

9-1 福島第一原子力発電所の廃炉に伴う廃棄物の種類と量

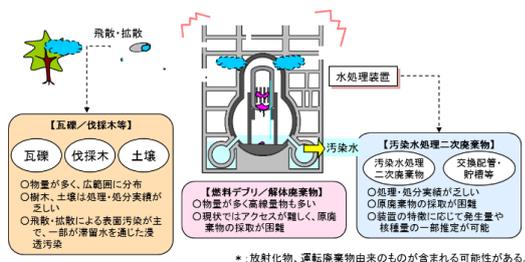
1. はじめに

福島第一原子力発電所(1F)の事故により発生した廃棄物は、炉心燃料に由来した放射性核種を含んでいること、津波や事故直後の炉心冷却に起因する海水成分を含む可能性があること、高線量であり処理・処分の実績が無いゼオライトやスラッジを含むこと、汚染のレベルが多岐にわたりその発生物量も大きいこと等、従来の原子力発電所で発生する放射性廃棄物と異なる特徴がある。

廃棄物の種類、発生量は、廃炉の進展に伴って変動するが、ここでは廃棄物の概要と2014年7月時点での現況をまとめる。

2. 1Fの廃炉で発生する廃棄物の特徴

1Fの事故によって発生した放射性廃棄物等は、第1図に示すように廃棄物の汚染形態によって、①水素爆発により拡散した気体状核種で汚染されたもの、②循環冷却水に燃料から溶出した核種で汚染されたもの、③燃料デブリ及び燃料デブリが付着して汚染されたもの、の3種類に分類することができる。それぞれの代表的な廃棄物とその特徴は以下の通りである。また、これら3種類以外にそれぞれの汚染起源が複合したもの及び事故前の操業による汚染と複合したものがある。



第1図 福島第一事故廃棄物の特徴

① ガレキ、伐採木等

原子炉建屋の爆発で拡散、飛散した揮発性の核種で表面が汚染されたものが主であり、一部は滞留水と接して汚染が浸透している。物量が多く、広範囲に分布している。

② 汚染水処理工程からの二次廃棄物

放射性核種を含んだ汚染水の処理に利用したゼオライト等の吸着材や、汚染水と接した配管やタンク(貯槽)である。これまでに放射性廃棄物としての処理・処分の実績が乏しい。非常に高線量であるため原廃棄物の採取は困難であるが、装置の特徴に応じて発生量や核種量の一部推定は可能である。

③ 燃料デブリ及び解体廃棄物

燃料デブリそのもの、及び燃料デブリで汚染されている炉心部分の解体廃棄物が相当する。高線量の物も多く、現状ではアクセスが難しい。

通常運転時における操業廃棄物は、管理された状態で発生するため、操業期間中の発生量はもとよりその後の推移、個別の廃棄物中の含有放射能や化学物質等の基本的な廃棄物性状に係わる情報が把握されている。また、未処理・処理済の双方とも現行の規制に基づく保管管理等が適切に行われており、処分方法や安全評価方法に加え対応する規制・基準も整備されている。

これに対して、事故廃棄物については、多くの汚染がコントロールできない状態で発生していること、汚染範囲が広く、高線量箇所もあるため、特に長半減期核種の組成等のデータが限定的であること等、非常に多くの不明点がある。この不明点を解消し、管理された状況に置くことが事故廃棄物に関する対策、技術開発の大きな課題である。

