

ソフトエレクトロンによる 食品原材料の表面殺菌

Low Energy Electron Beam Surface Sterilization of Food Material

| | |
|--------------|--------------|
| 林 徹* | 加藤 健治** |
| T. Hayashi | K. Kato |
| 柏木 正之*** | 谷口 周一*** |
| M. Kashiwagi | S. Taniguchi |
| 錦見 敏朗*** | 岡崎 泰三*** |
| T. Nishikimi | T. Okazaki |
| 水谷 睦*** | 金子 博実*** |
| A. Mizutani | H. Kaneko |

Synopsis

As frozen or chilled foods have become popular nowadays, it has become very important to provide raw materials with lower level microbial contamination to food processing companies. Consequently the food material sterilization is one of the major topics of food processing. Dried materials like grains, beans and spices etc., are not invaded deeply by microorganisms, which just stay on the surfaces of materials, so it is very useful to take lower energy electron beam, than 300keV, with small penetration (Soft-Electrons), as a sterilization method. This is a non-thermal method, and also a physical method, so is free from residues of chemicals in foods, or environmental pollution problem.

Recently, for commercial use of Soft-Electrons, Nissin-High Voltage Co., Ltd. (NHV) has made the Soft Electron Processor, which can process 500kg/h of grains. In this text we will show the results of sterilization by Soft Electron Processor and its availability.

1. ま え が き

最近、冷凍食品やチルド食品といった加工食品が増えてきている。これらの食品は殺菌効果が期待できるような加熱加工を施すことができないため、食品原材料の段階で微生物汚染のレベルを低く抑える必要がある。そのため、食品原材料の殺菌は食品加工において重要な課題となっている。

食品殺菌法としては加熱殺菌が主流であるが、

- (1)耐熱性微生物に対する殺菌効果が小さい。
- (2)タンパク質やデンプンの劣化、変色、香りの減少などの品質劣化を伴う。

という問題があるので、必ずしも食品原材料の殺菌に向いているわけではない。むしろ、これらの問題点を回避するために非加熱殺菌法の導入が望まれている。

食品原材料の内でも、穀物、豆、香辛料等の乾燥食品は、その表層のみ微生物に汚染されている。もし表層を限定して殺菌できれば、可食部の大部分の品質を保つことができる。これは、透過力の小さいソフトエレクトロン(300keV程度の低エネルギー電子線)を利用すること

で実現可能であり、その有用性は国際農林水産業研究センターの林らにより詳細に研究されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。表1に小麦、玄米、米粉および蕎麦の殺菌効果と粘度の変化を示す。粘度の低下はデンプンの分解度合いの良い指標であり、照射に伴う品質低下を計るのに適している。表1から、粘度の変化をさほど伴わずに高い殺菌効果が得られていることが判る。ソフトエレクトロンによる殺菌は品質の低下を招かずに大きな殺菌効果が得られることを示す好例である。

非加熱殺菌方法としては、ほかに薬剤による化学殺菌がよく用いられるが、この方法は食品への薬物残留や使用薬剤の処理による環境汚染が問題となる。ソフトエレクトロンによる殺菌は物理的殺菌方法なので、そのような問題がないという点で大きな優位性を持つ。

今回日新ハイボルテージ(株)は国際農林水産業研究センター林らの協力のもと、工業的利用に向けた殺菌装置“Soft Electron Processor”を開発した。本装置は、主に小麦を対象とし最大500kg/hの穀物を処理する能力がある。

本稿では、装置概要、ソフトエレクトロン照射に特有な現象、および殺菌実施例を紹介する。

* 独立行政法人 国際農林水産業研究センター

** 日新電機(株) 技術開発研究所

*** 日新ハイボルテージ(株)

表1 低エネルギー電子線または線による殺菌効果と粘度の変化

| 照射条件 | 玄米 | | 籾 | | 小麦 | | 蕎麦 | |
|---------------------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|
| | 微生物数 (CFU/g) | 粘度 (mPa.s) | 微生物数 (CFU/g) | 粘度 (mPa.s) | 微生物数 (CFU/g) | 粘度 (mPa.s) | 微生物数 (CFU/g) | 粘度 (mPa.s) |
| 無処理 | 4.1×10^6 | 211.1 | 4.7×10^7 | 149.5 | 2.7×10^4 | 287.4 | 1.4×10^6 | 211.3 |
| 75keV, 8 μ A, 40min | < 10 | 206.0 | | | < 10 | 293.6 | | |
| 100keV, 14 μ A, 20min | < 10 | 185.9 | 6.3×10^3 | 147.3 | < 10 | 246.6 | 3.3×10^2 | 199.9 |
| 130keV, 22 μ A, 6min | < 10 | 146.7 | < 100 | 137.3 | < 10 | 206.4 | < 10 | 192.5 |
| 線 10kGy | < 10 | 21.1 | 6.3×10^2 | 31.9 | < 10 | 34.6 | < 10 | 26.8 |

