

表2 ガンマ線照射した牛肝臓の栄養成分の変化

成分		処理		
		コントロール	3 kGy (水中)	5kGy (ドライアイス)
たんぱく質	(g/100gFW)	19.7 ± 0.1	19.6 ± 0.2	19.8 ± 0.4
水分	(g/100gFW)	72.3 ± 0.3	72.2 ± 0.6	72.1 ± 0.9
脂質	(g/100gFW)	3.8 ± 0.3	3.8 ± 0.2	3.8 ± 0.1
チアミン(B1)	(mg/100g FW)	0.189 ± 0.001	0.165 ± 0.003 **	0.178 ± 0.008 *
ビタミン B6	(mg/100g FW)	0.85 ± 0.04	0.77 ± 0.03 *	0.83 ± 0.02
ビタミン B12	(µg/100g FW)	62.7 ± 3.2	62.3 ± 4.2	64.3 ± 3.8
ナイアシン	(mg/100g FW)	13.6 ± 0.2	13.5 ± 0.4	13.5 ± 0.2
総アスコルビン酸	(mg/100g FW)	28.0 ± 0.5	27.0 ± 0.3 *	27.5 ± 0.4
葉酸	(mg/100g FW)	1.2 ± 0.0	1.4 ± 0.06 *	1.2 ± 0.06
鉄	(mg/100g FW)	5.6 ± 0.1	5.9 ± 0.6	5.5 ± 0.4
ビタミン A	(µg/100g FW)	16.3 ± 1.2	14.3 ± 4.0	16.0 ± 2.6
ビタミン E	(mg/100g FW)	0.49 ± 0.01	0.47 ± 0.02	0.50 ± 0.01

mean ± SD (n=3)

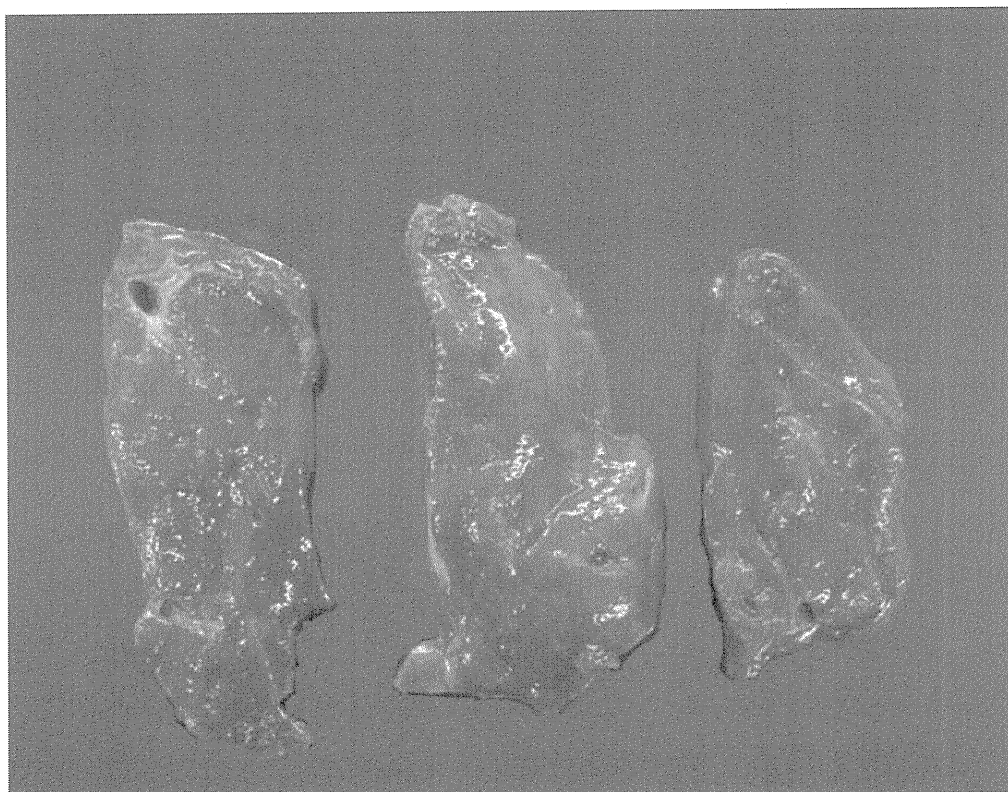
*; p<0.05, **; p<0.01 でコントロールと比較して有意差あり (t 検定)

表 3 TBA 価および過氧化物価

成分		処理		
		コントロール	3 kGy (水中)	5 kGy (ドライアイス)
TBA 価	(n mol/g)	1.1 ± 0.3	1.5 ± 0.2	1.2 ± 0.1
過氧化物価				
(抽出油)	(m eq/kg)	2.3 ± 1.3	1.3 ± 0.3	0.7 ± 0.3

mean ± SD (n=3)

図4. 色差測定用試料の外観



コントロール

冷蔵 3kGy

凍結 5kGy

150g の塊を包装して照射後に凍結保存し、解凍後切り分けた

表 4 照射および非照射牛肝臓の L*、a* b*値およびメトリック彩度

部位 メータ	処理			
	パラ コントロール	3 kGy (水中)	5kGy(ドライアイス)	
外側 (膜あり)				
L*	30.4 ± 1.7	32.2 ± 1.9 *	31.2 ± 1.1	
a*	14.0 ± 1.2	13.4 ± 2.3	15.2 ± 0.6	
b*	4.5 ± 1.4	2.5 ± 1.6 **	5.2 ± 0.7	
メトリック彩度	14.7 ± 1.6	13.7 ± 2.5	16.1 ± 0.8	
外側 (膜なし)				
L*	28.9 ± 3.5	28.8 ± 1.5	28.4 ± 1.5	
a*	16.4 ± 1.3	16.3 ± 0.5	19.0 ± 2.0 **	
b*	10.3 ± 1.5	10.5 ± 1.1	11.2 ± 0.8	
メトリック彩度	19.4 ± 1.7	19.4 ± 0.9	22.0 ± 2.0 **	
内側 (切り口)				
L*	28.0 ± 2.8	30.1 ± 2.4 *	27.9 ± 2.2	
a*	14.9 ± 1.3	16.9 ± 1.5 **	15.1 ± 1.1	
b*	9.2 ± 1.3	10.2 ± 1.3 *	8.5 ± 0.9	
メトリック彩度	17.5 ± 1.6	19.8 ± 1.7 **	17.3 ± 1.2	

mean ± SD (n=3)

