

## 廃棄物処理等科学研究費補助金 総合研究報告書概要版

- ・研究課題名 = アスベスト廃棄物と廃棄物焼却灰の高効率・高信頼性熔融無害化および資源化
- ・研究番号 = K1806, K1946, K2059
  
- ・国庫補助金清算所用額 (円) = 63,178,000
  
- ・研究期間 (西暦) = 2006-2008
  
- ・代表研究者名 = 葛西栄輝 (東北大学)
  
- ・共同研究者名 = 村上太一 (東北大学)、林直人 (東北大学)

・研究目的 = アスベスト廃棄物を廃棄物焼却灰と共に熔融固化し、副生熔融スラグとして効率的に再資源化するためのプロセス条件を基礎的な熔融実験により把握し、実機焼却灰熔融炉を用いた実証試験で検証することにより、

- ・高信頼性・高効率のアスベスト廃棄物無害化・再資源化のための熔融処理方法の確立
- ・熔融炉の長期安定・低コスト操業、アスベスト飛散防止およびアスベスト廃棄物の処理促進
- ・2次飛灰へのアスベスト残留や作業環境への漏洩防止

に資することを目的とする。上記目的の実現のため、典型的な飛散性アスベスト廃棄物と産業廃棄物焼却飛灰のそれぞれの化学組成と鉱物構成を詳細に把握し、対応する酸化物状態図等を考慮して必要な情報と知見を取得する。これに基づき、生成する融液を低融点 (低液相面) かつ高流動性組成に誘導するための低コストフラックス材を広範囲に検討すると共に、信頼できる熔融処理マニュアルを構築する。

### 1. 緒言

我が国に輸入されたアスベストの総量は1千万トンを超え、主に建築材料、電化製品、自動車部品などに使用されていた。中でも建築材料としての使用量は多く、吹き付け材など飛散性のものも少なくない。しかし、様々なアスベスト製品中のアスベスト鉱物の平均含有率は数 mass%程度に留まり、通常、モルタルなど他の建設資材と複合化している。このため、アスベスト廃棄物として排出される際にはアスベスト総使用量の十数倍になることが予想されている。さらに、アスベストの局所的偏在に加え、平均化学組成の大きなばらつきも存在する。日本の建築物の耐久年数は平均30年程度であり、ここ数十年で多くの老朽化が進んだ建物が解体されることにより、2030年頃まで毎年平均100万トン以上のアスベスト廃棄物が排出されると予測される。

現在、種々の新規な無害化処理技術が研究開発の途上であるが、実際に適用されている方法は高温熔融・無害化し、副生スラグを最終処分あるいはリサイクル使用する方法である。これは、処理対象物を高温で熔融し、含有するアスベスト鉱物の化学的構造、物理的形狀を破壊・変異させるものであり、比較的信頼性の高い方法である。

我が国で使用実績のある典型的なアスベスト鉱物は chrysotile, crocidorite, amosite 等であり、これら単独での熔融温度は1500°Cを超えるものが存在する。アスベスト廃棄物は、上述したように、モルタルなど他の建設材料と複合化しているケースが多いため、局所的な成分偏在やロットによる平均化学組成の大きなばらつきが存在する。したがって、ある時点における最適熔融炉操業条件を選択しても、処理対象物の性状変化により最適条件も変化する。不適切な操業条件のまま操業すると炉内のスラグは流動しにくくなり、極端な場合は固体のまま熔融しない。これは、熔融炉の燃料比増加、炉内耐火物の損傷を引き起こし、稼働率低下に直結する。地球温暖化抑制のための二酸化炭素排出削減の見地からも、また昨年前期まで顕著であった燃料や原材料価格高騰への対応としても、安定操業条件を確保しつつ燃料比を最小化することが切望されている。

本研究では、アスベスト廃棄物と廃棄物焼却灰を同時に熔融処理することでスラグ組成制御の自由度を拡大し、最小の低コストフラックス材（溶材）配合により、1400℃あるいはそれ以下の温度で、効率的かつ信頼性の高い熔融炉操業条件確立とこれを実現する熔融炉操業マニュアル作成を目指した。焼却灰組成もアスベスト廃棄物と同様、元々の廃棄物や焼却炉の操業条件によって時間変動する。これは、特に少量多種の廃棄物を取り扱う産業廃棄物処理施設において顕著である。この意味では、一般廃棄物焼却炉の焼却灰との混合処理が有利と考えられるが、実現のためには科学的な検討以外にも検討すべき課題は多い。よって、本研究で提案するスラグ組成制御法の有効性検証は、産業廃棄物焼却灰熔融炉を使用して検証した。

