パッケージ照射におけるかまぼこの吸収線量分布

久米民和*・橘 宏行*・青木章平*・佐藤友太郎*

Dose Distribution of Kamaboko on Package Irradiation

TAMIKAZU KUME*, HIROYUKI TACHIBANA*, SHOHEI AOKI* and TOMOTARO SATO*

Gamma irradiation of Kamaboko (a kind of fish jelly products) has been investigated to extend their shelf-life. In this study, the dose distribution in a $14 \times 27 \times 38$ cm package of Kamaboko was measured with a Fricke dosimeter, to elucidate the better irradiation conditions. The ratios of the absorbed dose in Kamaboko (D_K) to the dose in irradiation field (D_F) were almost same at the dose rate of 2×10^5 , 5×10^4 and 1×10^4 rad/hr. When the package of 14 cm thickness was irradiated at the dose rate of 3×10^5 rad/hr and reversed at half dose, the dose uniformity ratio was 1.16 in depth. The ratio was 1.11 in vertical. Therefore, the overall dose uniformity ratio was calculated from above these values as approximately 1.29. In the case of Kamaboko with wrapping film and wooden plate, smaller dose uniformity ratio in depth was obtained as 1.12. The dose uniformity ratio in the package of Kamaboko calculated from the values D_K/D_F almost agreed with the observed ones.

(Received June 18, 1976)

かまぼこの貯蔵期間の延長を目的とした γ 線照射処理法が検討されており、これまでに照射効果および適正線量に関する研究結果が報告されている。篠山¹⁾は板付かまぼこに 300 krad の照射を行なった場合、 $10 \sim 12^\circ\text{C}$ の温度で約 2 倍に貯蔵期間を延長できること（非照射の貯蔵期間は 7～10 日であるのに対し、300 krad 照射では 21 日間）、において、硬さ、白色度等の品質に劣化は認められないことなどから適正線量は 300 krad であると報告している。また、ケーシング詰かまぼこに 300 krad 照射した場合にも、弾性、白色度が向上し、においの変化はなく全体として品質の向上が見られ、著しい貯蔵期間延長効果が認められると報告されている²⁾。

かまぼこ照射の実用化に際しては、パッケージ照射により大量処理する方法が適していると考えられる。しかし、パッケージ照射を行なう場合、試料中の吸収線量が不均一になるという問題があり、パッケージ照射の実用化に先だって、適正線量をより均一にかつ効率よく照射するための条件を検討することが必要である。

先に報告したコンテナに詰めた馬鈴薯中の吸収線量の実測値においては、GOLDSTEINE および WILKINS のデー

タから求めた値と一致しないという結果³⁾が得られており、不均一媒質中の吸収線量分布を求めるには実測することが必要と思われる。そこでかまぼこのパッケージ照射実用化に関する知見を得るため、実際にダンボール箱にかまぼこを詰めて照射した場合のパッケージ中の吸収線量分布の測定及び検討を行なった。

実験方法

1. 供試試料および照射条件

試料として 5.3 (巾) $\times 18$ (長) $\times 2.3$ (厚) cm, 板厚 0.7 cm の市販の板付かまぼこを用い、照射用のパッケージとしてはこの大きさの試料の市場流通に用いられている $14 \times 27 \times 38$ cm のダンボール箱を用いた。線源は原研高崎研の長さ 104 cm, 高さ 30 cm の ^{60}Co 板状線源 (60 kCi) を用いた。かまぼこの包装紙と板を取り除いた状態 (平均密度 0.8 g/cm³) および包装紙と板を付けたままの状態 (平均密度 0.6 g/cm³) でパッケージに詰めて照射した場合のパッケージ中の吸収線量分布を鉄線量計を用いて測定した。

2. 鉄線量計による吸収線量測定

* 日本原子力研究所高崎研究所 (群馬県高崎市綿貫町 1233)

Japan Atomic Energy Research Institute, Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment, Takasaki-shi, Gunma-ken.