*; p<0.05、 **; p<0.01 でコントロールと比較して有意差あり (t 検定)

平成 24 年度 厚生労働科学研究費 厚生労働科学特別研究事業
食品に対する放射線照射による殺菌手法及び効果判定手法の開発
並びに安全性に関する研究

分担研究報告書

分担課題名 放射線照射による殺菌等の手法の対象となる食品の検討

研究分担者：等々力 節子 独) 農研機構 食品総合研究所

研究協力者：川崎 晋 独) 農研機構 食品総合研究所

研究要旨：放射線照射による食品の殺菌について、その技術的特徴、諸外国での実施・許可状況、研究動向について文献等による調査を行い、当面、わが国で放射線照射による殺菌手法の検討対象となる食品について情報を整理した。放射線殺菌技術は、香辛料などの植物性乾燥食品原材料を汚染する芽胞菌の殺菌や、食品を汚染する腸管出血性大腸菌、カンピロバクター、サルモネラ属菌、リステリアなどの食中毒細菌の低減化に寄与する技術である。ただし、細菌の低減化に必要な放射線の線量は、汚染している微生物種のみならず、照射時の温度や雰囲気、食品の成分などの環境因子の影響を受けるため、個別のケースにおける殺菌効果の評価には、標的菌と照射条件、対象食品を明確にした上での慎重な検討が必要である。諸外国における、食品の放射線照射の許可と実用化についての情報を整理した結果、香辛料や乾燥野菜についての殺菌が多く、多くの国で実施されているほか、限られた数量の冷凍魚介類（冷凍エビ）、カエル脚、牛挽肉、鶏肉が食中毒細菌（腸炎ビブリオ、腸管出血性大腸菌、サルモネラ属菌）などの低減化を目的として照射されている実体が明らかになった。文献調査の結果、放射線殺菌の研究対象には、腸管出血性大腸菌、サルモネラ属菌、リステリアを取り上げたものが多く、対象食品は、食肉や肉製品の他、サラダやカットフルーツなども含む調理済み食品（RTE）に放射線殺菌を応用するための研究にも拡大が見られた。また、国や地域に特徴的な食品の衛生化を目的とした研究例も少数ながら見られた。牛肝臓を汚染する腸管出血性大腸菌等に関連した研究例は見当たらなかった。

以上の調査結果と、先の分担研究課題の成果を考慮し、放射線殺菌の効果を調査する対象モデル食品として牛生肝臓を選択した。

A. 研究目的

わが国では食品衛生法の下、食品の放射線照射は原則的に禁止され、ばれいしょの崩芽抑制を目的としたコバルト 60 線源によるガンマ線照射のみが例外として認可さ

れている。一方、米国を初めとした諸外国では、食肉などの食中毒菌であるサルモネラや腸管出血性大腸菌 O157 の制御や香辛料や乾燥野菜に付着する芽胞菌の殺滅などを目的とした放射線殺菌処理が実用化して

いる¹⁾。

近年、食習慣の変化や高齢化などの社会状況の変化を反映し、わが国における細菌性あるいはウイルス性の食中毒の発生状況に変化が生じている。2011年にはユッケを原因食材とする腸管出血性大腸菌による集団食中毒が発生し、それを契機に畜産物の生食による食中毒リスクが議論された。特に、牛肝臓については、薬事・食品衛生審議会において、牛肝臓の内部が腸管出血性大腸菌により汚染される可能性があるとともに、それらを除去する手法が見いだせないことから、牛肝臓を生食用として販売することを禁止する規格基準を設定すること及び牛肝臓の生食の安全性を確保する知見が得られた際には改めて審議することが答申された²⁾。

牛肝臓の規格基準の審議過程では「肝臓内部の菌の殺菌方法として、諸外国でも利用されている放射線照射の有効性を検討すべき」といったパブリックコメントも寄せられたことから、リスク管理のために放射線照射のような新たな微生物制御法の可能性についての情報整理を行うことが必要となった。

そこで、本分担当課題では、放射線照射による食品の殺菌について、その技術的特徴、諸外国での実施・許可状況、研究動向について文献等による調査を行い、当面、わが国で放射線照射による殺菌手法の検討対象となる食品について情報を整理した。

B. 研究方法

食品の放射線照射技術のうち、特に微生物等の殺菌に関する利用状況や今後の応用の可能性について、公表されている学術論

文や総説、FAO/IAEAのデータベース、各国政府機関の規格基準や評価書をデータソースとして以下の点について調査を行った。

1. 食品の放射線照射の特徴と適用範囲
2. 諸外国における放射線殺菌の実用動向
3. 諸外国における放射線照射殺菌の許認可状況およびリスク評価動向
4. 論文における照射殺菌研究対象の把握
5. わが国の食中毒発生状況と放射線殺菌効果検討の対象食品

