廃船舶の放射能調査と除染への 基礎的な取り組み

滝上 英孝^{1*}・山本 貴士¹・鈴木 剛¹・
竹内 幸生¹・田野崎隆雄¹・高田 光康¹・大久保拓郎²

¹ (独) 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

² (一財) 日本環境衛生センター (〒210-0828 神奈川県川崎市川崎区四谷上町10-6)

* E-mail: takigami@nies.go.jp

東日本大震災の後、福島県沿岸部に残置されている廃船舶の放射線量率(線量率)及び仮置き場の環境中の線量率を多点測定し、線量率分布の可視化に努めた。さらに適切な廃船舶を選定し、船舶に堆積する支障物(土砂、溜り水)の除去、及びFRP部材表面等に付着していると考えられる放射性物質の洗浄除去を試みて、除染作業前後の船舶の線量率の変化について調べた。また、一部の廃船舶部材等は採取の上、放射能濃度の定量を行った。以上から、廃船舶及び仮置き場の放射能を評価し、廃船舶そのものの放射能汚染についての考察を踏まえて、廃棄物処理の可能性について検証を試みた。結果として、船舶に滞留する土砂等により線量率が上がるケースがみられたが、それらを撤去、洗浄除去することにより線量率が有意に低減し、以降の廃棄物処理やリサイクルにつながる見通しが得られた。

Key Words : boat waste, decontamination, radioactive cesium, radioactivity, radiation dose

1. はじめに

2011年3月の東日本大震災と津波を受けて生じた福島第一原子力発電所の放射能放出事故後、福島県相馬市沿岸部には二百数十艘の廃船舶(舟艇と呼ばれる小型船。繊維強化プラスチック(FRP)製の船体を有するもの)が残置されていた。FRPは材質が高強度であるため、処理・リサイクル困難物であるが、そのリサイクルシステムの構築も進められてきた¹⁾。平成17年9月には、環境省において広域処理に係る特例の対象となる一般廃棄物に関する告示が改正され、対象となる一般廃棄物として「廃FRP船」が追加されている²⁾。実際には、指定引取場所に収集され、粗解体された後、その破材を中間処理施設に輸送し、破碎・選別等を行い、最終的にセメント焼成することによりリサイクルを行うルートが整備されている³⁾。このリサイクルシステムは今回の震災による災害船舶廃棄物に関しても活用可能であったが、放射能汚染に対する懸念のために処理が停滞していた。相馬市における試行的な現場調査において廃船舶の放射線の表面線量率は0.38 $\mu\text{Sv/h}$ を示す場合もあり、解体、破碎業者

の受け入れ基準(0.20 $\mu\text{Sv/h}$)を超過したことも停滞の一因であった。一方で、環境中のバックグラウンド放射線量率が高いことで船体の線量率を過大評価している可能性も考えられ、より詳細な調査と評価が求められていた。

福島県沿岸部の自治体では、前述のような廃船舶の処理が問題となっており、本研究では、まず相馬市との提携を行い、調査を推進した。まず、相馬市沿岸部の仮置き場に残置された廃船舶の放射線量率及び仮置き場の放射線量率を多点測定し、線量率分布の可視化に努めた。さらに適切な廃船舶を選定し、船舶に堆積する支障物(土砂、滞留水等)の除去、及び部材(FRP)表面等に付着していると考えられる放射性物質の洗浄除去を試みて、除去前後の廃船舶の放射線量率の変化について調べた。また、一部の廃船舶部材等は採取の上、放射性Cs(¹³⁴Csと¹³⁷Cs)の放射能濃度の定量を行った。上記を踏まえて、廃船舶及び仮置き場の放射能を限定的にはあるが評価し、廃棄物処理(広域処理)への展開が可能であるか検討と課題の抽出を試みた。

