

## 4.2 リスクプロファイル原案の作成

### 1. 照射食品の安全性に係るリスク

#### 1.1 有害物質等の生成

##### 1.1.1 過酸化物質

###### (1) 注目されるようになった経緯

食品に放射線を照射すると、ヒドロキシラジカル等の各種のラジカルが生じ、これが引き金となって様々な化学変化が起こり、種々の過酸化物質が生じる<sup>1</sup>。

国内外の多くの研究によれば、過酸化物質、特に過酸化脂質は、大量に摂取すると下痢、胸やけ、嘔吐等の症状を引き起こすだけでなく、動脈硬化等との関連も指摘されている<sup>2,3</sup>。

###### (2) 科学的特性

一般に食品中の脂質は、脂肪酸の不飽和結合が自然酸化によって過酸化物質を生成し、さらにそれらがアルデヒド、炭化水素や有機酸に分解して不快臭を生じさせることが知られている。放射線照射は、紫外線や可視光線、加熱等と同様に脂質の酸化を促進する作用がある<sup>4</sup>。脂肪に放射線を照射すると過酸化物質が生成することが多くの研究者によって見出されており、例えば、バターを0℃あるいは-70℃で照射した後、-20℃で貯蔵すると、過酸化物質価が最初の2日間で著しく増加する<sup>1</sup>。

関連する食品として、ラード、バター、マーガリン等の脂質含有量が特に高い食品群が挙げられる。

過酸化物質の生成は線量とともに増加するが、同じ線量であれば、線量率（単位時間当たりの放射線量。吸収された放射線量を指す場合、吸収線量率とも呼ばれる。）が高くなるにつれて少なくなる<sup>1</sup>。Lueckらによる1966年の総線量0.1MGyを照射したラードによる研究では、照射前の過酸化物質価は13.1であったが、線量率が0.05MGy/hrでは134、0.5MGy/hrでは62.5、20MGy/hrの場合は14.1であった<sup>5</sup>。

###### (3) 毒性評価

###### ① 体内動態

該当情報なし

###### ② 一般毒性

疫学的調査及び過酸化物質の生体内での反応機構などから、過酸化物質、特に過酸化脂

質と動脈硬化等との関連性が多くの研究者によって指摘されている<sup>2,3</sup>。

### ③ 変異原性・遺伝毒性

脂質の過酸化物（環状のペルオキシエポキシドを含む）は、金属やアスコルビン酸の存在下で DNA と反応する。また、リノレン酸やリノール酸の過酸化物は、サルモネラ菌を用いた Ames 試験により、弱い変異原性を示す<sup>2,6</sup>。

### ④ 発がん性

上述の変異原性や DNA との化学反応のデータなどから、過酸化脂質と発がんの関係が指摘されている<sup>2</sup>。

## (4) 曝露評価

該当情報なし

## (5) 耐容量

該当情報なし

## (6) 国際機関及び各国の取組状況

### ① 基準値及び検出方法

照射食品中の過酸化物の含有量については特別な基準は制定されていない。

### ② リスク低減方法

#### (a) 国際的な規制

食品への放射線照射を行っている各国で認可されている食品中には、ラード等の脂肪酸を多く含む食品は含まれていない<sup>7</sup>。

#### (b) 一般的な対応策

##### ・ 照射線量の制限

フリーラジカルの生成を経て、食品中に起こる化学的変化を最小限度に抑えるためには、最低必要線量を照射することが望ましい。最適照射条件が採用されるならば悪影響を与える因子をより少なくすることは可能である<sup>8</sup>。

##### ・ 抗酸化剤の添加

抗酸化剤を脂肪や脂肪含有食品に添加し、酸化による酸敗を防ぐことができる。このような系における照射において、 $\alpha$ -トコフェロール、ブチルヒドロキシアニソール（BHA）、没食子酸プロピル（PG）等の抗酸化剤は、脂肪の自動酸化を抑制することが明らかとなっている。しかし、その効果は試料の種類、抗酸化剤の種類によって異なる<sup>8</sup>。

ビタミンEや $\alpha$ -トコフェロール、BHA、PG、ノロジヒドロキシグアヤル（NDGA）を用いた実験では、ビタミンEやPG、 $\alpha$ -トコフェロールのような天然の抗酸化剤は放射線への抵抗性が低く、BHAやNDGAのような合成抗酸化剤は抵抗性が高いとされる<sup>9,10</sup>。

- ・ 酸素不透過性包装の利用

調理したソーセージを用いた実験では、酸素透過性の包装で貯蔵した場合、過酸化物の生成が加速的に増加したことから、粉碎した肉製品に放射線照射を行う際には、酸素不透過性の膜で包装することが推奨されている<sup>1</sup>。

## (7) 消費者の関心・認識

食品への放射線照射に関するアンケート<sup>a</sup>によれば、一般消費者の食品への放射線照射に対する認知度は現状では高くなく、半数以上の消費者は食品への放射線照射について具体的な内容を知らない。

ただし、同アンケートでは、照射食品について「食品中の成分が変化し、未知の健康影響をもたらす恐れがある」と思うかという設問に対して、69%の回答者が「そう思う」または「どちらかというと思う」と回答しており、この問題に対する潜在的な関心は高いと考えられる。

## (8) 不足しているデータ

食品に放射線を照射した時に生じる過酸化物については、食品への放射線照射が導入された初期に多くの研究が行われた。今後も必要に応じて、最新の科学的知見を反映させるべく、最近の新しい分析技術を用いて、照射による過酸化物の生成量と毒性、保存・調理過程での変化等についてデータを充実させるとともに、過酸化物の健康影響についての研究動向を注視しておくことが望ましい。

---

<sup>a</sup> 報告書3章3.2参照

(引用文献)

- <sup>1</sup> Elias PS and Cohen AJ, Radiation Chemistry of Major Food Contaminants, Elsevier (1977) (日本語訳：食品照射の化学、学会出版センター)
- <sup>2</sup> Stan Kubov, Toxicity of dietary lipid peroxidation products, Trends in Food Science and Technology 67, (1990)
- <sup>3</sup> Penumetcha M. et al. Dietary oxidized fatty acids: an atherogenic risk? Journal of Lipid Research Vol.41, p.1473, (2000)
- <sup>4</sup> 金子信忠ほか 香辛料の製油成分及び脂質に対する $\gamma$ 線照射の影響 日本食品工業学会誌 第38巻、第11号、p.1025、(1991年11月)
- <sup>5</sup> Lück et al, Einwirkung ionisierender Strahlen auf Fette, VII. Mitt. Entstehung von mittelkettigen Ketonen und Kohlenwasserstoffen, Fette Seifen Anstrichmittel 68, p.851, (1966)
- <sup>6</sup> MacGregor JT et al. Mutagenicity tests of lipid oxidation products in Salmonella typhimurium: monohydroperoxides and secondary oxidation products of methyl linoleate and methyl linolenate Food Chem. Toxicol. 23, p.1041, (1985)
- <sup>7</sup> (社) 日本原子力産業会議ホームページ (元データは IAEA 資料等)
- <sup>8</sup> (社) 日本原子力産業会議、食品照射解説資料 (1992)  
<http://foodirra.jaea.go.jp/dbdocs/006001003028.html>
- <sup>9</sup> Chipault et al. In Symposium on Foods, The AVI Publishing Company, Westport, Conn. p.151, (1962)
- <sup>10</sup> Wills ED, Effects of Antioxidants on Lipid Peroxide Formation in Irradiated Synthetic Diets. Int.J.Radiat.Biol.Relat. Stud, Phys. Chem. Med 37, p. 403, (1980)

## 1.1.2 放射線分解生成物

### (1) 注目されるようになった経緯

1950年代からの米軍の研究において、食品への放射線照射によって各種の分解生成物が生じることが報告され、食品安全上の危害要因になるのではないかという懸念が提起された<sup>1</sup>。

### (2) 科学的特性

食品中には、炭水化物、タンパク質、脂質をはじめとして様々な物質が含まれており、放射線照射によって、これらの物質が起因となって様々な放射線分解生成物が生じる。これまでに報告された主要な放射線分解生成物としては次のようなものがある。

なお、WHOの報告書（1994）によれば、「これらの反応生成物は、食品中に天然に存在していたり、調理など他の処理方法でも生成する。仮に、放射線照射による放射線特異的分解生成物（Unique Radiolytic Product, URP）が存在するにしても、全反応生成物の中でごくわずかしが含まれていないといえることができる」<sup>1</sup>とされている。

URPの1種とされるアルキルシクロブタノンについては、次節を参照されたい。

#### ○ 炭水化物由来の分解生成物

炭水化物は水溶液中で主としてOHラジカルと反応する。これにともない、デンプン、グリコーゲン、セルロース等は切断して断片化し、さらにケトンやアルデヒド、有機酸を生成し、脱酸素反応も起こす。グルコースだけでも少なくとも34種類の放射線分解生成物が生じる<sup>1</sup>。分解生成物の性質と量は水分の含量によって大きく変わる<sup>2</sup>。この中には変異原性を示す物質が知られている（糖の分解生成物の項参照）。

純粋な糖に照射すると著しい分解過程を誘起し、放射線分解産物が生成する。しかし、1kGyまでの線量では、その濃度は無視できるものと考えて良い<sup>3</sup>。

また、その程度の放射線量が糖にもたらす物理的及び化学的変化は非常にわずかであり、熱処理で観察されるものよりむしろ少ない。実際の食品では、アミノ酸、タンパク質の保護効果により、糖の放射線分解は抑制される<sup>1</sup>。

#### ○ タンパク質由来の分解生成物

WHOの報告書（1994）によれば、「タンパク質は20種類以上のアミノ酸から構成されるため、照射により多数の分解生成物が生じる可能性があるが、実際の食品中ではタンパク質のアミノ酸は影響を受けにくい状態にあり、放射線による分解は少ない。さらに、照射の結果生じたフリーラジカルは比較的動きにくく、再結合が起こりやす

いため<sup>1</sup>、実際の影響は低減される。タンパク質中のアミノ酸の放射線による損傷は極めて少なく、50kGyまでの高線量を照射しても、アミノ酸組成はほとんど変化しないという多くの証拠が得られている<sup>1</sup>」としている。

#### ○ 脂肪由来の分解生成物

食品中の脂質の主要成分であるトリグリセリドは、照射によって励起され、種々の化学反応を引き起こし、種々の脂肪酸やプロパンジオール、プロパンジオールエステル、アルデヒド、ケトン、ジグリセリド、二価エステル、アルカン、アルケン、メチルエステル、炭化水素、短鎖のトリグリセリド類を生成する<sup>1,3</sup>。

#### ○ 牛肉からの揮発性物質

米国陸軍の実験によると、牛肉を50kGyで照射した結果、65種類の揮発性物質が分離された。このうち、2種類は照射とは無関係であった。残りの63種類は、牛肉の脂質から分離したトリグリセリドの放射線分解生成物とほぼ同様であった。具体的な生成物は以下の通り<sup>1,2</sup>。

アルカン（メタン～ヘプタデカン）、アルケン（エチレン～ヘプタデセン）、アルデヒド（ノナール、ウンデカナル、ドデカナル等）、有機酸（ヘプタン酸～デカン酸等）、メチルエステル（メチルラウリン酸、メチルミリスチン酸）、2価エステル（1,2-プロパンジオールジミリスチン酸等）、その他（ベンゼン、トルエン、メチルメルカプタン、カルボニルスルフィド等）

#### ○ 鶏肉からの揮発性物質

鶏肉（酸素透過性包装）を3kGyで照射した直後に分離された揮発性物質は、ヘキサナル、アセトアルデヒド、ペンタナル、2-プロパノン等であった<sup>4</sup>。

#### ○ ラジオトキシシン

1970年代にロシアで行われた実験で、セシウム137の<sup>ガンマ</sup>γ線を照射したジャガイモのエタノール抽出物をラットに経口投与したところ、生殖細胞への変異原性を示したとの結果が報告され、この結果を説明するために、未確認の原因物質としてラジオトキシシンという名称が与えられた<sup>5,6</sup>。