C. 研究結果および考察

1. 食品の放射線照射の特徴と適用範囲

1.1 :生物の放射線感受性と食品照射

放射線の生物作用を利用して食品の殺菌、殺虫、発芽抑制などを行う技術を食品照射と呼び、放射線で処理された食品を照射食品という。食品照射に利用される放射線は、食品の国際規格であるコーデックス規格³⁾においては、以下の3種類について線源やエネルギー範囲を制限している。

- ・60-Co または 137-Cs のガンマ線
- ・エネルギー5 MeV 以下のエックス線
- ・エネルギー10 MeV 以下の電子線

ガンマ線やエックス線のような電磁波放射線が物質を通過すると、その物質を構成する原子に電離や励起を起こしてエネルギーを失う。物質中では電磁波放射線のエネルギーは高速電子に変換されるため、電子線（加速器から発生するエネルギーの強い電子粒の流れ）も電磁波放射線も同じような反応を起こす。これらの放射線が水に作用すると酸素を触媒として、OH ラジカル、

スーパーオキシドアニオン、過酸化水素水和電子のような活性酸素種を生成し、これらが生体分子や食品成分と反応する。水が存在しないと放射線が直接生体分子や食品成分と反応する。したがって、水の存在下の方が放射線の作用は大きい。水を介した放射線の作用を間接作用、水を介さないものを直接作用という。

遺伝情報の本体である細胞内 DNA や生体膜を構成する脂質分子は放射線による分子切断を受けやすく、この生体分子の変化が種々の生物の生命活動の維持に障害をもたらす。生物に対する放射線の大まかな影響は、表 1 に示すように高等生物では少ない線量で大きな効果をもたらすが、下等生物では大きな線量が必要である。バレイショなど根茎野菜は 0.15 kGy 以下で発芽が抑制され、害虫の多くは 0.2~0.5 kGy で殺虫される。微生物の場合には有芽胞細菌は放射線耐性が強いが、多くの食品微生物は 1~10 kGy で殺菌される。一方、ウイルスは放射線に著しく耐性が強く失活には 10~50 kGy 必要であり、酵素やプリオンなどはさらに放射線に耐性が強い⁴⁾。表 2 には、対象となる食品と想定される効果を考慮して、食品照射が利用できる分野をまとめた⁵⁾。食中毒の防止や食品の衛生化を目的とした場合の利用は、1 kGy 以下で畜肉の寄生虫の制御、1~7 kGy 程度での多水分食品の微生物制御(非孢子形成細菌)、3~10 kGy において、乾燥食品原材料の衛生化(有芽胞細菌を含む)が可能である。しかしながら多くのウイルスの不活性化には、細菌の制御より多くの線量を要し、食品品質の低下が無視できないことが多く、食品照射技術としては、利用できないものも多

い。また、放射線照射は毒素を産生するカビの増殖制御に効果はあるが、産生後に食品中に蓄積したカビ毒を放射線で分解することは困難である。

1.2 :細菌の放射線感受性と影響因子

放射線に対する感受性は微生物の種類によって異なる。また、栄養細胞に比べて芽胞は著しく放射線抵抗性が高い。表 3 に種々の微生物の相対的な放射線感受性を示す目的で、リン酸緩衝液中での D₁₀ 値⁴⁾を示した。さらに表 4 に種々の食品中における代表的な食中毒細菌の D₁₀ 値⁶⁾、表 5 に 4 種の食中毒菌 (*E. coli* O157:H7、*Salmonella* spp、*Listeria monocytogenes*、*Staphylococcus aureus*) の D₁₀ 値に対する肉種の違い検討した結果を示した⁷⁾。

非孢子形成細菌の中で食中毒の原因となる主な細菌の放射線抵抗性は、一般的にはカンピロバクター<腸管出血性大腸菌<リステリア<サルモネラ属菌の順に高くなる。このように食品を汚染する細菌の種類によって放射線感受性は大きく異なるため、放射線殺菌の導入を検討する際には、対象となる食品における汚染微生物リスクのプロファイリングを十分に行い、殺菌条件の設定を行うための標的微生物(菌株)を明確にすることが重要である。

さらに、殺菌対象となる微生物種の違いによらず、同一微生物の放射線感受性(殺菌効果)は、放射線照射を行う際の微生物の存在環境に著しく影響される。表 3 と表 4 を比較すると、同一微生物種のリン酸緩衝液中での D₁₀ 値に比べて、食品中での D₁₀ 値は明らかに大きくなっている。また照射時の温度(特に凍結状態であるか/液体状態

であるか) 酸素の有無、食品マトリクス成分の違い(共存する化学物質の存在)も影響が見られる。これらの違いは、水の放射線分解による活性種(OHラジカルなど)が二次的にDNA分子に作用する“間接効果”が微生物の致死作用に大きく寄与することから、放射線照射時の活性種の生成量や移動を左右する水分活性や酸素量、温度や相変化(凍結か液体か)などの因子が関与することで説明されている。表6に、放射線による微生物の致死効果に対する環境因子について、WHOの成書⁶⁾からまとめた。

以上から、食品の殺菌における放射線の必要線量を決定する際には、対象食品の包装形態や照射温度などの条件を考慮することが重要と言える。

2. 諸外国における放射線殺菌の実用動向

国外において既に市場流通している照射食品の種類を把握することは、わが国で、放射線殺菌法の適用対象となる食品の検討の参考となる。この項では「諸外国における放射線殺菌の実用動向」に関する既存の調査結果を取りまとめた。ただし、各国における照射食品の生産量や貿易量の統計を正確に把握するのは困難であるため、2007年度に内閣府が日本原子力開発機構に委託して行った放射線利用に関する経済規模における調査のうちの食品照射に関する海外調査の結果(調査対象年次は2005年)⁸⁾、EUが公表している最新(2011年度)の食品照射に関する報告書⁹⁾、およびIAEAのRCA(地域連携協定)食品照射プロジェクトの会議レポート^{10),11)}および、これらをデータソースとした、久米らのレポート¹²⁾⁻¹⁴⁾を参考にした。

