

JAERI-Tech  
99-046



JP9950420



植物検疫を目的とした食品照射技術の検討  
—食品照射技術検討ワーキンググループ報告書—

1999年6月

須永博美・伊藤 均・高谷保行・瀧澤春喜・四本圭一  
平野 剛\*・田中隆一・徳永興公\*

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。

入手の間合わせは、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、お申し越してください。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）で複写による実費頒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, 1999

---

編集兼発行 日本原子力研究所

植物検疫を目的とした食品照射技術の検討  
—食品照射技術検討ワーキンググループ報告書—

日本原子力研究所高崎研究所環境・資源利用研究部

須永 博美<sup>+</sup>・伊藤 均・高谷 保行・瀧澤 春喜<sup>+</sup>・四本 圭一<sup>+</sup>・平野 剛\*  
田中 隆一<sup>++</sup>・徳永 興公\*\*

(1999年4月30日受理)

わが国における食品照射の実用化は、馬鈴薯の発芽防止を目的として1973年に世界に先駆けて開始された。その後、馬鈴薯以外の食品照射は、わが国では実用化されていない。しかし、食品の検疫処理に多量に用いられている臭化メチルの使用禁止への国際的な動向及び国内における病原大腸菌等による食中毒の多発という食品を取り巻く最近の状況変化を考慮すると、近い将来食品照射が必要とされる可能性は極めて高い。そこで、食品照射における照射効果や照射技術に関する研究実績を有するわが国唯一の研究機関である高崎研では、わが国における食品照射の実用化を技術面から支援するため、平成9年8月に環境・資源利用研究部及び放射線高度利用センターの関係者から成るワーキンググループを結成した。本報告は、このワーキンググループにおける食品照射に関するこれまでの研究の総括、わが国における食品照射の必要性及び想定される実用化品目の検討、実用化のための技術的課題の抽出とその解決法等についての議論をまとめたものである。

---

高崎研究所：〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町1233

<sup>+</sup>放射線高度利用センター

<sup>++</sup>高崎研究所

\*三菱電機(株)

\*\* (財)放射線利用振興協会

Investigation of Food Irradiation Technology for Application to Plant Quarantine  
- Working Group Report of Food Irradiation Technology -

Hiromi SUNAGA<sup>+</sup>, Hitoshi ITO, Yasuyuki TAKATANI,  
Haruki TAKIZAWA<sup>+</sup>, Keiichi YOTSUMOTO<sup>+</sup>, Tsuyoshi HIRANO\*,  
Ryuichi TANAKA<sup>++</sup> and Okihiro TOKUNAGA\*\*

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 April 30,1999)

The commercialization of food irradiation in Japan was started in 1973 for the sprout inhibition of potatoes as the first successful food irradiation facility in the world. Since approval of potato irradiation, no items has been commercialized in Japan. However, international agreement for phase out of methyl bromide after 2005 and increasing incidences of foodborn diseases such as by Escherichia coli O157:H7 are forcing to have interesting to food irradiation. Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment has long experiences on research of irradiation effect and engineering of food irradiation in Japan. From these back ground, working group of food irradiation was organized at August 1997 by some members of Department of Radiation Research for Environment and Resources and Advanced Technology Center for supporting technically on commercialization of food irradiation. This report presents the result of discussion in working group on generalization up to date researches of food irradiation, application fields and items, technical problems and future prospects of this technology in Japan.

Keywords: Food Irradiation, Quarantine Treatment, Foodborn Disease, Methyl Bromide, Radiation Engineering, Radiation Effect

---

<sup>+</sup> Advanced Technology Center

<sup>++</sup> Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment

\* Mitsubishi Electric Corporation

\*\* Radiation Application Development Association

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. これまでの食品照射研究の総括と実用化の現状 .....	3
2. 1 食品照射の概要 .....	3
2. 2 海外における研究 .....	3
2. 3 わが国における研究 .....	4
2. 4 実用化の現状 .....	7
3. わが国における食品に関する問題と食品照射の有効性 .....	8
3. 1 食品を巡る最近の問題点 .....	8
3. 2 食品照射の有効性 .....	9
4. 各品目における食品照射の必要性の検討 .....	10
4. 1 食品品目別の検討 .....	10
4. 2 食品関連品目の検討 .....	11
5. 検疫処理を目的とした放射線による殺虫 .....	13
5. 1 検疫処理の必要性 .....	13
5. 2 わが国に持ち込みが禁止されている病害虫 .....	13
5. 3 害虫に対する照射効果 .....	14
5. 4 輸入農産物の品質に与える照射の影響 .....	15
5. 5 今後の研究課題 .....	15
6. 検疫処理のための照射技術の検討 .....	17
6. 1 食品照射に用いる放射線の種類 .....	17
6. 2 X線発生技術 .....	19
6. 3 X線照射技術 .....	21
6. 4 青果物を照射する場合のケーススタディ .....	22
6. 5 照射技術に関する今後の検討課題 .....	25
7. まとめ .....	27
謝辞 .....	29
参考文献 .....	30

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Generalization of up to Date Researches on Food Irradiation and Recent Status of Commercialization .....	3
2.1 Outlines of Food Irradiation .....	3
2.2 Researches in the Overseas .....	3
2.3 Researches in Japan .....	4
2.4 Recent Status of Commercialization .....	7
3. Problems Relating Foods and Advantage of Food Irradiation .....	8
3.1 Recent Problems Relating to Foods .....	8
3.2 Advantage of Food Irradiation .....	9
4. Investigation of Application Fields of Food Irradiation .....	10
4.1 Application Fields on Food Items .....	10
4.2 Application Fields on Other Items Relating to Food .....	11
5. Radiation Disinfestation for the Purpose of Quarantine Treatment .....	13
5.1 Necessity of Quarantine Treatment .....	13
5.2 Prohibited Pests to Brought in Japan .....	13
5.3 Irradiation Effects to Pests .....	14
5.4 Irradiation Effects on Quality of Imported Agricultural Commodities .....	15
5.5 Necessary Research Subjects .....	15
6. Aspects of Radiation Engineering for Quarantine Treatment .....	17
6.1 Kinds of Radiation for Application to Food Irradiation .....	17
6.2 Technology for X-rays Generation .....	19
6.3 Radiation Engineering of X-rays .....	21
6.4 Case Study of Fruit Irradiation .....	22
6.5 Necessary Research Subjects for Radiation Engineering .....	25
7. Conclusion .....	27
Acknowledgements .....	29
References .....	30

## 1. はじめに

放射線の作用を利用した食品照射の研究は、第2次世界大戦終了直後から、貯蔵期間を延長することを目的に米国、英国、旧ソ連等で開始された。その後、野菜の発芽防止や殺虫に対する放射線の優れた効果が明らかになり、他の多くの国でも研究が行われるようになった。これらの研究によって、放射線照射は食品に対して成熟の遅延や発芽抑制をはじめ、害虫、寄生虫、病原性や腐敗性の細菌、糸状菌、酵母菌などの制御、さらには滅菌など多くの応用分野があり、食品を冷蔵しないで長期間貯蔵することが可能であることが明らかになった。

また、照射食品の健全性に関しては40年以上にわたって主に先進国において、放射線照射による誘導放射能、毒性物質、発癌性物質等の生成、栄養価の変化について、また照射食品の子孫に及ぼす影響について詳細な検討がなされた。これら詳細検討の結果に基づいて、FAO/IAEA/WHOの照射食品の健全性に関する合同専門家委員会は、総平均線量が10kGy以下で照射された食品の健全性（毒性学、栄養学、微生物学を含む安全性）に問題はないと明確に結論づけた。

明らかになった食品照射の特長及び健全性を踏まえて、食品照射の実用化は進展した。現在、食品照射を認可している国は41ヶ国、117品目以上に及んでおり、また30ヶ国において実用化している。このうち、殺菌を目的とした香辛料及び乾燥野菜の照射が多い。また、フランス、オランダ、ベルギーにおいては食中毒性細菌の殺菌を目的とした鶏肉や冷凍魚介類の照射が実施されている。さらに、1997年には米国において病原大腸菌 O-157:H7 対策として牛肉等赤身肉の照射が許可されたのは記憶に新しい。

一方、わが国における食品照射の実用化は、1973年に世界に先駆けて発芽防止を目的とした馬鈴薯の照射が北海道士幌農協で実現した。その後、照射食品に対する消費者イメージが障害となり、馬鈴薯以外の食品照射は現在にいたるまで実用化されていない。しかし、以下に述べるような食品を取り巻く最近の状況変化を考慮すると、近い将来わが国でも食品照射の実用化についての積極的な議論が行われるものと思われる。

食品を取り巻く最近の状況変化の一つは、輸入食品の検疫や貯蔵穀類の殺虫を目的とした燻蒸処理に大量に使用されている臭化メチルが近い将来使用禁止になることである。近年、交通や輸送手段の発達により大量物資の迅速な国際間輸送が可能となり、食品の貿易量も急増している。わが国もその例外でなく、わが国で消費される食料の50%以上は外国からの輸入でまかなわれているのが現状である。ところが、このように食料の輸入の拡大に伴い、国内に生息しない害虫、病原菌等の外国からの侵入の恐れが増大している。それを防止するため、わが国では、輸入される穀物、生鮮果実等は薬剤による燻蒸処理、蒸気処理、低温処理が行われている。蒸気処理や低温処理は生鮮果実等を傷め、処理に時間がかかり、またコストが高い。一方、薬剤による燻蒸処理はこのような欠点がないため、この処理法が多く用いられている。この検疫処理には大量の臭化メチルが用いられてきたし、現在も用いられている。

ところが、臭化メチルはオゾン層破壊物質であるため、その使用について国際的に議論され、第9回モントリオール議定書締約国会合において先進国における使用を2004年で禁止すること

が決定された。ただし、この場合燻蒸処理を目的とした使用は例外とされた。しかし、米国は臭化メチルの使用を 1999 年から製造及び輸入を段階的に削減する予定であり。この使用禁止期限は 2004 年は避けられない情勢にある。

わが国における臭化メチル使用量は、平成 4 年度で 9,430 トンであり、米国に次いで世界で 2 番目に多い。また、輸入食品の検疫や貯蔵穀類の殺虫を目的とした燻蒸処理に使用されている量は全使用量の約 20% であり、この目的の使用量としては世界で最も多い。わが国で輸入食品の検疫処理に大量に使用されている臭化メチルの使用禁止が真近に迫っている状況において、それに替わる検疫処理法の開発が緊急の課題である。

食品を取り巻く最近の状況変化の二つ目は、生肉などからの食品由来の食中毒が年々増加する傾向にあることである。記憶に新しいところでは、病原性大腸菌 O-157:H7 やサルモネラ・エンテリテイデスなどの食品由来の病原菌による中毒の集団発生が挙げられる。サルモネラ菌等による食中毒発生の増大は開発途上国のみでなく先進工業国においても年々深刻化しており、各国とも食品特に生肉等生鮮物の衛生化対策を急いでいる。

放射線照射は、生鮮果実や野菜、穀類、豆類、生肉等の品質に悪影響を与えることなく殺虫・殺菌処理が可能であり、処理時間が少なく、低コストで処理可能である。従って、放射線照射は、臭化メチル処理に替わる検疫処理法としてだけでなく、生鮮食品の衛生化法として適した方法である。更に、この方法は、生産地と同じ完熟度の果実類を輸入し、消費者へ提供することを可能にする。

以上の様な食品を取り巻く最近の世界的な動向及びわが国の状況を考慮すると、わが国においても食品照射技術を実用化しなければならない状況が近い将来到来することが予想される。

高崎研は、食品照射の研究において照射効果及び照射技術に関する研究実績を有するわが国における唯一の研究機関である。食品照射の実用化の議論がわが国において一旦始まれば高崎研に対して技術的支援が要請されることは十分に考えられる。そこで、平成 9 年 8 月に、食品照射に関する照射効果及び照射技術に関連する研究開発を行っている環境・資源利用研究部及び放射線高度利用センターの関係者から成るワーキンググループを結成し、そこで食品照射に関するこれまでの研究の総括、わが国における食品照射の必要性、想定される実用化品目、実用化のための技術的課題とその解決法について議論した。本報告は、これまで 10 回の WG での議論をまとめたものである。



## 2. これまでの食品照射研究の総括と実用化の現状

### 2.1 食品照射の概要

放射線による食品の衛生化及び貯蔵期間延長技術を食品照射と呼んでおり、わが国でも40年以上前から研究が行われてきた。米国や英国、旧ソ連などでは第二次世界大戦終了直後から研究が開始されており、国際的には約50年の研究実績がある。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、冷凍下でも殺菌可能であり、栄養成分の分解が少ないことによる。研究の初期には、照射による味の悪変や異臭発生などの問題が見出されたため研究が低迷したこともあった。しかし、食味変化がほとんど問題にならない低線量処理でも野菜の発芽防止や殺虫に有効であることが明らかになるに従って各国での研究は活発となった。一方、食品の放射線処理はその安全性に関して多くの誤解と反発を生じた。このため、各国での食品照射研究では食品としての安全性を評価する健全性試験に多くの力をさいてきた。健全性試験とは食品としての安全性と栄養適性を評価する試験である。

食品照射の応用分野は、表2-1に示すように目的に応じて低線量、中線量、高線量処理に分類することができる。

- (1) 低線量処理：0.02～1kGyの線量で、根茎菜類の発芽防止、及び果実や穀類の殺虫、肉類の寄生虫殺滅などを目的としており、栄養成分の変化も無視でき、処理コストも薬剤処理より少ないか同じ程度で済む。
- (2) 中線量処理：1～10kGyの線量で菌数低減化による貯蔵期間延長、及びサルモネラ菌、病原大腸菌、腸炎ビブリオ菌、カンピロバクター、ブドウ球菌、リステリア菌など芽胞形成能のない病原性細菌の殺菌に有望である。畜産製品や魚介類には食味劣化を起ささない適性線量があり、常温では1～4kGyである。一方、凍結下または脱酸素下、乾燥状態では4kGy以上の線量でも食味劣化は少ない。香辛料や乾燥野菜は菌数低減化を目的としており必要線量は6～10kGyであり、風味の減少も認められないため、多くの国で実用化されている。
- (3) 高線量処理：30～50kGyで商業的な完全殺菌を目的としている。宇宙食や免疫不全の病人食として欧米諸国で実用化されている。

### 2.2 海外における研究

#### 1) 食品照射の必要性

世界的に見れば収穫後の害虫や腐敗による食品の損失は20%にも達しており、国によっては40%が食用に用いられなくなっている。もちろん、これら多くの損失は貯蔵施設や輸送手段の改善によって大幅に減少することができるが、熱帯諸国などでは薬剤を大量に使用しなければどうしようもないことが多い。たとえば米の害虫防止のためには、頻繁に臭化メチル燻蒸を繰り返さなければならない。放射線処理法は収穫後の損失を大幅に低減でき、しかも食品由来の病原菌、寄生虫による被害を低減できることから、WHO、FAO、IAEAなどの国際機関は食品照射の実用化推進に熱心に取り組んできている。一方、米国などの先進国では食品照射を従来の薬剤に代わる処理法として使用しようとする動きが強まっている。

## 2) 海外における健全性評価

表2-2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年のFAO/IAEA/WHO合同専門家委員会の頃より始まり、1970年には食品の健全性試験のための国際プロジェクトがわが国や米国、西ドイツ、フランスなど24カ国が参加して開始された。1976年の合同専門家委員会ではこれらの成果を基にして、食品の放射線処理は加熱や凍結と同じ物理的な処理法であり、食品添加物としての取り扱いが妥当でないとする見解を示した。1977年のFAO/IAEAの飼料の放射線殺菌に関する専門家会議では50kGyまでの照射は動物飼料としての安全性に問題のないことを明らかにした。続いて1980年のFAO/IAEA/WHO合同専門家委員会では「10kGy以下の総平均線量でいかなる食品を照射しても、毒性学的、栄養学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健全性試験は不要である」という結論を出した。

放射線分解生成物の分析による健全性評価の研究は1970年頃から米国や西ドイツなどで行われ始めた。脂質の放射線分解生成物の種類は加熱処理による分解生成物と大差がないか、それより少ないと報告されている(図2-1)。放射線による脂質の分解機構は自動酸化機構と類似して、放射線は可視光線と同様に触媒として働いており、アルデヒド類やエステル類、脂肪酸などを生成する。蛋白質の分解生成物はアンモニアや脂肪酸、芳香族化合物、アミド、メルカプタン類などを生成する。さらに、アミノ酸と糖類が反応してメラノイジンを生成したり、リジノアラニンやヒスタミンを生成することもある。また糖類は有機酸やアルデヒド類、ケトン類、アルコール類を生成する。なお、生成物のほとんどは非照射食品中にも存在し、その生成量も60kGy照射しても食品1kg当たり数10mgにすぎないと報告されている。

1984年には米国で平均線量59kGy照射した冷凍鶏肉の毒性試験の結果が報告され、健全性に問題の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、ウサギ及びビーグル犬に与える長期毒性試験(280日~999日)、優勢致死試験、世代試験、変異原性試験が行われた。例えばラットの長期毒性試験で各群約110匹という膨大な数の動物が用いられた。本試験で得られた結果は用いた動物数が多いため、当然のことながらデータのバラツキも少なく(図2-2)、ガンマ線、電子線、加熱による差は全く認められていない。さらに、1980年以降に活発に行われた照射食品の検知技術の研究で、放射線分解生成物による分析法は検知法としてはあまり有望でなかったが、放射線分解生成物の種類は加熱調理食品と同じであり、生成物の量は加熱に比べ著しく少ないことが再確認された。このため、WHOは1997年9月に10kGyの上限線量を撤廃し、病人食を対象とした75kGyの滅菌線量でも安全性に問題がないと宣言した。

### 2.3 わが国における研究

#### 1) 初期の研究

わが国での食品照射研究は昭和30年ころから大学や国公立の研究機関で基礎的研究が開始された。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、国外での研究の発展に刺激されて、昭和40年には食品照射研究者から成る食品照射研究協議会が発足し国内での情報の交流、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進展および海外の動向を考慮して昭和42年に食品照射に関する原子力特定総合研究を発足させた。当時のわが国の食品照射研究は貯蔵性の向上を主目的としており、取り上げられた品目も貯蔵性向上の観点から選ばれた。食品照射を実用化するためには、(1)各食品に対する照射効果および最適条件の検討、(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2-3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。

## 2) 原子力特定総合研究の成果

原子力特定総合研究で取り上げられた食品類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2-3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、ウインナー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をまとめると以下ようになる。

