

平成 27 年度 厚生労働科学研究費 食品の安全確保推進研究事業
畜産食品の安全性確保に関する研究 (H25-食品-一般-011)

分担研究報告書

分担課題名 放射線照射による微生物除去

研究分担者：等々力 節子 国立研究開発法人 農研機構 食品総合研究所
研究協力者：川崎 晋 国立研究開発法人 農研機構 食品総合研究所

研究要旨：牛肝臓内部に接種した *Salmonella* Enteritidis IF03313 株のガンマ線殺菌を行い、 D_{10} 値として、凍結(-80)含気条件で 1.43、脱気条件で 1.58 kGy を得た。また、*Salmonella* を 10^5 CFU/g 接種した検体について、目標線量が、6、7、8 kGy となるよう 3 段階の線量のガンマ線を照射した場合、含気条件では 7、脱気条件では 8 kGy で *Salmonella* が非検出となった ($n=5$)。抽出法を変更して回収率を向上させた分析法により、冷凍(0) 6 kGy、凍結(-80)10 kGy までの牛肝臓のガンマ線照射における、2-アルキルシクロブタノン類(2-ACBs)、2-dDCB、2-tDCB、2-tDeCB の生成量を再確認した。

A. 研究目的

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が設定された。この規制には解除の要望も多かったことから、今後、生食の安全性を確保する新たな知見が得

られれば、必要な管理措置を改めて審議することも答申された¹⁾。

そこで、放射線照射のような新たな微生物制御法についてもその有効性についての検討が必要となり、平成 24 年度より研究が開始された。

本分担研究課題では、前研究課題を継続して、放射線照射による牛肝臓の殺菌条件を明らかにし、その際に生成する副産物及びその安全性を検討することを目的とする。

本年度は、牛肝臓内部に接種した *Salmonella* Enteritidis IF03313 株の凍結条件でのガンマ線による死滅効果の確認と電子線照射に関する予備試験を実施した。また、照射による副生成物について、冷凍 10 kGy、冷蔵 6 kGy までの線

量で 2-アルキルシクロブタノン類 (2-ACBs)の生成量について、抽出法を替えて再検討した。

B. 研究方法

1. 材料

微生物試験用の牛肝臓試料は、東京芝浦食肉処理場にて屠殺直後に凍結した牛肝臓塊 (約 6.0 kg) を用いた。これらは購入後、-80 で保存した。試料は 25 g の塊となるよう無菌的に切り分け、各々ガスバリア性の袋に移した後、-80 で冷凍保存した。

2-ACBs 定量用の牛肝臓試料は、東京芝浦食肉処理場より、屠殺した翌日または翌々日に、冷蔵状態で入手した。肝臓は入手日のうちに 50g 程度の塊に切り分けて、ガスバリア袋 (PTS 袋, 三菱ガス化学製、PB180250P 180 × 250mm) にいれ、含気状態または脱気状態で包装した。包装後の試料は、冷蔵(0)照射では照射水中に 3 時間、凍結(-80)照射では超低温槽に一晩保管し、照射前の温度を恒温とした。

2. 供試菌株

供試菌は、研究機関が保有する *Salmonella* Enteritidis IFO3313 株を用いた。

供試菌は Trypticase Soy Broth(TSB; Difco)にて 35 一昼夜静置培養した後、遠心分離 (4000 x g, 10 分間) により菌体を収集、培地成分を除去した。おのおの菌体はリン酸緩衝溶液に再懸濁し、 10^9 CFU/mL となるように調整、これを供試菌液として以降の試験に用いた。

3. ガンマ線照射

ガンマ線照射はコバルト 60 線源を装填した Gamma Cell 220 (Nordion, Canada)を用いた。照射時の温度は、氷冷(0)および冷凍(ドライアイス下) (-80)の 2 条件を設定した。照射中の温度を一定に保つため、照射チャンバーと同形状の筒状型発泡スチロール箱を作成し、この中央に予冷した検体を入れ、周囲に氷(0)もしくはドライアイス (-80)を封入した。線量率は約 2.97 kGy/h であった。

正確な吸収線量は模擬試料に装着したアラニンペレット (ES200-2106:ブルカーバイオスピン社製)の信号を ESR 装置 (Bruker EMX-Plus) で測定して決定した。検量線は英国の National Physical Laboratory の標準アラニンペレットで作成した。