2.1 アジア/オセアニア地域における食品の商業照射と殺菌への応用

表7にアジア地域での実用照射の処理量を示した。2010年における商業規模の照射食品の量は285,000トン、オーストラリアの照射量は635トン(スパイス類については利用できる統計なし)と見積もられる。アジア地域の照射量は2005年との比較すると増加が見られるが、この増加分には中国とベトナムの寄与が大きく、品目としては果実類の植物検疫における消毒処理(殺虫・不妊化)が重要な位置を占めている。微生物制御や衛生化目的の利用は、香辛料や乾燥野菜、健康食品など植物性の乾燥食材のほか、ベトナムにおいては輸出用のエビなどの冷凍魚介類やカエル脚などが60,000トン程度、中国でも南西部の13施設で味付け鶏肉(pickled chicken)、牛肉などが68,000トンほど照射されているとの報告がある。また地域に特徴的な食品として、タイにおける豚肉の発酵ソーセージの寄生虫制御なども長年の実績がある。

2.2 EU

EU域内では、照射食品の統一基準であるEC指令により、域内の認可施設で処理されている食品の種類と量を欧州委員会への報告が義務付けられておりその結果を取りまとめた年次レポートが発行されている。表8-10にその統計の概要をまとめた。EUにおける照射量は減少の傾向にある。照射の目的は、他の地域にみられる発芽抑制や殺虫・植物検疫処理は含まれず、衛生化・微生物制御のみである。主な照射対象品目は、食用カエル(冷凍)、食鳥肉、スパイス/

ハーブ類である。EU における統一の許可品目であるスパイス・ハーブ類の照射は、9 か国で実施されている。また、EU で特徴的な品目としては、食用ガエルが挙げられる。なお欧州委員会は、域外の第三国（南アフリカ、タイ、トルコ、スイス、インド）に 11 の食品照射施設を承認しており、これらの施設で処理されたスパイスなどが照射され EU に輸出されている。

2.3 アメリカ地域における状況

表 11 に米国の 2005 年および 2010 年の処理量を示した。植物検疫処理のための果実照射が増加している以外は大きな変化はない。スパイス類については、米国での生産量の 1/3 が照射殺菌されている。牛挽肉については腸管出血性大腸菌 O157 などへの対策としての照射が行われており、実用線量は冷蔵 1.25 kGy、冷凍 2.25 kGy である。(Ronald F. Eustice 私信)

アメリカ地域のその他の国として、2005 年実績でカナダ、ブラジルにおいて香辛料・乾燥野菜殺菌が実施されているとの報告がある。

2.4 その他の国と世界全体の状況

上記以外の地域では 2005 年実績で、南アフリカ共和国で、香辛料 15,875 トン、ハチミツなどの殺菌に 2,310 トン、エジプトでの香辛料の殺菌 550 トンが確認される。最新の世界全体の動向を取りまとめた報告は入手できなかったが、前述の内閣府委託調査によれば、2005 年の世界全体での処理量は約 40 万トンでそのうちの 46%が香辛料・乾燥野菜の殺菌、肉・魚介類の殺菌が 8%であった (図 1)。

3. 諸外国における放射線照射殺菌の許認可状況およびリスク評価の動向

この項では、世界全体と主要国(米国、EU 諸国、カナダ、オーストラリア/ニュージーランド)の食品照射の許可の動向についてまとめた。なお、諸外国の規制やリスク評価・管理の状況については、食品安全委員会のファクトシート¹⁵⁾や平成 23 年度と同委員会委託調査事業の報告書¹⁶⁾厚生労働省の委託調査事業の報告書¹⁷⁾にまとまった情報がある。

3.1 各国の許可状況

食品照射を管轄する FAO/IAEA の Food and Environmental Protection Section が運営する、食品照射に関する許可に関するデータベース¹⁸⁾には、57 カ国についての許可状況が登録されている。各国の規制の体系は、個別の食品に対する具体的な基準を設けるものから、食品群(食品クラス)ごとの許可など多様であるが、このデータベースにおける 8 つの食品群での分類に基づいた認可状況を表 13 にまとめた。この中で、乾燥野菜・香辛料類 (G6 グループ: Dry vegetables and spices) については日本とウルグアイを除く 55 カ国で、殺菌目的(殺虫も含まれる)の放射線照射が認可されている。なお、このグループ分けのなかで、G3:Cereals and their milled products、(穀類とその(製粉)加工製品、G4:Fish and seafood (魚介類)、G5:Raw poultry and meat、((非加熱)食鳥肉および畜肉)、G7:Dried food of animal origin、(動物性乾燥食品)、G8:その他 についても、その目的の多くが、殺菌や衛生化である。

3.2 米国における許可と評価の状況

表 14 に 2013 年 3 月現在の米国の許可状況をまとめた¹⁹⁾。米国 FDA は 1986 年までに、豚肉の寄生虫制御を含む殺虫や成熟制御などの低線量照射、酵素製剤や香辛料等の高線量照射を許可し、照射食品評価の枠組みを整えた。食中毒を起こす病原性細菌への対策としては、1990 年に主にサルモネラ対策として食鳥肉への照射、1997 年には牛挽肉の汚染低減を意識した赤身肉の許可がなされた。いずれも、FDA の許可年の 2 年後に USDA/FSIS の認可が発効され、鶏肉や牛挽肉については、前項で述べたように商業規模での流通実績がある。その後 2000 年代になり、殻付き卵、もやし用種子、軟体動物・貝類（ビブリオ対策）などの認可が行われた。2008 年には、腸管出血性大腸菌のアウトブレイクの影響もあり、2000 年に出されていた、調理済み食品への部分回答としてレタスとハウレンソウの照射が認可された。2012 年 11 月には、1999 年の USDA/FSIS からの申請に対する回答として、常温の赤身肉や製品の照射（4.5 kGy）の認可および、3.0 kGy であった食鳥肉への最大線量を非凍結で 4.5 kGy、凍結で 7.0 kGy に拡大する改正が行われた。なお、食鳥肉の改訂では、1990 年の規制条件である「酸素透過性の包材を利用する」（ボツリヌス菌増殖を懸念しての殺菌時の包装資材制限）が撤廃された。これはその後の研究成果で食鳥肉のボツリヌス汚染への考慮を不要と判断したことに拠る。現在、FDA では表 15 に示した 2 つの申請が審議中である。

