Technical Report

Ethanol Production from Rice on Radioactively Contaminated Field
toward Sustainable Rice FarmingShinya YOKOYAMA^{*1}, Bintaro IZUMI^{*2}, Kazuo OKI^{*3}

(Received June 1, 2011)

持続的稲作を目指した放射能汚染土壌におけるイネからのエタノール生産

横山伸也^{*1}, 和泉敏太郎^{*2}, 沖 一雄^{*3}

Radioactive species such as ^{137}Cs were discharged from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant which was severely damaged by the enormous earthquake and tsunami. Cropland has been radioactively contaminated by ^{137}Cs etc. and it seems impossible to plant rice due to the non-suitability for food. According to the reports, ^{137}Cs transferred into the rice from soil is less than 1% on the average. Therefore, it is expected that the concentration of ^{137}Cs in bioethanol will be well below the tentative restriction value even if bioethanol could be produced from the rice. It is proposed that the rice field should be filled with water to avoid the flow of runoff contaminated by radioactive cesium compounds because they are insoluble in aqueous phase and that bioethanol should be produced from the rice in order to maintain the multifunction of rice field and to continue the agriculture. If rice farming is halted and neglected, agricultural function of rice field as well as local community will be permanently destroyed.

Key Words

Rice, Radioactivity, Cesium, Bioethanol, Sustainability

1. 緒 言

平成 23 年 3 月 11 日に東北地方の太平洋沿岸での大地震と津波に加えて、福島県では東京電力福島第一原子力発電所が被災した。地震により外部電源および非常用ディーゼル発電機が故障し全交流電源が喪失した。このために冷却作業が不可能になり外部から水を注入した。しかし、格納容器内の圧力が高まったために、内部のガスを外部へ排気するベント操作を行ったが、これに伴い放射性を帯びた気体が屋外に放出されることになった。さらに、大地震の翌日 1 号機では原子炉冷却水喪失による核燃料温度上昇に伴い水素が大量に発生し水素爆発が起り、さらに 2 号機と 3 号機の爆発に加えて 4 号機に火災が生じ汚染が拡大した。

報道によれば¹⁾、福島県川内村周辺では土壌の放射能が

1 kg 当たり 1526 Bq と暫定基準値の 5000 Bq を下回っているにもかかわらず、ほとんどの農家が作付けを諦めているのが実態である。イネの作付けを放棄すれば二、三年で水田は荒れ果て、それ以上放置しておくとも水田機能を回復することすら難しい状況になるといわれている。

本提案は、主にセシウム ^{137}Cs により放射能汚染された水田で、手間がかからず肥料も少なく済む多収穫米を育て、各地域に小規模なエタノール製造システムを設置してバイオエタノールを製造してエネルギー用として供するものである。これまでの報告から土壌中の ^{137}Cs は根から吸収されるが、移行率は極めて小さく玄米中の蓄積量も小さい^{2) 3)}。したがって、コメから製造したエタノール中の ^{137}Cs 濃度は暫定規制値を十分にクリアできると予想される。本提案により放射能

* 1 Department of Environmental Management,
Faculty of Environmental and Information Studies,
Tottori University of Environmental Studies
1-1-1, Wakabadai-kita, Tottori-shi, Tottori 689-1111, Japan

* 2 NPO of Shimane Bio Ethanol Research Party
c/o Corp. Building 15, Chidori-cho, Matsue-shi, Shimane
690-0852, Japan

* 3 Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan

* 1 鳥取環境大学環境情報学部情報マネジメント学科
〒 689-1111 鳥取市若葉台北 1-1-1

* 2 特定非営利活法人しまねバイオエタノール研究会
〒 690-0852 島根県松江市千鳥町 15 コープビル

* 3 東京大学生産技術研究所
〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

汚染された土壌は徐々に除染されると共に、水田が放棄地にならずにその機能を維持でき農家の生産活動が継続できる。エタノールの生産、利用に関して特区のような措置をとることで、地域の雇用拡大ができ、次世代の再生可能エネルギー生産の先端的モデル地区として新産業の創出に貢献し、農業従事者が将来展望を持つことができる。バイオエタノールをガソリンに混合利用することにより、県内の石油消費を抑制でき、将来の安定的な石油代替燃料の開発につながれると考える。