3. 1Fの廃炉で発生する廃棄物の管理状況

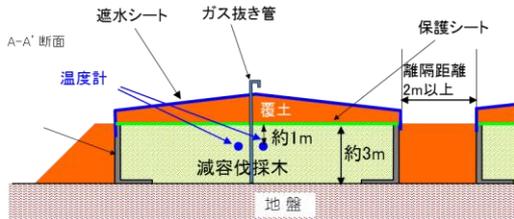
3.1 ガレキ・伐採木等

事故及びその後の廃止措置に伴う工事等により発生したガレキ・伐採木は、1F構内にエリアを設けて、表面線量が0.1mSv/h未満は屋外集積、0.1~1mSv/hはシート養生、1~30mSv/hは覆土式一時保管施設、仮設保管設備、容器において保管されている。また、表面線量が30mSv/h以上の高線量の廃棄物については、固体廃棄物貯蔵庫で保管されている。伐採木の場合、枝・葉の部分は、線量低減対策及び、火災発生リスクへの対処として、チップ化して一時保管槽に保管しているが、表面線量の低い幹の部分は屋外集積している。

ガレキ・伐採木の保管事例として、覆土式一時保管施設、伐採木一時保管槽の外観と内部構造をそれぞれ第2~第5図に示す。



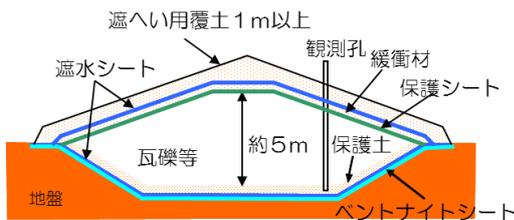
第2図 覆土式一時保管施設の外観



第3図 覆土式一時保管施設の構造



第4図 伐採木一時保管槽の外観



第5図 伐採木一時保管槽の構造

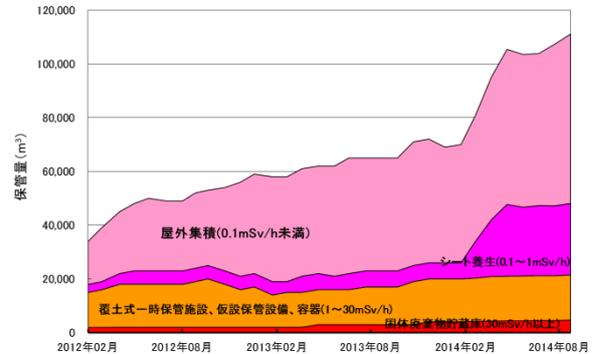
ガレキ・伐採木の2014年8月末時点の管理状況を第1表に示す。また、ガレキの保管量の推移を第6図に、伐採木の保管量の推移を第7図に示す。

第1表 ガレキ・伐採木の管理状況

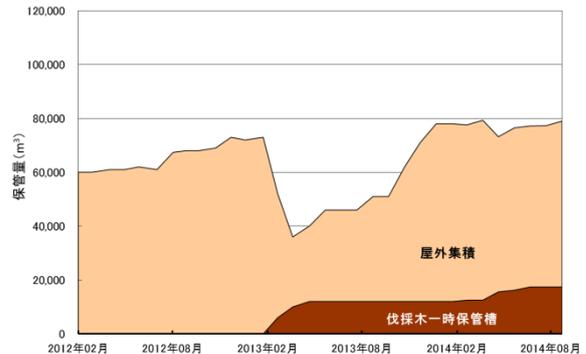
分類		保管量 (m ³)
ガレキ	屋外集積 (0.1mSv/h 未満)	63,000
	シート養生 (0.1~1mSv/h)	26,600
	覆土式一時保管施設、仮設保管設備、容器 (1~30mSv/h)	168,00
	固体廃棄物貯蔵庫 (30mSv/h 以上を含む)	4,700
伐採木	屋外集積 (幹・根・枝・葉)	61,600
	一時保管槽 (枝・葉)	17,400

ガレキ保管量の推移を見ると、屋外集積とシート養生の廃棄物量が2014年2月頃から増加し、大きく変動していることが分かる。これは、屋外集積については、多核種除去設備を新設するために対象場所に置かれていた資機

材を廃棄物保管場所に移動したためである。また、シート養生については、汚染水タンクの増設を行うために対象場所に置かれていた廃車両を廃棄物保管場所に移動したためである。



