

平成 30 年度 厚生労働科学研究費 食品の安全確保推進研究事業  
「畜産食品の生物学的ハザードとその低減手法に関する研究」

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 食品総合研究部門  
研究協力者：川崎 晋 国立研究開発法人 農研機構 食品総合研究部門  
研究協力者：清藤 一 国立研究開発法人 量研機構 高崎量子応用研究所

**研究要旨：**肝臓左葉に対し、サルモネラの 5 桁低減に必要な線量を効率的に照射する方法を検討し、その際の線量分布と殺菌効果について調査した。

縦 20 cm × 横 25 cm、最大厚さ 50 mm の肝臓左葉を、厚さ方向を板状線源の正面に向けて両面照射した際の吸収線量の最大/最小比は 1.104 であり、同等の配置において照射時間を適切に設定すれば、肝臓左葉を 8.2 kGy～10 kGy の範囲内で照射できる可能性が示された。

商業規模のガンマ線照射施設において、トートボックス内の指定位置に、厚さ 50 mm 及び 100 mm の板状の模擬試料を固定し、コンベアシステムで照射室に搬送して照射を行った際の試料中の線量分布測を測定し、厚み方向のガンマ線の透過力とボックス内における適切な試料位置を確認した。この検討結果に基づき、2 つのトートボックスの指定位置に、凍結状態の肝臓をそれぞれ 1 つずつ配置して照射を行ったところ、試料 1（最大厚さ 64.4 mm）では、線量範囲が 8.94 kGy ～ 9.49 kGy、最大/最小比 1.062、試料 2（最大厚さ 76.2 mm）では、8.59 kGy ～ 9.33 kGy、最大/最小比は 1.089 となり、線量測定の不確かさを考慮しても、8.2 kGy～10 kGy の線量範囲で照射を達成できる可能性が示された。ただし、重量や寸法にある程度の幅のある 11 検体の左葉試料（932g～2,350g、寸法 約 27～32 cm × 17～28 cm、最大厚さ 38 mm～57 mm 程度）を、同様の照射条件で一斉に処理した場合には、試料表面の線量範囲でも 8.69 kGy ～ 9.90 kGy、最大/最小比 1.139 に広がった。多数の肝臓試料を複数のトートボックスに装填して、すべての検体のいずれの部位も目標範囲の線量に収れんさせるには、個々の試料の形体や比重をできるだけ揃えて再現良くトートボックス内の定位置に装填する工夫が必要と判断された。なお、これら 11 検体の照射前の最大菌数は、一般生菌数  $10^5$  CFU/g、腸内細菌科菌群  $6.2 \times 10^3$  CFU/g であったが、ガンマ線照射により、増菌しても、11 検体のすべてが不検出となるレベルまで低減された。

## 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を設定された。この規制には解除の要望も多く、その決定の際には、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。<sup>1)</sup>。

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確立することを目的とする。H29年度までに、25gの牛肝臓中への接種実験により、脱気包装、ドライアイス下において  $10^5$  CFU/g の *E. coli* O157 および *S. Enteritidis* を低減（不活化）するために、それぞれ 5.3~5.5 kGy、8.2~8.5 kGy（信頼度 95%~99%）の線量が必要であることを明らかにした。

本研究では、放射線照射の実用性を評価する目的で、商業用照射施設において、牛肝臓左葉部位に対して、*S. Enteritidis* を

$10^5$  CFU/g 不活性化するガンマ線を照射するための条件について検討を行った。

## B. 研究方法

### 1. 材料

牛肝臓の採材部位は、他の分担研究の結果から、最も微生物汚染が少ないと考えられる、左葉部分を対象とした。微生物試験用の牛肝臓試料は、食肉処理場にて屠殺直後に取り出して急冷し、牛肝臓塊より左葉（約 0.9 kg~2.74 kg）を切り出して用いた。また、商業用施設での線量分布を予備的に調査するための模擬試料として、市販の板こんにやく（ $14 \times 7.5 \times 2.5$  cm 密度約 0.988 g/cm<sup>3</sup>）を用いた。

### 2. ガンマ線照射施設

ガンマ線照射は、①国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構、高崎量子応用研究所（量研、高崎研）のガンマ線照射施設（7セル）にて静置の両面照射を、②コーガイソトープ株式会社1または3号機にて、トートボックスを用いた連続照射を行った。

①は照射室に配置された照射台上に試料を設置して照射するもので、前年までの試験により、線源保護板から 20 cm以上の距離に試料容器（400 mm（横）× 240 mm（縦））を設置した際には、試料容器表面における線量分布がほぼ均一であることが確認されている。なお、試料の厚さ方向の線量の均一性を保つために、照射時間の半分で試料を反転させ両面から照射を実施した

②の商業用施設は、ノーディオン社製ガンマ線照射装置2基、JS-7500（60-Co 約 66.6 PBq）および JS-7500（60-Co 約 3.3 PBq）

を備えている。これらの装置には、専用照射容器として、ステンレス製のトートボックス（長さ 58cm x 幅 46 cm 高さ 89 cm）による連続搬送設備が付属しており、照射試料はトートボックス中に充填され、コンベア上を連続移動して照射室へ入る。照射室内のトートボックスは、室内中心にある板状線源を取り囲むように配置されたコンベア上を、ポジションを変えながら移動してゆく。各トートボックスは、設定されたサイクルタイムにより滞在時間を規定され、最終的に板状線源の両側を通過することで、容器内の試料が連続的に両側面から一定線量で照射される。図 1 に照射施設の概観と、線源に対すトートボックスのポジションの相対位置およびトートボックス内の線量分布イメージを示す。

### 3. 肝臓左葉および小片の静置照射における線量分布確認

牛肝臓左葉（1,800g、20 cm × 25 cm、厚さ 50 mm）を 2 枚に切断して中心内面 5 か所にアルミ蒸着シートで包装したアラニンペレット線量計を挟み、その後 2 枚を重ねて元の形状に戻してガスバリア袋で脱気包装した。包装後の外面にも線量計を張り付けた（図 2）。

薄切りした肝臓小片を作成し、その 5 枚を 10 cm × 7 cm の発泡スチロール皿に並べ、切り身の間および、皿表面に線量を装着し、ガスバリア袋で脱気包装した。包装した袋の上面にも線量計を取り付けた。この状態の試料 2 皿分（肝臓重量：84.6g 及び 87 g）を作成した。なお、包装試料の肝臓部分の厚さは約 1 cm であった（図 3）。

