

ゼオライトを給与した黒毛和種牛の体内放射性セシウム濃度の推移

石川 雄治¹・古閑 文哉²・内田 守譜³・矢内 伸佳・渡邊 鋼一・佐藤 亮一

Changes of Internal Radioactive Cesium Concentration
in the Body of Japanese Black Cattle Supplemented Zeolite

Yuji ISHIKAWA¹, Fumiya KOGA², Moritsugu UCHIDA², Nobuyoshi YANAI,
Koichi WATANABE, Ryoichi SATOU

Abstract

This study examined to shorten the period to feed the clean food for contaminated Japanese Black cattle by radioactive cesium, and to test the effect of addition of zeolite whether it can facilitate the discharge of radioactive cesium from the body. The radioactive cesium concentration of blood, urine, feces and femoral muscle by cattle living body radioactivity estimate equipment were measured during clean feed intake period. As a result, zeolite addition in clean food was not to facilitate the discharge of the overall radioactive cesium in the body. Effect of zeolite addition, it was not clear to the discharge effect of radioactive cesium from the body.

Key Words : internal radioactive cesium concentration, Japanese Black cattle, zeolite supplement
キーワード：体内放射性セシウム濃度、黒毛和種、ゼオライト給与

1 緒言

東日本大震災により発生した原子力災害での放射性物質の拡散により汚染された稲ワラを介して牛の体内に放射性セシウムがとりこまれ、2011年7月に福島県南相馬市から出荷された牛肉から食品の暫定規制値を超過する放射性セシウムが検出された。これ以後、約1ヶ月半に渡り福島県内で飼養される肉牛の出荷規制措置が執られた。解除に向けて県は、放射性物質を含まない安全な飼料給与履歴を確認した農家から肉牛の出荷を再開し、併せて出荷予定牛の血液中の放射性セシウム濃度を測定し出荷の可否を判断することで、食肉で暫定規制値超過の恐れのある牛が出荷されることのないように対策を講じてきた。2012年4月には、食品衛生法で牛肉を含む食品の新たな基準値が 500Bq kg^{-1} から 100Bq kg^{-1} に変更されたことに伴い、繁殖雌牛等に対する牛用飼料中の放射性物質濃度の暫定許容値は $3,000\text{Bq kg}^{-1}$ から 100Bq kg^{-1} （水分80%換算）に変更された。

こうした背景から、県内の廃用予定牛は出荷できず滞留することになり、継続飼養を余儀なくされたため、畜産農家の経営的負担となった。当時、福島県農業総合センター畜産研究所（以下、当畜産研究所）は、泌乳牛に放射性セシウムを含む飼料にゼオライトを添加すると、飼料から生乳への放射性セシウムの移行を抑制できることを確認した⁷⁾。一方、小林ら(1998)⁵⁾は、体内に入った放射性セシウムは、腸管-腸管サイクルという代謝経路により、上部消化管から吸収された放射性セシウムが下部消化管へ分泌され再吸収される過程の中で、放射性セシウム吸着能力を持つ物質が放射性セシウムを捕捉し、下部消化管の腸管壁からの放射性セシウム再吸収を阻害することで、糞中への放射性セシウム排出を促進することを報告している。

そこで、放射性セシウム汚染牛の体内からできる限り早期に放射性セシウムを排出させることを目的として、暫定許容値以下の放射性セシウムを含む飼料を給与した低濃度汚染モデル牛を作出し、清浄飼料による飼い直し期間中に放射性セシウム吸着能力の高いゼオライト製品を飼料に添加して摂取させ、その効果を検討した。また、調査では、科学技術振興機構（以下、「JST」）委託研究課題として開発した牛生体放射能測定装置⁶⁾による牛生体の体内放射性セシウム濃度の推移の確認も行った。

2 試験方法

(1) 試験区の設定

2013年2月当畜産研究所沼尻分場（福島県耶麻郡猪苗代町）飼養の黒毛和種繁殖雌牛4頭を、当畜産研究所（福島県福島市荒井）牛舎に移動し、2013年7月28日までの約5ヶ月間、放射性セシウムを含まない飼料（輸入チモシー乾草）のみの給与で舎飼馴致した。血液、尿、及び糞中の放射性セシウム濃度が検出限界以下（以下、「N.D.」）であることを確認し、併せて牛生体放射能測定装置により推定される筋肉中の放射性セシウム濃度がN.D.であることを確認後、試験に供した。