- (1) 馬鈴薯とタマネギは休眠期間中に照射すれば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問題にならず、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) ウインナーソーセージや水産練製品では包装材と脱酸素を工夫すれば3~5kGyで貯蔵期間を10°Cで2~4倍に延長できることを明らかにした。
- (3) かまぼこでは卵白を添加すると食味劣化が著しくなるため卵白以外の添加物を用いる工夫が必要である。
- (4) 温州ミカンでは0.5MeVの低エネルギー電子線で1.5~2kGy照射すれば約3°Cの条件で3ヶ月貯蔵できるが、果皮の褐変化が若干起こることがある。
- (5) 健全性試験は表2-4に示すように、7品目とも食用として問題のないことが明らかにされている。照射食品の健全性については従来の加工処理食品や食品添加物と比べ、公的機関で科学的に大規模に行われた例はないと言われており、世代試験など多くの動物試験の成果は最近の環境ホルモンのような微量成分の影響にも対応できるデータである。
- (6) 照射コストについても表2-5に示すように、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、殺菌処理も照射装置の開発が進めば経済的に引き合う可能性がある。

原子力特定総合研究の中で、原研は照射技術の開発を主に担当し、コバルト60ガンマ線での均一照射条件の確立、食品照射に適した線量評価法の確立等の成果を得た。また、関連研究として馬鈴薯やタマネギ、米、ウインナーソーセージ、水産練り製品、温州ミカンについて照射技術の開発に必要な最小、最高線量決定等の照射効果の研究を行った。さらに、これらの成果は北海道士幌農協の馬鈴薯照射施設の概念設計に役立ち、馬鈴薯の実用照射に貢献した。また、電子線による照射技術の開発ではミカン表面の線量分布及び均一照射条件を明らかにした。

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

原子力特定総合研究が活発に行われた昭和42年から50年の当時は、米国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となった。昭和47年には馬鈴薯の発芽防止処

理が厚生省より認可され、馬鈴薯照射施設が北海道士幌農協に設置された。本施設はコバルト60γ線（30万キュリー）により、1日350トンの馬鈴薯を照射処理することができる。昭和48年より運転が開始され毎年1.5万トンの照射馬鈴薯が市場に出荷され、世界で初の食品照射の商業化に成功した。従来の生産ラインの中間に照射装置を設置することにより、人件費や輸送費の増加を抑制することができたためである。

### 3) 原子力特定総合研究終了後の反対運動と健全性の再評価

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」という誤まった報道とも重なって拡大し、その後の食品照射の実用化の低迷の原因となった。また1978年には乾燥野菜を不法に放射線殺菌するというベビーフード事件が起こり、日本の食品照射研究に大きな打撃を与えた。照射食品反対運動では、(1)ソ連のクチンらの照射馬鈴薯での優勢致死試験やインドの小麦での栄養失調児で血中のポリプロイド値でネガティブなデータが得られたこと、(2)特定総合研究の初期動物試験で摂取用量設定時の過剰摂取により非照射でも得られた悪影響を照射の影響としたこと、(3)同じく動物試験での評価について一部の試験項目で得られた誤差程度のデータを拡大解釈する、などを論点とした。

しかし、ソ連やインドのデータは試験方法設定そのものに問題があり、追試によっても再現性がないことから国際的に否定されている。さらに、1986年には日本アイソトープ協会に食品照射研究委員会が設けられ、誘導放射能、食品成分の変化、変異原性、微生物学的安全性について、新しい試験法により安全性の再評価試験が行われた。本委員会の1991年までの6年間の活動によって、全ての項目について安全性に問題のないことが再確認された。本委員会で原研は微生物学的安全性の評価を担当し、照射によってカビ毒産生性の増大が認められないことを明らかにした。さらに、原子力特定総合研究で得られた健全性試験の結果についても専門家グループによる総合評価作業や再試験が行われ、健全性に問題のないことが明らかにされている。また、国立衛生試験所では、1kGyのガンマ線を照射したグレープフルーツの毒性試験を実施し、安全性に問題のないことを明らかにした。

### 4) 最近の研究状況

原子力特定総合研究終了後、国内の研究者は大幅に減少し、農林水産省食品総合研究所や厚生省国立医薬品食品衛生研究所、原研等で基礎的研究が継続されているにすぎない。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主に行われ、また国立医薬品食品衛生研究所では検知法の研究が主に行われている。原研では、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、食肉の病原大腸菌 O-157:H7 等の食中毒菌の放射線殺菌効果、香辛料の放射線殺菌効果の研究を行い、放射線殺菌の有効性を明らかにした。さらに、原研は、1988年から食品照射データベース整備を行い、本データベースは、1998年6月よりインターネットにより一般への公開を開始している。本データベースには国内、国外の貴重な研究成果が700件以上収録されており、食品照射実用化推進に役立つことが期待される。

## 2.4 実用化の現状

FAO/WHO合同食品規格委員会 (Codex) では1980年のFAO/IAEA/WHO合同専門家委員会の結論を基にして1983年に平均線量10kGyまでの照射食品の一般規格が採用され(ステップ9)、加盟各国に受入が勧告されている。本一般規格ではガンマ線とX線の上限エネルギーは5MeV、電子線は10MeVとされ、個々の食品類についての最適線量範囲、照射施設の管理、標示等が記載されている。

食品照射実用化の動きは1980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年以降は多くの国で実用化され始めている。食品照射許可国は1997年で41カ国に達し、117品目以上の食品類が許可されている。食品照射実用化が活発な国は米国、フランス、オランダ、ベルギー、中国、南アフリカ等であり、特に米国は政府が積極的に食品照射の実用化を推進している。表2-6に示すように、米国ではすでに年間3万トンの以上の香辛料が放射線殺菌されており、最近では生鮮肉や青果物、宇宙食、病人食等の照射も増加している。フランスでは年間1万トンの以上の冷凍鶏肉が電子線殺菌されており、香辛料や冷凍魚介類の放射線殺菌も大規模に行われている。このため、ドイツもフランスからの照射香辛料の輸入を認めざるを得なくなっており、欧州連合内でも照射食品がすでに流通している。オランダやベルギーでも香辛料や冷凍魚介類の放射線殺菌が大規模に行われており、ハンガリー、デンマーク、ノルウェー、英国等の国々でも実用化が始まっている。一方、南アフリカでも香辛料や青果物の照射が大規模に行われており、かなりの量が輸出にまわされている。アジアでは、中国が大々的に食品照射の実用化を進めており、ニンニクや香辛料、生薬等が放射線処理されており、年間5万トンの以上照射されている。韓国やタイ、インドネシア、インド等でも実用化が始まっており、香辛料や発酵ソーセージ等が照射されている。カナダや中南米諸国でも食品照射の実用化が進んでおり、食品照射は医療用具の放射線滅菌と同様に普遍的な技術になりつつある。

一方、わが国では、馬鈴薯の発芽防止が実用化して以来20年以上経過した現在、年間1.5万トンの以上の照射馬鈴薯が市場で流通している。照射馬鈴薯は、収穫直後の食味を長期維持し、貯蔵中に発芽しないという利点があり、端境期の価格上昇抑制に役立っている。

### 3. わが国における食品に関する問題と食品照射の有効性

#### 3. 1 食品を巡る最近の問題点

##### 1) 検疫処理と臭化メチルの使用禁止

わが国は温帯から亜熱帯気候に位置しており、海外より病害虫が侵入すると容易に被害が広がりにくい環境下にある。このため、検疫体制はヨーロッパ諸国に比べ厳しくせざるを得ず、これまで、検疫処理薬剤を大量に使用することにより被害を防止してきた。

以前は、青果物の検疫処理に二臭化エチルが使用されてきたが、発ガン性を有するため各国で使用禁止になった。この代替法として低温処理（ $-0.6\sim 1^{\circ}\text{C}$ 、12～14 時間）、蒸熱処理（果実の中心温度  $46.8^{\circ}\text{C}$ 、10 分間）及び臭化メチル燻蒸処理が採用されてきた。臭化メチル燻蒸が行われている青果物はサクランボ、ネクタリン、グレープフルーツ、オレンジ、クルミ等であり、年間100万<sup>ト</sup>以上が処理されている。また、他の生鮮果実は低温処理、または、蒸熱処理されている。しかし、低温処理や蒸熱処理は青果物の品質低下をもたらし、ミバエ等の発生が著しい地域の青果物に対しては有効でない。一方、豆類やトウモロコシの臭化メチルによる燻蒸処理も年間500万<sup>ト</sup>以上に及んでいる。

第9回モンテリオール議定書締約国会合において、開発途上国も含めて、2014年までにオゾン層破壊物質である臭化メチル全廃が決議された。同時に先進国の全廃スケジュールも前倒しとなり、従来の2009年末全廃から、2005年までに段階的に禁止されることが国際的に決定された。また、米国EPAでは、1991年の臭化メチルの製造、及び輸入のレベルを基にそれぞれ、1999年で25%、2001年で50%、2003年で70%、2005年で100%の削減をする予定となっている。

日本の臭化メチル使用量<sup>1)</sup>は、平成4年度で9,430<sup>ト</sup>であり、米国に次いで世界で2番目に使用量の多い国<sup>2)</sup>である（表3-1の1）。このうち、検疫処理、穀類貯蔵に使用されている量は全体の約2割と思われる（約2,800<sup>ト</sup>、表3-1の2）。また、検疫処理への使用は、代替法が見つかるまで例外とされていたが、1998年には、検疫処理への臭化メチルの使用も禁止することが国際的に合意された。しかし、放射線以外に有効な代替処理法がないのが実情である。米国では検疫に放射線処理法の採用を決定しており、このための規格基準が作成されている。また、多くの国でも放射線処理法採用の検討が開始されている。わが国では、輸入青果物の検疫処理には蒸熱法、または低温処理法を採用し、穀類については検疫処理の廃止、または炭酸ガス処理に変更する方向で検討されている。しかし、これらの処理法が適用できない品目も多くある。

##### 2) 食中毒の多発

海外から輸入されてくる肉類や魚介類は検疫で病原菌が検出されれば返送、または廃棄処理されるが、これは汚染菌数が著しく多い場合のことであり、少量の汚染菌数ではそのまま通関して流通している。しかし、肉製品や魚介類等を中心とした輸入食品で問題になるのはサルモネラ菌や病原大腸菌、リステリア菌、コレラ菌、腸炎ビブリオ菌などの食中毒菌や寄生虫の侵入であろう。また、わが国で生産された肉類や魚介類でも食中毒菌や寄生虫対策がますます重要になりつつある。一方、飼料原料である魚粉や骨粉などのサルモネラ菌汚染が著しい製品が多い。飼料原

料の放射線殺虫・殺菌については農林水産省関係者も法的に問題ないと発言している。

これまで多くの食品類の殺虫・貯蔵には薬剤が利用されてきたが、薬剤の健康に対する悪影響、環境汚染が問題になってきており、安全な代替処理法が求められている。一方、わが国でも病原大腸菌 O-157:H7 やサルモネラ・エンテリテイデスなど、食品由来の病原菌による病気の集団発生が最近多発している。すなわち、10年以上前には食中毒の第1位だった腸炎ビブリオ菌にかわり、サルモネラ菌や病原大腸菌による病気が数年前から急増している（表3-2）。

世界保健機関（WHO）の報告によると、先進国でのサルモネラ菌など食品由来の病気は近年急増しており、各国ともその対策が深刻な問題となっている。このように多発する食中毒対策として、多くの国では食品照射技術に注目しており、ここ数年の間に実用化が急速に進展しつつある。

### 3. 2 食品照射の有効性

世界で食品の放射線処理を許可している国は41カ国、117品目以上におよび、実用化している国は30カ国である。多くの国で実用化されている品目は殺菌を目的とした香辛料と乾燥野菜、食中毒性細菌の殺菌のための鶏肉や冷凍魚介類である。米国では、1997年に病原大腸菌 O-157:H7 対策を主目的とした牛肉等の赤身肉の放射線殺菌が、食品医薬品局（FDA）によって許可されたのは記憶に新しい。

わが国では、世界に先駆けて馬鈴薯の発芽防止のための放射線照射が実用化して以来20年以上経過し、現在年間1.5万トンの照射馬鈴薯が市場に出荷されている。照射馬鈴薯は、収穫直後の食味を長期維持し、貯蔵中に発芽しないという利点があり、端境期の価格上昇抑制に役立っている。過去に、他の食品について実用化の要望が業界より出されたことがあったが、照射馬鈴薯の実用化以降に起こった食品照射反対運動のため、実用化は進展していない。

また、輸入食品の検疫処理においては、臭化メチルの代替法としていくつかの処理法が検討されている。しかし、これらの処理法はそれぞれ長所短所があり、あらゆる食品に適用可能なわけではない。輸入食品の検疫に用いられるそれぞれの処理法の比較を表3-3に示す。この表から、放射線処理法は他の処理法と比較しても、すぐれた処理法といえることができる。

#### 4. 各品目における食品照射の必要性の検討

##### 4. 1 食品品目別の検討

わが国においては、輸入食品の検疫処理において臭化メチルの全廃を受けて、その代替法が検討されている。また、3章で述べたような食品を巡る国内外の状況にもかかわらず、わが国は食品照射の全面解禁には依然としてほど遠い状況にある。多くの実用的利点を有する食品照射は、使用禁止となる臭化メチル等の薬剤処理の代替法が他にみつからない食品の検疫処理法として検討するのが現実的であると考えられる。これらをふまえて、表4-1に食品照射を必要とする品目を示す。以下に、個々の食品の検疫処理への放射線照射の適用性について検討した。

##### 1) 輸入青果物

輸入青果物の中には蒸熱法や低温処理法が、適用できない品目が多くある。サクランボ、ネクタリン、リンゴ等は放射線処理以外には有効な処理法がないと考えられる。また、グレープフルーツやオレンジなどは、汚染の少ないものは低温処理法が施されているが、現在、臭化メチル処理を行っている汚染の多い地域からのものに対しては、放射線処理が代替法として有効であろう。グレープフルーツやパパイヤ等については米国から放射線処理した産物の輸出の要望がすでに出されており、いづれ日本に圧力がかかってくると思われる。さらに、ASEAN加盟諸国を中心としたアジア・太平洋地域協力計画(RCAプロジェクト)において食品照射のガイドラインが合意されており、アジア・太平洋地域協力加盟諸国は、放射線処理した熱帯果実を日本などに輸出することを希望している。

##### 2) 豆類

豆類の輸入量は年間200万トンを及んでおり、輸入時に臭化メチルで検疫処理されている。豆類や穀類の場合、ホスフィンで当面は代替できるが、透過性が悪く耐性害虫が出現しやすいという問題があり、これらの問題のない放射線照射が有効であろう。なお、飼料原料として輸入されている穀物・豆類に対しては、臭化メチルの代替処理法として、放射線処理が容認される方向にある。大豆、いんげん、落花生等に対する代替処理法として袋づめの場合はX線、ばらで入荷される場合は電子線及びX線による放射線処理法が利用できる。

##### 3) 輸入冷凍肉・魚介類

輸入冷凍肉や魚介類にはわが国には存在していない寄生虫や病原菌で汚染されていることがあり、奇病発生の原因になっている。ことに病原大腸菌 O-157:H7 は、輸入牛肉を通じてわが国に拡散した可能性があり、この殺菌法として放射線処理が今後注目されるものと思われる。冷凍肉や魚介類は、現状では無処理または解凍して蒸気殺菌したのち再凍結して流通しているため、品質が劣化しているものが多い。放射線処理は冷凍下で品質劣化なしに行うことができる。

##### 4) 香辛料

過去に厚生省は香辛料の照射を許可しようとしたことがあったが、チェルノブイリ原発事故が



起こったため、御破算になった。しかし、照射香辛料が国際間貿易ですでに流通しているため、業界も香辛料の放射線処理の実用化には関心を示している。香辛料の場合、高熱での気流滅菌法や酸化エチル滅菌法が使用されてきたが、気流滅菌法は香気成分が低減する。また、酸化エチル滅菌法は毒性物質が残留するため法律で禁止されている。気流滅菌法については、一時期、業界でももてはやされたが、最近では業界での使用量は減少しており、放射線処理に関心が寄せられている。

ここで、日本で輸入されている植物の検疫を含めた検査実績とその消毒の割合を表4-2に示す。このなかで、青果物（生果物）は、輸入量の中の消毒率が最も高い。また、果肉内部の殺虫処理に適した臭化メチル燻蒸処理に替わる代替法が無いことを考えると、放射線処理法による青果物の検疫処理を検討することが急務と思われる。

#### 4. 2 食品関連品目の検討

わが国では、馬鈴薯以外の食品の放射線処理は現在のところ法律上、禁止されている。現状では、農林水産省や厚生省は、積極的に放射線処理を許可する方向には動いておらず、また消費者の間にも放射線にたいする拒否反応が根強く存在しているのも事実である。更にわが国の農業関係生産者や食品業界も長年使い慣れてきた薬剤等による処理法に頼りたがる傾向にあり、積極的に放射線処理法を導入しようとする業者は少ない。しかし、これまで検疫処理に大量に使用されてきた臭化メチルの使用禁止等食品を取り巻く最近の国際的動向を考慮すると、優れた実用的特徴を有する放射線処理法の導入を早急に検討する時期にきていると思われる。

このような状況においてもただちに食品照射を馬鈴薯以外の食品に適用することは国民の理解を得るといって極めて困難であると思われるので、先ず食品関連品目の放射線処理を実用化し、その過程で国民の理解を得ていくことが現実的であると思われる。実際、法律的に食品に属さないものの放射線処理については、許認可上及び法律上の問題はない。上記のような観点から食品関連品目として選定した生薬、飼料原料及び輸入切り花・木材の放射線処理について検討した。

##### 1) 生薬

生薬は法律上、食品ではなく、医療用品に属するため許認可上の問題は特にない。原研と、国立医薬品食品衛生試験所は共同研究を実施中である。生薬の放射線殺菌の実用化のための規格基準の作成を目的とし、また、生薬の放射線殺菌を目的とした電子線加速器施設の建設が関西空港近郊で始まっており、大阪近郊の漢方薬業界が実用化に力を入れている。これは、医薬品に対する衛生基準が厳しくなったことや中国や米国で実用化していることが業界を刺激する一因となっている。

##### 2) 飼料原料

わが国では、飼料用穀類はほとんど海外よりの輸入品に依存しており、備蓄のためにサイロに貯蔵されている。この場合、夏期に虫の発生を抑制するため臭化メチル燻蒸を繰り返しているの

が実状である。各種飼料用原料の殺菌、殺虫に対する放射線照射効果の基礎データはそろっており、臭化メチルの代替処理法として有望であろう。穀類の殺虫線量は、0.2~0.5kGy であり、粒状で連続処理することが望ましい。飼料用原料として使用されている魚粉や骨粉の場合、サルモネラ菌等の病原菌汚染が問題となる。この場合、袋ごとの殺菌が必要であり、透過力の高いγ線、またはX線処理が望ましい。しかし、比重が軽い製品については、10MeV の電子加速器の利用も考えられる。

### 3) 輸入切り花・木材の殺虫

輸入切り花の放射線殺虫に関しては、農林水産省管轄下の照射施設で試験を行い、照射許可の準備を進めている。木材の場合、害虫が発見されると臭化メチル燻蒸処理を施すのが現状である。木材に対して放射線処理を考えた場合、X線、及びγ線による照射施設が適当であろう。