第6図 ガレキ保管量の推移



第7図 伐採木保管量の推移

伐採木保管量の推移については、2013年2月頃に屋外集積が大幅に減少したこと、2013年10月頃から増加したことが特徴である。2013年2月頃の屋外集積の減少は、伐採木一時保管槽を整備して枝・葉の部分をチップ化して同保管槽に保管することにより高い減容効果が得られたためである。また、2013年10月頃の増加については、タンク増設及びフェーシング工事により伐採木が発生したことが理由である。

ガレキ・伐採木について、これまでに実施した57試料の汚染核種分析結果を第2表に示す。分析試料は、ガレキについては1, 3, 4号機周辺のエリアから採取した、水素爆発で散乱したコンクリート、砂礫等、伐採木については、2カ所の保管エリア及び3号機周辺の松の枝葉である。これらの試料を日本原子力研究開発機構原子力科学研究所に輸送して放射能分析を行った。

処分上重要となる核種のうち、検出下限値を超えて検出された核種は、γ線放出核種のCo-60、Cs-137、β線放出核種のC-14、Se-79、Sr-90、Tc-99であった。α線放出核種については、検出下限値未満(表中には“ND”として表す)であった。これらの分析結果から、1F事故廃棄物の

特徴である、Cs-137による汚染が支配的であることが解る。Cs-137の放射能濃度は、Sr-90に対して約2～3桁高い値を示した。その他の核種に対しても、数桁以上高い値である。

第2表 ガレキ・伐採木の放射性核種濃度分析結果

核種	放射能濃度 (Bq/g)	
γ 核種	⁶⁰ Co	ND (<7E-02) ~ 5.6E+00
	¹³⁷ Cs	2.0E+00 ~ 1.9E+05
β 核種	¹⁴ C	ND (<5E-02) ~ 2.7E+00
	⁶³ Ni	ND (<5E-02)
	⁷⁹ Se	ND (<5E-02) ~ 2.1E-01
	⁹⁰ Sr	ND (<5E-02) ~ 1.0E+02
	⁹⁹ Tc	ND (<5E-02) ~ 8.9E-02
α 核種	²³⁸ Pu	ND (<5E-03)
	²³⁹ Pu + ²⁴⁰ Pu	ND (<5E-03)
	²⁴¹ Am	ND (<5E-03)

総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力発電投資環境整備小委員会報告書 (H19.5) によれば、放射能濃度確認規則レベルで区分した場合、通常の中規模モデルプラント (80万kW級BWR) 及び小規模モデルプラント (50万kW級BWR) の解体廃棄物の物量は第3表に示す量になると推定している。

第3表 モデルプラントの解体廃棄物の物量

	BWR 中規模 (80万kW級)	BWR 中規模 (50万kW級)
L1 廃棄物	70 t	50 t
L2 廃棄物	830 t	760 t
L3 廃棄物	6,750 t	5,530 t
CL 以下廃棄物	230,180 t	140,330 t
合計	237,830 t	146,670 t

L1: 余裕深度処分相当
L2: コンクリートピット処分相当
L3: トレンチ処分相当

通常に操業した原子力発電所の場合、廃止措置に伴う解体廃棄物のうち約97%がクリアランスレベル(CL)以下となり、放射性廃棄物としての取扱いをしなくても良いと想定されている。しかし、1F事故では、水素爆発により、通常であればCL以下に設定可能な建屋構造物等がほぼ全て汚染していると考えられ、浸透汚染していない内部などを除いてほぼ全量が放射性廃棄物となる。

ガレキ・伐採木等は、廃止措置の進展とともに発生し、保管量も増大する。特に、ガレキ発生量については、廃止措置シナリオに大きく依存するので、最終的な発生量を現時点で予測することは難しい。

3.2 汚染水処理二次廃棄物

第7図に1Fの汚染水の発生、処理等の状況を示す。炉心部の冷却のために注水された水は燃料デブリと接することにより汚染水となり、それを浄化する設備を経由し、浄化された水は再度炉心に注水され、残りの核種を含んだ水はタンクに貯蔵される。また、地下水が原子炉施設に流入しているために400m³/日の汚染水が増大していることが大きな問題である。



