リンゴジュースに含まれる放射性セシウムのゼオライトによる低減

関澤春仁*, 山下慎司, 丹治克男, 大越 聡, 吉岡邦雄

福島県農業総合センター

Reduction of Radioactive Cesium in Apple Juice by Zeolite

Haruhito Sekizawa*, Shinji Yamashita, Katsuo Tanji, Satoshi Okoshi and Kunio Yoshioka

Product Quality and Processing Division, Fukushima Agricultural Technology Centre,
116 Shimonakamichi Takakura, Hiwada, Koriyama, Fukushima 963-8041

Zeolite, which is designated as one of the food additive, is known to absorb radioactive cesium by its cation exchange capacity. In this study, we investigated the effect of zeolite treatment on the removal of radioactive cesium in apple juice made from apples produced in FY2011. Removal of the radioactive cesium in apple juice was possible by the addition of zeolite. There was a positive correlation between the reduction of radioactive cesium and the surface area of the zeolite as well as treatment time. It was also shown that the efficacy of radioactive cesium removal was decreased by lowering the treatment temperature. Zeolite treatment did not affect the contents of sugars and malic acid in the apple juice; however, it increased the concentrations of the cations Na^+ and Ca^{2+} , and decreased K^+ . Moreover, a slight change in apple juice flavor was observed after zeolite treatment.

(Received Nov. 9, 2012; Accepted Jan. 28, 2013)

Keywords : radioactive cesium, zeolite, apple juice

キーワード : 放射性セシウム, ゼオライト, リンゴジュース

2011年3月11日の東日本大震災に伴って発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故は、日本国内の広範囲に放射性物質を飛散させ、農作物や土壌を汚染する深刻な事態を引き起こした。この事故に対し、福島県では農産物や加工食品に含まれる放射性物質のモニタリング体制を整え、国の定める基準値を超える食品の流通を防ぐ対策が取られている^{1)~4)}。

食品には元来⁴⁰K等の放射性物質が含まれており、我々は日頃から一定量の放射性物質を摂取している¹⁾。しかし、原発事故由来の人工核種である放射性セシウムについては、基準値以下であっても消費者に不安を与えており、風評被害を招くなどの大きな影響を及ぼしている。

食品の加工と放射性物質の除去に関する研究は、世界各地で大気圏内核実験が行われていた1950年代後半およびチェルノブイリ原子力発電所事故後の1986年以降に多く行われており、様々な知見が得られている⁵⁾。食品中の放射性物質の除去に関しては、洗浄、煮沸、塩漬などによる分離と、活性炭やイオン交換樹脂などに吸着させる積極的な除去に分けることができる。東京電力福島第一原子力発電

所の事故後、我々は直ちに農作物の加工過程における放射性セシウムの挙動について研究を開始したが、果実のジュース加工においては放射性セシウムの濃度は大きく変化しなかった⁶⁾。そこで我々は、より積極的に除去する方法としてゼオライトに着目した。

ゼオライトは多孔質の骨格を持つ鉱物の一種で、陽イオン交換作用や吸湿、吸着作用などの特徴を持っており、農地の土壌改良や家畜の飼料添加物、工場の排水処理などに幅広く用いられ、東京電力福島第一原子力発電所の事故以降は放射性物質による汚染水や土壌の放射性セシウムの吸着などに利用されている⁷⁾⁸⁾。

一方、食品への利用に関しては厚生労働省の既存添加物名簿に製造用剤として記載されており⁹⁾、一般食品に対し最大残存量が0.5%以下で、かつ食品製造または加工上必要不可欠な場合に限り利用が可能とされている¹⁰⁾。

食品中の放射性物質については、平成24年4月1日より基準値が設定されており、基準値を超えた食品は市場に流通しないため過度に心配する必要はない。しかし基準値内であっても食品に含まれる放射性物質については消費者の関心が高いことから、我々はリンゴジュースに含まれる放射性セシウム(¹³⁴Csと¹³⁷Csの合計)に対するゼオライトの影響について検討を行った。

〒963-0531 福島県郡山市日和田町高倉字下中道 116

* 連絡先 (Corresponding author),

sekizawa_haruhito_01@pref.fukushima.lg.jp

表 1 ゼオライトの組成

項目	試料 1 (%)	試料 2 (%)
水分	5.39	5.35
K ₂ O	3.24	2.81
SiO ₂	72.00	71.08
CaO	0.70	0.60
MgO	0.17	0.14
Fe ₂ O ₃	1.33	1.27
Al ₂ O ₃	9.04	9.86
Na ₂ O	1.96	2.73
強熱減量	4.54	4.57