包装し線量計を取り付けた左葉は、ほぼ

同面積の紙箱に入れ、トレー入りの切り身肝臓は、2 つのトレーを重ね、それぞれ厚さ方向の中心をそろえて、発泡スチロール箱（外径（436 mm（横）× 276 mm（縦）× 136 mm（奥行き））、内径（400 mm（横）× 240 mm（縦）× 100 mm（奥行き））に入れ、高崎量子応用研究所の照射室にて、線源保護板からレバーの厚さ中心までの距離が 30 cm、高さ中心が 22.5 cm となるように立てかけて、前面から室温にて照射した。線量率は約 1.5 kGy で、照射時間の半分（4 時間）で試料を反転した（図 4）。

吸収線量の確認は、照射試料の外箱の基準位置（試料中心位置と同じ距離の箱側面）にアラニン線量計（アミノグレイ、日立電線株式会社）取り付け、量研、高崎研が校正した検量線を用いた線量測定システムにより行った。このシステムにおける線量測定の不確かさは 3% である。吸収線量の分布は、上述のように試料内部と表面に装着したアラニンペレット（ES200-2106：ブルッ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. 連続照射における線量分布予備試験

肝臓の模擬試料として板状のこんにやくを縦・横 3 枚ずつ 1 面 9 枚となるように並べ、これを 2 段（2 枚重ね（厚さ 5 cm）または、4 枚重ね（厚さ 10 cm）となるように固定した。各こんにやくの中心表面と重ね合わせたこんにやく板の間、および側面に当たる箇所にアルミ蒸着シートに封入したアラニン線量計を張り付けた。（図 5）

作成した立方体上の模擬試料 (22 cm × 42 cm 厚さ : 50 mm または 10 mm) を、発泡スチロール箱に立てて箱の中央に設置し、すきまに発泡スチロールを埋めて固定した。この発泡スチロール箱を、照射装置に付属したトートボックスに 2 段重ね (こんにやく 2 枚重ね 厚さ 50 mm の模擬試料) または、中心部に 1 段 (こんにやく 4 枚重ね 厚さ 100 mm) をセットし、コーガアイソトープ社 1 号機 (1 サイクル、約 1 時間) で、目標線量 10kGy または、3 号機で、予備照射として、サイクルタイム 2 分で 1 周照射して線量測定を行い、サイクルタイム 2 分 5 秒で 8 周照射し、目標最小線量 8.2 kGy を超えるような照射を行った。トートボックスへの模擬試料の装填手順とボックス内での位置イメージを図 6 に示した。

線量測定は、ESR 測定装置 (ブルカー社製 e-scan) を用いて、アラニンラジカルに由来するシグナル強度を測定し、NPL アラニンを用いて同社で比較校正して作成した検量線を用いて線量を読みだした。照射時の試料温度は、31.1°C (2 枚重ね試料) または、19.3°C~22.4°C (平均 20.4°C) であった。

#### 5. 肝臓左葉の連続照射における線量分布

2 頭分の交雑牛の肝臓 (総重量 7.72kg および 6.44 kg) から左葉 (重量 2.74 および 2.04 kg) を切り出し、前項 3 で示したように、アルミ蒸着シートに封入したアラニン線量計を切り開いた中心部及び包装後の表面にそれぞれ 5 か所、左葉 1 つにつき 15 か所ずつ取り付けました。この左葉試料を -80°C の超低温層にて凍結したのち、ドライアイスで梱包して照射施設に送付した。

アラニン線量計が取り付けられた凍結肝臓試料は、発泡スチロール板に PP バンド (黄色) で固定し、発泡スチロール容器に立てて設置し、倒れないようにすきまに発泡スチロールを埋めた。そして、主なガンマ線照射面を遮らないようにドライアイス板を配置した (図 7)。なお、試料表面には熱電対式温度プローブ (安立計器株式会社製 ハンディタイプ温度計 HA-400E) の先端を差し込み、照射前後の温度測定を行った肝臓試料とドライアイスを含めた発泡スチロール容器は、前項 4、の 1 段照射の位置と同じになるように、トートボックス中に配置し、コンベアにより、サイクルタイム 2 分 5 秒で 8 周照射した。

試料に取り付けたアラニン線量計の線量は、ドライアイス下で、校正照射を行ったアラニン線量計で作成した検量線を用いて線量を算出した。

#### 6. 肝臓左葉連続照射における殺菌効果

2 か所の食肉処理場 A または B において、それぞれ 6 頭および 5 頭分の肝臓左葉を得た。採材後の肝臓は、冷蔵状態で研究所に輸送し、入手直後 (と畜後 2 日目)、方形葉側の一部 (25 g 程度) を微生物試験用にサンプリングし、残りを、ガスバリア袋 (PTS 袋 ; 三菱ガス化学製、PB180250P 350×500mm) を用いて脱気包装し、直ちに -80°C の超低温槽で保管した。凍結状態の左葉は、商用照射施設に送付後、前項と同様に、トートボックスに装填して搬送し、ドライアイス下で照射を行った。なお、11 個の肝臓検体は、48 個のトートボックスに散在するように配置した。照射装置は前項 5. と同様の運転条件とした。線量測定は、各々

の肝臓左葉の厚さが最大及び最小となる部分の表面にアラニン線量計をとりつけて行った。

照射前の肝臓検体は、25 g を 225 mL の菌緩衝ペプトン水を加えて、ストマッカーで乳剤化したのち、標準寒天平板および VRBG 平板 (Oxoid) にて、一般生菌数及び、腸内細菌科菌群を計数した。

ガンマ線照射後の肝臓検体は、25g をサンプリングし、225 mL の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) に一白金耳を画線し、35 °C で一昼夜培養し、腸内細菌科菌群の生残の有無を確認した。

## C. 研究結果および考察

### 1. 静置照射における肝臓(左葉)および切り身試料中の線量分布

表 1 に牛肝臓左葉(1,800 g 最大厚さ 50 mm)及び、包装した切り身(85~89g 程度、厚さ:10 mm)を静置して両面から照射した際の線量分布を示す。薄く切ってほぼ均一な厚さに包装した切り身に張り付けた線量計の吸収線量は、平均で 12.67 kGy 及び 12.53 kGy、左葉のそれは、平均で、12.24 kGy と、厚さの大きな左葉に比べて、切り身の吸収線量はやや大きくなった。また、試料内の線量の変動も小型に成型した切り身のほうがやや小さく、線量の最大/最小比 (DUR: Dose Uniformity Ratio) は、1.05 ~1.06 程度であった。一方、試料内の厚さも不均一で最大厚さの大きな左葉の DUR は、1.104 となった。ただし、左葉の DUR から、腸内細菌科菌群であるサルモネラの 5 桁低減に必要な最小線量の 8.2 kGy となるよう

