

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246092

研究課題名(和文) 焼却・熱処理を用いた放射性核種分離・濃縮・処分技術の開発

研究課題名(英文) Development of the radionuclide separation, concentration and disposal technology using incineration and heat-treatment.

研究代表者

米田 稔 (Yoneda, Minoru)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40182852

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,400,000円

研究成果の概要(和文)：除染廃棄物などの減量化手法として、焼却・熱処理を用いる方法の有効性を確認するための研究を行い、以下の結果を得た。予想される除染廃棄物発生量を推定するための森林土壌中Cs移行モデルは多成分流モデルが有効であった。ジオポリマー(フライアッシュなどとアルカリシリカ溶液との反応で形成された非晶質の縮重合体であり、セメントを使用しない次世代のコンクリート技術としても期待される材料)を利用した焼却灰からの放射性Cs溶出抑制法は有効である。土壌を多く含む除染廃棄物減容化策として500℃程度の比較的低温での熱処理が有効である。焼却処理場労働者らの放射線内部被曝はダイオキシン対策で十分避けられる。

研究成果の概要(英文)：Studies to confirm the effectiveness of incineration and heat-treatment as the reduction technique of radioactively polluted wastes or decontamination wastes were performed and the following results were obtained. As for the Cs movement model in forest soil to estimate the quantity of forest soil to be removed for decontamination, multicomponent flow model was effective. It is effective to use the geo-polymer (the material which is amorphous condensation polymer formed by the reaction of fly ash, for example, and alkali silica solution, and is expected as a next-generation concrete technology without cement) to prevent the leaching of radioactive Cs from incineration ash and fly ash. Heat-treatment at the comparatively low temperature of around 500 degrees Celsius is effective as a volume reduction method of the soil-rich decontamination wastes. The internal radiation exposure of the workers of incineration plants can be avoided enough by the countermeasure for dioxin exposure.

研究分野：環境工学

キーワード：放射能汚染 廃棄物 土壌 焼却 不溶化 セシウム ジオポリマー 最終処分

### 1. 研究開始当初の背景

森林の除染については、住居等近隣の森林の落葉落枝の除去が優先的に行われているが、線量を十分に下げするためには、ある程度森林土壌も取り除くことが必要だと思われる。このため、特に森林域での土壌中 Cs などの物質移動を正確に予測することが必要とされている。また、今後、放射能汚染廃棄物などを処分していくためには、その減容化が不可欠となる。その有効な手段の一つは焼却処理であるが、最終処分を行う場合には、焼却灰などの濃度レベルに応じて、溶出率を抑制することが必要となる。また、焼却処分場の作業員の被曝リスクも十分に小さいものでなければならない。

### 2. 研究の目的

以上の研究背景の下、焼却・熱処理を用いた放射性核種分離・濃縮・処分技術の開発のために、以下の目標を設定する。

#### (目的1) 処理対象森林除染廃棄物量の推定

今後、森林除染で線量を下げることが必要となる掘削深さを明らかにし、発生する廃棄物量を予測するため、本研究では、森林土壌内の Cs の挙動を推測できるモデルの構築を、フィールドでのサンプリング実験および室内でのカラム実験による分析結果をもとに試みる。また、今回は問題となっていないが、もし、同様な事故が発生した場合に問題となる可能性がある Sr の挙動についても同時に検討する。

#### (目的2) 都市ゴミ中 Cs の焼却特性把握とジオポリマーによる安定化効果の検証

放射能汚染廃棄物を焼却処理した際の焼却灰、飛灰への Cs の分配割合や集じん機での捕集割合などを把握する。また、飛灰などからの放射性物質の溶出を抑制するため、都市ごみ焼却飛灰をジオポリマー化により不溶化処理することの有効性を明らかにするため、Cs 溶出率の低いジオポリマーの作成・評価による最適条件の探究、環告 14 号の一軸圧縮強度の規準を達成できるジオポリマーの作成・評価、Cs 不溶化形態の解明、放射性 Cs を含む実際の都市ごみ焼却飛灰を用いたジオポリマーの Cs 不溶化効果を確認する。

#### (目的3) 土壌を多く含む除染廃棄物の熱処理特性の把握

比較的大量かつ土壌を多く含む除染廃棄物を減容化のために焼却した場合や、さらにその焼却灰を埋め立て処分した場合についても、放射性物質の挙動を把握する必要がある。ここでは、Cs を添加した土壌を熱処理した場合の Cs の溶出特性を解析し、熱処理による土壌中の Cs の挙動への影響について明らかにする。また、同時に Sr の挙動についても検討する。

