

学 術

獣医師にとっての放射能汚染問題

佐 藤 至

岩手大学農学部

はじめに

2011年3月の福島第一原発事故から13年余りが経過し、食品と環境の放射能汚染とこれによる被曝への不安と関心はだいぶ薄れてきているように感じられる。しかし、帰還困難区域の避難指示はまだほとんど解除されておらず、避難指示が解除された地域でも生活基盤や農畜産業の復興は緒についたばかりである。昨年は新たに処理水の海洋放出が現実の問題として浮上し、一部の国では日本産水産物の輸入規制が行われるなど、放射能汚染の問題はまだまだ現在進行中のものである。本稿では、あらためて放射線に関する基本的な事柄を整理するとともに、牛の放射能汚染に関する話題をいくつか紹介したい。

放射線とは

放射線には様々な種類があるが、原子力基本法は「放射線とは、電磁波又は粒子線のうち、直接又は間接に空気を電離する能力をもつもので、政令で定

めるものをいう。」と定義しており、政令は次のように定めている。

【核燃料物質、核原料物質、原子炉及び放射線の定義に関する政令】

第四条 原子力基本法第三条第五号の放射線は、次に掲げる電磁波又は粒子線とする。

- 一 アルファ線、重陽子線、陽子線その他の重荷電粒子線及びベータ線
- 二 中性子線
- 三 ガンマ線及び特性エックス線（軌道電子捕獲に伴って発生する特性エックス線に限る。）
- 四 一メガ電子ボルト以上のエネルギーを有する電子線及びエックス線

これらのうち放射性物質の壊変に伴って原子核内から放出されるものは、 α 線、 β 線、および γ 線の3種類で、壊変の際に内部転換あるいは軌道電子捕獲という現象を起こす放射性物質はX線も放出する（表1）。なお、X線も γ 線も電磁波なのでモノとしては全く同じで、違いは発生する場所、すなわち γ 線は原子核内、X線は原子核外（一般に電

表1 放射性物質から放出される放射線の種類とその概要

種類	主な発生源	本態	電荷	質量 (kg)	真空中速さ
α 線	α 壊変	He原子核	+2	6.64×10^{-27}	1.5万km/秒前後で、核種毎に一定
β 線	β^- 壊変	電 子	-1	9.11×10^{-31}	数万～29.7万km/秒程度で、最大値は核種毎に一定であるが、個々の β 線の速さは不定
	β^+ 壊変	陽電子	+1		
γ 線	α 壊変、 β 壊変 核異性体転移	電磁波 (光子)	0	0	30万km/秒（不変）
X線	電離・励起、制動放射、 内部転換、軌道電子捕獲、 陽電子消滅				（ γ 線のエネルギーは核種毎に一定）

子)である。

放射線のエネルギーの単位には電子ボルト (eV) が使用され、 $1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}\text{J}$ である。粒子線のエネルギーは質量と速さで決まるが、電磁波のエネルギーは波長(または周波数)で決定され、波長が短いものほどエネルギーが高い。電波法は波長0.1mm以上の電磁波を電波と定義しており、0.1mmから概ね10nmまでが光の領域(可視光は400~800nm)、それよりも波長が短い領域が放射線である。

放射性物質と放射能

放射性物質は放射性同位元素と同義であり、原子核が不安定で「壊変」という現象を起こして別の元素に変わり、その時放射線を放出する性質を持っている。原子核が不安定になる要因としては、一つには原子核内の陽子と中性子のアンバランスがあり、陽子が過剰なものは陽子が中性子に変わることで(β^+ 壊変)、中性子が過剰なものは中性子が陽子に変わることで(β^- 壊変)安定化しようとする。このため、 β^- 壊変したものは原子番号が1増え(例： $^{131}\text{I}\rightarrow^{131}\text{Xe}$)、 β^+ 壊変したものは原子番号が1減ることになる。前述の軌道電子捕獲は β 壊変の一種で、原子核が軌道電子を取り込んで原子番号が1減る。