※ジークライト株式会社の分析結果

実 験 方 法

1. 試料の調製

(1) 原料

2011 年 11 月に福島県内の空間線量が比較的高い地域で収穫されたリンゴ「ふじ」を用いた。

(2) ジュースの加工方法

芯を除去した 10 kg のリンゴをジューサーで搾汁した後、ペクチナーゼ（ヤクルト薬品工業，ペクチナーゼ SS）を 0.05 %（w/v）添加し、45℃で 2 時間反応させた。その後ガーゼと濾紙（アドバンテック東洋，No. 1）で濾過し、80℃ 15 分間の殺菌処理を行った。殺菌後は容量 700 ml の瓶 10 本に充填し、実験時に開封するまで 5℃で保存した。

2. 供試資材

試験には山形県米沢市板谷地区から産出された、ジークライト株式会社のゼオライトを用いた（表 1）。このゼオライトはクリノプチロライトに少量のモルデナイトを伴っており、セシウムイオンの吸着能力についても確認されているⁱⁱ⁾。

実験には、ゼオライトを粒径 1～3 mm 程度に破碎・焼成したものを「破碎 2 mm」、ゼオライトを粉末化した後に粒径 0.5～1 mm に造粒・焼成したものを「造粒 1 mm」、同様に粒径 3～5 mm を「造粒 4 mm」、7～9 mm を「造粒 8 mm」として用いた。なお、余分な粉末や不純物等を除去するため、実験に使用する前に蒸留水で煮沸し、煮沸液を捨てた。これを 3 回くり返した後に乾燥機で乾燥させ、実験に用いた。

3. ジュースへのゼオライト処理方法

(1) ゼオライトの粒径・製造方法の比較

実験には、破碎 2 mm、造粒 1 mm、造粒 4 mm、造粒 8 mm の 4 種類を用いた。

ジュースに各ゼオライトをそれぞれ 5 %（w/v）添加し、スターラーで 5 分間攪拌し、濾紙（アドバンテック東洋，No. 1）で濾過したものを放射性セシウム濃度および各種成分の分析に用いた。

(2) ゼオライトの添加量の比較

ジュースに破碎 2 mm をそれぞれ 1, 5, 10, 20 %（w/v）

添加し、スターラーで 5 分間攪拌し、濾紙（アドバンテック東洋，No. 1）で濾過したものを放射性セシウム濃度および各種成分の分析に用いた。

(3) ゼオライトの処理時間の比較

ジュースに破碎 2 mm を 5 %（w/v）添加し、スターラーでそれぞれ 1, 5, 10, 30, 60 分間攪拌した。その後、濾紙（アドバンテック東洋，No. 1）で濾過したものを放射性セシウム濃度および各種成分の分析に用いた。

(4) ゼオライトの処理温度の比較

予め 0, 20, 40, 80℃に保温しておいたジュースに破碎 2 mm を 5 %（w/v）添加し、スターラーで 5 分間攪拌し、濾紙（アドバンテック東洋，No. 1）で濾過したものを放射性セシウム濃度および各種成分の分析に用いた。

4. 測定項目

(1) 放射性セシウム濃度

ジュースのサンプルは U8 容器に充填し、ゲルマニウム半導体検出器（CANBERRA，GC3020-7500SL-2002CSL）を用いて¹³⁴Cs と¹³⁷Cs の濃度を測定した。測定時間は 4000 秒で行った。また、¹³⁴Cs と¹³⁷Cs の濃度の合計値の計数誤差は次の計算式で算出した。

$$\sigma Cs = \sqrt{(\sigma Cs_{134})^2 + (\sigma Cs_{137})^2}$$

(2) 糖含量

糖含量の測定には HPLC（L-2000，日立ハイテク）を用いた。測定条件は以下のとおりで、得られたピークは各標準物質の保持時間から判断し、2 反復の平均値を測定値とした。カラム：Mightysil NH2（4.6×250 mm）（関東化学）、カラム温度：40℃、溶離液：75 % アセトニトリル、流速：1 ml/min、検出器：RI 検出器、標準物質：D(-)-フルクトース（和光純薬工業）、D(+)-グルコース（和光純薬工業）、スクロース（和光純薬工業）。