#### (目的4) 推定被曝量に基づく焼却処分場の安全作業マニュアルの改良

焼却プラント内での粉じんを含む浮遊粒子状物質の個数及び重量濃度の調査を、各単

位作業場所にて実施し、内部被曝量の推算を行うとともに、労働者へのヒアリングを実施することによって、労働者の放射性物質を含めた安全作業マニュアルの改善を試みる。

### 3. 研究の方法

研究目的 1～4 を達成するため、それぞれに対し、以下の研究方法 1～4 を採用した。

#### (方法1)

福島第一原発事故直後の降雨による Cs 及び Sr の土壌中での挙動を評価するために、2013 年 10 月 31 日～12 月 12 日に岩手県滝沢村の岩手大学滝沢演習林においてフィールド実験を行った。主な樹木が針葉樹林である場所 4 か所と主な樹木が広葉樹林である場所 4 か所の森林内の約 7 度の傾斜のある場所に、それぞれ深さ 40 cm ほどの縦穴を掘り、そこから傾斜の上側に向かって奥行 30 cm ほどの横穴を掘り、サンプリング装置を設置した。なお、測定地点での針葉樹は主にスギ、落葉樹はコナラであった。また、土壌はおもに黒ボク土であった。サンプリング装置の横穴の真上に Cs 標準液 1000 ppm、Sr 標準液 1000 ppm をそれぞれ 100 mL 添加し、横穴内に降雨により流出してくる流出水をサンプリング容器に採取した。そして、よく攪拌した流出水を 5 mL とり、15 mL の遠沈管に移して、遠心分離機で土と液体部分を分離した。分離した上澄み液を 1 mL とり、1 N の硝酸で 100 倍に希釈し 0.45  $\mu\text{m}$  のメンブレンフィルターに通し、ICP-MS を使って Cs 及び Sr を定量した。また、深さ毎に土壌を採取し、マイクロ波支援分解装置を用いて分解した後、直ちに遠沈管に移して pH が 1 になるように超純水で希釈し 0.45  $\mu\text{m}$  のメンブレンフィルターに通した後、1 N の硝酸で適度に希釈し、ICP-MS で土壌中の Cs および Sr の全量を定量した。また、現地から土壌のコアサンプルを採取し、これに放射性 Cs および Sr を含んだ溶液を浸透させる実験により、浸透水量を制御した環境における Cs および Sr の浸透データを得るカラム実験も実施した。

#### (方法2)

種々の廃棄物焼却炉における現地調査、および安定 Cs を添加した模擬廃棄物の焼却実験を行う。まず、種々の廃棄物焼却炉において、カスケードインパクターを用いた排ガス中の Cs の挙動を現地調査する。また、焼却灰および飛灰への分配率を明らかにするため、パイロットスケールの実験装置(ロータリーキルン焼却炉)を用い、対象試料として、RDF を準備し、 $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  を、試料の含水率が 30%、Cs 濃度: 5,100 mg/kg となるよう添加して調整し、燃焼条件として、空気比は 1.4、1.7、2.2 で変化させ、キルンでの燃焼温度 700、再燃焼炉 900 で実験を行う。次に本パイロット実験で得られた主灰、飛灰について、その Cs の化学形態を評価するため、SPring-8 のビームライン BL01B1 を用いた XAFS 分析を実施するとともに、都市ごみ焼却飛灰などの

ジオポリマー化の有効性を確認するため、安定 Cs の実験としてメタカオリン使用ジオポリマーと石灰炭使用ジオポリマーを作成して、溶出試験、強度試験に供し最適条件の探究・評価を行う。さらに Cs 不溶化機構の解明として XAFS 分析・XRD 分析を行う。