ラジオトキシシンを提唱したKuzinらの研究によると、細胞の構成物質または代謝産物に放射線のエネルギーが吸収されることによって、十分長寿命であり、十分長い距

離を移動でき、かつ水溶性であるような生成物が形成され、それらがターゲットに損傷を与えるとされている。ラジオトキシンは、このような物質の総称である。ラジオトキシンは、100°C、15 分間の処理で失活する。その具体的な実態については明らかにされていないが、セミキノンではないかと指摘されている<sup>7,8</sup>。

この問題については、その後追試が行われたが、ラジオトキシンの存在を示すデータは得られていない<sup>9</sup>。

#### ○ 糖の分解生成物

グルコースなどの糖を高線量で照射すると、グルコソンをはじめとするアルドスロース (aldosulose)、グリオキザール、グリセルアルデヒド、グリオキシル酸などが生じ、変異原性が現れることが知られている<sup>10</sup>。

実際に、日本で行われた実験でも、6~37kGy の範囲で照射されたグルコース水溶液において、特に 13kGy 以上の照射で変異原性を示すことが確認されている<sup>10</sup>。

しかし、WHO の報告書 (1994) によれば、「果実や果汁の成分として糖が照射されても、純粋な糖溶液が照射された時に生じる変異原性物質は検出できるほど生成しないことが、分析化学的な研究で明らかにされている<sup>1</sup>」とされている。

変異原性物質の生成は、果実中で抑制されること、照射果実では変異原性を示さないこと、動物個体を用いた実験では照射グルコースが変異原性を示さないことが示されており、総合的に考えると照射果実の健全性については問題がないとの結論が得られている。

#### ○ アミノ酸の分解生成物

最も単純なアミノ酸であるグリシンを真空中で照射すると、グリオキシル酸やホルムアルデヒドが生成する<sup>1</sup>。また、アラニンからはアセトアルデヒドも生成する<sup>1</sup>。これらは、ヒトに対して発がん性がある可能性が指摘されている。

#### ○ 糖とアミノ酸の混合物

糖とアミノ酸の混合物は、100°C前後での加熱で、メイラード反応により、変異原性物質を生成することが知られている<sup>10</sup>。糖とアミノ酸の混合物を照射した研究では、照射によって変異原性は誘発されないことが示されている<sup>10</sup>。

#### ○ その他

この他に照射食品中に生成する物質として、トリクロロエタン、メタノール等のア

ルコールが知られている<sup>3</sup>。

なお、コバルト 60 による<sup>ガンマ</sup>  $\gamma$  線照射と電子線の照射でも分解生成物のパターンは異なる<sup>11</sup>。

### (3) 毒性評価

#### ① 体内動態

該当情報なし

#### ② 一般毒性

放射線分解生成物には多数の物質が存在するが、そのほとんどは加熱等の調理によっても生成する。これらの物質については、多くの毒性試験データが存在する。WHO の報告書 (1994) によれば、「照射食品中で検出される生成物のほとんどは、非照射食品でも検出される。毒性試験の結果から、通常の商品摂取であれば、放射線分解生成物は健康に害は及ぼさない<sup>1</sup>」とされている。

#### ③ 変異原性・遺伝毒性

放射線分解生成物には多数の物質があり、変異原性をもつものも知られている。前述の通り、高線量照射されたグルコース水溶液が変異原性を示すが、同じ研究の一環で行われた糖とアミノ酸の混合物を用いた実験では、照射によって変異原性は誘発されなかった<sup>10</sup>。

#### ④ 発がん性

該当情報なし

### (4) 曝露評価

#### ① 含有実態

米国 FDA による放射線分解生成物の生成量試算 (1980 年) によると、「1kGy の吸収線量での全反応生成物は 30mg/kg (平均分子量を 300 と仮定) で、これ以上の線量では、生成物の量は線量に比例して直線的に増加する<sup>3</sup>」とされている。

#### ② 推定摂取量

該当情報なし

## (5) 耐容量

該当情報なし

## (6) 国際機関及び各国の取組状況

### ① 基準値

国際機関及び各国において、放射線を照射した食品中の放射線分解生成物に関する基準は制定されていない。

### ② リスク低減方法

#### (a) 国際的な規制

放射線分解生成物に対する特段の規制措置は講じられていない<sup>4</sup>。

#### (b) 一般的な対応策

WHO の報告書（1994）によれば、「放射線分解生成物の量は、主として吸収線量の大きさに依存するが、他の要因も生成量や種類に関係する。それらの要因としては、照射時の温度、粘度、成分組成、雰囲気（ambient atmosphere）などがある。これらの要因の組み合わせによっては、望ましくない最終生成物の生成量を低減させることができる<sup>1</sup>」とされている。

### ③ 国際的な評価

WHO の報告書（1994）によれば、「照射食品中で検出される生成物のほとんどは、非照射食品でも検出される。毒性試験の結果から、通常の食品摂取であれば、放射線分解生成物は健康に害を及ぼさない」とされている<sup>1</sup>。

## (7) 消費者の関心・認識

食品への放射線照射に関するアンケート<sup>a</sup>によれば、一般消費者の食品への放射線照射に対する認知度は現状では高くなく、半数以上の消費者は食品への放射線照射について具体的な内容を知らない。

ただし、同アンケートでは、照射食品について「食品中の成分が変化し、未知の健康影響をもたらす恐れがある」と思うかという設問に対して、69%の回答者が「そう思う」または「どちらかというと思う」と回答しており、この問題に対する潜在的な関心は高いと考えられる。

---

<sup>a</sup> 報告書3章3.2参照

## (8) 不足しているデータ

放射線照射にともなう分解生成物については、揮発性物質を中心に照射食品の安全性研究の初期段階に多くの分析が行われている。例えば、糖とアミノ酸の混合物など、発がん性との関連が指摘される物質についても、放射線による分解生成物は加熱等の調理加工による分解生成物と同等である<sup>1</sup>ことが確認されている。今後も必要に応じて、最新の科学的知見を反映させるために、研究動向を注視しておくことが望ましい。

### (引用文献)

- <sup>1</sup> WHO, Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food, (1994) (日本語訳：照射食品の安全性と栄養適性, コープ出版, (1996))
- <sup>2</sup> Merritt C Jr et al., Effect of radiation parameters on the formation of radiolysis products in meat and meat substances, J.Agric.Food Chem., p.29, Vol.26, No.1, (1978)
- <sup>3</sup> Elias PS and Cohen AJ, Radiation Chemistry of Major Food Contaminants, Elsevier (1977) (日本語訳：食品照射の化学、学会出版センター)
- <sup>4</sup> Du M et al, Volatile profiles and lipid oxidation of irradiated cooked chicken meat from laying hens fed diets containing conjugated linoleic acid, Poultry Science 80, p.235, (2001)
- <sup>5</sup> Kopylov VA et al., Mutagenic effect of extracts from gamma-irradiated potato tubers on the sex cells of male mice, Radiobiologija, 12, p.524, (1972)
- <sup>6</sup> Levinsky HV and Wilson MA; Mutagenic evaluation of an alcoholic extract from gamma-irradiated potatoes., Food Cosmet. Toxicol., 13, p.243, (1975)
- <sup>7</sup> 佐藤満彦、Kuzin のラジオトキシン説 (1) その化学的実態、 Radioisotops, Vol41, p.87, (1992)
- <sup>8</sup> 佐藤満彦、Kuzin のラジオトキシン説 (2) その生物学的作用 Radioisotops, Vol41, p.161, (1992)
- <sup>9</sup> 松山晃、食品照射 放射線化学 第 51 号, p.49-50, (1991)
- <sup>10</sup> 祖父尼 他、照射による変異原性誘発の可能性、食品照射研究委員会研究成果最終報告書 ((社)日本アイソトープ協会)、p.133-220 (第 3 章)、(1992)
- <sup>11</sup> Merritt C, Radiolysis Compounds in Bacon and Chicken, Final Report., U. S. Army Natick Research and Development Laboratories, (1982)

### 1.1.3 アルキルシクロブタノン

#### (1) 注目されるようになった経緯

1970年代に放射線照射によって特異的に生成する放射線特異的分解生成物 (Unique Radiolytic Product, URP) として2-アルキルシクロブタノン (以下 2-ACB) の存在が確認された<sup>1</sup>。その後、1990年代後半にドイツ国立栄養生理学研究所の研究グループがコメントアッセイ (個々の細胞における DNA 損傷を検出する試験法) を用いて、本物質が遺伝毒性を有する可能性を示唆した<sup>2</sup>。

#### (2) 科学的特性

2-ACB は、食品中の脂質であるトリグリセリドの分解によって生成し、前駆体となる脂肪酸の種類によって、2-ドデシルシクロブタノン、2-テトラデシルシクロブタノンなど、各種の 2-ACB となる (表 4-1 参照)。アルキルシクロブタノンの構造と生成経路は図 4-1 の通りである<sup>3</sup>。

表 4-1 食品中の脂肪酸から生成する 2-ACB の例

前駆体(脂肪酸)	名称	R	略称
パルミチン酸 (C16:0)	2-Dodecylcyclobutanone (2-ドデシルシクロブタノン)	$(\text{CH}_2)_{11}\text{CH}_3$	2-DCB
パルミトレイン酸 (C16:1)	2-Dodec-5'-enylcyclobutanone (2-ドデセニルシクロブタノン)	$(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_5\text{CH}_3$	2-DeCB
ステアリン酸 (C18:0)	2-Tetradecylcyclobutanone (2-テトラデシルシクロブタノン)	$(\text{CH}_2)_{13}\text{CH}_3$	2-TCB
オレイン酸 (C18:1)	2-Tetradec-5'-enylcyclobutanone (2-テトラデセニルシクロブタノン)	$(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{CH}_3$	2-TeCB
リノール酸 (C18:2)	2-Tetradecadienylcyclobutanone (2-テトラデカジエニルシクロブタノン)	$(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$	

このほか、ミリスチン酸からは 2-decylcyclobutanone (2-decyl-CB) が生成する。

(出典：文献 4 をもとに一部情報を追加)

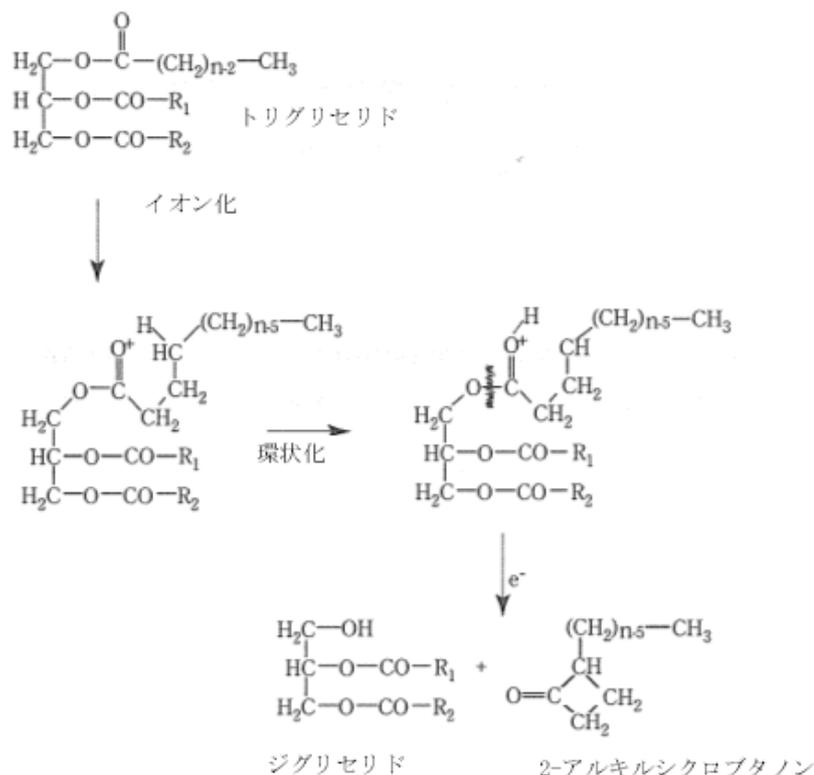


図 4-1 アルキルシクロプロタノンの構造と生成経路

(出典：文献 3 より和訳)