## 5. 検疫処理を目的とした放射線による殺虫

### 5. 1 検疫処理の必要性

近年、交通や輸送手段の発達により、国際間貿易でも大量かつ迅速な輸送が可能になり、輸入及び輸出货量も急増している。一方、国際間貿易の拡大に伴い、国内には生息していない害虫や病原菌、雑草種子等の侵入が拡大する恐れも増えている。わが国では、生鮮果実等の殺虫処理は燻蒸や蒸熱処理、低温処理によって行われてきている。燻蒸処理に使用される薬剤は1984年ころまでは主に二臭化エチルが生鮮果実の燻蒸に用いられてきたが、人間に対する変異原物質であり生殖障害を与えることが明らかになり、米国で使用禁止になり、わが国でも禁止になった。一方、現在でも使用されている臭化メチルはオゾン層破壊物質のため西暦2005年から使用できなくなる趨勢にある。蒸熱処理や低温処理は生鮮果実に傷害を引き起こしたり、処理時間が長くなり、処理コストが高つくという欠点がある<sup>1)</sup>。放射線処理法は生鮮果実や野菜、穀類、豆類等への傷害が少なく殺虫処理でき、処理時間が少なく、低コストで、しかも生産現地と同じ完熟した果実等を輸入できるという利点もあり、今後の実用化が期待される検疫処理技術であろう。

### 5. 2 わが国に持ち込みが禁止されている病虫害

わが国は気候温暖な地域に位置し、ヨーロッパ諸国に比べ病虫害の発生が容易に起こりやすい。一方、わが国は穀類、果実、飼料原料、木材などを多量に輸入しており、輸入品と共に混入してきた害虫等による被害が発生する可能性がある。植物防疫法はわが国で栽培もしくは自生している植物への病害を防止するのが目的であり、欧米諸国と同じ基準で判断することはできない。植物防疫法では、概略次のように定められている<sup>2)</sup>。

- 1) 侵入を特に警戒する病虫害が発生している地域の寄生植物、土および土に付着する植物、病菌、害虫は輸入を禁止する。
- 2) 植物を輸入する場合は、輸出国の検疫証明書の添付を必要とする。
- 3) 植物の輸入は、指定されている港で行われなければならない。
- 4) 植物を郵便物で輸入する場合は、小包郵便物など3種類のものに限定される。
- 5) 植物を輸入した場合、すみやかに届け出て、植物防疫官の検査を受けなければならない。
- 6) 特定の種苗については、港での検査のほか、一定期間隔離して検査を受け入れることが必要である。
- 7) 検査の結果、病虫害が発見された場合は、植物防疫官の指示に従って消毒等の処置を行わなければならない。
- 8) 試験研究のため、輸入禁止品に指定されているものの輸入を希望するときは、事前に農林水産大臣の許可を受けなければならない。

輸入病虫害として国内への持ち込みが禁止されている主なものを、表5-1に示す。ことに、

地中海ミバエ、ウリミバエ、ミカンコミバエは生鮮果実の3大害虫として扱われており、原則として輸出国で消毒するべきであると定められている。

### 5. 3 害虫に対する照射効果

米国の動植物防疫局が示す害虫防除の基準では「予想される害虫、10万個体中 99.9968%の死亡率を達成できる特定の処理を行うこと」と定められている<sup>3)</sup>。地中海ミバエやウリミバエ、ミカンコミバエの殺虫線量は250Gyと米国農務省は定めているが、表5-2に示すように250Gy以上の線量でも卵の孵化や幼虫の蛹化が起こる<sup>4)</sup>。このため、放射線処理の場合には害虫が再生できる能力の有無を基準にしている。

穀類や豆類、乾燥食品に発生するコクゾウ虫や蛾の仲間の殺虫線量は海外の報告では卵で150~200Gy、蛹や成虫で250~400Gyと報告されている。わが国での原子力特定総合研究の結果では、不妊化線量はコクゾウ、ココクゾウ、ノメシコクガ、コクヌストモドキで200Gy以下であった<sup>5)</sup>。この結果は海外で行われた類似の昆虫類とほぼ同じ傾向を示している。

一方、生鮮果実や野菜の害虫であるミバエ類やコドリガの殺虫線量は250~350Gyとされており<sup>6)</sup>、不妊化による繁殖防止を目的とする場合には250Gyで十分であろう（\*不妊虫放飼法でのウリミバエの必要線量は70Gy）。その他、輸入切り花などで問題になる害虫は蛾、イモムシ、毛虫、ダニ、アブラムシ、アザミウマ、カイガラムシ、線虫（回虫の仲間、植物に寄生するものもある：マツノザイセンチュウなど）などがある。この内、昆虫類、ダニ、アザミウマは300~400Gyで繁殖を防止できるが、線虫は2kGy以上照射しないと繁殖を防止できないと報告されている<sup>7)</sup>。しかし、これらの線量は各国での研究をまとめたものであり、統一性がなく正確な殺虫線量を決める必要がある。

木材は、米材、南洋材、北洋材が輸入されている。これらの材木はカミキリムシ科、キクイムシ科の木材害虫が発見されることが多い。これらの害虫の殺虫線量も500Gy以下で十分であろう<sup>8)</sup>。

寄生虫については、肉に寄生しているトキソプラズマや旋毛虫の殺虫線量は500~700Gyである。一方、魚介類に寄生しているアニサキスは放射線に耐性であり、2kGy以上の高線量でも殺滅できない<sup>9)</sup>。一方、クロノルチスやオピソルチスは100Gyでも殺滅できる<sup>10)</sup>。このように、寄生虫についてはデータが不足しており、実用化しているのは豚肉の寄生虫の殺滅程度である。

検疫処理に放射線を利用する場合に解決しておかなければならない問題点は、

- 1) 放射線処理法は薬剤と異なり即死しない。
- 2) ミバエ類や乾燥食品の害虫のデータはそろっているが、他の昆虫類については正確な線量がわかっていないものがある。
- 3) 寄生虫については繁殖性まで検討した研究は十分行われていない。

等である。生鮮果実の場合、害虫が即死しないことは検疫の上で問題である。なぜなら、不妊化された害虫が農作物に被害を及ぼさなくとも、植物病原性ウイルス等の運搬に関与する可能性があるためである。この対策としては、果実の表面を60℃で数秒間処理して植物病原菌とともに成

虫だけを殺しておくとか、照射後に低温で約1週間放置して照射虫の死滅を促進させるなどの組み合わせ処理を検討する必要がある。一方、植物に寄生する線虫類については放射線処理は有効とは言えず、わが国にいない線虫類が生息している地域からの農産物の輸入を禁止するのが現実的な方法とあろう。しかし、わが国の植物検疫では線虫類については特に重要視していないため、線虫にかかわる農産物はほとんど無視しておいても良いであろう。寄生虫の場合、問題になるのは肉類や魚介類であるが、アニサキスのような放射線耐性種は-20℃で24時間保てば死滅するものが多いため、輸入品については凍結状態で輸入し、病原菌の放射線殺菌処理に限定して十分であろう。

なお、飼料原料に混入している外来雑草種子については放射線による不活性化のデータが全くないため、早急に雑草種子が繁殖しない線量を決定しておく必要がある。現実には、外来雑草による農業及び畜産業への被害が広がっており、検疫処理による外来雑草種子の侵入防止も重要である。

#### 5. 4 輸入農産物の品質に与える照射の影響

生鮮果実では、柑橘類やパイナップルは500Gy以上で品質低下が若干起こるが、パパイヤやマンゴーは1kGyでもほとんど品質低下が起こらないと報告されている。従って、生鮮果実の上限線量は品質変化が無視できる500Gyとするべきであろう。生鮮果実や野菜の品質に対する放射線感受性は表5-3のように分類されている<sup>11)</sup>。

穀類や豆類の照射で問題になるのは、澱粉の粘度低下である。原子力特定総合研究の結果では、小麦の場合、200Gyでも製麺性が若干低下するが製パン性は500Gyでも低下しないことが報告されている<sup>12)</sup>。小麦の場合、製麺用小麦は国産品が適しており外国産は製パン用に用いられているため、照射による問題はないであろう。豆類の場合、粘性が重要な加工食品はなく蛋白質は放射線に安定なため、照射による品質低下を問題にする必要はないであろう。

切り花の場合、キク、バラ、ユリ、スイトピー、アイリスなどは150~200Gyで傷害が起こるが<sup>7)</sup>、照射前後に糖液で処理しておけば傷害を低減できるであろう。なお、生鮮野菜でもキャベツやレタス、ハクサイなどのような葉部を食用とする野菜については照射効果のデータがほとんどないのが実状である。タマネギについても発芽防止の研究は行われているが、殺虫処理線量での品質に与える影響についてのデータは取得されていない。ましてや、生鮮野菜の殺菌効果に関するデータは全くないといえよう。

チューリップ等の輸入球根は放射線処理ができないため、これらの輸入品は引き続き臭化メチルによる検疫処理が必要であり、処理後の臭化メチルを回収して分解処理する技術開発が必要であろう。

#### 5. 5 今後の研究課題

原研では今後、臭化メチル代替法としての放射線による検疫処理導入に必要な技術開発を行うておく必要がある。具体的に原研で研究可能な項目としては、殺虫線量照射した輸入生鮮果実

の品質に与える影響、短時間での輸入青果物の照射の有無判別法、外来雑草種子の繁殖防止に必要な線量の決定、殺虫を目的とした豆類の照射効果、無包装の穀類や豆類の電子線による流状照射技術の検討、制動放射X線による照射技術の開発、が考えられる。なお、照射した害虫の死滅促進効果の研究は農林水産省の研究機関に分担してもらふべきであろう。

この中で、早急に解決しなければならない課題は照射の有無判別法等の青果物の検疫管理技術の確立である。米国は、西暦1999年から臭化メチルの使用を段階的に廃止することを決定しているが、その場合、日本へ大量に輸出しているグレープフルーツ、リンゴ、サクランボが問題となる。さらに、米国は世界貿易機関を通じて日本に対し青果物の輸出圧力を強めており、今後、大きな政治問題になることが予想される。これらの生鮮果実は地中海ミバエ、コドリン蛾の汚染が問題であり、臭化メチル以外に有効な殺虫法がないのが実状である。原研では、これらの生鮮果実を中心に以下のような研究課題について検討する必要がある。

- a) 殺虫線量以上照射した生鮮果実の品質に与える影響、及び低温貯蔵効果の検討。  
(褐変化、ビタミンC、還元糖、腐敗性、食味)。
- b) 検疫管理技術の開発 (照射の有無判別法、ルーチン線量計)。
- c) 電子線、及び制動放射X線による照射技術の開発 (均一照射、線量評価)。

## 6. 検疫処理のための照射技術の検討

輸入青果物の検疫処理を放射線処理により行うための照射技術について検討する。輸入青果物には多くの種類があり、照射処理にはそれぞれに対し所定の目的に必要な線量を、一定の均一度の範囲で、効率よく照射することが必要となる。

ここでは大部分の輸入青果物の照射に適用できると思われる制動放射線（X線）の利用を主に考え、また、ケーススタディとしてグレープフルーツの照射処理を取り上げて検討を進めた。

### 6. 1 食品照射に用いる放射線の種類

食品照射には電子線、ガンマ線、X線（制動放射線）の利用が考えられる。この中から、照射する対象により最適な放射線が選定されることになる。これらの放射線の特徴をまとめると以下のようになる。

#### 1) 電子線

電子線は電子加速器を用いて発生させ、そのエネルギーは0.15MeVから0.3MeV程度の低エネルギーといわれるものから、GeVオーダーの超高エネルギーにいたるものまで得られるが、食品照射には最高10MeVまでが使用される。これは電子線照射を行った場合に発生するX線の光核反応による物質の放射化を考慮し、安全の立場からFAO/WHO合同食品規格委員会により規定されているものである。なお後述するX線による食品照射に対してはこれを発生させる電子の最大エネルギーが5MeVと規制されている。このように両者において、規定の最大エネルギーが異なるのは同じ吸収線量となる照射において誘起される放射能を定量的に評価した結果に基づいている。

電子線の利用では、そのエネルギーによって決まる比較的短い飛程の中で電子のエネルギーのほとんどが消費されるので、一般的に試料中の線量率はガンマ線やX線照射の場合に比べて桁違いに高くなり、したがって単位時間当たりに照射処理できる量は大きくなる。これは電子線利用の大きな特長である。さらに、5~10MeVの電子線を発生する加速器は現在では200kWの出力を発生できるものまで製作されており、必要があればさらに大出力化も可能な状況にあり、電子線の利用は短時間に大量処理を要する場合に有利な方法といえる。また、電子加速器ではビームのON/OFF、エネルギー、ビーム強度、ビーム走査幅等が可変で、試料に対応した適切な条件で容易に照射を行うことができる。

しかし、電子線照射では前述のように試料の深さ方向への透過できる距離（飛程）はガンマ線やX線に比べて短く、しかも飛程中での吸収線量分布（深度線量分布）が大きく変化する。図6-1は1MeV~10MeVの電子が水に入射した場合の深度線量分布を、EDMULTコード<sup>1)</sup>により求めた結果を示す。食品照射においては、照射による滅菌や殺虫等を行うために要する最小線量と、風味の変化や変質等から決まる最大線量に基づいて定められた所要の線量均一度（最大線量/最小線量）の範囲内で照射を行う必要があり、この深度線量分布は照射条件や照射方法を検討するための重要な因子となる。

## 2) ガンマ線

ガンマ線源としては主にコバルト60が用いられる。コバルト60から放出されるガンマ線はそのエネルギーが1.33及び1.17MeVと比較的高く、試料内での透過力に優れ、また、放射化が問題となる程のエネルギーではなく、常に安定した強度の放射線照射ができるのが大きな特長である。また、コバルト60はRIの中では線源製造についての経験が豊富で、密封等の健全性についての信頼性も高い。入手についてはほとんど輸入であるが、メーカーからの安定供給が確保されており、国内でも数多く用いられている線源である。

その他のガンマ線源としてセシウム137がある。セシウム137は、半減期が約30年と長く、更に安定したビーム強度が長期間にわたって得られるのが特長であるが、エネルギーが0.66MeVと低いため、透過力はコバルト60の場合に比べて劣る。また、セシウムの潮解性に起因する線源の健全性に不安があり、有用な線源とは言い難い。

RI線源には共通の特性として核種に応じた放射線強度の時間減衰があり、これを補償するためには定期的な線源補強を要する。また、RIは常に放射線を放出し続けており、その強度は制御できないため、照射装置の故障時における修理作業の場合など放射線被曝に対する配慮が重要になる。また、線源はRIの漏洩を防ぐためステンレス等で被覆、熔封されているが、この健全性の確認が常に必要とされるなど、加速器を線源として用いる場合に比べ、線源管理は面倒であると言わざるを得ない。

## 3) X線

電子線を高原子番号物質のターゲットに衝突させたときに発生する制動放射線(X線)を用いる方法、すなわち電子加速器をX線源として用いる方法<sup>2,4)</sup>も注目される。この場合、電子線出力のうちX線に変換される割合は数パーセントに過ぎず、大部分は熱として損失することになり、電子線の利用に比べエネルギー利用効率の悪い使い方ということになるが、X線の透過力がコバルト60からのガンマ線と同等又はそれ以上であり、照射コストもコバルト60の場合と比較し得る値となることが予想され<sup>5,6)</sup>このため、X線利用の有用性は高いと考えられる。さらにX線利用はビーム出力の制御ができるなど加速器を電子線源として用いる場合の特長がそのまま適用できるという利点がある。一方、短所としては上記のように電子線利用の場合に比べ、エネルギー利用効率が低くなるということのほか、加速器の出力のふらつきがそのままX線出力に反映されることである。これは常に安定した放射線を発生しているRIの場合と異なり、場合によっては加速器の故障による運転停止が起り得ることを意味している。しかし、加速器の性能は年々向上しており、この点はかなり改善され、大きな欠点とはなり得ない状況になりつつある。

上記のような各放射線の特長に基づき、検疫処理を目的とした食品照射用として適切な放射線を考えると、輸入青果物等の場合、食品照射用として許容される最大エネルギー10MeVの電子線を用いても透過力が不足するため均一照射処理ができない。そこで5MeVまでの電子線を変換して得られるX線の利用が有用になると考えられる。その理由を改めてまとめると次のようになる。

- (1) エネルギー、ビーム電流、ビーム走査幅などの調整が容易にできるので、一つの施設で種々の照射対象に応じた最適な条件で照射を行うことができる。



- (2) RI線源と異なり、線源からの放射能汚染の心配がなく食品照射に適している。  
また消費者の理解も得られやすいと考えられる。
- (3) 放出される放射線強度の自然減衰がないので、定期的な線源補充の必要がない。

ここでは植物検疫処理のための照射用線源として、電子加速器をX線源として用いる場合について検討した。

## 6. 2 X線発生技術

### 1) X線源用電子加速器

電子加速器を食品照射のためのX線源として用いる場合の所要性能は次のようになる。

- a) 食品照射用として必要な出力性能を有すること。
- b) 故障が少なく、長時間にわたる連続運転が可能な性能を有すること。

食品照射に用いられるX線のエネルギーは前述のように最高値で5MeVに規定されている。ここで用いる電子加速器は必ずしも最大加速エネルギーが5MeVの装置である必要はないが、X線源として用いる5MeV以下の運転条件において、所要プロセスに対応できる十分な出力を発生できるものでなければならない。

5MeV程度のエネルギーで大出力の電子線を発生させる加速器としては、豊富な運転実績がある直流加速方式のコッククロフトワルトン型やダイナミトロン<sup>TM</sup>型がまず挙げられる。これらの加速器は整流器とコンデンサが多段に接続されている回路に交流を入力することにより、そのコンデンサに直流高電圧を蓄積させ、これが多段に接続されていることにより数MVという高電圧を得る方式である。この高電圧が直接加速管に接続され、その電圧に相当するエネルギーの直流の電子線が得られる。これらの型の加速器は国内において、5MeV-200kWが2基、150kWが2基既に設置され、稼働を続けている。また、2~3MeVのエネルギーの電子加速器を含めるとさらに多くの台数が稼働しており、この方式の装置は大出力加速器としての実績は最も大きいと言える。これらの加速器の特長としては上記のような優れた運転実績と入力電力の電子線出力への変換効率が高いことが挙げられる。

最近、Rhodotron<sup>TM</sup>という新しい方式の10MeVクラスの大出力電子加速器が開発され、相次いで設置されている。これはベルギーのメーカーにより製作されている装置で、同軸型の単一空洞を用いるRF加速方式の加速器である。電子銃から放出された電子は空洞内で加速され、空洞外に取り付けられた偏向磁石部でその方向を反転し、再び空洞内に入り加速され、その繰り返しを10回繰り返すことにより10MeVのエネルギーを得るという原理の加速器である。この加速器から放出される電子線は連続波となる。電子エネルギーはこの加速回数により決まり、5MeV用には5回パスのところでビームを取り出す。ビーム出力については10MeVで40kW~200kW(保証性能は150kW)のタイプまでの製作実績があるが、さらに必要があれば300kW、500kWも製作可能とされている。5MeV運転時においては保証するビーム出力は下がるが設計値としては10MeVと同じ出力を出せるようになっている。このような出力は現状のコッククロフトワルトン型やダイナミトロン型加速器の出力に匹敵又はそれ以上のものとなる。現在までの設置実績は、日本での1基(設置中)を含めて8基である<sup>7)</sup>。この加速器の運転実績については今のところ明らかでないが、今

