

# 「食品照射」

## の基礎知識と最新技術動向

### 放射線殺滅菌／なぜ生物は放射線に弱いのか

#### 第2回

食のコミュニケーション円卓会議 副代表  
(元QST高崎量子応用研究所)  
小林 泰彦

#### 身近な放射線利用例と必要な線量

様々な放射線利用例とおおよその線量を図1に示す。グレイ (Gy) は「吸収線量」すなわち物質に吸収された放射線の物理的エネルギーの単位であり、1 kg の物質に1 J (ジュール) のエネルギーが吸収されたとき1 Gy となる。

放射線利用の線量は目的と照射対象によって大きく異なり、最も高い線量が必要なのは原子炉などで用いられる材料の耐放射線性の評価試験である。プラスチック・ゴム製品などの高分子材料の放射線架橋<sup>注1)</sup>やグラフト重合<sup>注2)</sup>による加工・改質の目的では数十 kGy (数万グレイ) から1MGy (百万グレイ) 以上、医療器具や医薬品、食品容器などの非加熱滅菌は20～50 kGy、スパイス・ハーブ類や冷凍・冷蔵食肉魚介類の食中毒防止や腐敗防止 (日持ち向上) のための殺菌は1～10 kGy で達成できる。

殺菌・滅菌よりも低い線量では、穀類や果実などの貯蔵害虫や病害虫の殺虫・不妊化ができ、植物検疫処理<sup>注3)</sup>や不妊虫放飼法<sup>注4)</sup>による野外の害虫の撲滅にも利用されている。さらに低い線量では、ジャガイモやニンニクの芽止めができる。

あまり知られていない利用例に輸血用血液製剤の照射処理がある。日本では輸血後移植片対宿主病<sup>注5)</sup>予防のために他人血から作られた血液製剤には15～50 Gyの放射線照射が義務づけられて

いる。15 Gy はリンパ球の不活性化に必要な線量で、50 Gy は赤血球や血小板が劣化しない上限線量である。

体外からのX線照射による一般的な放射線がん治療での1回当たりの線量は通常2 Gyで、何日かおきに延べ数十 Gy 程度 (ただし皮膚や周辺の正常組織の耐容線量の範囲で) 照射を繰り返す。最近普及しつつある重粒子線がん治療<sup>注6)</sup>では、一度に大きな線量を照射し、より少ない回数で、極端には1回だけの照射で治療することも可能になっている。いずれの場合も、がん組織と正常組織の放射線障害からの回復力の違いを最大限に利用し、重篤な副反応や晩発影響を抑えながらがんを制御するために、線量と照射間隔の最適化や薬剤の併用などが検討されている。

おおよそ0.1 Gy以下の線量では、事実上、生物への照射効果が見られない。図1に示したX線透視、X線CT、核医学検査などは、放射線の生物作用を期待する利用法ではない。

#### 放射線殺菌・滅菌

単に微生物数を減らすことや、食中毒防止などの目的に応じて特定の対象微生物だけを除去することを殺菌といい、あらゆる微生物を殺滅または除去して無菌状態を達成することを滅菌という。