#### (方法3)

岩手大学滝沢演習林にある針葉樹林の土壌を用いて実験を行う。土壌採取には、直径 5cm、高さ 5cm の金属製のコアサンプラーを用いた。土壌表面を覆っている落ち葉などをできる限り除去した後、コアサンプラーの上端が地面の高さと同じになるように土壌に押し込み、土壌を採取した。有機物含有量の指標として、土の強熱減量試験を実施するとともに、篩を用いての粒度分布試験も行った。溶出試験では、土壌を 10g ずつ量り取り、Cs-133、Sr-88 を 5 $\mu$ g ずつ添加した土壌サンプルと Cs-134、Sr-85 を 1250Bq ずつ添加した土壌サンプルを作成し、蒸留水 5ml を加えた後、45 で 20 時間乾燥させ、マッフル炉を用いて 1 時間加熱し、自然冷却させ、その後、質量を測定した。加熱温度は 100、200、300、400、500、600 とし、各温度での土壌サンプルを作成し、固液比 1:10 になるように蒸留水を加え、6 時間振とうさせ、3000rpm で 10 分間遠心分離を行い、上澄み液を 0.45 $\mu$ m フィルターでろ過し、ろ液を測定試料とし、Ge 半導体検出器で Cs-133 と Sr-88 の溶出量を測定した。また、熱処理した土壌サンプルに蒸留水 5ml を加えた後、45 で 20 時間乾燥させる操作をもう一度実施して、乾湿操作の溶出率への影響を調べた。この乾湿操作を繰り返す前を「乾湿 1 回」、繰り返した場合を「乾湿 2 回」と呼ぶ。

#### (方法4)

被災地周辺の 2 箇所の焼却処理施設 A、B で調査を実施する。文部科学省により発表された空間線量率の航空機モニタリングの結果では、A 施設は 0.2~0.5 $\mu$ Sv/h、B 施設は、0.1~0.2  $\mu$ Sv/h の範囲であった。A 施設は焼却炉と灰熔融炉の両方を備えた施設であり、周辺の焼却炉からの灰も搬入される。B 施設は焼却炉のみの機能を持った施設であった。外部被曝は、あらゆる場所での影響を考慮するため、ごみ処理施設全域において調査を行う。内部被曝については、作業者が粒子状物質に曝露される可能性が高い単位作業場所である ごみピット、灰ピット、飛灰処理設備において調査を行う。ただし、A 施設ではごみピット内での測定が困難であったため、ごみ搬入口での測定を実施した。各単位作業場所における粒子数濃度と粒度分布を NanoScan SMPX (以下 SMPS、Model 3910、TSI 社製)および Optical Particle Sizer (以下 OPS、Model 3330、TSI 社製)を用いて測定した。SMPS と OPS の測定可能粒径範囲は、それぞれ、10~420 nm、0.3~10 $\mu$ m であり、これらの装置を同時に利用することにより広範囲の粒度分布を得ることが可能である。

これらの装置は、測定範囲の粒子をそれぞれ 13 および 16 分割して個数濃度を求め、1 分毎に粒度分布を測定することができる。今回の測定では、各作業場所で約 20 分間測定を行い、その平均値から粒度分布を求めた

#### 4. 研究成果

各研究目的・方法に対し、それぞれ以下の結果を得た。

##### (成果1)

針葉樹林における流出水合計量と Cs 添加量に対する溶出割合の関係を図-1 に示す。この実験結果から、Cs、Sr 共に初期の溶出が多いことがわかる。土壌間隙を浸透する水は、流れの速い水 (急流水) と遅い水 (緩流水) に大きく大別できるので、Cs、Sr 共に溶出量が初期に多いのは、土壌中に Cs、Sr が固定される前に浸透してきた初期の急流水の影響が大きいことが考えられる。図-2 に針葉樹林土壌中の Cs 全量の鉛直分布を示す。分布の傾向は Cs、Sr 共にほぼ同じであった。安定同位体の Cs と Sr の溶出割合は Sr の方が Cs より大きかったが、物理的吸着メカニズムに加えて分配係数が異なるにもかかわらず土壌中の鉛直分布がほぼ同じ傾向を示した。このことは、安定同位体の Cs および Sr の初期の森林土壌中の鉛直方向の浸透は、土壌間隙水の遅い成分である緩流水中の核種の動きにのみ依存していることを意味している。また、土壌カラム実験においても、Cs 及び Sr の浸透量および土壌中分布について、ほぼ同様な結論が得られた。以上の結果から、森林土壌中の Cs と Sr の浸透を土壌間隙水の 2 つの成分 (急流水と緩流水) の流れを考慮して推定するモデルを以下のように構築した。深さ 31cm までの土壌を 11 の層 (上部 2cm 間隔、下部 5cm 間隔) に分割し、各層を 2 種類の土壌 (安定土壌と不安定土壌) 及び土壌中に存在する 2 種類の土壌間隙水 (急流水、緩流水) の 4 つに分割する。安定土壌は Cs や Sr が土壌中の粘土鉱物の構造の中に入り込んでほとんど動かなくなっている層、不安定土壌は Cs や Sr がイオン吸着等で土壌吸着しており、土壌水とは分配係数による平衡関係にあるため、経根吸収、浸出による下部への浸透がある層を表している。降下した Cs、Sr は急流水と緩流水のみに分配されると仮定する。急流水、緩流水は下部コンパートメントへの物質の移行を考え、不安定土壌、安定土壌では下部コンパートメントへの物質の移行は考えない。安定土壌から不安定土壌への移行は無視できるほど小さいとして、ないものとする。不安定土壌のコンパートメントは静止水及び土壌からなるものとする。以上のモデルを用いて計算した結果、Cs、Sr ともに土壌中分布、溶出曲線を実測値とほぼ一致させることができた。よって本研究で構築したモデルは、森林土壌中の Cs、Sr の短期的な移行を表現することが可能であることを示している。