低濃度汚染モデル牛は、個体間に間隙を設けた牛床にスタンション繋留し、水分80%換算 100Bq kg^{-1} に調製した飼料（以下「調製飼料」）を1日1頭当たり7kg、1ヶ月間摂取させて作出した。その後、清浄飼料給与試験に移行し、放射性セシウムを含まない飼料（購入輸入チモシー乾草）6kg、肥育用飼料（沼尻肥育用飼料；北日本くみあい飼料）1kgに、A飼料ゼオライト（商品名：フィードボンド；出光興産、東京）を1日当たり200g給与する試験区2頭と、ゼオライトを給与しない対照区2頭を設けた。これは、生沼ら⁷⁾（2013）が乳牛に対してTMR飼料にゼオライト200gを添加し、放射性セシウムの移行抑制効果を確認した試験と同様に設定した。

試験は、2013年7月29日から2014年1月22日までを第1期試験とし、その後5ヶ月の馴到期間を経て2014年6月2日から2014年12月9日までを第2期として2回に分け、反復して試験を実施した（図1）。

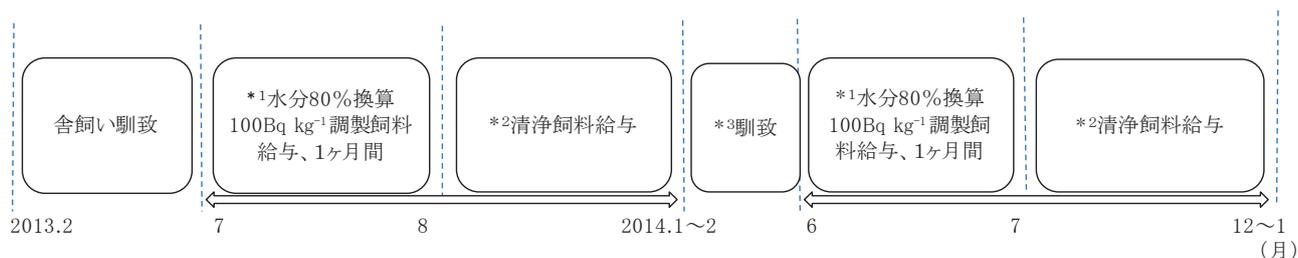
(2) 調製飼料の調製方法

当畜産研究所の圃場でフォールアウト後に慣行法で栽培したペレニアルライグラスの一番草のロールサイレージ（2011年5月生産）を電動式ワラ切りカッターで約30~50mm長に細断、乾燥（天日乾燥、送風乾燥機併用）後、同様に細断した購入輸入チモシー乾草と混合して放射性セシウム濃度を水分80%換算 100Bq kg^{-1} に調製した。

(3) 調査項目及び分析方法

清浄飼料給与期間中の血液、尿、糞、及び牛生体の放射性セシウム濃度を経時的に測定した。

血液は、頸静脈から約550mlを輸血用バッグ（テルモ血液バッグPCD；テルモ株式会社、東京）に採取し、マリネリ容器（700ml用）に移し替えて、



*1: H23産ロールサイレージを細断し、乾燥させた飼料を輸入牧乾草と混合調製したものを(3,234Bq/day/head)給与した。

*2: 試験区:ゼオライト200g/day添加、対照区:ゼオライト無添加

*3: 清浄飼料(輸入牧乾草)のみ給与した。

図1 試験のフロー

ゲルマニウム半導体検出器（以下、「Ge検出器」）で2,000～100,000秒測定した。

尿は、尿道カテーテルを用いて導尿して約700～1,000ml採取、あるいは排尿時にビニール袋に採取したものを、マリネリ容器（700ml用）に移し替えて、Ge検出器で2,000～50,000秒測定した。血液、尿ともに規定量に満たない検体は蒸留水でメスアップし測定した後、実際の濃度に換算した値を測定値とした。

糞は、24時間に排泄した糞全量をビニール袋で覆ったプラスチック製コンテナに個体毎に採取し、均一に混合した後にV11容器（約1,000ml）に充填し、NaI (TI) シンチレーションスペクトロメータ (CAN-OSP-NAI, CANBERRA製) により40,000～100,000秒測定した。

