

## 高エネルギーの電解水素水は福島第一原子力発電所の災害による 内部放射線被ばくを減少させる

### 抄録

2011年3月11日に福島第一原子力発電所の災害が福島県全体に放射線障害を引き起こした。セシウムは土壌や植物に吸収され、家畜に移行した。農場の動物およびヒトの体から放射性セシウムを除去することは必至ある。最近、 $H_2$ は、活性酸素を捕捉することで酸化ストレス関連疾患を抑制することが報告されています。報告によると、「活性水素」（水素水）は活性酸素を取り除く。我々は、高エネルギーの電解水素水が効果的に家禽から放射性セシウムの除染の可能性を検証した。試験群家禽には、高エネルギーの電解水素水を給水し、対照群家禽には、通常の水を給水した。セシウムの内部被曝線量は、対照群に比べて試験群でセシウムの排泄より大量であった可能性が高く、対照群家禽に比べての試験群家禽で有意に低かった。試験群の家禽組織ではセシウム 137 の濃度が対照群に比べて低いことが認められ、高エネルギーの電解水素水がニワトリ組織に組み込まれセシウム 137 の排出の速度を増加させたことを示している。

### 導入

2011年3月には、日本は大地震（マグニチュード 9.0）とその後の津波に見舞われた。これらの事件は、福島第一原子力発電所の原子炉を破壊し部分的なメルトダウンを引き起こした。大量放射性物質が大気、海水、土壌中に放出され福島県に深刻な放射能汚染をもたらした。発電所から半径 20 キロ内の家畜が汚染された。人々は避難したが、所有する家畜を避難地区に同行することはできなかった。しかしながら、家畜は、食肉として一般に販売することがないことを条件に、動物を殺処分することを免れた。

被災地からの汚染された肉は、食品供給ルートに入ることは許されず、適時適切な経営判断は、人の健康を守るために適宜必要な処置が必要であった。どのように動物を除染する方法について何時どのように行われるべきか意思決定をする必要がある。いくつかの注意が動物の生産設備、車両、枝肉の汚染除去が注目されているが、まだ生きている動物の汚染除去に関心が払われていない。多数の動物を除染するための効率的な方法が開発され、検証される必要がある。

2013年7月、当社は福島第一原子力発電所の 60 キロ東にある中央郡山市の傾斜地域領域で空気中の放射線レベルを測定した。放射線量は、サンプリング領域における地上 0.1 m で 0.3 から 1.3 マイクロシーベルト/h であった。いくつかの高線量の地点（放射線量が 1.3 マイクロシーベルト/h の「ホットポイント」）が斜面の下部に発見され、放射性物質が雨水によって下り坂を運ばれていたことを示唆された。

セシウムは土壌に吸収され、一部はその後、植物によって吸収され、家畜に転移する。食物連鎖を通じての放射性セシウムの移動は大いに関心が持たれている。農場の動物およびヒトの体からセシウムを除去する方法を見つけることが不可欠である。

「水素水」は、いくつかの疾患における臨床的改善が観られるとされています。活性酸素を効果的に「活性水素」によって相殺すると推論されています。水素水は、活性酸素を除去し、酸素ラジカルによる損傷から DNA を保護する[1]。電解水では、活性酸素が陰極近くで減少し、陽極近くで多く認められる。水素水は、低溶存酸素濃度、高溶存水素濃度、および有意な負の酸化還元電位を認める。

電解水素水は、活性酸素を除去し、酸化的損傷から DNA を保護する多くの水素分子(H<sub>2</sub>)が含まれている[2]。最近、H<sub>2</sub>は、反応性活性酸素を捕捉することで、種々の酸化ストレス関連疾患を抑制することが報告されています[3]。しかし、これが発生するメカニズムは不明である。我々は、本研究で高エネルギーの電解水素水が効果的に鶏を除染するという仮説に基づきニワトリから放射性セシウムの除去を試みた。

最近の研究では、H<sub>2</sub>はリンパ節細胞および腸陰窩細胞における放射線誘発急性傷害を抑制することが見出された[4]。しかしながら、試験管内での実験で使用した H<sub>2</sub>豊富なリン酸緩衝液は、活性酸素の捕捉する分子機構の検討が無かった。その研究では、H<sub>2</sub>豊富な青色緑水の1回腹腔内注射をマウスに行い、その後、放射線照射損傷が抑制されることが確認された[4]。生体組織への照射の有害な影響は、主にヒドロキシルラジカル(OH $\cdot$ )の発生に関連している。H<sub>2</sub>はOH $\cdot$ を選択的に減少させ、*in vitro*試験におけるペルオキシ亜硝酸基(ONOO $\cdot$ )濃度および中大脳動脈閉塞のラットモデルにおける治療の抗酸化活性を有することが見出された[3]。他の研究では、H<sub>2</sub>は培養ヒト細胞とマウスの胃腸管へのガンマ放射線からの防護効果が示された[6,5]。