まず、熔融処理対象物の熔融性状を簡便かつ確に把握するための熔融試験について基礎的に検討し、広範囲な条件での多数の熔融実験を行い、生成スラグの流動性に関するデータベースを得た。また、現場操業に適用可能な簡便な生成スラグ流動性測定法を提案した。さらに、提案したスラグ流動性評価法を組み込んだ高効率・高信頼性熔融無害化を安定して実現するための熔融炉操業マニュアルを構築した。

本総合研究報告書概要版では、スラグ流動性評価に関する基礎研究の結果および熔融スラグに関するデータベースについて述べる。さらに、基礎研究結果に基づいて熔融炉内のスラグ組成を適正に制御・誘導する原理を提案し、実機熔融炉を使用した実証試験によりその有効性を検証した結果を示す。

## 2. アスベスト廃棄物の熔融温度および流動性に与える主要因子の解明

### 2. 1 熔融無害化温度低減の可能性

本研究における基礎的な熔融実験により、以下の事項を確認した。

- ・アスベスト廃棄物および廃棄物焼却灰の主要化学組成のモデルとして  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  (5 mass%に固定)の各試薬から調製した試料から得られるスラグの高流動長組成は、 $\text{CaO}(\text{MgO})\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  系状態図上では 35% $\text{CaO}$  (MgO)-15% $\text{Al}_2\text{O}_3$ -50% $\text{SiO}_2$  の領域に現れる。これは、状態図上の低液相線領域と完全に一致するものではないが、後述する推算粘性をも考慮すれば、傾向はほぼ一致し、状態図に基づくスラグ組成制御は有効と判断される。
- ・スラグの化学組成を考慮して求めた推算粘度は塩基度 ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) に大きく依存し、塩基度の低下によって増加する傾向を示す。これは試薬調製試料の結果と定性的に一致する。

上記結果に基づき、実際のアスベスト廃棄物および廃棄物焼却灰の熔融試験を行い、これらを適正比率で混合することにより、フラックス剤（粘土）の添加率を最小限（10 mass%以下）に抑えた条件下で、推奨される熔融無害化温度に比較して極めて低温（1623 K（1350℃））で高い流動性を持つスラグ生成が可能であることを確認した。しかし、実廃棄物試料の主要組成情報のみから、熔融後の流動性を精度よく推定することは困難であることもわかり、アルミナポート熔融試験法など、スラグ流動性測定試験の実施が不可欠と判断される。

### 2. 2 スラグ流動性測定試験方法

本研究では、熔融炉操業現場でも適用できる簡便なスラグ流動性測定法として、アルミナポート（長さ 100 mm、幅 24 mm）法を提案した。ポート内に圧粉成形試料を置き、加熱熔融後に軸方向に融け流れた長さを測定し、流動性評価の指針として用いるものである。まず、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  の各粉末試薬を用いて調製したタブレットを使用し、流動長と基本化学組成から推算されるスラグ粘性の関係を把握した。標準的な試料の温度履歴は低温熔融無害化を想定し、Fig. 1 に示すように最高温度 1350℃の温度パターンを

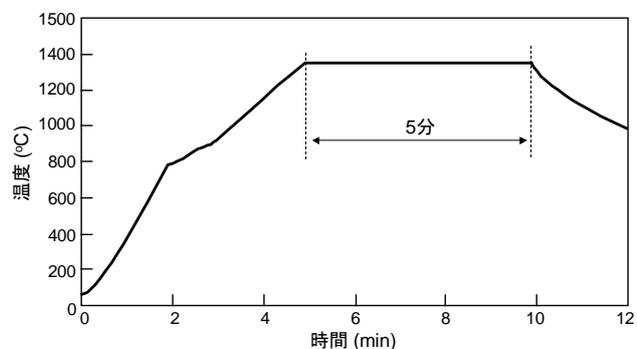


Fig. 1. スラグ流動性測定試験における標準温度パターン

標準条件に設定した。

さらに、実際のアスベスト廃棄物および廃棄物焼却灰の縮分試料、フラックス材の混合比を広範囲に変化させた熔融試験を行った。フラックス材としては、実証試験を行った最上クリーンセンター近隣で産出される廉価な  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  源として山形県最上町産の粘土や山砂、 $\text{CaO}$  源としては、入手しやすく比較的低コストである生石灰および消石灰を選択した。