放射線照射が行われている食品のうち、主要な脂質の一種であるトリグリセリドの含有量の多い食品ほど 2-ACB 生成との関連性が強くなる。

### (3) 毒性評価

2-ACB の毒性については、遺伝毒性・発がん性との関連性を中心に 1990 年代後半から多くの報告が出されている。これまでの研究結果の概要は以下の通り。

#### ① 体内動態

##### ○ ラットへの給餌試験

飲料水 (1%エタノール) 中に 2-ACB (2-TCB, 2-TeCB) を添加してラットに 4 ヶ月給餌した (ラット一頭当たり約 1mg/日)。その結果、2-ACB は腸管バリアを通過して、脂肪組織から検出された。その濃度は、2-TCB が 0.31 μg/g 脂肪、2-TeCB が 0.07 μg/g 脂肪であった。ラットの脂肪組織の重量を 30 g と仮定すると、脂肪組織への蓄積量はそれぞれ 9 μg、2 μg で、ラットの摂取量の 10 万分の 1 程度であった。糞中に排泄されたのは、摂取した 2-ACB の 1%未満であった。このことから、これらの化合物は動物体内で代謝されるとともに、糞中にも排泄されることが明らかになった<sup>5</sup>。

## ② 一般毒性

### ◆急性毒性

2-ACB の急性毒性に関する研究例はない。

### ◆亜急性毒性、慢性毒性

亜急性毒性試験（28 日間、90 日間）又は慢性毒性試験（12 ヶ月以上）に関する研究例はない。ただし、WHO による 1970 年代に行われた米国陸軍の実験データの再解釈については、後述のリスク評価の項目を参照のこと。

### ◆その他の細胞毒性試験

- ・サルモネラ菌 TA97 株に対して、2-decyl-CB、2-DCB 及び 2-TCB の影響を調べたところ、2-decyl-CB、2-DCB といった短鎖長の 2-ACB に細胞毒性（増殖率の減少）が認められた<sup>6</sup>。
- ・ヒト結腸がん細胞（HT29 stem cells, HT29 clone19A）を 2-TCB に曝露させたところ、37°C、30 分では細胞毒性（テトラゾリウム塩を用いた生細胞のミトコンドリア酵素活性測定法）が見られなかったが、1～2 日間の曝露では、細胞毒性が観察された<sup>7</sup>。
- ・ヒト結腸正常細胞、前がん状態の細胞（LT97 adenoma cells）、及びヒト結腸がん細胞（HT29 clone19A）の 2-DCB に対する感受性を調べたところ、正常細胞及び前がん状態の細胞においては、細胞毒性（トリパンプルー色素排除試験による細胞の生死判定法）が用量依存的に示された。一方、がん細胞においては、細胞毒性は観察されなかった<sup>8</sup>。

## ③ 変異原性・遺伝毒性

### ○ 微生物を用いた試験

- ・サルモネラ菌を用いた復帰突然変異試験（Ames 試験）では、変異原性は認められなかった<sup>3,6,9</sup>。
- ・その他、大腸菌、酵母等を用いた試験でも変異原性は認められなかった<sup>10,11</sup>。

### ○ 哺乳類培養細胞を用いた遺伝毒性試験

- ・ヒト結腸正常細胞、前がん状態の細胞（LT97 adenoma cells）、及びヒト結腸がん細胞（HT29 clone19A）の 2-DCB に対する感受性を調べたところ、正常細胞及び前がん状態の細胞においては、DNA 鎖切断が用量依存的に示された。一方、がん細胞においては、DNA 鎖切断は観察されなかった<sup>8</sup>。

- ・ヒト結腸がん細胞（HT29 stem cells, HT29 clone19A）を用いた *in vitro* コメットアッセイにおいて、2-ACB 類は DNA 損傷の増加を引き起こさなかった<sup>3</sup>。
- ・ヒト HeLa 細胞及びヒト結腸がん細胞 (HT29 stem cells) に対する 2-TCB、2-TeCB、2-DCB、2-decyl-CB の影響を調べたところ、2-TCB 及び 2-TeCB については、細胞傷害が見られる高濃度でしか酸化的 DNA 傷害を引き起こさなかったが、2-DCB、2-decyl-CB については、細胞傷害が見られるより低い濃度で、酸化的 DNA 傷害を引き起こした<sup>3</sup>。
- ・ヒト HeLa 細胞及びヒト結腸がん細胞（HT29 stem cells）に対する 2-TCB、2-DCB、2-decyl-CB の影響を調べたところ、細胞傷害が見られるより低い濃度で、2-TCB は DNA 鎖切断を引き起こし、2-DCB 及び 2-decyl-CB は、酸化的 DNA 傷害を増加させた<sup>6</sup>。
- ・2-DCB の染色体異常誘発性に関して、ヒトのリンパ芽球細胞（TK6 lymphoblasts）を用いて、サイトカラシン B で細胞分裂を阻害した状態での小核形成を調べたところ、最高濃度（53  $\mu$ M）で小核の有意な増加が見られた<sup>12</sup>。

#### ○ラットを用いた *in vivo* 試験

- ・2-DCB を 2 段階の濃度（1.12mg/kg/bw、14.9mg/kg/bw）でラットに経管投与し、16 時間後に結腸細胞を採取してコメットアッセイにより、DNA 損傷を観察した。その結果、低用量投与群 6 頭のうち 2 頭、高用量投与群 6 頭のすべてで陰性対照群に比べて DNA 損傷の頻度と損傷量の増加が認められた<sup>13</sup>。

#### ④ 発がん性

##### ○ラットを用いた発がんプロモーション作用に関する試験

- ・ラットを用い、発がん物質である azoxymethane（AOM）単体、AOM+2-TCB、AOM+2-TeCB の 3 投与群において、結腸における腫瘍発生を観察したところ、AOM+2-TeCB を投与した群において、AOM 単体を投与した群と比較して、投与 6 ヶ月後に前がん状態の傷害の促進が認められた（投与 3 ヶ月には有意差なし）。また、投与 6 ヶ月後に腫瘍が発生した個体数に有意な差は見られなかったものの、AOM+2-TCB を投与した群、AOM+2-TeCB を投与した群において、AOM 単体を投与した群と比較して、個体あたりの腫瘍の数やサイズの増加が見られた。これらの結果より、2-ACB は発がんプロモーション作用を有していると示唆されている<sup>14</sup>。

#### (4) 曝露評価

##### ① 含有実態

WHO の声明 (2003) によれば、「2-DCB の照射食品中の生成量は極めて少なく、食品中での安定性も考慮すると、食品から摂取される 2-DCB の量は生の食品中の分析値よりも低い可能性がある<sup>15)</sup>」とされている。この理由として、「一般的に、低用量から中程度の照射による 2-DCB の食品中の生成量はわずかなレベルであり、室温で保存した鶏肉中では安定であっても、熱、光、酸素にさらされるとある程度の分解が起こること」が指摘されている<sup>15)</sup>。

これまでに、肉類 (牛肉・鶏肉)、卵・乳製品、魚介類 (サーモン)、アボガド、ヘーゼルナッツ、カカオ豆等で、2-ACB が検出されたとの報告がある<sup>3)</sup>。

なお、鶏肉を用いた実験によれば、2-DCB の生成量と照射線量 (10kGy 以下) との間には直線性が見られる<sup>16)</sup>(図 2)。

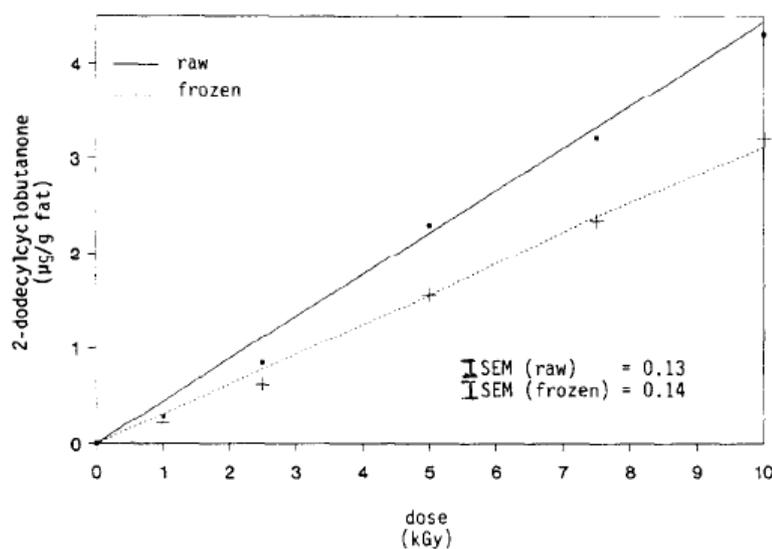


図 4-2 鶏肉に放射線を照射した時のアルキルシクロブタノン生成量

(出典：文献 16 による)

また、スパイスの中にはゴマの種子、マスタードの種子、ナツメグ等、比較的脂肪含有量の高いものがあるが、これらについて、高線量照射を行った際の詳細な 2-ACB 生成量に関する研究はない。

## ② 推定摂取量

- ・ 鶏肉を例とした試算例

殺菌線量 (3kGy) における 2-ACB の生成量は、鶏肉の脂質含量を 10% とすると、 $0.4 \mu\text{g/g}$  鶏肉 (調理後) と算定され、成人 (70Kg) が 200g の鶏肉を一度に摂取すると仮定すると、摂取量は  $80 \mu\text{g}$  (体重 1kg 当たり約  $1 \mu\text{g}$ ) となる<sup>13</sup>。

なお、スパイスからの推定摂取量に関する研究例はない。

## (5) 耐容量

2-ACB に関する耐容摂取量、急性参照値は設定されていない。

## (6) 国際機関及び各国の取組状況

### ① 基準値及び検出方法

#### (a) 基準値

2-ACB についてはこれまでに基準値は設定されていない。

#### (b) 検出方法

EU の照射食品の標準分析法 (EN1785)、Codex の標準分析法 (EN1785 を採用) として、食品中の脂質を抽出し、カラムで精製した後、ガスクロマトグラフ質量分析 (GC/MS) (ガスクロ/マススペクトル) で分離検出する方法が定められているほか、MS 以外には、TLC、ELISA による検出方法も報告されている<sup>17</sup>。

### ② リスク低減方法

現在、国際的あるいは各国における規制はとられていない。

### ③ リスク評価の状況

#### ○ WHO

WHO の声明 (2003) によれば、「2-DCB 及び他のシクロブタノン類の影響は、あったとしても極めてわずかか無視できる」とされている<sup>15</sup>。これらの根拠となるデータは次の通り。

#### ◆1970 年代の米国陸軍の実験データの再解釈

米国陸軍で 1970 年代に  $-30^{\circ}\text{C}$  で保存した鶏肉に高線量照射 ( $59\text{kGy}$ ) を行い、長期毒性試験を実施した。この実験条件によれば、鶏肉中には約  $1.5 \mu\text{g/g}$  鶏肉の 2-DCB が生成していたと推定されるが、この鶏肉をイヌ等に長期投与したり、細

菌や哺乳類培養細胞を用いた遺伝毒性試験を行っても影響が見られなかったことから、2-DCB 及び他のシクロブタノン類による影響は、あったとしても極めてわずかか無視できる。

◆その他、最近の実験データの評価

- ・実験に使用された 2-DCB が分解している可能性を否定できず、原因物質が特定できない。
- ・コメントアッセイは、偽陽性の結果が得られやすく、国レベルの規制機関によって正式な遺伝毒性試験方法としては採用されていない。