(3) 有機酸含量

有機酸含量の測定には HPLC（L-2000，日立ハイテク）を用いた。測定条件は以下のとおりで、得られたピークは各標準物質の保持時間から判断し、2 反復の平均値を測定値とした。カラム：Gelpack GL-C610h-S（7.8×300 mm）（日立化成工業）、カラム温度：60℃、溶離液：3 mM 過塩素酸、流速：0.5 ml/min、反応液：BTB 溶液、流速：0.6 ml/min、検出器：UV/VIS 検出器、検出波長：440 nm、標準物質：L(-)-りんご酸（和光純薬）。

(4) 陽イオン濃度

陽イオン濃度の測定にはイオンクロマトグラフ（DX500，日本ダイオネクス）を用いた。測定条件は以下のとおりで、得られたピークは各標準物質の保持時間から判断し、2 反復の平均値を測定値とした。カラム：IonPac CS12A（4×250 mm）、カラム温度：35℃、溶離液：20 mM メタンスルホン酸、流速：1 ml/min、サプレッサ：CSRS（電流値 59 mA）、検出器：電気伝導度検出器、標準物質：陽イオン混合標準

表2 ゼオライト処理と放射性セシウム濃度

資材名	粒径 (mm)	添加割合 (%)	処理時間 (分)	処理温度 (℃)	^{134}Cs 濃度 (Bq/kg)	^{137}Cs 濃度 (Bq/kg)	放射性セシウム 濃度	放射性セシウム 残存率
無処理	—	—	—	—	50±3.6	64±3.6	114±5.1	100
破碎 2mm	1~3				33±3.1	39±3.0	72±4.3	63
造粒 1mm	0.5~1	5	5	20	30±2.7	40±2.8	70±3.9	61
造粒 4mm	3~5				45±3.6	53±3.5	98±5.0	86
造粒 8mm	7~9				48±3.7	54±3.6	102±5.2	89
破碎 2mm	1~3	1			47±3.4	54±3.3	101±4.7	89
		5			33±3.1	39±3.0	72±4.3	63
		10	5	20	26±2.9	27±2.7	53±4.0	46
		20			15±2.4	16±2.4	31±3.4	27
破碎 2mm	1~3		1		37±3.1	51±3.0	88±4.3	77
			5		33±3.1	39±3.0	72±4.3	63
		5	10	20	28±3.0	31±2.7	59±4.0	52
			30		19±2.2	23±2.4	42±3.3	37
			60		13±2.2	19±2.1	32±3.0	28
				0	34±3.1	45±3.1	79±4.4	69
破碎 2mm	1~3	5	5	20	33±3.1	39±3.0	72±4.3	63
				40	26±2.7	36±2.6	62±3.7	54
				80	24±2.7	38±2.8	62±3.9	54

※±は計数誤差

図1 ゼオライト資材の体積当たりの表面積と放射性セシウムの残存率との相関関係

図2 ゼオライト資材の添加割合と放射性セシウムの残存率との関係

液Ⅱ（関東化学）。

(5) 陰イオン濃度

陰イオン濃度の測定にはイオンクロマトグラフ（ICS-1500, 日本ダイオネクス）を用いた。測定条件は以下のとおりで、得られたピークは各標準物質の保持時間から判断し、2反復の平均値を測定値とした。カラム：IonPac AS12A（4×200 mm），カラム温度：35℃，溶離液：2.7 mM Na₂CO₃/0.3 mM NaHCO₃，流速：1.3 ml/min，サプレッサ：ASRS-ULTRA（電流値 19 mA），検出器：電気伝導度検出器，標準物質：陰イオン混合標準液Ⅳ（関東化学）。

実験結果

(1) ゼオライト処理と放射性セシウム濃度の変化

無処理のジュースの放射性セシウム濃度に対するゼオラ

イト処理後の放射性セシウム濃度の割合をCs残存率としたところ、破碎2mmが63%，造粒1mmが61%となり、資材の粒径が小さいほどCs除去効果は高くなった（表2）。造粒した3種類のゼオライトにおいて、平均の半径から算出した体積あたりの表面積（表面積/体積）とCs残存率の相関を求めたところ、3点のみのデータではあるが決定係数は0.999となり、放射性セシウムの除去はゼオライトの表面積に依存することが示唆された（図1）。