筋肉中の放射性セシウム濃度の推定には、牛放射能測定装置⁶⁾を使用した。すなわち、遮蔽装置の施された専用の保定枠場内に牛を保定し、尻尾側後方の腿に鉛で遮蔽したコリメータ付きの5インチNaI検出器 (SAINT-GOBAIN製) を密着させて、5分間ガンマ線スペクトルを測定した。スペクトルデータは、Code Fukushima (スカラベコーポレーション、仁木工芸株式会社) を用いて解析し推定した。

さらに、筋肉中放射性セシウム濃度の測定は、外科的に局所麻酔を施した上で最後肋骨から約10cm後方の臍部を縦に15cm程度切開して皮下筋層の外腹斜

筋、内腹斜筋を約25g採取し、U8容器に充填後Ge検出器により10,000～20,000秒測定した。

3 試験結果及び考察

(1) 調製飼料給与終了直後の生体内放射性セシウム濃度

調製飼料1ヶ月間摂取直後の血液の放射性セシウム濃度は3.5Bq kg⁻¹、牛筋肉中の放射性セシウム濃度は53Bq kg⁻¹、このときの筋肉/血液の比は16.3 (表1) であり、帰還困難区域 (旧警戒区域) 内で継続的に高濃度の汚染飼料を摂取した「放れ牛」を安楽殺した時のデータから血液の放射性セシウム濃度の約28倍が筋肉内放射性セシウム濃度と推定できるとした内田ら (2013)⁹⁾ の報告とは異なった。この要因の一つとして内田ら (2013)⁹⁾ の報告で採取した筋肉の部位は首であり、本試験との筋肉採取部位の違いがあることが考えられた。

また、摂取した飼料から牛の筋肉への移行係数の平均値は0.016 (表1) であり、国際原子力機構 (IAEA) の示す平均値 (IAEA資料2010)²⁾ の0.022、檀原ら (1963) が汚染調製飼料から計算した値の0.021¹⁾、Johnsonら (1969) の0.022⁴⁾、さらに農水省で試算した値の0.038よりも低い値であった。

(2) 清浄飼料給与期の生体内放射性セシウム濃度の推移

清浄飼料給与期間中における、牛体内を循環する

表1 調製飼料摂取終了直後の血液、尿、筋肉の放射性セシウム濃度

	n	平均値	標準偏差	最大値	最小値
血液 (Bq kg ⁻¹)	8	3.5	1.1	5.1	2.0
尿 (Bq kg ⁻¹)	8	58.2	12.9	81.0	42.0
筋肉 (Bq kg ⁻¹)	8	53.0	6.1	61.7	45.9
移行係数 [*] (day kg ⁻¹)	8	0.016	0.002	0.019	0.014
筋肉/血液の比		16.3	4.7	23.4	9.7
筋肉/尿の比		0.9	0.2	1.1	0.7
尿/血液の比		17.6	5.5	26.1	11.3

※移行係数 = 牛筋肉1kg中の放射性セシウム濃度 (¹³⁴⁺¹³⁷Cs kg⁻¹) / 摂取した飼料中の放射性セシウム量 (¹³⁴⁺¹³⁷CsBq day⁻¹)

表2 糞中、尿中および血液中放射性セシウム濃度 ($^{134+137}\text{Cs}$) \pm 誤差

		(Bq/kg)									
		ゼオライト/調製飼料摂取終了		0	7	14	28	42	56	70	84 (日後)
血液	添加有 (n=4)	3.5 \pm 0.8	2.2 \pm 0.5	1.5 \pm 0.3	0.9 \pm 0.1	0.6 \pm 0.1	0.3 \pm 0.1	0.3 \pm 0.0	0.3 \pm 0.1	0.2 \pm 0.1	
	無添加 (n=4)	3.5 \pm 1.4	2.5 \pm 1.1	1.6 \pm 0.8	0.8 \pm 0.4	0.6 \pm 0.3	0.4 \pm 0.1	0.3 \pm 0.1	0.3 \pm 0.1	0.2 \pm 0.0	
尿	添加有 (n=4)	62.1 \pm 13.8	36.3 \pm 12.0	20.4 \pm 4.1	13.0 \pm 6.5	9.6 \pm 1.4	6.1 \pm 1.8	5.1 \pm 1.8	4.7 \pm 1.8	3.7 \pm 0.3	
	無添加 (n=4)	54.2 \pm 12.6	36.2 \pm 11.6	26.5 \pm 9.8	14.9 \pm 6.5	8.5 \pm 5.1	5.0 \pm 1.5	4.7 \pm 1.8	4.3 \pm 2.1	3.7 \pm 0.3	
糞	添加有 (n=4)	206.8 \pm 32.35	21.9 \pm 4.4	15.51 \pm 3.6	7.7 \pm 2.0	6.8 \pm 1.4	3.3 \pm 1.2	2.9 \pm 0.8	2.4 \pm 0.8	2.4 \pm 0.8	
	無添加 (n=4)	132.0 \pm 22.28	17.3 \pm 3.4	14.7 \pm 3.0	6.1 \pm 1.6	4.7 \pm 1.3	2.3 \pm 0.8	2.1 \pm 0.8	1.4 \pm 0.7	1.4 \pm 0.7	

