

水稻への放射性セシウム吸収抑制対策 -放射性セシウム対策にゼオライトは有効か？-

東京農業大学応用生物科学部

後藤 逸男・蜷木朋子・近藤綾子・稲垣 開生

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故により放出された放射性物質は、広く環境中に拡散し、農地の汚染を引き起こした。今後も長期にわたり半減期の長い放射性セシウムによる影響が懸念される。福島県では水田面積の約7%にあたる7,300 haで平成24年産米の作付けが制限された。農地における放射能汚染対策は、1986年に起きたチェルノブイリ原子力発電所事故後の対策が基本とされた。しかし、チェルノブイリでは畑作・牧草地が農業の中心であるのに対し、福島県では農地の70%以上を水田が占める。そのため、チェルノブイリ事故後の対策がそのまま福島で活かせるか定かではない。

セシウムはアルカリ金属に分類され、土壌中ではCs⁺として存在し、K⁺やNH₄⁺と類似の挙動をする。土壌粘土鉱物などに強く吸着されるため、土壌表層に長く留まり、下方へは移動しにくい。そこで、農地での除染対策として、土壌表層の放射性Cs強度が5,000 Bq/kg以上では表土除去、それ以下の場合には混層による強度低下を施した上で、作物への放射性Cs吸収抑制対策が行われている。

本研究では、吸収抑制対策資材としてカリウム肥料とゼオライトを取り上げ、それらの水稻へのCs吸収抑制効果を検討した。東京農大世田谷キャンパス内では安定同位体¹³³Csを指標とする水稻のポット栽培試験、福島県南相馬市内の放射能汚染水田では水稻の圃場試験を行い、水田における合理的な放射性Cs吸収抑制対策を検討した。

2. 安定同位体¹³³Csを用いた水稻のポット栽培試験

(1)カリウム肥料によるCs吸収抑制効果

カリウムの施用が水稻への放射性Csの吸収を抑制することは、1962年天正らの研究で明らかにされている。そのメカニズムはCsとKが作物へ吸収される際に競合し、Kが選択的に吸収されることに起因する。福島県内の水田で、平成24年作では、カリウム肥料として水溶性の塩化カリウムとク溶性のケイ酸カリウムが施用されたが、どちらがCs吸収抑制対策資材として適しているかは定かではない。そこで、1/5000aワグネルポットによる水稻の栽培試験を行った。カリウム施用量をク溶性K₂Oとして25、50 kg/10a相当量とした結果、図1のように両者共に玄米中の¹³³Cs含有量が対照区の1/12以下となり、Csの吸収抑制効果が認められた。

(2)ゼオライトによるCs吸収抑制効果

ゼオライトは保肥力を改善する土壌改良資材として1977年「地力増進法」に基づいて政令指定された資材で、高いCECを有する。火山灰を起源とする天然鉱物であるため、日本には無尽蔵に存在し、特に被災地福島県は良質ゼオライトの産地である。ゼオライトはK⁺とNH₄⁺を特異的に捕捉して、圃場からの肥料の溶脱を防ぎ、作物へ養分を効率よく吸収させる。また、Cs吸着性にも優れ、原発事故現場では放射能汚染水の処理資材として用いられている。福島県ではこのゼオライトが平成24年水稻作にCs吸着材として施用されたが、作物への吸収抑制効果は明らかにされていない。そこで、ゼオライト

を0.2、1 t/10a 相当量施用して、水稻のポット栽培試験を行った。その結果、図2のようにゼオライト 1 t/10a 施用区では玄米中の ^{133}Cs 含有量が対照区の 1/3 程度となり、Cs 吸収抑制効果が認められた。

