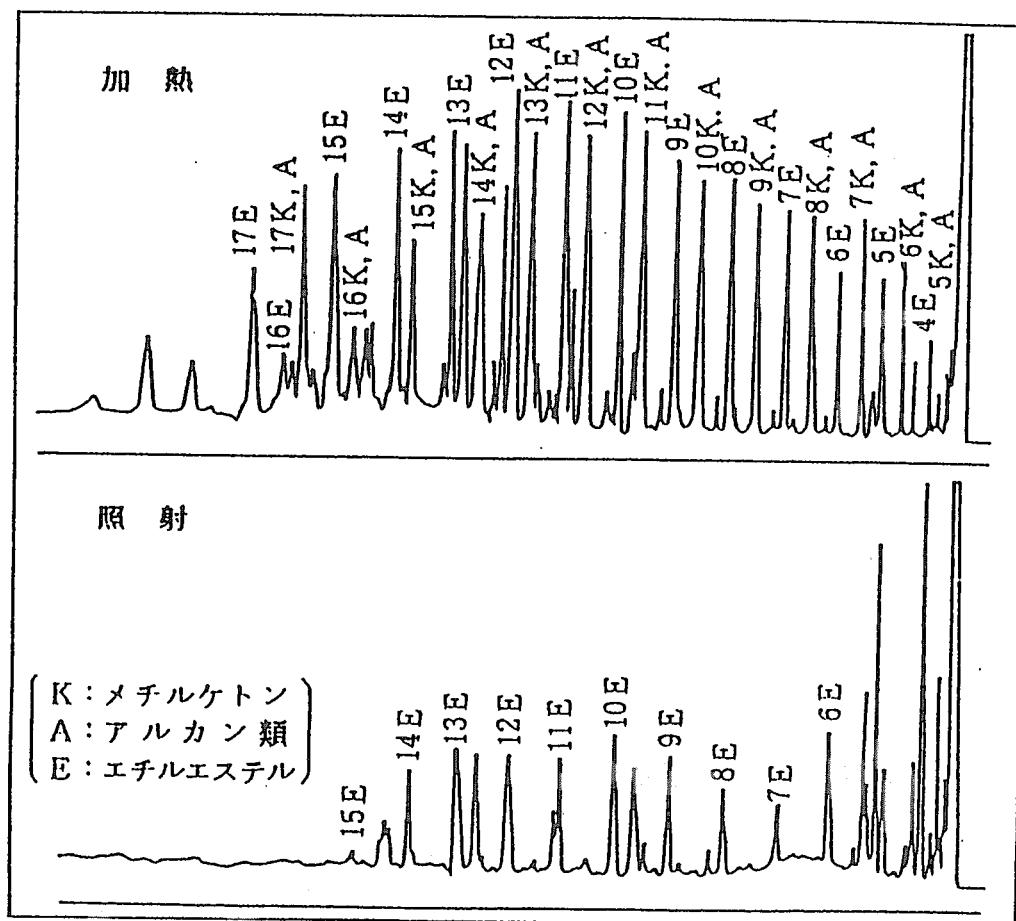


図 7-1 脂肪のモデル物質メチルステアリン酸の加熱 (180°C, 1時間)
および照射 (120kGy) による揮発性分解生成物の比較。
(数字は炭素鎖の長さを示す)

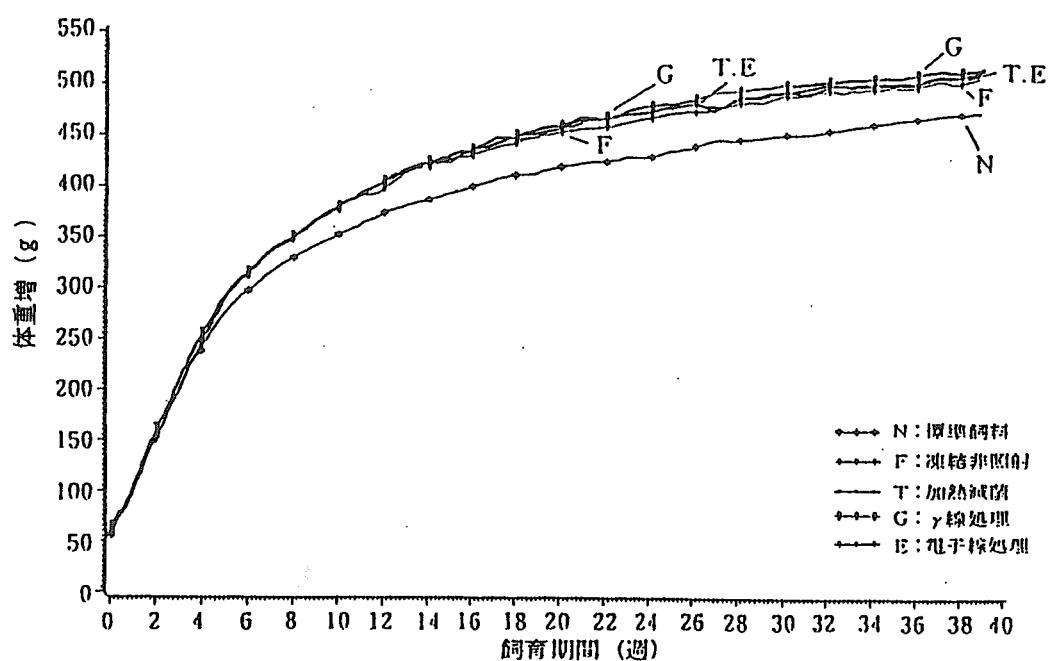


図 7-2 59kGy 照射した凍結鶏肉の雌ラットによる体重増曲線
(アメリカ・ラルテックで得られたデータ)

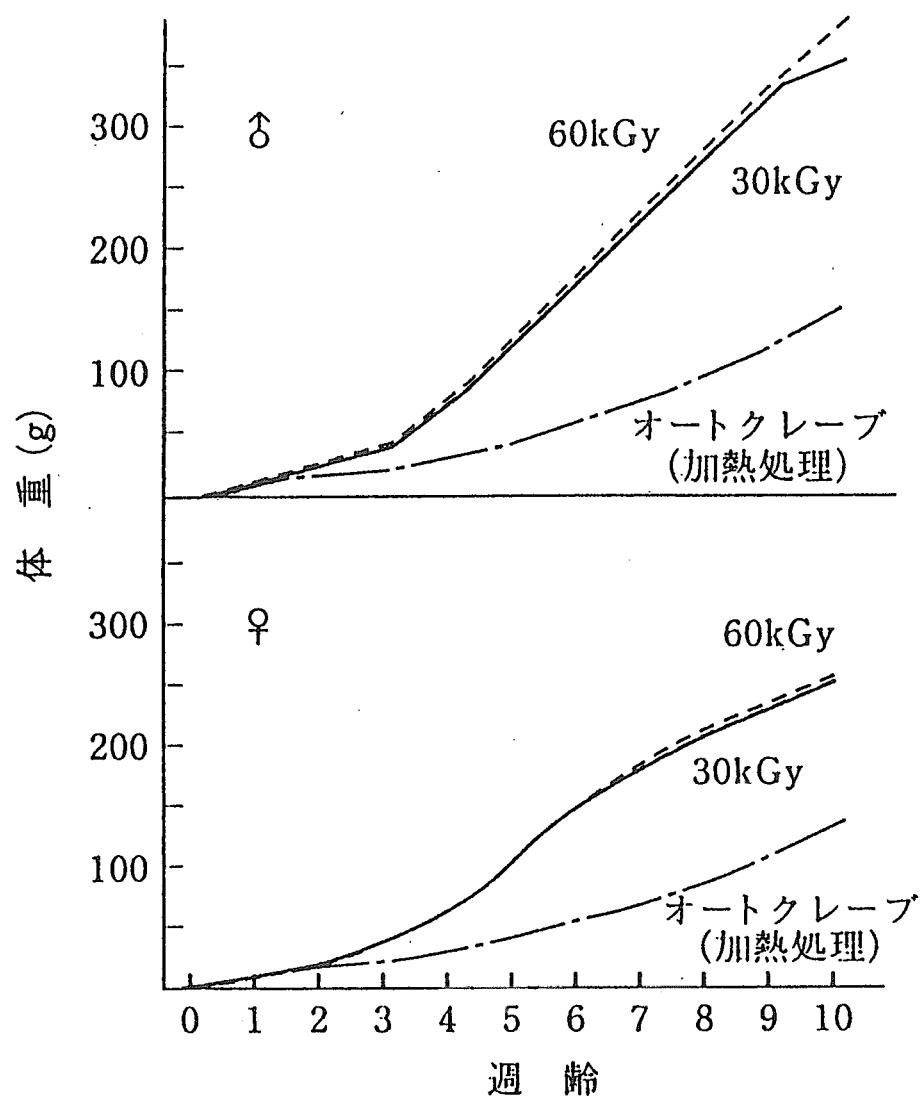


図 7-3 ラットの体重増加曲線

[岩藤誠吾：実験動物、19巻、77-81(1970)]