ゼオライトの添加割合の比較では、添加量が多いほど放射性セシウムは低減し、添加量20%ではCs残存率が27%であった（表2）。しかしながら、添加量とCs残存率は比例せず、添加割合が高くなると、添加量に対する除去率は低くなる傾向が示された（図2）。

処理時間においては、処理時間が長いほど除去効果が高

図 3 ゼオライト資材の処理時間と放射性セシウムの残存率との関係

図 4 ゼオライト資材の処理温度と放射性セシウムの残存率との関係

表 3 ゼオライト処理と糖、有機酸、陽イオン含量

資材名	粒径 (mm)	添加割合 (%)	処理時間 (分)	処理温度 (°C)	糖			有機酸 リンゴ酸 (%)	陽イオン				
					フルクトース (%)	グルコース (%)	スクロース (%)		Na ⁺ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)
無処理	—	—	—	—	8.3	3.0	4.1	0.34	11.7	7.2	1327.1	21.5	15.8
破碎 2mm	1~3	5	5	20	8.2	2.8	4.0	0.33	51.1	6.4	1228.7	22.3	20.8
造粒 1mm	0.5~1				8.3	3.6	4.0	0.32	77.5	6.0	1219.5	23.4	22.7
造粒 4mm	3~5				8.2	3.4	4.0	0.32	18.4	6.9	1291.4	21.3	16.3
造粒 8mm	7~9				8.2	2.6	4.1	0.32	16.6	7.2	1294.2	21.3	16.0
破碎 2mm	1~3	1	5	20	8.2	3.3	3.8	0.33	19.2	7.9	1307.8	22.0	17.6
		5			8.2	2.8	4.0	0.33	51.1	6.4	1228.7	22.3	20.8
		10			8.2	3.0	4.1	0.32	97.8	6.0	1180.7	24.7	28.9
		20			8.5	3.5	4.1	0.32	169.3	5.4	1051.9	26.5	38.7
破碎 2mm	1~3	5	1	20	8.1	3.1	4.2	0.34	27.8	7.3	1309.0	22.5	19.1
			5		8.2	2.8	4.0	0.33	51.1	6.4	1228.7	22.3	20.8
			10		8.0	3.5	4.0	0.33	64.8	7.0	1215.8	23.2	23.5
			30		8.0	3.6	4.1	0.33	97.9	6.0	1185.4	24.1	26.9
			60		8.0	3.7	4.1	0.33	119.0	6.4	1173.1	24.7	29.0
破碎 2mm	1~3	5	0	5	8.2	3.7	4.0	0.33	36.4	7.5	1300.1	23.1	20.6
			20		8.2	2.8	4.0	0.33	51.1	6.4	1228.7	22.3	20.8
			40		8.6	3.6	4.2	0.34	74.6	7.3	1281.1	24.4	24.9
			80		8.8	2.6	4.5	0.35	125.3	7.0	1254.7	24.9	27.0

く、60 分処理での Cs 残存率は 28% となった (表 2)。しかしながら、添加量の比較と同様に、処理時間と Cs 残存率は比例せず、処理時間が長くなると、処理時間に対する除去率は低くなる傾向が示された (図 3)。

また、処理温度の比較では、温度が低いと除去効果が低かったが、40℃処理と 80℃処理ではいずれも Cs 残存率は 54% となった (表 2, 図 4)。

(2) ゼオライト処理と糖含量の変化

無処理のリンゴジュースにはフルクトースが 8.3% (w/v)、グルコースが 3.0% (w/v)、スクロースが 4.1% (w/v) 含まれていたが、ゼオライト処理によって組成や含有量が大きく変化することはなかった (表 3)。

(3) ゼオライト処理と有機酸含量の変化

無処理のリンゴジュースにはリンゴ酸が 0.34% (w/v)