β 壊変の際、 β 線だけを放出するもの(^3H 、 ^{90}Sr

など)もあるが、多くは β 線と γ 線を放出する。内部転換とは、本来 γ 線として放出されるはずのエネルギーが軌道電子に与えられ、これを飛び出させる現象である。また、核異性体転移とは β 壊変した際に少し時間を置いてから γ 線を放出する現象である。 ^{137}Cs は β 壊変後に94%が $^{137\text{m}}\text{Ba}$ になって核異性体転移を起こすが、このうち90%は γ 線を、10%は内部転換を起こして軌道電子を放出する。

原子核が不安定になるもう一つの要因は原子核が巨大すぎることで、原子番号が82(鉛)以上のものはヘリウムの原子核を放出して小さくなることで安定化しようとする(α 壊変)。 α 壊変を起こすと原子番号が2、質量数が4減る(例： $^{226}\text{Ra}\rightarrow^{222}\text{Rn}$)。このように放射性物質が壊変しようとする性質あるいはそれによって放射線を放出する能力を放射能と言う。

放射線と放射能の単位

放射線の量には、物理量、防護量、および実用量の3種類がある(表2)。物理量としては一般に吸収線量が使用されるが、稀にカーマが使われていることもある。両者の違いがわかりにくいだが、放射線によって物質に与えられたエネルギーがカーマであり、そこから制動X線などとして系外に逃げたエネルギーを差し引いたものが吸収線量である。放射性物質から放出されるX線や γ 線のエネルギー領域で

表2 放射線の量の種類と単位

	線量の種類(単位)	備考
物理量	吸収線量(Gy)	放射線から吸収したエネルギー、 $1\text{Gy}=1\text{J}/\text{kg}$
	カーマ(Gy)	光子または中性子によって生じた全ての荷電粒子の初期運動エネルギーの和、 $1\text{Gy}=1\text{J}/\text{kg}$
	照射線量(C/kg)	光子による空気の電離量、 $1\text{R}=258\mu\text{C}/\text{kg}=8.8\text{mGy}$
防護量	等価線量(Sv)	組織の吸収線量×放射線加重係数
	実効線量(Sv)	(等価線量×組織加重係数)の全身についての総和
実用量	周辺線量当量(Sv)	サーベイメーターで測定
	個人線量当量(Sv)	個人線量計で測定

Gy: グレイ, Sv: シーベルト, J: ジュール, C: クーロン, R: レントゲン

は両者の差はほとんどないので、通常はカーマ=吸収線量と考えて差し支えないが、被照射体の表面付近では一致しないことがある。

生物が被曝した場合、吸収線量が同じであっても、その影響の大きさは放射線の種類と被曝した組織によって異なる。このため、放射線の種類や被曝した組織によって重みづけをした、健康への影響の大きさを基準とした防護量が考案された。組織の吸収線量に放射線加重係数（ β 線、X線、 γ 線は1、 α 線は20）を掛けたものが等価線量で、各組織の等価線量に組織加重係数（表3）を掛けて全身について合計したものが実効線量である。しかし、生きている人や動物でこれを実測することは現実的には不可能である。

表3 組織加重係数（ICRP2007年勧告）

組織	組織加重係数
骨表面, 皮膚, 脳, 唾液腺	0.01
甲状腺, 食道, 膀胱, 肝臓	0.04
生殖腺	0.08
肺, 胃, 結腸, 骨髄, 乳房, 残りの組織	0.12
合計	1.00

このため、これに代わる実測可能な量として線量当量が使われる。各種のサーベイメーターやガラスバッジなどの線量計はこの値を表示するように設計されており、被曝線量の管理その他放射線防護のために使われる。線量当量はその使用目的から、どのような条件下でも実効線量を下回らないように安全側（大きめ）に評価するようになっており、条件によって異なるものの、実効線量/線量当量の比は概ね0.7である¹⁾。