◆体内動態

- ・ラットへの給餌試験<sup>5</sup>（上述）によれば、2-ACB は脂肪組織に蓄積せず、速やかに代謝される。

○ EC

EC の食品科学委員会の声明（2002）によれば、「これまでに 2-ACB の悪影響を示すとされたデータのほぼすべてが *in vitro* 試験であり、これらの結果にもとづいて、脂質を含む照射食品中の 2-ACB 類をヒトが摂取した際の健康リスクを評価することは適当でない（not appropriate）。2-ACB の遺伝毒性は標準的な遺伝毒性試験法によって確認されたものではなく、各種 2-ACB 類に対する NOAEL を定めるための適切な動物給餌実験データも存在しない<sup>18</sup>」とされている。

○ 米国 FDA

FDA の貝類への照射許可に関する官報（2005）によれば、「2-ACB が大腸がんを引き起こす可能性があるとの論文<sup>14</sup>があるが、この論文の著者も述べているように、実験で用いたラットの 2-ACB の曝露量（mg/kg 体重）は、予想されるヒトの曝露量（ $\mu$ g/kg 体重）より 3 桁も大きい。実験動物モデルや実験計画の限界、データの曖昧性、実験で用いられた化学物質の曝露とヒトの曝露との間に密接な関係が存在しないことを考慮すると、大腸がんを引き起こすと考えるだけの科学的な確実性と信頼性をもった情報ではない」とされている<sup>19</sup>。

○ IARC（国際がん研究機関）

2-ACB の発がん性については国際がん研究機関（IARC）の評価書は出されていない。

#### (7) 消費者の関心・認識

食品への放射線照射に関するアンケート<sup>a</sup>によれば、一般消費者の食品への放射線照射に対する認知度は現状では高くない。

ただし、同アンケートでは、照射食品について「食品中の成分が変化し、未知の健康影響をもたらす恐れがある」と思うかという設問に対して、69%の回答者が「そう思う」または「どちらかというと思う」と回答しており、この問題に対する潜在的な関心は高いと考えられる。

#### (8) 不足しているデータ

各照射食品中のアルキルシクロブタノンの生成量及びその推定暴露量については、さらにデータの蓄積が望まれる。また、アルキルシクロブタノンの毒性（特に、遺伝毒性、発がんプロモーション作用）についても、今後の研究の動向を注視し、データを充実させていく必要がある。

---

<sup>a</sup> 報告書3章3.2参照

(引用文献)

- <sup>1</sup> Letellier PR and Nawar WW., 2-Alkylcyclobutanones from the radiolysis of triglycerides., *Lipids*, Vol.7, p.75-76, (1972)
- <sup>2</sup> Delincée H. et al., Genotoxic properties of 2-dodecylcyclobutanone, a compound formed on irradiation of food containing fat *Radiat. Phys. Chem.* 52, p.39-42, (1998)
- <sup>3</sup> Bournouf D. et al., Etude toxicologique transfrontaliere destinee a evaluer le risque encouru lors de la consommation d'aliments gras ionises. Toxikologische Untersuchung zur Risikobewertung beim Verzehr von bestrahlten fetthaltigen Lebensmitteln. Eine franzoesisch-deutsche Studie im Grenzraum Oberrhein. In Marchioni et al. (ed.) Rapport final/Schlussbericht INTERREG II. Project/Projekt No.3.171, Karlsruhe: Bundesforschungsanstalt fuer Ernaehrung
- <sup>4</sup> 内閣府食品安全委員会 平成 16 年度食品安全確保総合調査「放射線照射食品の安全性に関する文献等の収集・整理等の調査報告書」独立行政法人食品総合研究所, 平成 17 年 3 月
- <sup>5</sup> Horvatovich P et al, Detection of 2-alkylcyclobutanones, markers for irradiated foods, in adipose tissues of animals fed with these substances., *J Food Prot.* Oct;65(10), p.1610, (2002)
- <sup>6</sup> Hartwig et al., Toxicological potential of 2-alkylcyclobutanones--specific radiolytic products in irradiated fat-containing food--in bacteria and human cell lines., *Food Chem Toxicol.* 45, p.2581-2591, (2007).
- <sup>7</sup> Delincée et al., Genotoxicity of 2-alkylcyclobutanones, markers for an irradiation treatment in fat-containing food - Part I: cyto- and genotoxic potential of 2-tetradecylcyclobutanone., *Radiat.Phys.Chem.* 63., 431-435 (2002)
- <sup>8</sup> Knoll et al., 2-Dodecylcyclobutanone, a radiolytic product of palmitic acid, is genotoxic in primary human colon cells and in cells from preneoplastic lesions., *Mutat Res.* 594, 10-19 (2006)
- <sup>9</sup> Gadgil.P and Smith JS., Mutagenicity and acute toxicity evaluation of 2-dodecylcyclobutanone., *J.Food Sci.* 69, C713-716, (2004)
- <sup>10</sup> Sommers CH., 2-Dodecylcyclobutanone does not induce mutations in the Escherichia coli tryptophan reverse mutation assay., *J Agric Food Chem.* 51, p.6367, (2003)
- <sup>11</sup> Sommers CH. and Schiestl RH., 2-Dodecylcyclobutanone does not induce mutations in the Salmonella mutagenicity test or intrachromosomal recombination in Saccharomyces cerevisiae., *J. Food Prot.* 67, p. 1293, (2004)
- <sup>12</sup> Sommers CH., Induction of micronuclei in human TK6 lymphoblasts by 2-dodecylcyclobutanone, a unique radiolytic product of palmitic acid *J.Food Sci.* 71, C281-284, (2006)
- <sup>13</sup> Delincée H. et al., Genotoxitaet von 2-Dodecylcyclobutanon In: Knoerr M et al., (ed.) Lebensmittelbestrahlung 5. Deutsche Tagung, Karlsruhe: Berichte der Bundesforschungsanstalt fuer Ernaehrung. 11-12 Nov. 1998; BFE-R-99-01, p.262-269 (1999)
- <sup>14</sup> Raul F et al, Food-borne radiolytic compounds (2-alkylcyclobutanones) may promote experimental colon carcinogenesis., *Nutr Cancer* 44(2), p.88, (2002)
- <sup>15</sup> WHO, Statement on 2-Dodecylcyclobutanone and Related Compounds. (March 2003)
- <sup>16</sup> Stevenson M.H. et al., The use of 2-dodecylcyclobutanone for the identification of irradiated chicken meat and eggs, *Radiat. Phys. Chem.* Vol.42, no.1-3, p.363-366, 1993
- <sup>17</sup> Ndiaye B. et al., 2-Alkylcyclobutanones as markers for irradiated foodstuffs III. Improvement of the field of application on the EN 1785 method by using silver ion chromatography *Journal of Chromatography A*, 858, p.109-115, (1999)
- <sup>18</sup> EC: Statement of the Scientific Committee on Food on a Report on 2-alkylcyclobutanone [http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/scf/index\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/scf/index_en.html) (2002)
- <sup>19</sup> U.S.Federal Register vol.70,157 Aug.16.(2005)

(注) アルキルシクロブタノンの毒性に関する文献は、論文として発表された情報もしくは WHO の報告書等に引用されている論文に準じた学術的情報に限定した。

## 1.2 微生物の増殖

### 1.2.1 マイコトキシン産生菌（主にアフラトキシン産生菌）

アフラトキシン等のマイコトキシンの産生に関しては、放射線照射によりマイコトキシンの産生能が増加するかがリスク評価のポイントであるが、産生能の増加については実証的なデータが乏しい。そこで、毒性評価、曝露評価、耐容量、基準値及び検出方法の項目では、リスク評価を行う際の基礎情報として、アフラトキシンに関する一般的な情報を記載した。

#### (1) 注目されるようになった経緯

1960年にアフラトキシンが発見され（七面鳥 X 病事件）、その後インドなどで食中毒が報告される中で、1970年代から80年代にかけて、食品の放射線照射処理により、アフラトキシン生産カビにおけるアフラトキシン産生能が増加するという研究結果が報告された<sup>1</sup>。その他、オクラトキシン生産カビにおけるオクラトキシンの増加等も報告されている<sup>2</sup>。

食品照射によるアフラトキシン産生能への影響をみた研究報告はあるものの<sup>1</sup>、実際の照射食品においてアフラトキシンの中毒例は報告されていない。香辛料などからアフラトキシンが検出されることがあるが、照射香辛料から実際に検出されたかは不明である。

#### (2) 科学的特性

##### ① 微生物及び関連する食品に関する知見

アスペルギルス (*Aspergillus*) 属、ペニシリウム (*Penicillium*) 属、フザリウム (*Fusarium*) 属の特定菌株が主にマイコトキシン（カビ毒）を産生する。特に、アフラトキシン産生能が照射により増加するという懸念が注目されてきた<sup>1</sup>。アフラトキシンは化学構造の異なる16種類が知られており、AFB<sub>1</sub>、AFB<sub>2</sub>、AFG<sub>1</sub>、AFG<sub>2</sub>の4種類と代謝物であるAFM<sub>1</sub>及びAFM<sub>2</sub>の6種類が代表的なものである<sup>3,4,5,6</sup>。

黄色コウジ菌 (*Aspergillus flavus*) や *Aspergillus parasiticus* などのアフラトキシン生産菌によるアフラトキシンの産生は、基質となる食品や飼料の成分組成や水分、温度等諸条件の組み合わせに左右される。アフラトキシン生産菌は熱帯から亜熱帯地域にかけて生息しており、炭水化物に富む米、トウモロコシ等の他、落花生、ピスタチオナッツ、一部香辛料等を基質として生育する<sup>3,4,5</sup>。

##### ② 照射による対象微生物の増殖・毒素生産に関する知見

- ・ 微生物及び毒素の放射線抵抗性

アフラトキシン産生菌である *A.flavus* の放射線抵抗性は高くなく、懸濁液中の  $D_{10}$  値<sup>a</sup>は 300Gy であり、乾燥条件では高くなるものの、600Gy 程度である。一方、毒素であるアフラトキシンは、食品中において放射線に対してきわめて安定であり、分解のためには 500kGy 以上の線量が必要となる。なお、アフラトキシンの放射線感受性は種類によって異なり、 $G1>B1>G2>B2$  の順に分解されやすい<sup>6</sup>。

- ・ 放射線照射による毒素産生能の増加

放射線照射処理により、アフラトキシンの産生能が増加する要因として、照射による産生菌の生育環境の変化、突然変異株の生成などが挙げられる。

放射線照射により、食品中脂肪分の組成が変化し、産生菌の生育が促進されることによってアフラトキシン産生量が増大する<sup>7</sup>。また、競合菌の減少により、産生菌が増加する。適正な線量の照射により産生菌は殺菌されることから、主に処理後の再汚染がこれらのリスク要因となる<sup>6</sup>。

放射線照射を繰り返すことにより、突然変異株が生じ、アフラトキシン産生量は増大する<sup>8</sup>。また、放射線による刺激効果によるアフラトキシン産生量の増大が指摘されている<sup>9</sup>。なお、産生能が増大する菌の生成確率は低く、多くの菌の産生能は減少し、増大した株も継代培養で元に戻る<sup>9</sup>。

他にも、水分含量の多い条件で、希釈または照射により菌数を減少させて接種すると、アフラトキシン産生量が増大するという報告がある。<sup>10,11</sup>

なお、照射によるマイコトキシン産生能の増加に関する報告は近年見受けられず、主に減少するという報告が多い<sup>12,13</sup>。

### (3) 毒性評価

#### ① 体内動態<sup>4</sup>

$AFB_1$  は体内で代謝され  $AFM_1$ 、 $AFP_1$ 、 $AFQ_1$ 、 $AFL$  に変換される。肝臓ではチトクロム P450 により  $AFB_1$ -8,9-epoxide が生成する。

$AFB_1$  の代謝物である  $AFM_1$  は乳中に移行する。経口摂取量の 0.9% が乳中に、20% が尿中に移行する。

#### ② 一般毒性<sup>4</sup>

---

<sup>a</sup> 90%の細胞がコロニー形成能力を喪失するのに必要な線量。照射条件によって値が異なるが、WHO の報告書をはじめ、微生物の放射線抵抗性を示す際に、一般的に用いられる。