3 回精製水を用いて調製した硫酸第 1 鉄溶液（鉄濃度 $1 \times 10^{-8} M$ ，食塩濃度 $1 \times 10^{-8} M$ の $0.8 N$ 硫酸酸性水溶液）を酸素飽和し，これを内径 13 mm，長さ 130 mm，肉厚 1 mm の共栓付バイレックス試験管に入れて線量計とした。照射後 304 nm における吸光度し，既報⁹⁾ に示した式を用いて吸収線量変化を測定を求めた。

実験結果

1. かまぼこ中における線量の減衰

照射室内の照射台上高さ 15 cm の位置における空間線量率分布（ここでは空気中で鉄線量計を照射して得られた吸収線量を空間線量と呼ぶこととする）を測定した結果を Fig. 1 に示した。この結果から求められた 2×10^5 ， 5×10^4 ， 1×10^4 rad/hr の各線量率を用いて，パッケージ中心奥行方向の吸収線量分布を測定した。この場合，包装紙および板を取り除いたかまぼこをパッケージに詰め，各線量率位置にパッケージの前面をあわせてそれぞれ 4 分，15 分，1.5 時間照射した。各照射時間は精度よく線量を測定するため最高線量が約 15 krad になるようにそれぞれ調整した。このときのパッ

Fig. 1. Distribution of dose rate in irradiation field
Position of package: (1) 2×10^5 , (2) 5×10^4 ,
(3) 1×10^4 rad/hr

Fig. 2. Position of radiation source and packages
Dose rate: (1) 2×10^5 , (2) 5×10^4 , (3) 1×10^4 rad/hr

Fig. 3. Dose distribution in package of Kamaboko
Dose rate: (1) 2×10^5 , (2) 5×10^4 , (3) 1×10^4 rad/hr
—●— Dose in irradiation field,
—○— Absorbed dose in Kamaboko

ッケージは Fig. 2 に示したような配置になっており，特に高線量率位置では線源に近くまた照射時間も短かいため，線源の上昇・下降時におけるパッケージ下面からの照射の影響を無視できないと考えられる。そこでこの影響を除くためパッケージの下に厚さ 5 cm の鉛ブロックを敷いて照射したときの結果を Fig. 3 に示した。各線量率位置におけるパッケージ中心奥行方向の吸収線量分布および空間線量分布を，表面線量を 1.0 とした相対線量として示してある。次に，この結果からかまぼこ中の線量減衰率，すなわち空間線量 (D_F) に対するかまぼこ中の吸収線量 (D_K) の比をパッケージ中心奥行方向の各点について求め，Fig. 4 に示した。この結果，各線量率位置ではほぼ一致した線量減衰率曲線が得られた。

Fig. 4. D_K/D_F at various depth in package of Kamaboko

D_K : absorbed dose in Kamaboko, D_F : dose in irradiation field, Dose rate: ● 2×10^5 , △ 5×10^4 , ○ 1×10^4 rad/hr

2. 包装された板付かまぼこ中の吸収線量分布

かまぼこを実際に照射する場合には、包装されしかも板を付けた状態で照射することになる。かまぼこ板では比重が異なるため板の有無によってパッケージ内の吸収線量分布に相異が生じることが予想される。Fig. 5 に示したように x 方向から照射する場合には y 線透過方向に板があり、 y および z 方向からでは板がない。そこで Fig. 5 に示したように包装された板付かまぼこをパッケージに詰めて、 x 方向からの照射を行なった。線量率 3×10^5 rad/hr の位置で照射したときのパッケージ中心奥行方向の吸収線量分布を測定した結果を Fig. 6 に示した。また包装紙ならびに板を取り除いた状態で照射したときの吸収線量分布も同時に示した。この結果より、反転して両面照射した場合のパッケージ中心奥行方向の線量均一度（最大・最小吸収線量の比）を求めると、包装

Fig. 5. Scheme of irradiation package of Kamaboko
Arrows show irradiation directions

Fig. 6. Dose distribution in package of Kamaboko
with and without wrapping film and
wooden plate

Dose rate: 3×10^5 rad/hr,
—●— with wrapping film and wooden plate ($\rho: 0.6 \text{ g/cm}^3$),
—○— without wrapping film and wooden plate
($\rho: 0.8 \text{ g/cm}^3$)

紙ならびに板を除いた場合 1.16 であるのに対し、包装されしかも板付の状態の場合 1.12 であった。Fig. 5 の x 方向における板の厚さの合計は 2.8 cm あり、板の比重はかまぼこの比重より小さいため、 y 線透過方向の充填密度が小さくなっている。このため、包装されしかも板付の状態でも照射した場合の線量均一度がよくなったものと考えられる。

3. パッケージ全体における線量均一度

パッケージ全体の線量均一度は奥行方向の線量均一度と空間の高さ方向の線量均一度の積として近似的に求められる⁴⁾。そこで種々の線量率位置における高さ方向の空間線量分布の測定を行ない、結果を Fig. 7 に示した。 3×10^5 rad/hr の位置における照射台上 30 cm までの高さ方向の線量均一度は 1.11 であった。また、Fig. 6 の結果から求めた奥行方向の線量均一度は 1.16 である。したがって、線量率 3×10^5 rad/hr の位置で厚さ 14 cm、高さ 30 cm のパッケージに包装紙ならびに板を除いたかまぼこを詰めて反転照射したときの線量均一度は、 $1.16 \times 1.11 = 1.29$ と求められ、 $\pm 15\%$ 程度の線量のバラッキで照射することが可能であることが認められた。

次に、安全性試験用試料として調製された $4.7(\text{巾}) \times 12.5(\text{長}) \times 2.6(\text{高}) \text{ cm}$ 、板厚 1 cm のかまぼこについて、Fig. 4 の D_K/D_F 曲線を用いて線量均一度を求め実測値と比較検討した。照射は 100 kCi の ^{60}Co 板状線源を用い、奥行 14、長さ 51、高さ 25.5 cm のダンボール箱に試料を 60 本入れて照射した。線量率 3×10^5 rad/hr の位置にパッケージの中心をあわせて、30 分で反転して 1 時間照射したときのパッケージ内の吸収線量は $2.21 \sim 2.60 \times 10^5$ rad であり、線量均一度は 1.18 であ

Fig. 7. Dose distribution of vertical direction
in irradiation field

Table 1. Calculated dose uniformity ratio in package of Kamaboko

Dose rate (rad/hr)	Thickness of package (cm)	Dose uniformity ratio		
		depth	vertical	overall
3×10^5	10	1.06	1.11	1.18
	15	1.13	1.11	1.25
	20	1.24	1.11	1.38
	25	1.40	1.11	1.55
	30	1.59	1.11	1.76
1×10^5	10	1.04	1.05	1.09
	15	1.09	1.05	1.14
	20	1.17	1.05	1.23
	25	1.27	1.05	1.33
	30	1.40	1.05	1.47

Source: 100 kCi, Package height: 30 cm

った。 D_K/D_F 曲線と空間線量分布から求めた奥行方向の線量均一度の計算値は 1.11 であり、全体の線量均一度は高さ方向の線量均一度 1.08 との積として 1.20 と求められた。実測値は包装されしかも板を付けた状態で照射して得られた値であることを考慮すれば、両者の値はよく一致しており、 D_K/D_F 曲線は照射条件を検討する際の線量分布計算に十分適用できると考えられる。

100 kCi の線源を用いて種々の条件下で照射した場合の線量均一度を D_K/D_F 曲線を用いて求め、照射条件の検討を行なった。Table 1 は高さ 30 cm のパッケージを用いて線量率 3×10^5 および 1×10^5 rad/hr の位置で、パッケージの厚さを 10 cm から 30 cm までかえた場合の線量均一度を D_K/D_F 曲線より計算したものである。この結果から、線量均一度 1.30 以内で照射可能なパッケージの厚さは線量率 3×10^5 rad/hr では 15 cm, 1×10^5 rad/hr では 20 cm 程度であることがわかった。

考 察

線源からの距離が離れるにしたがって照射線量率は低くなるので、照射野にパッケージを置いた場合にパッケージ前面と後面では照射線量に差異が生じる。また、被照射物の種類や詰め方によって線量減衰率が異なる。したがって、パッケージ中のかまぼこの吸収線量を求める場合、線源のキュリー数、配列、線量率が異なるとその都度線量測定を行なわなければならない。しかし、かまぼこの吸収による線量減衰率を求めておけば、吸収線量や線量均一度は空間線量分布から計算で求めることが可能となる。点線源と測定点 P の間に厚さ x cm の吸収物質がある場合の P 点における吸収線量 D は次の式⁶⁾で求

められる。

$$D = D_0 \cdot B(x) e^{-\mu x}$$

D_0 : P 点における空間線量

$B(x)$: 線量ビルドアップ係数

μ : 吸収物質の ^{60}Co γ 線に対する線吸収係数

点線源から平行ビームが照射されたとみなせる場合には、吸収物質（試料）の種類、詰め方を同一にすれば $B(x)$, μ は一定の値となり、 D/D_0 は試料による線量減衰率を示すことになる。板状線源を用いた本実験では、 1×10^4 rad/hr の位置は線源から 249 cm 離れており平行ビームとみなすことができると考えられる。 2×10^5 , 5×10^4 rad/hr の位置は線源に近いが、鉛ブロックを下に敷いて線源の上昇、下降時の照射の影響を除いた場合の D_K/D_F は 1×10^4 rad/hr の結果とほぼ一致した。したがって、この場合にもほぼ平行ビームが照射されているとみなすことができ、Fig. 4 に示した D_K/D_F 曲線のかまぼこによる線量減衰率を示していると考えられた。

形や詰め方の異なる安全性試験用のかまぼこについて、異なるキュリー数の線源を用いて照射したときの線量均一度を D_K/D_F 曲線を用いて求め、実測値と比較したところほぼ一致した結果が得られた。したがって、 D_K/D_F 曲線を用いてかまぼこ中の吸収線量を計算で求めることが可能であり、かまぼこのパッケージ照射実用化に際しての照射条件決定のために本実験結果を利用できると考えられる。また本実験は線源中心線上での固定照射について行なった結果であり、線源中心線から離れた位置での照射やコンベアを用いた実用照射時には線源と平行方向の線量分布も考慮に加える必要があると考えられる。

要 約

かまぼこのパッケージ照射実用化のための照射条件を明らかにするため、パッケージ内かまぼこ中の吸収線量分布と線量均一度について検討した。

(1) かまぼこによる吸収線量減衰率は 2×10^6 , 5×10^4 , 1×10^4 rad/hr の各線量率でほぼ一致した。

(2) 奥行 14 cm のパッケージを用いて線量率 3×10^6 rad/hr で照射したときのパッケージ内奥行方向の線量均一度は、包装された板付のかまぼこを用いた場合 1.12, 包装紙ならびに板を除いた場合には 1.16 であった。

(3) 線量率 3×10^6 rad/hr における高さ方向 30 cm までの線量均一度は 1.11 であり、奥行 14 cm, 高さ 30 のパッケージを用いて反転照射したときの線量均一度は 1.29 と求められた。

(4) 安全性試験用のかまぼこを用いて、かまぼこによる吸収線量減衰率から求めた線量均一度の計算値は実測値とよく一致した。

終りに本報告をまとめるにあたり有益な御助言をいただいた当研究所の田中隆一氏に感謝致します。

文 献

- 1) 篠山茂行：食品照射，7，64 (1972)。
- 2) 日本アイソトープ協会編：食品照射における照射効果に関する試験研究 昭和 48 年度成果報告書 (1975)。
- 3) 久米民和・橘 宏行・青木章平・佐藤友太郎：食品工誌，20，492 (1973)。
- 4) 久米民和・青木章平・伊藤 均・渡辺 宏・佐藤友太郎：食品工誌，22，577 (1975)。
- 5) 日本放射性同位元素協会編：新版アイソトープ便覧，(丸善)，p. 538 (1970)。

(昭和 51 年 6 月 18 日受理)