2. 方法

下記の(1)～(3)の調査に関して、相馬市沿岸部の廃船舶仮置き場において平成24年6月～8月に実施した。

(1) 廃船舶表面や船舶周辺環境のスクリーニング測定

仮置き場に残置されている廃船舶表面や廃船舶周辺環境のガンマカメラ（東芝製ポータブルガンマカメラ装置）による放射能測定スクリーニングを実施した。ガンマカメラは半導体素子を100個以上、平面上に並べ、それぞれの素子に入射する特定エネルギーの γ 線を測定することにより、視野範囲（視野角 60° ）における面的な放射線分布を遠隔測定の上、放射線源の高い場所を可視化することが可能な機器である。最大で60分程度までの測定時間で露光すれば、 $0.1 \mu\text{Sv/h}$ 程度の低線量率のホットスポットの同定も可能である。本調査では10～20分程度の測定時間を確保した。

(2) 廃船舶の詳細線量率調査及び支障物除去に伴う線量率低減確認調査

仮置き場に残置されている廃船舶2艘（いずれも船長約7 m、船幅約2.5 m）について船体表面及び船舶周辺環境中の放射線量率の多点測定を実施した。この2艘は、他の廃船舶群とはやや離れた位置に独立して存在し、他の廃船舶からの放射線の影響を受けにくいという理由により選定した。多点測定はGMサーベイメータ（Aloka社製、TGS-133）及びNaI (TI)シンチレーションサーベイメータ（Aloka社製、TCS-172B）を用いて行った。具体的には、船舶の周縁部分（1 m高さ、1 cm表面）を50 cm間隔で測定し、また、船舶内も中央線に沿って表面線量率

（1 cm表面）を測定した。あわせて、船舶の周縁の直下地面についても表面線量率（1 cm表面）を測定した。また、対象とした廃船舶内の支障物（土砂等の付着・堆積物や残置物）の撤去や洗浄に伴う放射線量率変化（低減）の測定確認を現場で実施した。このような除染に伴う線量率の低減効果を確認する意味から、もう1艘の廃船舶での簡易調査を追加した（除染作業前後での船内のNaI (TI)シンチレーションサーベイメータによる測定のみを実施した）。なお、GMサーベイメータ及びNaI (TI)シンチレーションサーベイメータによる線量率測定時の特定数は十分に長い時間とし（10秒以上で設定した）、環境省放射能濃度測定方法ガイドライン⁹を参考に特定数の3倍程度の時間を待って測定値の読み取りを行った。

(3) FRP部材や支障物の放射能濃度測定

FRP部材や支障物（土砂、滞留水）のサンプリングと放射能（放射性Cs放射能濃度）測定を行った。測定は現地で可搬型NaI (TI)シンチレーションスペクトロメータRT-30（GEORADIS社製、90 mm厚さの鉛遮蔽容器、下部には50 mm厚みの鉛板付き）にて実施した。採取した試料は、容積750 mLの円筒形プラスチック容器に充填し、測定を行った。放射能濃度（主要核種である ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能濃度）は試料採取日時点のものとした。

また、一部のFRP部材については研究所に持ち帰り、バックグラウンドレベルの低い環境で表面線量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）を測定し、また、Ge半導体検出器（CANBERRA社製、GC、相対効率20%）による γ 線核種分析により主要核種である ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能濃度を求めた。放射能濃度は試料採取日時点のものとした。

図-1 廃船舶のガンマカメラでの撮影結果

3. 調査結果及び考察

(1) 廃船舶表面や周辺環境のスクリーニング測定結果

仮置き場における廃船舶及び船舶周辺環境の放射能汚染状況についてガンマカメラを用いたスクリーニング調査を行った。ガンマカメラでは、放射線検出器により計測した γ 線強度分布がビデオで撮影された画像上に重ねて表示され、 γ 線強度分布が色調変化で表示される。撮影結果の中央下端には表示レンジが表示される。また、撮影結果の右下端に撮影範囲内で測定された最大の計数率（1秒間あたりに計数した γ 線の数）が表示される。ガンマカメラの撮影写真の中で検出放射線が「平均値以上」の表示の場合、平均値に比べ放射線が多く出ている場所（汚染が高い場所）のみが着色して示され、色の表示がなく、背景画像が見えている箇所については、周囲に比べ汚染の分布が少ないことを示している。