4. 牛肝臓のガンマ線殺菌効果確認試験

菌体の接種は、自然解凍後した 25g 塊の牛肝臓あるいは牛挽肉の内部に、供試菌液 100 μ L を注射針により注入することで行った。菌体濃度は終濃度で、 10^8 CFU/g 程度 (生残曲線作成用) あるいは 10^5 CFU/g 程度 (殺菌効果確認用) となるように調製した。菌体接種後の試料は、直ちに、ガスバリア袋 (PTS 袋, 三菱ガス化学製、PB180250P 90 × 120mm) を用いて含気あるいは真空包装を行った。含気条件では、ヘッドスペースに空気を残し、脱気条件では、真空包装機を用いて、袋内の空気を抜いてヒートシールした。包装後の検体は、-80 の冷凍庫内で

2 時間以上放置して温度を一定にした後、ガンマ線照射に供した。

生残曲線を作成するための試料は、目標線量として、冷凍下で 0、0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 kGy の線量を照射した。また、殺菌効果確認用の試料は、冷凍条件下で、目標線量、6、7、8 kGy の 3 段階の線量を照射した。

照射後の検体は、解凍後直ちに菌数計測した。

5. 生菌数測定および標的微生物の検出

ガンマ線照射後の検体は、滅菌緩衝ペプトン水 (BPW: Difco) を加えて 10 倍乳剤とし、必要に応じてその 10 倍段階希釈試料液を調製した。各 10 倍段階希釈試料液は、標準寒天平板 (Merck) および VRBG 平板 (Oxoid) にスパイラルプレーティング法で塗抹した。これらの平板は 35 °C で各々 24 時間培養し、その出現集落数から 1 g 当たりの一般生菌数ならびに *Salmonella* 数を求めた。さらに VRBG 平板上の集落については、平板あたり 5 つの集落を選択し、これらをイムノクロマト法による *Salmonella* 同定キット (Singlepath *Salmonella*; Merck) に供し、典型集落が *Salmonella* 属であることを確認した。

別途、殺菌線量を求める実験では、目標線量 (6、7、8 kGy) を照射した後、検体に滅菌緩衝ペプトン水を加えて 10 倍乳剤とした後、35 °C で一昼夜培養した。培養した菌液は標準寒天平板および VRBG 平板 (Oxoid) に一白金耳を各線し、35 °C で一昼夜培養した。出現した集落は、それぞれ釣菌し、イムノクロマト

法による *Salmonella* 同定キット (Singlepath *Salmonella*; Merck) に供し、典型集落が *Salmonella* 属であることを確認した。

6. 2-アルキルシクロブタノン分析

照射および非照射の牛肝臓 (約 50g) から、約 3g の肝臓を秤量し、メタノール 50mL を加えてホモジナイザー (AM-8 型, Nissei) で 2 分間攪拌後、抽出液をろ過した。さらに残渣を 50 mL のクロロホルム/メタノール (2:1) (C/M) 溶液で 2 回抽出し、最後に 20mL の C/M 溶液で洗浄した。集めた抽出液に 0.88% KCl 溶液 93 mL を加えて分液ロト中で混和し、4 °C の冷蔵庫中で 1 晩放置後、クロロホルム層を集めた。この抽出物の溶媒を留去後、アセトニトリル 2mL に再溶解させた。これを 2 回繰り返して、アセトニトリル溶液を合わせ、-20 °C で 30 分以上冷却して脂肪分を析出させた。これを 0、1,680 x g で 10 分間遠心して取り除き、2-アルキルシクロブタノン類 (2-ACBs) が含まれる上清を濃縮して、2mL のヘキサンに再溶解した。この溶液を 1mL ずつ、ガラス製の 1g のシリカゲルカラム (Merck Silica gel 60 70-230 mesh) 2 本に添加し、10 mL のヘキサンで洗浄後、ヘキサン/ジエチルエーテル (98:2) 15 mL で溶出し、その 5-15mL 画分を集めた²⁾。この試料を濃縮して、内部標準物質として、2-cyclohexylcyclohexanone、0.05 µg / mL を含むヘキサン 200 µL に溶解した。この試料を GC-MS で分析し、2-ドデシルシクロブタノン (2-dDCB) および 2-テトラデシルシクロブタノン (2-tDCB)、2 -

テトラセニルシクロブタノン (2-tDeCB)を定量した。なお、検量線は、2-ACBsの標準試料に、非照射の牛肝臓からの抽出精製物を添加したマトリックススタンダードを用いて作成した。