3.3 EU における許可と評価の状況

欧州委員会は、食品科学委員会（SCF: Science Committee on Food）に照射食品の安全性と技術的妥当性についての評価を諮問した。これに対する 1986 年の評価レポート²⁰⁾には、放射線照射の適用が容認できる食品クラスとその線量がまとめられた。SCF は 1992 年、1998 年にも特定の食品クラス（品目）についての放射線照射の妥当性を評価し、表 16 に掲げた食品クラス（品目）をリストアップした。1999 年 EU 統一に際し、食品照射に関する域内基準である 2 つの EC 指令を定めたが、このうち食品照射利用の一般原則を定めた Directive 1999/2/EC²¹⁾では、照射を認可する食品クラス・品目と線量は SFC の既存の評価に基づいて選択することとされ、域内で共通の許可品目としては、Directive 1999/3/EC²²⁾に、「香辛料・バーク・野菜調味料類（Dried aromatic herbs、spices and vegetable seasonings）の最大平均総吸収線量：10 kGy」が記載された。それ以外の品目については、品目リストの統一が完成するまでの間、各国の個別の許可品目リストが 2013 年 3 月時点でも有効である（表 17）²³⁾。

2011 年には、欧州食品安全機関（EFSA）が食品照射の照射食品の化学的な安全性と食品照射の微生物学的な効果についての評価を実施している。これは、2003 年の SFC の食品照射に関する評価以降の情報をアップデートし、従来の食品クラス（品目）ごとに線量を設定する SCF 時代の考え方が適切か否かについて欧州委員会からの諮問に答えることを目的とした²⁴⁾。この評価の微生物への効果の部分を担当した EFSA の BIOHAZ パネルの見解²⁵⁾は、食品中の微生物への放射線の作用は食品の物理的な状態

(凍結、冷蔵、水分活性)によっても異なること、また、標的とする微生物の種類や食品の汚染状態により微生物低減に必要な放射線量は異なることから、微生物低減に必要な線量の設定は、あらかじめ食品クラス(品目)ごとに定められたものに従うより、微生物の汚染リスクと望まれる微生物の低減効果の評価をベースにすることが望ましいとの答申をした。また、(個別の食品に)適用可能な線量の上限は(食品成分の)不適切な化学変化などで制約されるので、殺菌効果や微生物学上の安全性の観点からは、微生物の低減のための上限線量を設定することは望ましくないと勧告した。さらに、放射線照射は、微生物の低減により消費者の健康を保護するためのアプローチの1つであり、総合食品安全マネジメントプログラムと合わせて導入すべきとしている。そして、食品照射がGAP、GHP、GMPやHACCPに包括される時、適用される線量に応じて食品に媒介される病原体を低減することにより、消費者の安全性の向上に寄与すると結論している。

なお、この評価書には2010年までの食品照射の化学的安全性(毒性評価)と微生物に対する低減効果の文献もレビューされている。毒性評価の部分については、食品安全委員会の調査報告書¹⁶⁾に要約されている。

3.4 カナダ、オーストラリア/ニュージーランドでの許可と評価

カナダでは、4つの食品クラス(品目)について、放射線照射が認可されている²⁶⁾。2002年にカナダ保健省(Health Canada)は、殺虫・植物検疫処理を目的としたマンガの照射と食鳥肉(冷蔵/冷凍)、冷凍エビ、

牛挽肉(冷蔵/冷凍)の食中毒細菌の制御を目的とした照射についての評価結果を公表し、これらの食品への放射線照射を認可する規格基準の改訂を提案した。しかしながら、この提案を反映した規制改正は、2013年3月現在で実施されていない(表18)。

オーストラリア/ニュージーランドでは2001年に、スパイス・ハーブの殺菌および殺虫、ハーブ茶の殺菌を目的とした放射線照射を許可した。その後、植物検疫目的の生鮮果実・農産物の照射許可を拡大している²⁸⁾(表19)。

4. 論文における照射殺菌研究対象の把握

2005年~2013年3月までの期間に発行された、食品の放射線殺菌に関するオリジナル論文をデータベース(Current Contents Connect®: Thomson Reuters)で検索したところ、主な食中毒細菌を扱っているものとして172報がヒットした。研究対象の微生物(属)分類した論文数を表20に示す。取り扱っている細菌としては、自然汚染の大腸菌群まで含めると*E. coli*を対象としている文献が最も多かった。

対象食品については、畜肉や畜肉製品(調理済み食品、Ready to Eatを含む)のみならず、カット野菜などの植物起源の食品がかなり多く含まれていた。さらに、個別の国や地域に特徴的な食品の殺菌例も少数ながら見られた。米国では2000年に赤身肉の許可が出されており、文献検索の期間を2005年以降に絞った場合、生鮮肉類よりもより複雑な食品に研究対象が推移してきている。また、放射線照射だけではなく、化学薬剤による洗浄、食品添加物、加熱、高圧など他の物理処理などとの組み合わせ処