放射能は放射性物質の量を表すもので、1秒あたりの壊変数として定義されている。単位はベクレル（Bq）である。放射能と放射性物質の原子数との間には次のような関係がある。

$$\text{放射能 (A)} = \text{壊変定数} (\lambda) \times \text{原子数} (n)$$

壊変定数は放射性物質の原子1個が1秒間に壊変する確率であり、 $\lambda = 0.693 / \text{半減期 (秒)}$ の関係か

ら容易に求めることができる。

汚染核種について

原子力発電所では主に²³⁵Uの核分裂によってエネルギーを発生させ、発電している（元素記号の左肩の数字は質量数で、核内の陽子と中性子の数を表している）。これに伴って様々な核分裂生成物が誕生するが、質量数が95前後と140前後のものが多く、その多くは放射性である。福島第一原発事故では、このようにして誕生した様々な放射性物質のうち比較的揮発性の高いものが大気中に放出された。大気への放出量について国連科学委員会では表4の値を示している²⁾。このうち¹³³Xeは、放出量は飛び抜けて多いものの、不活性ガスであるため地表に沈着することはない。テルルやヨウ素はいずれも半減期が短く、事故後の初期被曝には寄与するものの、長期的な被曝や汚染の観点からは無視することができる。このため、環境の放射能汚染源として長期的に問題になるのは、半減期が比較的長く放出量も多かった¹³⁴Csと¹³⁷Csである。¹³⁴Csは半減期が2.1年のため、すでに1/100程度まで減衰しているが、¹³⁷Csは半減期が30年と長いため、今でも放出量の70%以上が残存している。なお、両核種とも β^- 壊変をして β 線と γ 線を放出する。同じ元素であるため、環境動態や体内動態は同一である。

表4 放射性物質の大気放出量の推定値

核種	物理的半減期	放出量 (PBq)
¹³² Te- ¹³² I	3.2日	29
¹³¹ I	8.0日	120
¹³³ I	21時間	9.6
¹³³ Xe	5.2日	7300
¹³⁴ Cs	2.1年	9.0
¹³⁷ Cs	30年	8.8

飼料から牛への放射性セシウムの移行

一定の汚染飼料を長期間摂取し、汚染が平衡に達した後の畜産物中の放射性物質濃度は、移行係数を用いて次のように記述される。

畜産物中濃度=移行係数×飼料中濃度×1日飼料摂取量

移行係数については、国際原子力機関³⁾など複数の機関が数値を公表しているが、農林水産省は牛肉に対する移行係数として0.038、牛乳に対する移行係数として0.0046を採用している。飼料摂取量を乳牛で64kg/日、肉牛で21kg/日として、飼料の基準値の100Bq/kg(表5)を上記の式に代入すると、牛肉で80Bq/kg、牛乳で29Bq/kgとなり、食品の基準値を超過しないことが予想される⁴⁾。しかし、同じ汚染環境で放牧された牛であっても筋肉中の放射性セシウム濃度には2倍以上の個体差があることから^{5,6)}、給与する飼料には十分に安全を見込む必要がある。

表5 放射性セシウムの基準値

対象	区分	基準 (Bq/kg)
食品	飲料水, 飲用茶	10
	乳, 乳児用食品	50
	一般食品	100
飼料	牛用, 馬用 ^注	100
	豚 用 ^注	80
	家禽用 ^注	160
	養殖魚用	40

注：粗飼料については水分8割ベース

生きている牛の汚染検査

と畜場での牛肉の検査で基準値を超過した事例は2013年以降報告されていないため、これまで畜産を継続してきた農家で今後基準を超過する虞はほとんどないと思われる。しかし、避難指示が解除された

地域で畜産を再開した農家では、飼育中に牛の汚染状況を確認できることが望ましい。

牛の生体検査のために、福島県と宮城県では大型シンチレーション検出器を用いた体外計測法を開発し、実用化している。福島県の報告では推定誤差は概ね20%以内に収まっており、スクリーニングには十分な精度である⁷⁾。しかし、この方法では牛をその装置のある場所まで運んでいくか、あるいはその装置を農家まで持っていかなければならない、気軽に測定できるものではない。