含まれていたが、ゼオライト処理によって含有量が大きく変化することはなかった (表 3)。

(4) ゼオライト処理と陽イオン濃度の変化

無処理のリンゴジュースには Na⁺が 11.7mg/L、NH₄⁺が 7.2mg/L、K⁺が 1327.1mg/L、Mg²⁺が 21.5mg/L、Ca²⁺が 15.8mg/L、それぞれ含まれており、陽イオン全体では K⁺が多くを占めていた。これらの陽イオンはゼオライト処理により、Na⁺ Ca²⁺は増加、K⁺は減少、Mg²⁺および NH₄⁺は処理前後で大きな変化はなかった。減少量としては K⁺が多かったが、Na⁺の増加量も多く、処理方法によっては Na⁺は無処理のジュースの 14 倍以上になった (表 3)。また、ゼオライト処理前後の Na⁺含量の変化率と放射性セシウム濃度および K⁺含量の変化率には負の相関があり、それぞれの決定係数は 0.823, 0.706 であった (図 5)。また、Ca²⁺含

図5 ゼオライト処理によるNa⁺含量の変化率と放射性セシウム濃度およびK⁺含量の変化率の相関関係

図6 ゼオライト処理によるCa²⁺含量の変化率と放射性セシウム濃度およびK⁺含量の変化率の相関関係

量の変化率と放射性セシウム濃度およびK⁺含量の変化率にも同様に負の相関があり、それぞれの決定係数は0.833, 0.765であった(図6)。これらの結果から、ジュース処理前にゼオライトに吸着していたNa⁺とCa²⁺がリンゴジュースに含まれる放射性セシウムやK⁺と置換されたことが示唆された。

(5) ゼオライト処理と陰イオン濃度の変化

陰イオンについては、無処理のジュースでCl⁻が10 mg/L, PO₄³⁻が470 mg/L含まれていたが、ゼオライト処理によって増減することは無かった(データ示さず)。

考 察

本研究の結果、ゼオライトによってリンゴジュースに含まれる放射性セシウムを低減できることが明かとなったが、果汁から陽イオンを低減させる技術については陽イオン交換樹脂を用いてK⁺を低減させる方法が既に確立されており¹¹⁾¹²⁾、放射性セシウムも同様の方法によって除去が可能であると考えられる。しかし、それらの技術を導入するためには設備投資や施設の改築などが必要であり、特に小規模な加工施設では経済的にも対応することは難しい。本研究で用いたゼオライトは安価で入手が容易であり、小規模でも処理が可能である点が大きな利点であると考えられる。

一方、ゼオライト処理後のジュースの品質については、甘味や酸味、およびそれらを示す成分については大きな変化はなかったが、香りが若干変化していた。この要因については、処理前のゼオライトの洗浄回数を増やしてリンゴジュースを処理したところ香りの変化が抑えられていたことから、ゼオライトの匂いの付着が主な原因であると考えられた。香りの変化を抑制する方法については今後の課題である。

また、ゼオライト処理によってリンゴジュースに含まれる陽イオン濃度が変化した。処理後のそれぞれの陽イオン濃度の増減割合から、使用したゼオライトに吸着していたNa⁺やCa²⁺が放出され、リンゴジュース中のK⁺やCs⁺が吸着したことが示唆された。海水やNaCl溶液において

は、ゼオライトがK⁺やCa²⁺を放出し、Na⁺を吸着したとの報告¹³⁾¹⁴⁾があるが、ゼオライトの陽イオン交換反応については液相中に共存する陽イオンやそれらの濃度の影響を受ける¹⁵⁾とされていることから、リンゴジュース中ではNa⁺やCa²⁺よりもK⁺やCs⁺を吸着しやすい性質を持つと考えられた。今後はリンゴジュース中の陽イオン濃度の変化が少なく、かつ放射性セシウムを減少させる方法についても検討の余地がある。

ゼオライトを実際にジュース加工へ応用することを考えた場合、造粒したゼオライトは割れやすいため、1~3 mm程度に破碎したゼオライトが使用に適していると考えられる。また、処理時間は30分以上では放射性セシウムの低減率が下がるため、おおよそ20分程度が効率良く処理できる時間であると考えられた。ただし、ゼオライトを食品加工に利用する場合は加工後の食品のゼオライト残存量が0.5%を超えてはならず、例えばジュース1 kg当たり5 g以下であるという条件を満たさなければならない。この条件を満たすには処理したジュースの濾過が重要である。さらに、食品の製造または加工上必要不可欠な場合にのみ利用可能とされており、使用にあたっては保健所等の関係機関に使用の可否を確認する必要があるため、実際の利用に向けてはさらなる検討が必要である。