理の効果を検討するものも多かった。

なお、牛レバーを放射線殺菌の対象として扱った研究論文は見当たらなかった。

5. わが国の食中毒発生状況と放射線殺菌効果検討の対象食品

表 21-25 に厚生労働省が実施した平成 23 年度および 24 年度の食中毒発生状況調査および平成 24 年度食品の食中毒菌汚染実態調査の結果を転載した。

平成 23 年はユッケを、平成 24 年は浅漬けを原因食材とした腸管出血性大腸菌による集団食中毒事件が発生しており、危害要因として、腸管出血性大腸菌に対する対策が重要であることがうかがえる。また、発生件数の多い原因物質としては、サルモネラ属菌、カンピロバクター・ジェジュニ／コリおよびノロウイルスが上げられる。ノロウイルスについては、放射線の効果は明確でないが、腸管出血性大腸菌、サルモネラ属菌、カンピロバクター・ジェジュニ／コリについては、放射線照射による菌数低減が期待できる。一方、食品における食中毒菌の汚染実態調査の結果では、もやし、みつばなどの大腸菌群、食肉（牛タタキ、ローストビーフ、馬刺しは比較的 low rate）での大腸菌群、加えて鶏ミンチおよび鶏たたきのサルモネラとカンピロバクター、牛レバー（加熱用）でのカンピロバクターの汚染率が高いことが認められる。牛生レバーについては、現在生食用での提供が禁止されており、ここ 2 年間の汚染実態調査の対象とはなっていないが、加熱用レバーの実体からは同種の微生物による汚染の可能性を排除できず、また、加熱による調理がなされないことを考慮すると、放射線照射に

よる殺菌効果を検討することには意義があると判断される。

D. 結論

1) 放射線殺菌技術は、香辛料などの植物性乾燥食品原材料を汚染する芽胞菌の殺菌や、食品を汚染する腸管出血性大腸菌、カンピロバクター、サルモネラ属菌、リステリアなどの食中毒細菌の低減化に寄与する技術である。ただし、細菌の低減化に必要な放射線の線量は、汚染している微生物種のみならず、照射時の温度や雰囲気、食品の成分などの環境因子の影響を受けるため、個別のケースにおける殺菌効果の評価には、標的菌と照射条件、対象食品を明確にした上での慎重な検討が必要である。

2) 諸外国における、食品の放射線照射の許可と実用化についての情報を整理した結果、香辛料や乾燥野菜についての殺菌が多く、多くの国で実施されているほか、限られた数量の冷凍魚介類（冷凍エビ）、カエル脚、牛挽肉および鶏肉が、食中毒細菌（腸炎ビブリオ、腸管出血性大腸菌、サルモネラ属菌）などの低減化を目的として照射されている実体が明らかになった。

3) 文献調査の結果、放射線殺菌の研究対象には、腸管出血性大腸菌、サルモネラ属菌、リステリアを取り上げたものが多く、対象食品は、食肉や肉製品の他、サラダやカットフルーツなども含む調理済み食品（RTE）に放射線殺菌を応用するための研究にも拡大が見られた。また、国や地域に特徴的な食品の衛生化を目的とした研究例も少数ながら見られた。牛肝臓を汚染する腸管出血性大腸菌等に関連した研究例は見当たらなかった。

E. 文献

- 1) 等々力節子、食品への放射線照射 諸外国の安全性評価と国際基準の動向、
- 2) 厚生労働省、薬事・食品衛生審議会、食品衛生分科会 2012年6月12日、<http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000002fsbi.html>
- 3) FAO/WHO : CODEX STAN 106-1983, REV.1-2003:http://www.codexalimentarius.net/web/more_info.jsp?id_sta=16
- 4) 伊藤均：放射線殺菌と食品微生物、食品微生物学会誌、28(3)、149(2011)
- 5) WHO : 食品照射の安全性と栄養適性 コープ出版(1996).
- 6) WHO : High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group, Geneva Technical Report Series, No. 890., WHO, pp 49-77 (1999).
- 7) Thyer et al, Variations in Radiation Sensitivity of Foodborne Pathogens Associated with the Suspending Meat, . Food Sci 60, 63-67(1995)
- 8) (独) 日本原子力研究開発機構. 内閣府委託事業「放射線利用の経済規模に関する調査」報告書. (2007)
- 9) European Commission, Official Journal of the European Union. Report from the Commission on Food Irradiation for the Year 2011 (2013)
- 10) IAEA/RCA Final Progress Review Meeting of Project RAS/5/050 and the Project, Planning Meeting of RAS/5/057, Hanoi, Vietnam, March 26-30, 2012.
- 11) IAEA/RCA RAS/5057 IAEA RCA Workshop on Best Practice for Phytosanitary Applications of Food Irradiation Jeongeup, Republic of Korea 22-26 October 2012 Workshop Report.
- 12) Kume, T., Furuta, M., Todoriki, S., Uenoyama, N., Kobayashi, Y., Status of Food Irradiation in the World, Radiat. Phys. Chem, 78, 222-226 (2009)
- 13) 久米民和、世界における食品照射の処理量と経済規模、食品照射、43、46-54 (2008)
- 14) Kume, T. and Todoriki, S. Food Irradiation in Asia, the European Union, and the United States: A Status Update, Radioisotopes 62(5) (2013) 印刷中
- 15) 食品安全委員会:ファクトシート、放射線照射食品 (2011年6月) http://www.fsc.go.jp/sonota/factsheets/f06_food_irradiation.pdf
- 16) 東レリサーチセンター：食品安全確保総合調査、食品中に含まれる物質等の安全性評価等 科学的知見の収集に関する調査報告書 平成24年3月 <http://www.fsc.go.jp/fsciis/survey/show/cho20120040001>
- 17) 三菱総合研究所、食品への放射線照射についての科学的知見のとりまとめ業務報告(平成20年3月(平成22年5月改訂)) <http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/iyaiku/syoku-anzen/housya/houkokusho.html>
- 18) FAO/IAEA: Food Irradiation Clearances Database <http://nucleus.iaea.org/ifa/>
- 19) FDA:21CFR179:26 Irradiation the Production processing and Handling of

Food.