に照射時間を設定した際の最大線量は 9.02 kGy と算定されることから、十分に狭い線量分布範囲での照射が可能であると判断された。凍結状態(ドライアイス下)で、肝臓を照射するためには、前面から来るガンマ線の照射方向を遮らないように、例えば、肝臓の背面からドライアスを当て、肝臓を途中で反転しながら同位置にて両面照射を行えば、同型の肝臓左葉を同様に良好な線量分布で照射を行うことが可能と考えられた。

### 2. 連続照射(商業施設)における模擬試料の線量分布

通常、商業ベースで受託照射を行っているガンマ線照射施設では、規定の大きさのトートボックスと呼ばれる専用容器中に照射試料を詰め、コンベアやハンガーリフト方式で、トートボックスを、定められた搬送経路で移動させ、コバルト 60 線源の周りを設定した速度で通過することで照射を行っている。トートボックスはある程度の大きさを持っており、ボックス内の照射試料の位置やボックス内の試料との相互作用により、吸収線量に分布が生じる。

本研究において、実証例として使用した商業施設では、長さ(板状線源に平行する横幅)58cm x 幅(線源からの距離方向の奥行)46 cm、高さ 89 cm のステンレス製のトートボックスが搬送系で利用されている。線源との位置関係から、図 1 右に示した高さ方向及び幅(奥行)方向の線量分布が生じることが予測された。そして、できるだけ均一な線量分布となる照射を行うためには、幅(奥行)方向に対して、可能な限り薄い試料をトートボックスの中心部に

立てるように配置することとが有効であると考えられた。

そこで、このような試料配置におけるガンマ線の厚さ方向の透過力と面方向の均一性を予備的に探るため、板状のこんにやく（密度：0.988 g/cm<sup>3</sup>）を用いてその表面と中心部の各位置での線量分布を求めた。

図8に、2枚重ねのこんにやくを9組（厚さ50mm）として、発泡スチロール箱に入れトートボックス内に2段重ねにした配置（図6中段）において、約10kGyを目標として照射した際の、各位置の線量計の吸収線量を示した。また、表2にこれらの結果をまとめた。

上下2段に入れた発泡スチロール箱中の模擬試料（厚さ50mm）の吸収線量は、下段の箱中で9.34~10.66kGy、上段の箱中では9.69~10.64kGy、全体では9.34~10.66kGy（中央値10.0kGy、平均値10.01kGy）、DUR（最大/最小比）は全体でも1.14と良好な分布を示した。この照射条件では、サイクルタイムを1週の照射で10kGy（照射時間は約1時間）となるようにセットしていることから、サイクルタイムを適切に設定すればサルモネラの5桁低減に必要な最小線量8.2kGyを超え、10kGyを下回る範囲での照射を実現できると考えられた。

さらに、図9に4枚重ね（厚さ100mm）のこんにやくをいれた発泡スチロール箱をトートボックスの中央に1箱入れて照射した際の線量分布を示す。照射は、コーガアイソトープ3号機を用い、最小線量が8.2kGyを上回るようにサイクルタイムを調節し、8周照射とした。100mmの厚さの試料では、線量は、前述の50mm厚さの試料に比べてより広範囲に広がり、最小線量は面方向の中

心位置（試料位置5）の試料の厚さ中心（位置③）で、8.23kGy、最大線量はの試料角位置の表面にあたる場所で10.13kGyとなり、DURは1.22であった。

### 3. 商用照射施設における連続照射での牛肝臓（左葉）の線量分布

模擬試料の線量分布測定結果から、試料の厚さが80mm程度までであれば、同様の配置において、目標範囲内の線量での照射が可能と予測した。そこで、厚さが64.4mm及び、76.2mmの凍結した牛肝臓左葉を、前項の100mm厚さの模擬試料の照射時と同様に、発泡スチロール箱の中心に立てて配置し、照射試験を行うこととした。照射中の温度を保つため、主に試料上部にドライアイス置いて冷却した。この試料箱をトートボックスに1つずつ装填し、線源を8周、周回して合計17時間かけて照射を行った。照射前および各周回の途中で、試料温度を測定した結果、照射前が-67.9℃、照射終了後が-66.7℃で周回中の最低温度は-70.1℃であった。

図10に2頭分の凍結肝臓（左葉）内の線量分布の測定結果を示す。最大厚さが64.4mmの試料1では、最小線量8.94kGy、最大線量9.49kGyであり、最大/最小比（DUR）は1.062となった。また、肝臓に張り付けた15個の線量計の吸収線量の平均は、9.17kGyであった。一方、最大厚さ76.2mmの試料2では、吸収線量の平均は、試料1よりやや低い8.92kGyとなり、最小線量8.59kGy、最大線量9.33kGy、DURは1.089であった。いずれの試料も、同一のサイクルで照射を行ったこんにやく（模擬試料厚さ100mm）よりも、小さなDURとなった。な

お、最小線量を示した箇所は、両試料とも、凍結した試料の厚さが最大となる左葉の中央部であり、最大線量を示した箇所は、厚さが小さくなる左葉の先端部分である端側の表面部分(線量計番号⑨)であった。

牛肝臓照射の微生物制御に必要な線量は、最小 8.2 kGy であるが、仮に最大線量を定めるとすれば、コーデックス規格で一般的に認められている 10 kGy が想定される。上述の肝臓(左葉)試料における線量分布の測定結果は、線量測定の不確かさを 5%程度見込んで、この線量範囲で照射を達成できる可能性があることを示している。

#### 4. 連続照射における肝臓左葉の殺菌効果

2 か所(A、B)の食肉処理場から肝臓左葉試料を調達し、合計 11 検体を脱気包装後に凍結し、前項と同様の条件で照射した。照射時の試料温度は、- 52.3 ~ - 72.2°C、平均で - 67.2°C であった。

表 3 に試験に用いた各肝臓の重量と厚さ、線量測定結果、照射前後の微生物検査結果をまとめた。

試験に供した肝臓は、照射時の重量が、932g~2,350g、寸法 約 27~32 cm × 17~28cm、最大厚さが 38 mm~57 mm程度であった。照射後の吸収線量の測定結果は、試料厚が最大となる表面の部分で 8.69 kGy~9.46kGy、厚さが最小となる表面部分で 8.96~9.90 kGy であった。