<GC-MS 条件>

GC 装置: GC : GC-2101,

検出器 : MS : QP2010+ Shimadzu 200

カラム : DB-5MS(60m × 0.25mm 0.25 μ m) カラム温度 : 55 (2min) 20 /min 175 , 2 /min 250 , 10 /min 270 (20min)

注入口 250

注入モード : パルスドスプリットレス

注入サンプル量 1 μ L

モード : EI (70eV) SIM 測定

定量イオン : m/z = 98

確認イオン : m/z = 112

7. 電子線照射に関する予備試験

電子線照射は、(株)原子燃料工業 NFI 照射サービスに委託し、同社が保有する電子加速装置 Rhodotron (10 MeV 200 kW, IBA 社製)を用いて実施した。

10 MeV 電子の深部線量分布 (depth-dose)を確認するため、比重約 1 g/cm³ 厚さ約 20 mm の板状こんにゃくを模擬試料とし、4枚重ねにしたこんにゃくに斜めに切り込みを入れ、テープ状の CTA フィルム線量計 (FTR-125 富士フィルム社製)をはさみ、10 MeV、12 mA の電子を照射した。片面照射時の試料厚さは 86.4mm コンベア速度は、5.71 m/min、両面照射時の試料厚さは 81.5

mm コンベア速度は、7.61 m/min であった。CTA フィルムの書く長さ方向の 280 nm における吸光度から、試料表面からの深さ方向における吸収線量 (kGy) を算定した。

殺菌効果の予備試験としては、前項と同様に 25g の肝臓試料に、10⁵ CFU/g となるように、*Salmonella* の供試菌株を接種し、ガスバリア袋で包装して凍結 (-80)した試料を、発泡スチロール製の箱に入れたドライアイスの上に重ならないように並べ、両面から 10 MeV、4 mA の電子で両面照射した。コンベア速度は、目標線量 6、7、8 kGy に対し、それぞれ、13.68、11.73、10.26 kGy/m とした。肝臓試料の照射方向に対する厚みは、10 ~ 15 mm 程度であった。照射条件ごとに、ラジオクロミックフィルム線量計 (FWT-60)を試料表面に装着した常温の肝臓試料を同時に照射し、吸収線量の確認を行った。

C. 研究結果および考察

1. 凍結した牛肝臓中での *Salmonella* の殺菌効果

25年度の実験では、*Salmonella* について凍結 (-80)含気条件で 1.33、脱気条件で 1.21 kGy と得られていたが、既存論文との整合性が取れなかったため、追試を実施した。追試を実施したところ、含気条件で 1.43、脱気条件で 1.58 kGy と得られ、結果の整合性を確認した。すなわち、本条件下で *Salmonella* 菌数を 1/10⁵ とするには含気条件で 7.2、脱気条件で 7.9 kGy が必要と推察された。ただし、こ

れは指数関数型として殺菌されたと仮定した場合の線量であり、シグモイド型による殺菌効果として考えた場合には上記殺菌線量は過大となる可能性も考えられた。このため、規定線量による *Salmonella* の殺菌効果確認試験を試みた。上記の検討結果から、おおよそ 6~8 kGy の照射により、*Salmonella* の菌数を $1/10^5$ に減少させることが死滅曲線から予想されたため、約 10^5 CFU/g となるよう *Salmonella* を接種した検体 (n=5) を作成し、牛肝臓中の線量が 6、7、8 kGy となるような照射した場合の不活性化 (5 log cfu/g 低減の可能性) について検討を行った。その結果、凍結含気包装下においては 7 kGy で、凍結脱気包装下においては 8 kGy で、5 検体中全てから *Salmonella* は非検出となった。本試験にて接種した菌数は 3.0×10^5 CFU/g と求められており、これまで作成した死滅曲線から得られた D_{10} 値と併せても、妥当な結果と推察された。

牛肝臓中を汚染する可能性のある食中毒起因菌としては、*E. coli* O157、*Campylobacter*、*Salmonella* を本研究では取り上げた。この中で *Salmonella* が最も放射線抵抗性であった。これまで、ユッケに代表される生食用牛肉の規格基準においては、その衛生基準として腸内細菌科 (*Enterobacteriaceae*) を指標菌として、これが規定のサンプリング・検査法において陰性であることを規定している³⁾。そこで、殺菌効果の検証に腸内細菌科を想定した際、*Salmonella* より放射線抵抗性が強い腸内細菌科の細菌が存在する可能性について、文献調査を行った。Farkas⁴⁾の総説によれば、腸内細菌