20) EC-SCF: Report of the Scientific committee on Food (eighteen series, 1987,1989)

21)CEC, Directive 1999/2/EC, Official Journal of the European Communities, L66/16,13.3.1999

22)CEC, Directive 1999/3/EC, Official Journal of the European Communities, L66/24,13.3.1999

23) CEC, List of Member States' authorizations of food and food ingredients which may be treated with ionizing radiation ,Official Journal of the European Union C 283/5 24.11.2009

24) EFSA: Statement summarizing the Conclusions and Recommendations from the Opinions on the safety of Irradiation of Food adopted by the BIOHAZ and CEF Panels. EFSA Journal 2011; 9(4): 2107.

25) EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ), Scientific Opinion on Irradiation of Food: efficacy and microbiological safety. EFSA Journal 2011;9(4):2103.

26) Government of Canada:Food and Drug Regulations (C.R.C., c. 870)
Division 26 Food Irradiation

27) Health Canada: Food And Drugs Amendments - Proposal Project N° 1094 (Food Irradiation) Regulatory Impact Analysis Statement (2002)

28)FSANZ, Food Irradiation

<http://www.foodstandards.gov.au/consumerinformation/foodirradiation.cfm>

29) 厚生労働省：平成 24 年（2012 年）食中毒発生状況 および 平成 23 年（2011 年）食中毒発生状況

<http://www.mhlw.go.jp/topics/syokuchu/04.html>

30)厚生労働省：平成 24 年度食品の食中毒菌汚染実態調査の結果について

http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/iya/ku/syoku-anzen/gvousei/dl/130329_3.pdf

F. 健康危機情報

無し

G. 研究発表

無し

H. 知的財産権の出願、登録状況

無し

表 1. 生物の照射効果に必要な線量

哺乳類細胞に対する障害	0.0005 ~ 0.005 kGy
根茎野菜の発芽抑制	0.02 ~ 0.15 kGy
外虫・寄生虫の不妊化、殺滅	0.07 ~ 1 kGy
カビ類の殺菌	1 ~ 10 kGy
細菌栄養細胞の殺菌	1 ~ 7 kGy
細菌芽胞の殺菌	10 ~ 30 kGy
ウイルスの不活性化	10 ~ 50 kGy
酵素の不活性化	50 ~ 200 kGy

(出典：伊藤 均) 日本食品微生物学会誌 28(3) pp150 2011)

表2 食品照射の応用分野

照射の目的	線量(kGy)	対象品目
発芽及び発根の抑制	0.03~0.15	馬鈴薯、タマネギ、ニンニク、甘藷 シャロット、ニンジン、栗
殺虫及び不妊化	0.1~1.0	穀類、豆類、果実、カカオ豆、ナツメヤシ、 豚肉（寄生虫）、飼料原料
成熟遅延	0.5~1.0	バナナ、パパイヤ、マンゴー、 アスパラガス、きのこ（開傘抑制）
品質改善	1.0~10.0	乾燥野菜（復元促進）、 アルコール飲料（熟成促進）、 コーヒー豆（抽出率向上）
腐敗菌の殺菌	1.0~7.0	果実、水産加工品、畜肉加工品、魚
孢子非生成食中毒菌の殺菌	1.0~7.0	冷凍エビ、冷凍カエル脚、食鳥肉、飼料原料
食品素材の殺菌（衛生化）	3.0~10.0 (~30)	香辛料、乾燥野菜、乾燥血液、 粉末卵、酵素製剤、アラビアガム、
滅菌	20~50	畜肉加工品、病人食、宇宙食、キャンプ食、 実験動物用飼料、包装容器、医療用具

太字の対象品目は諸外国も含め商業規模での流通が報告されているもの

WHO：照射食品の安全性と栄養適性（1996；コープ出版）⁵⁾などから作成

表 3. 種々の微生物の放射線感受性 (D₁₀ 値) リン酸緩衝液、 溶存空气中

菌 種	D ₁₀ 値 (kGy)
<i>Escherichia coli</i> S2	0.15
<i>Escherichia coli</i> O157:H7 IID959	0.12
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> S1	0.06
<i>Pseudomonas fluorescens</i> B3-1	0.06
<i>Salmonella</i> Typhimurium YK-1	0.16
<i>Salmonella</i> Enteritidis YK-2	0.16
<i>Listeria monocytogenes</i> G2-1	0.16
<i>Staphylococcus aureus</i> H12	0.21
<i>Vibrio parahaemolyticus</i> Sa-2	0.035
<i>Aeromonas hydrophila</i> KL-31	0.057
<i>Streptococcus faecium</i> A21	1.00
<i>Psychrobacter</i> sp. A4	0.50
<i>Bacillus pumilus</i> E601 (芽胞)	1.70
<i>Bacillus subtilis</i> 201-2 (芽胞)	1.40
<i>Bacillus cereus</i> 1-14 (芽胞)	1.10
<i>Clostridium botulinum</i> Type A 62A (芽胞)	2.2
<i>Clostridium botulinum</i> Type E Biwako (芽胞)	2.4
<i>Deinococcus radiodurans</i> R1 (放射線抵抗性菌)	2.1
<i>Methylobacterium radiotolerans</i> O-1 (放射線抵抗性菌)	1.4
<i>Aspergillus oryzae</i> IAM 2630	0.20
<i>Aspergillus flavus</i> IFO 30180	0.24
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> 52a	0.36
<i>Tricosporon oryzae</i> R1 (放射線抵抗性菌)	1.60