2. 方 策

土壌の放射能汚染の主因は ^{137}Cs であり、ヨウ素の半減期が8日であるのに対して約30年と長い。したがって、農地を放置しておくとも劣化が進行し事実上農地として使うことが不可能になるだけではなく営農ができず、経済的にも大きな打撃を受けることになる。そこで、放射能汚染の危惧から食用米としてではなく、エネルギー用の稲作をすれば従来どおりの営農が可能になる。ただし、当然ながら生産されるエタノールに許容量以上の放射性物質が含まれないことが求められ、稲作やエタノール製造過程において必要に応じて放射線の遮蔽などの対策は必要である。

2.1 作付け

耕作中の土壌粉塵などによる内部被曝や作業時の外部被曝を避けるために、作業の簡略化と常時周辺環境の放射線監視を行うと共に、農業従事者にフィルムバッジ・積算線量形などを着用してもらい、放射線従事者に準じた管理を行うことにより被曝線量を十分に管理する。効率を上げるためにできるだけ農地を集約化することで大規模にし、農作業を無人耕運機や刈り取り機を導入することが望ましい⁴⁾。 ^{137}Cs は体内摂取したときカリウムと同様の振る舞いをし、筋肉組織に蓄積して β 線による内部被曝が生ずるとされている。体内吸収を避けるために、水田を乾燥せず農作業を簡素化することが望まれる。

津村らは、土壌による ^{137}Cs の固定に及ぼす湛水処理の影響を調べ、 ^{137}Cs は主に固定態と置換態で存在し、水溶性で存在するのは1%以下であると報告している²⁾。報道によれば、広島大学が福島県で行った調査の結果、 ^{137}Cs は地表から5cm以内に90%留まっており、15cmでは99%以上が留まっていると報告されている⁵⁾。セシウムは土壌中の粘土と強く結合して表層に留まっているので深いところにしみ込まない性質がある。逆に風の影響で表層の土壌が環境中に飛散する恐れがあるが、湛水状態にすることで飛散を防止できる。いずれにせよ、水田では不透水層が存在するので、セシウム濃度は容易には減少しないと思われる。事実、駒村らの研究によれば、水田における ^{137}Cs の滞留半減時間は9～24年と報告されている⁶⁾。

水田には灌漑が不可欠であり、灌漑水に放射性物質が混入してくる可能性は否定できないので循環的な利用を行うことが望ましいが、できない場合でも放射線量計でモニタリング

しながら水路にゼオライトのような吸着剤を敷設する。天然ゼオライトは合成ゼオライトやイオン交換樹脂よりもCsを効率よく除去できると報告されており、コスト面からも有望である⁷⁾。

津村らのポットでの土壌中 ^{137}Cs のイネへの移行の研究によれば、経根吸収される場合は土壌の性質や施肥の種類や量などにより左右されるが、 ^{137}Cs の土壌から玄米への移行率は $2.4 \times 10^{-1} \sim 0.59 \times 10^{-2}$ であった²⁾。ただし、この数値はポット実験の結果であり、かなり過酷な条件で得られたものである。Tsukadaらは実際の田圃から採取した土壌中の ^{137}Cs の白米部への平均移行率は 1.6×10^{-3} であり、白米に含まれる ^{137}Cs は玄米に比べて約半分と報告している³⁾。IAEAの報告書によれば、466検体の土壌からイネへの移行率は最大値が 6.1×10^{-1} 、最小値が 1.3×10^{-4} 、平均値が 8.3×10^{-3} であった⁸⁾。これらの結果から、土壌から可食部に移行する ^{137}Cs の濃度は非常に小さいと予想できる。