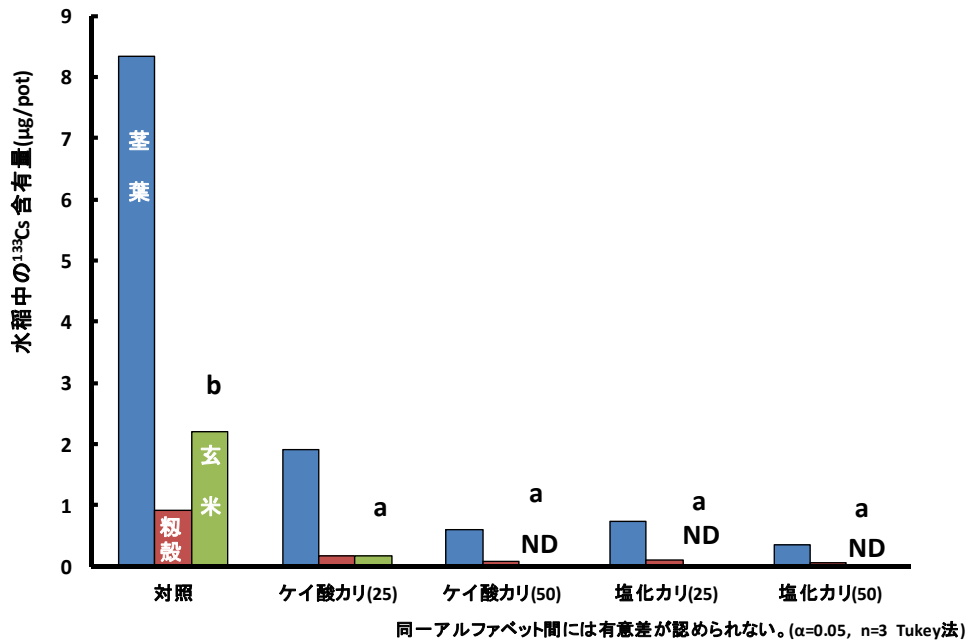


図1 カリ肥料の形態の違いが水稻の ^{133}Cs 吸収に及ぼす影響

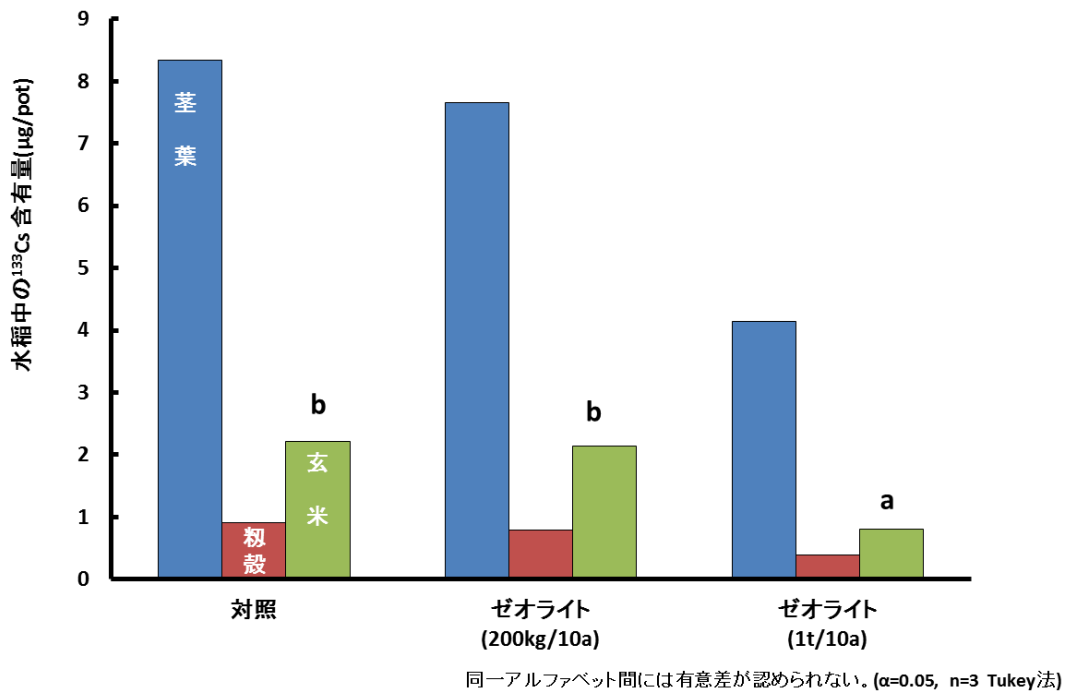


図2 ゼオライトの施用が水稻の ^{133}Cs 吸収に及ぼす影響

3. 福島県南相馬市の水田における放射性 Cs 吸収抑制対策試験

南相馬市では 2012 年 3 月に市内全域での 24 年産水稲作付けの全面的制限を決定し、市内 130 ヶ所の水田約 15 ha で「平成 24 年度地域水田再生試験栽培事業」として水稲の試験作付を行うことになった。そこで、筆者らは上記水田での試験作付を南相馬市に申請し、「ほ場番号 126」として認められた。試験栽培地は福島第一原子力発電所から 20.8 km 地点の水田で、放射性セシウム吸収抑制対策として、塩化カリウムとゼオライトの施用試験を行った。作土の放射性 Cs 強度は 1,475 Bq/kg、交換性 K₂O 含有量は 17 mg/100g、CEC は 14 meq/100g であった。30 a の水田に塩化カリウムとゼオライト施用区を設け、塩化カリウム施用量については南相馬市の慣行施肥量である 5 kg/10a と多量施肥 30 kg/10a の 2 水準とした。多量施肥区のカリウム施用量については、2012 年 2 月に発表された農研機構の加藤らの研究を参考とした。また、ゼオライト施用量については無施用、1 t/10a、2 t/10a 施用の 3 水準とし、2012 年 5 月に水稲(ひとめぼれ)を定植し、9 月に収穫した。1 区画 3 連で土壌および水稲試料を採取し分析を行った。

その結果、玄米中の放射性 Cs 濃度はゼオライト無施用・カリウム標準区で最も高く、17 Bq/kg であったが、カリウム肥料およびゼオライトの施用により 5~6 Bq/kg に低減された。その低減要因を解析するために二元配置分散分析と水準間の有意差検定を行った結果、カリウム肥料とゼオライトによる低減効果が認められた。