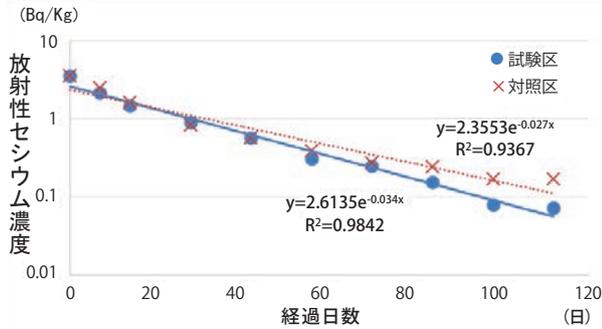


図2 血液中の放射性セシウム濃度の推移

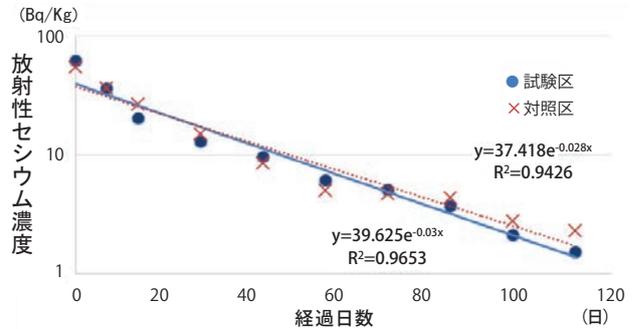


図3 尿中放射性セシウム濃度の推移

血液、牛が排出する尿及び糞中の放射性セシウム濃度を測定した。

血液中の放射性セシウム濃度は、両区とも調製飼料摂取終了後から28日後までに0.9Bq kg⁻¹程度に急激に低下し、以後、112日後にかけて漸減していくことを確認した(表2、図2)。

尿中の放射性セシウム濃度は試験区では調製飼料摂取終了後から14日後にかけて急激に減少し、以後、112日後にかけて漸減していくことを確認した。生物学的半減期は、試験区で23.1 \pm 1.5日、対照区で25.2 \pm 2.2日と推定され、試験区が対照区よりも早い時期に低下する傾向が見られたが区間に有意差はなくゼオライトの効果は確認されなかった(図3)。

なお、尿中放射性セシウムの生物学的半減期について、伊藤ら(2012)³⁾は、東京電力福島第一原子力発電所事故後に実施した試験において、尿中の放射性セシウム濃度から求めた生物学的半減期は14日と報告している。今回の結果はこれよりも10日ほど長い日数であった。一方、内田ら(2013)⁹⁾は、フォールアウト後に収集した3,000Bq kg⁻¹程度の高濃度の放射性セシウムを含む粗飼料を4ヶ月間給与した牛では、尿中放射性セシウムの濃度は給与中断後9日目までと44日目以降とは異なる生物学的半減期で減衰し、0~9日間では7.1日、44~128日間では37.4日と報告している。本試験では、給与中断後14日までの減衰率はそれ以降の減衰率よりも大きかったものの、全期間から推定された指数関数を用いた減衰曲線の適合度は両区とも高かったことから(試験区R=0.9653、対照区R=0.9426)、2つの減衰パターンに分ける必要性は低いものと考えられた(図3)。