図-1に廃船舶のガンマカメラでの撮影結果例を示す。

図-1（左）は、放射線のホットスポットが船体から検出され、船体傷部分の表面線量率が比較的高いことがNaI (TI)サーベイメータの併用により確認できた例である。図-1（右）は、放射線が地面から検出され、船体の放射線も地面（バックグラウンド）からの影響を受けていることを示唆する。

ガンマカメラ撮影写真での色調からは、調査地点である廃船舶仮置き場における廃船舶及び船舶周辺環境の放

射線量率は高くない状況であった（総じて1 μ Sv/hを超えることはなく、< 0.1~0.4 μ Sv/hのレベルにある）。特に廃船舶に関しては周辺土壌等からの影響を受けており、また、廃船舶内の相対的に放射線量の高い部分は点状に分布しており、廃船舶が津波を受けて沈没した際に侵入してきた放射能の高い土砂の堆積、付着等によるものであることがうかがえた。

(2) 廃船舶の詳細線量率調査及び支障物除去に伴う線量率低減確認調査結果

仮置きされていた2艘の廃船舶（船舶A、B）について線量率測定を行った結果について記載する。船舶AについてはGMサーベイメータによる測定の結果、船舶の周縁部（FRPのクラック（破断）部分）に500 cpmを超える箇所が見つかった（図-2）。NaI (TI)サーベイメータでは、先述のGMサーベイメータで高かった箇所は、0.25~0.31 μ Sv/hを示し、船舶の表面線量率としては他の部分より相対的に高かった（図-3）。これらの箇所の放射線量率は、地面に比べても高く、クラック部分への土砂の付着が認められた。その他の船体部分はほぼ、直下の地面よりも低い線量率を示した。船体から同じ高さ（1 m）で距離を取り、船体から離れてもNaI (TI)サーベイメータによる線量率について変化が見られないことから、船舶周辺環境（バックグラウンド）による影響が大きいものと推察された。

図-2 GMサーベイメータによる廃船舶Aの線量率（cpm）詳細評価結果

廃船舶の周縁部分の表面線量率、船内の中央線に沿った表面線量率、船舶の周縁部分の直下地面の表面線量率を示す。各測定箇所では除染（支障物の撤去や洗浄）に伴う放射線量率の変化についても示す。「カット」とある部分は、部材採取を行い放射能濃度測定に供した箇所を示す（除染後の測定を実施していない）。

図-3 NaI(Tl)サーベイメータによる廃船舶Aの線量率(μSv/h)詳細評価結果

廃船舶の周縁部分の表面線量率、船内の中央線に沿った表面線量率、船舶の周縁部分の直下地面の表面線量率を示す。各測定箇所では除染(支障物の撤去や洗浄)に伴う放射線量率の変化についても示す。「カット」とある部分は、部材採取を行い放射能濃度測定に供した箇所を示す(除染後の測定を実施していない)。

船舶Bについては、放射線量は船舶Aよりも低く、GMサーベイメータで最大150 cpm、NaI(Tl)サーベイメータではほぼ0.20 μSv/hを下回る結果となった。船尾部分で0.20 μSv/hを超える箇所があるが、地面からの影響を受けているものと推察された。このような2船舶について、支障物の除去及び洗浄作業を実施した(図-4)。支障物除去としては、救命胴衣等の残置物及び堆積土砂の撤去を人力により行った。また、洗浄作業は、家庭用の高压洗浄機と携帯電源を用いて500 Lタンクから取水の上、放