後、その出力性能等が次第に明らかになるものと思われる。この加速器は、大出力性能を有しつつ、サイズがコンパクト、高い電力効率、修理や保守がし易い構造になっていること等が特徴として挙げられ、工業照射用大出力電子線源及びX線源として位置づけられることが期待される。

このほか線型電子加速器についても放射線プロセスへの利用のため、大出力化を目指した開発が進められ、SバンドのRFを用いる装置で10MeV、25kW、Lバンドでは50kWの加速器が稼働している。この型の加速器は加速器本体がコンパクトであるということが大きな特徴であり、必ずしも大出力を要しない場合には適した加速器である。

## 2) X線発生用ターゲット

X線発生用ターゲットは電子加速器に取り付け、電子線を入射させることによりX線を発生させる装置であり、電子をX線に変換するX線発生部及び入射電子エネルギーのエネルギー損失により発生する熱を除去するための冷却部より構成される。図6-2はこのX線発生用ターゲットの基本構造図を示す。

このX線発生用ターゲットとして備えるべき基本的な要件として次の2点が挙げられる。

- (1) 電子線をX線へ変換する率が高いこと、
- (2) 長時間の利用にに対する耐久性に優れていること。

ここで変換率が高いということは同一の電子加速器を用いた場合のX線出力が大きいということであり、これにより処理速度の増大が図れ、処理コストが低下するという重要な因子である。

電子線が物質中を進む過程で制動放射線の発生のために単位距離当たり失うエネルギー、すなわち放射阻止能  $-(dE/dx)$  rad は次式で与えられる<sup>8)</sup>。

$$-(dE/dX) \text{ rad} = N(E+mc^2) \frac{Z(Z+1)}{137} \left( \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \times \left\{ 4 \ln \frac{2(E+mc^2)}{mc^2} - \frac{4}{3} \right\} \text{ [erg/cm]}$$

ここでNはターゲット物質の1cm<sup>3</sup>当たりの原子数、Eは入射電子の運動エネルギー、mは電子の静止質量、cは電子の電荷(esu)、Zは原子番号、eは光の速度である。上式より明らかなように放射阻止能は物質の原子番号のほぼ2乗に比例する。そのため、変換率を高くするためタンタル、タングステン、金など高原子番号物質の使用が有利となる。表6-1にこれらの物質についてX線発生体として用いる場合に関する特性を示す。これらはターゲットのX線発生体として必要な薄い板材が得られるとともに、融点などの特性の点から適切な材料といえる。ターゲットの設計に当たってはこれらの特性を考慮し、最適な構造とするよう考慮する必要がある。

X線発生用ターゲットを用いて効率よくX線を得るには、上記で述べた材料の選定の他に厚さ等の構造についての考慮も重要である。ターゲットのビーム入射面の形状は電子加速器のビーム取り出し窓と同様の、走査されたビームがすべて入射できるような長方形とし、ビームの進行方向については図6-2に示すような構造で、各部の厚さを最適な値とするのが一般的な考え方である。

図6-3は5MeVの電子がタンタルに入射した場合の深さに対する入射電子線のエネルギー堆積及び前方方向に放出されるX線のエネルギーの電子エネルギーに対する割合をETRANコー

ドにより算出した結果を示す。この結果、この場合では約  $1.5\text{g}/\text{cm}^2$  (約  $0.9\text{mm}$ ) の厚さの時に最大のX線発生率が得られることがわかる。しかし、この厚さでは入射した電子線の一部は透過してターゲット後方のX線照射場に混在することになり、照射試料内の線量不均一を招くので問題となる。そのため、このX線発生体はX線発生のために最適な厚さとし、これに冷却水層および底板を加えて、入射電子線をすべて吸収する厚さとするのが最適な構造となる。

図6-4に筆者らが以前設計を行った5MeV、300kW、ビーム走査幅120cmの電子加速器に取り付けて使用するための実用ターゲット<sup>9)</sup>の形状を示す。ここではX線発生体はタンタル(1mm厚)とし、冷却水の水压に耐えられるよう平板を湾曲に曲げた形状にしている。このターゲットのX線発生体の寸法は、長さ130cm、幅15cm、湾曲の程度、すなわち曲率半径20cmである。また冷却水層厚は8mm、底板はステンレス製で1.5mm厚とした。

X線発生用ターゲットの取付けは電子加速器のビーム取り出し部に直接取り付ける方式と、ビーム窓の前方に別に取り付ける方式とがある。前者では薄く、機械的に弱いビーム窓がないので加速器の保守上有利であり、X線照射専用利用する場合には適している。また後者では加速器を電子線照射用/X線照射用と両用に用いることができる特長がある。

なお、どちらの方式においても、ターゲットを取り付けることにより電子線の後方散乱が大幅に増えることによりスキャンホン部やビーム窓のフランジ部等の温度上昇が激しくなるため、電子線源としての利用時に比べこれらの部分の冷却能力の増強が必要となる。

### 6.3 X線照射技術

電子加速器にターゲットを取り付け、X線源として用いる場合の照射技術について考える。ここではコンベア上で照射する場合の試料内の線量均一度(最大線量/最小線量)、処理速度、電子線のエネルギーに対する利用効率等について、線量計算コードを用いて検討を進めた。

試料は輸入青果物とし、これが生産者から、輸送、検疫処理、そして小売店までの流通に用いられる段ボール製箱に詰められている状態で照射するものとする。

X線照射における線量計算には、原研で開発したDEXコード<sup>10)</sup>を用いた。DEX(Design of Bremsstrahlung X-ray Irradiator for Industrial Process)はX線の発生・吸収を近似式で求める計算コードで、1~5MeVの電子線がBe~Auの原子番号の金属ターゲット物質に入射した場合に発生するX線のエネルギースペクトルと微分強度、被照射物質内の吸収線量、照射装置設計のための移動照射時の吸収線量の計算が可能である。

このDEXコードを用いて求めた空間線量率分布と測定結果の比較の一例を図6-5に示す。ここでは電子のエネルギーを3MeVとし、ビーム電流10mA、ビーム走査幅60cmとし、ターゲットとしてタングステン0.5mm厚、冷却水層厚5mm、ステンレス製底板1mm厚からなる平板型を用いた。ターゲット底板部から20cmの位置におけるX方向(ビーム走査方向)及びY方向(ビーム走査に対し直角方向)の線量率分布で、測定はX線用電離箱により行った。計算値と測定値は良い一致を示し、本コードの有用性がわかる。また、X線の空間線量率分布は加速器から放出される電子線と類似していることがわかる。

電子線のX線への変換率は前述のように5MeVのエネルギーでタンタル等の高原子番号物質のX線発生体を用いても高々8%程度と低い値であり、照射コスト高の一因となっている。照射コス

トの低減化は放射線プロセス開発の主要課題の一つであり、そのため、X線の利用においては照射方法を工夫し、より高い利用率とすることが重要である。図6-6に示したような線量率分布となるX線場を用いて照射を行うにはコンベアを用いてY方向に移動させて行う方法が試料内の線量を均一にし、多くの試料を連続的に処理するための方法として適切であり、さらにX線の利用率を高くするため多段式とすることが有利である。またX方向の線量率分布において端部の低線量率となる部分も利用することが利用率の向上につながる。そのためには列についても複数とし、異なったパスの照射により低線量部分は加算され、結果的に均一の線量になるよう配置する事が必要となる。田中等<sup>11)</sup>は5MeV、60mA、ビーム走査幅120cmの電子線をX線に変換して、密度0.1~0.6g/cm<sup>3</sup>の水等価物質を照射する場合を仮定して照射方法の検討を行った。図6-6は検討の基本となる照射方法で、2列4段式を示し、試料は、1-1→1-2→2-1→2-2→・・・→4-2と移動し、次に試料箱の反転を行い、1'-1→1'-2→2'-1→2'-2→・・・→4'-2と移動して照射を行う。ここでは試料箱の厚さを40cmとし、最適な箱の高さについての検討を行っている。図6-7は箱の高さと試料の線量均一度との関係を示す。この結果、線量均一度は試料密度によって幾分か傾向が異なるものの、高さ100cm付近で最大値(均一性が悪い)を、130~140cmで最小値(均一性が良い)を示すことがわかる。また図6-8は、試料箱の高さと放射線利用効率、すなわち(必要な最低線量×処理量)/電子線出力との関係を示す。この結果は高さ120~140cmで最大値を与える。上記の検討より、最適な照射方法は許容される線量均一度の範囲内で、できるだけ高い放射線利用効率を得られるよう、ビーム走査幅と試料箱の高さとの関係を求めることにより決定できる。

流通に用いられる箱の寸法はそれぞれの内容物により異なるので、上記の条件になるようにするにはビーム走査幅を調整する必要があるが、これが容易にできるのは電子加速器を用いることの大きな特長である。

上記の検討では、各箱が全パスを通過した後、各箱の照射面を反転し、その状態でさらに全パスを通過する方法とすることになっているが、青果物の種類によっては反転時のショックによる損傷が問題となることが予想される。このような試料は箱の両面からの照射を必要とし、2台の加速器を用い、試料の反転なしに両面から照射ができるように配置することが必要となる。

#### 6. 4 青果物を照射する場合のケーススタディ

##### 1) グレープフルーツの検疫処理

グレープフルーツは年間28万トン(1990年)が主に米国から輸入され、現在は臭化メチル燻蒸により検疫処理が行われている。検疫処理の目的はミバエ類の殺虫である。

ここで、検疫処理の典型的な例として、このグレープフルーツをX線照射によって行うことについて上記のDEXコードを用いて検討を行う。

ミバエの殺虫のための吸収線量は最小値で250Gyとする。これは米国農務省で採用している値<sup>12)</sup>である。ミバエはこの程度の照射によっては即死しないが、1週間程度の低温貯蔵条件において死滅する。また、上限は風味の変化が生じない範囲である500Gyとする。したがって照射を行う場合の線量は最小値を250Gyとし、線量均一度、すなわち[最大値/最小値]が2以下となる照射を行うよう設計する必要がある。グレープフルーツは収穫後の輸送、検疫処理、そして小売り店までの

流通において段ボール製の箱に詰められている。図6-9は小売店で求めた箱の外観写真であり、寸法は、長辺44cm、短辺29cm、高さ25.5cmである。重量は計16kg（見かけ比重0.5）であった。写真からわかるようにこの箱には直径2.5cmほどの穴が16箇所あいており、青果物自身の呼吸や燻蒸用ガスの流入、排出がし易いようになっている。

## 2) X線による照射方法

照射には5MeVの電子線がタンタルを発生体とする湾曲型のターゲットに入射したときに発生するX線を用いるものとする。ここに用いる加速器のビーム取り出し部は最大ビーム走査角が $60^\circ$ で、その場合に走査幅120cmの電子ビームが試料位置で得られるような走査管を有するものを考え、試料箱の寸法や照射の列数に応じて自由にビーム走査幅を変化させて照射を行えるものとする。X線発生用ターゲットの断面の構造はタンタルの厚さが1mm、冷却水層の厚さが8mm、そしてステンレス製の底板の厚さが1.5mmとする。この厚さは図6-2に基づくX線の発生率や必要な機械的強度を考慮して決定した。ターゲットのX線発生体の寸法のうち、長さについては、加速器から走査されて放出される電子線が十分に入射できる長さである130cm程度とする。また幅についてはビームスポット径より十分に大きい値とする必要があり、ここでは15cmとする。

加速器から放出される電子線のビーム電流については計算上1mAとし、考察の中で適切な値を求めるものとする。

このターゲットを用いた場合に発生するX線のエネルギースペクトルをDEXコードにより算出した結果を図6-10に示す。このエネルギースペクトルは0.4MeV付近にピークがあり、高エネルギー側に長く尾を引いた形となることがわかる。このエネルギースペクトルから求めた、平均の光子エネルギーは1.01MeVである。

X線は、ここでは垂直方向のビームを用いるものとし、コンベアに試料箱を搭載し、試料箱の短辺方向に移動させて照射を行う。

照射方法として次の2種類を考え、それぞれの場合についての箱の中の線量分布、線量均一度、処理量、利用効率等をDEXコードにより求めた。

- (1) X線発生用ターゲット面におけるビーム走査幅を40cmとし、2列、1, 2, 4段、(両面照射)。
- (2) X線発生用ターゲット面におけるビーム走査幅を80cmとし、2箱を並べて1組として同時に移動するようにして、2列、1, 2, 4段、(両面照射)。

上記コンベアラインにおける試料箱配置とその動作の方向(段数2の場合)を図6-11に示す。各試料箱はここに示す1-1からすべてのパスを●印をつけた位置関係で通過後、箱の上、下面の反転を行って再び1-1(1'-1)に戻り、上記同様すべてのパスを通過して照射が完了する。この場合の列の間隔は2cm、段の間隔は5cmとする。この場合の電子線の走査幅については前項での検討に基づき、箱の中の線量均一度や電子線利用率を考慮し、これらが最適な値となるよう決めたものである。すなわち、前項で、ビーム走査幅が120cmの場合に試料箱の長さ(前項では高さと表現)が130~140cmとするのが最適(利用効率が最大)となり、本試料箱の寸法(長辺)が44cmであるので、上記の関係に基づき、単純に2列の場合はビーム走査幅を40cmとした。し

かし、ビーム走査幅が 40cm のように小さい場合にはビーム窓の単位長さあたりの許容ビーム電流の関係から、加速器から十分なビーム電流量が取り出せない可能性がある。一般的にはこの許容ビーム電流は 0.5mA/cm といわれており、特別な工夫をしない限りビーム走査幅 40cm では 20mA が最大値となる。

電子加速器を X 線源として用いる場合にはできるだけ大電流がとれるような配慮が必要であり、そのためには走査幅を広くするが必要になる。このような考えの下で照射方法を考えると、(2) の 2 つの箱を並べて 1 組として照射を行う方法も有効と思われる。この場合では試料箱の長辺の寸法は 88cm として扱い、ビーム走査幅は 80cm とする。

試料のグレープフルーツは水等価物質と考え、密度 0.5g/cm<sup>3</sup> で各箱の中に均一に詰まっているとして扱う。

図 6-12 及び 6-13 はそれぞれ (1)、(2) の 2 段として照射した場合の箱中の等線量分布曲線を示す。ここでは箱内の最低線量が 250Gy となる照射を行っている。この線量分布は、段数が変化しても大きな変わりはなく、線量均一度は 1.16 以内であり、十分均一な照射ができることを示す。また、表 6-2 は各照射条件に対する線量均一度、処理速度、処理量及び電子エネルギー利用率の値を示す。

上記の結果より、ビーム走査幅を適切な値とし、試料箱を 2 列とする照射方法により線量均一度が良く、また X 線の利用率の高い照射ができることがわかる。さらに、段数を増やすことにより処理速度や利用率が増加する。

しかし、段数を増やすことはコンベアラインが複雑になるということでもあり、設備費の増大やコンベア自身による X 線吸収の増加も考えられ、適切なコンベアシステムの設計が必要となる。

上記の輸入青果物検疫処理のための X 線照射施設の想定図の一例として垂直ビームを用いる方式の施設を検討した。その平面図を図 6-14 に示す。ここでは、照射室へ導かれた試料はコンベアの照射モード選択により、所定の列数及び段数の照射を受け、さらに試料反転装置の機能を組み合わせて、照射がすべて終了したところで照射室より搬出される。この場合、垂直ビームにより試料の上面より照射される方式であり、試料の移送において、ラインに勾配をつけることにより重力に基づく自然移送を用い、所要電力の削減が図れることが期待できる。しかし、照射部のコンベアラインの設定においてはスペースが限られるので、異なったサイズの箱の照射に対応するのに困難が生じる可能性もある。

これに対し、水平方向にビームを放出する方法ではハンガー式のコンベアを用いて照射を行うのが一般的となろう。この方法はガンマ線照射施設において通常採用されており、ターゲットから試料までの距離、照射体の段数の増減などへの対応が容易である。また、試料箱のビーム入射面の反転も試料にショックを与えることなくでき、X 線照射のためのコンベアシステムとしては適していると考えられる。

### 3) 所要照射施設

さて、4 章で述べたように青果物は年間約 150 万トンが輸入され、このうち 100 万トン余りは臭化メチル薫蒸等による検疫処理が行われている (1996 年)。これを臭化メチルの使用禁止に伴い、放射線照射法を代替法として用いると仮定した場合の設備の性能や設置台数について考える。

輸入青果物には多くの種類があるが、これをここで検討したグレープフルーツに代表させ、放射線を加速器からの 5MeV 電子線を X線に変換して用いることとする。また、コンベアによる照射方法として 2 箱を並べて 1 組とする 2 列 2 段の方式を採用するものとする。

上記の計算では、ビーム電流 1mA の場合で処理量は 4.3 トン/h であるから、これを 20mA とすると 86 トン/h となる。この条件で 1 日 5 時間、年間 200 日の照射運転を行うとすると、加速器 1 基当たり年間 86,000 トンの処理が行えることになる。このような施設を全国に 12 基設置することにより約 100 万トン/年の処理が行えることになる。

電子エネルギー 5MeV、ビーム電流 20mA の性能を有する電子加速器については、6. 2 の 1) で述べたように、これ以上の出力で稼働している装置も既に存在している状況であり、特に問題とはならない。またこのような加速器に取り付けて大出力 X線を発生するターゲットについても、一例として 6. 2 の 2) で述べた湾曲型ターゲットの設計が完了している。

上記は極めて大雑把に照射施設の所要出力性能や必要な設置数等を求めたものであるが、青果物の種類やそれぞれに応じた照射方法の採用などに的確に対応できるようにするため、もっと小出力の照射施設を数多く設置することも一つの考え方である。

## 6. 5 照射技術に関する今後の検討課題

### 1) 線量評価法の確立

食品照射の実用化が定着していくための基本要素として照射された試料の吸収線量が定められた範囲内に確実にあることと、それを確認する手段が確立されていることがまず挙げられる。そのためには線量を精度良く測定できる線量計があることと、測定に基づく試料全体の線量についての評価法が確立していることが必要である。

吸収線量 100~500Gy の領域に適用できる線量計として、現状ではアラニン線量計<sup>13)</sup>や Gaf 線量計<sup>14)</sup>等が挙げられるが、さらに高精度、安価、測定が容易な線量計の開発は今後の検討課題である。これらの線量計を用いて行うべきことは、まず所定の照射条件の下で

- (1) 箱の中での線量分布測定。
- (2) 箱の中の各試料個体中での線量分布測定。

であろう。これらの測定は繰り返し行い、そしてこの結果を解析し、所定の線量及び均一度が十分に達成できる照射方法や条件の決定を行う。

また、上記の測定実験においてはどこの部位において線量の最大、最小値が得られるかを明らかにし、その後の定常的なモニタリングを行う場合に最適な位置を決めることも重要である。