### 2. 3 熔融実験結果

まず、流動長の測定値とスラグの基本組成による粘度推算値の比較を行った。ここでは、実スラグ中の微量成分による濡れ性や表面張力の影響を除くため、前述した試薬を用い、下記のような組成範囲を持つ3つのグループの混合試料を各20個ずつ調製した。

・  $\text{MgO}$ : 0,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : 0,  $\text{SiO}_2$ : 40~60,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 5~20,  $\text{CaO}$ : 15~55 mass%

・  $\text{MgO}$ : 5,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : 0,  $\text{SiO}_2$ : 40~60,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 5~20,  $\text{CaO}$ : 20~55 mass%

・  $\text{MgO}$ : 5,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : 5,  $\text{SiO}_2$ : 35~55,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 5~20,  $\text{CaO}$ : 20~55 mass%

熔融スラグ粘度の推定には、飯田らによる推算粘度式（飯田孝道著，“熔融スラグ・ガラスの粘性—物性工学的アプローチによる多成分系複雑液体の高精度な粘度推算法，アグネ技術センター，(2003), 124）を使用した。

Fig. 2 に、得られた粘度推算値とアルミナポート法による流動長測定値の関係を示す。本図には熔融後のスラグの結晶化状態について定性的に分類した結果を併せて示した。ばらつきはあるものの、推算粘度と流動長には負の相関が認められる。結晶化したスラグの組成は塩基度 ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) が高い特徴があり、粘度が小さく、流動長が長い傾向を示す。図に認められるばらつきは、スラグの流動長に影響を与える因子が粘性以外にも存在することを示唆する。Fig. 3 にスラグ組成から推定した液相線温度と流動長の実測値の関係を示す。結晶化したスラグの液相線温度が高い傾向があるが、流動長と液相線温度には明確な関係は認められない。結晶化状態は、凝固時の冷却速度と密接に関連することから、本研究でも温度パターンとの関係を詳細に検討した。

さらに、主要化学組成がほぼ同様な試薬調整試料と実際の熔融スラグ試料の流動長にかなり相違が認められる場合があることを確認し、リン成分、酸化鉄の酸化度 ( $\text{Fe}^{2+}$  および  $\text{Fe}^{3+}$ )、アルカリ成分、硫黄成分などの微量含有成分の影響について詳細検討を行った。この中で、硫黄濃度が高い試料において、熔融状態で  $\text{SO}_x$  ガスの解離に起因するスラグの泡立ち現象を確認し、これが見かけのスラグ流動長に影響を与えることを明らかにした。熔融対象物や燃料の再生重油等の硫黄濃度が高い場合には、留意すべきと考えられる。