血液中の放射性セシウム濃度は体内汚染レベルを反映する。高瀬らは、筋肉と血液の放射性セシウム濃度は高い相関を示し($r=0.97$)、その比はネックで23であったと報告している⁸⁾。福田らは88頭の分析結果から放射性セシウムの筋肉(複数部位):血液比を22と⁹⁾、佐藤らはもっとも濃度の高かった筋肉部位と血液との比を22.7と報告している¹⁰⁾。これらの結果から牛の筋肉中放射性セシウム濃度の最確値は血中濃度の概ね23倍とみなして良いであろう。しかし、血液の放射性セシウム濃度が筋肉の1/23であるとすると、出荷可能であることを確認するためには定量限界として最低でも2Bq/kg程度が必要である。装置の性能にもよるが、50mLの血液(1本のシリンジで採血できる最大量)でこの感度を達成するためには6時間以上の測定が必要である。また、採血するためには獣医師に依頼する必要がある、この方法にも困難が伴う。

尿は血液よりも放射性セシウム濃度が高く、農家自身による採取が可能で、かつ大量に採取できるため、汚染検査のための試料として有望である。しかし、尿中セシウム濃度と血中セシウム濃度の相関は低く、単純な換算では精度の高い推定は困難であった。これは、腎臓における尿の濃縮度が一定ではないことが原因であるため、なんらかの方法によって濃縮度を補正する必要がある。

佐藤らは¹³⁷Csの濃縮率(尿中濃度/血中濃度)と尿中の各種パラメーターとの関係を検討した結果、クレアチニン、比重、導電率、カリウムおよび⁴⁰Kが補正因子として利用可能であった。この中で最も相関が高くかつ簡便に測定できたのは比重であり、これによる補正を加えた血中放射性セシウム濃度の

推定式は以下ようになった¹¹⁾。

$$\text{血中Cs} = \text{尿中Cs} / (\text{比重} - 1) / 329$$

この式による推定値と実測値との関係は $y=x$ の直線上に収束し(図1), 推定値の平均誤差率は16.9%と, 概ね実用的な精度が達成できた。

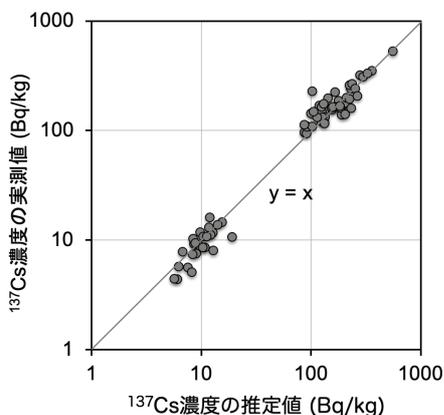


図1 尿による血液中放射性セシウム濃度の推定

牛肉の検査部位

と畜場での牛肉の検査は, 一般に頸部断面の筋肉(ネック)を用いて行われている(他の部位を用いていると畜場もある)。体内の放射性セシウム濃度が筋肉で最も高いことはよく知られており, 様々な筋肉部位の放射性セシウム濃度が均一であるか, あるいはネックで最も高ければ, この検査方法に問題はない。しかし, ネックよりも放射性セシウム濃度が高い部位があれば, ネックの検査で合格であっても基準値を超える牛肉が流通するおそれがある。