科細菌の放射線抵抗性は、*Yersinia enterocolitica* < *Shigella* spp. < *Escherichia coli* (O157:H7 を含む) < *Salmonella* spp. の順に大きくなると報告されている。また、2014年に公表された、オーストラリア農務省の調査報告書⁵⁾に整理された細菌の放射線感受性のデータを参照に、腸内細菌科の D_{10} 値を整理すると、*Salmonella* と並んで、*Enterobacter* sp.の放射線耐性が高かった(表3)。*Enterobacter* 属菌について、Osaili ら⁶⁾は、ブレインハートインフュージョン培地中、加水ミルクパウダー中および、乾燥ミルクパウダー中での *E. sakazakii* ATCC 51329 他5株の D_{10} 値はそれぞれ、0.21-0.29 kGy、0.24-0.37 kGy、1.06-1.71 kGy の範囲であったと報告している。また、Lee ら⁷⁾は、TSB 中および、乾燥ミルクパウダー中での *E. sakazakii* strain ATCC 29544 の D_{10} 値をそれぞれ、0.27 及び 0.76 kGy と報告している。細菌の放射線感受性は、同一菌株であっても、照射時の雰囲気、温度あるいは共存物等によっても修飾をうけるため、*Enterobacter* 属菌について既報の D_{10} 値だけから、本研究で試験した *Salmonella* との比較において、牛肝臓中での放射線抵抗性について議論することは難しい。しかしながら、*E. sakazakii* についての放射線抵抗性に関する情報を考慮すると、牛肝臓中での *Enterobacter* 属菌の汚染可能性や放射線感受性について、今後さらに検討を要すると考えられる。

2. 牛肝臓のガンマ線照射による 2-アルキルシクロブタノン類(2-ACBs)の生成

前年度の研究における 2-ACBs の定量結果では、線量依存的な 2-ACBs の生成を確認したものの、用いた分析法の添加回収率が 59%~68%と低かった。原因として、肝臓中の酵素による 2-ACBs の代謝反応が抽出中に進行する可能性が考えられた。そこで、肝臓を無水硫酸ナトリウムと混和後に高速ホモジナイザーを用いてヘキサンで抽出する方法から、硫酸ナトリウムによる脱水操作を止めてタンパク質が変性しやすいクロロホルム/メタノール溶媒を使って一気に抽出する方法に変更した。その結果、本年度用いた方法での添加回収率は、低濃度添加、2-dDCB および 2-tDCB を 3.3 ng/g FW、2-テトラデセニルシクロブタノン(2-tDeCB)を 8.1 ng/g FW で、 96.2 ± 5.7 、 88.3 ± 2.5 および $116.2 \pm 6.0\%$ (n=7)であった。また、高濃度添加として 2-dDCB、2-tDCB、2-tDeCB を 33 ng/g FW、33 ng/g FW、81 ng/g FW で添加した際の回収率は 79.3 ± 1.6 、 73.5 ± 3.1 および $77.4 \pm 2.1\%$ (n=7)であった。抽出方法を変更することで、回収率が向上し、回収率の標準偏差も小さくなった。

表 4 に、異なる温度包装条件で照射した際の 3 種の 2-ACBs の定量結果を示す。非照射のコントロール試料からはいずれの 2-ACBs も検出されなかった。また、同一条件での分析値を線量に対して直線回帰した傾きから、1 kGy あたりに換算した 2-ACBs の生成量を求めて表 5 にまとめた。この際の相関係数は、0.88~0.99であった。

肝臓生重量 1g・1 kGy あたりの 2-dDCB および 2-tDCB の生成量は、2-tDCB の含量が 2-dDCB の含量に比べて大きく、-80 に比べて 0 の照射の方がやや大きな値となった。一方、オレイン酸を前駆体とする 2-tDeCB は、-80 照射における生成量が 0 照射の場合に比べて著しく大きくなった。また、-80 照射においては、含気包装時の 2-tDeCB の生成量は脱気包装より有意に大きかった。分析方法の変更により、昨年報告値より、総じてやや高い値が得られたが、これまでの文献値にある他の畜肉での生成量^{9),10)}に比べて著しく多量の 2-ACBs が照射牛肝臓中に生成することは無いと判断された。