## 材料と方法

土壌試料は、福島県いわき市の北部にある個人所有の農地と福島市の南部から土地所有者の同意を得て収集した。農地からの土壌サンプルを採取しても、絶滅危惧種や保護種に影響を及ぼすことはなかった。放射性セシウムは、生理食塩水と土壌サンプルを混合し、12時間95°Cで混合物をインキュベートすることにより抽出した。混合物を冷却した後、上清を濾過フィルターで滅菌した。この研究で使用される各家禽の腹腔内に、土壌抽出物の1.5ベクレル/mL溶液の20mLで注入した。各家禽は実験開始時の体重は2.5Kg。抽出物中の放射性セシウム濃度は、ガンマ線スペクトロメータ(LB2054, ベルトールドテクノロジーズ社&Co. KG社, Bad Wildbad, Germany)を用いて測定した。

実験に使用した家禽は、福島県でのみ飼育されている品種の会津地鶏を用いた[7]。鶏は、福島県の放射能で汚染されていなかった会津地域から購入した。会津地鶏の飼育と販売は福島県によって承認されている福島県畜産研究センターと会津地鶏ネットのみ許可されている。にんじん舎社会福祉法人の所有する農場は、会津地鶏を飼育する事が福島県畜産研究センターから承認を受けている。100日齢であった家禽は郡山に運搬され、そこで飼育した。我々は、福島県によって承認された会津地鶏の繁殖、輸送方法に従った。ほこりや雨が入らないように設計された新しい飼育小屋は、放射能汚染が排除するために新たに構築した。

家禽は、二つの群に分けた。試験群は飲料水として高エネルギーの電解水素水を与えられた、対象群は通常水（原水：高エネルギーの電解水素水を製作する同一の水道水）を定期的に与えられた。家禽は家畜に分類されているので、研究を実施するための倫理的承認は必要とされなかった。しかし、私たちは鶏を犠牲にするために、所属機関の倫理委員会から承認を得た。実験は広島大学での動物実験委員会のガイドラインと広島大学での基礎研究や開発のための自然科学センター所属の実験動物科学研究施設運営委員会の承認を受けた（許可番号 A13-110）。各家禽は、それが屠殺にされる時苦痛を最小限にするように断頭した。

高エネルギーの電解水素水は、三相交流電力を用いて 60 分間、200V で電気分解することによって調製した。電解は、ステンレス鋼の電極を搭載した 80-L バッチタイプの装置で行った（GFX11-MA001, 聖環境開発 (株)、福島県日本）。調製された高エネルギーの電解水素水は 6.8 の pH および 0.3 / ml の溶存水素濃度を有していた。これは水道水 (pH は 6.6、溶存水素濃度 0.2  $\mu$ g / mL で、酸化還元電位、523 mV で、溶存酸素濃度が 7.69 ミリグラム / l と比較して低い酸化還元電位 (521 MV) 及び低溶存酸素濃度 (2.59 ミリグラム / L) を有していました。ここに表示した数値は中間値で、全ての測定方法は、認定された機関において室温で行った。測定の方法は、日本の厚生労働省によって承認されている。

飼育小屋は、約 35 平方メートルの面積を有していた。小屋は、半分に試験群、も一方の半分に対照群を占有した。各家禽は、自由に水や食料を摂取していた。放射性セシウムが注入された後、全ての排泄物を毎日採取した。集めた排泄物を乾燥させ、乾燥した排泄物の放射能を測定した。第 1, 第 3, そして第 5 週に各群 3 羽ずつの家禽が注射後に屠殺しました。食品として高く評価される「ささみ」、「胸肉」、および「もも肉」と呼ばれる筋肉を、凍結 VD-16 凍結乾燥機 (タイテック社、埼玉県) 用いて乾燥した。各試料中のセシウム 137 と 134Cs は、上記ガンマ線スペクトロメータを用いて 18 時間計測した。結果は、乾燥重量で表されている。