2. 装置概要

図1、図2に示すように、本装置は

- (1) 直流高圧電源部
 - (2) 電子を発生し加速する加速器部
 - (3) 照射物を照射領域に運び、回収する搬送部
- で構成されている。



図1 “Soft Electron Processor”の外観

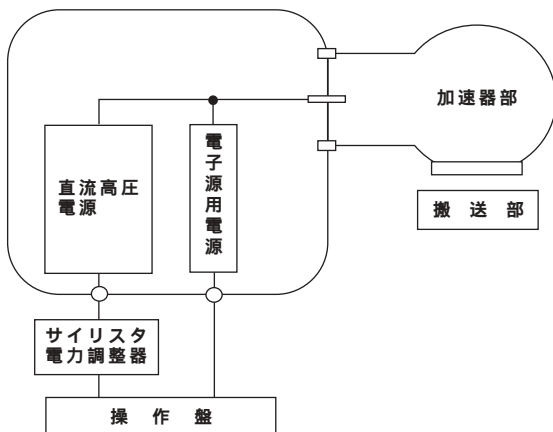


図2 “Soft Electron Processor”の構成

2・1 直流高圧電源部

本装置が採用した直流高圧電源は、鉄心接地型の倍電圧整流回路である。基本回路を図3に示す。この方式は

一次、二次コイル間の結合が良いため電流量が容易に引き出せるほか、コストが他方式に比べて比較的安価、といったメリットがある。ただし、鉄心、一次、二次コイル間の絶縁技術が要求されるため、実用としては1MV以下の電圧に限られる。

2・2 加速器部

加速器部の構成は図4に示すように電子源、照射窓および真空排気装置を備えた加速チャンバからなり、極めて簡単な構造をしている。この様な形式の加速器はエリア型と呼ばれる。電子源部は照射幅に見合った長さのフィラメント部を持ち、カーテン状に電子流を発生する。電子源から引き出された電子流は、電子源部と照射窓との間に印加された直流高電圧で加速され、照射窓を通過して対象物に到達する。本装置は加速電圧が最大150kVと低く、加速された電子のエネルギー損失を極力少なくして照射部へ取り出す必要があるため、照射窓箔にはできるだけ電子の透過性が良く、かつ耐熱性の高い極薄のチタン箔が使用されている。

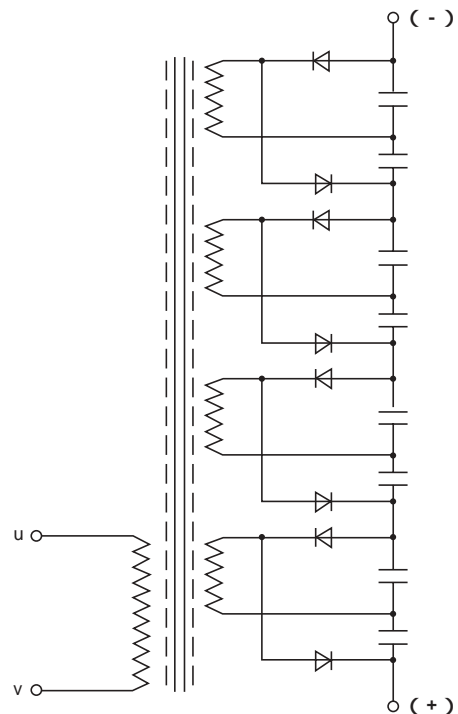


図3 鉄心接地型倍電圧整流回路

加速チャンバ内は、耐電圧性の維持、電子流の散逸、ならびにフィラメントの長寿命化のために、 10^{-5} Pa程度の高真空に保たれている。こうした高真空度を得るため