第8図 1Fの汚染水の状況

汚染水の処理施設設備は、セシウム除去設備、塩分除去設備、多核種除去設備から構成される。セシウム除去設備には、セシウム吸着装置 (KURION)、第二セシウム吸着装置 (SARRY)、除染装置 (AREVA) があるが、除染装置は停止しており、現在ではセシウム吸着装置、第二セシウム吸着装置が稼働している。第9図及び第10図に、セシウム吸着装置、及び第二セシウム吸着塔の外観をそれぞれ示す。セシウム吸着塔は、円筒形であり、スキッド (箱) の中に設置されている。



第9図 セシウム吸着装置の外観



(a)



(b)

第10図 第二セシウム吸着装置の外観

第4表 汚染水処理施設から発生する廃棄物

処理設備	廃棄物	保管状況
セシウム吸着装置	KURION-H	使用済吸着塔として保管
	KURION-SMZ	
	KURION-AGH	
	シリカサンド	
第二セシウム吸着装置	IE-96	使用済吸着塔として保管
	IE-911	
除染装置	スラッジ (フェロシアン化ニッケル、水酸化鉄、硫酸バリウム、砂、ポリマー、等)	除染装置施設内に保管
多核種除去設備	水酸化鉄スラリー	保管容器 (HIC) で保管
	炭酸塩スラリー	
	活性炭	
	チタン酸塩	
	フェロシアン化合物	
	Ag 添着活性炭	
	酸化チタン	
	キレート樹脂	
樹脂系吸着材	処理カラムとして保管	

塩分除去設備は、RO膜を用いた装置と蒸発濃縮を用いた装置の2種類の淡水化装置で構成されるが、蒸発濃縮を用いた装置は停止しており、現在はRO膜を用いた淡水

化装置が稼働している。多核種除去設備 (ALPS) は、現在は一設備が稼働しているが、今後、増設多核種除去設備、高性能多核種除去設備が整備される予定である。

それぞれの汚染水処理設備から発生する廃棄物を第4表に示す。

セシウム吸着装置から発生するKURION-H、KURION-SMZ、KURION-AGHは全て合成ゼオライトであり、吸着塔内で保管される。第二セシウム吸着装置から発生するIE-96は合成ゼオライトであり、IE911はチタンケイ酸塩である。除染装置からはスラッジが発生するが、このスラッジは、フェロシアン化ニッケル、水酸化鉄、硫酸バリウム、砂、ポリマー等を含んでいる。セシウムの吸着はフェロシアン化ニッケルが担っている。多核種除去設備からは、前処理工程で水酸化鉄スラリーと炭酸塩スラリーが発生し、メインの吸着工程から活性炭、チタン酸塩、フェロシアン化合物、Ag添着活性炭、酸化チタン、キレート樹脂、樹脂系吸着材が発生する。多核種除去設備の共沈、吸着材で除去することを想定している主な核種を第5表に示す。

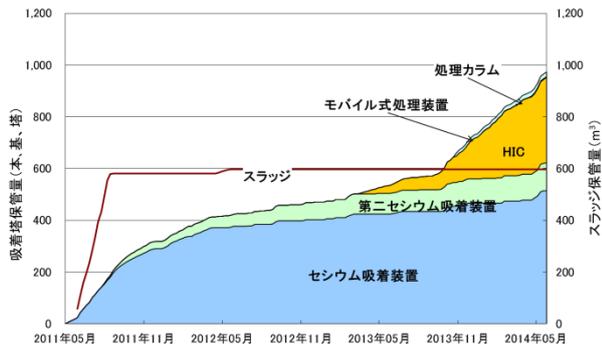
第5表 スラリー及び吸着材の成分と除去対象核種

工程	主な成分	主な除去対象核種
前処理	水酸化鉄Ⅲ	有機物、 α 核種、Co、Mn
	炭酸塩	Sr、Mg、Ca
吸着材交換式	活性炭	コロイド
	チタン酸塩	Sr
	フェロシアン化合物	Cs
	Ag 添着活性炭	I
	酸化チタン	Sb
カラム式	キレート樹脂	Co
	樹脂系吸着材	Ru 等負電荷コロイド