また、両効果には交互作用があり、ゼオライトの効果はカリウム多量区より標準施用区で顕著であった。玄米収量ではカリウム・ゼオライトの施用による増収効果、また、ゼオライトの施用によりタンパク質含量が増加する傾向にあった。

カリウム肥料については、Cs との競合による吸収抑制効果と考えられる。ゼオライトについては土壌中で施肥由来の NH₄⁺と K⁺を捕捉し、作物に効率よく吸収させることにより増収し、Cs との競合により放射性 Cs の吸収を抑制したと考えられた。

表1 カリ肥料とゼオライトの施用が玄米の放射性セシウム強度に及ぼす影響

ゼオライト	カリ肥料 K ₂ O	玄米収量 kg/10a	タンパク質 %	玄米の放射能強度(乾物当たりBq/kg)			
				¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	Cs合計	⁴⁰ K
0t/10a	5kg/10a	449	6.0	6.1	10.5	16.6	72.1
	30kg/10a	493	6.1	2.5	3.9	6.4	75.4
1t/10a	5kg/10a	530	6.4	4.5	7.3	11.8	65.5
	30kg/10a	609	6.4	2.4	3.6	6.0	81.2
2t/10a	5kg/10a	553	6.2	2.4	3.9	6.3	68.8
	30kg/10a	676	6.5	2.0	3.3	5.3	70.0

放射能測定:ゲルマニウム検出器(キャンベラ社)

茎葉: U8容器による 12時間測定 合計検出限界:10Bq/kg

玄米: 2リッターマリネリ容器による80分測定 合計検出限界:5Bq/kg

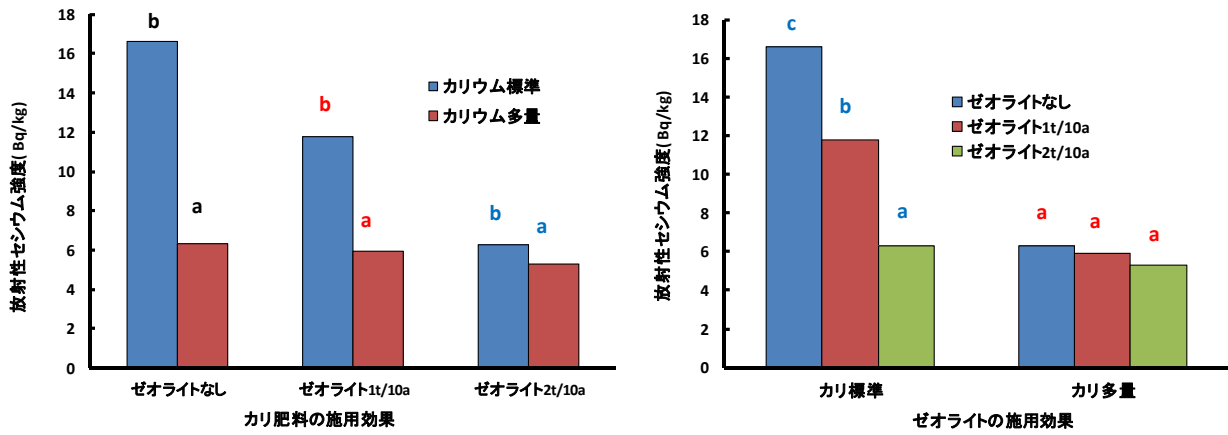


図3 カリ肥料とゼオライトの施用が玄米の放射性セシウム強度に及ぼす影響
各水準毎の同一アルファベット間には有意差が認められない。(α=0.25, n=3 Tukey 法)