4. 電子線照射に関する予備試験

4.1 透過力の確認

放射線照射殺菌では、コバルト 60 ガンマ線のみならず、10 MeV 以下の電子が利用されている。電子線は線量率がガンマ線に比べて著しく大きい、その透過力はガンマ線に比べて劣っている。そこで牛肝臓に対する電子線の照射効果を検討する予備試験として、10 MeV 電子照射時の深部線量分布を確認した。

図 1 に示すように厚さ 86.4 mm(比重 約 1g/cm^3)の模擬試料に線量計を設置し、上面方向から 10 MeV 電子を照射した際の、線量分布の結果から、図 2 に示すような深度-線量分布曲線を得た。この場合、試料厚さ 86.4 mm は、線量計の長さ 113.9 mm に相当する。図 2 に示すように、片面照射における電子の有効な透過厚さを、試料表面とほぼ同等の線量となる厚さと考え

えると、試料厚さで約 36 mm が片面照射の上限厚さと考えられた。

図 3 に、片面照射時と同様に 4 枚重ねの模擬試料を両面照射した際の深度-線量分布を示す。照射した模擬試料の厚さは、81.5 mm であった。実測した、線量分布から、最大/最小線量比 (Dose Uniformity Ratio) は約 1.5 程度であった。また、図 3 に示したように中央部の線量が表面線量と同等の線量となる厚さを両面照射で透過可能な厚さであるとして、片面照射の深度線量分布のデータから両面照射において透過可能な厚さを推定すると、約 85 mm であった。

4.2 . 殺菌効果の予備試験

前項の結果を参考に、重量 25g、厚み 10 ~ 15 mm 程度の牛肝臓の中心に 3.1×10^5 CFU/g の *S. Enteritidis* IFO3313 株を接種して、含気、凍結状態 (-80) で 10 MeV 電子を両面から照射した (n=5)。目標線量 6、7、8 kGy に対して、ラジオクロミック線量計で測定した同形のダミー試料の吸収線量は、6.3、7.2、8.2 kGy (両面の平均) であった。含気条件、凍結状態 (-80) において 8 kGy で、5 検体中全てから *Salmonella* は増菌培養を行っても非検出となった。7 kGy では、5 検体中 3 検体が陽性であった。この結果は、上述したガンマ線における殺菌効果とは一致せず、電子線の効果の方がガンマ線に比べて、やや劣る可能性を示唆している。ガンマ線と電子線の殺菌効果については、同等とするもの¹¹⁾電子線の効率が低いとするもの¹²⁾、ガンマ線の効率が低いとするもの¹³⁾など、異なる傾向が報告されている。ただし、これらの差異は極

端なものではなく、また、殺菌効率の異なる理由も線量率の違いや、照射時の環境の影響の可能性も考察されておりガンマ線、電子線の作用が本質的に異なるとは解釈されていない。牛肝臓の電子線照射については、今後、標的菌株の生残曲線を作成しての D_{10} 値の算出など、さらに詳細に検討する必要がある。

D. 結論

牛肝臓内部に接種した *Salmonella* Enteritidis IFO3313 株のガンマ線殺菌を行い、 D_{10} 値として、凍結 (-80) 含気条件で 1.43、脱気条件で 1.58 kGy を得た。また、*Salmonella* を 10^5 CFU/g 接種した検体について、目標線量、6、7、8 kGy となるよう 3 段階の線量のガンマ線を照射した場合、含気条件では 7、脱気条件では 8 kGy で *Salmonella* が非検出となった (n=5)。

抽出法を変更して回収率を向上させた分析法により、冷凍 (0) 6 kGy、凍結 (-80) 10 kGy までの牛肝臓のガンマ線照射における、2-アルキルシクロブタン類 (2-ACBs)、2-dDCB、2-tDCB、2-tDeCB の生成量を再確認した。

E. 文献

- 1) 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>
- 2) Kitagawa, Y., *et al.*, A Rapid and Simple Method for the Determination of 2-Alkylcyclobutanones in Irradiated Meat and Processed Foods.