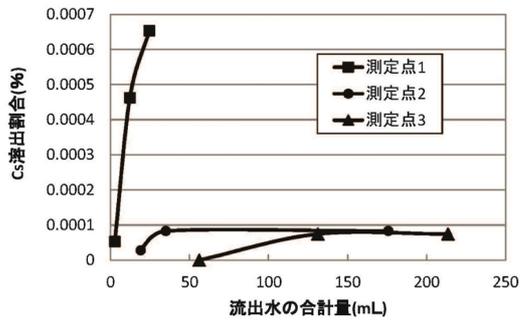


図-1 Cs 溶出割合と流出水量 (針葉樹林)

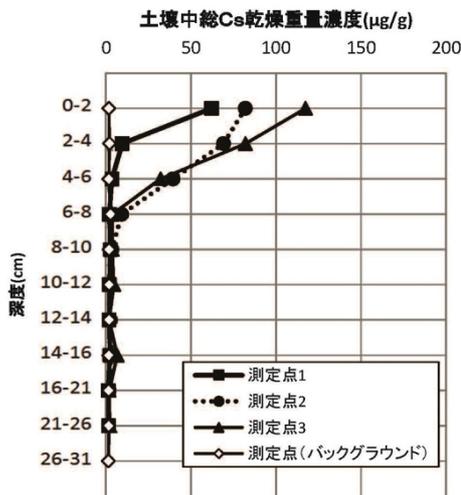


図-2 土壌中 Cs 濃度分布 (針葉樹林)

## (成果 2)

廃棄物焼却炉排ガス中の Cs の挙動を現地調査した結果、排ガス中の Cs は  $1\ \mu\text{m}$  以下の微粒子に濃縮されている傾向が複数の施設で見られたが、バグフィルターを主とする排ガス処理プロセスにより排ガス中のセシウムは 99.8%以上除去できることがわかった。ロータリーキルン焼却炉を用いた実験結果では、焼却灰(主灰)および飛灰中の Cs 濃度および発生量から、それぞれへの分配割合の和は概ね 100%を示し(図-3)、Cs のマスバランスが確認された。この上で、図-3 に空気比に対する主灰への Cs 分配割合の結果を示すと、空気比が小さくなるほど主灰への Cs 分配率が増加する傾向がみられた。これは、空気比増大に伴って、排ガス流速による物質移動、あるいは酸素供給による燃焼が促進され Cs の主灰への分配率が減少することが原因であると推測される。近年では、都市ごみ焼却炉において、燃焼効率が更に改善され、排ガス再循環など、低空気比での運転が可能となってきているが、この場合には主灰に Cs が残留しやすくなることが推測され、飛灰中に Cs を濃縮させ、主灰中の Cs 濃度を低減させるならば、注意が必要である。

