

ソフトエレクトロンによる殺菌技術

はじめに

食品の持つ機能成分の効用が次々と明らかにされ、現代人は、食品の摂取により、健康を維持することに、かつてない関心を払っている。多くの食品メーカーが、機能性を付与した新製品の開発に力を注いでいるが、最終的に製品化を成功させるためには、流通期間における衛生上の品質を保証する必要がある、そのためには、原料となる食品が本来持っている機能性成分の特性や風味を損なわない、新しい殺菌法の開発も重要なポイントとなる。

加熱殺菌は、多くの食品加工で利用されているように、非常に有効な方法である。ただし、耐熱性の芽胞菌を殺滅するためには、食品本来の品質を損なう様な過酷な条件を必要とする場合があり、特に熱伝導の悪い穀類、豆類などの乾燥食品を加熱により完全に殺菌することは極めて困難である。これらの食品原材料を汚染する芽胞は、そのままの状態では増殖しないが、加工の過程で、適度な水分や栄養分を得ることで増殖し、最終製品のシェルフライフに影響するため、有効な非加熱殺菌法の開発が望まれている。

加速器を用いて発生する電子ビームは、ガンマ線と同様、芽胞菌に対して、強い殺菌能力を持っている。透過力が 50 ~ 150 μm の低エネルギー電子ビームは、紫外線とは異なり、複雑な形状をした食品の表層に入り込み、そこに生育する微生物に効果的に作用する。我々は、この透過力の小さいエネルギーが 300keV 以下の電子ビームを“ソフトエレクトロン”と呼ぶことにした。そして、このソフトエレクトロンを穀物、豆、香辛料、茶葉、種子などの食品の表層に効率良く照射する装置を開発し、各食品に適した処理条件を検討し、穀類のテクスチャー、香辛料や茶葉のフレーバー、種子の発芽力などを保持したまま殺菌を可能にする新しいシステムを確立した。また、本研究の成果をもとに、食品産業で利用できる実用装置の開発も行われた。これらの研究成果は、食中毒や薬剤使用の不安など、食品の安全に対する社会的ニーズが高まる中、それに対応する新技術を提供できるものと期待される。本稿では、殺菌を中心に、ソフトエレクトロン（低エネルギー電子ビーム）を用いた食品の処理技術についての我々の研究成果を紹介する。

1. 電子のエネルギーと透過力、殺菌効果

放射線のエネルギーを利用して、殺菌や殺虫を行う食品照射の分野では、従来、食品を包装したまま処理できるというメリットが重視され、透過力の大きいガンマ線やエネルギーの大きい電子線の利用が、香辛料の殺菌を中心に進められてきた。ただし、これらの透過力の大きい放射線は、デンプンなどを多く含む穀物において

は、テクスチャーなどの品質を低下させるため、殺菌には利用できないとされてきた。

ところで、穀物、豆などの乾燥食品原材料を汚染する微生物、特に多くの場合に問題とされる耐熱性芽胞菌は、穀物表層部分に多く分布しており、内部の可食部分にはほとんど存在しない。ただし、陰になる部分にも微生物は生育しているので透過力のない紫外線では十分な殺菌効果が得られない。それならば、殺菌に必要な最小限の透過力を有し、内部には到達せず品質劣化（変化）を起こさないような透過力の小さい電子ビームを、加速電圧の調整によって発生させて利用すれば、問題は解決するのではないか。このような発想に基づき、従来、食品には不向きとされてきた 300keV 以下のエネルギーの小さい電子ビームに着目し、このエネルギー域の電子をソフトエレクトロンと定義した。ソフトエレクトロンの食品への透過力と微生物への作用を、従来の電子線やガンマ線、紫外線と比較して表現したイラストを図 1 に示した。

ソフトエレクトロンの実際の透過力を図 2 に示す。この図は、電子のエネルギーを吸収した量に応じて、着色変化するプラスチックフィルム（ラジオクロミック線量計）数枚を積層し、エネルギー（電圧）の異なるソフトエレクトロンをあて、そ