## 結果

両群の家禽は、同様の体重増加があったが、体重増加は、会津に美里にて飼育した家禽の体重増加変化と類似していた。異なるグループからの組織サンプルの乾燥重量は、有意差はなかった (図 1)。試験群による排泄物中の放射性セシウム線量は、初日に高かったが、二日目でははるかに低下した。しかし、対照群の排泄物中の放射性セシウム濃度は、最初の日の試験群の排泄物中の線量の 30% であり、試験群二日目の排泄物中の線量よりも高い (図 2)。三日後の試験群と対照群の排泄物中の放射性セシウム線量の間には有意差はなかった。各組織の乾燥重量におけるセシウム 137 と 134Cs 濃度の経時変化グラフに表した (図 3)。線量は第 3 週において、もも肉以外で最大値に達したのに対し、もも肉中の 134Cs 濃度は、注射後 1 週間で最大に達した。実験では、4 年前に原子力災害後に発生したため、セシウム 137 よりも短い半減期を有する 134Cs は、検出することは困難であった。家禽の試験群と

対照群の  $^{134}\text{Cs}$  線量に有意差はなかった。

セシウム 137 の濃度は、注入後に最も顕著に 3 または 5 週目に、注射後、ほとんど常に対照群より試験群からのサンプルで低かった (図 4)。しかし、対照群のささみでセシウム 137 の濃度は、第一及び第 3 週の間増加し、その後 5 週減少し、より多くの末梢組織への腹腔からの放射性セシウムの移行を反映しています。5 週目では、試験群のささみのセシウム 137 の濃度は、対照群のささみのセシウム 137 の濃度の 20% 未満でした。ささみは、カリウム豊富で、カリウム、セシウムはささみで緩慢に交換されると考えられる。セシウム 137 の濃度は、試験の終了時に、対照群の組織におけるよりも試験群の組織において低かった。

全体的に、セシウム 137 の濃度は、注射後 3 と 5 週間目で対照群の組織より試験群の組織において ~40% 低かった。したがって、我々は、高エネルギーの電解水素水を飲むことは、放射性セシウム 137 が効率的に家禽の体内から取り除かれる要因となったと結論づけた。

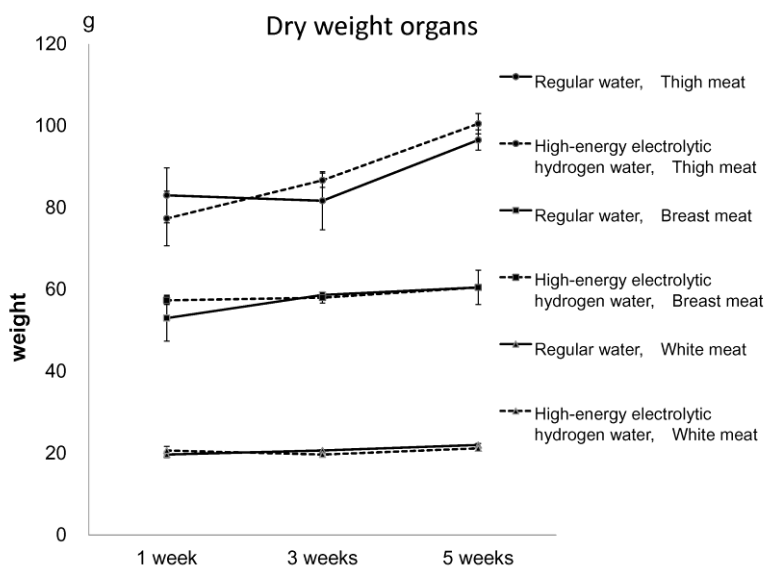


Figure 1

図 1 試験群と対照群の家禽から組織サンプルの乾燥重量。

もも肉は、実験の 5 週間を通して体重が増加したが、他の組織では体重が増加はわずかであった。試験群と対照群の有意差は認められなかった (\*  $P < 0.05$ 、各群標本数は  $N=3$ )。