- Food Analytical Methods* 7(5), 1066-1072, (2014).
- 3) 厚生労働省：生食用食肉の腸内細菌科菌群の試験法について,食安発0926第1号 平成23年9月26日
- 4) J. Farkas, C. Moha'csi-Farkas, *Trends in Food Science & Technology*, 22, 121-126 (2011).
- 5) Australian Department of Agriculture (2014), Gamma irradiation as a treatment to address pathogens of animal biosecurity concern, Department of Agriculture, Canberra, pp 95-96 Table9.
- 6) Osaili, T.M., *et. al.* Inactivation of *Enterobacter sakazakii* in infant milk formula by gamma irradiation: determination of D10-value. *J Food Sci* 72, M85–M88 (2007).
- 7) LEE J. W. *et.al.*, Gamma Radiation Sensitivity of *Enterobacter sakazakii* in Dehydrated Powdered Infant Formula, *Journal of Food Protection*, Vol. 69, No. 6, 1434–1437(2006).
- 9) Ndiaye, B. *et al.*, 2-Alkylcyclobutanones as markers for irradiated foodstuffs II. The CEN method: field of application and limit of utilization. , *Radiation Physics and Chemistry* 55437-445, (1999).
- 10) Marchioni, E. *et al.*, Production Yields of 2-alkylcyclobutanones in irradiated foods. *Proceedings of International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2009.* http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/072/41072628.pdf.
- 11) Tallentire, A. and Miller, A, A comparison of the microbicidal effectiveness of gamma rays and high and low energy electron radiations., *Radiation Physics and Chemistry*, 79, 701–704 (2010).
- 12) Katheleen, T. *et. al.* Effect of Gamma or Beta Radiation on *Salmonella* DT 104 in Ground Pork, *Journal of Food Protection*, 69(6), 1430–1433 (2006)
- 13) Qian, J. *et. al.*, Effects of gamma and electron beam irradiation on the microbial quality of steamed tofu rolls., *Radiation Physics and Chemistry*, 82, 119–121 (2013).
- F. 健康危機情報
なし
- G. 研究発表
論文発表
なし
講演・研修会等
1. 川崎晋, 持田麻里, 等々力節子, 五十君静信. ガンマ線照射による牛肝臓・挽肉中での腸管出血性大腸菌の殺菌効果、第19回腸管出血性大腸菌研究会(東京), H27/7/9-10.
- H. 知的財産権の出願, 登録状況
なし

表 1. 牛肝臓中における *S. Enteritidis* IFO3313 株のガンマ線照射による殺菌効果

-80°C	D ₁₀ 値 (kGy)	
	含気	脱気
牛肝臓	1.43	1.58

表 2. 牛肝臓中において *S. Enteritidis* IFO3313 株を 3.0×10^5 CFU/g 接種した検体に 6, 7, 8 kGy の線量を照射した際の検出結果 (n=5)

牛肝臓	6.0kGy	7.0kGy	8.0kGy
含気	5/5	0/5	0/5
脱気	5/5	2/5	0/5

表 3 . 主な腸内細菌科細菌の D10 値

細菌名	D10 値 (kGy)
<i>E coli K99</i>	0.02
<i>E coli</i>	0.04 - 0.70
<i>Enterobacter sp.</i>	0.36 - 1.5
<i>Klebsiella species</i>	0.4 - 0.45
<i>Proteus mirabilis</i>	0.24 - 0.5
<i>Proteus vulgaris</i>	0.07
<i>Salmonella anatum</i>	0.45 - 0.67
<i>Salmonella dublin</i>	0.02
<i>Salmonella Enteritidis</i>	0.25 - 0.7
<i>Salmonella Gallinarum</i>	0.13 - 0.56
<i>Salmonella Heidelberg</i>	0.33
<i>Salmonella Meleagridis</i>	0.93
<i>Salmonella Panama</i>	0.41 - 0.66
<i>Salmonella Paratyphi</i>	0.19 - 1.07
<i>Salmonella Senftenberg</i>	0.13 - 1.34
<i>Salmonella Stanley</i>	0.61 - 0.78
<i>Salmonella Typhi</i>	0.2 - 0.78
<i>Salmonella Typhimurium</i>	0.1 - 1.58
<i>Serratia marcescens</i>	0.02 - 0.1
<i>Yersinia enterocolitica</i>	0.04 - 0.38

Australian Department of Agriculture (2014),
 Gamma irradiation as a treatment to address pathogens of animal biosecurity
 concern, Department of Agriculture, Canberra , pp 95-96 Table9 より作成

<http://www.agriculture.gov.au/biosecurity/risk-analysis/reviews/final-animal/ba-2014-13-gamma-irradiation>