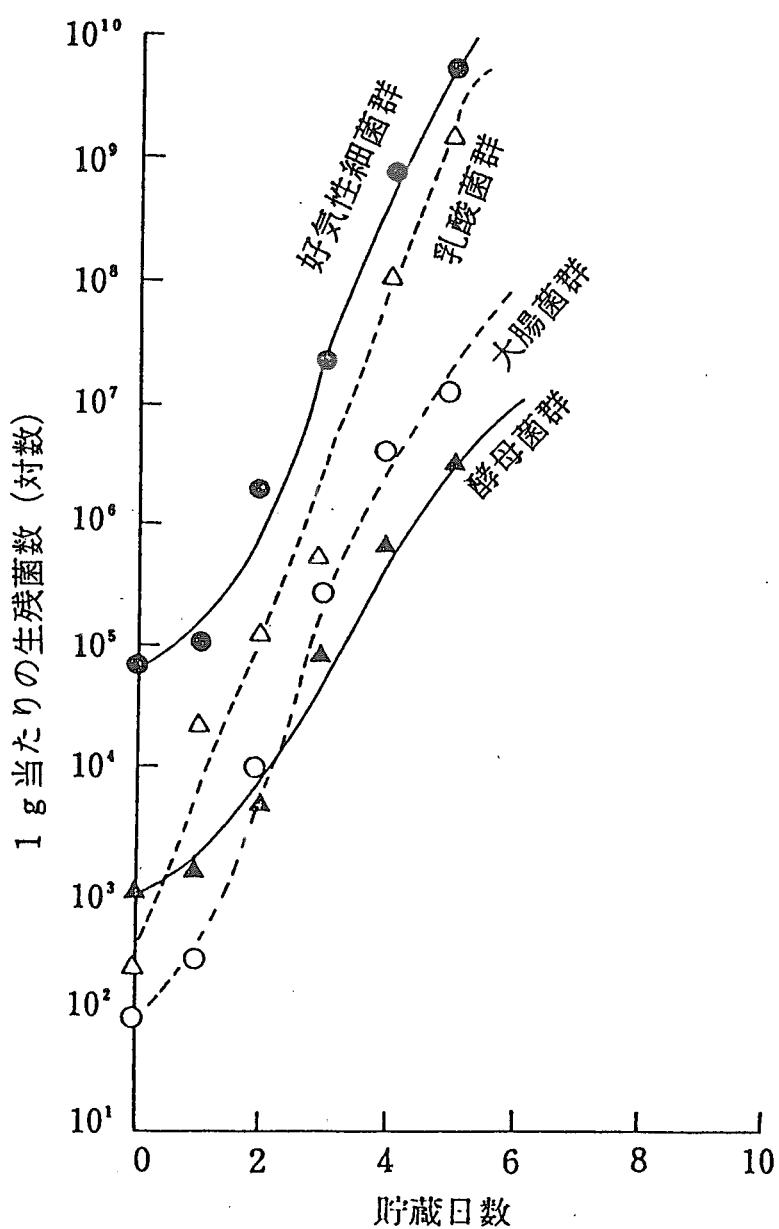


図 7-4 非照射鶏肉の10°C貯蔵での各種微生物の増殖

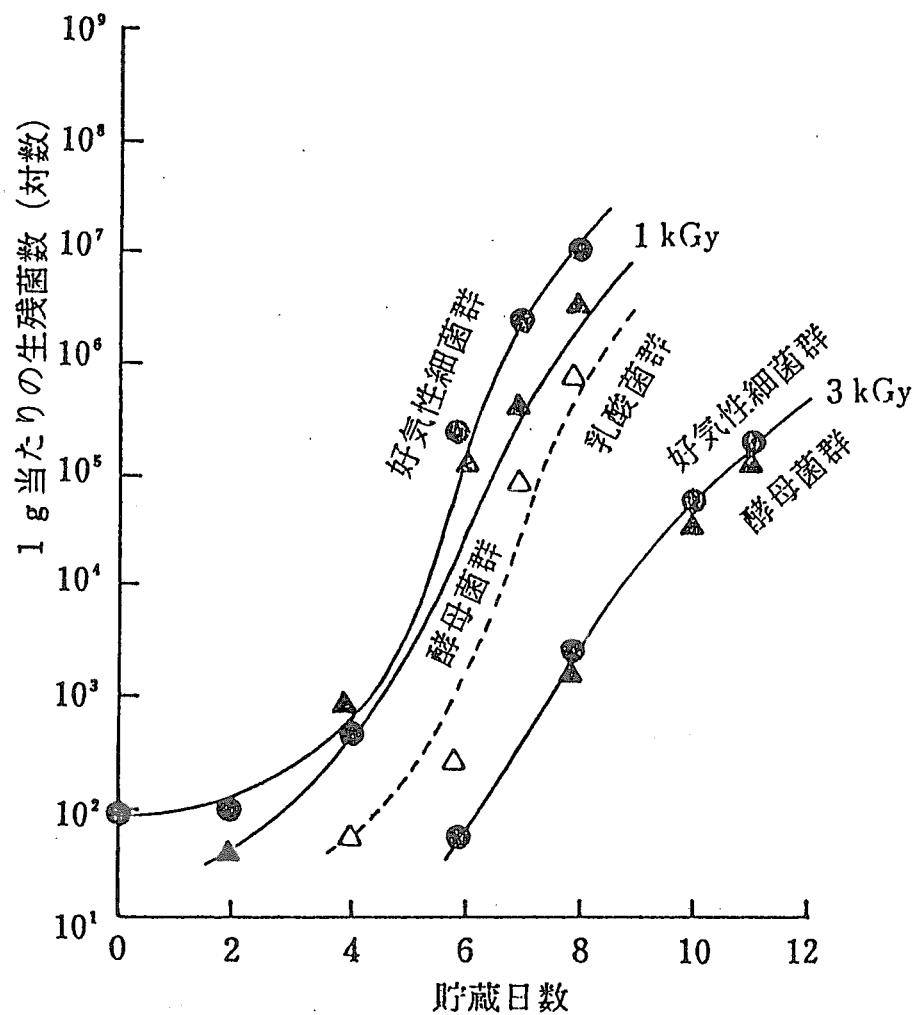


図 7-5 照射鶏肉の10°C貯蔵での各種微生物の増殖

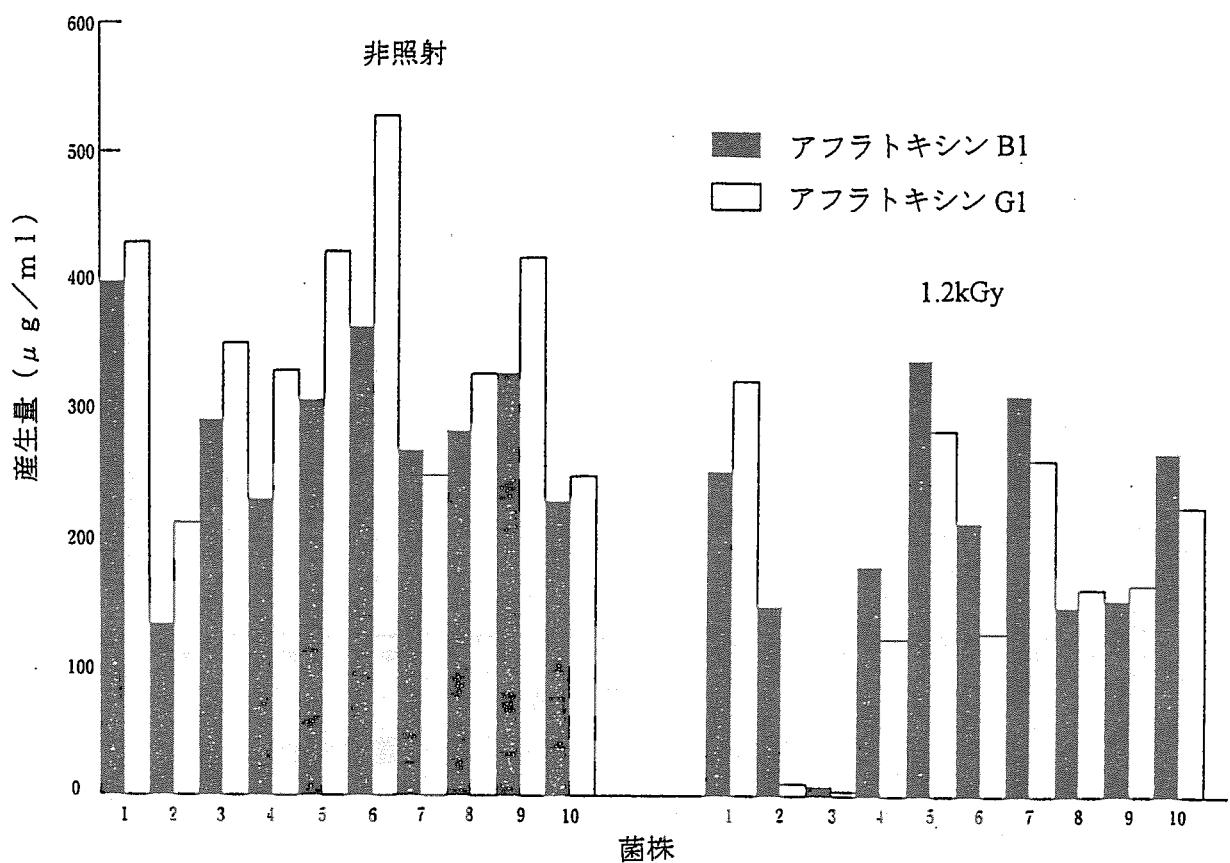
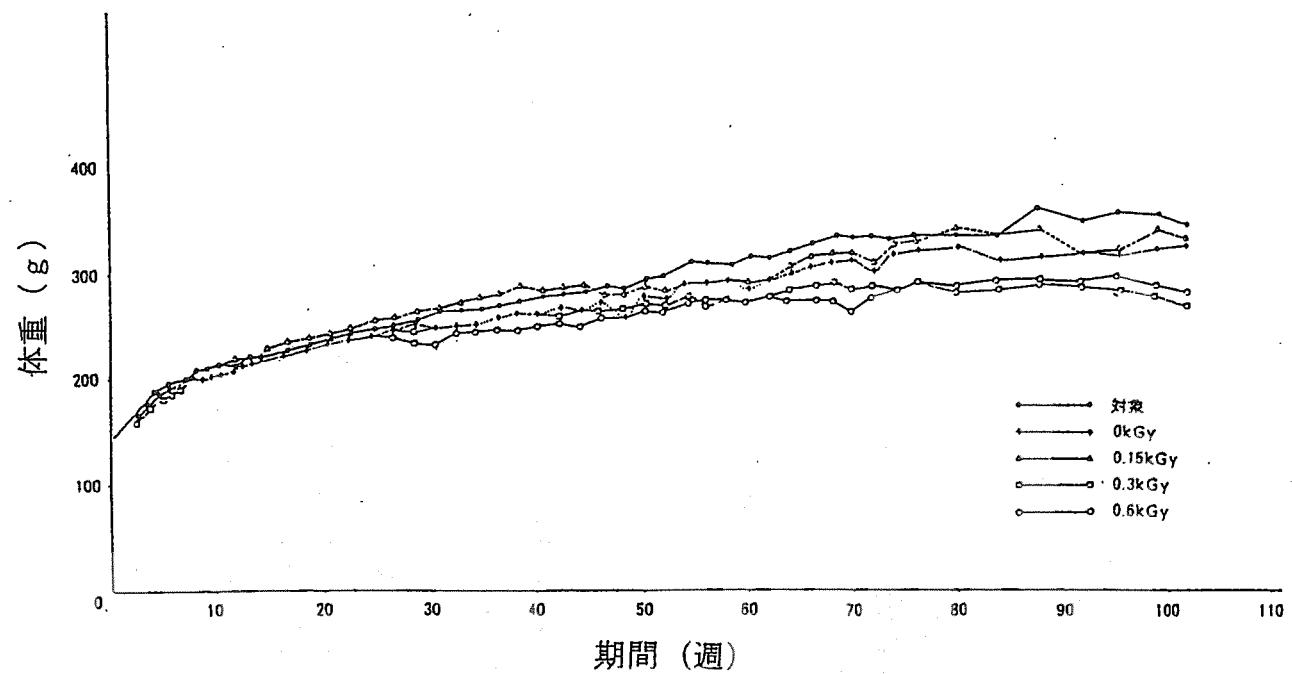
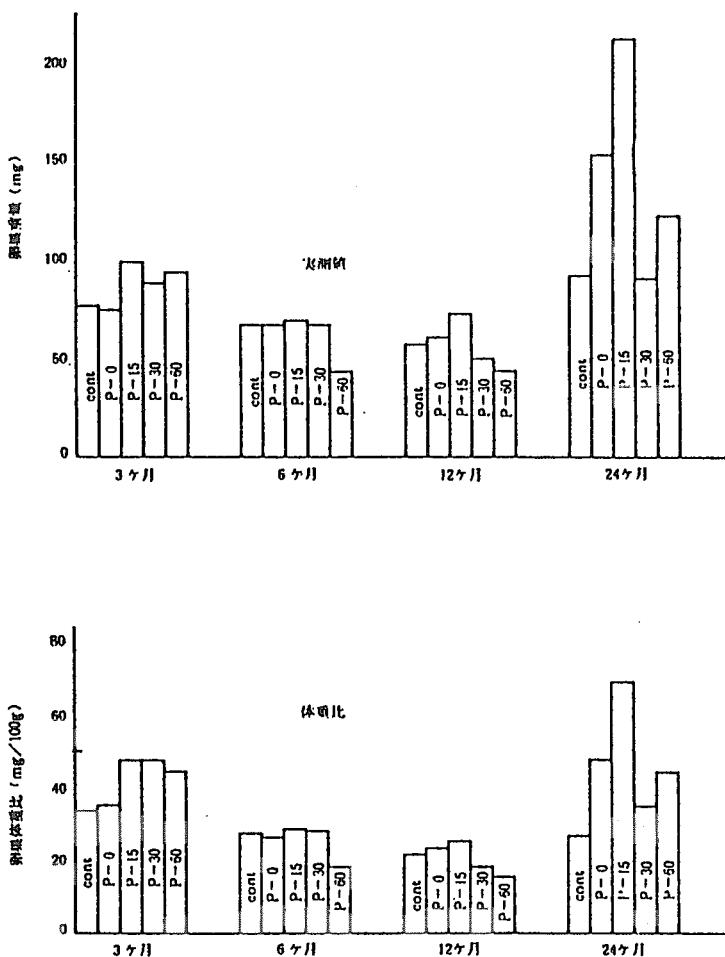