に、主ポンプとしてターボモレキュラポンプを使用している。

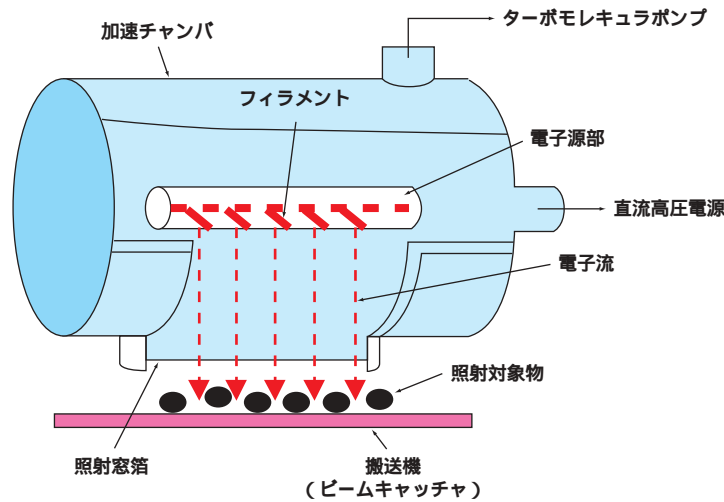


図4 エリア型加速器部の構成

2・3 搬送部

3.1.2.1項に示すように、表面照射による殺菌を効率良く行うには、搬送系に工夫をして均一な照射に近づける必要がある。これを満足する搬送方式として、振動コンベア式、斜面落下式、遠心式を検討したが、予備試験の結果、これらの中で最も均一な回転が得られる振動コンベア式を採用することとした。図5にその概要を示す。本方式は傾斜板とそれを振動させる機構からなり、傾斜板を振動させて対象物をランダムに回転させ、実用上均一な照射を実現している。傾斜板は電子流を止めるビームキャッチャの役割も持つため、水冷機構が備わっている。さらにメンテナンス性向上のため、本体から脱着可能となっている。

3・1 照射条件の決定

通常の殺菌照射に用いられる線のような貫通照射では、対象物の運動やその形状を考慮しなくとも表面線量を求めることができる。しかし、回転する対象物の表面のみに照射を行うソフトエレクトロン照射では、対象物の運動とその形状に起因する特有の現象を考慮する必要がある。

3・1・1 放射線殺菌

菌に放射線を照射した場合、一般に線量の増加とともに生存する菌数は指数的に減少し、生存菌数 N は次式で表される。

$$N = N_0 \times 10^{-\frac{D}{D_{10}}} \quad (1)$$

ここで、 N_0 ：初菌数、 D ：照射線量である。 D_{10} は D 値といい、もとの菌数を1/10に減らすために必要な線量である。 D 値が大きいくほど、殺菌処理に対する抵抗性が大きい。

3 照射殺菌の試験方法

“Soft Electron Processor”による殺菌効果を検証するための試験方法を次に示す。

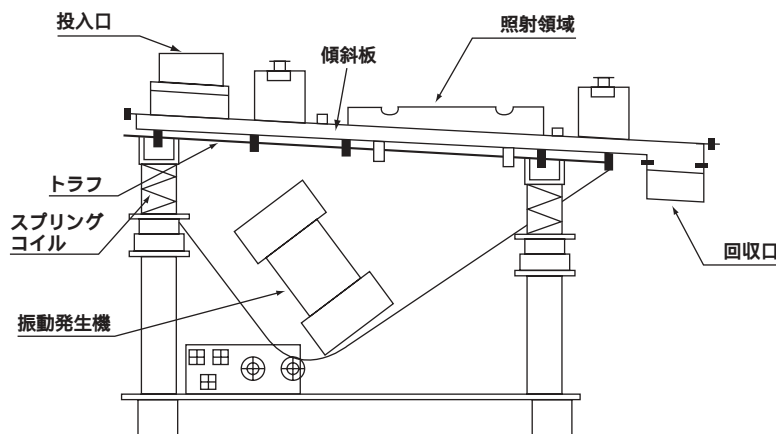


図5 振動コンベア外観

3・1・2 表面照射特有の現象

ソフトエレクトロンは透過力が小さく、照射範囲が対象物表面層近辺に限定される。これはソフトエレクトロンの最大の利点であるが、同時に次に示す特有の現象がある。

- (1)照射の均一性による殺菌効果の変化(対象物の運動に起因)
- (2)照射物形状による表面線量と線量計線量との相違(対象物の形状に起因)