表 4 . ガンマ線照射した牛肝臓中の 2-アルキルシクロブタノン含量

照射条件	dDCB (ng/g FW)	tDeCB (ng/g FW)	tDCB (ng/g FW)
脱気包装 0			
3 kGy	4.26 ± 0.33	6.34 ± 1.13	9.92 ± 0.69
6 kGy	7.67 ± 0.66	15.50 ± 0.46	20.8 ± 1.83
含気包装 0			
3 kGy	4.72 ± 0.33	6.54 ± 0.09	10.2 ± 0.30
6 kGy	7.43 ± 0.16	14.9 ± 0.8	22.3 ± 0.5
脱気包装 -80			
5 kGy	4.93 ± 0.25	20.1 ± 2.1	13.2 ± 1.0
10 kGy	10.1 ± 0.23	44.7 ± 1.0	30.4 ± 1.3
含気包装 -80			
5 kGy	4.88 ± 0.14	21.4 ± 1.6	13.2 ± 0.2
10 kGy	10.3 ± 0.30	55.5 ± 1.6	30.7 ± 0.5
Mean ± SD (n = 3)			

表 5 2-ACBs の生成効率

(1kGy あたりの生成量) ng / g FW / kGy

	2-dDCB	2-tDeCB	2-tDCB
照射条件			
脱気包装 0	1.3	2.5	3.4
含気包装 0	1.3	2.4	3.7
脱気包装 -80	1.0	4.4	3.0
含気包装 -80	1.0	5.3	3.0

kGy

(先駆脂肪酸 1mmol、1kGy あたりの生成量) nmole / mmole FA/

	2-dDCB	2-tDeCB	2-tDCB
照射条件			
脱気包装 0	0.33	0.41	0.44
含気包装 0	0.32	0.40	0.46
脱気包装 -80	0.26	0.72	0.38
含気包装 -80	0.26	0.87	0.38