要 約

食品添加物として指定されているゼオライトは、陽イオン交換能を有することから、放射性セシウムの除去に効果を示すことが知られている。本研究では、平成23年度産のリンゴを加工して得られたリンゴジュースのゼオライト処理による放射性セシウムの除去効果を調査した。その結果、リンゴジュースにゼオライトを添加することにより、放射性セシウムを低減できることが明らかとなった。そして、放射性セシウムの低減効果については、ゼオライトの表面積や処理時間と正の相関があることが示された。また処理温度の低下に伴って放射性セシウムの低減効果も弱くなることが明らかとなった。ゼオライト処理により、リンゴジュース中の糖やリンゴ酸濃度に影響はなかったが、陽

イオン濃度に関して Na^+ と Ca^{2+} の増加と K^+ の減少が認められた。一方、ゼオライト処理により香りが若干変化することが確認された。

本研究の一部はすかいらーくフードサイエンス研究所の学術研究助成を受けて実施しました。また、本研究の遂行にあたり、ゼオライトを提供して頂いたジークライト株式会社に深謝いたします。

文 献

- 1) 厚生労働省, 通知「放射能汚染された食品の取り扱いについて」, 平成 23 年 3 月 17 日.
- 2) 文部科学省, 放射能測定シリーズ No. 15「緊急時における放射性ヨウ素測定法」(平成 14 年改訂版) (2002).
- 3) 厚生労働省, 通知「乳及び乳製品の成分規格等に関する省令の一部を改正する省令, 乳及び乳製品の成分規格等に関する省令別表の二の(一)の(1)の規定に基づき厚生労働大臣が定める放射性物質を定める件及び食品, 添加物等の規格基準の一部を改正する件について」, 平成 24 年 3 月 15 日.
- 4) 厚生労働省, 通知「食品中の放射性物質の試験法について」, 平成 24 年 3 月 15 日.
- 5) 財団法人原子力環境整備センター, 環境パラメータ・シリーズ 4 食品の調理・加工による放射性核種の除去率 (1994).
- 6) 関澤春仁, 山下慎司, 小野美代子, 後藤裕子, 一条晶恵, 丹治克男, 農産物の加工と放射性物質の動態, 園芸学研究第 11 巻別冊 1, p. 154, 大阪 (2012).
- 7) 東京電力株式会社, 福島第一原子力発電所 放射性滞留水の回収・処理の取組み～水処理(放射能除去)の仕組み～, 参

考資料 (2011).

- 8) 福島県農林水産部, 農産物の放射性セシウム対策に係る除染及び技術対策の指針 第 1 版 (2012).
- 9) 食品衛生法及び栄養改善法の一部を改正する法律 (平成 7 年法律第 101 号) 附則第 2 条第 4 項に規定する既存添加物名簿 (平成 8 年 4 月 16 日厚生省告示第 120 号).
- 10) 食品, 添加物等の規格基準 (昭和 34 年厚生省告示第 370 号).
- 11) 中野 BC 株式会社, 低ナトリウム濃度梅果汁の製造方法及び梅果汁飲料の製造方法, 特許第 3692302 号, 平成 17 年 6 月 24 日.
- 12) 明治製菓株式会社, 低カリウムジュースとその製造方法及びその含有製品, 特許第 4590145 号, 平成 22 年 9 月 17 日.
- 13) 和嶋隆昌, 志水倫恵, 岡本 光, 池上康之, 海水中におけるゼオライトのイオン交換に関する基礎的実験, 佐賀大学海洋エネルギー研究センター報告, **16**, 1-6 (2008).
- 14) 和嶋隆昌, 志水倫恵, 大和武彦, 池上康之, 産地の異なる天然ゼオライトの NaCl 溶液中におけるイオン交換に関する基礎的実験, 佐賀大学海洋エネルギー研究センター報告, **16**, 1-6 (2008).
- 15) 小野嘉夫, 八嶋健明, 「ゼオライトの科学と工学」, (講談社, 東京), pp. 111-117 (2000).

引用 URL

- i) 財団法人日本分析センター: 日本の環境放射能と放射線, http://www.kankyo-hoshano.go.jp/kl_db/servlet/com_s_index (2012.12.18).
- ii) 日本原子力学会バックエンド部会, 福島第一原子力発電所内汚染水処理技術のための基礎データ (2011.5.2), <http://www.nuce-aesj.org/wiki.php?id=projects:clwt:start> (2012.12.18).

(平成 24 年 11 月 9 日受付, 平成 25 年 1 月 28 日受理)