3・1・2・1 照射の均一性による殺菌効果の変化

対象物表面に均等な照射が行われないと、照射过剩の部分と照射不足の部分ができる。均一な照射による殺菌効果と不均一な照射による殺菌効果の比を α とすると、は形式的に次のように定義される。

図6に示すように対象物表面を m 個の領域に均等分割する。D値を D_{10} 、平均線量を D 、初菌数を N_0 、 i 番目の領域の線量を $D(1 + \alpha^i)$ とすると、

$$= \left(\sum_{i=1}^m \frac{S}{S} \times N_0 \times 10^{-\frac{D(1+\alpha^i)}{D_{10}}} \right) \div \left(N_0 \times 10^{-\frac{D}{D_{10}}} \right) \quad (2)$$

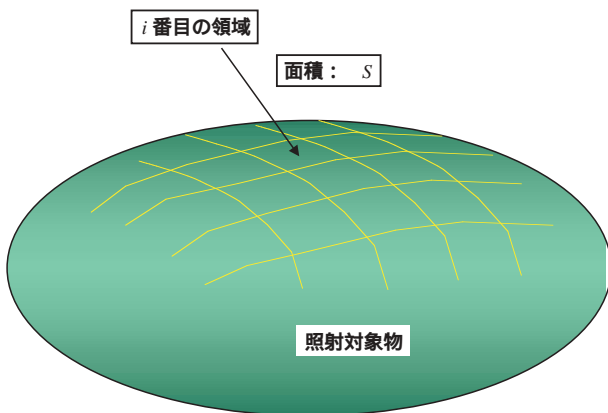


図6 表面の均等分割

ただし、 S は対象物の表面積、 S_i は i 番目の領域の面積である。

α は明らかに、次式を満たす。

$$\sum_{i=1}^m \alpha^i = 0 \quad (3)$$

ところで、 α がどのような値をとるときに α が最小、すなわち殺菌効果が最大となるのであろうか。直感的には $\alpha=0$ 、すなわち均一照射の時に α が最小となるように思われる。事実、式(2)に式(3)を代入して α を消去した後に α ($i=1 \dots m-1$) で偏微分すると、 $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_m = 0$ で最小値1を取ることが判る。すなわち、均一照射が最も殺菌効果が高く、逆に不均一さが増すほど殺菌効果が下がりより高い線量が必要となる。

3・1・2・2 表面線量と線量計線量の相違

3.1.2.1項で論じた照射の均一性が確保されたとしても、線量計による貫通照射と違って、CTAフィルム等の線量計で測定する線量と照射物表面の線量が一致しない。これは何故であろうか。この相違を引き起こす要因は、次の2点である。

- (1)ソフトエレクトロンは照射物裏面には届かない。
- (2)ソフトエレクトロンは照射物表面に対し斜め入射する。

この2点是对象物の幾何学的形状にのみ依存するので、一種の形状因子とみなせる。

例として、平板と球の場合を図7に示す。それぞれの運動形態を次のとおり仮定する。

- a) 平板は極短時間で裏表が変わり、表裏の照射時間は等しい。
- b) 球は全表面が均一に照射されるよう回転しながら照射される。

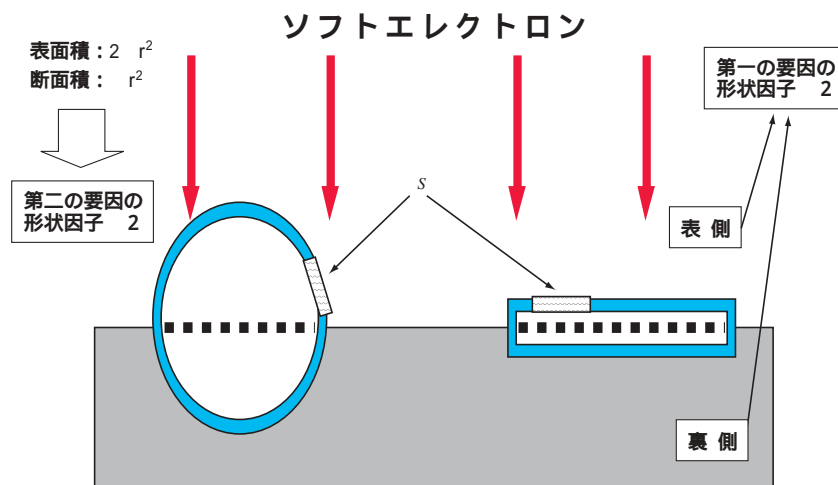


図7 平板および球の形状因子

それぞれの形状とも、ある領域 S に着目すると、 S が電子流に対し表側にいる確率、および裏側にいる確率は等しいと考えられるので、第一の要因による形状因子は 2 となる。仮定 a) より平板については第二の要因を考慮する必要はないが、球の場合は仮定 b) より、表側半球の表面積と断面積の比、 $2r^2 / r^2 = 2$ が第二の要因による形状因子となる。ただし、 r は球の半径である。