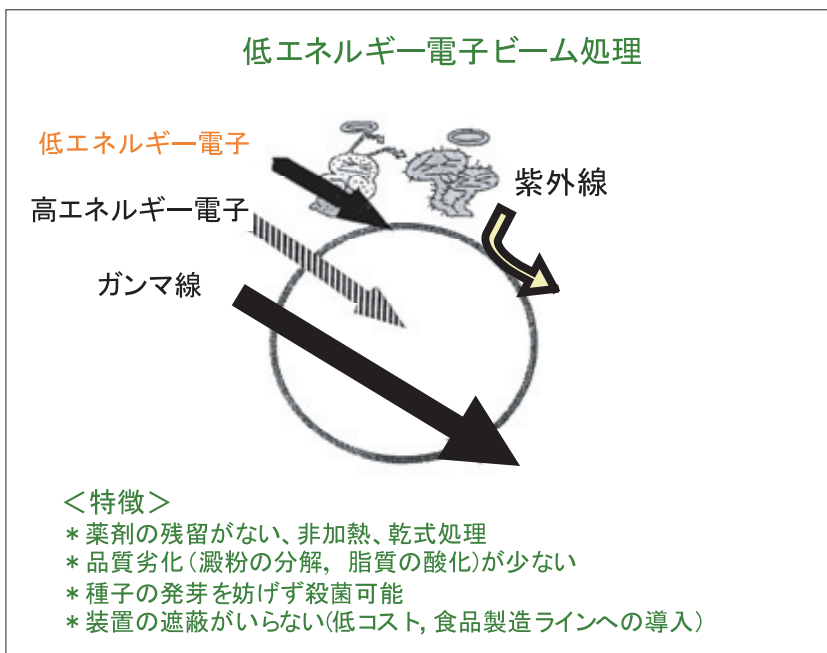


図 1 ソフトエレクトロンの透過力のイメージ

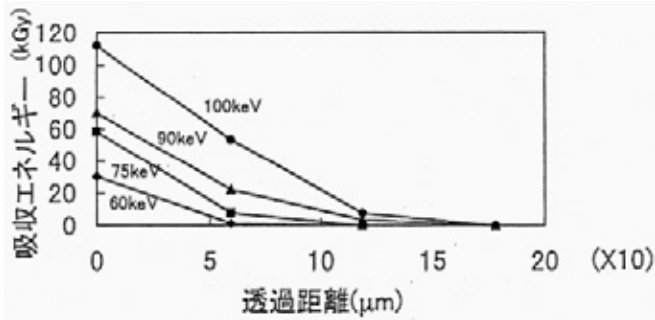


図2 ソフトエレクトロンの透過力

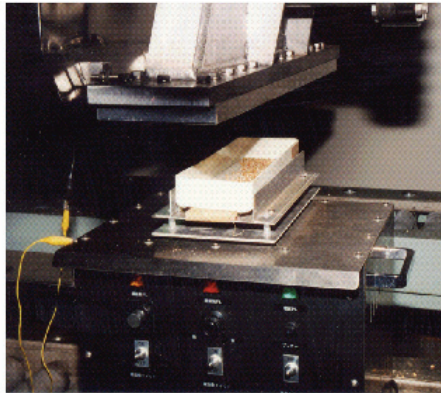
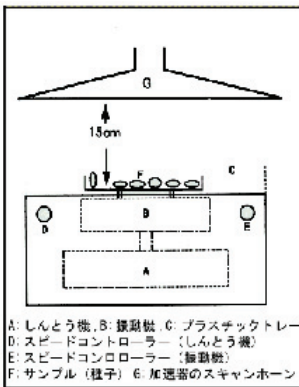


図3 バッチ式穀物回転装置

の1枚ごとに吸収されたエネルギー（吸収線量 = 単位は Gy）をプロットしたものである。このグラフから、例えば、60keV のソフトエレクトロンは、フィルムの1枚目にエネルギーをほとんど吸収され、二枚目まで通り抜けることはできないため、このフィルムの厚さ（50 ミクロン）と比重から、密度が $1\text{g}/\text{cm}^3$ の物質に対する透過力は、60 ミクロン程度であると読みとれる。