肝臓に対して急性毒性を示す (LD50 : 0.3mg/kg [AFB<sub>1</sub>, 経口、ウサギ])。ラットでは、300 μg/kg (4 週間) で細胞性免疫の低下が認められた。

### ③ 変異原性・遺伝毒性<sup>4</sup>

サルモネラ菌を用いた Ames 試験で AFB<sub>1</sub>(25-200ng)に変異原性が認められた。

### ④ 発がん性<sup>4</sup>

アフラトキシンは天然の発がん物質であり、JECFA(1998)において、AFB<sub>1</sub>は強い発がん性を有するとされている。

IARC による発がん分類 (実験動物)

十分な証拠 (sufficient evidence) : アフラトキシンの混合物、AFB<sub>1</sub>、AFG<sub>1</sub>

限定的な証拠 (limited evidence) : AFB<sub>2</sub>

不十分な証拠 (inadequate evidence) : AFG<sub>2</sub>

IARC による発がん分類 (ヒト)

Group1(ヒトに対して発がん性を示す) : アフラトキシンの混合物

## (4) 曝露評価

### ① 含有実態

未照射の食品を対象とした厚生労働科学研究によれば、アフラトキシンは、ピーナッツ、ピーナッツバター、チョコレート、ピスタチオ、ハトムギ、アーモンド、ソバ粉、香辛料、ココア、コーングリッツの一部から 3 μg/kg 未満の濃度で検出されている<sup>4</sup>。

しかし、実際の照射食品について、アフラトキシンの含有実態を調べたデータはない。

### ② 推定摂取量

未照射の食品を対象にモンテカルロ法を用いた推定によれば、我が国におけるアフラトキシンの推定摂取量の 99.9 パーセンタイル値は、2.06ng/kg/day と試算されている<sup>3,4,5</sup>。

しかし、実際の照射食品によるアフラトキシンの推定摂取量に関するデータはない。

## (5) 耐容量

### ① 耐容摂取量

耐容摂取量は設定されていない<sup>4</sup>。

## ② 急性参照値

急性参照値は設定されていない<sup>4</sup>。

## (6) 国際機関及び各国の取組状況

### ① 基準値及び検出方法

#### (a) 基準値

Codex の照射食品に関する一般規格において、照射食品の衛生に関する取り扱いが記載されている。適正製造規範(Good Manufacturing Practice: GMP)、HACCP、生鮮食品の輸送取り扱い規則の遵守が示されている中、「微生物学的安全性に関しては各国の規格基準に従うべき」と示されている<sup>14</sup>。なお、国際的なアフラトキシンに関する基準値は Codex<sup>a</sup>において総アフラトキシン (B1+B2+G1+G2) 等に関する規制が加工用落花生等に設定されており、EU<sup>b</sup>、米国<sup>c</sup>をはじめ 70 カ国以上において基準値が設定されている<sup>15,16,17</sup>。我が国では、食品衛生法により、アフラトキシン B1 は食品中に検出されてはならない (10  $\mu$  g/kg 以上が陽性) とされている<sup>3,4</sup>。

#### (b) 検出方法

アフラトキシンの分析法に関しては、クロロホルム、メタノールまたはアセトニトリルに少量の水を加えた溶媒で抽出し、液液分配またはシリカゲル等で精製した後 HPLC, LC/MS 及び薄層クロマトグラフィーで解析を行う<sup>3,4,5</sup>。

## ② 汚染防止・リスク低減方法

### ○ 国際的な規制

放射線照射された食品中のアフラトキシンに特化した規制は国際的に制定されていない。

### ○ 一般的な対応策

アフラトキシンを放射線で分解することは難しく、特に乾燥状態や食品中では非常に高線量を要するが、アフラトキシンを産生する糸状菌は比較的放射線感受性が高く、8kGy 程度の照射で完全殺菌できる<sup>6</sup>。

食品によっては、照射により、アフラトキシン産生菌の生育環境が向上する可能性があるため、処理後の再汚染防止を徹底する必要がある。また、繰り返し照射による突然変異株の生成を防止するためにも、適正な管理が要求される<sup>6</sup>。

<sup>a</sup>加工用落花生 15  $\mu$  g/kg(AFB1+ B2+ G1+ G2) 乳 0.5  $\mu$  g/kg(AFM1)

<sup>b</sup>加工用落花生 15.0  $\mu$  g/kg(AFB1+ B2+ G1+ G2) 8.0  $\mu$  g/kg(AFB1) 等

<sup>c</sup>全食品 20  $\mu$  g/kg (AFB1+ B2+ G1+ G2)

### ③ 国際的な評価

#### ○ WHO

WHO の報告書（1994）は、「照射後のアフラトキシン生産能増大の可能性を示す実験は、実用的見地からは考えられない実験条件で行われている」としている。「従って、科学的知見に基づく総合的な評価として、GMP に基づく適正な条件で貯蔵した照射食品においてアフラトキシンの増加という危険性は存在しない」と結論している<sup>1</sup>。

#### ○ EC

EC の食品科学委員会の見解（2003）によれば、WHO の見解同様、「マイコトキシンが増加する危険性はほとんどない」としている<sup>18</sup>。

#### ○ 米国

「食品製造・加工・出荷における放射線照射」において、使用できる線源や装置、食品の種類と線量、表示義務などを規定している。この中において、アフラトキシン産生に関する特別なリスク管理等に関しては基準が定められていない<sup>19</sup>。

### (7) 消費者の関心・認識

食品への放射線照射に関するアンケート<sup>d</sup>によれば、食品への放射線照射に対する一般消費者の認知度は現状では高くなく、半数以上の消費者は具体的な内容を知らない。

ただし、同アンケートでは、照射食品について「食品中の成分が変化し、未知の健康影響をもたらす恐れがある」と思うかという設問に対して、69%の回答者が「そう思う」または「どちらかというと思う」と回答していることから、アフラトキシンを始めとするマイコトキシンの安全性も類似の問題として潜在的な関心は高いと考えられる。

### (8) 不足しているデータ

放射線照射によりアフラトキシン産生菌のアフラトキシン産生能が増加するという懸念は、1980年代の研究をもとに WHO の報告書（1994）や EC の食品科学委員会の見解（2003）<sup>1,18</sup> で否定されており、特段の追加データは必要ないと考えられる。

---

<sup>d</sup> 報告書 3 章 3.2 参照

(引用文献)

- <sup>1</sup> WHO, Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food, (1994) (日本語訳：照射食品の安全性と栄養適性, コーブ出版, (1996))
- <sup>2</sup> Paster N et al, Effect of Gamma Radiation on Ochratoxin Production by the Fungus *Aspergillus Ochraceus*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 36: p.445-449, (1985)
- <sup>3</sup> 農林水産省、食品安全に関するリスクプロファイルシート アフラトキシン、  
[http://www.maff.go.jp/j/syouan/seisaku/risk\\_analysis/priority/pdf/chem\\_aflatox.pdf](http://www.maff.go.jp/j/syouan/seisaku/risk_analysis/priority/pdf/chem_aflatox.pdf)
- <sup>4</sup> 厚生労働省、アフラトキシンに関するリスクプロファイル、薬事・食品衛生審議会食品衛生分科会食品規格部会（平成20年7月8日開催）資料  
2-4<http://www.mhlw.go.jp/shingi/2008/07/dl/s0708-3g.pdf>
- <sup>5</sup> 内閣府食品安全委員会、アフラトキシン B1 の概要について、  
<http://www.fsc.go.jp/emerg/af.pdf>
- <sup>6</sup> 久米民和、食品照射はカビ毒アフラトキシンの防止に役立つか、放射線と産業, 115 号, pp.20-24, (2007)
- <sup>7</sup> Priyadarshini E and Tulpule PG, Effect of Graded Doses of Gamma-Irradiation on Aflatoxin Production by *Aspergillus Parasiticus* in Wheat, *Food and Cosmetic Toxicology*, 17: p.505-507, (1979)
- <sup>8</sup> Frank HK et al., Response of Toxicogenic and Non-toxicogenic Strains of *Aspergillus flavus* to Irradiation., *Sabouraudia*, 9, p.21-26, (1971)
- <sup>9</sup> 伊藤均、アフラトキシン産生に及ぼす低線量照射の影響、食品照射研究委員会研究成果最終報告書 ((社)日本アイソトープ協会)、p.235-244、(1992)
- <sup>10</sup> Sharma A et al, Influence of Inoculum Size of *Aspergillus parasiticus* Spores on Aflatoxin Production, *Appl. Environ. Microbiol*, 40, p.989-993, (1980)
- <sup>11</sup> Odamtten GT et al., Influence of Inoculum Size of *Aspergillus flavus* Link on the Production of B1 in Maize Medium Before and After Exposure to Combination Treatment of Heat and Gamma Radiation., *Int. J. Food Microbiol.*, 4, p.119-127, (1987)
- <sup>12</sup> Farag RS et al., Aflatoxin Destruction and Residual Toxicity of Contaminated-Irradiated Yellow Corn and Peanuts on Rats., *Adv Food Sci.*, 26.p.122-129, (2004)
- <sup>13</sup> Aziz et al, Control of *Fusarium* moulds and fumonisin B1 in seeds by gamma-irradiation, *Food Control.*, 18. p.1337-1342, (2007)
- <sup>14</sup> Codex, Codex General Standard for Irradiated Foods, CODEX STAN 106-1983, REV.1-2003, (2003)
- <sup>15</sup> Codex, Codex General Standard for Contaminants and Toxins in Foods, CODEX STAN 193-1995, Rev.3-2007, (2007)
- <sup>16</sup> COMMISSION REGULATION (EC) No 1881/2006
- <sup>17</sup> U.S.A. Compliance Policy Guides
- <sup>18</sup> EUROPEAN COMMISSION, Revision of the opinion of the Scientific Committee on Food on the irradiation of food, (2003)
- <sup>19</sup> 21CFR179 Irradiation in the Production, Processing and Handling. of Food

## 1.2.2 放射線抵抗微生物（ボツリヌス菌など病原性微生物）

毒性評価、曝露評価、耐容量、基準値及び検出方法の項目では、リスク評価を行う際の基礎情報として、ボツリヌス毒素に関する一般的な情報を掲載した。

### (1) 注目されるようになった経緯

放射線照射によって微生物の突然変異が引き起こされ、放射線抵抗性微生物が発生するのではという指摘がある<sup>1</sup>。

ボツリヌス菌 (*Clostridium botulinum*) やセレウス菌 (*Bacillus cereus*) は、食中毒の事例が国内外で多数報告されており、その芽胞は放射線抵抗性が高いことが知られている<sup>1</sup>。そのため、照射後残存した芽胞が発芽、増殖及び毒素産生を行い、中毒を引き起こす危険性が示唆されてきた。特にボツリヌス菌に関しては過去に多数の研究がなされている<sup>2</sup>。特に魚介類に照射を行うと、体内にグリコーゲンが生成してボツリヌス菌の毒素産生が増加したり、酸素非透過性の袋に保存した試料では、嫌気性菌であるボツリヌス菌が増殖しやすくなる可能性が指摘されている<sup>3</sup>。

国内外においてボツリヌス菌等による食中毒は今までに多数報告されている。照射食品に関しては、魚介類でボツリヌス菌感染のリスクが高いとされている。魚介類の照射は多くの国で禁止されており、照射食品に由来する中毒事例は今まで報告されていない。

### (2) 科学的特性

- ・ 突然変異による放射線抵抗性微生物の発生

微生物に放射線を繰り返し照射すると、放射線抵抗性を示すことがある<sup>4</sup>が、継代培養することで、放射線抵抗性は元へ戻る。放射線誘発の突然変異は、通常の照射条件下では発生率が低く、紫外線や薬剤と同程度である<sup>5</sup>。