滅菌法には、実験室での無菌操作で一般的な火

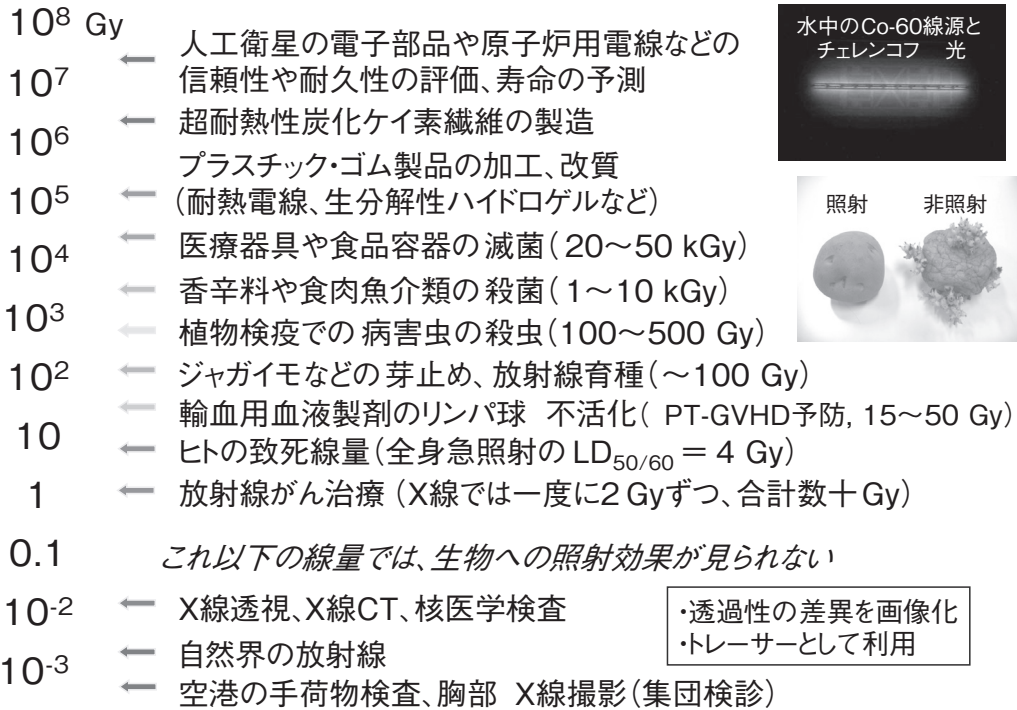


図1 放射線利用例と線量(単位:Gy)。生物への照射効果を利用するのは、おおよそ1 Gy~数十 kGyの線量域

表1 主な工業的滅菌法の比較

	高圧蒸気滅菌	EOG滅菌	放射線滅菌
滅菌対象の材料	加熱に耐える 材料に限定	多くの材料に適合	多くの材料に適合
包装材の制約	蒸気透過性	ガス透過性、耐真空性	制約なし
処理方法	バッチ式	バッチ式	連続式
処理時間	数時間	十数時間	数秒(電子線)~数時間(ガンマ線)
滅菌工程管理	複雑	複雑	簡易(吸収線量だけ)
滅菌後の処理	乾燥	残留ガスの除去	なし
滅菌・殺菌効果	良好	良好	良好

炎滅菌や乾熱滅菌があるが、医療器具などの滅菌のために工業的に広く利用されているのは、オートクレーブを用いた高圧蒸気滅菌、エチレンオキサイドガス<sup>注7)</sup>によるEOG滅菌、そして放射線滅菌である。これらの滅菌法の比較を表1に示す。

高圧蒸気滅菌は、通常121℃の飽和水蒸気中で20分間処理するもので、通常160~180℃で行われる乾熱滅菌よりも低温かつ短時間で処理することができる。なお、日本では放射線の利用が禁止されている香辛料の殺菌には、140℃の過熱乾燥水蒸気による気流式殺菌が用いられている。

エチレンオキサイドには微生物のDNAの

-NH<sub>2</sub>基や-OH基、タンパク質の-COOH基や-SH基と反応して不可逆的にアルキル化する作用があり、食品容器や医療器具の滅菌などに用いられているが、食品中に残留するとエチルクロロヒドリンなどの有害物質が生じるため、日本やEUなど多くの国では食品への使用が認められていない。またエチレンオキサイド自体に発がん性があるとされ、最近米国で滅菌受託施設から周辺環境へのEOGの漏洩が発覚して社会問題になっている。日本でも今後EOG滅菌は廃止となる可能性があり、環境への負荷が少ない放射線滅菌の利用拡大が予想される。

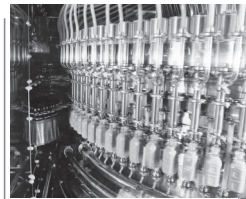


キムワイブ γ線滅菌済み  
アスワン



EB滅菌瓶(広口)  
サンブラテック

<https://www.monotaro.com/>



ペットボトルのEB滅菌  
システム  
<https://www.shibuya.co.jp/bottling/BS-01.html>



実験動物用飼料  
[https://www.clea-japan.com/products/diet/radiation\\_diet](https://www.clea-japan.com/products/diet/radiation_diet)



目薬容器等 (PET, PE, PP)  
[http://www.shinko-ccl.co.jp/product/general\\_index.html](http://www.shinko-ccl.co.jp/product/general_index.html)



医療用ディスポーザブル不織布用品  
<https://hogv.co.jp/product/nonwoven.html>

図2 放射線滅菌済み製品の例。医療器具、実験機材、ヘルスケア用品、食品包装材など

放射線滅菌には次のような利点がある。

1. 温度の上昇が小さく、プラスチックなど耐熱性が低い材料でも処理可能。
2. 薬剤を使わないため、そもそも残留の恐れがなく安全性が高い。滅菌後の処理も不要で環境汚染もない。
3. 放射線の透過力が大きいため、形状を問わず内部まで均一に処理可能。出荷前の最終梱包状態での処理も可能で、開封するまで滅菌状態が保たれる。
4. 連続処理が可能で効率的。
5. 滅菌効果は線量(吸収線量)だけで決まるため、工程管理と滅菌の保障が簡便。

これらの特長を利用し、医療器具や医薬品、実験機材のみならず衛生用品や化粧品、実験動物用飼料、食品や飲料の容器・包装材などの非加熱滅菌、最近では飲料用PETボトルの無菌充填システムにおける非加熱滅菌にも放射線照射が使われている(図2)。もちろん、食品そのものの殺菌