図 7-6 カビ毒産生菌アスペルギルス・パラシチカスの非照射および照射後に生残した各 10 菌株でのアフラトキシン産生量の比較 (30 °C、10 日培養)。





8. 照射食品の検知技術

8. 1 検知技術の必要性

食品照射の場合、国際的に再照射は基本的に禁止されている。すなわち、再照射の禁止は不適切な食品製造工程をごまかすための照射を防止するためであり、1kGy 以下の殺虫処理や放射線殺菌処理した原材料が一部含まれる加工製品の照射はその限りではない¹⁾。再照射を禁止する理由は、微生物毒素が放射線や加熱処理などに対し耐性であり、腐敗状態の食品の殺菌後にも毒素が残留する可能性があるためであり、再照射を防止するために検知技術（照射の有無判別法）が必要である。

また、照射食品が国際間貿易で流通しつつある現在では、輸入された食品材料が薬剤で処理されたのか、放射線で処理されたのか、または不適切な衛生管理をごまかす手段としてなんらかの処理をしているかを判別する技術は消費者の健康を守るうえで重要である。輸入食品の検査の場合も、害虫の侵入を防止する上で照射の有無を検知する技術が必要である。なぜなら、放射線殺虫処理では不妊化されていても成虫が生きていることがあるためである。

厚生労働省は新規の食品加工技術を許可する条件として検知法の存在を要求している。これは、照射食品についても同じであり、照射食品の流通を管理するためには表示とともに検知技術も必要としている。一方、消費者の中には照射の有無を判別する検知技術が消費者の選択の自由と安心のため必要との意見がある。

ところで、放射線処理の場合には薬剤処理と異なり、食品中の化学変化はほとんど起こらず、たとえわずかな変化が起こっても加熱や凍結、乾燥処理によって起こる変化と大差がない。従って、化学分析による検知技術は一部の例外を除いて困難である。望ましい検知技術としては、分析法が簡単で安価、信頼性が高いことが必要である。また、迅速に分析でき、必要な試料の量が少なくてすみ、適用できる線量範囲が広いことが望ましい。さらに、検知と同時に吸収線量が推定できることが望ましい。このため、現実的な検知法としては数種類の検知技術の組み合わせが必要であろう。さらに、照射済み製品の標示の義務化、簡易線量計の添付を義務づけることにより検知が簡便化できるであろう。

照射食品の検知技術の開発は 1970 年（昭和 45 年）以前にも行われたが、成分変化を中心に研究したため、信頼できる方法が開発できなかった。1980 年（昭和 55 年）代に入ると世界的に食品照射実用化の機運が高まり、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、物理学的方法、化学的方法、生物学的方法で多くの有望な技術が開発されるようになった²⁾（表 8-1）。

8. 2 物理学的方法

食品中の物理学的性質は放射線照射によって変化することがある。

例えば、照射された食品中には活性種が生成するが、多くの食品成分は水と共に存しているため、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砂や骨片中に生成した活性種は安

定であり、これを ESR (電子スピン共鳴) 装置で測定することができる。ESR法とは磁気共鳴マイクロ波分光法で活性種を検出するもので 1 ~ 25kGy 照射された鶏肉の骨片や香辛料で数週間から数ヶ月検知可能である。

熱ルミネッセンス法は、食品中に混在する砂などの結晶が照射によって変化し、これに温度が加えられると発光する現象を利用したものである。すなわち、放射線照射により生成した電子の一部が、砂などの結晶中の格子欠陥に捕獲され蓄積されるが、これに熱が加わると蓄積されたエネルギーが光として放出され、結晶は安定状態に戻る。この時の発光量は吸収線量に比例する。1985 年ころより、照射香辛料の検知法として熱ルミネッセンス法が有望なことが報告されるようになった³⁾。香辛料の熱ルミネッセンス検知法としては、香辛料を前処理なしにそのまま測定する方法（直接測定法）、無機質を抽出する方法（抽出測定法）、2 次照射前後の発光量の比を標準とする方法（標準化法）が報告されている。この中で、直接法は短期的には検知可能であるが、3 ヶ月以上の貯蔵では検知は困難であるとされている。しかし、直接法も分析条件の工夫によっては長期の検知も可能と思われる。抽出法は 3 ヶ月から 1 年貯蔵でも検知可能であるが、完全な検知はできない。一方、標準化法の場合には 1kGy 照射で 90%、5kGy 以上では 100% 検知可能と報告されている。熱ルミネッセンス法は乾燥野菜や乾燥果実にも適用可能である。

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減する。この変化を回転粘度計で測定することができる。香辛料の 10% 水懸濁液を pH12.5 に調整してから 100 °C・30 分沸騰してから粘度を測定すると非照射と比べ照射試料の粘度が著しく低下する。コショウなど澱粉含量が多いものでは長期間にわたり安定して検知が可能である⁴⁾。しかし、香辛料でも種類によっては粘度が上昇するものもあり、全てに適用できるわけではない。なお、粘度測定法は低線量照射食品には適用しにくい。

電気インピーダンス（交流電気抵抗）の測定による検知は照射馬鈴薯の検知技術として有望視されている。

8. 3 化学的方法

照射による分解生成物の分析から検知する方法としては、脂質から生成される揮発性炭化水素（ヘキサデカンおよびヘプタデカジエン）やシクロブタノンの分析がある⁵⁾。これらの化合物は放射線分解での生成量が多く、加熱など他の処理法と区別できる。これらの検知方法は肉類、チーズ、魚貝類に適用でき有望である。

フェニールアラニンは照射により o-チロシン、m-チロシン、p-チロシンを生成する。o-チロシンは照射で多量に生成されやすいため o-チロシンによる分析法が有望とされていたが、最近では o-チロシンが非照射食品にも検出されており、有望視されなくなった⁶⁾。

放射線による水素または一酸化炭素の生成量から検知する技術は冷凍食品などの検知に有望である⁷⁾。

8. 4 生物学的方法

生鮮果実の種子は照射により発芽率が低下する。この原理を利用するとグレープフルーツやレモンなど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り、ジベレリン添加などにより発芽促進処理をすれば短期間での検知が可能になると思われる⁸⁾。

照射馬鈴薯の芽を組織培養して形態的変化を検出する方法とかタマネギの発根試験も有望であろう。

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、肉類や魚貝類、香辛料などでは他の検知法との併用で吸収線量の推定も可能であろう。

免疫化学的手法と電気泳動との組み合わせにより加工食品中の照射卵白を検知する技術も有望と思われる。これは、タンパク質の分子量分布は照射により変化するが免疫化学的性質は変化しないことを利用した方法である⁹⁾。

最近開発された技術としては、細胞内のDNAの照射による低分子化断片を電気泳動にかけて顕微鏡で観察するコメット分析法がある。この方法は図8-1に示すように、照射細胞のDNAが彗星のように尾を引くことを観察することにより検知する技術である¹⁰⁾。コメット分析法は凍結した肉類や穀類、生鮮果実に適用可能である。また、DNAの抽出量を比較することによる検知法も有望であろう。

表 8-1 照射食品の代表的な検知法の分類

分析の対象	食品の品目	技術
骨、殻、無機物を含む食品	香辛料、乾燥野菜、食鳥肉、貝、エビ	E S R
無機物、殻、石灰質化した外皮を含む食品	香辛料、乾燥野菜、貝	熱ルミネッセンス、化学ルミネッセンス
脂質を含む食品	食鳥肉、肉、魚、卵、チーズ、ナッツ、大豆粉	揮発性炭化水素 シクロブタノン 脂質過酸化物
D N A を含む食品	食鳥肉、肉、青果物	細胞の電気泳動
種子を含む食品	グレープフルーツ、オレンジ、レモン	胚の発芽力



非照射



照射 (1kGy)

図 8-1 照射鶏肉細胞内DNAの電気泳動(コメット分析)。

9. 食品の放射線処理技術と経済性

9. 1 吸収線量分布

食品の照射効果は吸収線量に依存するので、食品梱包物の各部位でほぼ均一の線量が照射される必要がある。放射線の透過力が優れているとしても、10～100cm 厚の梱包物を均一の線量分布で照射するのは困難である。ガンマ線やエックス線の場合、透過力が優れているため厚い梱包物でも照射できるが、電子線は比較的透過力が弱いため梱包物の厚さを薄くして照射する必要がある。

ガンマ線の場合、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梱包物を反転して再照射する必要がある（図9-1）。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。

ガンマ線の場合、照射対象物を線源から距離をはなして照射すると厚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。一方、照射対象物を多方面から照射するように工夫することにより線量均一度を良くすることが可能である。実用の照射装置ではコンベアを用いて、図9-2に示すように梱包物を反転して両面照射する場合が多い¹⁾。

電子線は透過力が弱い分、梱包物表面で吸収線量が高くなり、図9-3に示すように透過力はエネルギーに比例する。電子線の反転照射による線量均一度は図9-4に示すようになり、ガンマ線より均一照射が困難である。電子線のエネルギーが千万電子ボルト（10MeV）では比重1の場合に約10～20cm 厚の梱包物を反転照射することによりほぼ均一に照射でき、5百万電子ボルト（5MeV）では約5cm 厚の照射が可能である²⁾。しかし、百万電子ボルト（1MeV）以下の電子線では梱包状態での食品の照射は困難であり、50万電子ボルト（500keV）以下では食品表面しか照射できない。

9. 2 ガンマ線照射施設

ガンマ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コバルト-60 で半減期 5.3 年である。セシウム-137（半減期 27 年）もガンマ線源として商業用に利用することが可能であるが広く使用されていない。

コバルト-60 は金属状の天然コバルト-59 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ている。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。

大規模なガンマ線照射装置は図9-5に示すように、コバルト-60 照射線源が水中に格納できるように工夫されている。ガンマ線は水深 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。ガンマ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照射される。ガンマ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出ることがないため、作業員への放射線被曝の心配はない。また、照射室内で作業中に線源が誤って操作でき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設計されている。

商業的な照射装置は図9-6に示すような梱包物をホークリフトでパレットに入れる方が多く、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1kg当たり約50円と見積もられるが、国によってはもっと安くなる可能性がある。また、北海道士幌町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。

9. 3 電子線照射施設

電子線は電子が電界により高エネルギーを与えられた放射線であり、テレビのブラウン管と同じ原理で発生される(図9-7)。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、金属筒(通常チタン筒)を通して外部に取り出されている。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される。

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5百万電子ボルト(5MeV)以下であり、梱包状より粒状または粉末など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、千万電子ボルト(10MeV)などの高エネルギーの加速が容易にできる。

電子線は照射方法によっては比較的安価に食品を照射できる。電子加速器は電源を切るだけで放射線の発生を停止でき周辺住民の理解が得られやすく、短時間に大量処理できるという利点があるが、ガンマ線に比べ透過力が弱いのが欠点である。

商業的な電子線照射装置は図9-8に示すように梱包した冷凍鶏肉や牛肉などを連続照射する装置や図9-9に示すような穀類を無包装の状態で連続照射する装置があり、照射室の遮蔽・安全管理はガンマ線照射装置と同じである。また、15万電子ボルト(150keV)以下の低エネルギーの電子線(ソフトエレクトロン)を照射する装置も開発されている。

電子線を重金属のタンクスチール板またはタングステン板に照射すると制動放射エックス線が発生する(図9-10)。制動放射エックス線はガンマ線より透過力が良好であるが転換効率が5百万電子ボルト(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%のエネルギーが利用できると報告されている³⁾。

香辛料を例に取れば、電子線のエネルギー1千万電子ボルト(10MeV)、10kGy照射では20cm厚の袋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。制動放射エックス線の場合、1時間当たり約4～5トン処理できる。この場合、照射コストはガンマ線より高くなると思われる。

9. 4 照射工程の管理と経済性

放射線処理が可能な食品類は食品衛生法で認められた品目に限られている。(注：海外で許可されていても日本で許可しているとは限らない)。また、食品衛生法で認められていない食品を放射線処理したい場合には、新たに厚生労働省に許可申請する必要がある。一方、食品を照射する施設を営業するためには放射線照射の利用や施設の規制を担当する文部科学省や厚生労働省の許可を得る必要がある。照射施設は作業者の安全を確保できるように設計され、照射工程の管理、照射線量が自動的に記録できるような装置を設置しておく必要がある。照射施設の管理者は放射線の取り扱いに熟知していなければならず、第1種放射線取扱主任者の免許が必要である。