### 2. 4 状態図上でのスラグ凝固形態の分類

熔融炉操業において、現在排出されているスラグの性状把握は操業アクションの迅速な決定に

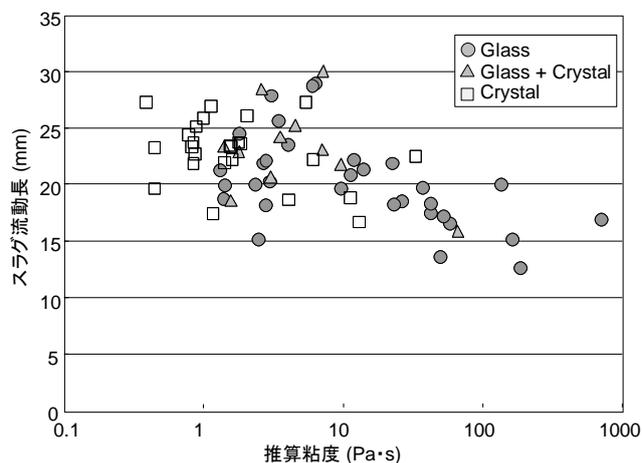


Fig. 2. 主要化学組成に基づいて推算したスラグの粘度と流動長の関係

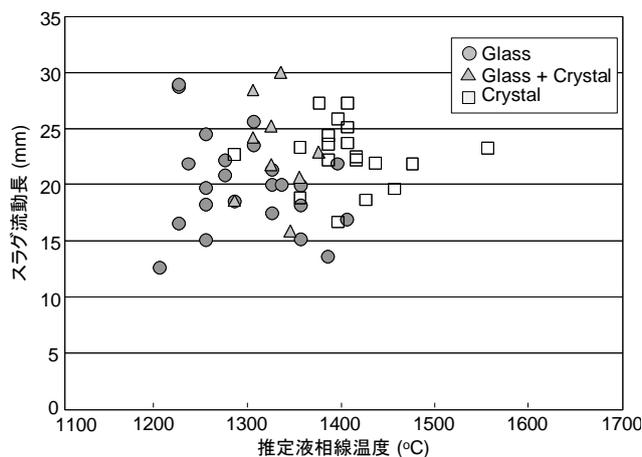


Fig. 3. 主要化学組成から推定したスラグの液相線温度と流動長の関係

極めて重要である。しかし、温度や流動状態の観察のみではスラグ組成の推定は難しい。よって、化学組成を大きく変化させた熔融試験を行い、色や結晶形態、表面状態などによる分類を行った。試料は試薬により調製し、主要成分 (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 以外については、MgO と Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 濃度をそれぞれ 2 および 4 mass % に固定した。ここでは、本研究で標準条件である最高温度 1350°C の熱履歴を採用した。

Fig. 4 に、各試料の化学組成を CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系状態図上に投影した位置に、それぞれ加熱後の概観写真配置して示す。これらのスラグ形態は大きく 6 つのパターンに分類でき、それぞれの領域を A~F と名づけた。A 領域の試料は、状態図上の低液相線領域に位置する完全熔融したガラス質スラグである。凝固前は、完全熔融 (液相単相) かそれに近い状態であったと推定される。塩基度 (CaO/SiO<sub>2</sub>) が高いと褐色、低い場合は緑色を帯びる。D 領域は低塩基度で、Trydimite を初晶とする高液相線温度領域にある。したがって、完全熔融しておらず、固液共存状態であったと推定される。試料表面はガラス光沢があり、内部に結晶粒子が確認できる。E および F 領域の試料では融液がほとんど発生せず、固相焼結状態を示す。状態図上では、それぞれ Anorthite および Gehlenite の初晶領域にあり、E は F より高密度な焼結体を呈する。F 領域の試料は表面が粗く空隙が多数存在し、低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 試料の場合には一部が粉化する。B 領域の試料はほとんど熔融せず、固相焼結も進行しないため、冷却時の粉化が顕著である。この領域の初晶は Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> であり、そのような組成範囲での冷却時の粉化現象については従来から知られている。低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の C 領域は、Pseud-Wollastnite を初晶とし、液相線温度が高い組成である。概観は赤と黒のまだら模様を呈し、高塩基度では赤色、低塩基度では黒色が多くなる。低塩基度領域では一部未熔融の固相も存在する。ただし、本研究が想定する廃棄物組成において、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 濃度が 10 mass % 以下となる可能性は稀有であると考えられる。

このようなデータベースと熔融炉排出スラグの熔融試験後の概観を比較することにより、スラグ組成に関する信頼性ある情報が得られる。

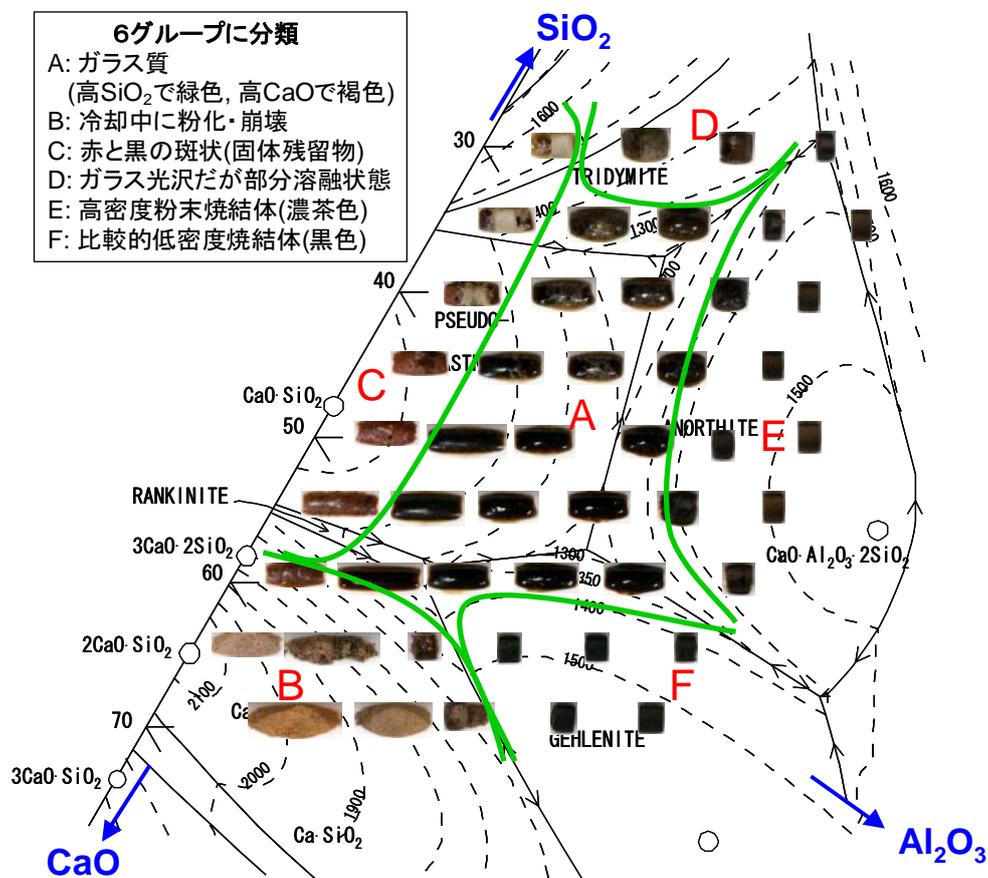


Fig. 4. 流動性評価試験で得られたモデルスラグ試料の分類 (MgO: 2 mass%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 4 mass%)

## 2.5 現場適用可能なスラグ流動性評価方法の検討

本研究では、スラグ流動長測定のため、3つの装置を作製した。その中で、Fig. 5に示す熱容量が小さく高速昇温と冷却が可能な楕円焦点型小型赤外線加熱炉を利用した装置をアスベスト廃棄物、焼却灰、フラックス材の適正な混合比を迅速かつ簡便に決定可能な現場に適用装置として提案した。本装置は、試料の昇温・冷却パターンを容易に設定・変更が可能であり、炉自体の熱容量が小さいため、試料冷却の待ち時間が少ない特徴も有する。

## 3. 焼却灰溶融炉による実証試験

### 3.1 実証試験の経緯

本研究で提案・確立を目指すアスベスト廃棄物と廃棄物焼却灰の高効率・高信頼性溶融処理技術の有効性を実際に稼働中の廃棄物焼却灰溶融炉を使用して検証する意義は大きい。一般的にこのような炉を持つ施設は、処理対象から一般廃棄物と産業廃棄物の2種類に分けられる。一般廃棄物処理施設は規模が大きいものが多く、本研究の実証試験にはなじまない。一方、産業廃棄物中間処理施設において焼却灰溶融炉を設置する施設数は極めて限られており、本研究の実証試験に協力可能な施設は極めて少ない。本研究では、その中の希少な施設の一つである山形県最上町の(株)最上クリーンセンターに依頼し、平成18～20年度にそれぞれ下記のような3回のシリーズにわたる実証試験を行い、多くの重要な情報を得た。本概要では、主に本研究の最終実証試験と位置づけた第3回実証試験について概説する。

- ・第1回実証試験: 2006年10月24～26日 (アスベスト廃棄物装入: 10月25, 26日)  
溶剤添加法および各種計測等の確認を含む予備試験
- ・第2回実証試験: 2007年7月10～12日 (アスベスト廃棄物装入: 7月11, 12日)  
連続型溶融スラグ流動性測定装置による処理物およびフラックス材の配合設計の有効性検証試験
- ・第3回実証試験: 2008年11月4～6日 (アスベスト廃棄物装入: 11月5, 6日)  
赤外線加熱炉による簡易型スラグ流動性測定による総合的な溶融炉操業制御試験

第3回実証試験は、2008年11月4～6日の日程で行った。試験期間の前後には、定常運転を行うための2日間の暖気運転および1日間の停止操業期間を設けた。また、実際のアスベスト廃棄物を装入した操業は11月5, 6日の2日間である。本試験では、上述した小型赤外線加熱炉を適用するバッチ式流動長測定装置 (Fig. 5) を現場に持ち込み、スラグ流動長を迅速測定することにより、溶融炉操業の評価とアクションの決定のための指針を得た。