処理も可能である。

どんな電離放射線にも殺菌作用があるが、工業的に使われているのは、主としてコバルト60(<sup>60</sup>Co、Co-60)のガンマ線(図3)と加速器で発生させた5~10 MeVの電子線である。

ガンマ線は透過力が大きいので、分厚いものや大きいものを均一に処理するのに適している。図3はQST高崎研にある研究用の照射施設の例だが、ガンマ線が外部に漏れないように遮蔽された照射室と線源プールがセットになっており、照射時にプールの底に格納されたコバルト線源を遠隔操作で昇降する点は大規模な商業用照射施設(図4)でも同じである。海外の原子炉で製造され輸入されたコバルト60のペレットを特殊な難腐食性金属で二重に密封した棒状の線源を基本単位として、なるべく均一かつ広範囲にガンマ線を照射できるように、その棒状のCo-60線源を板状や円筒状に並べた線源集合体が用いられる。

図4に示す商業規模のガンマ線照射施設では、トートボックス内やパレット上に崩れないように梱包・載荷された製品をコンベアで自動的に照射

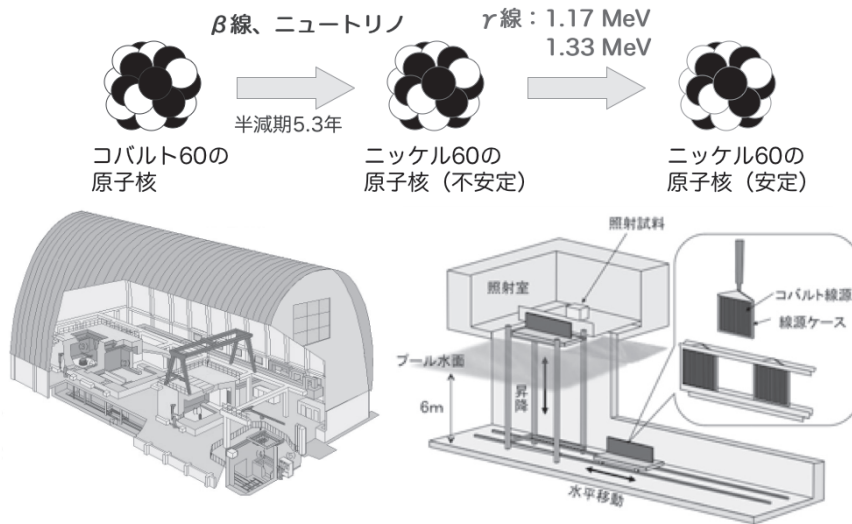
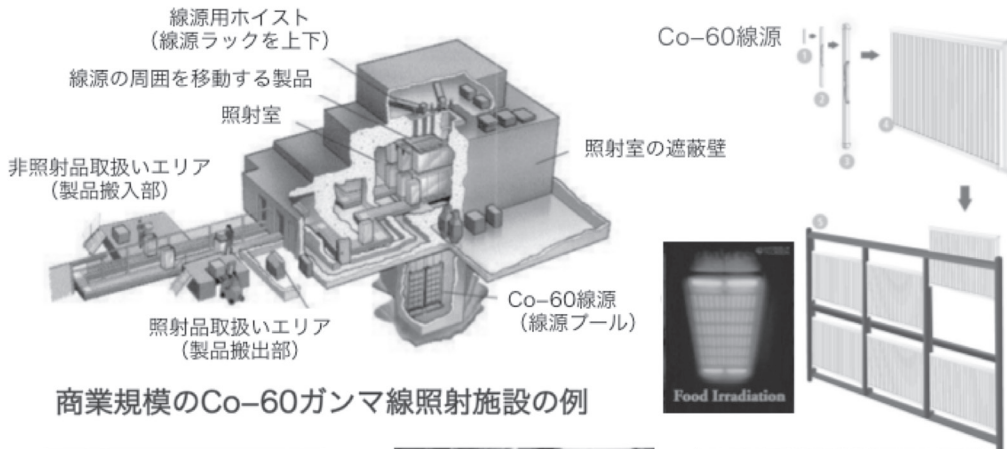