上記の線量評価やモニタリング法を確立することは、特に食品照射を実施する場合に基本となるものであり、これまでの国内外での食品照射における方法や医療器具の滅菌照射におけるバリデーションの手法等を参考にして今後検討すべき課題である。

### 2) 効率的コンベアシステムの設計

照射処理においては、試料に対し所定の線量が、定められた線量均一度で、また放射線の利用効率が高い状態で実施できるよう、コンベアシステムを構築する必要がある。さらに、食品であ

るが故、搬送中の衝撃が少ないような配慮も必要となる。このような要求に対するコンベアシステムの設計は今後の検討課題である。



## 7. まとめ

本報告書は、環境資源利用研究部及び放射線高度利用センターのメンバーにより平成9年に結成された食品照射ワーキンググループのなかで、1年余にわたり検討してきた議論の成果をまとめたものである。その内容を項目で分けると、以下のとおりである。

- (1) 食品照射に関するこれまでの研究の総括
- (2) 食品照射の実用化の現状把握とわが国における必要性の予測
- (3) 想定される実用化品目とそれらについての技術的検討
- (4) 食品照射のための放射線源及び照射技術に関する検討
- (5) 輸入青果物検疫処理のためのX線照射技術に関する検討 (ケーススタディ)

わが国では、1967年に開始された食品照射に関する原子力特定総合研究によって、'72年に馬鈴薯の発芽防止処理が認可され、世界で初の食品照射の商業化に成功したが、一部消費者の反対運動等によってその後の食品照射研究は低迷した。しかし、照射食品の安全性については再評価試験等が行われ、その健全性には問題のないことが再確認された。'83年に特定総合研究が終了した後は国内における食品照射研究の規模は縮小したが、原研等の2、3の研究所で基礎研究が継続されている。そのなかで、食中毒菌や香辛料の放射線殺菌の有効性が明らかにされるとともに、食品照射のデータベースが整備されてきた。

一方、国外の食品照射実用化の動きは、10kGy以下の線量ではいかなる食品に対しても健全性試験は不要であるというFAO/IAEA/WHO合同委員会の結論が出た1980年の頃から世界各国で活発となり、'90年以降多くの国で実用化が進んでいる。'97年には、食品照射許可国は41カ国に達し、100品目以上の食品類が許可されている。なかでも、米国、フランス、中国等が実用化に積極的である。

こうした状況の中で、わが国においても最近、香辛料、生薬、輸入青果物、家畜飼料等について放射線照射処理法の実用化の要望が民間企業の中から出てきた。生薬については、厚生省傘下の研究機関が実用化に向けて規格基準の作成作業を進めている。この中で、わが国が取り組まなくてはならない最も重要な課題は、輸入青果物の検疫処理に使用されている薰蒸剤としての臭化メチルの使用禁止に伴う代替処理法としての放射線処理法の開発である。米国やEUでは、2005年までに臭化メチルの使用を禁止する方針を出しており、各国では緊急の課題として代替処理法の開発に取り組んでいる。放射線法は最も有力な代替法としてクローズアップされており、米国では検疫に放射線処理法の採用を決定しており、農務省が作成した放射線検疫処理の規格基準に従って各州で照射した生鮮果実の消費者テストをすでに行っている。

わが国における輸入青果物の検疫処理には、臭化メチル燻蒸とともに、低温処理や蒸熱処理が採用されてきたが、サクランボ、ネクタリン、グレープフルーツ、オレンジ類などのいくつかの品目については、生産地域にもよるが品質低下あるいは殺虫の不完全性による病害虫の国内侵入防止の観点から、それら処理法の適用は難しく放射線法のみが有効である。また、臭化メチル燻蒸による検疫処理を実施している穀類のうち、豆類やトウモロコシについても放射線処理法以外に有望な代替法がない。輸入青果物業界はすでに数年前から放射線法の導入を要望しており、そ

のための調査を開始している。

放射線法による実用化が有望とされる以上の生鮮果実や野菜類の検疫処理における課題を照射効果、照射技術、照射検知法、及び安全性の4つの観点から整理した。

1. 照射効果では、殺虫線量、青果物の品質と線量との関係、及び青果物中の残留農薬に関する放射線影響についてデータが不足している。
2. 照射技術では、検疫処理を上陸した港で実施しなくてはならない制約があるため、これまで広く用いられてきた RI を利用するガンマ線照射法については、加速器放射線（電子線及び制動放射線）に比べて、照射施設の立地が容易ではないことが予想される。特に新しい照射手段としての電子線や制動放射X線を利用する場合、各青果物に適合した均一で効率的な照射手段、線量計測における高精度化等が課題となるとともに、穀類等の照射では、流動物に対応した連続的な照射技術や線量評価等の品質管理技術が課題となる。
3. 照射検知法では、これまで有望とされていた ESR法やルミネッセンス法が適用困難であるため、新しい手段の開発が望まれている。一つの可能性として種子の発芽試験があるが、定量性において優れ、かつ種子がないものでも適用可能な手段が望ましい。
4. 照射食品の安全性については国際的にすでに実証されており、課題は残されていない。

これらの解決すべき課題のうち、最も重要な課題は殺虫線量の決定及び照射後生き残った害虫の死滅促進条件の決定であるが、これらの害虫は国内に持ち込めないため、その実施条件は大きく制約される。したがって、原研で実施するのに相応しい研究課題としては、

- (1) 定量性に優れ、かつ広い適用性が期待される新しい照射検知法として、DNA 損傷分析法を検討するとともに、果実等については種子の発芽試験法も検討する。
- (2) 殺虫線量以上照射した輸入生鮮果実や野菜類の品質に与える影響並びに照射後の常温、及び低温貯蔵効果を明らかにする。具体的には、品質を維持できる線量の上限及び貯蔵中の褐変の有無、ビタミンCや還元糖の変化、腐敗性、食味に与える影響等を調べる。
- (3) 電子線、制動放射X線による生鮮果実や野菜類の安定で効率的な照射方法及び品質管理に必要な線量評価技術を検討する。
- (4) 副次的な照射食品の安全性に関わる課題として、生鮮果実や野菜類の残留農薬の放射線による分解及び食品成分との化学反応の有無等について検討する。

これらの研究課題のうち、照射技術については、検疫処理の新しい手段として有望と考えられる制動放射X線について、他の放射線法と比較して発生法や照射方法について検討を行った。また、グレープフルーツ(殺虫線量 250Gy、風味に変化を生じない線量 500Gy)を対象品目として、すでに開発したX線量計算コードを用いて 5MeV ピークの制動放射X線による殺虫処理のケーススタディの検討を行った。その結果、電子ビーム出力 100kW の照射施設では、毎時 86 トンの照射が可能であることがわかった。

謝辞

DEXコードを用いて線量計算を行うに当たり、日本原子力研究所高崎研究所放射線高度利用センター利用計画課長 田中 進 氏には懇切な指導を頂いた。ここに感謝の意を表する。

## 参考文献

2. これまでの食品照射研究の総括と実用化の現状
  - 1) 伊藤 均：照射食品における国内・国外の動向について，RADIOISOTOPES, 36(6), 290 - 299(1987).
  - 2) 伊藤 均：食品照射の最近の話題－ICGFI総会に出席して－，放射線と産業，70号，27 - 31(1996).
  - 3) 伊藤 均：食品照射の新しい展開と可能性，原子力eye, 44 (8), 60 - 63(1998).
  - 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，(1997)。
  
3. わが国における食品に関する問題と食品照射の有効性
  - 1) 中北 宏：「ポストハーベスト農産物と農薬」，科学と生物，Vol.31, No.10, 1993.
  - 2) 楯谷昭夫：「臭化メチルとオゾン層について」，植物防疫，47, 37, 1993.
  - 3) 伊藤 均：「食品照射の最近の話題」，放射線と産業，No. 70, 1996.
  - 4) 伊藤 均：「食品照射の新しい展開と可能性」，原子力eye, Vol. 44, No.8, 1998.8. .
  
4. 各品目における食品照射の必要性の検討
  - 1) 全国植物検疫統計表（1996年度版）
  
5. 検疫処理を目的とした放射線による殺虫
  - 1) 楯谷昭夫：熱帯性果実の放射線処理，食品照射，8(2)，51 - 65(1974).
  - 2) 食品照射研究協議会事務局：放射線殺虫研究会について，食品照射，8(2)，66 - 67(1974).
  - 3) 団野皓文：農産物の放射線による防疫技術，農業および園芸，59(3)，69 - 76(1984).
  - 4) J. W. Balock, A. K. Burditt Jr., S. T. Seo and E. K. Akamine：Gamma irradiation as a quarantine treatment for Hawaiian fruit flies, *Econ. Ento.*, 56, 42-46(1968).
  - 5) 食品照射研究運営会議資料編：貯蔵害虫の放射線殺虫，放射線照射による米の殺虫に関する研究成果報告書，昭和52年.
  - 6) The Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture: Insect disinfection of food and agricultural products by irradiation, STI/PUB/895, IAEA, Vienna, 1991.
  - 7) 林 徹：臭化メチルをめぐる国際情勢と放射線照射，食品照射誌，31，19 - 21 (1996).
  - 8) 吉田忠晴，深見順一，福永一夫，松山 晃：キクイムシおよびアズキゾウムシの放射線による防除，食品照射，7(1)，76 - 81(1972).
  - 9) 大石圭一，岡 重美，平沖直治：アニサキス幼虫の死滅効果，食品照射誌，6(1)，54 - 58(1971).
  - 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.

- 1 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).
  - 1 2) 食品照射研究運営会議資料編：照射小麦の製パン及び製めん適性，放射線照射による米の殺虫に関する研究成果報告書、昭和58年.
6. 検疫処理のための照射技術の検討
- 1) 多幡達夫：“0.1～10 MeV電子の物質中での深度線量分布”，放射線化学, 53, 2 (1992).
  - 2) Sunaga H. et al.：“Study of High-power X-ray Source for Radiation Processing”，Proceed. The 3rd Japan-China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, Saitama, Japan, 222 (1987).
  - 3) Cleland M. R. et al.：“Advances in X-ray processing Technology”，Radiat. Phys. Chem., 35, 632 (1990)
  - 4) Takehisa M et al.：“Present Status of Industrial X-ray (Bremsstrahlung) Technology and Advantages of X-rays as a Food Irradiation Source”，IAEA-SM-328/22, 243 (1993).
  - 5) Cleland M. R. and Pageau G. M.：“Comparisons of X-ray and Gamma-ray as a Sources for Industrial Irradiation Processes”，Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B24/25 967, (1987).
  - 6) Yotsumoto K. et al.：“High Power Bremsstrahlung X-ray Source for Radiation Processing”，Radiat. Phys. Chem, 31, 363 (1988).
  - 7) A. ヘレール 他：“IBA社工業用高電圧・高出力電子線加速器ロードトロン”，放射線と産業, 78, 27 (1998).
  - 8) Whyte G. N.：“Principles of Radiation Dosimetry” JOHN WILEY & SONS, INC. New York, 17 (1959).
  - 9) 須永博美 他：JAERI-M 89-182, “工業用大出力X線発生ターゲットの開発” (1989).
  - 1 0) 田中進 他：私信、JAERI DATA/CODE 投稿準備中.
  - 1 1) 田中進 他：“工業用大出力X線照射施設”，第23回理工学における同位元素研究発表会要旨集, 36 (1986)
  - 1 2) International Consultative Group on FOOD Irradiation (ICGFI)：Addendum to the Report of the 14th ICGFI Meeting, “Status Reports on Food Irradiation by Member Countries of the International Consultative Group on FOOD Irradiation (ICGFI)”，Mexico (1997).
  - 1 3) Kojima T. et al.：“Recent Progress in JAERI Alanine/ESR Dosimetry System”，Radiat. Phys. Chem. 42, 813 (1993).
  - 1 4) McLaughlin W. L et al.：“The Use of a Radiochromic Detector for the Determination of Stereotactic Radiosurgery Dose Characteristics”，Med. Phys. 21 (3), 379 (1994).

表 2-1 食品照射の応用分野

目的と線量	線量(kGy)	対象品目例
低線量照射(1kGy まで)		
○発芽防止	0.02~0.15	馬鈴薯、タマネギ、ニンニク他
○殺虫及び害虫不妊化	0.10~1.0	穀類、果実類、豚肉他
○熟度調整	0.50~1.0	熱帯果実類、そ菜他
中線量照射(1~10kGy)		
○貯蔵期間延長	1.0~7.0	鮮魚、魚肉加工品、畜肉加工品、ミカン、イチゴ他
○食中毒防止	3.0~10.0	冷凍魚介類、鶏肉、冷凍卵他
○殺菌(衛生化)	5.0~10.0	香辛料、乾燥野菜、配合飼料、魚粉他
○物性改良	2.0~10.0	寒天生産、ウイスキー熟度促進、乾燥野菜、デンプンの低粘度化他
高線量照射(10~50kGy)		
○完全殺菌	30~50	ハム、ベーコン、鶏肉、病院患者食、無菌動物用飼料、宇宙食

(世界保健機関(WHO):『照射食品の安全性と栄養適性』,コープ出版,1994.4.)

表 2-2 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、食品添加物としての扱いは妥当でないと勧告。
1977	FAO/IAEA の飼料の放射線殺菌に関する専門家会議で 50kGy まで照射された動物飼料の安全性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 2-3 食品照射研究の対象品目と期間

品 目	目 的	研 究 期 間
馬 鈴 薯	発芽防止	昭和 42 年度～44 年度
タマネギ	〃	昭和 42 年度～53 年度
米	殺 虫	昭和 42 年度～54 年度
小 麦	〃	昭和 44 年度～54 年度
ウインナーソーセージ	殺 菌	昭和 43 年度～55 年度
水産練製品	〃	昭和 44 年度～55 年度
み かん	〃	昭和 45 年度～56 年度

(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), 1987.)

表 2-4 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った	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	"
ウイソ・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。	特になし。	励起蛍光スペクトルの変化による判別の可能性あり	"	"	"	"	1969-1980	"
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	国立栄養研究所	国立衛生試験所	(財)食品薬品安全センター	—		

※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://takafair.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 2-5  $^{60}\text{Co}$  線による照射コスト (日本国内)

品目	照射目的	線量(kGy)	照射コスト(円/kg or 円/1kg)
馬鈴薯	発芽防止	0.06-0.15	2**
米および小麦	殺虫	0.2-0.5	0.25-1*
水産練製品	貯蔵期間延長	3	20*
ウインターソーセージ	貯蔵期間延長	3-5	30-40*
実験動物飼料	滅菌	30	150**
医療用具	滅菌	25	140**

注 1 : \*印は、原研でのコスト試算である。

注 2 : \*\*印は、昭和 60 年当時の照射コストである。

(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 2-6 食品照射が実用化している主要な国と食品類

国名	食品類	処理量(t/年:概算値)
アルゼンチン	香辛料、乾燥野菜	650
ベルギー	香辛料、乾燥野菜	19,000
カナダ	香辛料等	4,500
チリ	香辛料等	450
中国	ニンニク、香辛料等	50,000 以上
フランス	香辛料、乾燥野菜	20,000 以上
ハンガリー	香辛料等	1,000
インドネシア	香辛料等	500
イスラエル	香辛料等	1,200
日本	馬鈴薯	15,000
韓国	香辛料、朝鮮ニンニク粉末	2,000
オランダ	香辛料、冷凍魚介類、鶏肉	20,000 以上
南アフリカ	香辛料、ニンニク等	10,000 以上
タイ	発酵ソーセージ、香辛料	100
イギリス	病人食、香辛料	若干量
米国	香辛料、果実、鶏肉等	30,000 以上

(伊藤均:『食肉製品における電子線殺菌の可能性』,食肉加工品の品質管理技術 月刊フードケミカル,1998.6 月号.)

表 3-1 臭化メチルの使用の現状

## 1. 世界主要国における臭化メチル使用量 (1992年、t)

国名	使用量 (t)	国名	使用量 (t)
アフリカ (全体)	1,838	イスラエル	3,500
オーストラリア	848	イタリア	7,500
ベルギー	300	日本	9,430
カナダ	270	オランダ	39
デンマーク	33.3	南アメリカ (全体)	621
フランス	1,604	スペイン	3,605
ドイツ	100以下	イギリス	550
インド	135	米国	28,100
インドネシア	135		

(伊藤:『食品照射の最近の話題』,放射線と産業, No. 70, 1996.)

## 2. 日本における臭化メチル使用量 (1990年)

	生産量	土壌薫蒸	検疫
臭化メチル	8,000t	4,700t	2,800t

(中北:『ポストハーベスト農産物と農薬』,化学と生物, No. 10, 1993.)

表 3-2 日本における食中毒発生状況 (平成8年度) \*

\* 魚介類 17%, 肉、卵類 6.5%

原因菌	件数	患者数	死者数
サルモネラ菌	350	16,334	3
ブドウ球菌	44	698	0
ボツリヌス菌	1	1	0
腸炎ビブリオ菌	292	5,241	0
病原大腸菌	179	12,094	8
ウエルシュ菌	27	2,144	0
セレウス菌	5	274	0
エルシニア菌	0	0	0
カンピロバクター	65	1,557	0
ナグビブリオ菌	3	36	0

(伊藤:『食品照射の新しい展開と可能性』,原子力 eye, 44, No. 8, 1998. 8.)