実験で得られた主灰、飛灰について、XAFS 分析を行った結果として、図-4 に Cs-K XANES の微分スペクトルを標準物質と実試料について示す。

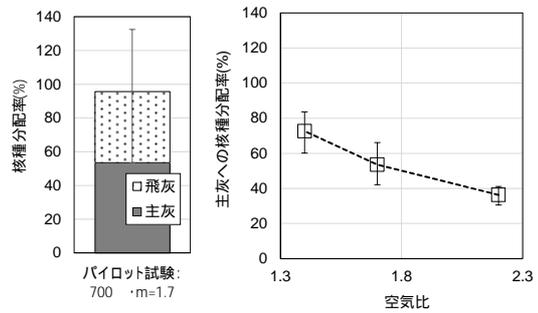


図-3 パイロット実験における Cs マスバランスと Cs の挙動に与える空気比の影響

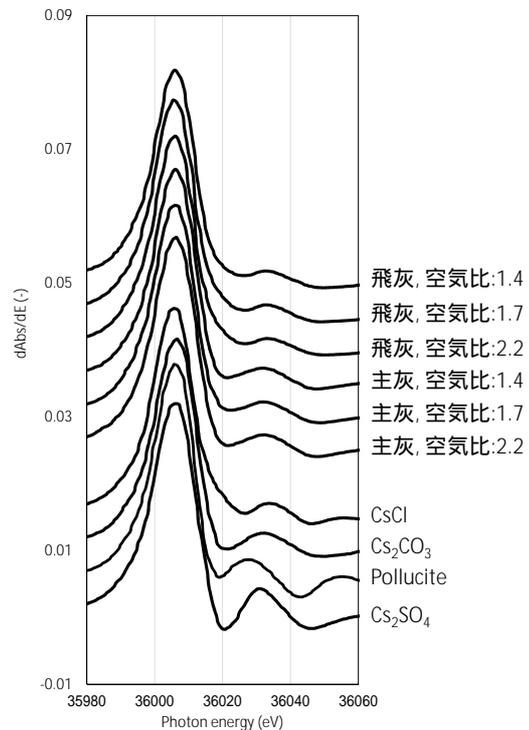


図-4 主灰、飛灰中の Cs-K 微分 XANES スペクトル

図-4 より、標準スペクトルと、実試料とのスペクトルとの比較から、特に  $36,030\text{-}36,035\ \text{eV}$  におけるピーク位置に注目すると、主灰中の Cs は  $\text{CsCO}_3$ 、飛灰中の Cs は  $\text{CsCl}$  であると推測された。また空気比の影響はあまり見られなかった。焼却時には、飛灰中に Cs がこの形態で濃縮されると考えられ、特に  $\text{CsCl}$  の水溶解度が高いことから、処分時には Cs の不溶化対策が必要であると考えられた。

放射性物質は上記の実験でわかるように飛灰中に濃縮されたことから、都市ごみ焼却飛灰をジオポリマー化により不溶化処理し、これを溶出試験、強度試験に供し最適条件の探究・評価を行った。安定 Cs を使った実験

ではメタカオリン使用ジオポリマーにおいて 14MNaOH、無希釈水ガラスを用いたアルカリ活性剤を使用したフィラーが 50～60%（その中の飛灰の割合が 50～60%）の条件が最適条件と考えられ、溶出率は 10%以下となり一軸圧縮強度も基準（0.98MPa）をクリアできるものもあった。石炭灰使用ジオポリマーでは BS10%の基準配合から MSWI-10%した条件が溶出率は中性灰で 24.5%、アルカリ灰で 30.1%となり最適条件となった。いずれのフィラーを用いる場合でも養生条件は 105、24 時間が最適となった。また Si/Al などの元素組成比の一般的な指標から溶出率については単純な相関は見られず関連付けて結果を述べるには至らなかった。

Cs 不溶化形態の解明のために行った XAFS 分析から、添加した飛灰中に含まれるセシウムは初期の形態に依らず、ジオポリマー化することで化学形態を変化させることが分かった。XANES および EXAFS 振動スペクトルの解析によりポルックス石に変化していると推測され、溶出率とポルックス石の存在との相関をとると決定係数が 0.83 となり強い負の相関が確認された。したがってジオポリマー化による Cs の主たる不溶化機構はポルックス石に変化することによると推測された。XRD 分析においてはジオポリマー化をすると非晶質度が増加し、ジオポリマーの生成が確認できた。しかし非晶質度と溶出率との相関は確認できなかった。溶出率の低くなった条件ではポルックス石の結晶が確認でき上記の XAFS 分析を裏付けることができた。

実際の放射性 Cs を含む都市ごみ焼却飛灰を用いたメタカオリン使用ジオポリマーからの溶出試験の結果、溶出液中 Cs 濃度は検出下限値未満であり、溶出率は 11.7～15.3% 未満となった。石炭灰使用ジオポリマーでは溶出率は 12.6%未満～34.1%となり、ジオポリマー溶液（アルカリ活性剤）45%以上で溶出率は低下した。安定 Cs の場合と同等の不溶化効果を示した。以上より、都市ごみ焼却飛灰中セシウムはジオポリマー化により高度に不溶化できることがわかった。