以上をまとめると、平板の形状因子は 2、球の形状因子は 4 となる。当社では線量計線量から照射物の表面線量の推定に、便宜上平板の形状因子を使用した。

3・1・3 照射に必要な電子流量の推定

3.1.2.2 項に述べた形状因子のため、表面線量と線量計線量は一致しない。したがって表面線量と電子流の相関曲線を取り、要求される表面線量から必要な電子流量を決定する必要があるが、今のところ表面線量を測定する良い手段がない。そこで形状因子を仮定して、次式を用いて要求される電子流量を算出することにした。

$$I(mA) = \frac{F \times D(kGy) \times V(m/min) \times L(cm)}{K(kGy \times m/min \times cm/mA)} \quad (4)$$

ここで、 F ：形状因子、 D ：表面線量、 V ：対象物の速度、 L ：装置の照射幅であり、 K は装置特有の照射効率をあらわす係数である。対象物の速度 V はさまざまな要因で変化するるので、照射試験ごとに測定している。

3・2 菌数測定

殺菌効果を評価するには、照射済みの対象物上に生存する一般細菌数を測定しなければならない。そこで次の手順で対象物から菌を回収し生存する菌数を決定することとした。

照射後、サンプル 10g に対し滅菌水を希釈液として 90g 加え、ホモジナイザ(試料粉碎機)にて 12,000rpm × 5min の条件で試料を粉砕し生存する菌を回収する。必要に応じて希釈し、適当量を標準寒天培地上に塗布した

後、35～48 時間の平板培養を行い、生存した菌がつくる集団の数(コロニ数)を測定する。希釈倍率および塗布量を勘案してグラム当たりのコロニ数(CFU/g)を算出し一般細菌数とする。

3・3 糊化粘度測定

1 項でも述べたように、糊化粘度の測定は品質低下を推定する有効な手段である。そこで、次の手順で糊化粘度の測定を行うこととした。ここで、糊化とはデンプンに水を加え加熱すると糊状になる現象のことを言う。ラビッドビスコアナライザという糊化特性測定装置を用い、資料 4g に対しイオン交換水 25ml を加えた後、60 から 95 まで徐々に昇温、その後 50 まで冷却する。この間粘度を連続して記録し、得られた最高粘度を糊化粘度とする。

4 殺菌実施例

“Soft Electron Processor” の性能を確認するため、代表的な穀物である小麦と玄米について照射実験を行った。試供体としては、小麦は Australian Standard White (ASW) を、玄米はコシヒカリを採用した。処理量は定格の 500kg/h とした。

ここで用いられている表面線量は、平板状のフィルム線量計で測定した線量を便宜上平板の形状因子 2 を用いて算出したものである。穀物の運動が理想的な回転に近づくと球の形状因子 4 を用いるべきであり、その場合表面線量はその半分の値となる。