食品を商業的に照射するためには照射時の吸収線量を定期的に測定し、過剰照射や照射不足が起こらないようにする必要がある。商業照射に用いる CTA (三酢酸セルロース) フィルム線量計やポリメチルメタアクリレート (PMMA)、色素線量計などの業務用線量計は湿度の影響とか線量率、比重の影響などの諸特性を十分に検討しておき、フリッケ鉄線量計やアラニン線量計(アラニンに生成する活性種の量を測定)などの標準線量計で定期的に校正しておく必要がある。また、照射施設は食品以外の異物が照射食品に混入したり、微生物や害虫汚染が起こらないように衛生管理を厳重にする必要がある。食品梱包物にはカラーラベルを添付して照射の有無が肉眼で判別できるようにし、作業ミスによる再照射を防ぐ工夫が必要であり、照射物には照射済みの表示をする必要がある。これらの工程管理はコーデックスの「照射食品に関する一般規格」を参考にするべきであり、医療用具の滅菌と同じ工程管理は必ずしも適用できないであろう。なぜなら、食品照射に用いる必要線量の多くは医療用具の滅菌線量に比べはるかに少なく、上限・下限の線量管理も厳密に行う必要があるためである。また、食品の放射線処理は衛生的条件下で製造された製品のみを対象とするべきであり、不適切な衛生管理をごまかす手段としての照射は禁止されている⁴⁾。なお、原材料の場合、1kGy 以下の殺虫を目的とした放射線処理以外の再照射は禁止されている。

大型の照射施設の設置は食品の集荷地または港に設置するとか、食品の処理工程の一部に組み込むように設置することにより、人件費とか輸送費を節約でき、少ない処理コストでの照射が可能になる。また、処理量が多いほど照射コストが低減できる。現在は大型の照射施設は 5 億～10 億円もするため、大規模な照射処理でないと経済的に採算があわない可能性があるが、小型の高エネルギー電子加速器が開発されれば、小規模な食品工場でも照射装置の設置が可能になるであろう。