この試験では、線量が試料内で最小となりうる、肝臓の内部線量を測定していないが、試料の最大厚さが、同一の条件で照射した、こんにやく試料(厚さ 100 mm)や、前項の肝臓試料(厚さ 74.6 mm)よりも小さい範囲にあることから、肝臓の内部であって

もこれらの最小線量である 8.28 kGy を下回る部分は存在しないと考えられた。

今回照射した全 11 試料の最大線量(9.90 kGy)と最小線量(8.69 kGy)の比は 1.139 であり、測定した範囲に限定しても、前項で肝臓内部にも線量計を配置して求めた 2 つの肝臓の最大線量(9.49 kGy)と最小線量(8.59 kGy)の比である 1.104 を上回っている。11 個の肝臓試料それぞれの最大厚さは、38 mm~57 mm程度と、それほど大きくないため、個々の肝臓内の線量分布の範囲はそれほど大きくはないと考えられるが、肝臓の個数が増えたことで、個体間の厚さや形状のばらつきが大きくなり、同じバッチの照射試料全体の線量範囲が広がったと考えられる。また、実測した最大線量の 9.90 kGy は、線量測定の不確かさを考慮すると、線量上限を 10 kGy に設定した場合において十分な余裕は無く、バッチ全体の線量分布をより小さくする工夫が必要と考えられた。

肝臓試料の微生物汚染状況は、処理場 A で入手した肝臓の一般生菌数  $7.4 \times 10^2$  CFU/g ~  $3.6 \times 10^3$  CFU/g、腸内細菌科菌群は、6 検体中 5 検体が検出限界未満、1 検体の菌数が  $4.5 \times 10^2$  CFU/g、処理場 B では、一般生菌数  $8.5 \times 10^4$  CFU/g ~  $3.2 \times 10^5$  CFU/g、腸内細菌科菌群  $8.1 \times 10^2$  CFU/g ~  $6.2 \times 10^3$  CFU/g であった。照射後の微生物検査に際し、検体から 25g をサンプリングし、これを前培養後に平板培養を行った結果、11 検体全てにおいて、一般生菌および腸内細菌科菌群は検出されなかった。

多数の肝臓試料を複数のトートボックスに装填して効率的な照射を実行する場合、すべての試料におけるいずれの部位におい

でも、線量範囲を目標範囲に収めるためには、個々の肝臓試料の形体（厚さ）をできるだけ揃えて再現良くトートボックス内の定位置に装填することが必要となる。そのためには、許容される DUR を達成できるように照射方向の奥行を小さくした立方体容器を設計し、その中にできるだけ比重を一定にして肝臓試料を充填し、各々のトートボックス内の試料配置と密度を揃えるなどの工夫が必要となる。

実際の商業照射施設を用いた効率的な連続照射の運用に際しては、基準とする線量の考え方を明確にした上で、各トートボックス内における肝臓試料の線量を、線量測定の不確かさを考慮しても、目的範囲に収れんさせる照射方法を決定する手順を定めるとともに、手順通りに照射が実施されたことを検証する手法についても、予め定めおくことが必要と考えられる。

#### D. 結論

牛肝臓中のサルモネラの 5 桁低減に必要な線量を、肝臓左葉を効率的に照射する方法を検討し、その際の線量分布と殺菌効果について調査した。

縦 20 cm × 横 25 cm、最大厚さ 50 mm の肝臓左葉を、厚さ方向を板状線源の正面に向けて両面照射した際の吸収線量の最大/最小比は 1.104 であり、同等の配置において照射時間を適切に設定することで、肝臓左葉を 8.2 kGy～10 kGy の範囲内で照射できる可能性が示された。

商業規模のガンマ線照射施設における連続搬送システムにおいて、厚さの異なる模擬試料をトートボックス内に配置した際の線量分布測定を行い、厚み方向のガンマ線

の透過力とボックス内における適切な試料位置を確認した。この結果に基づいて決定した試料配置により、2 つのトートボックスのそれぞれに、凍結状態の肝臓を 1 つずつ充填して照射を行い、肝臓内部も含め線量分布を確認したところ、最大厚さ 64.4 mm および最大厚さ 76.2 mm の 2 つの肝臓の線量範囲は、8.59 kGy ～ 9.49 kGy、最大/最小比 1.104 であり、線量測定の不確かさを考慮しても、8.2 kGy～10 kGy の線量範囲で照射を達成できる可能性があることが示された。ただし、試料内及び試料間の形体（特に厚さ）の変動の大きい 11 検体の左葉部位を、同様の照射条件にて処理した場合には、試料表面で測定した線量の範囲が 8.69 kGy ～ 9.90 kGy、最大/最小比 1.139 に広がった。なお、これらの検体の微生物は一般生菌、および腸内細菌科菌群とも検出限界未満のレベルに低減された。

多数の肝臓試料を複数のトートボックスに装填して連続的に照射を実行する場合、すべての検体のいずれの部位も目標範囲の線量に収れんさせるためには、個々の試料の形体や比重をできるだけ揃えて再現良くトートボックス内の定位置に装填する工夫が必要と判断された。さらに、規格基準を設けて照射行程を管理する際には、照射条件を決定する手順を定めるとともに、日常的に手順通りの照射が実施されたことを検証する手法についても規定しておく必要がある。

#### 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/2r9>

[852000002fsbi.html](http://852000002fsbi.html)

- 2) 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

#### F. 健康危機情報

なし

#### G. 研究発表

論文発表

- 1) 川崎 他、牛肝臓内部における *Campylobacter jejuni* のγ線照射に対する殺菌効果、日本食品科学工学会誌、65 (2018) 259-263.
- 2) Susumu Kawasaki, Mie Saito, Mari Mochida, Fia Noviyanti, Hajime Seito, Setsuko Todoriki, Inactivation of *Escherichia coli* 0157 and *Salmonella* Enteritidis in raw beef liver by gamma irradiation, Food Microbiology 78 (2019) 110- 113.