また、3.1.2.1 項で議論した不均一性があると、適切な形状因子を用いたとしても殺菌に必要な線量よりも大きめの線量が必要となる。

したがって、4.1 項および 4.2 項で求める細菌の生存率を一桁下げる表面線量は、いわゆる D 値よりも大きな値となっている。

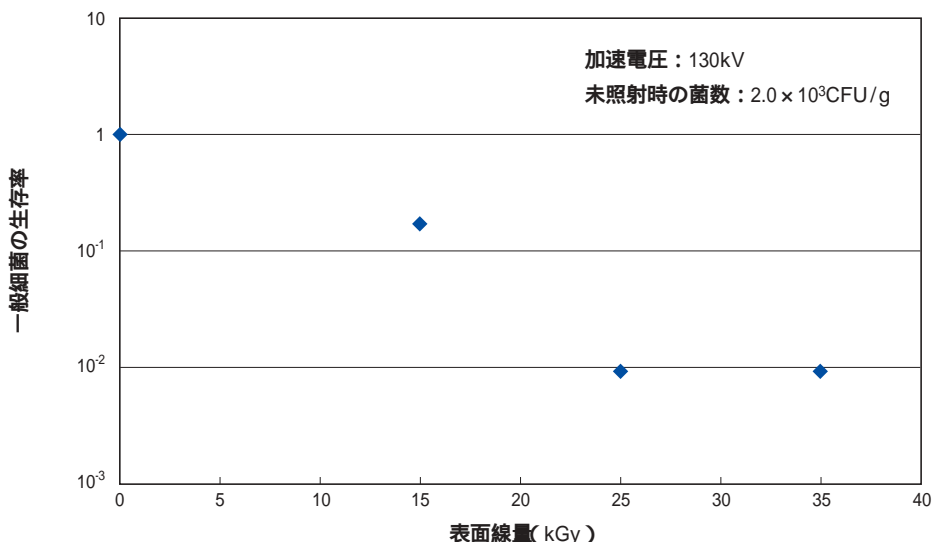


図 8 殺菌効果の線量依存性 小麦(ASW)

4・1 小麦

図8に加速電圧130kVでの殺菌効果の線量特性を示す。縦軸は一般細菌の生存率を表し、横軸は表面線量を表す。また、図9に加速電圧130kVでの糊化粘度変化の線量特性を示す。縦軸は未照射の試供体に対する糊化粘度の比を表し、横軸は表面線量を表す。

図8を見ると、一般細菌の生存率は線量の増加に伴い指数関数的に減少している。また、連続搬送処理で菌数を一桁下げるには、約14kGyの照射が必要となる。図9

を見ると、この約9倍の125kGyという高線量でも小麦の粘度変化はほとんど見られない。

食品加工において 10^2 CFU/gを実用的な殺菌の目安と考えると、未処理の小麦の菌数が 10^4 CFU/g程度⁽¹⁾なので、約28kGyの表面線量(連続搬送処理)が必要となる。また、125kGyの線量でも糊化粘度変化がほとんど見られないことより、“Soft Electron Processor”は品質低下を起こさずに小麦の実用的な殺菌ができる装置であると結論できる。

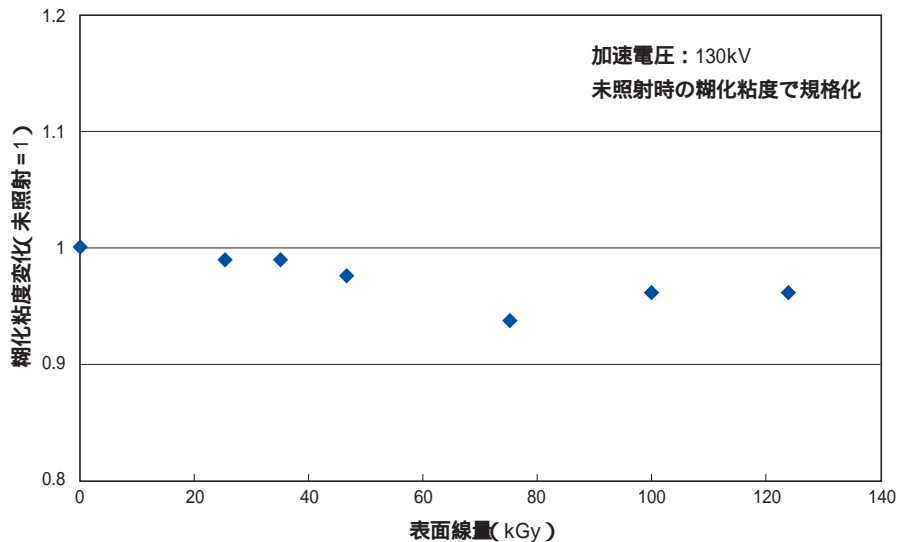


図9 糊化粘度変化率の線量依存性 小麦(ASW)