表 3-3 輸入食品の検疫に用いられる処理法の比較

項目 種類	透過性	殺虫効果	適用品目	残留毒性	環境への影響	品質への影響	処理条件 (代表例)	経済性
臭化メチル	○	○	果実、 穀類	弱、発癌性 物質	オゾン層 破壊	果実によっ ては損傷あ り	密封、 果実:2-48 時間 穀類:1-7 日	○
二臭化メチル	○	○	果実	強、発癌性 物質	労働災害	傷害、少	密封、 2-4 時間	○
ホスフィン	×	○	穀類	強、毒性 発火性	耐性害虫 出現	少	密封、 1-7 日	○
蒸熱法	×	△	果実	なし	なし	果実の損 傷、大	果実の中心温度 47.2℃、7 時間	×
低温処理法	×	×	果実	なし	なし	果実の損 傷有り	果実の中心温度- 0.6℃ 12 日以上	×
CO <sub>2</sub> 処理法	△	×	穀類	なし	労働災害	少	長期密封	×
放射線処理法	○	○	果実、 穀類	なし	なし	少	連続処理 0.2-0.5kGy	○

表4-1 照射実用化候補品目

項目 品目	必要線量	使用線源	従来処理法	年間処理量(概算)	その他
飼料原料 穀類 魚粉・骨粉	0.2~0.5kGy 5~8kGy	電子線	臭化メチル 一部蒸気殺菌 (抗生物質多用)	1,500万トン/年 50万トン/年	法律規制外*
生薬	5~15kGy	電子線	無処理	3万トン/年	法律規制外*
香辛料	5~10kGy	電子線	酸化エチル 気流殺菌	3~5万トン/年	約20カ国 で実用化
輸入青果物	0.2~0.5kGy	X線	臭化メチル 二臭化エチル	150万トン/年	蒸熱法・低温 処理:品質劣 化、コスト高
輸入豆類	0.2~0.5kGy	X線 電子線	臭化メチル	500万トン/年	
輸入切り花	0.2~0.5kGy	X線	臭化メチル	30万トン/年	
輸入冷凍肉	3kGy	X線	無処理	100万トン/年	サルモネラ、大 腸菌
輸入冷凍 魚介類	3kGy	X線	一部蒸気殺菌	50万トン/年	
輸入木材	0.2~1kGy	X線, $\gamma$ 線	燻蒸処理	1600万m <sup>3</sup>	

\*食品衛生法による。

表4-2 輸入植物検査実績

種 類 \ 項 目	輸 入 量	消 毒 量	消毒率 (%)	対 象
切り花	1,201,百万 個	169, 百万 個	14.1%	検疫
生果実	1,547, 百万 kg	1,177, 百万 kg	76.1%	検疫
野菜	1,046, 百万 kg	238, 百万 kg	22.8%	検疫
トウモロコシ (飼料)	15,876, 百万 kg	9,874, 百万 kg	62.2%	殺菌 ※注 1
大豆	4,945, 百万 kg	2,645, 百万 kg	53.5%	検疫
生薬・香辛料	694, 百万 kg	120, 百万 kg	17.2%	検疫
油料・肥飼料	7,607, 百万 kg	1,330, 百万 kg	17.5%	検疫

※注 1) 1997 年より検疫対象外。(全国植物検疫統計表(1996 年度版) から抜粋して構成。)

表5-1 国内に持ち込みが禁止されている病害虫

項 目	対 象 検 疫 病 害 虫
害 虫	地中海ミバエ、ミカンコミバエ、ウリミバエ、ヘシアンバエ、 コドリング、サツマイモノメイカガ、アリモドキゾウムシ、 イモゾウムシ、コロラドハムシ、ジャガイモシストセンチュウ、 ミカンネモグリヤンチュウ等。
植物病原菌	じゃがいもがんしゅ病、たばこべと病等。
その他	法令に定めたもの。

表5-2 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 <sup>(a)</sup>	55,000	0.40	0.028
ウミバエ	多種類の果実 <sup>(b)</sup>	44,000	1.40	0.156
地中海ミバエ	パパイヤ	40,000	0.30	0.250

(a) : レイシ、サランボ、セイウスマ、タンジエリン、グアバ、 (b) : パパイヤ、トマト、キュウリ

表5-3 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、ランブータン、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、チェリモヤ、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ira、レモン、コショウ、アメリカカボチャ。
(D) 不明	キウイフルーツ、ザクロ。

表6-1 タンタル、タングステン、金のX線発生体として用いる場合に関する特性

物性値	タンタル	タングステン	金
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	17.1	19.3	19.3
比熱 (kcal/(kg °C))	0.033 (20°C) 0.035 (500°C)	0.032 (20°C)	0.031(20°C)
熱伝導率 (kcal/m h °C)	52.8 (20°C) 63.6 (20°C)	170 (20°C)	254 (20°C)
熱膨張係数 (10 <sup>-6</sup> /°C)	6.5 (20°C) 7.1 (20°C)	4.3 (20°C)	14.2 (20°C)
融点 (°C)	2850(20°C)	3410(20°C)	1063(20°C)
加工の容易さ	good	no-good	good

表6-2 各照射条件に対する線量均一度、処理速度、処理量等

照射法	電子線 走査角	走査幅 (cm)	線量 均一度	処理速度 (m/h)	処理量 (ton/h)	電子エネルギー 利用率(%)	
単純2列	1段	10.9°	40	1.15	44.8	2.52	3.50
	2段	10.9°	40	1.15	61.3	3.45	4.79
	4段	10.9°	40	1.16	70.4	3.96	5.50
2箱を1組 として2列	1段	21.1°	80	1.11	27.7	3.12	4.33
	2段	21.1°	80	1.13	38.3	4.31	5.99
	4段	21.1°	80	1.15	44.4	5.00	6.94

※ 全て、ビーム電流 1 mA の場合。

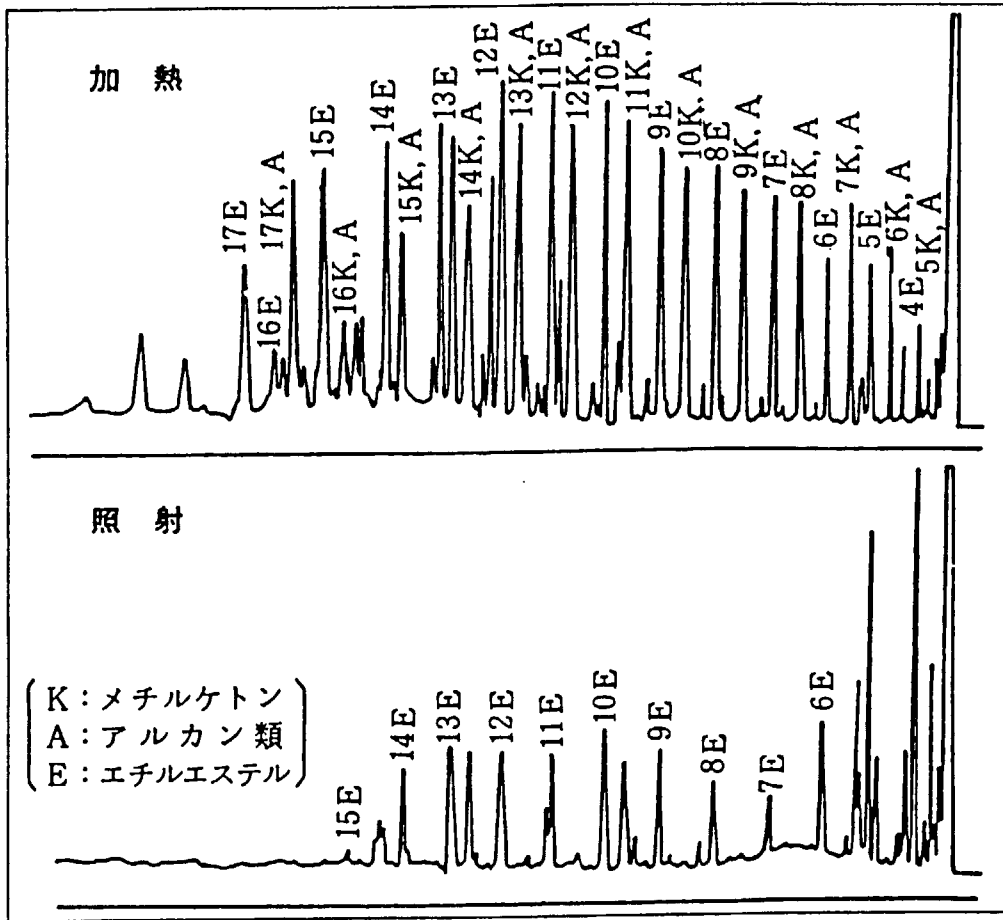


図2-1 脂肪の加熱(180°C, 1時間)および照射(120kGy)による揮発性分解生成物の比較(メチルステアリン酸)

(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.)



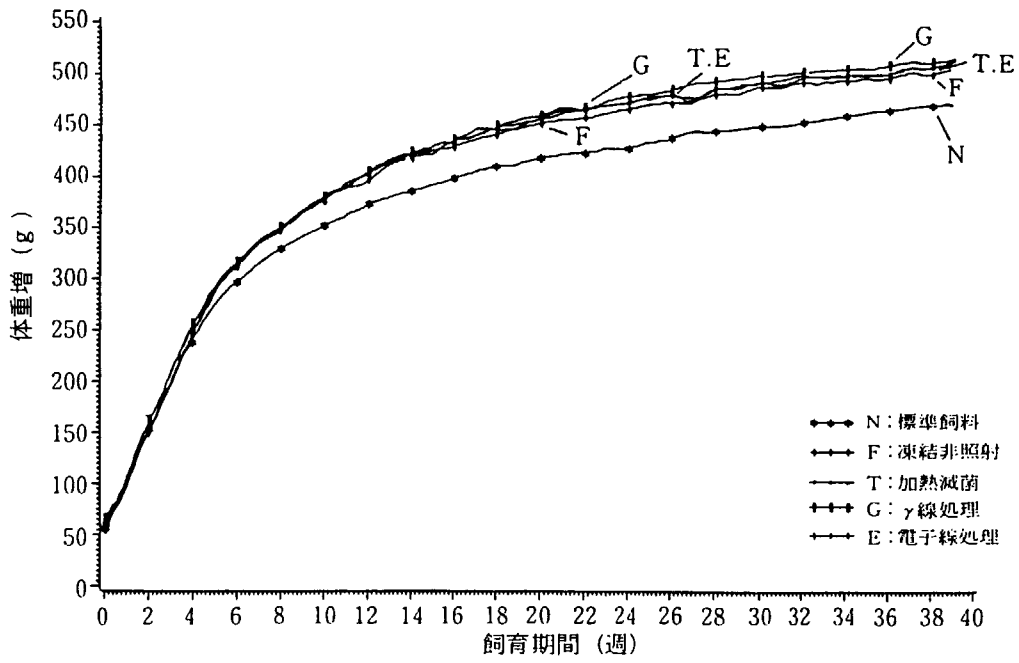


図 2-2 59kGy 照射した凍結鶏肉の雌ラットによる体重増曲線

(伊藤均:『世界における食品照射の現状』,Isotope News .1996.9月号.)

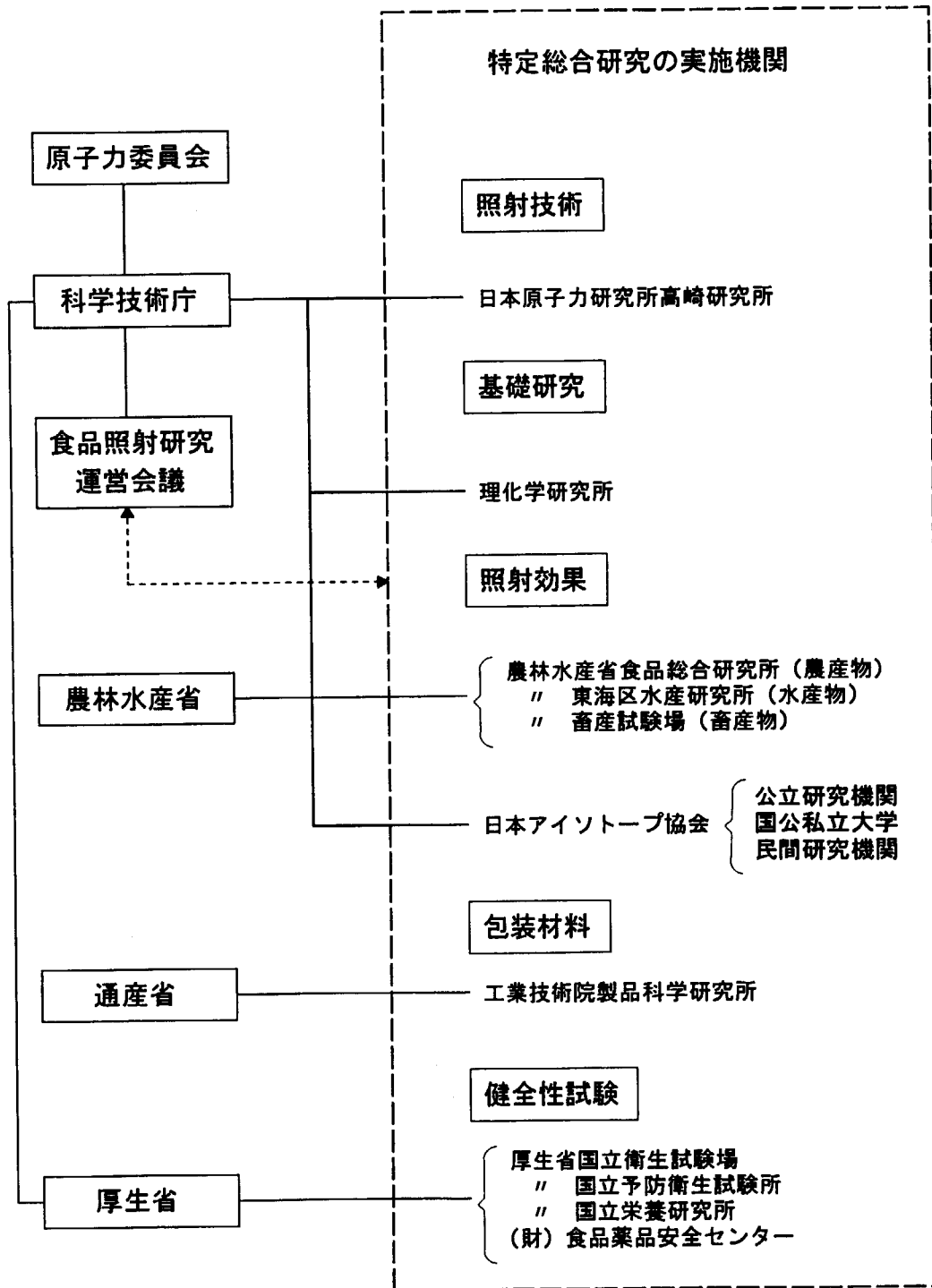


図 2-3 食品照射特定総合研究の研究組織と分担

(伊藤均:『照射食品における国内・国外の動向について』,RADIOISOTOPES, 1987.36(6).)