講演・研修会等

なし

#### H. 知的財産権の出願，登録状況

なし

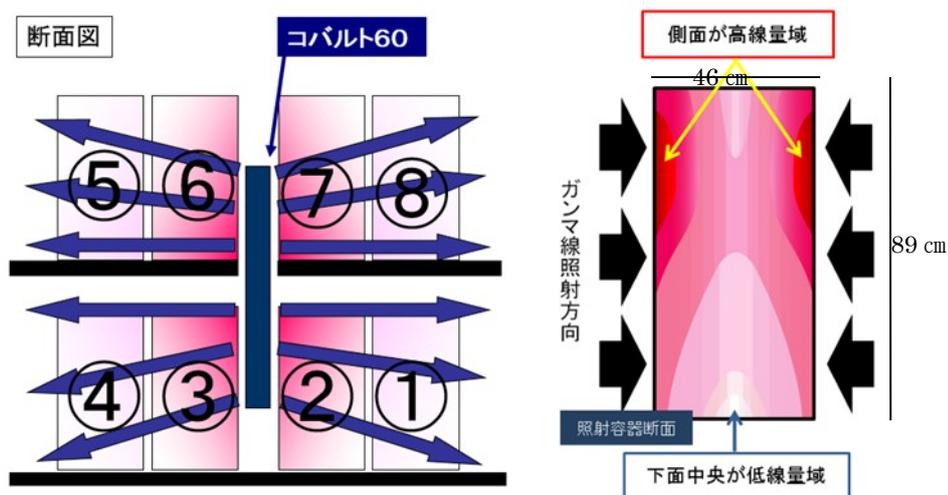
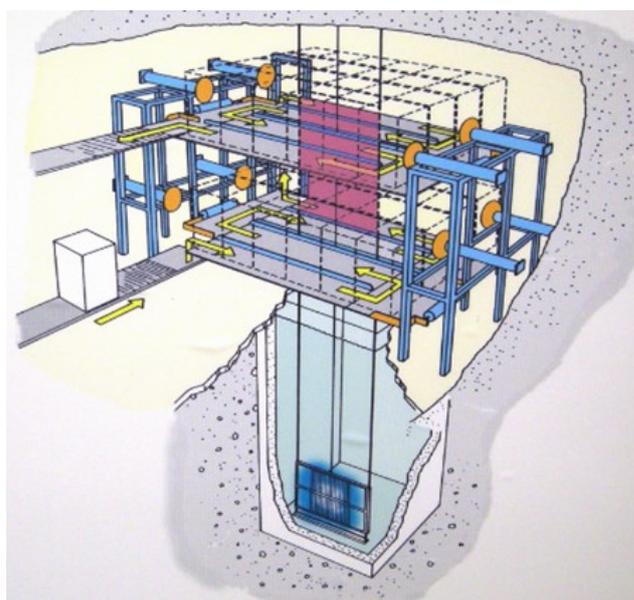


図 1. 商業用照射施設概略(上)と線源の周りを移動するトートボックスの相対位置と箱内の線量分布イメージ(下)

線源は照射時にはプールから引き上げられ、照射室内で容器の中心に固定される。照射容器は上下2段左右4列あり、各列6容器ずつ並んでおり、48容器が配置される。(図は線源の断面方向での容器列を示している)照射容器は線源のまわりを1コマずつ一定時間(サイクルタイム)ごとに間欠で移動する。早く動くと弱く照射され、ゆっくり動くと強く照射される。時間によって照射量をコントロールする。48回移動すると照射室から排出される。この移動の際、照射容器(トートボックス)の両側面から照射されることになるが、線源位置、距離との関係から、容器内の線量は、おおよそ下図右のような分布が生じる。



図2. 肝臓左葉へのアラニン線量計の取り付け

切り出した牛肝臓左葉を、方形葉側の厚い部分から2枚になるように切り開き、内面に密封したアラニン線量計を配置し(5か所)、2枚をもとの形になるように合わせ、ガスバリア袋で密封した。包装後の肝臓の両面にも線量計を張り付けた。



線量計(5か所)を張り付けた  
発砲スチロールトレイに  
切り身の肝臓を載せる

切り身の間にも線量計挟む

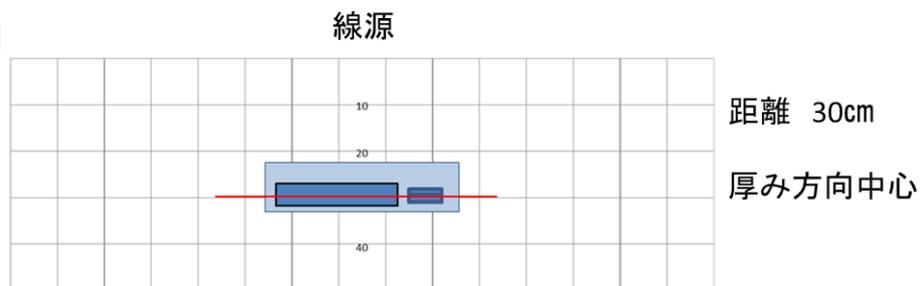
No 6 ~ 10 (5か所)



全体を脱気包装(シール)の後、  
上面に線量計を貼り付け

図3. 肝臓切り身試料の包装とアラニン線量計の取り付け

上から見た図



照射箱内(透視図)

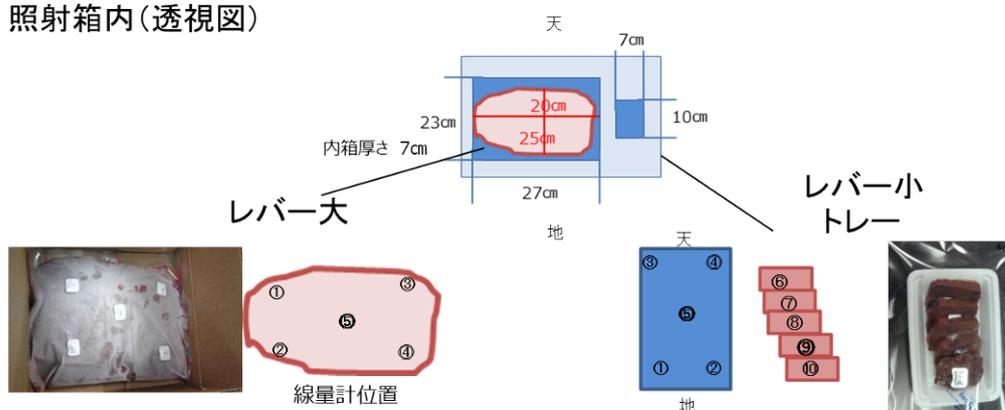


図4. 静置照射における試料箱の設置位置と箱内配置

板状線源の正面に試料を入れた発砲スチロール箱を立て、試料中心の距離を線源保護板より30 cmとした。半分の照射時間(4 時間)で中心位置の距離を保ったまま試料を反転させた。



縦 (7.5 cm) 横(14 cm) 厚さ(25 mm)



2枚重ね 厚さ(25 mm)



4枚重ね 厚さ(100 mm)