2. 実験室規模の殺菌装置開発と穀類の品質^{1)~3)}

透過力の小さい電子を穀物などの粒状の食品の表面にまんべんなく当てるため、ソフトエレクトロンの照射ウインドウの下で穀物粒を回転させる方法をとった。米、麦など単純に転がらない形状のものを裏返すためには横振動と縦振動を同時に与える必要があり、写真のような試料回転装置を試作した（図3）。

この装置を用いて、籾、玄米、そば、豆などの表面をエネルギーと処理時間を変えてソフトエレクトロンで処理し、殺菌に必要な電子の最小エネルギーを検討した。結果を表 1 に示す。殺菌に必要な電子のエネルギーは玄米：75keV、籾：130keV、小麦：75keV、殻付ソバ：130keV であった。なお、この表中に示される処理時間は、数十分単位で非常に長くなっている。これは、実験に用いた電子加速装置では、その特性上、低エネルギー領域での電流値が μA オーダーで非常に小さく、殺菌に必要な電子をあてるには長時間を要するため、低エネルギー領域に特化した電子加速器を導入すれば、mA オーダーの電流が取り出せるため、極短時間の処理が可能となり実際の効率は問題にならない。殺菌可能な条件で処理した穀物を粉末化し、アルカリ溶液中で加熱、糊化してその溶液の粘度を測定した結果を表 2 に示す。殺菌可能なソフトエレクトロンで穀物を処理しても、粘度はほとんど変化しなかった。一方、ガンマ線で殺菌すると粘度は非常に低下する。これは、穀物中のデンプンが分解して、低分子化したことによる。これらの結果から、殺菌可能な条件のソフトエレクトロンで穀物を処理しても、デンプンはほとんど分解していない。

表 1 ソフトエレクトロン処理した穀物の一般細菌数 (個/g)

	玄米	籾	小麦	殻付ソバ
Control ^{a)}	$4.1 \times 10^6 \pm 4.6 \times 10^5$	$4.7 \times 10^7 \pm 1.5 \times 10^7$	$2.7 \times 10^4 \pm 1.2 \times 10^4$	$1.4 \times 10^6 \pm 6.8 \times 10^5$
75 keV, 8 μA , 10 min	$5.1 \times 10^2 \pm 2.1 \times 10^2$	-----	$1.2 \times 10^3 \pm 8.3 \times 10^2$	-----
75 keV, 8 μA , 40 min	< 10	-----	< 10	-----
100 keV, 14 μA , 5 min	$1.2 \times 10^3 \pm 5.6 \times 10^2$	$5.8 \times 10^5 \pm 7.0 \times 10^4$	$3.1 \times 10^2 \pm 2.1 \times 10^2$	$1.4 \times 10^3 \pm 9.2 \times 10^2$
100 keV, 14 μA , 20 min	< 10	$6.3 \times 10^3 \pm 1.3 \times 10^3$	< 10	$3.3 \times 10^2 \pm 3.6 \times 10^2$
130 keV, 22 μA , 1 min	$2.5 \times 10^3 \pm 1.6 \times 10^3$	$1.6 \times 10^5 \pm 3.8 \times 10^4$	$2.9 \times 10^3 \pm 1.8 \times 10^3$	$1.8 \times 10^3 \pm 9.0 \times 10^2$
130 keV, 22 μA , 6 min	< 10	< 100	< 10	< 10
160 keV, 40 μA , 0.5 min	$7.4 \times 10^2 \pm 1.8 \times 10^2$	$1.3 \times 10^5 \pm 4.5 \times 10^4$	$2.0 \times 10^3 \pm 8.9 \times 10^2$	$9.7 \times 10^2 \pm 8.0 \times 10^2$
160 keV, 40 μA , 3 min	< 10	< 10	< 10	< 10
210 keV, 40 μA , 0.5 min	$1.4 \times 10^3 \pm 7.1 \times 10^2$	$1.3 \times 10^5 \pm 3.5 \times 10^4$	$1.7 \times 10^3 \pm 1.3 \times 10^2$	$6.7 \times 10^2 \pm 2.6 \times 10^2$
210 keV, 40 μA , 2 min	< 10	< 10	< 10	< 10
ガンマ線, 2.5 kGy	$2.2 \times 10^4 \pm 3.6 \times 10^3$	$3.2 \times 10^5 \pm 4.2 \times 10^4$	$2.5 \times 10^4 \pm 4.7 \times 10^3$	$2.0 \times 10^3 \pm 2.1 \times 10^3$
ガンマ線, 5.0 kGy	$3.3 \times 10^3 \pm 1.6 \times 10^3$	$8.4 \times 10^4 \pm 3.8 \times 10^4$	$4.6 \times 10^3 \pm 1.4 \times 10^3$	< 100
ガンマ線, 7.5 kGy	$5.8 \times 10^2 \pm 1.9 \times 10^2$	$7.4 \times 10^3 \pm 3.2 \times 10^3$	$7.5 \times 10^2 \pm 6.3 \times 10^1$	< 10
ガンマ線, 10.0 kGy	< 10	$6.3 \times 10^2 \pm 3.2 \times 10^2$	< 10	< 10
ガンマ線, 12.5 kGy	< 10	< 100	< 10	< 10