4. 土壌のカリウム捕捉力に対するゼオライト施用効果

CEC が異なる土壌に塩化カリウムを K_2O として 0、50、100 mg/100g 添加して、5 時間振とうさせ土壌に十分捕捉させた後、過剰の塩化カリウムを 80%メタノールで除去した。これらの土壌の交換性 K_2O を分析した結果、図4のように CEC 20 meq/100g 以下の土壌ではカリウム捕捉率が低下した。しかし、それらの土壌に 0.2、1.0、10%のゼオライトを添加した後、同じ処理を施した結果、図5のようにゼオライトによる K^+ 捕捉力の増大が認められ、その効果は CEC の小さな土壌ほど顕著であった。すなわち、ゼオライトの施用で K^+ の溶脱を防ぎ、作物に吸収されやすい形態として捕捉されることが明らかになった。

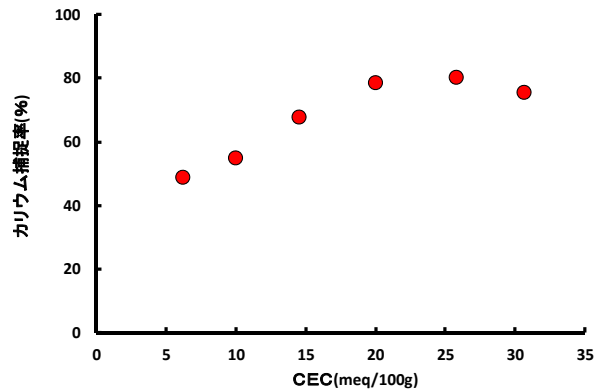


図4 土壌のCECの違いによるカリウム捕捉率の変化

$$\text{カリウム捕捉率(\%)} = \frac{\text{交換性}K_2O\text{増加量}}{K_2O\text{添加量}} \times 100$$

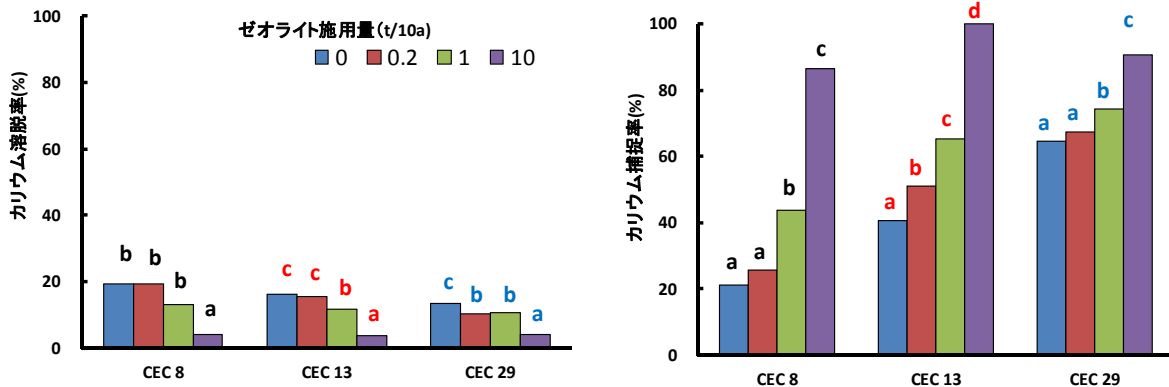


図5 土壌のCECの違いとゼオライト添加によるカリウム溶脱率と捕捉率の変化

各水準毎の同一アルファベット間には有意差が認められない。(α=0.05, n=3 Tukey 法)

$$\text{カリウム溶脱率(\%)} = \frac{\text{水溶性}K_2O\text{増加量}}{K_2O\text{添加量}} \times 100$$

$$\text{カリウム捕捉率(\%)} = \frac{\text{交換性}K_2O\text{増加量}}{K_2O\text{添加量}} \times 100$$