図3 コバルト60の崩壊(壊変)とガンマ線の発生



商業規模のCo-60ガンマ線照射施設の例



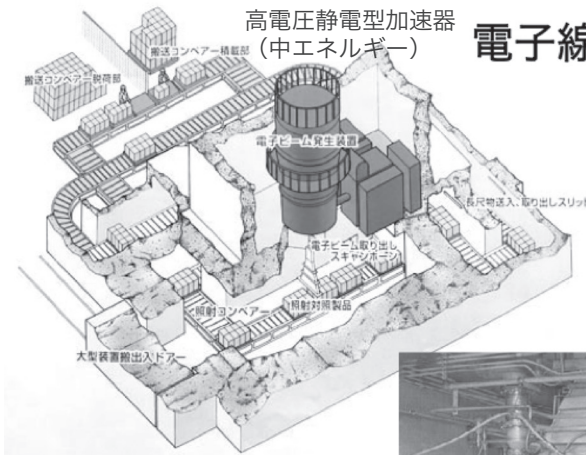
図4 商用ガンマ線照射施設の例

室内に搬送し、線源集合体の周囲を直接触れることなく通過させながら目的の線量までガンマ線を照射する。

電子線は、線量率(単位時間当たりの線量)はガンマ線の千倍も高いが、透過力が小さい(水中で数cm以下)ので、薄いシート状の製品やプラスチック容器など嵩(かさ)密度の小さいものを

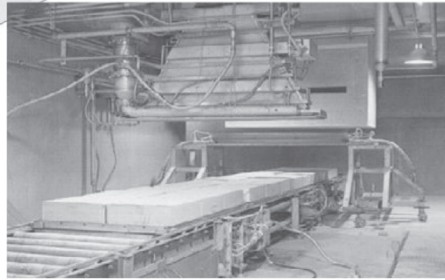
コンベアで搬送しながら短時間で大線量を照射するのに適している(表1の電子線とガンマ線の処理時間の違いに注目)。加速器の電源を切ればすぐに放射線の発生が止まる点もコバルト60との相違点である。

図5に示す商業規模の電子線照射施設でも製品はコンベアで自動的に照射室内に搬送され、帯



## 電子線照射施設

ラジエ工業株式会社  
5 MV・30 mA  
最大出力：150 kW



- ・高速で照射できる
- ・電源OFFで放射線が止まる
- ・分厚いものには向かない

図5 商用電子線照射施設の例

状にスキャンされながら大気中に取り出された電子ビームの直下を、ビームのスキャン方向と直交するようにコンベアで搬送されながら照射される。

電子線の透過力の弱さを利用して対象物の表面だけを選択的に照射することも可能で、無菌充填用PETボトルの滅菌では、容器の内外から表面だけに低エネルギー電子線<sup>注8)</sup>を照射してボトル材の品質劣化を抑えることができる。

国内で商業サービスとしてガンマ線や電子線の照射を行っている受託照射施設を図6に示す。いずれも医療器具や容器包装の滅菌、材料改質など大線量(10 kGy以上)の照射に対応している。

なお、電子線滅菌は、医療器具・医薬品の製造ラインや清涼飲料水の無菌充填ラインのように、製品の製造ラインに小型の電子加速器を組み込んでインライン・インハウ

スで使われることが多い。

最近では、5～10 MVの電子加速器を用いて発生させた制動X線(変換X線ともいう)<sup>注9)</sup>も使われ始めている。コバルト60のガンマ線(1.17および1.33 MeV)よりもエネルギーの高いX線はさらに透過力が高く、電源を切れば発生が止まる点も優れている。電子線から制動X線への変換効率が悪く、装置の耐久性にも懸念があったことからまだあまり普及していない。しかし、今後はコバルト60の線源輸送に係る

セキュリティの問題でその供給がますます困難になり、価格も上昇すると予想されることから、ガンマ線から高エネルギーX線へのシフトが進むと考えられる。

ガンマ線、電子線、X線のいずれも、その生物作用は細胞内に入射した高エネルギー光子がコンプトン散乱<sup>注10)</sup>で発生させた反跳電子とその二次電子、あるいは直接入射した高速電子とその二次電子による生体物質の電離・励起に起因する。従っ

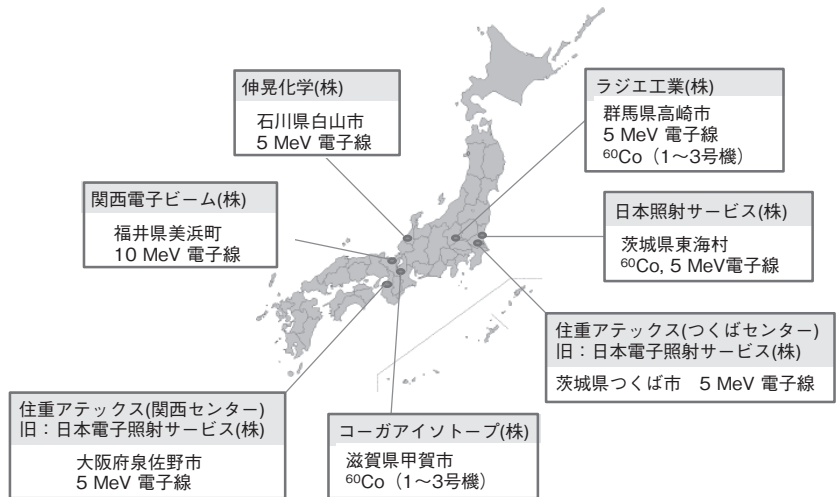


図6 国内の受託照射施設(商業サービス)