- ・ 放射線抵抗性

水懸濁液中のボツリヌス菌の  $D_{10}$  値は 2kGy 弱であるのに対し、鶏肉中においては C 型、E 型菌芽胞は 10kGy の照射でも完全に死滅させることができなかった<sup>6</sup>。

- ・ 照射による病原性微生物及び毒素の増加

放射線照射によるボツリヌス菌への影響を見た研究は鶏肉や魚介類において複数報告されている。

ボツリヌス菌を接種した鳥の皮は、照射 (3kGy) の有無にかかわらず、10°C で保存した場合は毒素を産生しないが、30°C で保存した場合は毒素を産生する。このとき、照射した鶏肉での毒素生産が遅くなる。なお、腐敗臭が発生する以前に毒素が産生されることはない<sup>7</sup>。

1960年代に米国で行われた研究によると、魚介類では照射が原因で魚体内のグルコース等の糖成分の残存量の増加が引き起こされ、非照射試料より短時間でボツリヌス菌が照射魚体内に毒素を産生する<sup>3</sup>。

一方、1970年代のドイツ連邦栄養学研究所での研究では、照射の有無によって差は無いものの、5°C以上の保存温度において毒素の産生が報告されている<sup>8</sup>。

### (3) 毒性評価

#### ① 体内動態

該当情報なし

#### ② 一般毒性

ボツリヌス毒素は熱に不安定な神経毒である。神経伝達物質であるアセチルコリンの分泌を抑制し、弛緩性麻痺を起こす。なお、知覚神経には作用しないため、中毒になった状態においても意識はある。

#### ③ 変異原性・遺伝毒性

該当情報なし

#### ④ 発がん性

該当情報なし

### (4) 曝露評価

#### ① 含有実態

抗原性の違いにより A~G 型に分類されている。人に病原性を示すのは A、B、E 及び F 型であり、毒素産生菌はタンパク分解菌とタンパク非分解菌に分類される<sup>9</sup>。魚類によるボツリヌス食中毒は E 型が原因になるなど、食材によって食中毒の原因となる毒素が異なる<sup>3</sup>。また、菌が土壌由来であるため、その分布に地域性があり、食中毒原因菌の毒素型と一致することが多い<sup>10</sup>。

#### ② 推定摂取量

該当情報なし

### (5) 耐容量

該当情報なし

## (6) 国際機関及び各国の取組状況

### ① 基準値及び検出方法

#### (a) 基準値

Codex の照射食品に関する一般規格において、照射食品の衛生に関する取り扱いが記載されている。GMP、HACCP、生鮮食品の輸送取り扱い規則の遵守が示されているが、「微生物学的安全性に関しては各国の規格基準に従うべき」と示されている<sup>11</sup>。

#### (b) 検出方法

ボツリヌス菌毒素の分析法に関しては、食品や糞便から各種培地に分離した後、嫌気培養し、毒素検出はマウスでの毒性試験または PCR 法による毒素遺伝子の検出を行う<sup>9</sup>。

### ② 汚染防止・リスク低減方法

#### (a) 国際的な規制

放射線照射された食品中のボツリヌス菌に特化した規制は制定されていない。

#### (b) 一般的な対応策

保存方法によっては、ボツリヌス菌の毒素生産能に差が生じることがあることから、適切な温度（魚介類で 3℃以下等）での保存や、場合によっては加熱処理等を組み合わせる必要がある<sup>2,3</sup>。また、ボツリヌス菌は嫌気性であることから、増殖を抑えるために酸素透過性の食品包装が必要になるとの指摘もなされている<sup>3</sup>。

### ③ 国際的な評価

#### ○ WHO

ボツリヌス菌などの放射線抵抗微生物が照射環境で特異的に増加するという懸念は、現在 WHO の報告書（1994）で否定されている<sup>2</sup>。ただし、保存方法の違いにより毒素生産能に差が生じる可能性があることから、適切な保存方法（魚において 3℃以下で保存等）の遵守を推奨している<sup>2</sup>。

#### ○ EC

EC の食品科学委員会の見解（2003）によれば、「微生物毒素は微生物類より放射線に抵抗性であり、微生物毒素の被害を防ぐには照射前の良好な製造工程と照射後の良

好な貯蔵管理が必要である」とされている<sup>12</sup>。

○ 米国

「食品製造・加工・出荷における放射線照射」において、使用できる線源や装置、食品の種類と線量、表示義務などを規定している。この中では照射食品のボツリヌス毒素産生に関する特別なリスク管理等に関する基準は定められていない<sup>13</sup>。

(7) 消費者の関心・認識

食品への放射線照射に関するアンケート<sup>a</sup>によれば、食品への放射線照射に対する一般消費者の認知度は現状では高くなく、半数以上の消費者は具体的な内容を知らない。

ただし、同アンケートでは、照射食品について「食品中の成分が変化し、未知の健康影響をもたらす恐れがある」と思うかという設問に対して、69%の回答者が「そう思う」または「どちらかというと思う」と回答していることから、ボツリヌス菌を始めとする微生物とその安全性も類似の問題として潜在的な関心は高いと考えられる。

(8) 不足しているデータ

放射線抵抗微生物が放射線照射食品において特異的に増加するという懸念は、上述の通り、WHOの報告書(1994)<sup>2</sup>で否定されている。また、ボツリヌス菌などの特異的増殖についても、同報告書において、照射特有の危害を起こさせることはないとされている。したがって、特段の追加データは必要ないと考えられる。

---

<sup>a</sup> 報告書3章3.2参照

(引用文献)

- <sup>1</sup> 伊藤均、連載：なぜ食品照射かーその歴史と有用性 【2】 食品微生物等に対する放射線の影響と安全性、放射線と産業、111号、pp.36-42、(2006)
- <sup>2</sup> WHO, Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food, (1994) (日本語訳：照射食品の安全性と栄養適性, コープ出版, (1996))
- <sup>3</sup> 宮原誠、照射食品安全性検証の歴史(2) 照射魚介類中のボツリヌス菌について、食品照射 39 巻、pp.28-49、(2004)
- <sup>4</sup> Davies R et al., Radiation-resistant mutants of *Salmonella typhimurium* LT2 : Development and characterization, J. Bacteriol., 113, p.133-144, (1973)
- <sup>5</sup> 伊藤均 他、繰り返し照射による *Salmonella typhimurium* の放射線抵抗性の誘導、食品照射. 24 巻、12-15、(1989)
- <sup>6</sup> 小崎俊司 他、ボツリヌス菌芽胞に対するガンマ線照射の影響、食品照射研究委員会研究成果最終報告書 ((社)日本アイソトープ協会)、p.224-234、(1992)
- <sup>7</sup> Dezfulian M and Bartlett JG, Effect of irradiation on growth and toxigenicity of *Clostridium botulinum* types A and B inoculated on to chicken skins, Appl Environ Microbiol 53: p.201-203, (1987)
- <sup>8</sup> Hussain AM et al., Comparison of Toxin Production by *Clostridium botulinum* Type E in Irradiated and Unirradiated Vacuum-Packed Trout (*Salmo Gairneri*), Arch. Lebensbittel hyg., 28, p.23-27. (1977)
- <sup>9</sup> 農林水産省、食品安全に関する病原微生物リスクプロファイルシート ボツリヌス菌  
[http://www.maff.go.jp/j/syouan/seisaku/risk\\_analysis/priority/pdf/micro\\_botulinu.pdf](http://www.maff.go.jp/j/syouan/seisaku/risk_analysis/priority/pdf/micro_botulinu.pdf)
- <sup>10</sup> CDC : Botulism in the United States 1899-1996, Atlanta, pp.5-6, (1998)
- <sup>11</sup> Codex, Codex General Standard for Irradiated Foods, CODEX STAN 106-1983, REV.1-2003, (2003)
- <sup>12</sup> EUROPEAN COMMISSION, Revision of the opinion of the Scientific Committee on Food on the irradiation of food, (2003)
- <sup>13</sup> 21CFR179 Irradiation in the Production, Processing and Handling. of Food

### 1.3 誘導放射能の生成

#### (1) 注目されるようになった経緯

食品中にはもともと自然の放射性元素（ラドン等）が存在する。第二次世界大戦終了後、各国で食品への放射線照射の実用化の研究が進められる中で、食品への放射線照射によってさらに放射能を誘起する（誘導放射能）ことは極力避けるべきとの観点から、各国で照射食品の健全性についての研究が行われた<sup>1</sup>。1960年代にこれらの研究を踏まえ、JECFIは安全を見越して、電子線発生装置からのエネルギーは最高10MeV、X線は5MeV以下とする勧告を出した<sup>2</sup>。

#### (2) 科学的特性

##### ① 関連する食品

ジャガイモ、タマネギ、ニンニク、イチゴ、マンゴー、香辛料（スパイス、ハーブ）、肉類（家禽肉、豚肉等）、魚介類（エビ、カエル脚等）、乾燥野菜等すべての食品。特に、高エネルギーの放射線を照射するものほど誘導放射能との関連性が強くなる。

##### ② 誘導放射能の発生に関する知見

食品照射で使われる放射線は一般的には10MeV以下の電子線とコバルト60の<sup>ガンマ</sup>線であり、このレベルの放射線では主として $(\gamma, n)$ 反応<sup>a</sup>が問題になる。このほか、 $(\gamma, \gamma')$ 反応<sup>b</sup>、 $(\gamma, p)$ 反応<sup>c</sup>について誘導放射能が生じる可能性がある<sup>3</sup>。

その他にも、照射施設では、照射装置本体、周辺設備等が放射化することがあり、このとき二次的に中性子が発生し、 $(n, \gamma)$ 反応<sup>d</sup>により<sup>ガンマ</sup>線が発生する可能性があることから、IAEAでは照射場には中性子を発生する物質をできるだけ置かないように勧告している<sup>4</sup>。

<sup>a</sup> 物質に $\gamma$ 線が照射された場合に、原子核が中性子結合エネルギー以上に励起されて中性子が放出される反応で、光核反応とも呼ばれる。中性子が1つ減った核種が放射性であれば、放射化が引き起こされる。

<sup>b</sup>  $\gamma$ 線によって励起された原子核が再び元の基底状態に戻るときに $\gamma$ 線を放出する反応。

<sup>c</sup>  $\gamma$ 線を照射された原子核から陽子（proton）が放出される反応。

<sup>d</sup> 中性子を照射された原子核から $\gamma$ 線が放出される反応。

- $(\gamma, n)$  反応

閾値が 5~10MeV の間にあり、反応生成物が放射性核種のものには 110 種類あるが、反応断面積から考えて、これらの反応により食品中の放射能が直接測定できる可能性はない。<sup>ガンマ</sup> $\gamma$  線のエネルギーが 5MeV 以下の場合、 $(\gamma, n)$  反応により直接放射化される核種はない<sup>3,5</sup>。

- $(\gamma, \gamma')$  反応

モデル試料としてカドミウム箔、スズ箔を用いて照射実験を行ったところ、コバルト 60 の<sup>ガンマ</sup> $\gamma$  線によって、ストロンチウム 87、カドミウム 113、インジウム 113、インジウム 115 などをターゲットとする反応により放射化が認められた。しかし、食品として考えた時は、これらの元素が食品中に含まれる量は極微量であり、黒コショウを試料としてコバルト 60 の<sup>ガンマ</sup> $\gamma$  線で照射後、スペクトロメータにより測定を試みたが検出できなかった<sup>3</sup>。

- $(\gamma, p)$  反応

<sup>ガンマ</sup> $\gamma$  線のエネルギーが 10MeV 以下の場合、 $(\gamma, p)$  反応で直接放射化される核種はない<sup>3</sup>。

### (3) 毒性評価

該当情報なし

### (4) 曝露評価

WHO の報告書 (1994) によれば、「多くの食品について照射後 24 時間以内の誘導放射能を理論的な半経験式を用いて計算した研究では、誘導放射能を検出するのは困難と評価された<sup>2</sup>」とされている。