伊藤 均：放射線殺菌と食品微生物 *Jpn. J. Food Microbiol.*, 28(3), 149-156, 2011 4)

表 4. 主な食中毒細菌の食品中での D₁₀ 値

細菌	製品	温度 (°C)	雰囲気	D ₁₀ (kGy)
セレウス菌 (<i>Bacillus cereus</i>) (栄養細胞)	ローストビーフ	NS	空気	0.173±0.157
	肉汁 (Gravy)	NS	空気	0.181±0.167
セレウス菌 (<i>Bacillus cereus</i>) (芽胞)	モッツアレラチーズ	-78		3.6
	アイスクリーム	-78		4.1
	ヨーグルト	-78		4
カンピロバクター・ジェジュニー (<i>Campylobacter jejuni</i>)	牛ひき肉 (低脂肪)	4±1	空気	0.175
	牛ひき肉 (低脂肪)	-16±1	空気	0.235
	タルタル生肉ステーキ	18-20	微好気性(低酸素)	0.08-0.11
リステリア菌 (<i>Listeria monocytogenes</i>)	鶏ひき肉	NS	空気	0.417-0.553
	骨抜き鶏肉	2-4	空気	0.27-0.77
	豚ひき肉	10	空気	0.573-0.648
	エビのすり身	-20	真空	0.7
	牛ひき肉 (低脂肪)	4±1	空気	0.578-0.589
	牛ひき肉 (低脂肪)	-16±1	空気	0.558-0.610
サルモネラ属菌 (<i>Salmonella</i> spp.)	牛ひき肉 (低脂肪)	4±1	空気	0.621-0.624
	牛ひき肉 (低脂肪)	-16±1	空気	0.675-0.745
大腸菌 O157:H7 (<i>E. coli</i> O157:H7)	牛ひき肉 (低脂肪)	4±1	空気	0.241
	牛ひき肉 (高脂肪)	4±1	空気	0.251
	牛ひき肉 (低脂肪)	-16±1	空気	0.39
	牛ひき肉 (高脂肪)	-16±1	空気	0.307
	骨抜き鶏	0	空気	0.26±0.01
	骨抜き鶏肉	0	真空	0.27±0.01
	牛ひき肉	0	真空	0.27±0.03
コレラ菌 (<i>Vibrio cholerae</i>)	エビ表面	-10±2	真空	0.11
腸炎ビブリオ (<i>V. parahaemolyticus</i>)	エビすり身	-20	真空	0.44
ビブリオバルニフィカス (<i>V. vulnificus</i>)	エビすり身	-20	真空	0.33

WHO 1999 High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy 文献 6)

Chapter 6 table 6、7、14 より作成

表 5. 畜肉表面に接種した各種病原菌のD₁₀ 値(kGy)

	5°C			
	<i>E.coli</i> O157:H7	<i>Salmonella</i> spp.	<i>Listeria</i> <i>monocytogenes</i>	<i>Staphylococcus</i> <i>aureus</i>
牛肉	0.30a	0.70c	0.45b	0.46e
ラム	0.32a	0.67c	0.47b	0.40f
豚肉	0.30a	0.51d	0.48b	0.43e
七面鳥 胸肉	0.30a	0.71c	0.50b	0.45e
七面鳥 モモ	0.29a	0.71c	0.47b	0.46e

a-e:同列の比較において異記号の値間で有意差あり (p<0.05)

Thyer et al *J. Food Sci* 60, 63-67(1995) より引用

供試菌株

E. coli O157:H7 ; ATCC35150、ATCC43889、ATCC43894、93-937、ENTC9490

Salmonella spp; *S. Dublin* ATCC15480、*S. Enteritidis* ATCC13076、
S. Newport ATCC6962、*S. Senftenberg* ATCC8400、
S. Typhimurium ATCC 14028

Staphylococcus aureus: ATCC25923、ATCC13565、B124、

Listeria monocytogenes; ATCC15313、ATCC 43256、ATCC49594、ATCC7644

表6. 微生物の放射線感受性に影響を及ぼす外的環境因子 (WHO 1999)

- 温度/位相

高温 : 45°C以上では放射線抵抗性の低下 (修復能の損失による)

細菌芽胞の放射線抵抗性は、80~95°Cの範囲で温度の上昇に伴い累進的に低減される。

凍結 (氷点下) : 栄養細胞の放射線抵抗性は凍結により増強 (水の活性低下、ラジカル拡散の制限による)

芽胞では、常温と凍結下の差が少ない

- 気体環境の性質

酸素 : 微生物細胞に及ぼす殺滅効果は、酸素により促進。

無酸素の水存在条件下では、空気存在下と比較して、栄養型細菌の放射線抵抗性が増強

- 水分活性

高水分 : 微生物は、懸濁基質を部分的あるいは完全に脱水した場合と比較して、高水分条件下の方が、著しく放射線感受性である。

低水分 : 低水分条件では、照射により生じる水分子由来のラジカルの生成が著しく低いため、ラジカルが関与する DNA への間接効果も低減する。

相対的に、細菌芽胞の放射線抵抗性は、外的水分活性や凍結に、さほど左右されない

- pH

好気性細菌芽胞の放射線感受性は、pH 5 未満では増加する
pH=5~8 の実用的な範囲内では変化しない

- 媒質の化学組成

微生物の殺滅効果はラジカルが媒介する間接効果の寄与が大きいことから微生物を懸濁する媒質や溶媒の性質は殺菌線量に影響する。培地(食品)成分によっては放射線照射により細胞内に生じるラジカルとの激しい競合が起こり、微生物に対する“助命 (sparing)” や “保護 (protecting)” 作用を生じる。