こんにゃく中心 1 個ずつ線量計を貼り付け、2 または 4 枚重ねとして線量計を挟み裏面中心にも線量計を張り付けた、これを 9 組並べた。(右図)。



図5. 模擬試料(こんにゃく)への線量計取り付け手順 (上)、と 1 面 9 枚のこんにゃくを組み合わせた際のこんにゃく位置の番号と線量計位置

口の番号は資料番号。赤丸はこんにゃく板中心の線量計位置。青丸は 6 面全体での外側線量計位置を示す。4 枚重ねの際は黄色塗りつぶしの位置の測定はしていない。

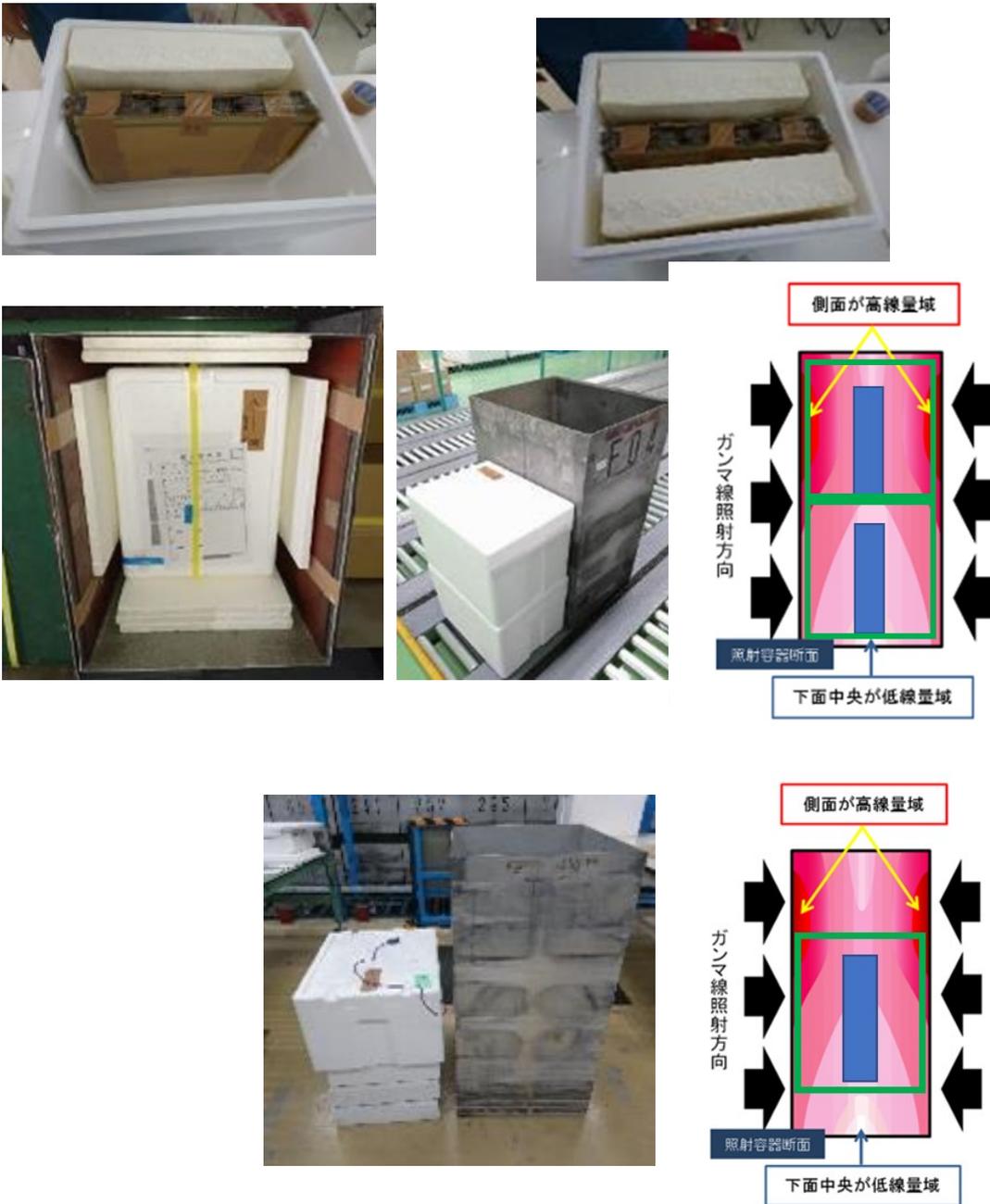


図6. 発泡スチロール箱への模擬試料(こんにゃく)の装填(上)、トートボックス中の発泡スチロール箱および試料位置のイメージ(中、下)

こんにゃく2枚重ねの際は中段のように発泡スチロール箱2箱それぞれに模擬試料を入れ2段に重ねてトートボックスに入れた。模擬試料(青口)はイメージ図に示すようにトートボックス中心の線量の弱い中央部に位置するように配置した。こんにゃく4枚重ねの試料は、トートボックス中に1箱の発泡スチロール箱を装填し、線量の変動が一番少ない場所に配置できるように箱の高さを調節した。

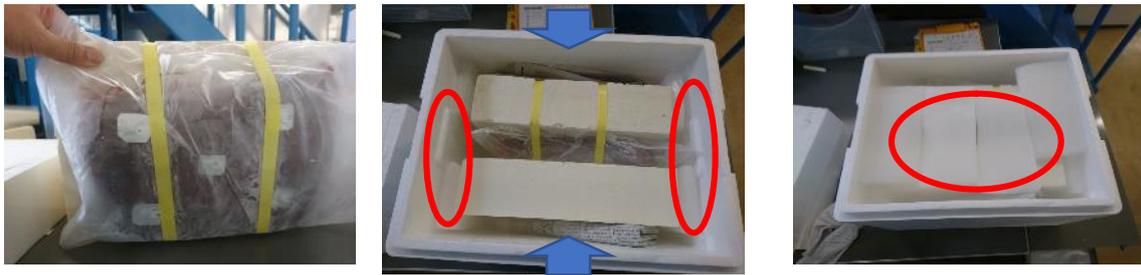


図7. 牛肝臓（左葉）の発泡スチロール箱への装填

凍結肝臓試料は、発泡スチロール板にPPバンド（黄色）で固定し、発泡スチロール容器に立てて設置し、倒れないようにすきまに発泡スチロールを埋めた。主なガンマ線照射面（青矢印方向）を遮らないように板状ドライアイスを側面および上面に配置した（赤丸印）。