て、放射線の種類による透過力の違いや、その裏返しとしての線量率の違いこそあれ、殺菌作用自体には、原理的にも実用上も何も違いはない。

一方、がん治療で利用される高エネルギーの重粒子線や中性子は、照射した物質に核反応を誘起して放射化（新たな放射性同位元素を生成）することがあるので、放射線滅菌の目的で使用されることはない。

放射線殺菌・滅菌の効果は、対象となる微生物の放射線耐性の裏返しであり、温度や酸素分圧、水分活性、線量率など放射線化学的な条件に依存して変わる DNA 損傷の生成効率と、その微生物の DNA 修復能の両方で決まる。一般的には、標的である DNA 分子が長い（ゲノムサイズが大きい）ほど、投入した放射線エネルギーに対する生物作用の効率が低い。カビや酵母より大腸菌などのバクテリアの方が放射線に抵抗性であり、ウイルスの不活性化にはさらに高い線量が必要となる。

実際には、放射線による直接の DNA の電離によって、糖・リン酸骨格の切断（DNA 鎖切断）や、DNA 分子上に遺伝情報を刻んでいる塩基の酸化や脱離などの塩基損傷が生じる他に、周囲の水分子の電離で生じた活性酸素や水和電子が DNA 分子と反応することによる間接的な鎖切断や塩基損傷も起こる（というか、むしろこちらの方が多い）。酸素分圧、水分活性、線量率などの放射線化学的な条件に依存して DNA 損傷の生成効率と殺菌・滅菌効果に変化するのはそのためである。

## なぜ生物は放射線に弱いのか

放射線で非加熱殺菌・滅菌が可能なのは、滅菌対象となる微生物も含めて生物が放射線に弱いことによる。

典型的な殺菌処理として吸収線量 10 kGy を与えられた際のエネルギー付与は、 $[Gy]=[J/kg]$  だから  $10\text{ kGy}=10,000\text{ J/kg}=2.4\text{ cal/g}$  ( $1\text{ cal}=4.184\text{ J}$ ) となり、水を照射した場合の温度上昇は高々  $2.4^{\circ}\text{C}$  に過ぎない。そのため生鮮品や冷凍品の殺菌処理も可能である。

逆に、我々が熱いお茶をひと口飲んだときに受

け取るわずかな熱エネルギーがガンマ線の全身急照射の形で与えられた場合は生死に関わる！

ヒトの半数致死線量（60 日以内に半数が死亡する線量： $LD_{50/60}$  = 約 4 Gy）のガンマ線で体重 70 kg の人が全身に急照射された場合、人体に吸収されたエネルギーは  $4\text{ [J/kg]} \times 70\text{ kg}=280\text{ J}$ 、熱量単位に直せば  $280\text{ J} \div 4.18=67\text{ cal}$  に過ぎない。

ここに、物質に吸収された放射線のエネルギーを表す物理量である吸収線量  $[J/kg]$  の単位として、特別な名称「グレイ (Gy)」が与えられている深い理由がある。すなわち、物理的には同じ量のエネルギーでも、熱としてではなく電離放射線の急照射で与えられると生物にとって極めて危険である！そのことを忘れるな！と。しかし、それは同時に、放射線を使えばごくわずかなエネルギーで非加熱殺菌・滅菌が可能であることを示している。

では、なぜ生物はこれほど放射線に弱いのか？その答えは、ほとんどすべての生物が遺伝情報の記録媒体として非常に長い超巨大高分子 DNA を採用しているため、細胞分裂のたびにその DNA 分子を完全に正確に複製しなければならないという宿命にある。細胞内で重要な役割を担っている生体高分子の中でもタンパク質・酵素などは意図しない化学修飾や三次元構造の変化によって変性・失活するとすぐにエネルギー源として燃やされるか、アミノ酸レベルに分解されて新しいタンパク質の原料としてリサイクルされるなど、基本的に使い捨てである。

ところが DNA 分子だけは完全に元通りに戻すための「修復」が試みられる。DNA は、ヒトの場合、1 個の細胞核の中にある 46 本の染色体の DNA を全部つなげるとヒトの身長の高さになるくらいの途方もなく長い超巨大高分子であるにもかかわらず、細胞内に 1 対しか存在しないその「原本」を傷つけることなく維持し、細胞分裂時の複製など必要に応じて正確にコピーする必要がある。そのため DNA は放射線や活性酸素による不本意な化学変化（損傷）を直ちに元通りに修復しないと致命的となる、いわば「急所」である。