**（成果 3）**

有機物含有量の指標として、強熱減量を求めた結果、61.9%となった。また、約 50%が粒径 500 μm 以下の土壌粒子であった。Cs-134 の熱処理温度と溶出率の関係を図-5 に示す。Cs-133, Cs-134 とともに熱処理温度の上昇に伴って溶出率が低下し、400 以上になると溶出率の変化はあまり見られなかった。土壌有機物は、負電荷を持ち、Cs を静電的に吸着する一方で、フレイドエッジサイトへの Cs の固定を阻害するという報告もある。土壌を加熱することで土壌中の有機物が減少することから、Cs のフレイドエッジサイトへの固定の阻害が少なくなり、結果的に Cs の土壌粒

子に固定する量が増え、溶出率が減少したのではないかと考えられる。乾湿繰り返し回数による違いを見ると、Cs-133, Cs-134 のどちらも差は見られなかった。これは、熱処理後に乾湿繰り返しの操作を行っても、Cs が土壌に固定されているため、溶出量に変化がなかったと推測できる。Cs 添加量の違いによる溶出試験の結果を比較すると、Cs-133 の方が約  $2 \times 10^5$  倍 Cs-134 より多く添加していることになるが、Cs の溶出特性について、Cs 濃度依存性はほとんど見られなかった。よって、土壌を含む除染廃棄物を焼却させた場合、あるいは焼却後に土壌を混合させ、500～600 に温度を保った場合、焼却後の廃棄物中の Cs が土壌に固定され、溶出を低減させる効果がある可能性が高い。

Sr-85 の熱処理温度と溶出率の関係を図-6 に示す。Sr-88, Sr-85 とともに熱処理温度の上昇に伴って溶出率が大きくなり、300 以上になると顕著な変化は見られなくなった。Sr は、Ca と似たような性質を持っており、化合物は水に溶けやすいものもあり、土壌の下層にまで浸透し、環境中で移動しやすい。よって、土壌を熱処理することにより、Sr がさらに動きやすくなり、溶出率が上昇したと考えられる。乾湿繰り返しの回数による違いを見ると、熱処理温度が 100 まではほぼ同じ溶出率であったが、200 から差が見られ、300 以上になると乾湿繰り返しの 2 回行った方が溶出率が小さくなった。

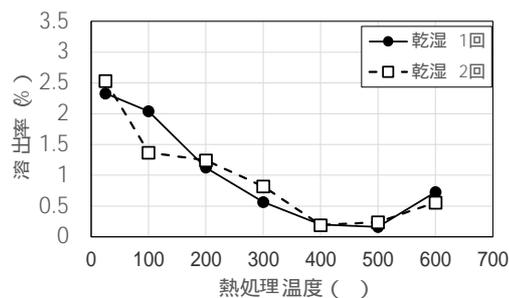


図-5 Cs-134 の溶出率の変化

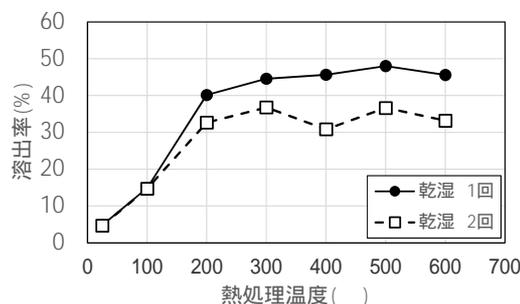


図-6 Sr-85 の溶出率の変化

**（成果 4）**

A 施設、B 施設において、個人線量計を用いた測定により、外部被曝量はバックグラウ

ンドの被曝量に比べ、十分に小さいことを確認した。内部被曝に関し、A 施設の屋外及び前述の ~ の単位作業場所における個数基準の粒度分布の測定結果を図-7 に示す。ごみ搬入口の粒子数濃度は施設屋外以下のレベルであり、飛灰処理装置においても 20nm 以下の粒径範囲が屋外に比べて若干高いものの数倍程度の差であった。灰ピットの粒子数濃度は 100nm 以下の範囲で屋外の 10 倍程度の粒子数が測定されており、吸入曝露によるリスクは他の 2 箇所に比べて高いことが予想される。