2.2 エタノール製造

イネからエタノールを製造するには、モミガラから玄米を分離した後、粉碎して液化処理をして糖化しさらに酵素で発酵する。発酵した後、蒸留と脱水をしてエタノールを得る。残渣として発酵残渣と発酵廃液が残る。この全工程において放射線遮蔽が簡単にできるようにできるだけシンプルな設備にする。すなわち、液化、糖化、発酵などの工程が1つのタンクで行えるようなシステムにし、例えば500kl～1,000kl規模のシステムを当該地域毎に数ヶ所分散設置し、濃度約30%程度のエタノールを製造して、蒸留・脱水基地まで運搬して99.5v%以上の無水エタノールにし、ガソリン混合燃料として使用する。脱水エレメントには ^{137}Cs を吸着除去できるゼオライトを使用して放射性物質がエタノールに入らないようにする。 ^{137}Cs の沸点は640℃であるが、蒸留・脱水装置内でエタノール-水混合物の温度は約120℃以下でありCsが気化する心配はない。さらに ^{137}Cs は水溶液中で揮発性の化合物を作らないとされている。したがって、生成したエタノールには ^{137}Cs が含まれないか、含まれるとしても土壌からイネへの移行率が1%程度であることを考慮すれば、極めて低い濃度であることが予想される。仮に土壌中の ^{137}Cs 濃度が5000Bqとした場合は、エタノール中の ^{137}Cs 濃度は50Bq以下であると期待できる。

2.3 放射性廃物の処理

イネの副産物であるイナワラとモミガラにも、エタノール製造の過程で副生する発酵残渣と発酵廃液にも同様に ^{137}Cs が含まれているので、これらは適正に処理する必要がある。通常は原子力発電所で発生する低レベル放射性廃棄物は発電所内にある「低レベル放射性廃棄物専用の焼却炉」で焼却して減容し、ドラム缶詰して青森県六ヶ所村にある設備で地層処分している。現状では低レベル放射性廃棄物の放射能濃度基準は設定されておらず、廃棄処分方法、廃棄場所も設定されていない。公衆の放射線被曝を極力小さくするためにも、早

急に関連法律制定が必要である。

本提案の各プロセスで排出されるイナワラ、モミガラに加えて、発酵残渣や発酵廃液も同様に「低レベル放射性廃棄物専用の焼却炉」で処分するのが適当と考えられる。なお、この焼却炉の排気はセラミックフィルターを使用しており、ごく微小な放射性物質であっても除去できるようになっている。あるいは、一般的な焼却炉で排気温度を調整しゼオライトをフィルターとして使用して放射性物質を取り除く等の工夫をする。いずれの場合も焼却熱等は、蒸留・脱水基地のエネルギーとしても利活用が図れる。

2.4 外部エネルギー源

エタノール製造では蒸留・脱水工程に熱源としてかなりのエネルギーが使用され、コーンからエタノールを製造する場合は全体の約30%である⁹⁾。今回の原子力災害では、周辺の市町村で家屋等が津波で破壊され、さらに放射能汚染されている廃棄物は、発電所内で発生する低レベル放射性廃棄物と同様に扱われるべきものと考えれば、いずれ「低レベル放射性廃棄物専用の焼却炉」が設置されるものと思われる。放射能対策が必要になりコスト増になる可能性があるが、廃熱を利用することも想定できるし、周辺で放射能汚染のないあるいは基準値以下の場合、外部のエネルギー源として津波で破壊された建築廃材や倒木、イナワラ、モミガラなども利用できる。

3. 課題

以上、放射能汚染された土壌の修復策として、従来通りイネを栽培してこれからエタノールを製造するという希望の持てる放射能対策の可能性を示した。これを具体的に実現するためにはいくつかの課題があるので以下に挙げる。

- (1) 放射能事故という非常事態の中で、福島県の復旧、復興のために全体あるは一部を特区としてできるだけ支援をする。
- (2) 今年の作付けを見送った水田に関しては、水田としての機能を失わないように湛水状態に保持する。
- (3) イネの耕作に関しては、被曝を避けるために十分な放射線監視とできるだけ農業従事者の作業を簡素化し、無人化、自動化、機械化を図る。
- (4) エタノール生産に関しては、全工程が必要に応じて放射性遮蔽できる連続工程の小型プラントを設計・試作する。液化・糖化・発酵が単一のタンクでできるようにシンプルな構造にする。
- (5) 放射性廃棄物については「低レベル放射性廃棄物専用の焼却炉」で処分するなど万全の安全性を図る。
- (6) 仮に、バイオエタノールが製造された場合は、福島県内をエネルギー特区とし、地産地消とする。なお混合ガソリン自体を無税にする。また混合比率もE3でなく海外並みの混合率を検討する。

4. 結 言

放射能により汚染された田圃を放置せず、イネを作付けしてエタノールを生産することで営農を可能にするシステムを提案した。畑地の場合は、放射性物質を選択的に吸収する品種があればいわゆるバイオレメディエーションにより除染が可能であるが、田圃は一度稲作を放棄すれば修復が困難である。しかし、燃料用エタノールを生産するシステムを構築することで稲作の継続が可能になる。