### 3.2 実証試験施設の概要

最上クリーンセンターの廃棄物中間処理施設においては、自社の連続型ロータリーキルン式焼却炉で発生する焼却灰を主体に、処理を委託されたアスベスト廃棄物を含む無機系廃棄物の溶融固化処理を併せて行っている。焼却灰は一旦ビンに溜められ、ホッパーから定量的に切り出され

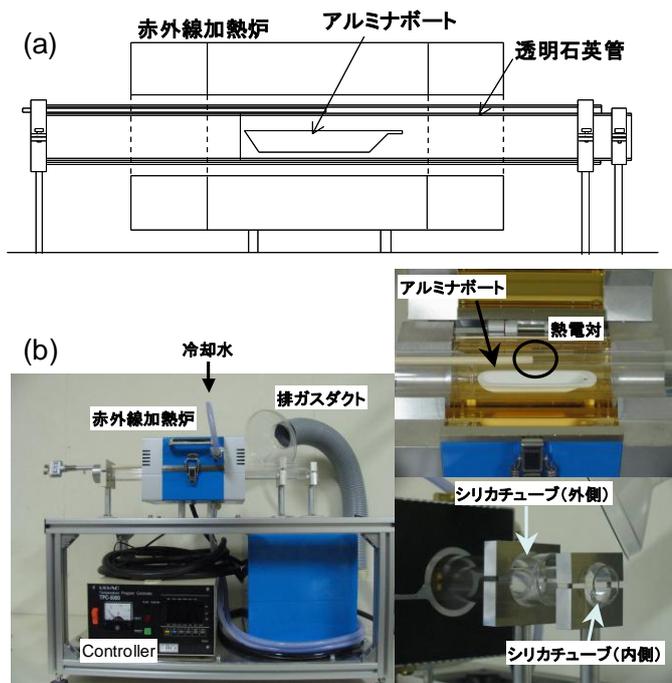


Fig. 5. 赤外線加熱炉によるバッチ型スラグ流動性評価装置  
(a) 装置概略図、(b) 装置概観写真

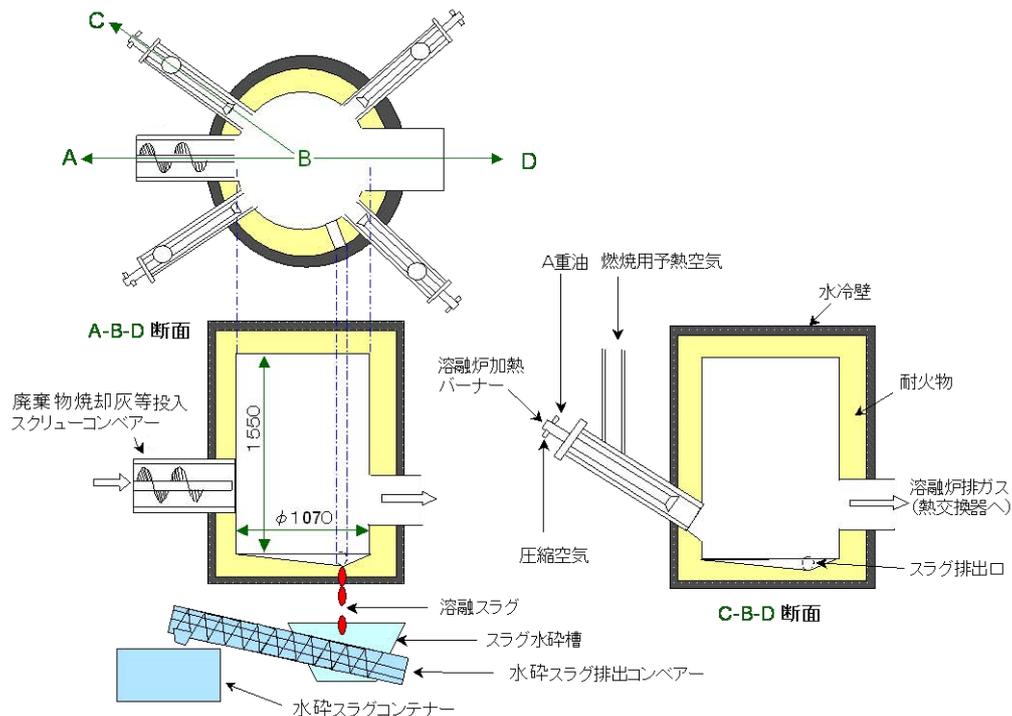


Fig. 6. 焼却灰溶融炉の概略(最上クリーンセンター)