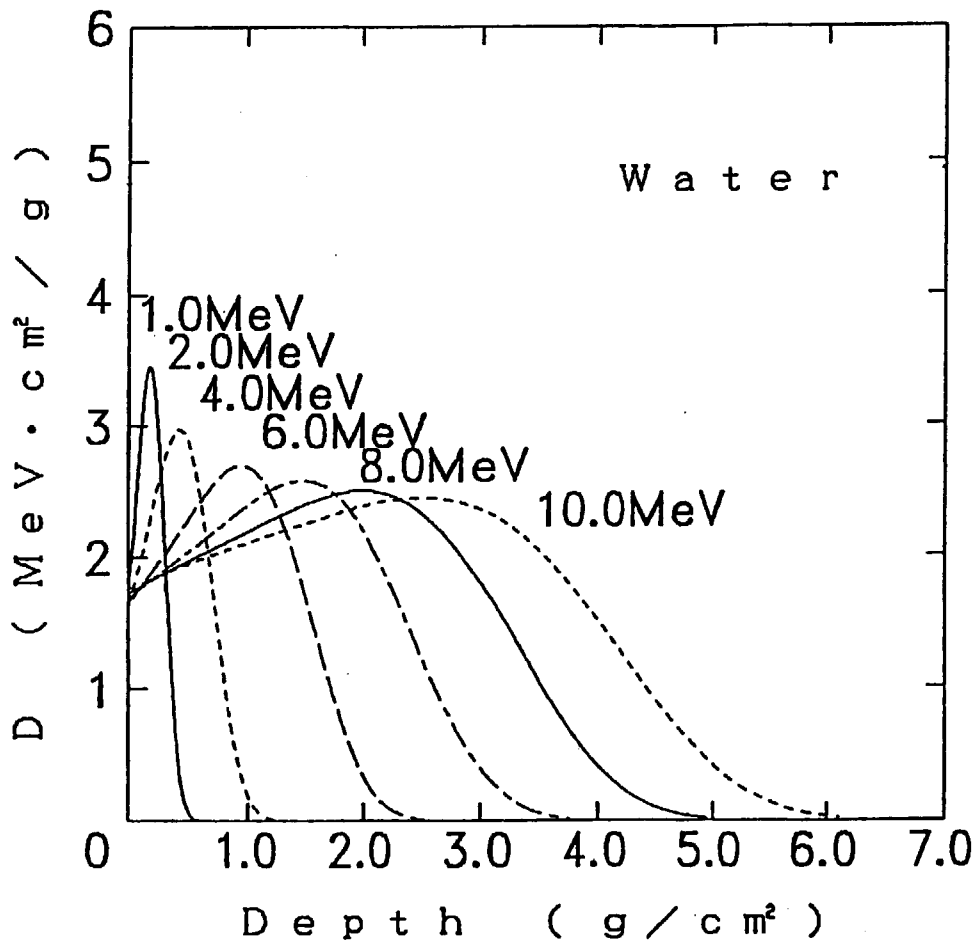


図6-1 1~10MeVの電子が水に入射した場合の深度線量分布

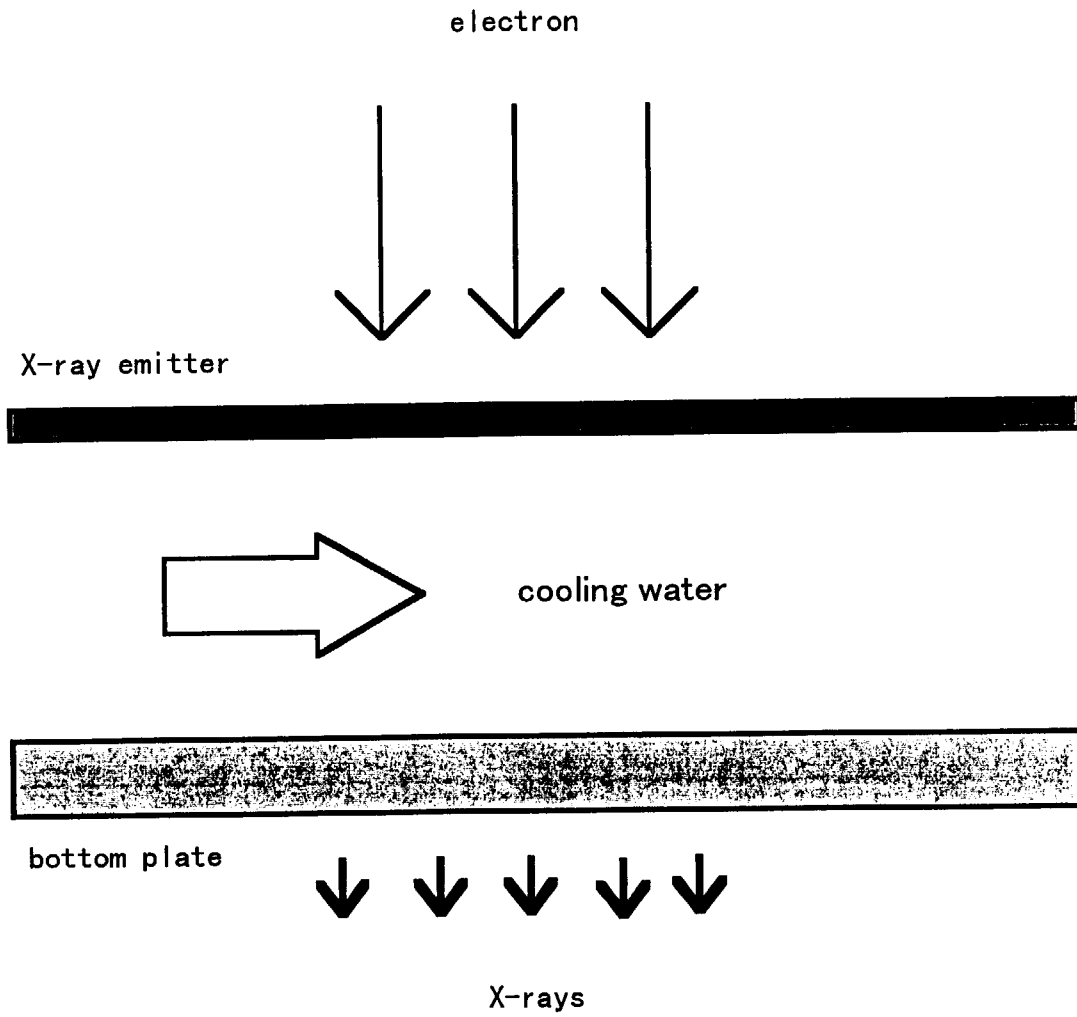


図6-2 X線発生用ターゲットの基本構造図

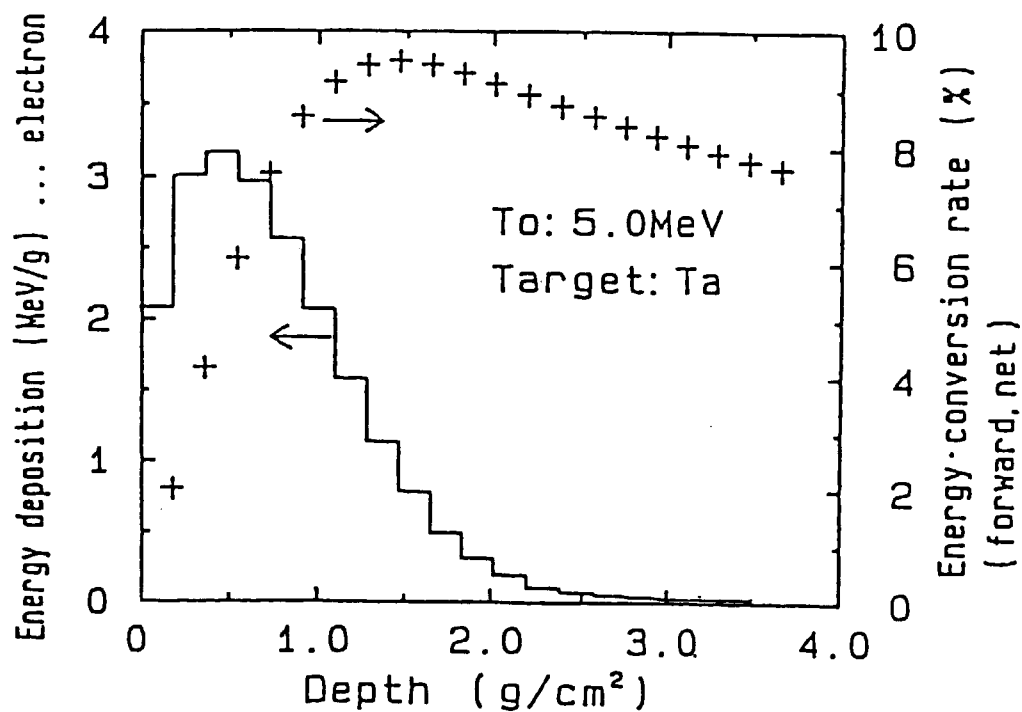


図6-3 5 MeV電子がタンタルに入射した場合の深さに対する入射電子線の堆積分布及び前方方向に放出されるX線の電子エネルギーに対する割合

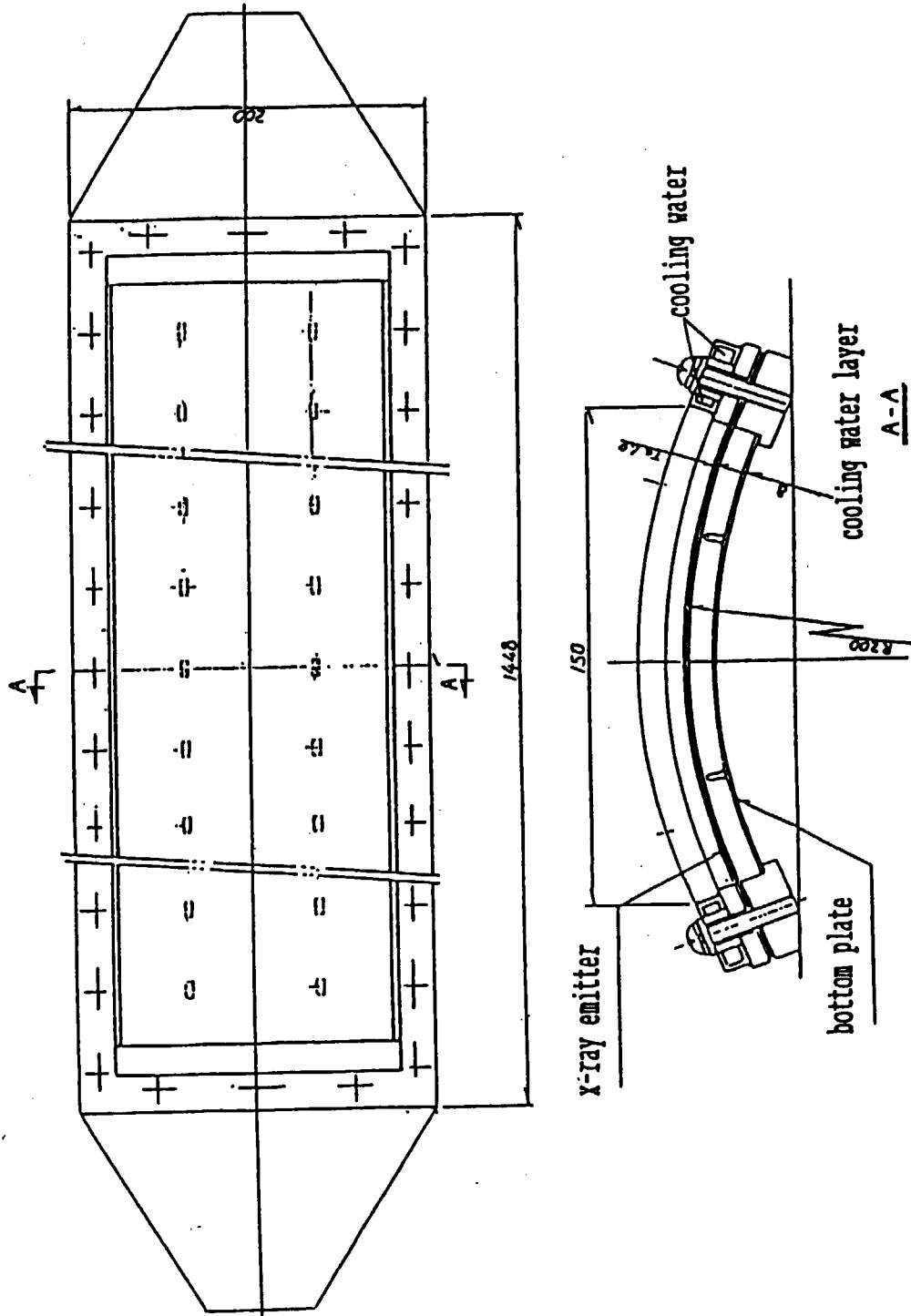


図6-4 5MeV 300kW ビーム走査幅120cmの電子加速器に  
取り付けて使用する実用ターゲットの例

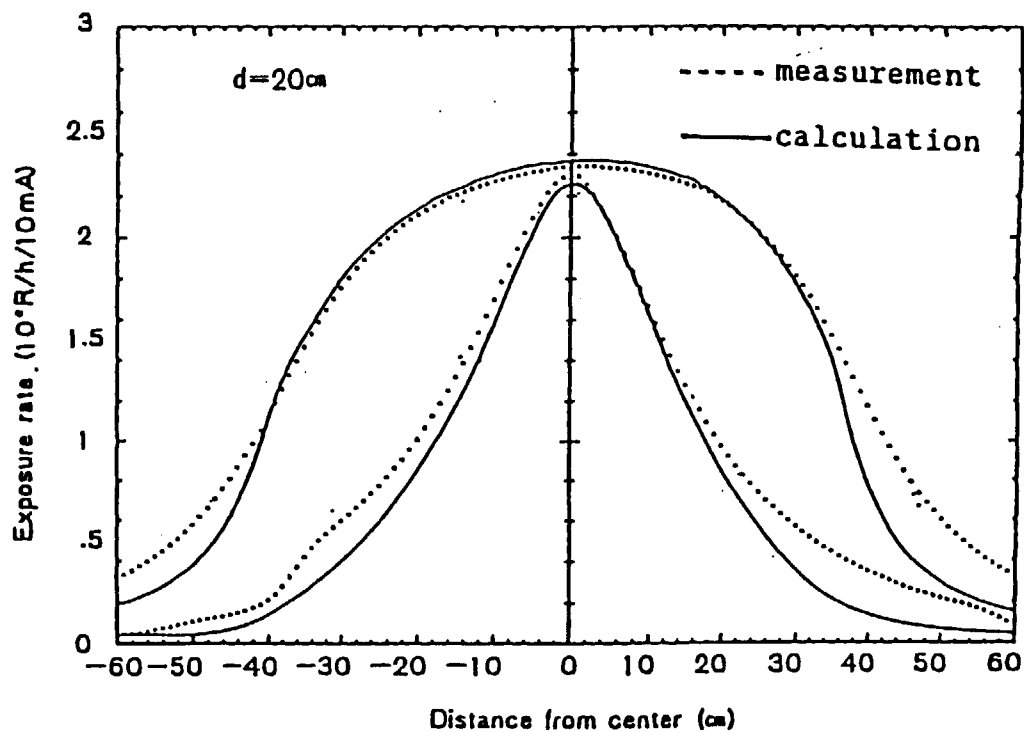


図6-5 ターゲット下10cmの位置におけるX線線量率のDEXによる  
計算結果とX線電離箱による測定結果の比較

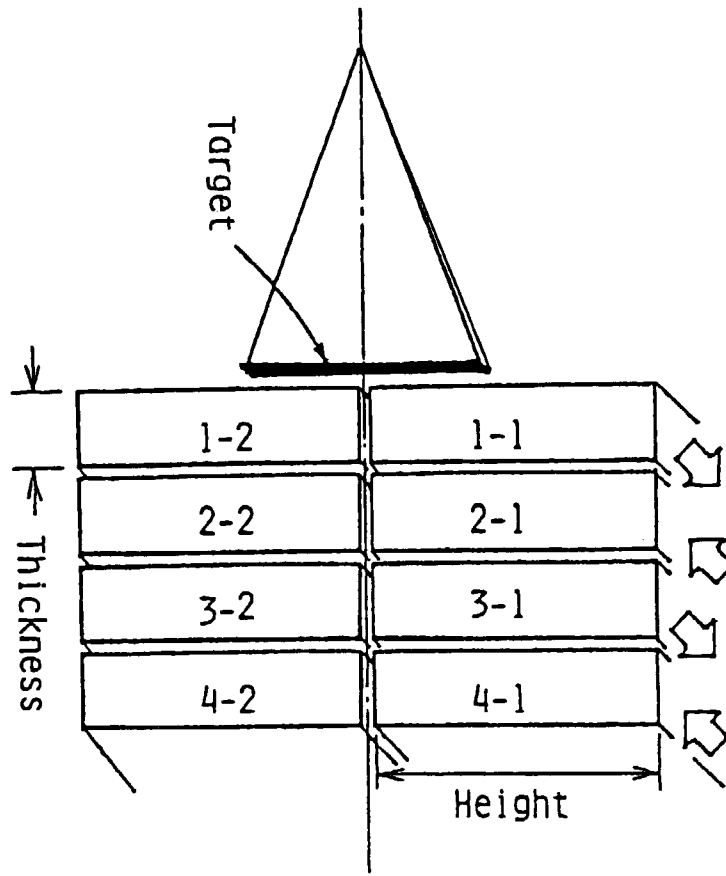


図6-6 2列4段の場合の照射方法

(田中他：第23回理工学における同位元素研究発表会要旨集. p36. (1986).)



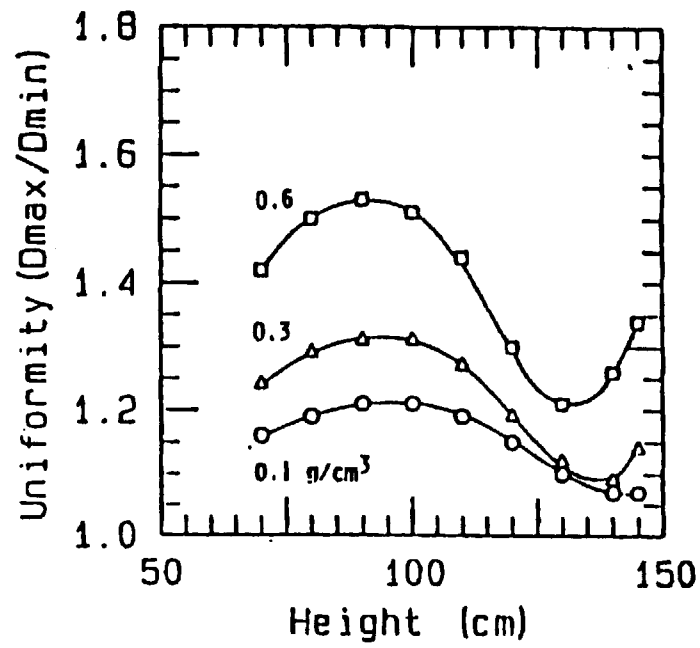


図6-7 箱の寸法と線量均一度との関係 (ビーム走査幅120cm, 両面照射)  
 (田中他: 第23回理工学における同位元素研究発表会要旨集. p36. (1986).)

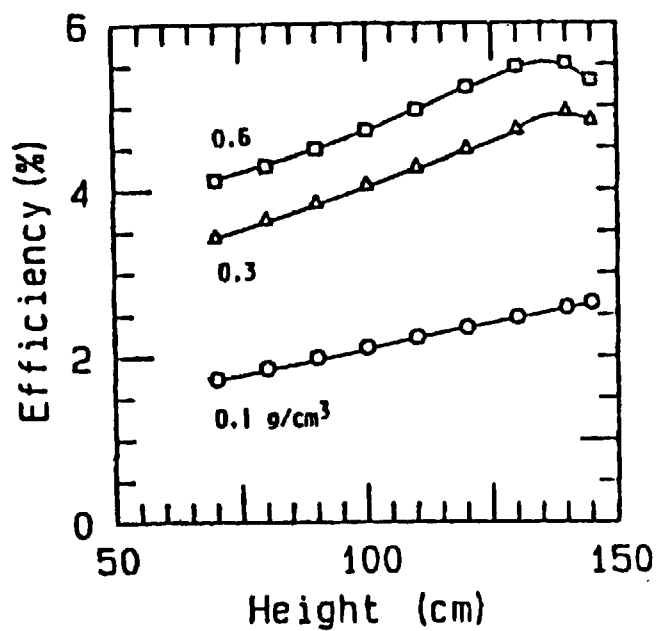


図6-8 箱の寸法と利用効率との関係 (ビーム走査幅120cm, 両面照射)  
 (田中他: 第23回理工学における同位元素研究発表会要旨集. p36. (1986).)

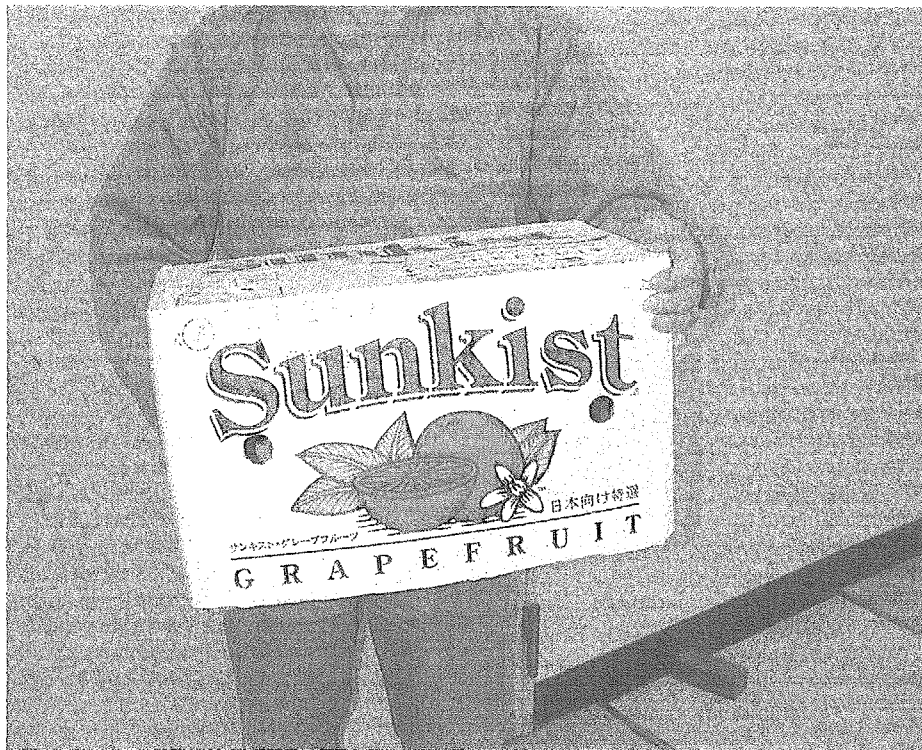


図6-9 グレープフルーツ入りダンボール箱

This is a blank page.