植物による土壌中の放射能汚染物質の吸収に関して、特にイネは土壌からの移行率が小さく短期間での除染は難しいと思われる。逆に、移行率が小さいことからイネに吸収される放射能汚染物質の濃度は低く、これまでの報告例から推定するとエタノール発酵した場合にエタノールに含まれる放射能汚染物質濃度は暫定規制値以内に収まることが予想される。

5月11日の読売新聞の論点で鈴木元氏は「希望持てる放射能対策を」の中で、チェルノブイリ事故後は、菜種の中でも放射性物質の影響の少ない品種を栽培、精製した油をバイオ燃料に加工し、菜種から食用油にする過程でも放射性物質を除去できたとされ、アルコールや砂糖の原料にする麦類などの作付けも推奨されたと報告している¹⁰⁾。畑であれば菜種なり麦なりを栽培すればよいが、福島県のような水田地帯においては水田の機能を生かすには稲作が最も適切と考えられる。

チェルノブイリ事故15年後の報告によれば、放射能汚染された農地の除染として表土を除くという方法はコストがかさむこと、土壌の肥沃度が失われること、汚染土による環境問題などで不適切とされており、本提案のような方法が適切と考える¹¹⁾。

わが国の農業は地域社会と深い絆があり、この事故で農業が立ち行かなくなると、単に営農ができなくなり農産物が生産できなくなるに止まらず、地域社会そのものが破壊されることになり地域文化の喪失に結びつく。事故が収束しても土壌の放射能汚染の懸念がなくなるのには10年単位の時間が必要と思われる。このような事態を避け、明日の希望へとつながる放射能対策を目的として、イネからのエタノール生産システムを提案する次第である。もとより経済的にはコスト高になるのは明らかではあるが、再生可能エネルギー生産の場として農業の新しい可能性を秘めており、何よりも農業従事者が誇りを持ち、地域社会が健全に維持できる意義は大きいのではなかろうか。

謝 辞

本研究は公益財団法人谷川熱技術振興基金の助成により行われたことを記し、謝意を表す。バイオエタノールの各工程のエネルギー収支に関しては、(財)エネルギー総合工学研究所プロジェクト試験研究部の副参事山田富明博士に資料提供をして頂き懇切にご教示頂いた。記して感謝申し上げる。国際医療福祉大学の鈴木元教授にはチェルノブイリ事故後の放射能汚染農場の除染について、(独)農業環境技術研究所の谷山一郎氏にはイネへの放射能物質の移行についての情報をご提供頂いた。深く感謝申し上げます。

文 献：References

- 1) 河北新報, 平成23年 5 月23日
 - 2) 津村昭人, 駒村美佐子, 小林宏信, 農業技術研究報告書B, **36**, 57-113(1984)
 - 3) Tsukada, H., Hasegawa, J., Hisamatsu, S., Yamasaki, S., *J. Environmental Radioactivity*, **59**, 351-363(2002)
 - 4) Li, M., Imou, K., Wakabayashi, K., Yokoyama, S., *Int. J. Agric. & Biol. Eng.*, **2**(3), 1-16(2009)
 - 5) 朝日新聞, 平成23年 5 月24日朝刊
 - 6) 駒村美佐子, 津村昭人, 山口紀子, 藤原英司, 木方展治, 小平潔, 農業環境技術研究所報告, **24**, 1-21(2006)
 - 7) 塩村隆信, 小川仁一, 今若直人, 野田修二, 第17回ゼオライト研究発表会予稿集, p. 7(2001)
 - 8) TECHNICAL REPORTS SERIES No.472: Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, International Atomic Energy Agency, Vienna, (2010)
 - 9) 山田富明, バイオエタノール製造システムの比較とコスト評価, バイオ液体燃料, ((株)エヌ・ティー・エス), p. 91-114(2007)
 - 10) 鈴木元, 論点, 読売新聞, 平成23年 5 月11日朝刊
 - 11) デビル・G・カベリン他(責任翻訳: 鈴木元), 農業における対策; チェルノブイリ事故後15年における効率の評価・その教訓(2001年キエフ国際会議プロシーディング), (国連人道問題調整部, ニューヨーク), p. 118-128(2001)
-