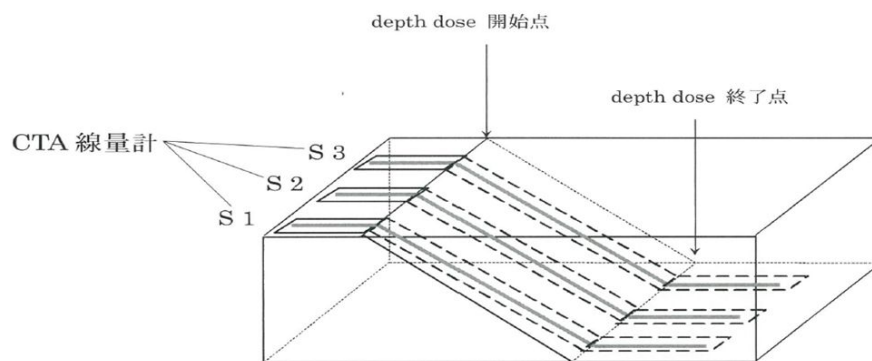


図1. 電子線片面照射時の線量計配置図

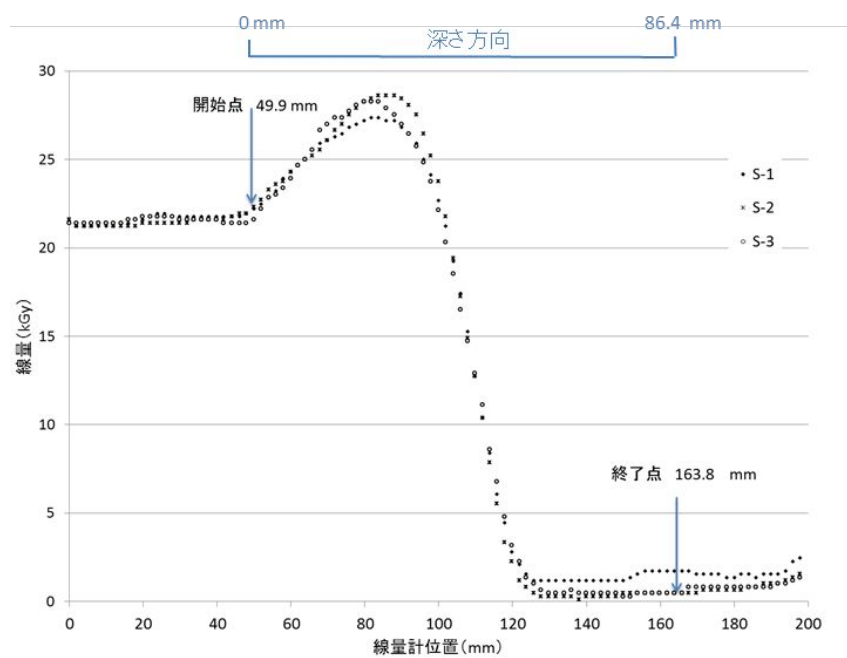


図2. 10 MeV 電子 片面照射における線量深度分布

x 軸は図1のように配置した線量計の長さ位置を表している。
 実際の深さ距離は図中の開始点位置 (49.9 mm) を 0 mm (試料最上面)、
 終了点位置 (163.8 mm) を 86.4 mm (試料最下面) として補正される。

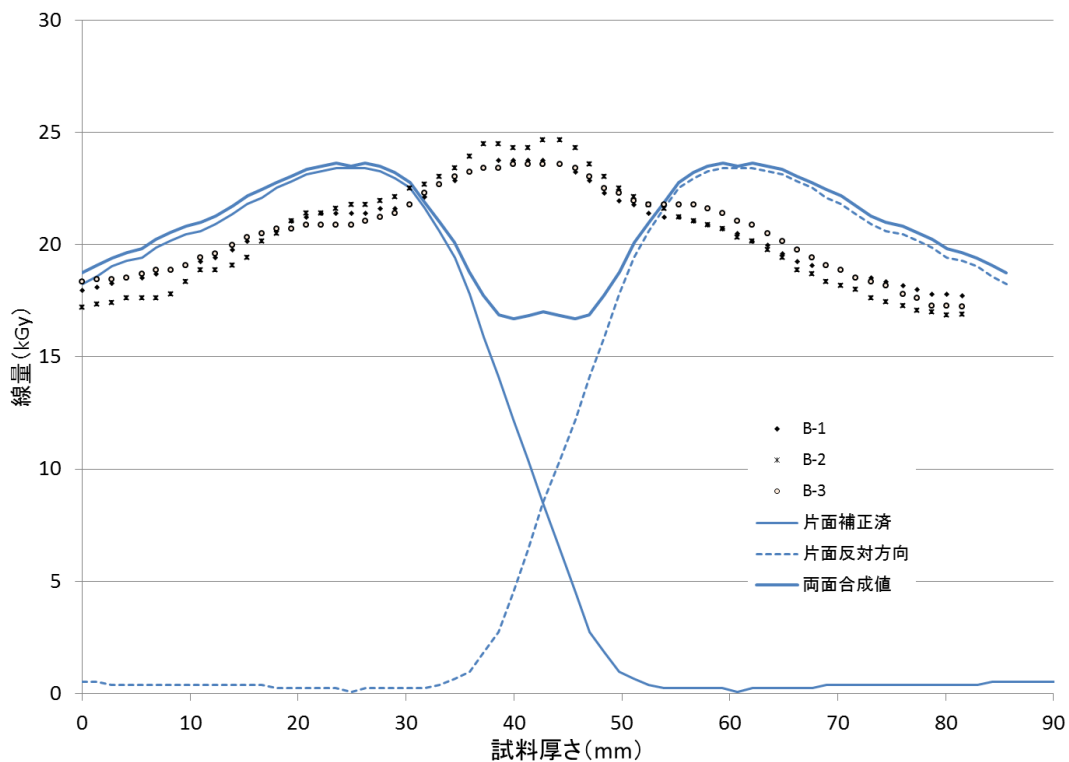


図3. 10 MeV 電子 両面照射における線量深度分布 (試料厚さ:81.5 mm)

x 軸は試料表面(照射方向に向かって最上面)からの試料厚さを表す。
 プロットは、図1のように3本のテープ状線量計を厚さ 81.5 mmの試料に取り
 付け両面照射(試料の表裏を反転させて1回ずつ照射)した際の実測値
 実線(細)は、図2で得た片面照射の深度線量分布曲線の最上面(表面)線量を両
 面照射時の最上 面線量と同等になるように補正して描画したもの。点線はこ
 れを反対方向から照射と仮定し、厚さ方向の座標を反転させて描画したもの。
 実線(太)は両者を合成し、片面照射の深度分布曲線から、厚さ 85.6 mmの試
 料の両面照射時の線量分布をシミュレーションしたもの。