放射線で 1 回の電離を起こすのに必要なエネルギーは、水分子では平均して約 30 eV である

ことが実験的に分かっている。1 J=6.2 × 10<sup>18</sup> eV  
なので、ガンマ線を1 Gy 照射した水 (H<sub>2</sub>O) 1  
kg の中では (6.2 × 10<sup>18</sup> eV) ÷ 30 eV=2 × 10<sup>17</sup>  
回の電離が起こっている。これは非常に大きな数  
のように思えるが、水1 kg 中の電子の総数を考  
えると、1 Gy の照射で1 kg の水の中のある1個  
の電子が弾き出される確率は約1億分の1となる。

ちょっと思考実験を。非常に長いDNA分子1  
本と、そのDNAの分子量(長さ)の100万分  
の1の分子量(長さ)しか持たないタンパク質が  
100万個あったとして、どちらにも同じ線量を照  
射し、全体として同じ数の電離が生じ、その結果  
同じ数、例えば仮に全部で1万箇所でも共有結合が  
切断されたとしたら? 100万個のタンパク質のう  
ちの1万個、つまり全体の1%が失活しても特に  
影響は無さそうだが、もし1本のDNA鎖に突如  
として1万箇所でもDNA切断が生じた場合の影響  
は、おそらく無視できないのでは…?

このように考えると、生物が放射線に弱いのは  
細胞分裂のたびに超巨大分子DNAを正確にコ  
ピーしなければならないという生物側の理由によ  
ることが分かる。そしてDNAのサイズが大きけれ  
ば大きいほど投入した放射線エネルギーに対す  
る生物作用の効率が高いこと、ヒトと大腸菌では  
致死線量が大きく違うこと、放射線殺菌は病原性  
大腸菌には向くがノロウイルスには向かないこと  
などの理由も、DNAのサイズ(長さ)と線量に  
比例してランダムに生じる切断の影響との関係を  
イメージすることによって直感的に理解できる  
のではないだろうか。ちなみに、酵素を放射線  
照射で失活させるのに必要な線量は、数十~数百  
kGyのオーダーである。

生物の体内では、呼吸で発生する活性酸素など  
によって、常にDNAを構成する塩基の酸化や脱  
離、糖・リン酸骨格の鎖切断など様々な化学的  
変化が生じているが、これらの望ましくない変  
化(DNA損傷)は細胞内の修復酵素群によって  
速やかに元通りに修復される。この能力、すなわ  
ちDNA修復能は、地球上で進化してきた全ての  
生物が備えているもので、生命現象の根幹ともい  
うべき能力である。しかし、人為的な放射線照射  
によって、細胞の修復能力を超えて一気に大量の

DNA損傷を起こすことで、細胞の分裂増殖を止  
めるか細胞死を導くことができる。これが放射線  
殺菌・殺虫・芽止めの原理である。

今回は、放射線照射による植物検疫処理<sup>注3)</sup>や  
不妊虫放飼法<sup>注4)</sup>による野外の害虫の撲滅などの  
利用例について解説する。

## 食べても大丈夫?

### ○殺菌・殺虫・芽止め目的で放射線を照射した食品

毒性的・微生物学的安全性と栄養学的健全性は、  
科学的に国際的に何度も繰り返し確認済みです。

▶大丈夫!食品中に放射線は残りません。栄養成分や  
品質はほとんど変わらず、有害な物質もできません。

課題:国内外の規制の不一致のため、食の安全と  
環境保護に役立つ技術が日本で使えないこと

### ○原発事故由来の放射性物質が混入・付着した食品

飲食による線量増加と健康リスクの程度によります。

- ・食品中の放射性物質の量の測定(ベクレル: Bq)
- ・線量増加と健康リスクの推定(シーベルト: Sv)
- ・自然放射線や生活上の健康リスクと比較して判断

▶大丈夫! 現在流通している食品は十分安全!