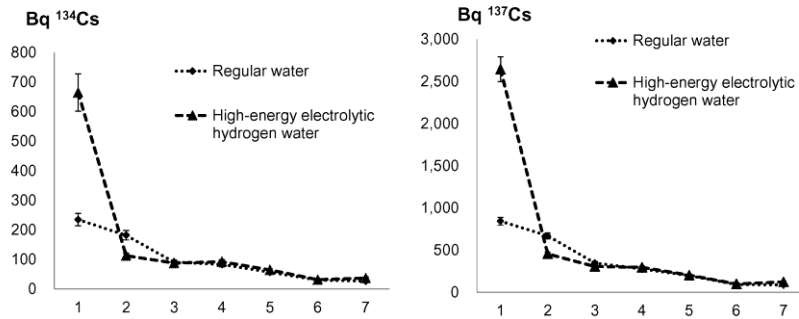


Figure 2

図2 (高エネルギーの電解水素水を飲用した) 試験群家禽と(原水:高エネルギーの電解水素水を製作する同一の水道水) 対照群家禽の排泄物中の放射性<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Csの線量。試験群鶏は注射の翌日に大量に排泄した。対照群の鶏から排泄される放射性セシウムの量は、注射後に緩慢に減少した(\*P<0.05、各群標本数はN=3)。

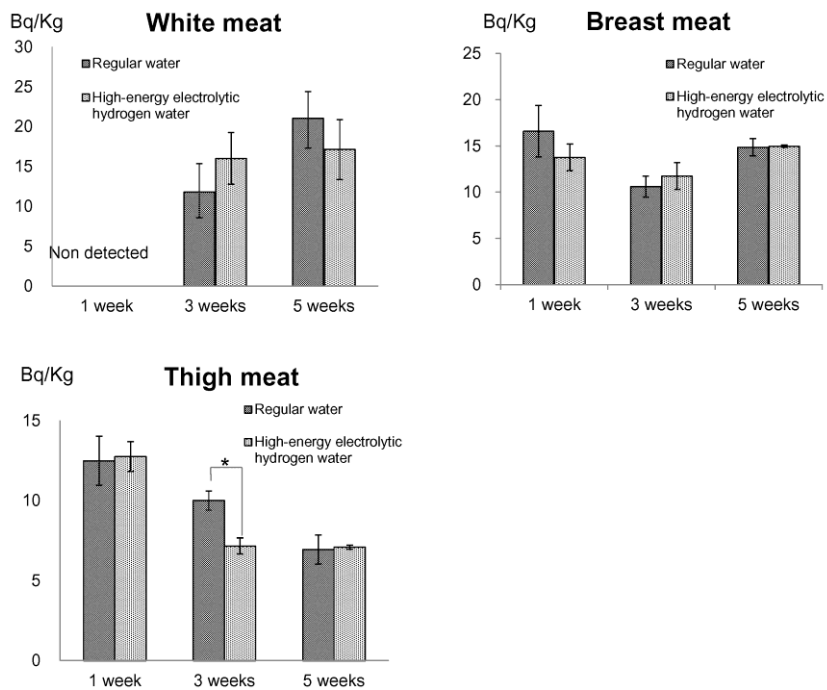


Figure 3

図 3.  $^{134}\text{Cs}$  濃度の放射性セシウム投与後の異なる時点で各組織における、試験群および対照群家鶏の線量推移 (Bq/kg 乾燥重量)。ささみ中の濃度は経時的に増加した。胸肉中の濃度は、最初に減少し、その後増加した。もも肉中の濃度は、時間の経過とともに減少した。異なる組織における経時変化は有意に異なっていた (\*  $P < 0.05$ 、各群標本数は  $N=3$ )。