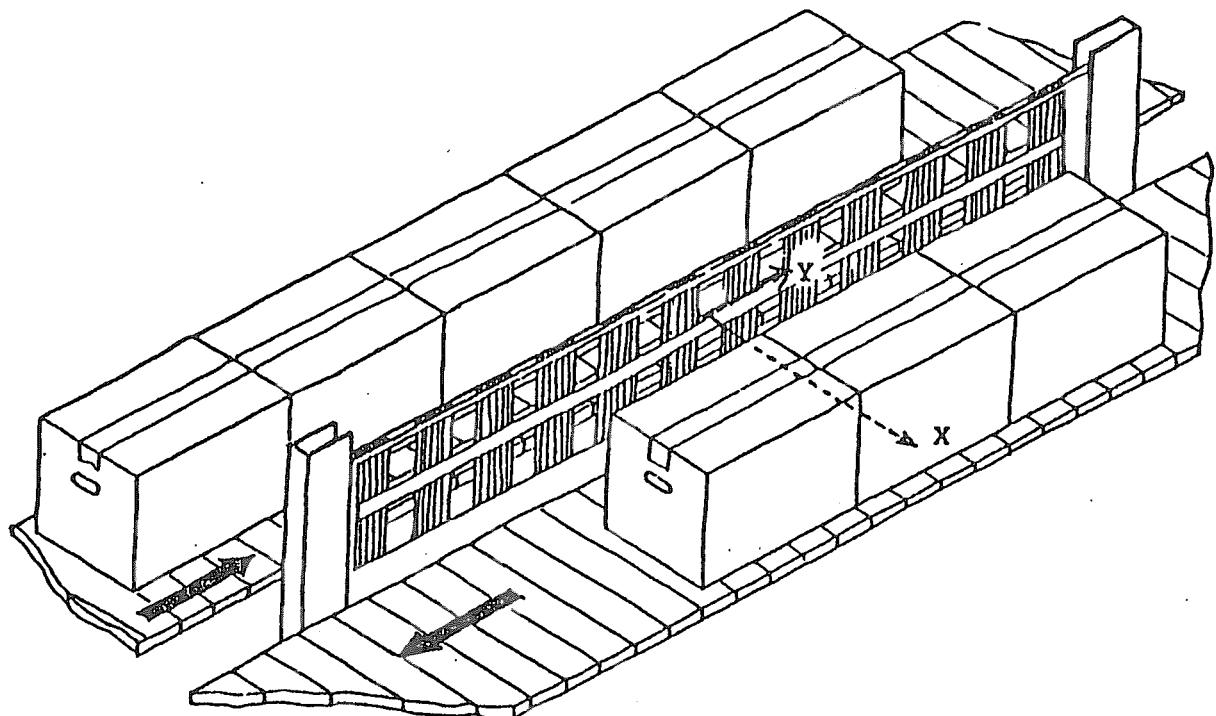


図9-1 板状コバルト-60線源によるコンベア照射装置。Y軸は線源、X軸は線源からの距離（コンテナに食品を梱包して照射する）

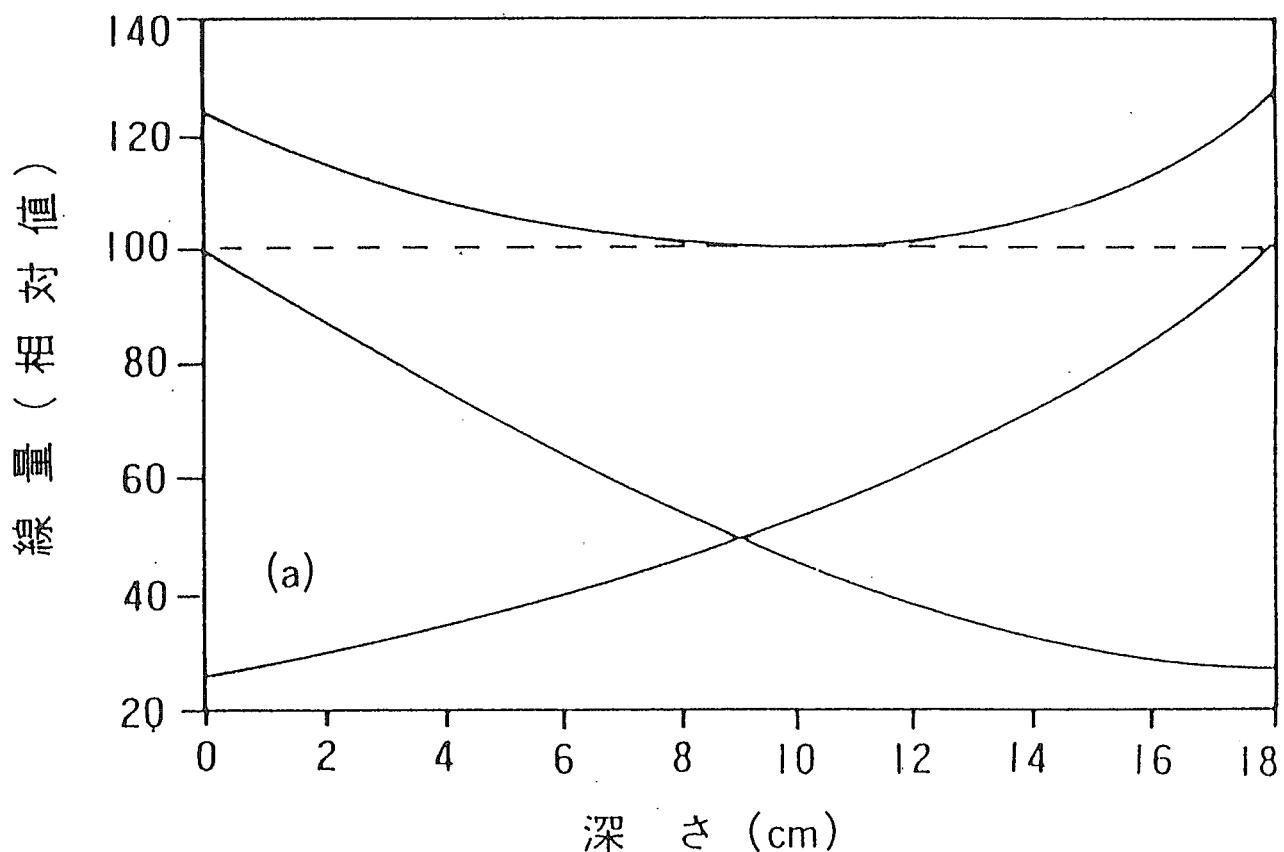


図9-2 コバルト-60 ガンマ線で反転照射した場合の線量分布
(比重1の場合)。

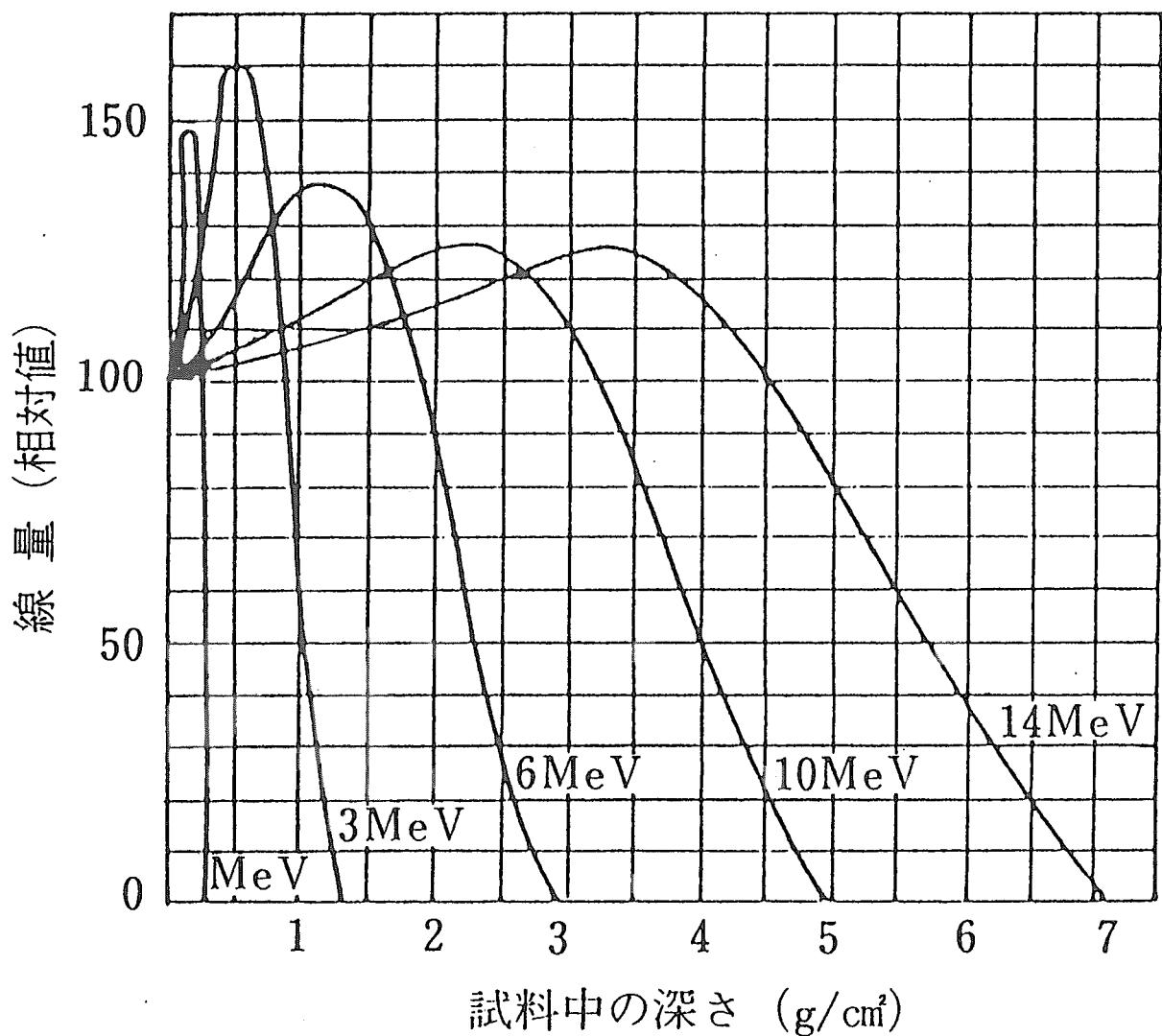


図 9-3 電子線のエネルギーと深部線量との関係

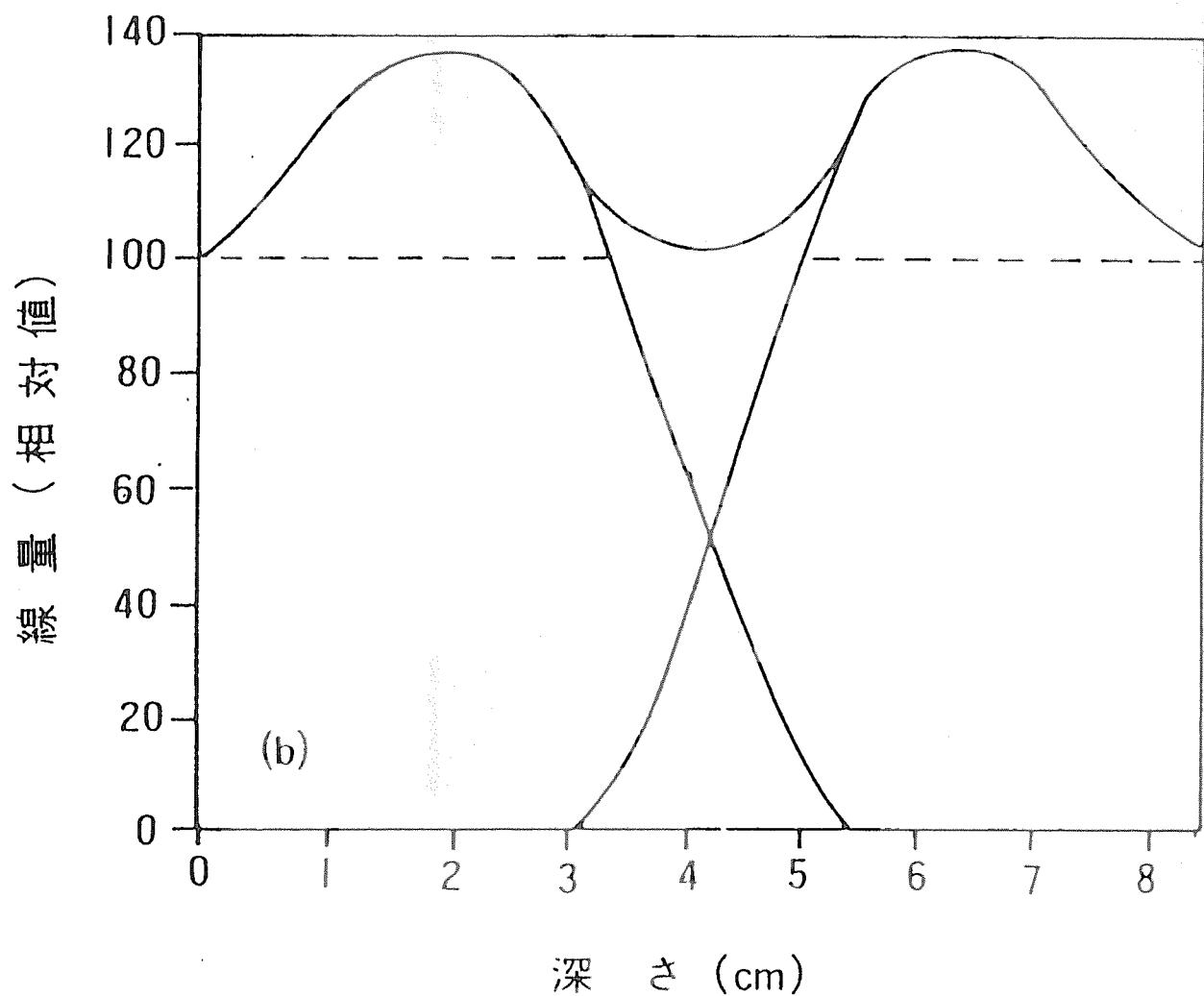


図9-4 千万電子ボルトの電子線で反転照射した場合の線量分布