米国陸軍の Natick 研究所の実験及び当該データを再整理した結果によると、コバルト 60 を 50kGy 照射した牛肉、ベーコンから、バックグラウンドの 2.4 倍、3 倍の誘導放射能が検出された。また、核種は不明であるが、牛肉でも 4.5kBq、ベーコン 2.3kBq、2.7kBq などの誘導放射能が観測された。さらに、10kGy 以上 20kGy 以下の照射でも、カドミウムなどで  $(\gamma, \gamma')$  反応が観測された。また、コバルト 60 の<sup>ガンマ</sup> $\gamma$  線を 25kGy 照射した食品において、放射能がバックグラウンド以上の値を示し、体内被曝量が増加することが報告されている<sup>6</sup>。

食品中の 94 核種全体に対する光核反応の閾値は 10.5MeV であり、10MeV の電子線で 32kGy 照射した直後の食品の誘導放射能は  $10^3\text{Bq}$  となる。10MeV の電子線照射により生成した放射性核種の体内での実効半減期は約 10 日となる<sup>7</sup>。

## (5) 耐容量

該当情報なし

## (6) 国際機関及び各国の取組状況

### ① 基準値

放射線照射された食品中の誘導放射能に対する基準は制定されていない。

### ② リスク低減方法

#### (a) 国際的な規制

IAEA、Codex の勧告（2002）においては、「食品中の誘導放射能は有意ではない」とされているが、「作業者の被曝等の側面も含めて、照射施設は GMP に従うべき」とされている<sup>4</sup>。

#### (b) 一般的な対応策

照射後、一定時間の経過により誘導放射能は低減される。したがって、照射後、摂取までに一定の時間を確保することにより、誘導放射能による影響を低減することができる。

### ③ 国際的な評価

#### ○ WHO

WHO の報告書（1994）によれば、「各国で食品照射に認められているエネルギー限界（電子線で 10MeV、X 線で 5MeV、コバルト 60 で 1.33MeV）では、誘導放射能が測定可能なレベルには達しない」とされている<sup>2</sup>。

#### ○ IAEA

IAEA の報告書（2002）によれば、「平均線量 60kGy までのコバルト 60 の<sup>ガンマ</sup>γ 線で照射された食品の消費によって生じる被曝量は有意ではなく、ゼロと表現するのが最も適切であるとされている。具体的には、照射直後の食品を 50kg/年間消費した時の被曝量の増加は、 $10^{-8}\text{mSv/年}$ 、すなわち自然のバックグラウンドレベルである  $3\text{mSv/年}$  の 3 億分の 1 未満である<sup>4</sup>」とされている。

#### (7) 消費者の関心・認識

2007年に行われた食品への放射線照射に関するアンケート<sup>e</sup>によれば、一般消費者の食品への放射線照射に対する認知度は現状では高くなく、半数以上の消費者は食品への放射線照射について具体的な内容を知らない。

#### (8) 不足しているデータ

上述の通り、これまでのWHOの報告書(1994)<sup>2</sup>やIAEAの報告書(2002)<sup>4</sup>での検討により、食品への放射線照射によって生じる誘導放射能は、有意なレベルに達しないとされている。国内の研究でも、ストロンチウムなどの一部の核種についてはガンマ線照射による放射化が測定されるが、食品中に含まれるとしてもその含有量は微量であるため、安全上問題にならないことが確認されている。従って、通常の組成の食品であれば、特段の追加データは必要ないと考えられる。

---

<sup>e</sup> 報告書3章3.2参照

(引用文献)

- <sup>1</sup>松山晃、食品照射研究・開発の現況、化学と生物 Vol.6, No.7、p.393-400、(1968)
- <sup>2</sup>WHO, Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food, (1994) (日本語訳：照射食品の安全性と栄養適性, コープ出版, (1996))
- <sup>3</sup>古田雅一 他、照射食品中の誘導放射能、食品照射研究委員会研究成果最終報告書 ((社)日本アイソトープ協会)、p.3-45 (第1章)、(1992)
- <sup>4</sup>Natural and induced radioactivity in food IAEA-TecDoc-1287, (2002)
- <sup>5</sup>古田雅一、照射食品の誘導放射能の評価、食品照射 第41巻、第1、2号、p.23、(2006)
- <sup>6</sup>宮原誠、X線並びに $\gamma$ 線を照射した食品に生じる誘導放射能、国立衛研報 第125号、p.107-118、(2007)
- <sup>7</sup>松山晃、世界における食品照射の現状と課題、食品衛生研究 第36巻、No.6、p.7、(1986)

## 2. 照射食品の栄養適性、加工適性、保存性に係るリスク

### 2.1 食品成分の変性

#### 2.1.1 栄養価等の損失

##### (1) 注目されるようになった経緯

1950年代から60年代にかけて米国陸軍で過剰照射された食品を餌として用いて行われた動物実験において、ビタミン不足による不妊等が観察されたことにより、食品照射により、ビタミン等の生理活性物質が分解されることが明らかになった<sup>1</sup>。

##### (2) 科学的特性

###### ① 損失が懸念される栄養素

WHOの報告書(1994)によれば、「加熱、乾燥、くん煙、缶詰、冷凍などのその他の方法と同様に、水分含量、主要栄養素(タンパク質、炭水化物、脂質)、必須ミネラル、水溶性ビタミン、脂溶性ビタミンといった栄養素が放射線照射によって影響を受ける」と報告されている<sup>2</sup>。

###### ② 照射による栄養価への影響に関する知見

###### ・ 主要栄養素(タンパク質と炭水化物)

10kGy以下の線量の照射は、タンパク質と炭水化物の栄養価に通常顕著な影響は及ぼさない<sup>2,3,4</sup>。

###### ・ 主要栄養素(脂質)

脂質はイオン化照射に対して感受性が高い栄養素であり、自動酸化が誘導される可能性が指摘されている<sup>5</sup>。また、生成されたフリーラジカルが不飽和脂肪酸の酸化を促進し、肉成分の生化学的変化を引き起こして栄養価に影響を与える懸念なども報告されている<sup>6</sup>。

###### ・ 微量栄養素(ミネラル)

WHOの報告書(1994)によれば、「照射がミネラルの量または生体有効性に影響を与えるという報告はない」としている<sup>2</sup>。しかし、照射したハッシュウマメ種子やハス種子においてミネラル分が減少するという報告もなされている<sup>7,8</sup>。

###### ・ 微量栄養素(水溶性ビタミン)

WHOの報告書(1994)によれば、「放射線照射による水溶性ビタミンの損失に関

する研究はかねてより多くなされており、放射線への感受性は一般的に、チアミン>アスコルビン酸>ピリドキシン>リボフラビン>葉酸>コバラミン>ニコチン酸の順」とされている<sup>2</sup>。適正な条件下では、チアミンの損失は10~20%以下と小さく、熱処理や乾燥など他の食品保存方法における損失と同程度である。

- ・ 微量栄養素（脂溶性ビタミン）

WHOの報告書（1994）によれば、「放射線照射による脂溶性ビタミンの損失に関する研究もかねてより多くなされており、水溶性ビタミン同様、放射線感受性は食品の種類、線量、照射時と貯蔵時の環境に大きく左右される。また、放射線感受性は一般的に、ビタミンE>カロチン>ビタミンA>ビタミンK>ビタミンDの順」とされている<sup>2</sup>。適正な条件下では、トコフェロール（ビタミンE）の損失は10~20%以下と小さく、熱処理や乾燥など他の食品保存方法における損失と同程度である。

(3) 毒性評価

該当情報なし

(4) 曝露評価

該当情報なし

(5) 耐容量

該当情報なし

(6) 国際機関及び各国の取組状況

① 基準値

Codexでは、「栄養適性に関する基準については、食品が販売される当該国で適用される栄養適性に関する公衆衛生上の国家基準を遵守すべき」としている<sup>9</sup>。（ただし、実際には照射食品に特化して、栄養面の特別な規定を設けている国はない。）

② リスク低減方法

(a) 国際的な規制

放射線照射された食品中の栄養価の損失に対する国際的な規制は定められていない。

(b) 一般的な対応策

実際のリスク低減方法としては、「ビタミンは種類によっては、低温（-45℃）での照射や熱湯への浸漬と組み合わせることで、損失を低減させることができる」とされている<sup>2</sup>。また、食品添加物を加えることで、ビタミン E などの抗酸化成分の減少を防ぐことができる<sup>10</sup>。

③ 国際的な評価

○ WHO

JECFI（WHO 1981 年）の報告では、「食品の総平均線量が 10kGy までの照射は、特別な栄養学的または微生物学的問題を生じない」と結論付けられている<sup>11</sup>。照射食品は、乾燥、くん煙、缶詰、冷凍といった他の方法で処理された食品と、栄養学的に同等である。WHO の報告書（1994）によれば、「ビタミン類の損失は、適正な処理技術で最小限にすることができる」と指摘されている<sup>2</sup>。

10kGy を超える線量については、WHO の報告書（1999）において、「照射食品の栄養適性については数々の研究が行われ、その多くが高線量での影響を検討している。

（中略）一般的に、これらの研究により、照射による影響についての共通性と予言可能性が確認されている<sup>12</sup>」とされている。同報告書では、これまでの多数の研究に基づき、「タンパク質、脂肪、炭水化物は、栄養価と消化の面で照射によって有意な変化を受けない<sup>12</sup>」としている。また、「10kGy を超える線量で食品の官能特性を保持するには、乾燥製品を除いて、酸素非存在下で低温で照射を行う必要があり、これにより栄養適性も保持される。栄養学的な観点では、照射食品は加熱滅菌された食品と実質的に同等又はそれよりも優れている<sup>12</sup>」とされている。「ただし、チアミンは食事からの摂取量の計算を行うべき唯一のビタミンである<sup>12</sup>」とも述べている。

○ EC

1987 年に EC の食品科学委員会は、1980 年の JECFI の栄養学的側面を始めとする結論を是認し、「10kGy 以下の線量で照射された食品の安全性を評価するために、これ以上の動物実験は行う必要がない」との見解を示した<sup>13</sup>。

(7) 消費者の関心・認識

食品への放射線照射に関するアンケート<sup>a</sup>によれば、一般消費者の食品への放射線照射に対する認知度は現状では高くなく、半数以上の消費者は食品への放射線照射につい

て具体的な内容を知らない。

#### (8) 不足しているデータ

上述の通り、WHO の報告書（1994、1999）において、10kGy まで、又は 10kGy を超える照射について、一般的には照射による特別な栄養学的問題は生じないとされている。その一方で、例えば、1981 年の報告書では、「個々の照射食品における変化の重要性とその食事での役割について注意を払うべきである<sup>11</sup>」とされ、1999 年の報告書では、「チアミンは食事からの摂取量の計算を行うべき唯一のビタミンである<sup>12</sup>」とも述べられている。そこで、放射線照射食品の利用に当たっては、チアミンをはじめとするビタミン等の減少率のデータと食品の想定される利用用途、摂取量等を考慮して、栄養学的な健全性について確認することが望ましい。

---

<sup>a</sup> 報告書 3 章 3.2 参照

(引用文献)