< 10: 検出限界以下

表 2 ソフトエレクトロン処理した穀物の粘度 (mPa.s)

	玄米	粳	小麦	穀付ソバ
無処理	211.1 ± 12.5	149.5 ± 7.7	287.4 ± 18.2	211.3 ± 21.6
75 keV, 8μA, 40 min	206.0 ± 3.5	-----	293.6 ± 12.5	-----
100 keV, 14μA, 20 min	185.9 ± 8.6	147.3 ± 8.9	246.6 ± 10.8	199.9 ± 25.4
130 keV, 22μA, 6 min	146.7 ± 11.9	137.3 ± 7.3	206.4 ± 3.5	192.5 ± 6.4
160 keV, 40μA, 3 min	136.2 ± 4.6	133.4 ± 4.8	192.8 ± 8.0	165.6 ± 7.5
210 keV, 40μA, 3 min	88.5 ± 3.0	105.5 ± 6.8	133.6 ± 3.6	108.7 ± 10.9
ガンマ線, 0.1 kGy	198.4 ± 4.1	138.3 ± 5.6	246.5 ± 3.4	189.6 ± 12.2
ガンマ線, 0.5 kGy	160.8 ± 8.3	117.9 ± 5.5	211.3 ± 4.7	143.2 ± 8.3
ガンマ線, 10.0 kGy	21.1 ± 1.0	31.9 ± 4.9	34.6 ± 1.7	26.8 ± 4.6

表 3 ソフトエレクトロン処理した米の微生物数 (個 / g)

処理の方法	コシヒカリ	日本晴れ
無処理	2.8x10 ⁵	1.8x10 ⁶
60keV, 4μA, 45min	< 10	< 10
75keV, 8μA, 30min	< 10	< 10
90keV, 10μA, 25min	< 10	< 10
100keV, 14μA, 15min	< 10	< 10
ガンマ線 7.5kGy	< 10	< 10

が、穀物全体を透過するガンマ線では、穀物粒全体に作用するため、デンプンの分解が起こってしまうことがわかる。

また、60keV のソフトエレクトロンで「こしひかり」「日本晴れ」いずれの品種の玄米もほぼ無菌にできる(表 3)。処理した玄米では油の酸化が起こるが、精米して白米にすると酸化された油(糠の部分)が除去されると予想される。このことを確かめるため、次のような実験を行った。玄米を殺菌可能な条件でソフトエレクトロン処理した後、歩留まりを変えて精米した。その後、過酸化脂質の生成指標である TBA 値(チオパルピツール酸値)を測定し、精米部分の脂質酸化について検討した。その結果、60keV のソフトエレクトロンで処理した玄米を 90%あるいは 88%の歩留まりで精米して得られた白米では、TBA 値が無処理のものと同程度を示すことが明らかになった。一方、ガンマ線処理した米の場合、粒の中まで酸化されているので、精米後も TBA 値はほとんど低下しなかった(表 4)。さら

表 4 ソフト電子線処理した玄米の歩留まりを変えて精米した白米の TBA 値
(nmol/g of rice)

	精米度 (%)			
	100% a)	92% a)	90% a)	88% a)
無処理	17.69	4.95	4.75	4.23
60keV, 4 μ A, 45min	29.68 b)	7.98 b)	5.18	4.75
75keV, 8 μ A, 30min	34.21 b)	9.05 b)	8.37 b)	5.43
90keV, 10 μ A, 25min	41.45 b)	15.55 b)	9.47 b)	9.43 b)
100keV, 14 μ A, 15min	57.66 b)	19.74 b)	14.33 b)	13.70 b)
ガンマ線 7.5kGy	60.59 b)	46.59 b)	43.8 b)	43.23 b)

a) 精米度 (歩留まり),

b) 無処理に比べて有意差あり ($p < 0.05$)

表 5 ソフト電子線処理した玄米の炊飯後の物理特性

	低圧縮試験		高圧縮試験	
	硬さ	粘り	硬さ	粘り
	(10^4 dyne)	(10^4 dyne)	(10^6 dyne)	(10^5 dyne)
無処理	7.02	2.13	2.03	4.88
60keV, 4 μ A, 45 min	6.94	1.94	1.99	5.03
75keV, 8 μ A, 30 min	7.08	2.09	1.99	4.83
90keV, 10 μ A, 25 min	6.74	1.64 a)	1.71	4.76
100keV, 14 μ A, 15 min	6.571	1.59 a)	1.52 a)	4.81
ガンマ線, 7.5 kGy	4.89 a)	0.77 a)	1.06 a)	4.46

a) 無処理に比べて有意差あり ($p < 0.05$)

に、ソフト電子線で処理した玄米を、通常の米飯の歩留まりである 90% まで精米し、この白米を炊飯して、テンスプレッサーを使ってテクスチャーを検討した (表 5)。殺菌可能な 60keV のソフト電子線で処理した玄米を原料とした米飯と無処理の米飯を比較しても、この処理が炊飯後のテクスチャーにも影響を及ぼさないことがわかる。

このように、玄米、粳、穀付ソバなどをソフト電子線処理した場合には、脱穀やとう精に伴って電子が当たった部分が除去されるので、白米やソバは無処理のものと同じ特性をもつことが示された。

3. 大豆，茶葉の殺菌^{4)～6)}

大豆は、味噌や豆腐などの伝統的な食品の原料として、日本人にとって重要な食品である。最近では、大豆に含まれるイソフラボンなどの機能性成分も注目されており、豆乳などの食品も人気が高い。我々は、ソフトエレクトロンを用いて、加工原料としての大豆の微生物数を低減することを試みた。大豆の一般生菌数は、その起源によっても異なるが、我々が、実験で用いたものでは、1g あたり 10^3 個程度の汚染が見られた。この大豆を 60keV のソフトエレクトロンで検出限界以下に低減することが可能であった。なお、同等の殺菌効果を得るために必要なガンマ線の線量は 20kGy であった。殺菌効果と同時に、大豆の色素成分として抗酸化機能を有するルテイン（カロテノイドの一種）の含量や、DPPH ラジカル消去活性、発芽能力などを検討した。その結果、ソフトエレクトロン処理した大豆では、発芽能力や機能成分に影響なく殺菌を行えることが確認できた（表 6）。豆乳は健康飲料として、最近注目を集めている。豆乳調整時には加熱の工程があるが、この原料大豆を利用すると、加熱条件を緩和して、その温度を下げてもしェルフライフの長い豆乳が製造できる（表 7）。さらにこの豆乳から豆腐を製造した際には、高温で加熱した豆乳に比べて、豆腐ゲルの特性が改善される（表 8）。

表 6 ソフトエレクトロンおよびガンマ線処理によるダイズの殺菌効果と品質変化

処理	一般生菌数 CFU/g	発芽率 (%)	TBA 値 nmole/g	DPPH ラジカル 消去能 (%)	ルテイン含量 (mg/g)
無処理	4.6×10^3	$97.5 \pm 5.0a$	$103.65 \pm 7.65a$	$45.13 \pm 0.46a$	$6.87 \pm 0.25a$
ガンマ線, 20kGy	< 10	0	$144.00 \pm 1.23b$	$42.80 \pm 0.50b$	$2.99 \pm 0.03b$
ソフトエレクトロン 60 keV, 26 kGy *	< 10	$97.5 \pm 5.0a$	$113.51 \pm 1.99a$	$44.71 \pm 0.33a$	$7.09 \pm 0.15a$