(比重1の場合)。

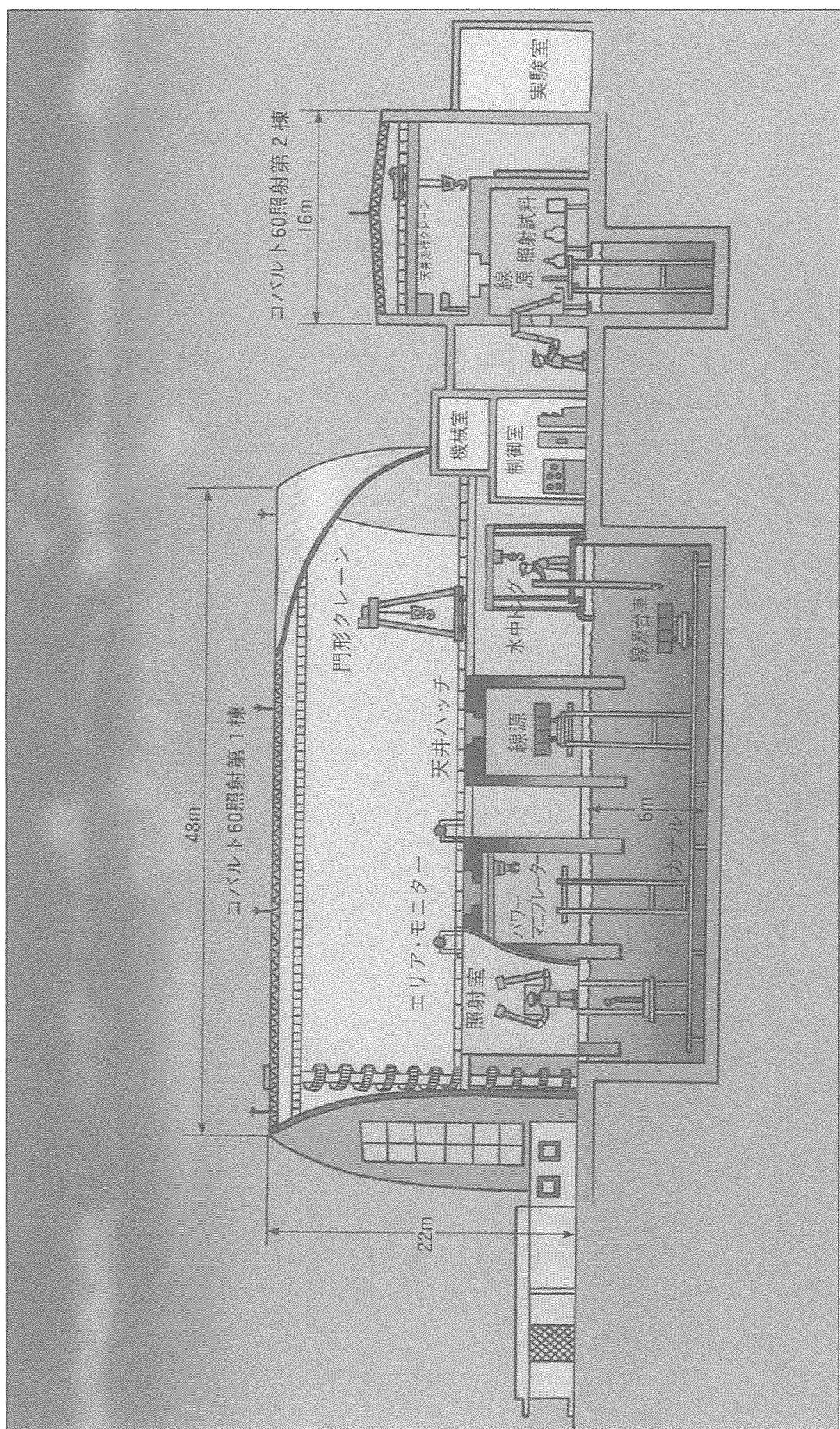


図 9-5 日本原子力研究所高崎研究所のコバルト-60 ガンマ線
照射施設の断面図。

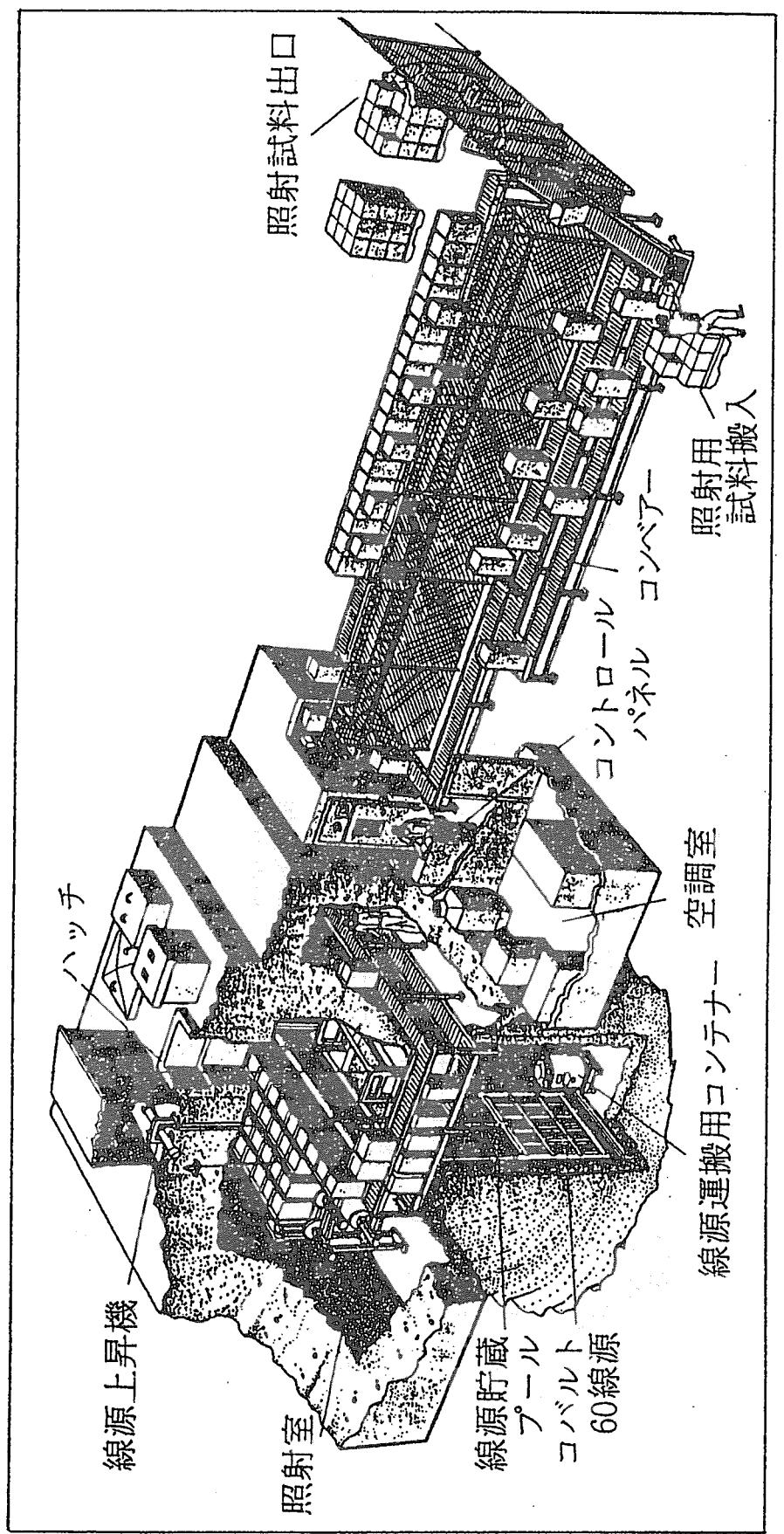
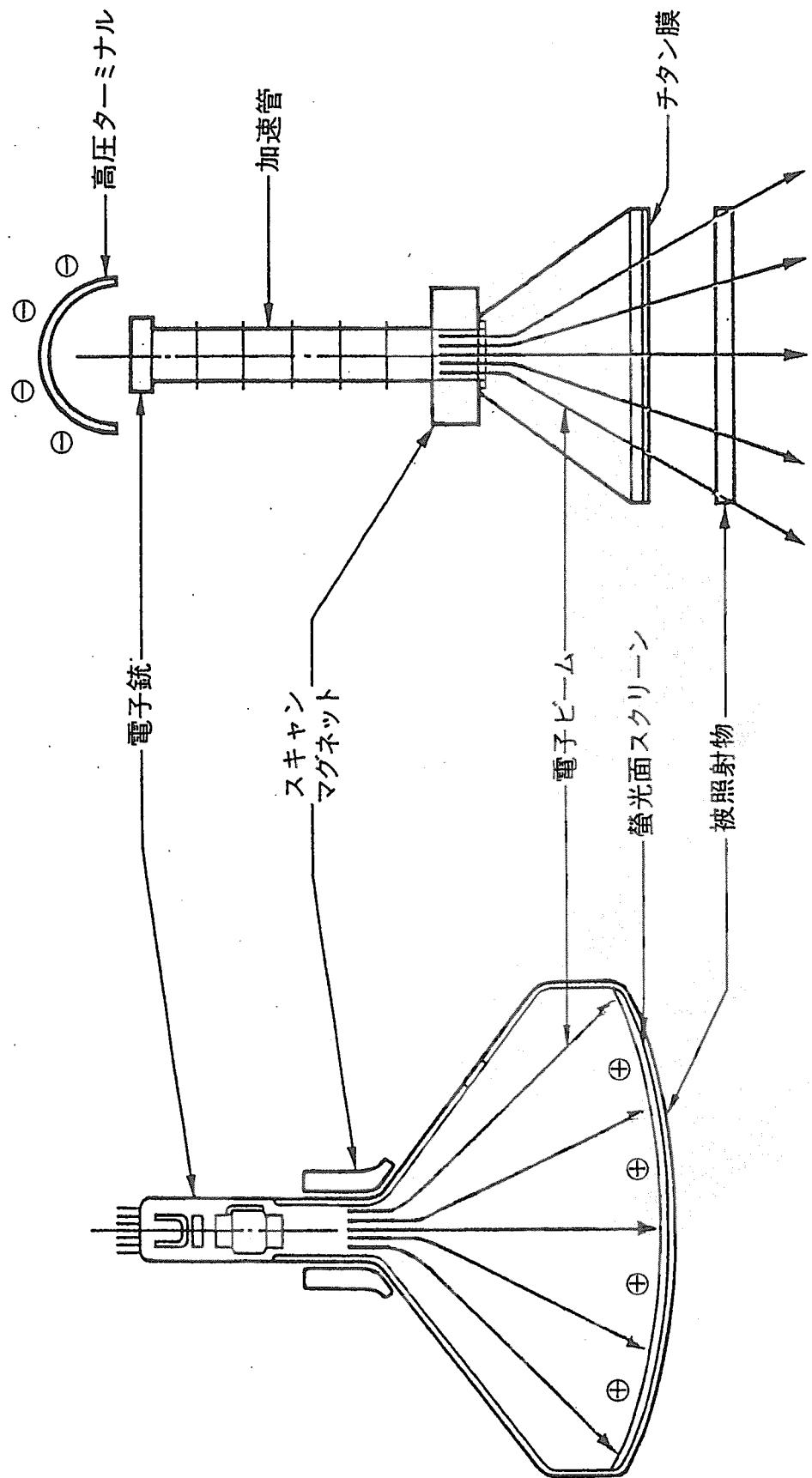


図 9-6 商業用コバルト60ガンマ線照射施設



電子加速器

プラウン管

図9-7 電子加速器とプラウン管の原理。

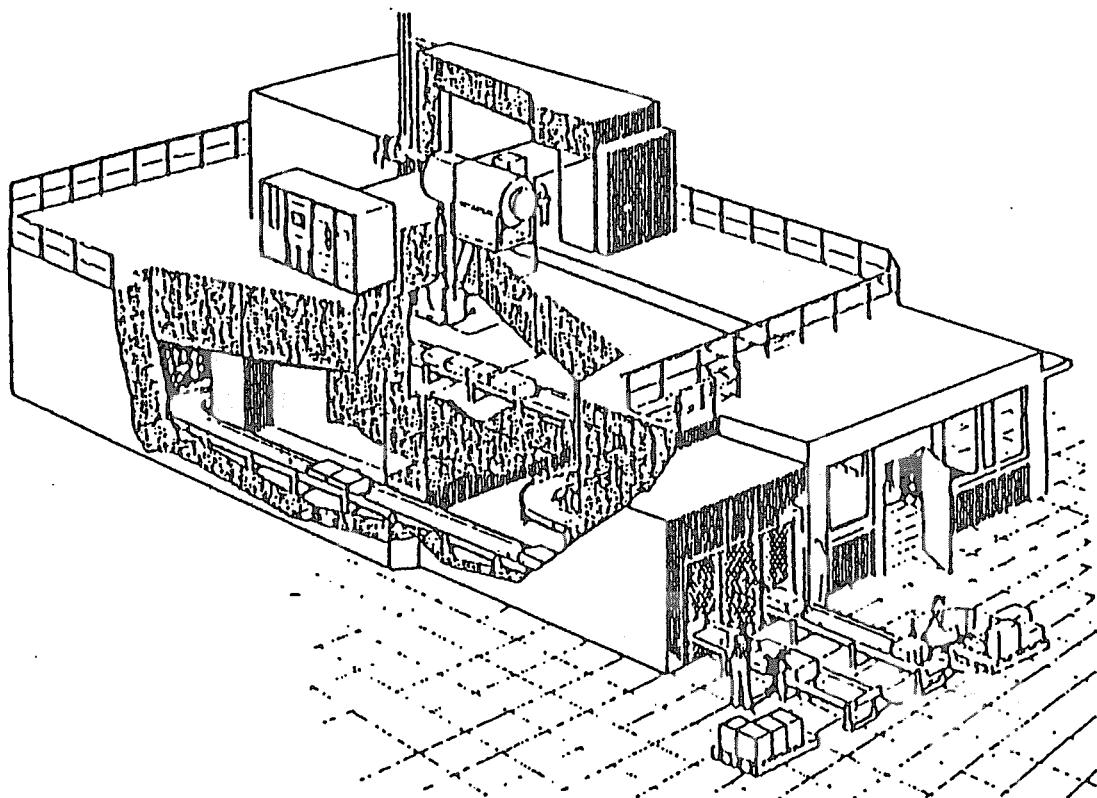


図9-8 高エネルギー電子加速器(10MeV)での
コンベアによる連続照射(垂直照射方式)