* : ゼオライト由来のカリを含む

2013年1月に農水省と福島県から発表された、「放射性セシウム濃度の高い米が発生する要因とその対策について」では、ゼオライトの吸収抑制効果は、ゼオライトに含まれるカリウムによる効果であり、今後の吸収抑制対策はカリ肥料による土壌中のカリ含量の確保を基本にするとする。しかし、本研究ではゼオライトは単なるCs吸着資材ではなく、ゼオライトの NH_4^+ 、 K^+ に対する特異捕捉性により窒素とカリウムが効率よく水稲に吸収利用され、増産と競合により、Csの吸収が抑制されたと結論される。

今後の水稲へのCs吸収抑制対策としては、カリウム肥料の施用が不可欠であるが、ゼオライトを併用施用する場合には水溶性カリウム肥料である塩化カリウム、ゼオライトを施用しない場合には塩化カリウム・ケイ酸カリウムどちらも有効であるが、経済性では前者が優れる。また、カリウム肥料を多量に施用した圃場でのゼオライトの併用効果は劣るが、CECが20 meq/100g程度以下の土壌では、 NH_4^+ 、 K^+ 捕捉資材としてゼオライトを0.5～1 t/10a施用すべきである。

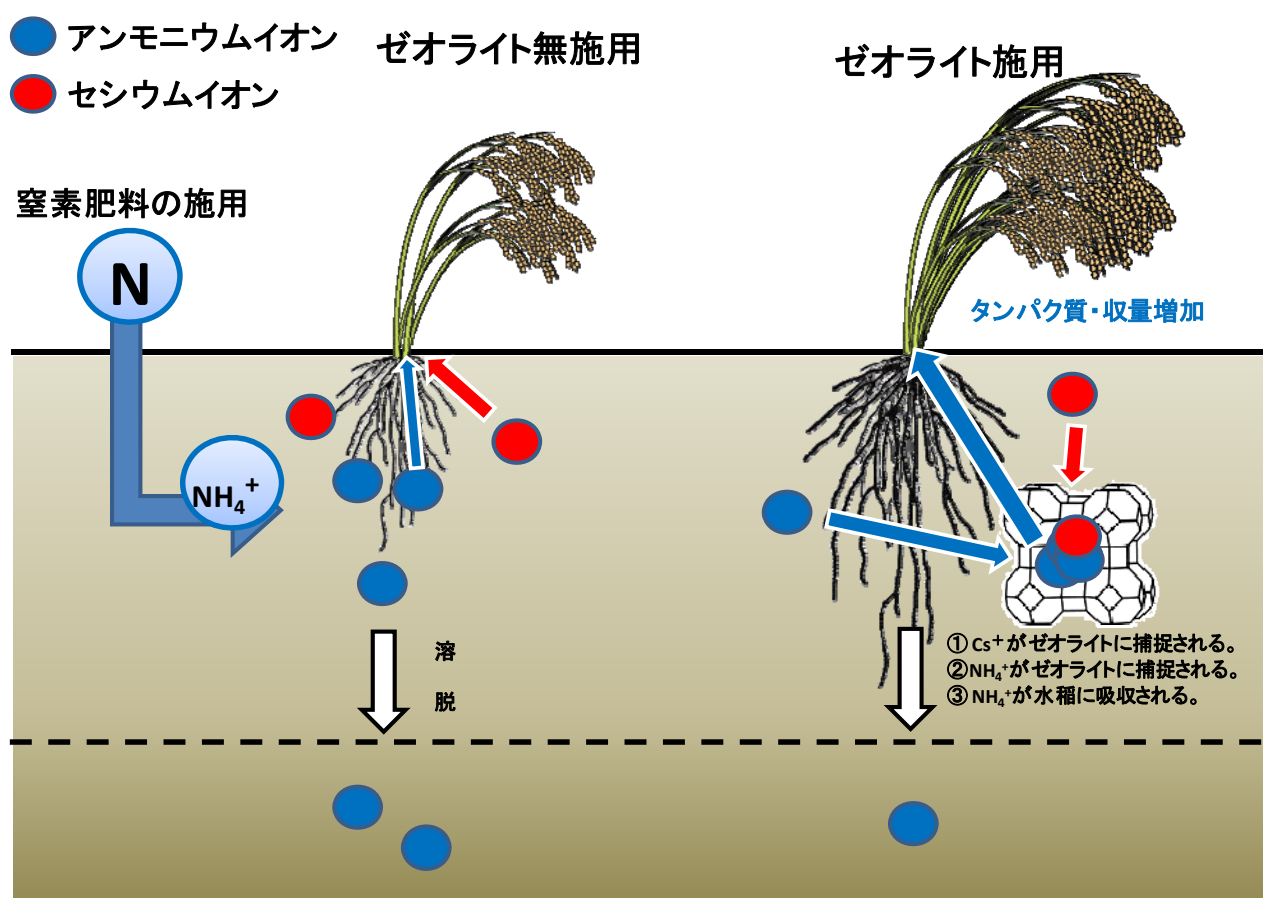


図6 ゼオライトの放射性セシウム吸収抑制メカニズム

5. 津波被災水田では、津波土砂の混層が放射能対策として有効

3.11の大津波により甚大な被害を受けた福島県沿岸部では、塩害だけでなく放射性セシウムによる汚染が認められる。演者らは、2011年9月より甚大な津波被害を被った福島県相馬市の水田(放射性セシウム強度:500～1,000 Bq/kg)で復興支援活動を行い、2012年9月には1.7 haの水田から約10トンの「そうま復興米」を生産した。

2011年6月に農水省から出された除塩マニュアルでは、津波により農地表面に堆積した土砂を「撤

去することを基本とする」とされているが、演者らは、被災水田に約 10 cm の厚さで堆積した土砂中の有害元素含有量を確認した上で、元の土壌と混層し、雨水による除塩と転炉スラグによる土壌改良を行った。その結果、玄米だけではなく水稻茎葉からも放射性セシウムは全く検出されなかった。その理由は、津波土砂中に 240 mg/100g 程度、混層後の作土中にも 100 mg/100g 程度の交換性カリウムが含まれているためであった。