* 表層部分（深さ 60 ミクロン）における見かけの線量。

表 7 ソフトエレクトロン処理した大豆からできた豆乳の全菌数

原料処理	豆乳調精時の加熱 温度 (°C)	全菌数 (0 日後) (CFU/g)	全菌数 (35°C 5 日) (CFU/g)
無処理	92	11	1.3×10^8
60keV 7.5kGy	92	< 10	< 10
無処理	120	< 10	< 10

表 8 ソフトエレクトロン処理した大豆からできた豆乳のゲル化特性

原料処理	豆乳調製時の加熱温度 (°C)	ゲル化指標 (注)
無処理	92	5.24
60keV 7.5kGy	92	5.24
無処理	120	3.52

(注) 5.5 : 最高品質, 4.5 I < 5.5 : 高品質, 3.0 I < 4.5 : 良品質, 3.0 < : 低品質

表 9 ソフトエレクトロン処理したマンゴピーンの生菌数及び発芽後芽の総体積

	生菌数 (CFU/g)	発芽率 (%)			芽の体積 (ml) *	
		1 日	2 日	3 日	3 日	4 日
control	5.4×10^3	98.3	99.5	99.8	49.8	74.0
60 keV	1.9×10^2	98.3	99.5	100.0	50.6	73.6
75 keV	<10	99.8	100.0	100.0	50.6	73.6
90 keV	<10	99.5	100.0	100.0	49.8	72.6
100 keV	<10	99.0	99.8	100.0	49.8	65.0

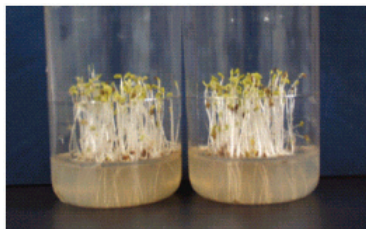
* 図 5 参照

また, 200keV のソフトエレクトロンで茶葉の殺菌が可能であることも確認された。同等の殺菌効果を加熱によって達成するためには, 色調やフレーバーに影響がみられた。

このように, ソフトエレクトロンによる殺菌工程を導入することで, 従来行っていた加熱殺菌の工程を省略または, 条件を緩和 (温度の低下や時間の短縮) し, 加工食品の色調やフレーバー, 加工適正を向上させることも期待できる。

4. 種子の殺菌^{7),8)}

モヤシやカイワレ大根の種子は, 土壌由来の微生物等で汚染されており, 種子を消毒しないと栽培中に微生物が増殖し, 生食する場合には食中毒の原因となる例が報告されている。ソフトエレクトロンのエネルギーを適切に設定することで, 種子の胚には影響が無く, 複雑な形状の種皮の表層に存在する微生物を殺滅することができる。我々の実験では, カイワレダイコン種子は 60 ~ 75keV, アルファルファ種子は 60 ~ 90keV (図 4), もやしの原料であるブラックマッペやマンゴピーンの種子は, 80 ~ 90keV のソフトエレクトロンで発芽力や成長力に影響を与えることなく殺菌できた。(表 9)(図 5)



種子中の生菌数

無処理: 4.8×10^8 CFU/g

処理 : <10 CFU/g

無処理 ソフトエレクトロン処理 (90keV)

図4 ソフトエレクトロン処理したアルファルファ種子の生育 (播種4日後)



Control 75keV 90keV 100keV

図5 ソフトエレクトロン処理した緑豆種子の生育

5. その他の応用 - 穀物の殺虫⁹⁾

穀物輸入の際害虫が混入していると、殺虫処理が施されている。現在日本で利用されている臭化メチルはオゾン層破壊物質であるとして、2005年までに全廃することが決定されており代替法の開発が急がれている。