表1 静置照射（両面）における、牛肝臓内の線量分布（左葉（厚さ 50 mm）：左、および切り身包装（厚さ 20 mm）

位置	Dose (kGy)	相対値*	位置	No1		No2	
				kGy	相対値*	kGy	相対値*
中心	1	12.63	上面	1	12.37	12.52	1.007
	2	12.32		2	12.36	12.60	1.012
	3	12.81		3	12.66	12.69	1.020
	4	12.52		4	12.61	12.86	1.033
	5	12.61		5	12.56	12.78	1.027
上面	6	12.07	内側	6	12.68	12.52	1.006
	7	11.60		7	12.86	12.54	1.008
	8	12.52		8	12.49	12.55	1.008
	9	11.89		9	12.79	12.64	1.016
	10	11.99		10	12.73	12.37	0.994
下面	11	12.18	下面	11	12.89	12.56	1.009
	12	11.70		12	12.60	12.14	0.976
	13	12.44		13	12.85	12.40	0.997
	14	12.08		14	12.68	12.27	0.986
	15	12.16		15	12.93	12.44	1.000
平均	12.24	0.984	平均	12.67	1.018	12.53	1.007
SD	0.355	0.029	SD	0.178	0.014	0.186	0.015
RSD %	2.90	2.90	RSD %	1.40	1.40	1.48	1.48
最小	11.60	0.933	最小	12.36	0.993	12.14	0.976
最大	12.81	1.030	最大	12.93	1.039	12.86	1.033
最大/最小	1.104		最大/最小	1.048		1.059	

\* 相対値：外箱の中心線上の線量 12.44 kGy を 1 とした時の相対線量 線量計位置は図4参照。



□の番号は資料番号。赤丸はこんにゃく板中心の線量計位置。青丸は9面全体での外側線量計位置を示す。

上段			
10.11		<b>10.64</b>	10.22
10.59		10.61	10.41
10.32		10.15	10.38
	10.10	9.98	10.03
	9.81	9.86	<b>9.75</b>
	10.11	9.96	10.07
10.03	9.94	9.716	9.873
10.37	10.14	9.873	9.932
10.28	9.69	9.932	9.796
	9.87	10.28	10.07
	10.11	9.827	9.88
	9.95	9.748	9.78
10.53		10.23	10.41
10.48		10.06	10.05
10.55		10.52	10.46
下段			
10.28		9.97	10.22
<b>10.66</b>		10.38	10.41
10.32		10.36	10.38
	10.00	10.05	10.09
	9.87	9.82	9.83
	10.25	10.04	10.17
10.02	9.60	9.49	9.46
9.54	9.74	9.61	9.77
10.26	9.51	9.66	9.75
	9.39	<b>9.34</b>	<b>9.34</b>
	9.74	9.74	9.64
	9.53	9.57	10.54
9.89		9.69	9.99
9.69		9.62	9.69
10.06		9.96	9.97

図8. 模擬試料（こんにゃく）中の線量分布（2枚重ね 厚さ50mm）

赤字：表面 黒字：中心（2枚の間） 青字：裏側 の線量計の吸収線量（単位：kGy）

□の枠の位置は、本図最上の写真に示したこんにゃくの位置1～9に相当する  
背景色 背景色 の位置は写真中の青丸（側面近く）位置の線量を示す。

（側面に線量計を貼り付けると被照射物の吸収より大きくなってしまいうため、端に近いところで2枚のこんにゃくの間挟んでいる）箱中の試料配置は図6. 中段の写真を参照。

表 2. 商業照射施設における模擬試料(こんにやく) 中の線量分布 (2枚重ね 厚さ 50 mm)

	下段 (中心部)	下段 (側面部)	下段 (箱全体)	上段 (中心部)	上段 (側面部)	上段 (箱全体)	全体
平均 (kGy)	9.76	10.06	9.90	9.92	10.32	10.11	10.01
SD (kGy)	0.29	0.29	0.28	0.149	0.2	0.22	0.31
RSD (%)	3.01	2.84	2.79	1.496	1.96	2.13	3.13
最小 (kGy)	9.34	9.54	9.34	9.69	9.99	9.69	9.34
最大 (kGy)	10.54	10.66	10.66	10.28	10.64	10.64	10.66
DUR (最大/最小)	1.13	1.12	1.14	1.061	1.06	1.10	1.14

箱中の試料配置は図 6. 中段の写真を参照

上段：トートボックス中上側の発泡スチロール箱に入れた模擬試料、下段：下側の発泡スチロール箱中の試料

中心部：こんにやくの真ん中に張り付けた線量計の線量(図 5、図 8 写真 赤丸印位置、側面部：同写真 青丸印位置



位置	試料1端	試料1	試料2	試料3	試料3端
①	9.90	9.58	9.42	9.39	9.76
②	8.78	9.48	8.85	8.81	9.14
③	9.59	8.72	8.73	8.58	9.16
④	9.52	8.94	8.84	8.69	9.04
⑤	10.13	9.74	9.40	9.31	9.62

位置	試料4	試料5	試料6
①	9.29	9.15	9.19
②	8.69	8.58	8.67
③	8.48	8.28	8.38
④	8.78	8.61	8.58
⑤	9.50	9.16	9.34

位置	試料7端	試料7	試料8	試料9	試料9端
①	9.69	9.31	9.24	9.40	9.81
②	9.28	8.63	8.57	8.81	9.62
③	9.06	8.40	8.41	8.49	9.20
④	9.46	8.91	8.57	8.62	9.22
⑤	9.94	9.46	9.23	9.24	9.73

平均 (kGy)	9.11
中央値 (kGy)	9.16
SD (kGy)	0.39
RSD (%)	4.26
Min (kGy)	8.28
Max (kGy)	10.13
DUR	1.22

図9. 模擬試料（こんにゃく）中の線量分布（4枚重ね 厚さ100mm）

試料1～9は、本図最上の写真に示したこんにゃくの位置1～9に相当する  
位置①～⑤は4枚重ねたこんにゃくの厚さ方向の位置を示し、①は1枚目の前面、⑤は4枚目の裏面であり③が厚さ方向の中心位置(2枚目と3枚目のこんにゃくの間)となる。