課題:風評被害、一部の国で続く輸入規制、  
「安心」のために続けられる過剰な検査

## 照射食品と放射性汚染食品

殺菌・殺虫・芽止めなどの目的で放射線を  
照射した「照射食品」と、原発事故などに起  
因する「放射性汚染食品」を混同してはなら  
ない。

照射食品の毒性的・微生物学的な安全性  
と栄養学的な健全性は、科学的な方法で繰  
返し確認されており、世界保健機関(WHO)  
や世界各国の多くの政府機関が「健康への悪  
影響を示す証拠は一つも無い」「定められた方  
法で放射線を使用すれば、新たに生成する化  
学物質による悪影響のおそれも、栄養成分の  
増減も、加熱や乾燥、調理など従来の食品加  
工の方法と差がない」と結論している。

一方、事故などで環境に放出された放射性  
物質による食品の放射性汚染の問題は、飲食  
による内部被ばくの健康リスクの問題に帰着  
する。

「放射性物質=危険・有害物質」ではなく「大  
量の放射性物質は強い放射線を出す」から危  
険・有害なのである。従って、放射性物質の  
有無ではなくその種類(核種)と含有量、そ  
れによる内部被ばく線量の推定が重要となる。

## リスク評価と安全の判断

2011年の東京電力福島第一原子力発電所の事故の影響による放射性汚染食品は、病原性微生物で汚染された食品や毒キノコなどは全く異なり「ただちに健康に影響」はない。あくまでもその飲食による内部被ばく線量の増加と、それに対応する低線量放射線被ばくの健康リスク（発がんリスク）の増加が判断基準となる。

2012年4月に定められた日本の食品中の放射性物質の基準値は、仮に基準値（一般食品で100 Bq/kg）ギリギリの食品を食べ続けても健康への影響はありえないほどの厳しいレベル（低い濃度）に設定されており、事実上ゼロリスクを目指した管理が行われている。そして、現在、コメをはじめとする農畜産物や水産物などの食品中の放射性物質の検査結果は、その厳しい基準値をも遥かに下回る「安全な」レベルであることを示している。

よく誤解されることだが「安全」か否かは科学的・一義的に判定可能なものではなく、科学的な根拠に基づいて推定されたりリスクの大きさが（自分にとって）「十分に小さい」と見做せるか否かの主観的な判断である。

もし、あなたがうっかり放射性汚染食品を食べてしまったことによる追加の内部被ばく線量(Sv)が、あなたの身体を構成するカリウム40などの体内の天然の放射性物質に由来する内部被ばく線量(Sv)と比較して無視できるほど小さかったら、多少は気になっても冷静に考えればそのリスクも無視できるはずである。もし、あなたが住む場所が、どこか別の場所より自然界からの外部被ばく線量(Svで表された実効線量)が多少高くても気にならないなら、同じくらいの内部被ばく線量(Svで表された預託実効線量)の増加も気にならないのでは？

なお、2011年の原発事故によって農作物などを汚染したセシウム137その他の放射性物質は、もしそれが放射線を出していなかったら到底検出できないくらいの極微量であり、その元素の化学毒性による有害性の懸念はあり得ない。

注1) 放射線架橋 (radiation-induced cross linking) : 放射線照射によってゴムやプラスチックの高分子の分子間に新たな結合を誘起し、網目構造 (ネットワーク構造) を形成させること。「放射線橋かけ」ともいう。この処理で機械的強度が向上したタイヤのゴムシートや耐熱性電線、コート紙の塗膜や建材表面の強靱な樹脂層などが製造されている。

注2) グラフト重合 (graft polymerization) : グラフトとは、「接ぎ木」という意味で、ある高分子鎖に別の高分子鎖を結合することをグラフト重合という。高分子鎖上に放射線照射や触媒などにより活性点を形成し、これによって別のモノマーの重合を開始させ、グラフト重合体を合成する。例えばポリエチレン膜に導電性の分子をグラフト重合させてボタン電池の隔膜 (セパレータ) が製造され、また強度のあるフィルター基材に特定の分子やイオンを吸着する官能基をグラフト重合させて脱臭フィルターや金属イオン除去フィルター、レアメタルや放射性セシウム捕集材などが製造されている。

注3) 植物検疫 (Plant Quarantine) : 植物の輸出入に伴い植物の病害虫がその植物に付着して侵入しないように輸出入の時点で検査を行い、検査の結果消毒などの必要な措置 (Phytosanitary Measures) をとること。農林水産省では、植物防疫法に基づき、農業生産の安全及び助長を図ることを目的として、病害虫の侵入防止を図るための輸入される植物等の検査等 (輸入植物検疫) や輸出先国・地域の要求に応じた植物等の検査等 (輸出植物検疫) を実施している。また、日本への侵入を特に警戒している病害虫について侵入調査や防除等 (国内植物検疫) を行っている。植物検疫に関する措置は、WTO/SPS協定 (衛生植物検疫措置の適用に関する協定) や国際植物防疫条約 (IPPC) 等に従い、科学的根拠や国際基準に基づいて実施されている。

注4) 不妊虫放飼法 (Sterile Insect Technique, SIT) : 防除対象の虫を人工的に大量飼育して放射線を照射し、交尾はできるが子孫を残すことができない不妊の虫を大量に生産して野外に放すことによって、野生虫同士の交尾頻度を大きく低下させる。不妊雄と交尾した雌が産んだ卵は孵化しないので、次世代の野生の虫の個体数は減少する。このような不妊虫の放飼を続けることによって野生虫同士の交尾の機会をさらに激減させ、ついには絶滅させる方法。この方法で、南方から侵入し南西諸島全域に生息していたウリミバエを根絶することに成功した。