ノシメダラメイガやコクヌストモドキなどの害虫は、穀物を外側から加害するが、これらの虫に対して60keVのソフトエレクトロンは殺虫効果を持つ。この場合に必要な電流量は殺菌に比べて小さいことから、実用規模の穀物の殺虫処理装置へのスケールアップも充分可能と考えられる。

6. 今後の展望¹⁰⁾

ソフトエレクトロンを食品の殺菌などに使う第一のメリットは、無処理のものと同じ特性を持った無菌の食品原材料（穀物、豆、香辛料）や種子を得ることができる点である。ソフトエレクトロンのコンセプトは単にエネルギーの小さい電子線による殺菌ではなく、できるだけ可食部に透過させず品質変化を抑えるという発想である。そのためには、対象となる食品の搬送装置が技術開発の鍵となる。我々はそのための連続処理装置として、傾斜をつけたトレイを振動しながら、原料が滑り落ちる装置設計を提案した。

この発想を実現し、振動コンベアを用いた実用規模の穀物殺菌装置の開発も行われている。例えば、日新ハイボルテージ社が開発した装置は、加速機部分と搬送部分の両方を、幅・高さ・奥行き各 2m 程度の大きさの遮蔽の中に組み込んだもので、一時間あたり 0.5 ~ 1.0 トンの処理能力を持っている。

電子顕微鏡程度の小さな透過力のソフトエレクトロンは、遮蔽が少なくてもよいために、装置もコンパクトにでき、食品の製造工程に殺菌装置を組み込むことが期待できる。また、装置も低価格であり処理コストが低いといったメリットもある。

今後さらに、食品メーカーや装置メーカーとの協力によって、実際の食品産業で利用できる装置開発が進み、この技術が普及することを願ってやまない。

（食品総合研究所 食品工学部電磁波情報工学研究室 等々力 節子）

参考文献

- 1) Hayashi, T., Okadome, H., Toyoshima, H., Todoriki, S. and Ohtsubo, K., Rheological Properties and Lipid Oxidation of Rice decontaminated with low energy electrons, *J. Food Protection*, **61** (1), 73-77(1998).
- 2) Hayashi, T., Takahashi, Y. and Todoriki, S., Sterilization of Foods with low energy electrons ("soft-electrons"), *Radiat. Phys. Chem.*, **52**(1-6), 73-76(1998).
- 3) Hayashi, T., Takahashi, Y., Todoriki, S., Low energy electron effects on the sterility and Viscosity of Grains, *J. Food Sci.*, **62** (4), 858-860(1997).
- 4) Todoriki, S., Kikuchi, O.K., Nakaoka, M., Miike, M., Hayashi, T., Soft electron (low energy electron) processing of foods for microbial control, *Radiat. Phys. Chem.* **63**, 349-351 (2002).
- 5) Kikuchi, O.K., Todoriki, S., Saito, M., Hayashi, T., Efficacy of soft-electrons (low-energy electron beam) for soybean decontamination in comparison with gamma-rays, *J. Food Sci.*, **68** (2), 649-652(2003).

- 6) 林徹, 中岡素子, 鶴岡誠, 等々力節子, 三池美佳, ソフトエレクトロンの茶葉に対する殺菌効果と品質への影響, 日本食品科学工学会誌, **46(10)**, 633-637(1999).
- 7) Todoriki, S., Hayashi, T., Disinfection of seeds and sprout inhibition of potato with Low energy electrons, *Radiat. Phys. Chem.*, **57**, 253-252(2000).
- 8) 林徹, 等々力節子, カイワレダイコン及びアルファルファの種子に対するソフトエレクトロンの殺菌効果と発芽に及ぼす影響, 日本食品科学工学会誌, **46(11)**, 754-757 (1999).
- 9) Imamura, T., Todoriki, S, Sota, N., Nakakita, H., Ikenaga, H., and Hayashi, T. Effect of "soft-electron" (low-energy electron) treatment on three stored-product insect pests, *Journal of Stored Products Research*, **40(2)**, 2004, 169-177
- 10) 林徹, 等々力節子, ソフトエレクトロン殺菌に用いる連続回転装置, 日本食品科学工学会誌, **46(6)**, 422-427(1999).