調製飼料給与中の糞中放射性セシウム濃度の測定においては、飼料から放射性セシウム量として1日1頭当たり3,234Bq摂取し、糞には、試験区、対照区の両区平均2,374Bqが排出されたことから、摂取した飼料中放射性セシウムの約73%が体外へ排出されたことを確認した。また、試験区、対照区ともに調製飼料摂取終了後から7日後に糞中に排出された放射性セシウム量は、調製飼料摂取終了時の約10分の1程度にまで減少していた(図4、表2)。清浄飼料給与に移行後の糞中放射性セシウム量の生物学的半減期は、試験区14.1 \pm 2.5日、対照区13.1 \pm 1.9日で区間に有意差はなく、ゼオライト給与の効果は確認されなかった。

生沼(2013)⁷⁾らは、ゼオライトを混合した放射性セシウムを含むTMR(完全混合飼料)を給与したとき、ルーメン内や下部消化管で遊離放射性セシウムイオンがゼオライトに吸着されることで体内への放射性セシウムの吸収が阻害されると推察している。一方、小林ら(1998)⁵⁾は、前述したように、上部消化管から吸収された放射性セシウムが下部消化管へ分泌され再吸収される過程の中で、放射性セシウム吸着能力を持つ物質が放射性セシウムを捕捉し、下部消化管の腸管壁からの放射性セシウム再吸収を阻害することで、糞中への放射性セシウム排出を促進することを報告している。また、伊藤(2012)³⁾らは、プルシアンブルーによる放射性セシウムの排泄促進効果は、ルーメン内容物中の放射性セシウムをプルシアンブルーが吸着する作用により血中や体内への移行が抑制されることによるものであり、体内に取り込まれた放射性セシウムの排泄が促進されたためではないと示唆している。

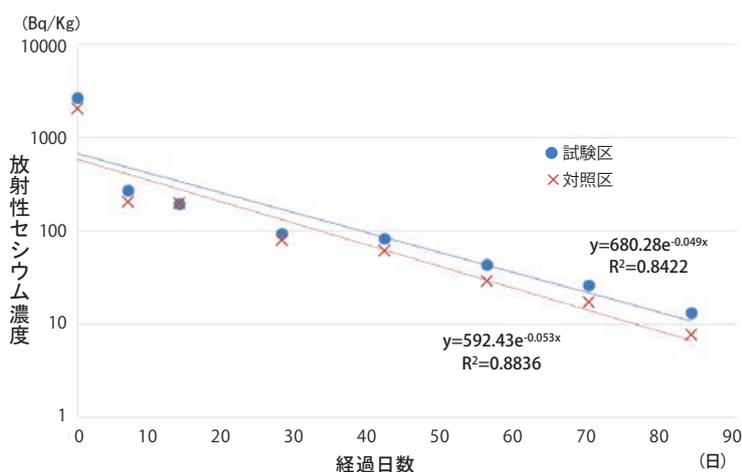


図4 1日当たり糞中放射性セシウム量の推移

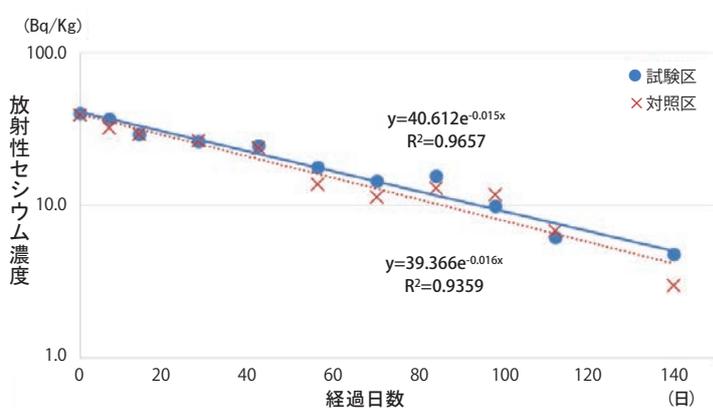


図5 牛生体放射能測定装置により推定した生体内放射性セシウム濃度

本試験では、消化器官内容物中及び体内に取り込まれ下部消化管から排泄される放射性セシウムを吸着させ、再吸収を阻止することにより放射性セシウムの排泄促進を図る目的で調製飼料給与終了後、清浄飼料とともに飼料用ゼオライトを給与したが、前述したように糞中に排出された放射性セシウム量及び糞中放射性セシウム量の生物学的半減期に有意差は認められず、ゼオライトの放射性セシウム排泄促進の効果は確認できなかった（表2、図4）。