汚染水処理二次廃棄物の2014年7月末時点の保管状況 (2014年7月30日: プレスリリース「福島第一原子力発電所における高濃度の放射性物質を含むたまり水の貯蔵及び処理の状況について (第161報)」) を第6表に、これまでの保管量の推移を第10図にそれぞれ示す。

第6表 汚染水処理二次廃棄物の管理状況

保管場所	種類	保管量
使用済セシウム吸着塔保管施設	セシウム吸着装置使用済吸着塔	514本
	第二セシウム吸着装置使用済吸着塔	110本
	多核種除去設備保管容器	365基
	多核種除去設備処理カラム	3塔
	モバイル式処理装置使用済吸着塔	20本
廃スラッジ貯蔵施設	廃スラッジ	597m ³



第11図 汚染水処理二次廃棄物の保管量の推移

汚染水中のセシウム濃度は、処理を開始した直後の2011年7月の時点ではプロセス主建屋から採取した試料で $1.7 \times 10^6 \text{Bq/cm}^3$ であったが、2014年6月の時点では $2.6 \times 10^4 \text{Bq/cm}^3$ に減少しており、約99%のセシウムが除去されていることを示す。セシウム吸着装置及び第二セシウム吸着装置から発生する使用済み吸着塔の量は、セシウム濃度の低下に伴い減少している。今後の発生量は、汚染水中のセシウム濃度が増加しなければ、現時点での発生量で推移するものと考えられる。

多核種除去設備から発生する廃棄物は、前処理工程で発生するスラリーが大部分であり、特に炭酸塩スラリーの発生量が多くなっている。

汚染水処理二次廃棄物は、放射線量が非常に高いために直接吸着材を採取することが難しい。このため、処理装置に流入する水と流出する水の核種分析を行い、それらの差分を評価することで吸着核種を推定している。

2013年4月3日までに発生したセシウム吸着装置及び第二セシウム吸着装置の吸着塔のセシウム吸着量を推定した結果を第7表に示す。また、それぞれの吸着塔の吸着量の分布を第8表に示す。

第7表 吸着塔のセシウム吸着量 (2013年4月3日)

	セシウム 吸着装置	第二セシウム 吸着装置
総吸着量 (Bq)	1.7E+17	8.0E+16
平均吸着量 (Bq/本)	4.0E+14	1.0E+15

第8表 セシウム吸着量の分布 (2013年4月3日)

吸着量レベル (Bq)	セシウム吸着装置 吸着塔 (本)	第二セシウム吸着 装置吸着塔 (本)
$10^{15} \sim 10^{16}$	0	34
$10^{14} \sim 10^{15}$	319	34
$10^{13} \sim 10^{14}$	103	6
$10^{12} \sim 10^{13}$	2	4
合計	424	78

第7表から、セシウム吸着装置吸着塔の平均吸着量は

$4 \times 10^{14} \text{Bq/本}$ 、第二セシウム吸着装置吸着塔のそれは、 $1 \times 10^{15} \text{Bq/本}$ と推定されている。吸着塔に充填されている吸着材の重量は約1tであることから、吸着塔のセシウム濃度は、2007年5月に原子力安全委員会がまとめた「低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について」に示されている ^{137}Cs のコンクリートピット処分の濃度上限値の推奨値である $1 \times 10^{14} \text{Bq/t}$ を超えた値である。実際の処分場作業時に設定される濃度上限値は、推奨値よりも2桁程度低い値となることから、コンクリートピット処分を行うことは困難であると考えられる。

国際廃炉研究開発機構/
日本原子力研究開発機構
宮本 泰明
(2014年 9月30日)