水を行って、船体表面と底部に残留する土砂の除去を実施した。およそ、1時間程度の除去・洗浄作業を行った後に、再度、船体表面及び船体直下の地面の線量率を再計測した(図-2、図-3)。船舶Aについては高線量率を示すスポットの線量率低減(GMサーベイメータ: 500 cpm→120 cpm、NaI(Tl)サーベイメータ: 0.31 μSv/h→0.14 μSv/h)が認められた。船舶Aのその他の船体部分、船舶Bの船体部分についても線量率低減が認められる箇所が見受けられたが、多くの部分についてはほとんど測定数値に変化がなく、船舶周辺環境からの影響を大きく受けているため、支障物除去や洗浄による効果が見かけ上、認められなかったものと考えられた。NaI(Tl)サーベイメータに比べるとGMサーベイメータの方の低減度合いの方が大きい傾向があり、船体表面の放射性物質の除去が行えていることが、飛程の短いβ線の低減(GMサーベイメータの測定値の減少)により示されていると考察された。一方で、γ線については船舶周辺環境からの入射線を広く拾うため、船体表面の正味の低減度合いについて評価しにくい。このことは船体表面の正味の線量率を評価する上では、バックグラウンドの低い測定環境に船体を移動するなどして測定することが望ましいことを示している。

図-4 支障物撤去及び洗浄作業のようす

左上: 高压洗浄作業、左下: 支障物撤去
右上: 船内の支障物、右下: 作業後の船内

この2船舶とは別にもう1船舶(廃船舶C、船長約5 m、船幅約2 m)の支障物撤去・洗浄作業を実施した。その結果を図-5に示す。10箇所について作業前後のNaI(Tl)サーベイメータによる船体の表面線量率の変化を示すが、

図-5 廃船舶Cの船内支障物撤去及び洗浄による放射線量率低減効果

高線量部分（測定点⑦～⑩）の顕著な低減が認められた。この低減は汚染堆積土砂（17,000～69,000 Bq/kg）の除去によるものであり、FRP船の汚染様態は固着性のものではなく、洗浄により低減可能な性質を有するものと理解された。また、堆積土砂の洗浄除去前後に表面線量率が0.20→0.28 μSv/hとなった箇所（測定点⑥右下）は、土砂を含む洗浄排水が流出した場所であり、汚染土砂の影響を受けている可能性が高いと考えられた。

(3) FRP部材や支障物の放射能濃度測定結果

仮置き場における廃船舶Aの調査時に採取した関連試料（周辺土砂、船内泥、滞留水、FRP、洗浄時の泥水）について可搬型NaI (Ti)シンチレーションスペクトロメータを用いた現地測定を行い、得られた放射性Cs放射能濃度について表-1に示す。

船体周辺土砂及び船内泥試料については、Cs放射能濃度合計値で約400～2,000 Bq/kgのレベルにあり、例えば、放射性物質汚染対処特別措置法で定める特別な管理が必要な指定廃棄物基準（8,000 Bq/kg）⁵⁾を大きく下回っていた。船内の滞留水とFRP試料については不検出（検出下限値10～30 Bq/kg）という結果であった。洗浄作業時に発生した濁水（洗浄水＋泥）については合計で490 Bq/kgであった。濁水については、公共水域の水中の濃度限度（¹³⁴Cs: 60 Bq/L, ¹³⁷Cs: 90 Bq/L、3か月平均値）⁶⁾を超過しないように留意する必要があると考えられた。

現地で採取を行った廃船舶のFRP部材3試料について、NaI (Ti)サーベイメータによる表面線量率データ（現地で測定した表面線量率（μSv/h）及び、研究所内に持ち帰

りバックグラウンドレベルの低い環境で測定した表面線量率（μSv/h）とGe半導体検出器によるγ線核種分析により求めた¹³⁴Csと¹³⁷Csの放射能濃度を表-2に示す。

FRP部材2からは¹³⁴Csと¹³⁷Csの合計放射能濃度として5,400 Bq/kg、また、他の2部材（FRP部材1及び3）からはそれぞれ620 Bq/kg、190 Bq/kgと定量された。

この3試料については、表面線量率（現場において測定した現場表面線量率と、バックグラウンドレベルの低い研究所に持ち帰り測定した所内表面線量率のいずれも）と含有Cs放射能濃度の間には正相関がみられた。

表-1 可搬型NaI (Ti)シンチレーションスペクトロメータによる船舶A内外の土砂や水試料等の放射性Cs放射能濃度

試料	¹³⁴ Cs (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)
船体周辺土砂 1	770	1200
船体周辺土砂 2	790	1300
船体周辺土砂 3	670	1100
船体周辺土砂 4	260	440
船体周辺土砂 5	260	450
船体周辺土砂 6	180	280
船体周辺土砂 7	170	270
船内泥	350	580
船内滞留水 1	ND (<20)	ND (<20)
船内滞留水 2	ND (<20)	ND (<20)
船内滞留水 3	ND (<20)	ND (<20)
船体 FRP	ND (<40)	ND (<20)
洗浄水＋泥	190	300

表-2 採取 FRP 部材中の表面線量率及び放射能濃度の測定結果

採取試料	FRP部材1	FRP部材2	FRP部材3
試料重量 (g)	280	210	220
試料容積 (ml)	900	900	900
現地表面線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	0.24	0.28	0.16
所内表面線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	0.09	0.13	0.07
放射能濃度 (Bq/kg)	^{134}Cs : 240	^{134}Cs : 2200	^{134}Cs : 80
	^{137}Cs : 380	^{137}Cs : 3200	^{137}Cs : 100

FRP 部材は、不均一媒体であり、破砕が困難であるため、測定容器への充填度が不十分であった。試料容積は参考値。放射能濃度を求めるに当たり、減衰補正日時は試料採取日とした。

表面線量率の高低にはそれほど差がみられなかったが、放射能濃度レベルには1桁の広がりのある結果となった。

放射能濃度の最も高かったFRP部材2については、付着していた土砂を刷毛により除去し、FRP部材の放射能濃度を測定した結果、FRP部材からは検出下限値に近い値が得られ、今回のFRP部材の汚染の本態は遊離性の土砂によることがあらためて示唆された。

4. まとめ

今回の廃船舶調査により得られた知見の要点を列記する。

- ・廃船舶の下部の地面の影響を受けて放射線量率が高くなるケースが大半であった。
- ・廃船舶表面に滞留する堆積土砂あるいは、付着土砂等により放射線量率が上がるケースがみられた。
- ・支障物の撤去と水洗浄による除泥により、廃船舶表面の放射線量率を実際に下げることが可能であった。
- ・限定的な調査結果ではあるが、例えば船舶のリサイクルの入口条件となる船体の表面線量 $0.20 \mu\text{Sv/h}$ （粗解体の受入基準として業者より示された放射線量の自主規制値）はバックグラウンドを差し引いた正味値として、今回の調査ケースでは達成できる見通しが高いものと思われた。あわせて、廃船舶部材の放射能濃度のデータも持ち合わせておくことが望ましいと考えられた。
- ・NaI (TI)サーベイメータによる線量率の測定に際しては、測定対象のみならず、船舶周辺環境から入射する γ 線を広く拾う可能性があるため、GMサーベイメータも併用しつつ、局所的な測定や除染に伴う線量率低減の評価を入念に行う必要がある。

本調査結果より、廃船舶のリサイクル、適正処理に向けた除染（支障物除去や除泥）を行う上で、考える要点について挙げる。災害廃棄物としての廃船舶のリサイ

クルに関しては、解体、シュレッダー、セメント製造を見通した全体プロセスでの放射線量率や放射能濃度の測定評価と対策が必要となる。廃船舶の残置現場における一次的な対応方策としては、今回の調査結果より下記の事項が重要であると考えられる。

- ・船内の除泥等、除染の効率化を検討する必要がある。船舶の内部構造（竜骨・ロンジフレーム）を理解した上で除染作業を実施する必要がある。船体表面は高圧水洗浄、船内については構造を理解した上で穿孔するなどして、除泥や排水が効果的に行えるようにすべきである。
- ・除染（支障物除去）に伴う線量率低減効果をみる上では現地においてもコンクリート土間や隔離壁を設けて、低線量環境（船舶周辺環境からの放射線の影響を大きく受けずに船体正味の線量を評価できる環境）を確保することが望ましい。また、洗浄水管理の観点からも上述のようなスペースを考慮することが重要である。洗浄水については、土砂の混じった濁水となることから簡易な沈殿池を設けるなどして固液分離を行い、上澄みの排水の放射能濃度を確認後に排水する（沈殿泥については適切に管理する）必要があると考えられる。

なお、本調査を通じて得られた知見に基づき、「残置廃船舶の放射線計測及び支障物除去・洗浄作業要領（案）」を作成し、関係自治体（相馬市）に提供の上、既に廃船舶の現地での解体、撤去作業が進行していることを付記しておきたい。

本研究では廃船舶に限定した調査を扱ったが、廃船舶によらず、他の災害廃棄物（複合製品や種々の廃棄物の混合がれき）の放射能評価にも共通する方法論の構築を行うことや、他の災害廃棄物への適用事例を増やし、知見を充実させる必要がある。

謝辞：本調査を実施するにあたり、福島県の関係自治体（相馬市）、環境省現地災害対策本部福島県内支援チームの協力を得た。また、国立環境研究所 渡部真文氏、千村和彦氏、深町孝一氏の調査協力を得た。ここに記して

謝意を表する。

参考文献

- 1) 北村孝雄：廃 FRP の資源化リサイクル，資源と素材，Vol. 113, pp. 1014-1017, 1997.
- 2) 環境省告示第九十号（平成十七年九月八日），広域的处理に係る特例の対象となる一般廃棄物の一部を改正する件
- 3) 一般社団法人日本マリン事業協会：FRP 船リサイクル事業概要，<http://www.marine-jbia.or.jp/recycle/recycle.html>（2013 年 5 月 23 日確認）
- 4) 環境省：放射能濃度等測定方法ガイドライン 平成 25 年 3 月 第 2 版。

- 5) 環境省：平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法施行規則（平成 23 年 12 月 14 日環境省令第 33 号）第 14 条
- 6) 環境省：平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法施行規則（平成 23 年 12 月 14 日環境省令第 33 号）第 25 条第 6 項別表第 2

(2013. 5. 24 受付)

Survey and Decontamination Trial of Boat Wastes Contaminated with Radioactive Cesium

Hidetaka TAKIGAMI¹, Takashi YAMAMOTO¹, Go SUZUKI¹,
Yukio TAKEUCHI¹, Takao TANOSAKI¹, Mitsuyasu TAKATA¹ and Takuro OKUBO²

¹Center for Material Cycles and Waste Management Research,
National Institute for Environmental Studies

²Japan Environmental Sanitation Center

Field survey was conducted to investigate radioactive cesium contamination status of the fiber reinforced plastic (FRP) boats which were damaged by the Great East Japan Earthquake and resulting tsunami, and further affected by nuclear fallout from the accident at the Fukushima No. 1 nuclear power plant. Radiation dose rate was measured targeted at some selected boats and the surrounding environment by using radiation survey meters (*i.e.*, NaI (Tl) scintillation counter and GM counter) and a radiation-sensing camera in order to visualize a dose rate distribution within the area. In addition, FRP parts, sediment deposits and stagnant waters in the boats were sampled and their ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs radioactivity were measured by gamma-ray spectrometry using NaI (Tl) scintillation or Ge detector. From the monitoring results, materials or sediments in the boats enhanced the radiation levels, however, which can be significantly reduced by decontamination operations such as removal and wash-out of the materials or sediments (*i.e.*, countermeasures for surface-deposited radioactivity). Consequently, the conducted survey and decontamination approaches became a good model and promoted a prompt dismantlement, removal and further disposal/recycle by the local authorities concerned.