図2は, 牛肉各部位の放射性セシウム濃度をネック

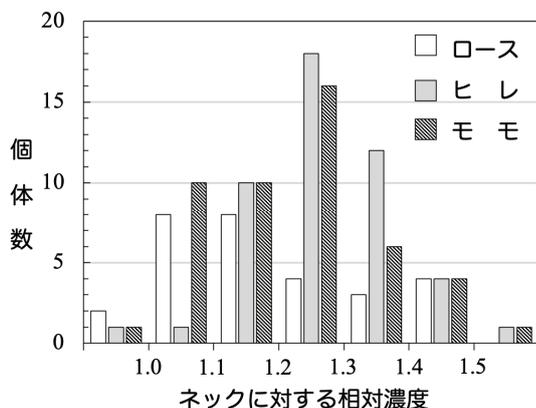


図2 牛肉各部位の放射性セシウムの濃度分布

クを基準とした相対値で示している^{12,13)}。ロース, ヒレ, およびモモの放射性セシウム濃度は大部分の個体でネックよりも高く, 統計的有意差も確認された。この調査においてネックに対する濃度比の最大値は1.57であり, 全個体のデータを合わせて計算した99%上側許容限界は1.66に達した。したがって, ネックでの検査で60Bq/kgを超えた場合には他の部位で100Bq/kgを超える可能性を排除できない。なお, 99%上側許容限界とは, 将来の観測値の99%以上がこの値以下であることを示している。

牛乳・牛肉への移行抑制

畜産物中の放射性セシウム濃度は, 食品としての基準を遵守するのみではなく, 合理的に達成しうる限り低くすることが望ましい。このためには汚染レベルの低い飼料を給与するのが基本であるが, 放射性セシウムの吸収を抑制し, あるいは体内に取り込まれた放射性セシウムの排泄を促進する方法についても古くから研究が行われている。放射性セシウムの吸収抑制・排泄促進剤として最も有効なものはプルシアンブルーであり, 人用の医薬品として承認されている。チェルノブイリ事故の後には牛に給与されて効果が認められた¹⁴⁾。しかし, プルシアンブルーは高価であり, 加えて, プルシアンブルーがシアン化合物であることは, 糞尿を農地に還元する上での懸念材料である(土壌の環境基準でシアンは不検出)。

プルシアンブルーと同様にセシウムの吸着作用を持つものにゼオライトがある。ゼオライトは鉱物の一種で, マウスを用いた実験で効果が認められているが, その効果はプルシアンブルーには及ばなかったという¹⁵⁾。福島県では, ゼオライトを乳牛に給与することによって牛乳への放射性セシウムの移行は半減したが¹⁶⁾, 一方で肉牛における排泄促進効果は認められなかった¹⁷⁾と報告している。このようにゼオライトの効果は明確ではないものの, ゼオライトは安価であり, 家畜の健康増進, 糞尿の悪臭防止等を目的に牛に給与している例もあることから, 費用対効果や安全性の観点からは可能性がある。

参考文献

- 1) ICRP Publication 74 (1996)
- 2) UNSCEAR Report 2013 (2014)
- 3) IAEA Technical Report Series 472 (2010)
- 4) 農林水産省, 家畜用飼料の暫定許容値設定に関するQ&A (2012)
- 5) Sato I, et al, Anim Sci J, 86, 716-720 (2015)
- 6) Sato I, et al, Anim Sci J, 87, 607-611 (2016)
- 7) 古閑文哉, 他, 福島農総セ研報, 特集号, 94-97 (2014)
- 8) 高瀬つぎ子, 他, Radioisotopes, 62, 281-290 (2013)
- 9) Fukuda T, et al, Anim Sci J, 87, 842-847 (2016)
- 10) Sato I, et al, Anim Sci J, 90, 1090-1095 (2019)
- 11) Sato I, et al, Anim Sci J, 88, 2100-2106 (2017)
- 12) Okada K, et al, Anim Sci J, 84, 798-801 (2013)
- 13) Sato I, et al, Anim Sci J, 88, 1021-1026 (2017)
- 14) IAEA, Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience (2006)
- 15) 佐藤 至, 他, Radioisotopes, 43, 468-473 (1994)
- 16) 生沼英之, 他, 福島農総セ研報, 特集号, 86-89 (2014)
- 17) 石川雄治, 他, 福島農総セ研報, 9, 33-38 (2018)

プロフィール

佐藤 至

1985年3月：岩手大学農学部獣医学科卒業
1987年3月：同大学院修士課程修了
1987年4月：岩手県技術吏員
1990年4月：岩手大学農学部獣医学科助手, のち助教授
2013年6月：岩手大学農学部附属動物医学食品安全教育研究センター教授