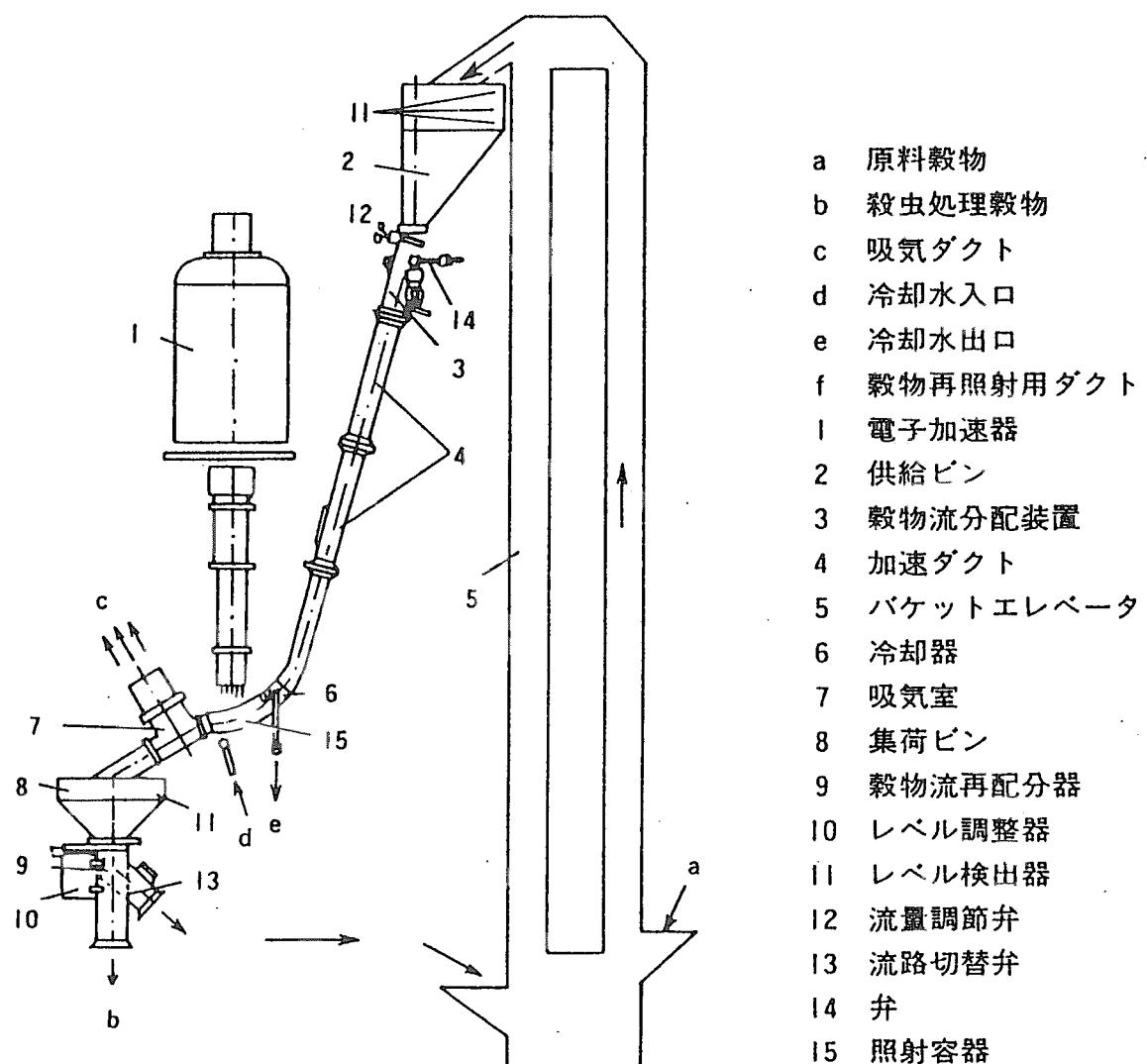


図9-9 ウクライナの穀類電子線殺虫施設の構成。

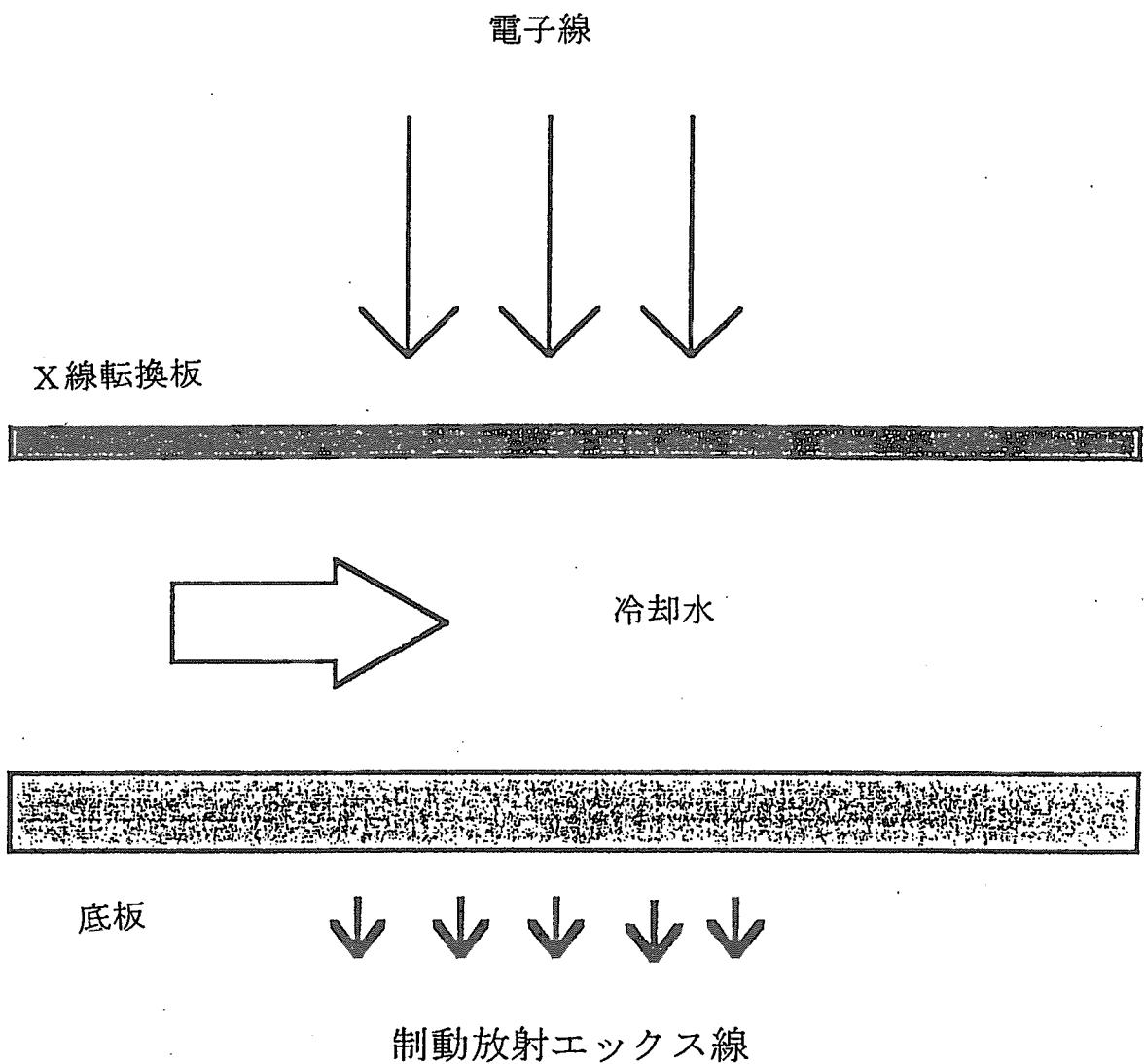


図9-10 エックス線発生用ターゲットの基本構造図。

10. おわりに

近年、人々の「食の安全」に関する関心が高まり、有害微生物の汚染防除が求められるようになってきている。一方、食品由来の病原菌による被害は年々増加しつつあり、サルモネラ菌や病原大腸菌 O157 等、従来少なかった病原菌による食中毒または疾病が増加している。また、わが国のように夏期の高温・高湿の気候ではカビ毒による被害も無視することはできない。このため、わが国でも危害分析・重要管理点（H A C C P）や適性製造基準（G M P）、品質保証国際基準規格（I S O 9000）など食品の安全確保のための規制が強化されてきている¹⁾。さらに、製造物責任法（P L 法）の施行によって、加工食品製造業者は、その原料の食材や各種添加物の微生物汚染防止に一段と注意を払うようになっている。しかし、農産物などの食材には収穫前から多くの微生物や害虫が共生または汚染しており、なんらかの殺菌・除菌・殺虫処理を必要とするものが多い。このため、原材料業者は菌数低減のため加熱殺菌や紫外線、殺菌剤、殺虫剤を使用しているが、これらの殺菌・殺虫法は品質劣化や透過性、残留毒性などの問題がある。このため、世界的に放射線処理法が注目されるようになってきている。

これまで述べてきたように、世界各国の安全性研究によって食品の放射線処理は加熱調理と同じように安全であることが明らかになっている。しかし、放射線と聞くと放射能と混同したり、得体の知れない反応が起こると恐れる人が少なくない。このような誤解は情報不足が大きく原因している。食品照射技術を実用化するためには食品照射に対する消費者の理解が必要である。このためには、消費者の理解を得る啓蒙活動や正確な情報提供活動が必要であろう。

情報不足は日常の食生活でも見られる。例えば、日常流通している食材にはサルモネラ菌や病原大腸菌 O157 で汚染しているものが少なからず存在するが、ほとんどの家庭では十分加熱調理しているため発症しないだけである。しかも、食中毒性細菌の中には抗生物質耐性菌が増加しており、薬剤による食中毒患者の治療が困難となる事態が予想される。欧米諸国で問題になっているリステリア菌による食中毒がわが国で問題にならないのは、リステリア菌が食材に汚染していないのではなく調理方法の違いとか発症が風邪の症状に似ていて気がつかないことも原因している。

一方、日本の消費者の多くは食中毒より農薬などの影響を恐れる傾向があり、欧米諸国と異なった傾向を示している^{2・3)}。わが国は食料自給率が 40%と他国と比べて異常に低く、海外からの輸入食品が年々増加している。しかし、検疫処理で使用されている臭化メチルはオゾン層破壊物質⁴⁾だけでなく毒性があり、以前には古々米に残留する臭化メチルが問題になったことがある。このため、検疫への放射線処理の導入はオゾン層破壊物質の使用を低減でき、薬剤被害の低減も可能となる。しかし、行政当局は検疫処理に放射線法を導入すると海外から安い農産物が流入して日本農業に壊滅的な被害を与えると恐れている。第 6 章でも述べたように、放射線処理は万能でなく、全ての農産物が検疫処理に適しているわけではない。ほとんどの生鮮野菜は殺虫を目的とした放射線処理で品質が劣化する。一方、生鮮果実類は放射線殺虫が有望であるが、それが日本農業に大きな被害を与えるとは思えない。日本の果実や野菜は外国産に比べ品質が良く農薬残存量も少ないため、放射線で発芽防止または殺虫処理して高級品として輸出するという発想が必要と思われる。馬鈴薯やタマネギの収穫前に散布している発芽防止剤マレイン酸ヒドラジドは人

体に有害であり効果も不安定である。この場合も放射線処理が品質保持、安全性の面から有望である。

飼料用穀類の多くは海外からの輸入に頼っているが、害虫の殺虫や外来雑草種子の不活性化、病原菌の殺菌、薬剤耐性菌の発生防止の上で放射線処理が有望である。また、食品工業で排出される廃棄物も放射線で殺菌処理すれば飼料としての有効利用が可能になる。アメリカなどから輸出される牛肉や鶏肉は放射線殺菌されたものが今後増えると思われるが、わが国だけが輸入拒否することは困難になると思われる。

香辛料や生薬の場合も現状では気流式過熱蒸気により殺菌されており、香氣成分が著しく低減したり色調が変化するなどの問題点がある。このため、加工食品によっては人工の香り成分が使用されている場合もあるようである。放射線による殺菌処理は香氣成分や色調変化がなく優れた殺菌法である。

わが国では最近、放射線以外の様々な殺菌・殺虫処理技術が開発されている。しかし、透過力や生鮮状態を保持しての処理、処理量の大きさ、処理コスト、安全性、殺菌・殺虫処理の確実性では放射線処理法が優れている。食品照射の安全性が科学的に証明されているにもかかわらず、食品照射の実用化に消極的な行政方針は世界で通用しなくなりつつあり、食品照射を認めた上の食品の安全対策、食料資源の確保、農業戦略の構築が必要であろう。放射線照射施設は高価なため実用性がないとの指摘がある。しかし、最近の電子加速器技術の進歩により小型で高エネルギー電子線の発生が可能な装置が開発されつつあり、小規模な企業でも照射装置を設置できる時代が近づいている。

謝　　辞

本報告書の作成に当たり、消費生活アドバイザーの碧海酉癸氏、原子力委員の木元教子氏より報告書作成内容につき貴重な意見を賜った。また、日本原子力研究所高崎研究所長の渡辺 宏氏、環境・資源利用研究部長の棚瀬正和氏、放射線高度利用センター・照射施設課長の須永博美氏より懇切なご指導を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

1. はじめに

- 1) 縊抜邦彦編：100 億人時代の地球、農林統計協会、1998 年。
- 2) UNEP : Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer, 1994 Report of the Methyl Bromide Technical Options Committee, 1995 Assessment.
- 3) WHO : High-Dose Irradiation ; Wholesomeness of Food Irradiated with Doses above 10kGy, Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group, WHO Technical Report Series 890, Geneva, 1999.
- 4) 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. 日常生活と放射線のかかわり

- 1) 野口正安：放射線のはなし、日刊工業新聞社、1990 年。
- 2) 山口彦之：放射線と生物、啓学出版、1975 年。

3. 食品照射とは

- 1) 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。
- 2) UNEP : Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer, 1994 Report of the Methyl Bromide Technical Options Committee, 1995 Assessment.
- 3) 縊抜邦彦編：100 億人時代の地球、農林統計協会、1998 年。
- 4) 中山 勉、児玉昌彦：発癌・制癌と活性酸素、化学と生物、23、(12)771 - 778 (1985)。
- 5) 森田潤司：活性酸素によるDNA損傷機構、日本農芸化学会誌、62(12)、1749 - 1756 (1988)。
- 6) H.デルティンガー、H.ヨング（代谷次夫・天笠準平訳）：放射線生物学、東京大学出版会、1974 年。
- 7) 近藤宗平：分子放射線生物学、東京大学出版会、1972 年。
- 8) 伊藤 均：加熱によらない殺菌技術、日本食品工業学会誌、38、(1)72 - 77 (1991)。
- 9) 伊藤 均：電子線の殺菌・滅菌効果、医科器械学、60(10)、469 - 475 (1990)。

4. 世界における食品照射

- 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) FDA : Recommendations for evaluating the safety of irradiated foods, Final report, 1980.
- 3) 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)。
- 4) 等々力節子：世界における食品照射の現状、食品照射、34 卷、63 - 65 (1999)。
- 5) Federal Register(1999) : Irradiation of meat food products, final rule, vol 64, No. 246. Page 72150, December.
- 6) 伊藤 均：食品照射の最近の話題； I C G F I 総会に出席して、放射線と産業、70 号、27 - 31 (1996)。

5. わが国の食品照射

- 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)巻、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、総合食品安全事典、p.842 - 877、産業調査会・事典出版センター、1994年。
- 3) K. Kameyama and H. Ito : Twenty-six years experience of commercialization on potato irradiation at Shihoro, Japan, Radiat. Phys. Chem., 57, 227 - 230(2000).
- 4) 須永博美、伊藤 均、高谷保行、滝澤春喜、四本圭一、田中隆一、徳永興公：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。
- 5) 岩原繁雄：照射食品の安全性とその問題点、防菌防黴、15(1)巻、33 - 38(1987)。