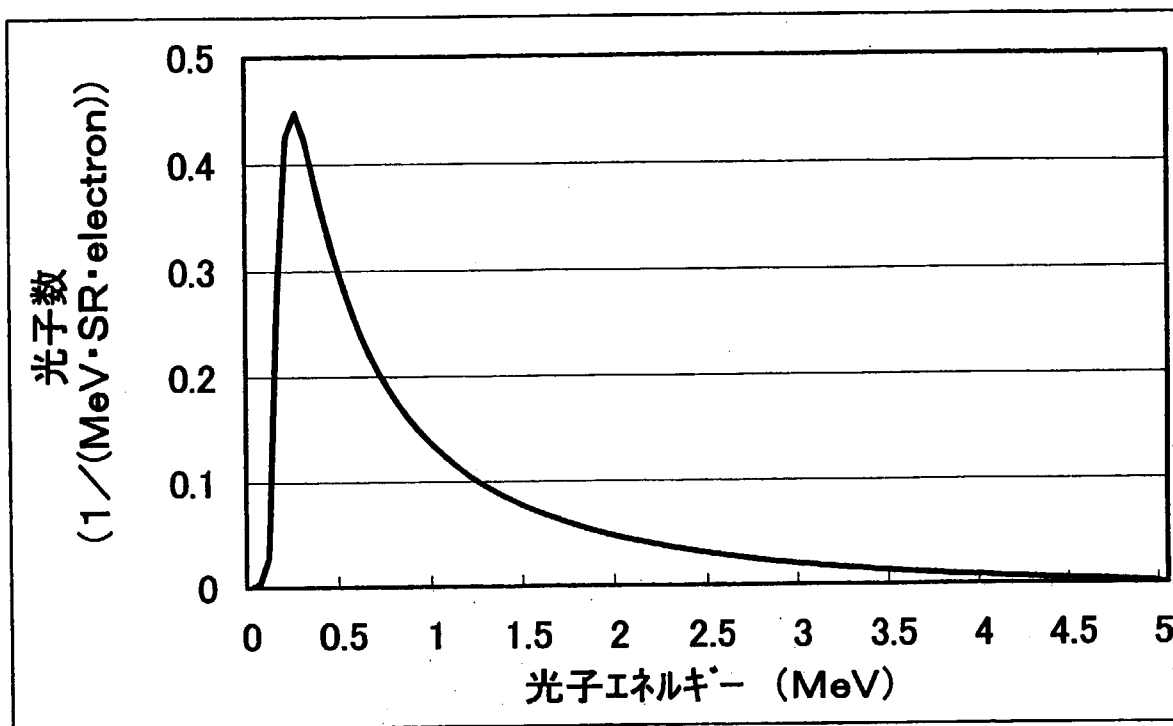


図6-10 5 MeV電子がタンタル製ターゲットに入射した場合に発生するX線のエネルギースペクトル (DEXコードによる。)

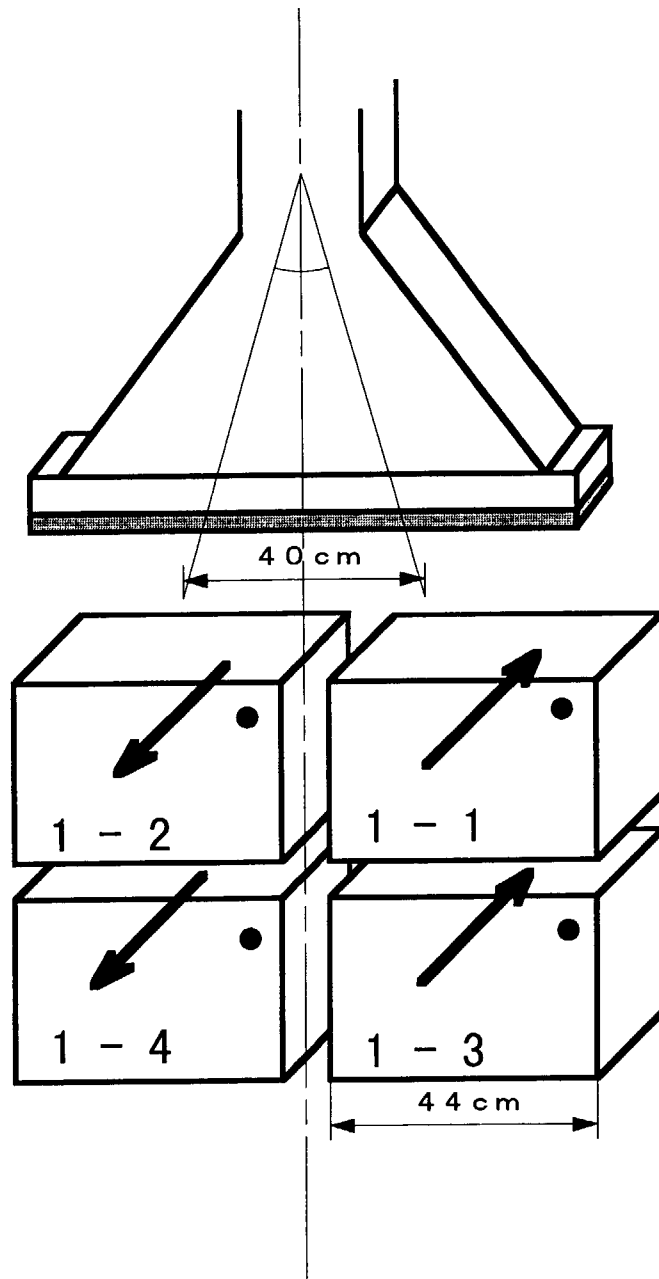


図6-11 コンベアラインにおける試料箱配置とその移動方向  
(1) ビーム走査幅40cmとした場合の2段2列照射

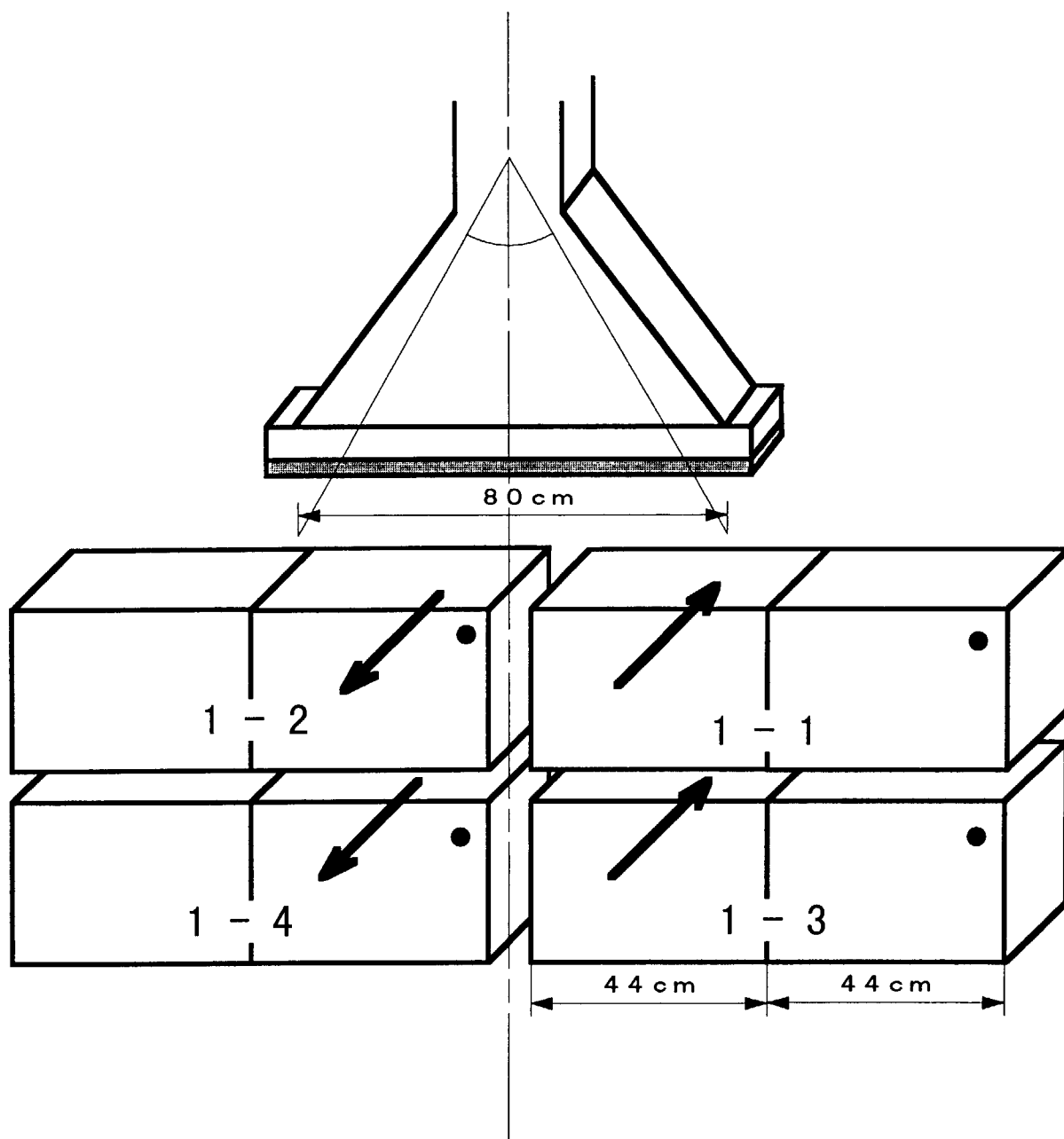


図6-11 コンベアラインにおける試料箱配置とその移動方向  
 (2) ビーム走査幅80 cmとし、2箱を並べて1組とした場合の2段2列照射

This is a blank page.



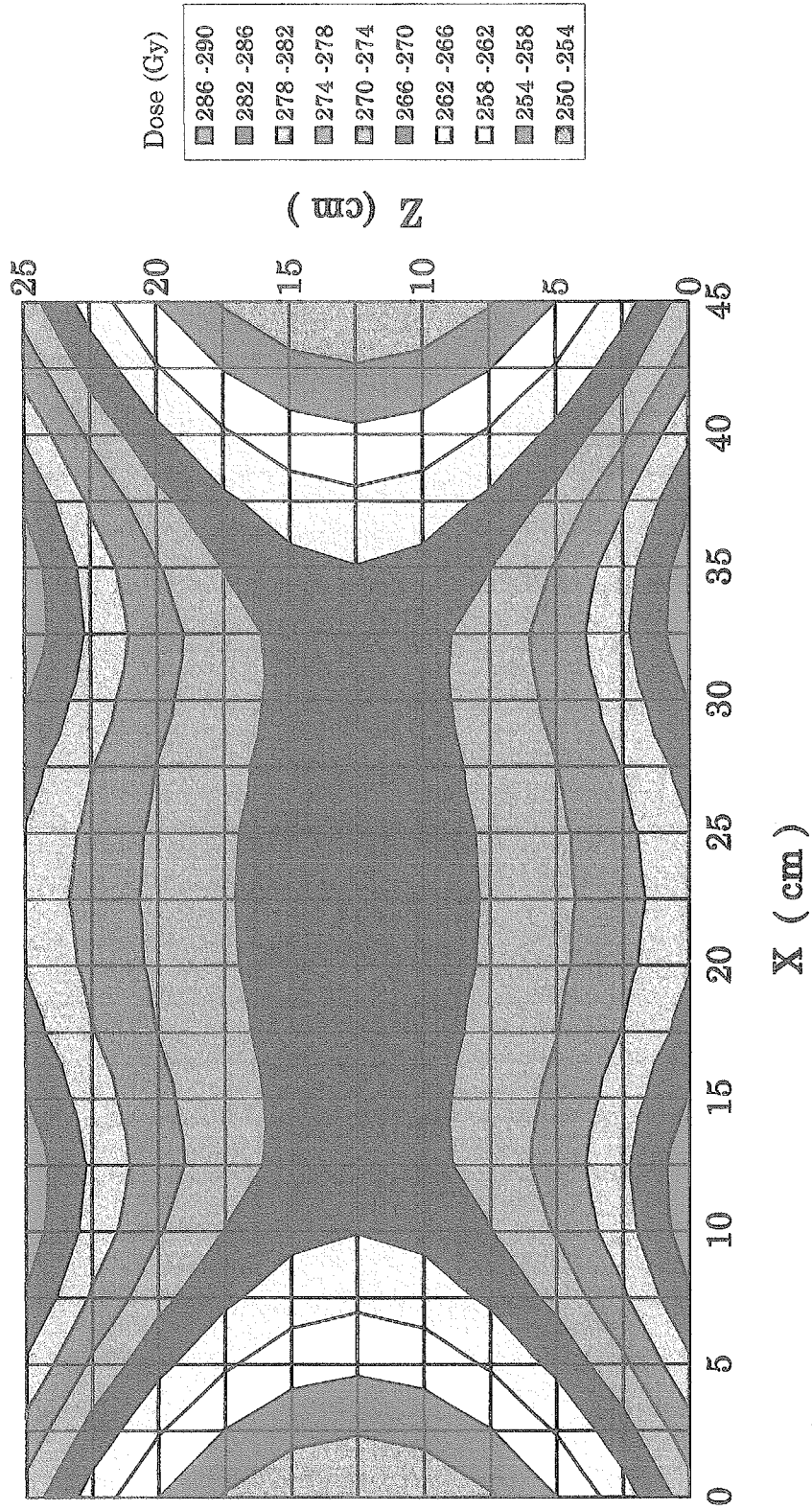


図6-12 2列2段照射（照射条件（1））の場合の試料箱内の等線量分布

This is a blank page.

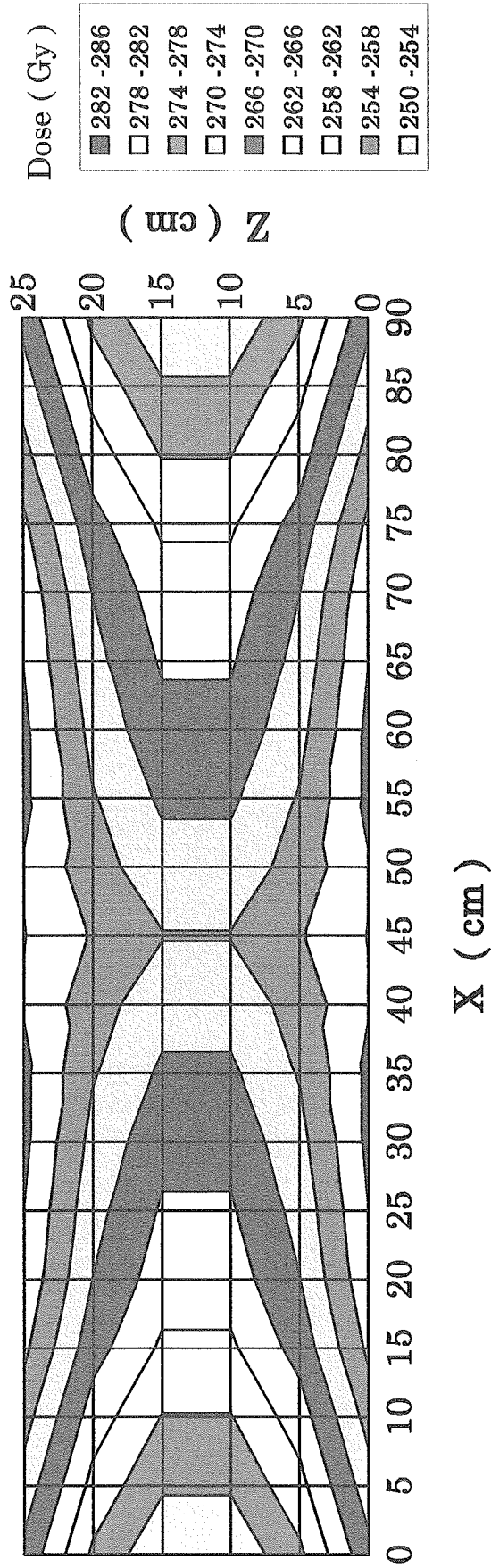


図6-13 2箱を並べて1組として2列2段照射（照射条件（2））の場合の  
試料内等線量分布

This is a blank page.

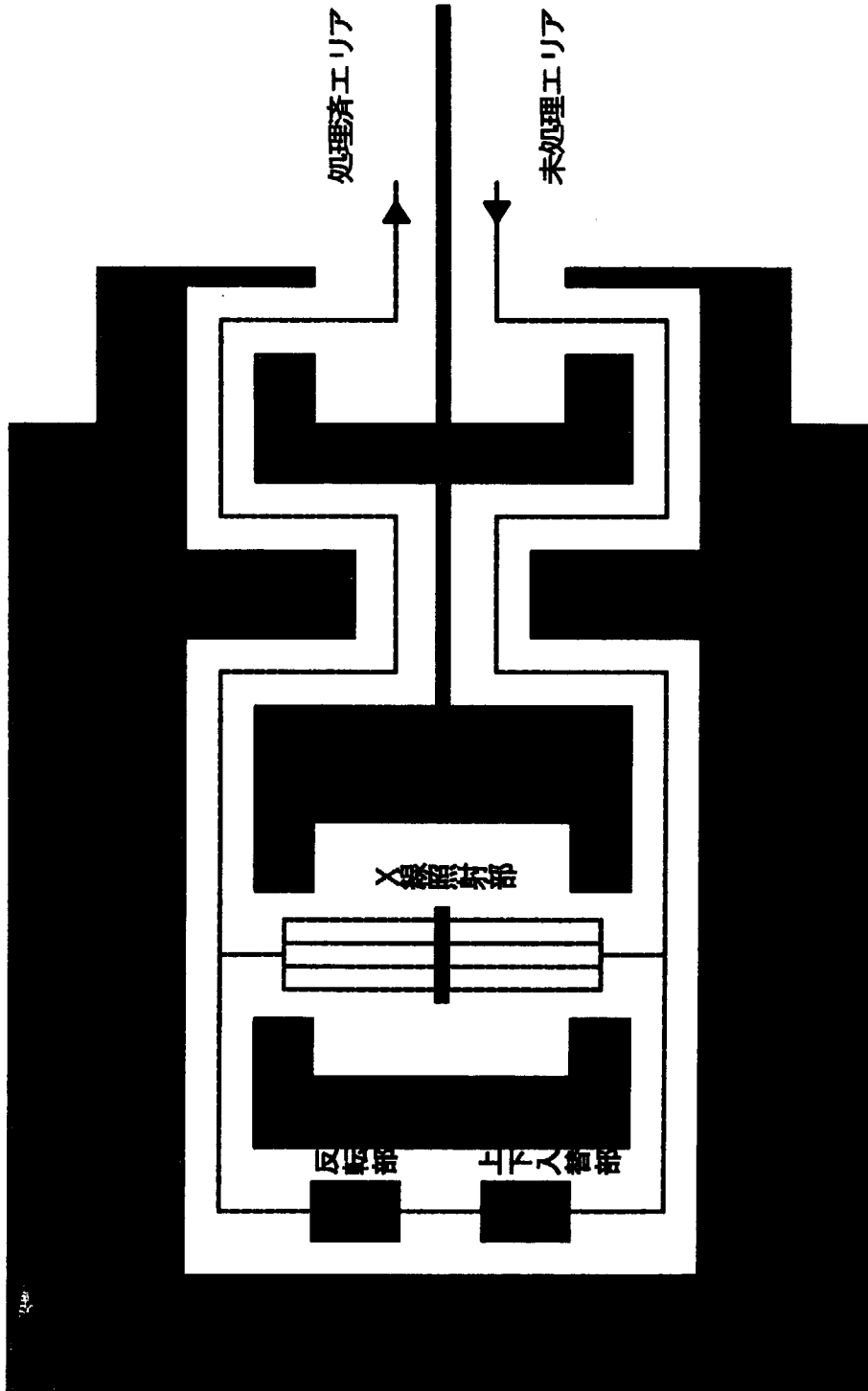


図6-14 X線照射施設の1例(平面図)

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 <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
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	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
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
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	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 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	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, 1 eV および 1 u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。
- EC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 <sup>5</sup> 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/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)  
= 4.184 J (熱化学)  
= 4.1855 J (15 °C)  
= 4.1868 J (国際蒸気表)  
仕事率 1 PS (馬力)  
= 75 kgf·m/s  
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

植物検疫を目的とした食品照射技術の検討―食品照射技術検討ワーキンググループ報告書―