4・2 玄米

図10に加速電圧150kVでの殺菌効果の線量特性を示す。縦軸は一般細菌の生存率を表し、横軸は表面線量を表す。一般細菌の生存率は線量の増加に伴い、指数関数

的に減少している。同図から、菌数を一桁下げるには約12.5kGyの線量が必要と判る。これは小麦と大差ない結果である。なお、玄米に関しては菌数測定のみを行った。

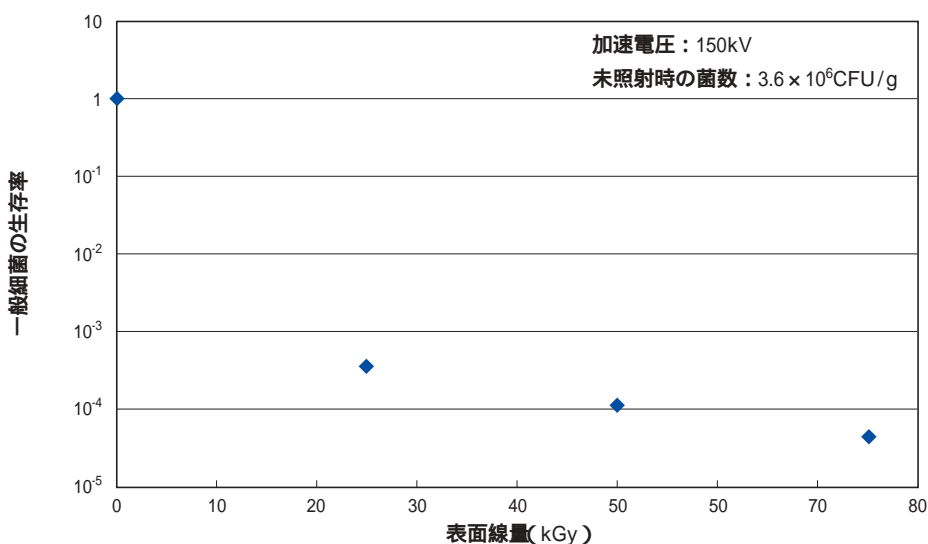


図10 殺菌効果の線量依存性 玄米(コシヒカリ)

5. あとがき

以上、ソフトエレクトロンによる殺菌技術について述べた。

本技術を適用した殺菌装置“Soft Electron Processor”は、照射物搬送に振動コンベアを使用し、穀物等の乾燥食品原材料を500kg/hという実用的なスピードで処理することが可能である。

また、殺菌に使用する電子のエネルギーが低いため、遮蔽設備が簡易にできる、装置自体のコストが低いなどの利点とともに、照射される領域が表層に限定されるので照射対象物への照射によるダメージを非常に低く抑えることができるというユニークな特徴を持つ。

さらに、開発時の主対象は小麦であったが、現在さまざまな乾燥食品原材料へとその適応範囲を広げており、今後の展開が期待できる。

最後に、“Soft Electron Processor”の開発、またその適応範囲の拡大に当たり並々ならぬご助力をいただいた共同研究者の方々に、深く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) Hayashi, T. "Decontamination of Dry Food Ingredients with Soft-Electrons", JARQ Vol.32, No.4 (1998)
- (2) Hayashi, T. "Comparative effectiveness of gamma rays and electron beams in food irradiation", Food irradiation (Thorne, S. Ed.), Elsevier Science Publisher, Inc., London, UK (1991)167-216
- (3) Hayashi, T., Takahashi, Y. and Todoriki, S. "Low-energy electron effects on the sterility and viscosity of grains", J. Food Sci., 62, 858-860(1997)
- (4) Hayashi, T. et al. "Rheological properties and lipid oxidation of rice decontaminated with low-energy electrons", J. Food Prot., 61, 73-77(1998)
- (5) Issiki, K. and Matsuda, T (Ed.), Handbook on Non Thermal Treatment to Control Microorganisms in Foods, Science Forum(2001)92-97

執筆者紹介

| | |
|-------|----------------------------------|
| 林 徹 | 独立行政法人 国際農林水産業研究センター 食料利用部長 農学博士 |
| 加藤 健治 | 日新電機(株)技術開発研究所 材料・プロセス研究センター |
| 柏木 正之 | 日新ハイボルテージ(株)取締役 加速器部 部長 |
| 谷口 周一 | 日新ハイボルテージ(株)加速器部 技術部 部長 |
| 錦見 敏朗 | 日新ハイボルテージ(株)加速器部 CS推進部 課長 |
| 岡崎 泰三 | 日新ハイボルテージ(株)EB加工技術センター |
| 水谷 睦 | 日新ハイボルテージ(株)加速器部 技術部 |
| 金子 博実 | 日新ハイボルテージ(株)加速器部 技術部 |