これは、伊藤（2012）³⁾ らが行ったプルシアンブルーによる研究と同様の結果であった。

牛における摂取飼料の消化管内通過速度を踏まえると、調製飼料摂取終了から7日を経過した時点では、牛が摂取した放射性セシウムは、ルーメンを含む胃の内容物にはほとんど存在せず、その後の糞中に検出された放射性セシウムは生体内から消化管へ排出されたものと考えられた。また、調製飼料給与

時に摂取した放射性セシウム量が少なく、下部消化管腸管壁からの分泌量が極めて少なかったためにゼオライトによる吸着量は僅かであり、糞中への放射性セシウムの排出促進に十分な効果を及ぼさなかったとも考えられた。

(3) 牛生体の体表から推定した牛筋肉内放射性セシウム濃度

調製飼料摂取終了直後から経時的な筋肉内放射性セシウム濃度の推移を確認するために、牛生体放射能測定装置を用いて、牛体内放射性セシウム濃度を推定した（図5）。

ゼオライト添加の有無に関わらず、体内の放射性セシウム濃度は調製飼料摂取終了後から漸減していき、高瀬（2013）⁸⁾ らが牛体内のコンパートメントモデルで示唆したように、牛の筋肉からは、血液や尿の減衰パターンとは異なり非常に緩やかに放射性

セシウムが排出されることが確認された。また、牛の筋肉に取り込まれた放射性セシウムの生物学的半減期は、調製飼料摂取終了後から試験区 46.2 ± 2.9 日、対照区 $43.3 \text{日} \pm 3.8 \text{日}$ と区間に有意差はなかった。

4 摘要

飼料由来の放射性セシウムにより体内が汚染された黒毛和種雌牛の飼い直し期間を短縮するために、ゼオライト給与による放射性セシウムの排出促進効果を検討した。試験では、清浄飼料にゼオライトを添加して給与した期間中の血液、尿及び糞の放射性セシウム濃度を測定するとともに、牛放射能測定装置により筋肉中放射性セシウム濃度の推定を行ったが、ゼオライト給与による放射性セシウムの排出促進効果は確認できなかった。

5 謝辞

本研究の実施にあたり、黒毛和種牛の生体内放射能測定においてはJST委託研究課題で開発した装置を活用させていただいた株式会社コムテックエンジニアリング立谷辰雄様、菅原裕利様、日本環境調査研究所茂木道教様、村山敏様、泉雄一様、東北大学電子光理学研究センター大槻勤様（現：京都大学原子炉実験所）、福島大学理工学類河津賢澄様、高瀬つぎ子様、のご厚意に感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 檀原宏・野崎博・三橋俊彦.1963.牛肉のCs-137汚染濃度.畜産の研究 17,11,77-88.
- 2) Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments.2010.International Atomic Energy Agency (IAEA) 472,82-96.
- 3) 伊藤伸彦.2012.福島第一原発事故後による畜産物への影響とその克服-20km圏内の汚染家畜を活用した研究-.日獣会誌 65: 645-652.
- 4) J.A.Johnson, T.R.Tyler, G.M.Ward.1969.Transfer of fallout Cs-137 from feed to meat of cattle, J.Animal Sci 29,695-699.
- 5) 小林信義・山本泰・明石真言.1998.放射線事故時におけるセシウム除去としてのプルシアンブ

ルー.保健物理 33, 323-330.

- 6) 古閑文哉・石川雄治・内田守譜・白石芳雄・遠藤孝悦・大槻勤・河津賢澄・高瀬つぎ子・立谷辰雄・菅原裕利・村山敏・茂木道教・泉雄一・石橋寿永.2013.繁殖和牛生体からの「と体」筋肉中放射性セシウム濃度の推定.福島県農業総合センター研究報告放射性物質対策特集号 94-97.
- 7) 生沼英之・齋藤美緒・小田康典・遠藤孝悦.2013.泌乳牛におけるゼオライトによる放射性セシウム移行抑制効果.日畜会報 84 (3) :333-339.
- 8) 高瀬つぎ子.2013.ウシの体内での放射性セシウムの分布-コンパートメントモデルによる解析-. RADIOISOTOPES 62:281-290.
- 9) 内田守譜・石川雄治・古閑文哉・高瀬つぎ子・大槻勤.2013.和牛繁殖雌牛における筋肉中放射性セシウム濃度の尿からの推定.福島県農業総合センター研究報告放射性物質対策特集号 90-93.