6. 食品照射の応用分野

- 1) The Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture : Training Manual on Food Irradiation Technology and Techniques, Second Edition, STI/DOC/10/114/2, IAEA, Vienna, 1982.
- 2) 鈴木慶記、亀山研二、内海和久、富山俊郎、菱沼 豊：加工用ばれいしょの貯蔵および加工に関する研究、食品産業センター技術報, No.3、61 - 70(1979)。
- 3) 食品照射研究委員会研究成果最終報告書、日本アイソトープ協会、1992年12月。
- 4) 緒方邦安、茶珍和雄：放射線照射と果実・そ菜の生体反応、化学と生物、10巻(4)、234 - 242(1972)。
- 5) 高野博幸、梅田圭司：貯蔵害虫の放射線殺虫、ノメシコクガのγ線に対する感受性、日本食品工業学会誌、21(6)巻、267 - 272(1974)。
- 6) The Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture : Insect Disinfestation of Food and Agricultural Products by Irradiation, STI/PUB/895, IAEA, Vienna, 1991.
- 7) 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)巻、290 - 299(1987)。
- 8) 世界保健機関：照射食品の安全性と栄養適性、コーパス出版、1996年。
- 9) 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)。
- 10) The Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture : Use of Irradiation to Control Infectivity of Food-borne Parasites, STI/PUB/933, IAEA, Vienna, 1993.
- 11) E. A. Murano : Irradiation of fresh meats, Food Technology, December, 52 - 54(1995).
- 12) 伊藤 均、Harsojo : 食肉中での大腸菌 O157:H7 の放射線殺菌効果、食品照射、33巻、29 - 31(1998)。
- 13) D. W. Thayer and G. Boyd : Elimination of Escherichia coli O157:H7 in meats by gamma irradiation, Appl. Environ. Microbiol., 59, 1930 - 1034(1993).
- 14) H. O. Rashid, H. Ito and I. Ishigaki : Distribution of pathogenic vibrios and other bacteria in imported frozen shrimps and their decontamination by gamma-irradiation, World J. Microbiol. Biochem., 8, 494(1992)

- 1 5) H. Ito and T. Sato : Changes in the microflora of vienna sausages after irradiation with gamma-rays and storage at 10 °C, Agric. Biol. Chem., 37, 233(1973).
- 1 6) 野々宮 孝、伊藤 均、森本明徳、山城富男、石垣 功、岩楓和男、堤 孝正 : γ 線照射によるRNAウイルスの不活化、食品照射、27(1,2)、19 - 26(1992)。
- 1 7) 伊藤 均、渡辺 宏、青木章平、佐藤友太郎 : ガンマ線照射したウインナーソーセージのミクロフローラに及ぼす包装フィルムの影響、日本農芸化学会誌、51卷、603 - 608(1977)。
- 1 8) M. L. Jun, H. Ito, H. Watanabe and N. Tamura : Distribution of microorganisms in spices and their decontamination by gamma-irradiation, Agric. Biol. Chem., 50(2), 347 - 355(1986).
- 1 9) 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).
- 2 0) 小林彰夫、木村容子、小野美佐子、久保田紀久枝 : 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報告書(日本アイソトープ協会)、p.90 - 98、1992年12月。
- 2 1) 金子信忠、伊藤 均、石垣 功 : 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卷(11)、1025 - 1032(1991)。
- 2 2) 渡辺 宏、Sri Bagiawachi、田村直幸 : 香辛料の抗菌性及び酸化性に対する γ 線照射の影響、食品照射、20卷、27 - 30(1985)。
- 2 3) A. Anellis, E. Shattuck, D. B. Rowley, E. W. Ross, JR, D. N. Whaley, and V. R. Dowell, JR. : Low-temperature irradiation of beef and methods for evaluation of a radappertization process, Appl. Microbiol., 30(5), 811 - 820(1975).
- 2 4) 伊藤 均、A. Begum、久米民和、武久正昭 : 飼料用魚粉の微生物分布と放射線殺菌効果、日本農芸化学会誌、57卷、9 - 16(1983)。
- 2 5) H. Ito and H. Iizuka : Present status of radiation treatment of animal feeds in Japan, Decontamination of Animal Feeds by Irradiation, p.15 - p.31, STI/PUB/508, IAEA, 1973.
- 2 6) 林 徹 : 乾燥食品原材料の殺菌、食品照射、32(1,2)、38 - 48(1997)。

7. 照射食品の安全性

- 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)卷、290 - 299(1987)。
- 2) 川嶋浩二、林 徹 : WHO技術報告シリーズNo.604 照射食品の健全性・FAO/IAEA/WHO合同専門家委員会(1996) 報告、食品照射、16卷、61 - 88(1981)。
- 3) Joint FAO/IAEA Division of Atomic Energy in Food and Agriculture : Decontamination of Animal Feeds by Irradiation, STI/PUB/508, IAEA, Vienna, 1979.
- 4) 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卷、89 - 111(1981)。
- 5) 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。
- 6) WHO : High-Dose Irradiation ; Wholesomeness of Food Irradiated with Doses above 10kGy, Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group, WHO Technical Report Series 890, Geneva, 1999.
- 7) D. W. Thayer, J. P. Christopher, L. A. Campbell, D. C. Ronning, R. R. Dahlgren, G. M. Thomson,

- and E. Wierbicki : Toxicology studies of irradiation-sterilized chicken, J. Food Protec., 50(4), 278 - 288 (1987).
- 8) FAO/WHO 合同食品規格委員会：照射食品に関する国際一般規格；ローマ、1984年、
食品照射（林 徹訳）、p.73 - 86、光琳、1988年。
- 9) A. Miller and P. H. Jensen : Measurement of induced radioactivity in electron-irradiated beef, Appl. Radiat. Isot., 38(7), 507 - 512 (1987).
- 10) IAEA : Consultants' Meeting on the Development of X-ray Machines for Food Irradiation, Vienna, Austria, 16 - 18 October 1995.
- 11) 中山 勉、児玉昌彦 : 発癌・制癌と活性酸素、化学と生物、23、(12)771 - 778 (1985)。
- 12) 森田潤司 : 活性酸素によるDNA損傷機構、日本農芸化学会誌、62(12)、1749 - 1756 (1988)。
- 13) P. S. Elias and A. J. Cohen (Ed.) : Radiation Chemistry of Major Food Components, Elsevier, 1977.
- 14) W. W. Nawar : Volatiles from food irradiation, Food Reviews International, 2(1), 45 - 78 (1986).
- 15) 食品照射研究委員会研究成果最終報告書、日本アイソトープ協会、1992年12月。
- 16) 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。
- 17) 金子信忠、伊藤 均、石垣 功 : 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卷(11)、1025 - 1032 (1991)。
- 18) 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)。
- 19) FDA : Recommendations for evaluating the safety of irradiated foods, Final report, 1980.
- 20) C. Merritt, Jr. : Radiolysis compounds in bacon and chicken; Final report, U.S. Army Natick Research and Development Laboratories, 1982.
- 21) International Consultative Group on Food Irradiation (ICGFI) : Peer review on Dr. H. Delincee's report on genotoxicity of 2-alkylcyclobutanones, Sixteenth Annual Meeting of the ICGFI, 25 - 27, October 1999, Antalya, Turkey.
- 22) F. L. Lepine : Effects of ionizing radiation on pesticides in a food irradiation perspective ; A bibliographic review, J. Agric. Food Chem., 39, 2112 - 2118 (1994).
- 23) H. Ito and H. Iizuka : Present status of radiation treatment of animal feeds in Japan, Decontamination of Animal Feeds by Irradiation, p.15 - p.31, STI/PUB/508, IAEA, 1973.
- 24) Y. Prachasitthisak, 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).
- 25) H. Ito and H. Iizuka : Taxonomic studies on a radio-resistant Pseudomonas, Agric. Biol. Chem., 35(10), 1566 - 1571 (1971).
- 26) H. Ito, H. Watanabe, M. Takehisa and H. Iizuka : Isolation and identification of radiation-resistant cocci belonging to the genus Deinococcus from sewage sludges and animal feeds, Agric. Biol. Chem., 47(6), 1239 - 1247 (1983).
- 27) 瀧上真知子、伊藤 均 : Escherichia coli のガンマ線および紫外感受性と突然変異誘発について、食品照射、30卷、11 - 16 (1995)。

- 28) 藤巻正生(監修) : 食品照射の効果と安全性、日本原子力文化振興財団、平成3年。
- 29) P. C. Kesavan and P. V. Sukhatme : Report of the examination of the results obtained by national institute of nutrition (NIN), Hyderabad and Bhahba Atomic Research Centre (BARC), Bombay of their studies on the effects of freshly irradiated wheat on lymphocytes in vitro from malnourished children, the cytology of bone marrow of rats and mice, meiotic chromosomes in male mice, germ cell survival in male mice and rats and dominant lethal mutations in rats and mice. Ministry of Health, India, p.1 - 56, July, 1976.

8. 照射食品の検知技術

- 1) 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。
- 2) K. W. Bogl, D. F. Regulla, M. J. Suess(Ed.) : Health Impact, Identification, and Dosimetry of Irradiated Foods; Report of a WHO working group on health impact and control methods of irradiated foods, Institut fur Strahlen Hygiene, ISH-Heft 125, Neuherberg/Munich, 1988.
- 3) 河村葉子、小島佳奈、杉田たき子、山田 隆、斎藤行生 : 热発光法による照射香辛料検知法の比較検討、食品衛生学会誌、36卷、55 - 61(1995)。
- 4) T. Hayashi, S. Todoriki and K. Kohyama : Irradiation effects on pepper starch viscosity, J. Food Sci., 59, 118 - 120(1994).
- 5) 後藤典子、田邊寛子、宮原 誠 : 照射鶏肉の炭化水素法及びE S R法による検知、食品照射、35卷、23 - 34(2000)。
- 6) 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。
- 7) M. Furuta, T. Dohman, T. Katayama, H. Toratani and A. Takeda : Detection of irradiated frozen meat and poultry using carbon mono oxide gas as a probe, J. Agric. Food Chem., 40(7), 1099 - 1100(1992).
- 8) Y. Kawamura, S. Uchiyama and Y. Saito : A half embryo test for identification of gamma-irradiated grapefruit, J. Food Sci., 54(2), 379 - 382(1989).
- 9) T. Kume, T. Ishii and T. Matsuda : Immunochemical identification of irradiated chicken eggs, J. Sci. Food Agric., 65, 1 - 4 (1994).
- 10) H. Cerda : Detection of irradiated frozen food with the DNA comet assay ; Interlaboratory test, J. Sci. Food Agric., 76, 435 - 442(1998).

9. 食品の放射線処理技術と経済性

- 1) 武久正昭 : ガンマ線照射装置、殺菌・除菌応用ハンドブック、p.163 - 167、サイエンスホーラム、1985年。
- 2) 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)。
- 3) 須永博美、伊藤 均、高谷保行、滝澤春喜、四本圭一、田中隆一、徳永興公 : 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。
- 4) 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。

10. おわりに

- 1) 外海泰秀：H A C C Pに対する我が国の取り組みと将来のあり方、防菌防黴、27巻(9)、593 - 598 (1999)。
- 2) 古田雅一：「みんなのくらしと放射線展」の参加者に対するアンケート調査から得られた放射線および照射食品に対する意識調査、食品照射、32巻、29 - 3781997)。
- 3) 食の教育推進協議会：食品照射に関するアンケート調査報告書、平成11年3月。
- 4) 川上房男：臭化メチル問題のその後、横浜植物防疫ニュース、第651号、1999。

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クロトン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E C閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度 1 Pa·s(N·s/m²)=10 P(ボアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧力	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 ⁻⁴	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal= 4.18605J (計量法)
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸	= 4.184J (熱化学)
9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶		2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹	= 4.1855J (15°C)
3.6×10 ³	3.67098×10 ⁵	1		8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵	= 4.1868J (国際蒸気)
4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶		1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)
1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴		252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹	= 75 kgf·m/s
1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷		0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸	= 735.499W
1.60218×10 ⁻¹⁹	1.63377×10 ⁻²⁰	4.45050×10 ⁻²⁰		3.82743×10 ⁻²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270×10 ⁻¹¹		1	100
3.7×10 ¹⁰	1		0.01	1	

照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	3876		1	100
	2.58×10 ⁻⁴	1		0.01	1

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています