連載講義

# 放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分について

## 第3回 焼却処理過程における挙動と制御

JW SEMINAR

（独）国立環境研究所　資源循環・廃棄物研究センター
山田正人、倉持秀敏、大迫政浩

《連載にあたって》

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故により、福島県を中心に東日本で広域な放射性物質汚染が生じています。日常の生活環境からの被ばくや食品を通じた被ばくなどが懸念される一方、放射性物質を含む廃棄物等の処理の問題が深刻化しています。この国難を克服するためには、放射能に汚染された環境の早期回復が試金石となり、放射性物質に汚染された廃棄物の安全かつ安心な処理処分の推進は、最も優先されるべき対処策の一つであると言えます。

本連載では、放射性物質汚染廃棄物の適正処理を行っていくうえで留意すべき技術的事項等を、（独）国立環境研究所が実施してきた調査研究の成果を中心に取り纏めた「放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分（技術資料）[1]」の内容を紹介します。

なお、今回の原子力災害は、わが国において、また世界においても過去経験したことのない未曾有の事態であり、科学的な知見が十分でなく不確実性を含む事項があることを、予めお断りしておきます。

### 1. はじめに

我が国の一般廃棄物は7割以上が焼却処理されています。福島第一原子力発電所事故由来の放射性物質に汚染された草木類などが、一般廃棄物として焼却され、焼却灰に比較的高い濃度の放射性物質が検出されています。焼却灰などの適正な処分の方法も問題ですが、焼却についても、「焼却施設は、放射能に汚染された廃棄物を処理する施設ではないのに大丈夫なのか」、「焼却によって放射性物質を再び撒き散らすことにならないのか」といった不安の声が国民から上がりました。今回は、焼却処理に対する疑問について、当研究所が行ってきた調査研究の成果を踏まえながら、Q&Aの形で答えていきたいと思います。

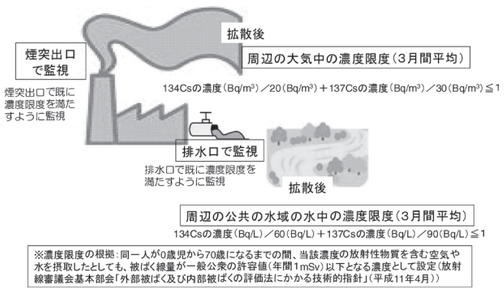



図1　焼却施設の排ガスおよび排水の濃度限度

### 2. 基準値はどのように設定されているのか？

放射性物質対処特別措置法（以下、特措法）の施行規則（環境省令）[2]に基づいて、放射性物質を含む廃棄物の処理施設においては、周辺環境の大気や公共水域の水中において濃度限度を超えない（Cs-134とCs-137のそれぞれの実測値を基準値で除した和が1を上回らない）ように、施設（事業場）からの排ガスや排水を排出口で監視することになっています（図1）。濃度限度の根拠は、同一人が0歳児から70歳になるまでの間、当該濃度の放射性物質を含む空気や水を摂取したとしても、被ばく線量が一般公衆の許容値（年間1mSv）以下となる濃度として設定[3]されたものです。なお、濃度限度の数値基準は、排ガスが大気中で希釈された後の周辺環境に対するもので、排出口におけるものではありません。しかし、基準の運用では、この濃度限度を排出口において超えないことを管理目標として、安全側に立って監視していくことになります。また、排ガスは、一般公衆に達する前に周辺環境中でさらに希釈されます。どの程度希釈されるかは、気象条件や地形に左右されますが、環境省におけるシナリオ評価[4]によれば、一般公衆が曝露されるまでに、大気拡散により10万倍程度希釈されると仮定されています。すなわち、周辺環境中の大気の濃度限度（そのまま吸っても大丈夫なレベル）を、希釈前の排出口における目標として管理することで、きわめて高い「安全率」が考慮されていることになります。

### 3. 排ガス測定データはどうなっているのか？

これまで公表されている多くの測定データにおいて、煙突出口における排ガスの放射性セシウム濃度は、ほとんどが検出下限未満となっています。環境省が収集している排ガスモニタリング結果において、2011年11月14日時点で11都県42施設から報告を受けたデータによれば、放射性セシウム濃度は、42施設中40施設で不検出となっています[5]。放射性セシウムが検出された施設は、いずれも電気集塵機を備えた施設であり、検出された値も濃度限度を大きく下回っていました。バグフィルターを備えた施設では、全て検出下限未満になっています。測定データは、福島県内で高い放射能濃度を有する焼却飛灰（ばいじん）が生じている施設もカバーしています。以上より、現に焼却施設から放射性セシウムは、排ガスとして環境中にほとんど放出されていないと言えます。

### 4. 放射性セシウムは排ガス中ではどのような状態で存在するのか？

連載第一回で説明したように、セシウム（Cs）は、原子番号55のアルカリ金属であり、金属の状態での沸点は約650℃、ごみの中で多いと考えられる塩化セシウム（CsCl）の形態では、沸点は約1300℃です。ごみ焼却炉の燃焼温度は、ダイオキシン類生成抑制のために800～850℃に制御されていますから、大まかに言えば、炉内で放射性セシウムの一部は揮発あるいは液化して排ガスに移行し、残りの主に固体の形態で存在するものは、主灰中に残留すると考えられます（図2）。排ガス中に移行した放射性セシウムは、ダイオキシン類生成抑制のために冷却され、約200℃以下で制御されているバグフィルター付近では、主に塩化セシウムとして凝縮し固体状態になり、他の物質と一緒に凝集してばいじんになると考えられます。安定セシウムのごみ焼却過程での挙動を調べた結果[6]では、バグフィルター前で固体状のセシウムが99.9%、ガス態のセシウムが0.1%であったことが報告されています。環境省などの調査結果[5]では、一部、バグフィルター入口で放射性セシウムが検出されていますが、測定に用いたサンプリング装置（図3）において、排ガスに含まれる粒子を捉えるため最上流部にある円筒ろ紙で検出されており、後段のドレン部や活性炭部では検出された事例はありません。つまり、測定できるレベルでは、ガス態は存在していないということです。連載第一回で説明したように、塩化セシウムの蒸気圧は、ダイオキシン類に対して9～11桁程度低く、ダイオキシン類よりもはるかに固体状態になりやすいためだと考えられます。

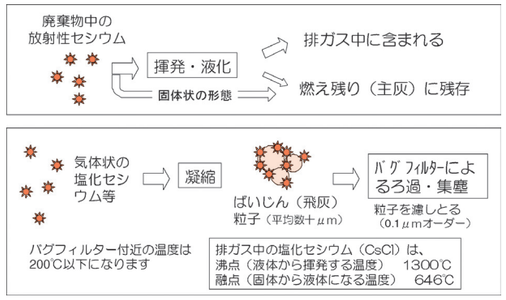



図2　焼却処理過程における放射性セシウムの挙動のイメージ

### 5. なぜバグフィルターで除去できるのか？

放射性セシウムはばいじんに吸着しているので、ばいじんを除去すれば放射性セシウムも除去されます。ばいじんの平均粒径は数十ミクロンメータであり、バグフィルターは、サブミクロンメータ（1/10ミクロンオーダー）の粒子をカットできることから、ほぼ完全に放射性セシウムを除去できます（図2）。特に、ダイオキシン類対策が施された現在の焼却施設は、放射性セシウムを含むばいじんの除去に十分な性能を有しています（表1）。排ガス中のばいじんには、そもそも大気汚染防止法において規制値が存在します。表2は、仮に規制値レベルの濃度でばいじんが排

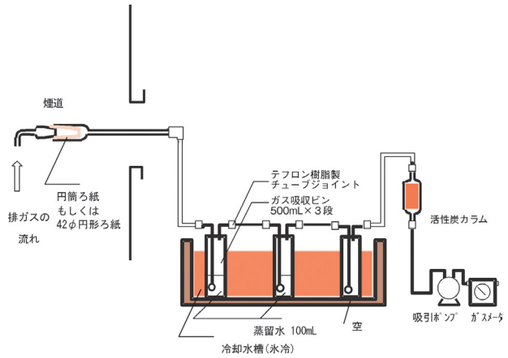



図3　排ガス試料採取装置の概要[7]

表1　排ガス処理設備による除去率の調査結果（調査時期は2011年10月～2012年3月）

| 施設 | 対象プロセス | 入口濃度（Bq／m³） | | 出口濃度（Bq／m³） | | 除去率（%） | | 集塵装置 | 調査実施者 | 調査時期 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Cs134 | Cs137 | Cs134 | Cs137 | Cs134 | Cs137 | | | |
| 福島県あらかわCC | 焼却 | 78 | 96 | <0.008 | <0.006 | 99.99< | 99.99< | BF | 環境省 | 10月 |
| | | 98 | 126 | 0.008 | <0.007 | 99.99 | 99.99< | | | 12月 |
| 須賀川地方保健環境組合 | 焼却 | 33 | 42 | 0.2 | 0.2 | 99.39 | 99.52 | EP | 環境省 | 10月 |
| | | 43 | 57 | 0.2 | 0.2 | 99.53 | 99.65 | | | 12月 |
| A市清掃工場 | 焼却 | 58 | 70 | <0.054 | <0.053 | 99.91< | 99.92< | BF | 国環研 | 10月 |
| B市清掃工場 | 焼却 | 58 | 76 | <0.1 | <0.1 | 99.83< | 99.87< | BF | 国環研 | 12月 |
| | 溶融 | 677 | 844 | <0.1 | <0.1 | 99.99< | 99.99< | | | |
| C市清掃工場 | 焼却 | 15 | 20 | <0.012 | <0.013 | 99.92< | 99.94< | BF | 国環研 | 2月 |
| | 焼却 | 64 | 85 | <0.018 | <0.017 | 99.97< | 99.98< | | | 3月 |
| | 溶融 | 39 | 51 | <0.01 | <0.011 | 99.97< | 99.98< | | | 2月 |
| | 溶融 | 98 | 133 | <0.013 | <0.013 | 99.99< | 99.99< | | | 3月 |
| D市清掃工場 | 溶融 | 335 | 404 | <0.4 | <0.3 | 99.88< | 99.93< | BF | A社 | 9月 |
| | 溶融 24h採取 | 220 | 330 | <0.05 | <0.07 | 99.98< | 99.98< | | | 3月 |

＊BF：バグフィルター、EP：電気集塵機
＊＊濃度はろ紙部のみ、環境省調査は出口濃度は煙突出口、国環研調査はBF出口

表2　ばいじんの規制基準からみた放射性セシウム濃度の推定

| 排ガス中のばいじんの規制基準値もしくはB清掃センター実測値（g／m³N） | ばいじんの放射性セシウム濃度の仮定値（Bq／kg） | ばいじん規制基準値における排ガスの放射性セシウム濃度推定値（Bq／m³N）＊ | （参考）線量限度を定める告示＊＊ |
|---|---|---|---|
| 0.04（4t／h以上） | 8,000～100,000 | 0.32～4 | $^{134}$Cs：20Bq／m³<br>$^{137}$Cs：30Bq／m³ |
| 0.08（2～4t／h） | | 0.64～8 | |
| 0.15（2t／h以下） | | 1.2～15 | |
| 0.0009～0.0016（H22年度のB清掃センター実績値） | 23,000（7／14採取試料の1号炉飛灰測定値） | 0.020～0.037 | |

排ガス濃度の基準の目安となる数値の1／1000程度になっています。

＊放射性セシウムはガス態で存在せず、ばいじんに全て含まれると仮定
＊＊実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示

出されていた場合に、そのばいじん中に8,000～100,000Bq/kgの放射性セシウムが含まれていると想定して、排ガス1m³あたりの放射性セシウム濃度の推定値を示しました。なお表では、実際の施設で測定したばいじん濃度と、ばいじんの放射性セシウム濃度に基づいて排ガスの放射性セシウム濃度を併せて推定しました。これらから明らかなように、ばいじんの規制値を遵守していれば、放射性セシウムが濃度限度を超える可能性はないといえます。実際の施設では、ばいじんの規制値について住民協定などでさらに厳しい自主基準を課しており、ばいじん濃度は規制値よりも数桁低いため、放射性セシウム濃度は極めて低く、通常の実測では検出下限未満となります。

## 6. バグフィルターは破れたりしないのか？

バグフィルターは、ろ布が張られた筒状のものであり、大規模な施設では数百本が設置されています。ろ布が全く破れないということはありませんが、そのような状況にならないように、ろ布にばいじんが堆積することによる圧力損失の上昇や、重さによるろ布の脱落等を防ぐために、表面の堆積層は「パルスジェット」と呼ばれる一時的な逆洗により順次払い落とされます。堆積層もフィルターの役目を果たすので、払い落とし直後では、若干のフィルター効果の低下は考えられますが、それを補うためにろ布にはプレコートが施されています。また、払い落としは全てのろ布同時ではなく、順次行われるので、全体としてのフィルター効果は維持されます。また、排ガス中のばいじん濃度を監視するダストモニターをバグフィルターの後段に設置することで、ろ布の健全性を常に確認することができます。さらに、施設の点検時などに定期的にろ布の強度劣化や目詰まり程度を計測することで、性能低下を予見して、早めに交換を行うという予防処置もとられています。すなわち、バグフィルターの損傷が頻繁に起こることはほとんどなく、常時監視により万が一損傷が起こった場合でも即座の対応が可能です。

## 7. 少しでも漏れると危険か？

ほとんどの場合、煙突出口排ガスの放射性セシウム濃度は検出下限未満ですが、少しでも漏れると不安という声が聞かれます。そこで、表3で示した実際の施設を例として周辺住民の被ばく線量を試算してみました。その結果として、煙突から排出された排ガスは、実際には大気中で希釈され、一般公衆の居住場所では通常は無視できるレベルになります。放射性セシウムを含むごみの焼却が焼却される期間を今後10年間として、もっとも影響が大きいと考えられる土壌への沈着と蓄積による外部被ばくの影響を試算しても、年間1mSvの10万分の1程度の被ばくしか受けないレベル（10万年間焼却し続けてやっと年間1mSvに達する程度）にしかなりません。周辺環境のバックグラウンドから考えても無視できるレベルです。

表3　焼却炉排ガスによる被ばく線量の推定例

条件

○排ガスの濃度：0.037 Bq/m³N
（ばいじん濃度と放射能濃度から推定）
○焼却施設条件は環境省検討会での評価に基づく

試算結果

1）ばいじんの外部被ばく（成人）
$1.1\times10^{-9}$ mSv/年
2）吸入による内部被ばく（成人）
$7.4\times10^{-7}$ mSv/年
3）降下粉塵による土壌からの外部被ばく（成人）
$1.4\times10^{-5}$ mSv/年
（10年間累積の最後の1年間）

## 8. 原発ごみ焼却炉と都市ごみ焼却炉の違いは？

原子力発電所で発生する可燃性ごみの焼却炉と都市ごみの焼却炉の大まかな比較を表4に示します。この表は関連事業者へのヒアリングをもとに整理したものです。「放射性物質を排出しないためには、都市ごみ焼却炉のバグフィルターでは不十分で、原発のごみ焼却炉が備えているような高性能フィルター（HEPA）が必要」との指摘がありますが、そもそも原発の焼却炉においては、都市ごみと比較して格段に放射能濃度が高く、またセシウムとは性質の異なる様々な種類の放射性物質を含むごみを燃やしているために、排ガス処理にバグフィルターあるいはセラミックフィルターと高性能フィルターを組み合わせて用いています。除去性能はバグフィルター単独よりも当然高くなりますが、燃やされている都市ごみの放射能レベルは、「原発ごみ」からみれば比較にならないほど低く、セシウムについては、排ガス処理の過程で揮発しにくいことが明らかですから、バグフィルターのみで排出口での管理目標値を満たすことが可能です。そのことは、これまでの多くの測定データが証明しています。ただし、今後、国が事業として行う「対策地域内廃棄物」の処理では、放射性物質濃度が格段に高い廃棄物も存在するため、より高度な技術的対応が必要になることも考えられます。ただし、原発ごみの焼却炉は、1～4トン/日（都市ごみは100トン/日のオーダー）と規模が小さく、放射性物質を含む膨大な廃棄物を処理するために、そのままスケールアップすることは容易でありません。現在のダイオキシン類対策がなされた廃棄物焼却炉をベースに二重のバグフィルターを装備するなど、除去率をさらに向上させるための対応も考えられます。

表4　原子力発電所で発生する可燃性ごみの焼却炉と都市ごみの焼却炉の比較

| | 原発ゴミの焼却炉 | 都市ごみ焼却炉 |
|---|---|---|
| 規模（1日の焼却量：トン） | 1～4トン規模 | 平均的には数百トン規模 |
| 焼却対象物と放射能レベル | 対象は発電所のメンテナンスなどで発生するゴミ。衣服、養生用ポリエチレンシート等。放射能は千Bq/kg～百万Bq/kg（平均10万Bq/kg） | 対象は都市ごみ。・高線量地域で飛灰濃度が数万Bq/kgのときに燃焼ごみは平均1000～2000Bq/kgと推測・岩手・宮城の災害廃棄物で不検出～数百Bq/kg（非汚染のごみと混焼する場合はさらに低い） |
| 環境保全対策の最大のターゲット | 放射性物質 | ダイオキシン類 |
| 一般的な排ガス処理構成 | セラミックフィルター＋HEPAフィルター | 消石灰・活性炭粉末等吹き込み＋バグフィルター |
| 放射性セシウムの除去性能 | 99.999%以上の除去 | 99.9%以上の除去 |
| モニタリング設備 | 自動放射能モニター | 自動ダストモニター |

参考文献（URLは2012年9月現在）
1）（独）国立環境研究所（2011）放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分（技術資料）
http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo_r2_120326s.pdf
2）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）
http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/mo_h23-33a.pdf
3）文部科学省放射線審議会基本部会（1999）外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針（平成11年4月）
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/housha/sonota/990401.htm
4）環境省（2011）第9回災害廃棄物安全評価検討会資料11-1および11-2
http://www.env.go.jp/jishin/attach/haikihyouka_kentokai/09-mat_4.pdf
5）環境省（2011）災害廃棄物の広域処理の推進について（改定）（ガイドライン）
http://www.env.go.jp/jishin/attach/memo20120111_shori.pdf
6）環境省（2011）第3回災害廃棄物安全評価検討会資料6-3
http://www.env.go.jp/jishin/attach/haikihyouka_kentokai/03-mat_5.pdf
7）国立環境研究所（2011）廃棄物等の放射能調査・測定法暫定マニュアル（2011年11月11日）
http://www.nies.go.jp/shinsai/radsurvey_111111.pdf