**背景色** 写真中の青丸（側面近く）位置の線量を示す。

（側面に線量計を貼り付けると被照射物の吸収より大きくなってしまうため、端に近いところで2枚のこんにゃくの間）箱中の試料配置は図6. 下段の写真を参照。

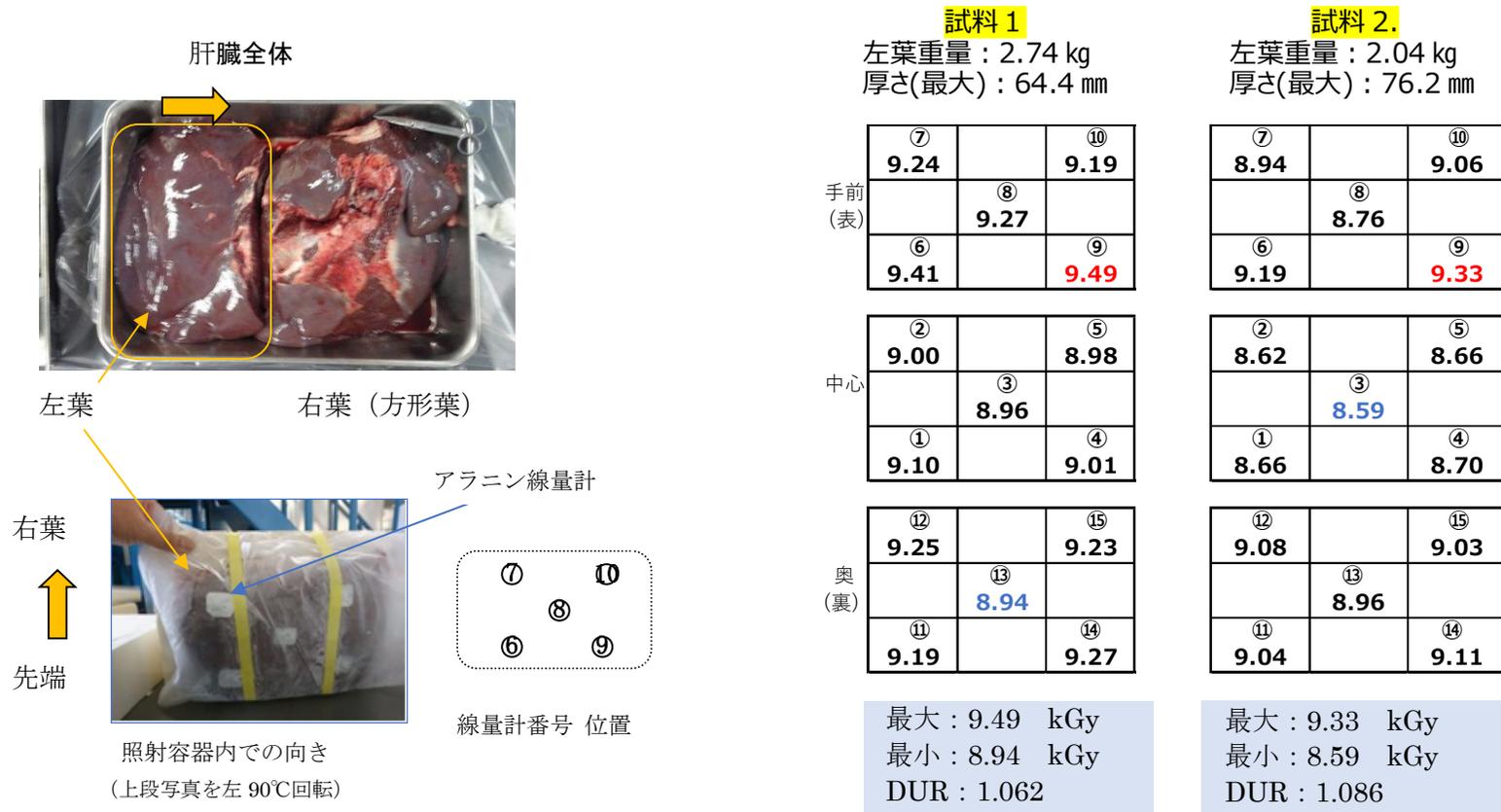


図 10. 凍結肝臓試料の線量分布測定結果：肝臓左葉試料の様子（左）、試料内の線量分布（右）

図枠内上段①～⑮は線量計番号、下段数字はアラニン線量計の吸収線量(kGy)を表す。手前：試料前面表、奥：試料裏側表面、中心は肝臓を切り開いた中心面に設置した線量計の番号トートボックス内の配置については、図 6 下段及び図 7 を参照。

表 3. 商業照射施設における肝臓試料(左葉)の殺菌効果と線量測定結果

処理場	試料No	全重量(左葉) (g)	照射した肝臓 の重量(g)	厚さ(最大) (mm)	厚さ(最小) (mm)	Box 番号	線量		菌数(照射前)		菌数(照射後)	
							最小 (kGy)	最大 (kGy)	一般生菌 (CFU/g)	腸内細菌科 (CFU/g)	一般生菌	腸内細菌科
A	190206-1	1508.3	1476.1	42	31	1	8.85	8.96	$1.1 \times 10^3$	<30	-**	-
	190207-2 (458)	2008.0	1967.0	50	31	3	9.46	9.51	$2.3 \times 10^3$	$4.5 \times 10^2$	-	-
	190207-3 (471)	1686.6	1654.0	42	34	21	<b>8.69</b>	9.24	<b><math>1.0 \times 10^3</math></b>	<30	-	-
	190208-4 (448)	1835.7	1794.0	55	34	23	8.74	9.24	$3.6 \times 10^3$	<30	-	-
	190208-5 (473)	2390.4	2350.7	51	29	46	9.46	9.57	$7.4 \times 10^2$	<30	-	-
	190208-6 (478)	1961.3	1915.0	44	31	48	9.29	9.51	$1.5 \times 10^3$	<30	-	-
B	190227-1	957.8	932.3	39	n. d.*	10	9.02	9.07	$1.9 \times 10^5$	$5.6 \times 10^3$	-	-
	190227-2	1279.6	1253.7	<b>38</b>	n. d.	12	9.24	9.57	$9.0 \times 10^4$	$2.4 \times 10^3$	-	-
	190227-3	1960.4	1934.3	50	n. d.	30	9.40	9.74	<b><math>3.2 \times 10^5</math></b>	$3.9 \times 10^3$	-	-
	190227-4	1397.7	1371.0	54	n. d.	32	9.29	9.40	$8.5 \times 10^4$	$8.1 \times 10^2$	-	-
	190227-5	1769.6	1744.1	<b>57</b>	n. d.	34	9.40	<b>9.90</b>	$1.9 \times 10^5$	<b><math>6.2 \times 10^3</math></b>	-	-

線量：最大；試料の最も薄い部分表面の線量、 最小；試料の最大厚み部分表面の線量

Box 番号：最大 48 個/サイクルセットすることが可能なトートボックスの順番

\*n. d.：測定せず，\*\* -：不検出（陰