- <sup>1</sup>宮原誠、照射食品安全性検証の歴史、食品照射, 38 巻, pp. 31-48、(2003)
- <sup>2</sup>WHO, Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food, (1994) (日本語訳：照射食品の安全性と栄養適性, コープ出版, (1996))
- <sup>3</sup>Elias PS and Cohen AJ, Radiation Chemistry of Major Food Contaminants, Elsevier (1977) (日本語訳：食品照射の化学、学会出版センター)
- <sup>4</sup>Diehl JF, Nutritional effects of combining irradiation with other treatments, Food control. 2, p.20-25, (1991)
- <sup>5</sup>Hammer, C. T. and Wills, E. D., The effect of ionizing radiation on the fatty acid composition of natural fats and on lipid peroxide formation, Int. J. Radiat. Biol., 35(4), p.323-332, (1979)
- <sup>6</sup>Du, M., Ahn et al, Influence of dietary conjugated linoleic acid on volatiles profiles, color and lipid oxidation of irradiated raw chicken meat, Meat Science, 56, p.387-395. (2000)
- <sup>7</sup>Bhat R et al, Nutritional quality evaluation of velvet bean seeds (*Mucuna pruriens*) exposed to gamma irradiation. Int J Food Sci Nutr, 59, p.261-278. (2008)
- <sup>8</sup>Bhat R and Sridhar KR, Nutritional quality evaluation of electron beam-irradiated lotus (*Nelumbo nucifera*) seeds. Food Chem, 107, p.174-184 (2008)
- <sup>9</sup>Codex, Codex General Standard for Irradiated Foods, CODEX STAN 106-1983, REV.1-2003, (2003)
- <sup>10</sup>宮原誠、X線並びに $\gamma$ 線を照射した食品に生じる誘導放射能、国立衛研報、第125号、P.107-118、(2007)
- <sup>11</sup>Wholesomeness of irradiated food Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee, WHO Technical report series No.659, (1981)
- <sup>12</sup>High-dose irradiation: Wholesomeness of food irradiated with doses above 10kGy Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group Geneva 1999
- <sup>13</sup>European Commission: Reports of the Scientific Committee on Foods on the Irradiation of Food (Eighteen Series) 1987

## 2.1.2 食品の加工適性、食味・風味への影響

### (1) 注目されるようになった経緯

放射線照射した小麦粉におけるグルテン分解による製麺適性の低下や、卵の粘度の低下、この他にも放射線照射による味、臭い、テクスチャー等の変化の可能性が示唆されてきた<sup>1,2,3</sup>。

### (2) 科学的特性

#### ① 加工適性や食味・風味の変化が懸念される食品

米、小麦などデンプンを多く含む食材、肉類など脂質を多く含む食材、その他タンパク質中の含硫アミノ酸を多く含む食材など<sup>2,3</sup>。

#### ② 照射による加工適性、食味・風味への影響に関する知見

##### ・ デンプン等を含む食材の品質変化

放射線照射によって生成するフリーラジカルはデンプン等の多糖類の分子構造の変化や断片化を引き起こす<sup>2,4,5</sup>。この理由から、デンプン等を含む食材の粘度の低下や、水溶性や酸性度の増加が引き起こされる<sup>6</sup>。また、穀物中の成分、例えばグルテンの分解なども報告されており、この結果、小麦等の製麺適性の低下や米などの食味の変化が発生する<sup>2,3</sup>。

##### ・ 肉類等への放射線照射による照射臭の発生

肉タンパク構成成分である含硫アミノ酸あるいは脂質は、放射線照射によって脱硫化あるいは酸化し、照射臭の原因となる揮発性物質を発生させる<sup>2,7</sup>。食肉や魚介類での照射臭の発生が 3kGy で微量発生する他、鶏卵を室温下で照射した場合、0.5kGy の<sup>ガンマ</sup>γ線照射で食味・風味が変化する<sup>8</sup>。

### (3) 毒性評価

該当情報なし

### (4) 曝露評価

該当情報なし

### (5) 耐容量

該当情報なし

## (6) 国際機関及び各国の取組状況

### ① リスク低減方法

#### (a) 国際的な規制

放射線照射された食品の食味の変化については、国際的な規制は定められていない。

#### (b) 一般的な対応策

正確で適切な放射線照射を行うことで、対応が可能である<sup>1</sup>。真空包装して酸素を除去して照射したり、凍結下で照射したりすることにより、食味劣化や色調変化を防止することが可能である<sup>3</sup>。

### ② 国際的な評価

#### ○ WHO

WHOの報告書(1994)によれば、「照射が不正確または不適切に利用された場合には食品の食味的性質が損なわれるとしているが、そのような食品は消費者が受け入れないため、問題をもたらすことはない」とされている<sup>1</sup>。

## (7) 消費者の関心・認識

食品への放射線照射に関するアンケート<sup>a</sup>によれば、食品への放射線照射に対する一般消費者の認知度は現状では高くなく、半数以上の消費者は具体的な内容を知らない。

## (8) 不足しているデータ

炭水化物、脂質、タンパク質等の食品中の成分に放射線照射が与える影響については、既に多くの研究があるが、多数の成分からなる実際の食品では、放射線照射による影響は、食品中の成分や照射条件等により変わる。放射線照射食品の利用に当たっては、目的とする食品の利用用途等を考慮して、加工適性や食味・風味への影響について検討が行われることが望ましい。

---

<sup>a</sup> 報告書3章3.2参照

(引用文献)

- <sup>1</sup> WHO, Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food, (1994) (日本語訳：照射食品の安全性と栄養適性, コープ出版, (1996))
- <sup>2</sup> Elias PS and Cohen AJ, Radiation Chemistry of Major Food Contaminants, Elsevier (1977) (日本語訳：食品照射の化学、学会出版センター)
- <sup>3</sup> 伊藤均、連載：なぜ食品照射か—その歴史と有用性【3】食品の照射効果と衛生化 放射線と産業、112号、pp.36-42、(2006)
- <sup>4</sup> Sokhey, A.S.and Hanna, M.A., Properties of irradiated starches, Food Struct. 12, p.397-410, (1993)
- <sup>5</sup> 坂上和之 ほか、「電子線照射による高分子多糖類の機能特性」の変化、食品照射、Vol.33 No.1/2、p.10-18、(1998)
- <sup>6</sup> Bao, J.and Corke, H., Pasting properties of gamma-irradiated rice starches as affected by pH. J. Agric. Food Chem. 50, p.336-341, (2002)
- <sup>7</sup> Giroux,M., and Lacroix,M., Nutritional adequacy of irradiated meat – a review, Food Research International, 31, p.257-264, (1998)
- <sup>8</sup> WOON Jae-Ho ほか、ガンマ線照射による鶏卵の食味変化とサルモネラの殺菌効果、食品照射、Vol.42 No.1-2、p.1-3、(2007)

## 2.2 食品包装への影響

### (1) 注目されるようになった経緯

食品照射の利点として、既に包装済みの食品を放射線照射により殺菌できるという点が挙げられるが、その一方で、包装材への照射による有害物質の生成や、包装材の劣化の可能性が指摘されてきた<sup>1</sup>。

### (2) 科学的特性

- ・ 高分子鎖（ポリマー）の構造変化

食品包装材を形成する高分子重合体では、フェニル環が分子内及び分子間において放射線に対する高い抵抗性を示す。従って、放射線に対する感度は、脂肪族に対して高く、芳香族において低い。放射線照射により高分子鎖（ポリマー）の架橋結合が発生し、伸長強度や硬度の増加、耐溶剤性の変化、耐衝撃強度の減少などが引き起こされる<sup>1</sup>。

- ・ 揮発性化合物、有機ラジカルの生成

放射線照射により高分子鎖が切断され、短鎖高分子の形成、ガスの発生、抽出物の変化などが引き起こされる<sup>1</sup>。例えば、LDPE（低密度ポリエチレン）を酸素存在条件下で放射線照射すると、揮発性物質としてアルデヒド類、ケトン類、カルボン酸類、飽和炭化水素類が生成する<sup>2</sup>。

- ・ 添加剤の分解等

市販のポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレンに<sup>ガンマ</sup>線照射を行ったところ、酸化防止剤の顕著な減少と、その分解産物の生成が見られたが、食品衛生上特に問題となる変化は見出されなかった<sup>3</sup>。

### (3) 毒性評価

該当情報なし

### (4) 曝露評価

該当情報なし

### (5) 耐容量

該当情報なし

## (6) 国際機関及び各国の取組状況

### ① 国際的な規制

Codex では、技術的および衛生上の目的達成に見合った線量、適正照射基準（Good Irradiation Practice : GIP）への適合、照射処理に適した食品および容器包装の衛生状態、GMP に則った照射前後の適正な取り扱いを定めている<sup>4</sup>。包装材については、「照射後の汚染や感染を避けるために、食品は再汚染や再感染を効果的に防止できる素材で包装すること、包装材は輸入国の基準にしたがうこと、容器の大きさと形状は照射施設の運転特性（施設内の輸送システムや照射線源など、容器内の線量分布に影響を与える特性）などを考慮して決める」ことが定められている<sup>4</sup>。

米国では「食品製造・加工・出荷における放射線照射」において、食品照射に使用できる包装材を表 1 の通り詳細に規定している<sup>5</sup>。

表 4-2 米国 21 CFR 179.45 で定められる食品照射に使用可能な包装材

法令	包装材	最大線量 [kGy]
Section 179.45(b)	ニトロセルロース加工セロファン	10
	グラシン紙	10
	ワックス加工の板紙	10
	ポリオレフィンフィルム	10
	クラフト紙	0.5
	PETフィルム（基本重合体）	10
	ポリスチレンフィルム	10
	塩酸ゴムフィルム	10
	塩化ビニリデン-塩化ビニル共重合体フィルム	10
Section 179.45(c)	ナイロン11 [ポリアミド-11]	10
Section 179.45(d)	エチレン-酢酸ビニル共重合体	30
	パーチメントペーパー	60
	ポリエチレンフィルム（基本重合体）	60
	PETフィルム	60
	ナイロン6 [ポリアミド-6]	60
	塩化ビニル-酢酸ビニル共重合体フィルム	60

（出典：文献 5 による。）

EU では、「照射食品の包装に用いられる素材は、その目的に適したものでなければならない」としている<sup>6</sup>。オーストラリアとニュージーランドでは、「照射食品に使用される又は使用するための包装及び包装資材は、処理目的に適した品質と容認可能な衛生状態を満たすべきであり、照射前後において、事例毎の処理技術の個別の要求事項を考慮しながら、GMP に従って取り扱われるべき」としている<sup>7</sup>。

### ② 一般的な対応策

放射線抵抗性の高い包装材を用いることで、リスクを低減することができる。また、抗菌性の高い包装材を用いて殺菌効果を高め、必要放射線量を低減させる方法も考えられる<sup>8</sup>。

#### (7) 消費者の関心・認識

食品への放射線照射に関するアンケート<sup>a</sup>によれば、食品への放射線照射に対する一般消費者の認知度は現状では高くなく、半数以上の消費者は具体的な内容を知らない。

#### (8) 不足しているデータ

放射線照射による包装材への影響については国内外で各種の検討が行われ、海外で食品照射に利用可能な包装材の規定も設けられている。今後、従来食品照射に利用されていなかった包装材を新たに利用する場合は、当該包装材が食品照射に対応していることを確認するためのデータを整備することが望まれる。

---

<sup>a</sup> 報告書 3 章 3.2 参照

(引用文献)

- <sup>1</sup> N. Chuaqui-Offermann, Food Packaging Materials and Radiation Processing of Food, A Brief Review. Radiar. Phys. Chem., 34(6):p.1005-1007, (1989)
- <sup>2</sup> Azuma K. et al, Identification of volatiles from low density polyethylene film irradiated with electron beam, Agric. Biol. Chem., 47 (4), p.855, (1983)
- <sup>3</sup> 河村葉子ほか 食品用ポリエチレン、ポリプロピレン及びポリスチレン製品へのガンマ線照射の影響：添加剤及びその他の化合物 食品照射 第35号、第1,2号、(2000)
- <sup>4</sup> CODEX, Codex General Standard for Irradiated Foods, CODEX STAN 106-1983, REV.1-2003, (2003)
- <sup>5</sup> 21 CFR 179, Irradiation in the Production, Processing and Handling of Food
- <sup>6</sup> DIRECTIVE 1999/2/EC of 22 February 1999 on the approximation of the laws of the Member States concerning foods and food ingredients treated with ionising radiation
- <sup>7</sup> Australia New Zealand Food Standards Code – Standard 1.5.3 Irradiation of Food (Amend No.88, Gazette No. FSC 30, 5 October 2006)
- <sup>8</sup> J. Han et al, The influence of electron beam irradiation of antimicrobial-coated LDPE/polyamide films on antimicrobial activity and film properties. LWT (Lebensmittel Wissenschaft Technologie), Vol.40, No.9, p.1545-1554, (2007)