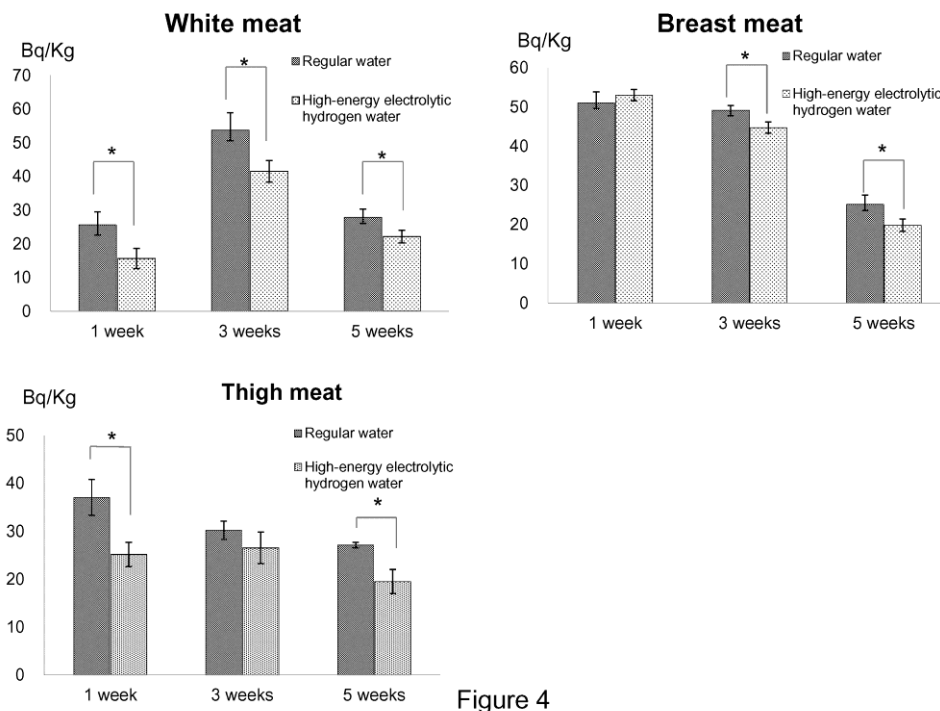


Figure 4

図 4.  $^{137}\text{Cs}$  濃度の放射性セシウム投与後の異なる時点で各組織における、試験群および対照群家鶏の線量推移 (Bq/kg 乾燥重量)。ささみ中の濃度は経時的に増加した。特に 5 週間注射した後の線量は対照群の家禽に比べて試験群家禽で有意に低かった。胸肉ともも肉中の線量は、注射後 1 週間の最大値に達したが、ささみ中の濃度は、3 週間注射後で最大値に達した (\*  $P < 0.05$ 、t 検定)。

## 討論

セシウム 137 を腹腔内に注入することでセシウムが比較的迅速に各々の組織により取り込まれた。ささみ試料中のセシウム 137 の濃度は、3 週間注射後に最大値に達した。むね肉試料中のセシウム 137 の濃度は、最初の週に高かった。ささみはむね肉、もも肉よりもより

多くのカリウムが含まれている[8]。セシウムとカリウムは、どちらもアルカリ金属で、ささみでは他の臓器に比べてカリウムが豊富なため、他の臓器よりゆっくりとセシウム 137 に交換されたと考えられる。

放射性セシウムは、3,5 週間注射後に分析した組織のすべてにおいて見出された。しかし、セシウムの多くは、家禽から排泄し、これを対照群の家禽に比べて試験群鶏でより急速に排泄された。セシウム 137 の濃度は、対照群の組織よりも試験群の組織で有意に低かった。高エネルギーの電解水素水を投与した場合、汚染された家禽における放射性セシウム濃度が低下した。我々は、放射性セシウムがより迅速に通常水よりも体外に放出されると結論付けた。

食用とする事の出来ない汚染された家畜を処分する費用がかかる。しかし、生きた家畜を除染することは、市場に供給しうるか否かに係わらず重要です、家畜を除染しても食肉として提供する事はできませんが家畜の処分のコストを減少させる。

福島県の食品中の放射性セシウム濃度が日本の保健省、厚生労働省令で定める安全基準を超えたため汚染された食品が生産者によって破棄されることは非常にまれである。私たちは、時間をかけて家禽から放射性セシウムの除去を監視した。

高エネルギーの電解水素水経口摂取によって、家畜や人間の内部被ばくによる、放射性セシウムを効率的に排泄を促進することが期待される。私たちは福島震災前から行われてきた家禽の飼育条件に従い、電解高エネルギーの水素水の投与で効果的に放射性セシウム内部被曝した家禽を除染が可能かを評価しました。

電離放射線の有害な生物学的効果は、主に増加したヒドロキシルラジカルによって引き起こされます。分子 H<sub>2</sub> が選択的に・OH 及び ONOO<sup>-</sup> のような細胞傷害性活性酸素種の濃度を減少させることが確認されている[3]。H<sub>2</sub> の潜在的な放射線防護効果が発見されており、放射線によって引き起こされる DNA 損傷の量を減少させる、抗酸化剤として作用する[4]。H<sub>2</sub> は、効果的にフリーラジカルを除去することが認められたが、正確なメカニズムはまだ同定されていない[6]。H<sub>2</sub> は、マウスにおける放射線肺炎[9、10]を減衰させることが観られる。このような有望な結果は、H<sub>2</sub> が電離放射線の影響から精子形成および造血を保護するかどうかなど新たな研究を生み出す。

我々は、高エネルギーの電解水素水を飲むことは、組織に組み込まれたセシウム 137 は、家禽から除去される速度を増加させた。我々の新規なアプローチは、幅広い用途に応用できる。しかし、高エネルギーの電解水素水は放射線事故の後の除染操作に使用するためには正確な機構を明らかにする必要がある。