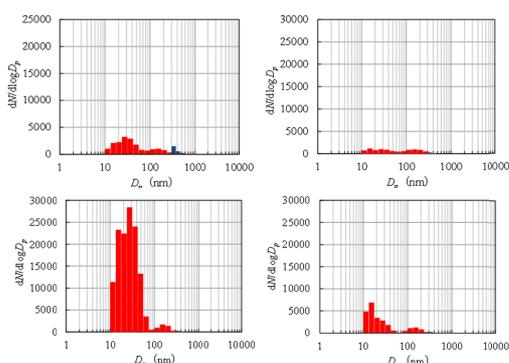


図-7 A 施設単位作業場所における粒度分布  
 左上：施設屋外、右上：ごみピット( )  
 左下：灰ピット( ) 右下：飛灰処理装置( )

同様に B 施設についての粒度分布を測定したところ、A 施設と異なり灰ピットの粒子数濃度は屋外とあまり変わらず、ごみピットと飛灰処理装置前がかなり高い値となった。特に、飛灰処理装置前では約 30nm を中心として高濃度の粒子が発生しておりピークの位置では屋外の約 30 倍の粒子数濃度となった。SMPS、OPS での A、B 施設の粒度分布測定から、同様の施設でも必ずしもナノレベルの粒子数濃度が高い場所は一樣ではなく、また、同一施設内でも作業箇所により粒子数濃度は大きく変わることが判明した。これらの測定結果から、内部被ばくによる 5 年間の実効線量は約  $1.6 \times 10^{-4}$  mSv と試算でき、外部被ばくと比較してもはるかに低い値であった。今回の測定により、現状の被災地のごみ処理施設における作業者の放射線被ばくのリスクは外部被ばく、内部被ばくともに低いことが予想される結果となり、環境省が公布している「廃棄物焼却施設内作業におけるダイオキシン類ばく露防止対策について(環廃対 183 号)」と同レベルの対策で、放射能についても十分な対策が兼ねられると考えられた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

Oshita K., Aoki H, Fukutani S., Shiota K., Fujimori T. and Takaoka M., Behavior of Cesium in Municipal Solid Waste Incineration, Journal of Environmental Radioactivity, vol.143,

1-6, 2015, DOI:10.1016/j.jenvrad.2015.01.019

池上麻衣子, 高瀬雄平, 米谷達成, 米田稔, 島田洋子, 松井康人, 福谷哲, 土壌の熱処理による Cs, Sr の溶出特性の変化, 土木学会論文集 G(環境), vol.70, No.7, III\_203-208, 2014, DOI:http://doi.org/10.2208/jscejer.70.III\_203

島田洋子, 長江卓也, 颯田尚哉, 渡邊篤, Seongjoo KANG, 米田稔, 松井康人, 森林土壌中 Cs および Sr の浸透モデルに関する検討, 土木学会論文集 G(環境), vol.70, No.7, III/193-202, 2014, DOI:http://doi.org/10.2208/jscejer.70.III\_193

島田洋子, 芦田貴志, Seongjoo KANG, 米田稔, 松井康人, 颯田尚哉, 藤田泰崇, 森林内 <sup>137</sup>Cs 動態モデルによる福島原発事故後の森林土壌汚染の将来予測と除染効果の推定, 土木学会論文集 G(環境), vol.69, No.7, \_167-173, 2013, DOI:http://doi.org/10.2208/jscejer.69.III\_167

〔学会発表〕(計 21 件)

Aoki H, Oshita K., Fukutani S., Shiota K., Fujimori T. and Takaoka M., Behavior of Cesium and Strontium in Waste Incineration., 8th i-CIPEC, HangZhou, China, 2014 年 10 月 15 日 ~ 2014 年 10 月 18 日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

米田 稔 (YONEDA, Minoru)  
 京都大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：4 0 1 8 2 8 5 2

### (2) 研究分担者

福谷 哲 (FUKUTANI, Satoshi)  
 京都大学・原子炉実験所・准教授  
 研究者番号：0 0 3 3 2 7 3 4

池上 麻衣子 (IKEGAMI, Maiko)  
 京都大学・原子炉実験所・助教  
 研究者番号：1 0 6 2 5 5 2 8

松井 康人 (MATSUI, Yasuto)  
 京都大学・大学院工学研究科・講師  
 研究者番号：5 0 5 2 3 5 0 1

高岡 昌輝 (TAKAOKA Masaki)  
 京都大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：8 0 2 5 2 4 8 5

大下 和徹 (OSHITA, Kazuki)  
 京都大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：9 0 3 4 6 0 8 1