注5) 輸血後移植片対宿主病 (Post Transfusion Graft-Versus-Host-Disease, PT-GVHD) : 輸血後に供血者のリンパ球が受血者の体内で増殖しながら受血者の組織を攻撃する病態。発症するとほぼ全ての患者が死に至る。日本赤十字社では1998年から照射済み輸血用血液製剤の供給



を開始し、2000年以降は照射済み血液製剤の輸血によるPT-GVHDの発症は確認されていない。

注6) 重粒子線がん治療 (Heavy Particle Radiotherapy) : 体外から放射線を照射するがん治療法の一つ。日本では炭素線すなわち炭素原子から電子を剥ぎ取った原子核 (炭素イオン) を加速器によって光速の70%以上に加速した炭素イオンビームが用いられる。陽子線や炭素線は物質に入射する時は相対的に低い吸収線量を与え、体内でビームが止まる寸前で最大の吸収線量を与える。この相対線量のピークをブラッグピーク (Bragg peak) とよび、この性質によって陽子線や炭素線ではX線やガンマ線と比べ体表面での吸収線量を低く抑えられるとともに、加速エネルギーを調節することによってビームの飛程末端位置を正確に制御し、腫瘍組織において吸収線量がピークになるように照射できる。同時に、その背後にはビームはほとんど届かないため、放射線感受性が高い重要臓器などできる限り線量を低く抑える必要がある正常組織の直近まで「寸止め照射」が可能という優れた物理的線量付与特性を有する。さらに、X線やガンマ線には抵抗性を示す放射線抵抗性がん細胞も効果的に治療できる特長をもつ。

注7) エチレンオキシドガス (Ethylene Oxide Gas : EOG または EtO) : 酸化エチレンとも呼ばれる。分子式  $C_2H_4O$ 、分子量 44.05 のエポキシド。

注8) 低エネルギー電子線 : エネルギー 300 keV 以下の電子線をソフトエレクトロンと呼ぶこともある。通常の高エネルギー電子線 (数 MeV 以上) に比べて、透過力が小さく、照射対象物の表面 (数百  $\mu m$  の深部) のみに作用する。低エネルギー電子線を発生させる加速器は、厚い照射壁で囲まれた照射室での照射は不要で、電子加速装置と照射場を一体的に遮蔽する小型の自己遮蔽型装置とすることができ、食品製造ラインに組み込んでインライン・インハウスでの処理が可能である。

注9) 制動X線 (bremsstrahlung X ray) : 高速で運動する電子が物質中の原子核の近傍を通過するときに、その電界によって減速され、その際失ったエネルギーを電磁波すなわちX線として放出するもの。原子番号と密度が大きい物質ほど制動X線の発生強度が大きいので、電子線を当てる標的には密度が大きく融点も高いタングステンやモリブデンなどの金属が用いられる。

注10) コンプトン散乱 (Compton scattering) : 物質に入射した高エネルギー光子が軌道電子と非弾性衝突し、失ったエネルギーの分だけ低いエネルギーの光子となって散乱すること。そのとき光子からエネルギーを受け取り、原子核の束縛を振り切って飛び出す電子を反跳電子という。X線を物体に照射したとき、散乱X線の波長が入射X線の波長より長くなる現象をコンプトン効果 (Compton effect) という。

注11) 二次電子 (secondary electrons) : 物質に入射した電子が他の原子の外殻電子を弾き飛ばすことで放出される電子。

#### 参考資料

- 近藤宗平、人は不射線になぜ弱いか (第3版)、講談社 (1998)
- 日本保健物理学会・日本放射線影響学会 低線量リスク委員会、低線量リスクに関するコンセンサスと課題、放射線生物研究、55(2) 特別号 (2020) <http://rbrc.kenkyuukai.jp/special/index.asp?id=33566>
- 環境省、放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料 (令和4年度版)、<https://www.env.go.jp/chemi/rhm/r4kisoshiryo/r4kisoshiryoh.html>
- 土肥野利幸、植物検疫の仕組みと放射線照射処理の国際基準、RADIOISOTOPES,71(2),93-99(2022)
- 東京大学工学部編集委員会、原子力工学 放射線生物学、丸善出版 (2022)
- 農林水産省、食品中の放射性物質の検査結果 (年度別、品目等別、都県別の解析結果) ~令和5年7月、[https://www.maff.go.jp/j/syouan/seisaku/radio\\_nuclide/](https://www.maff.go.jp/j/syouan/seisaku/radio_nuclide/)