被災より約 2 年を経過した現時点では、手付かずの津波被災農地であっても降雨による自然除塩が進んでいるため津波土砂中の交換性カリウムは減少傾向にあるが、元の土壌と混層しても 50～100mg/100g 含まれる。宮城県では津波からの復興が進んでいるが、福島県では、津波被災農地 5460 ha の内、2012 年度までに営農を再開した面積は 10%程度に過ぎない。特に、南相馬市以南では、全く手付かずの被災農地も多い。今後の復興対策に際しては、津波土砂の有害元素含有量や放射能強度を調べた上で、それらに支障がなければ、積極的に元の土壌と混層することが、作物への放射能吸収抑制対策となる。

6. 風評被害の払拭と水稻作付の早期復興を期待

表1に示す玄米中の ^{40}K の天然放射能強度が放射性セシウム強度に比べて比較にならないほど強いことに注目してほしい。世間では放射性セシウム強度だけが一人歩きしているが、特に農産物中にはカリウムが多く含まれているため ^{40}K の放射能も検出される。この天然放射能は何ら規制の対象とはならないが、ガンマ線として放出される放射能であることに違いはない。しかも、その波長がセシウムより短いため放射能はセシウムより強力である。放射能汚染農地には、作物へのセシウム吸収抑制対策として塩化カリウムが施用されるが、その ^{40}K に由来する放射能強度を測定すると何と 16,000 Bq/kg に達する。また、高血圧者用の減塩食塩は塩化ナトリウムと塩化カリウムの混合物である。

これらの事実を農業生産者や消費者に正しく伝えることが農産物の風評被害対策として大切であり、農産物の放射能測定値表示には必ず ^{40}K の測定値を並記すべきである。

南相馬市一帯では山林の放射能の影響で狩猟が行われていないため田んぼや畑に猪が出没し、農産物に大きな被害が出ている。上記試験作付水田にも稲穂が稔り始めた頃から猪が出没し、田んぼが猪の餌場と運動場と化している。

南相馬市では 3.11 以降2年間にわたって水稻の作付が制限されたが、25 年度には第一原発から 20 km 以遠の地域では、管理計画の下で、全量管理・全袋検査に合格すれば出荷可能な作付再開準備区域に指定された。上記試験作付水田もこの地域に該当することから、本年度も水稻の試験作付を実施し、水稻への放射性セシウム吸収抑制技術の確立を目指して、福島県内での水稻作付けの早期全面復興の一助としたい。