溶融炉に投入される。これとは別に、アスベスト廃棄物に対しては、指定ビニール袋で密封された状態のまま投入可能な専用投入口が設けられている。投入されたアスベスト廃物はプッシャーとスクリー式フィーダーにより、焼却灰と混合されつつ溶融炉内に装入される。また、本実証試験のため、粘土や消石灰等のフラックス材を定量添加するための供給装置を新たに設置した。溶融炉は内径 1070 mm のいわゆる表面溶融タイプで、自身の排ガスを利用して予熱した空気を利用する重油バーナー4本を持つ (Fig. 6)。炉の内壁はアルミナ系耐火物で、その外側に水冷ジャケットを有し、加熱は、排ガス顕熱で予熱した空気を利用した A 重油を燃料とするバーナーを用いている。溶融したスラグは、流動し炉外に排出されて水冷、回収される。一方、溶融炉の排ガスは熱交換後、ロータリーキルン式焼却炉の排ガスと合流し、急冷塔を経てバグフィルターで除塵される。

### 3. 3 試験方法

#### 1) 赤外線加熱炉によるスラグ流動性評価

実証試験に供するアスベスト廃棄物をサンプリングし、飛散防止のために十分に蒸留水を含ませた状態でステンレス製の羽ミルにより 3 min 粉碎した後、防塵フィルターでシールした容器内で乾燥した。廃棄物焼却灰および溶融スラグはそれぞれ実証試験中にサンプリングし、試料調製時に障害となる金属粗粒等を取り除いた後、高速ハンマー型粉碎機(20,000 rpm)で 1 min 粉碎した。スラグ化学組成を制御するためのフラックス材は、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 源としては山形県産の粘土および山砂を、CaO 源としては市販の生石灰を選択した。

使用した飛散性アスベスト廃棄物、廃棄物焼却灰およびフラックス材の各化学組成を Table 1 に示す。焼却灰に付した番号 1, 2, 3 は、それぞれ平成 20 年 11 月 4, 5, 6 日にサンプリングしたことを示している。CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 成分は大きく変動しており、焼却物の変動したことを示している。アスベスト廃棄物

Table 1. アスベスト廃棄物、焼却灰、フラックス(山砂)の各試料の化学組成

	スベスト廃棄物	焼却灰1	焼却灰2	焼却灰3	山砂
CaO	16.5	24.6	8.4	16.2	3.7
SiO <sub>2</sub>	32.4	36.5	47.7	40.4	67.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.7	12.9	2.7	24.4	16.8
MgO	18.1	2.5	2.5	1.8	1.2
T-Fe	6.8	2.6	1.2	3.1	3.7

はクリソタイルおよびクロシドライトをそれぞれ 26.6%、21.3%の濃度で含有するものである。

それぞれの試料は所定の混合割合になるように秤量し、十分混合した後、直径 10 mm のディスク型タブレットに圧粉成形した。以上のように調製したタブレット試料をアルミナボート（長さ 100 mm、幅 24 mm）内中央に設置し、流動性評価試験に用いた。試料を赤外加熱炉内部にセットした後 5 min で所定の温度に到達した後、5 min 保持して炉冷する温度履歴を標準条件とした。

熔融試験後、ボート長さ方向試料長の平均値を計測し、その値と熔融前のタブレット長との差を流動長と定義した。また、スラグの熔融および結晶化状態の目視観察により、試験後のスラグ組織から試料を「ガラス」、「ガラス+結晶質」、「結晶質」、「不溶」および色や表面状態など概観で大まかな分類を行い、後ほど得られた主要成分濃度の分析値と比較した。

## 2) スラグ流動性評価に基づく熔融炉操作制御

実証試験においては、重油供給量、予熱空気温度、熔融炉出口ガスの温度、合流前の排ガス温度、排出スラグ温度、熔融スラグ生産量を測定すると共に、熔融炉に供給する焼却灰、排出される熔融スラグ、バグフィルターばいじんを定時サンプリングし、必要に応じて化学組成定量、残留アスベスト測定、土壌汚染防止法に基づく溶出試験および含有量試験を行った。また、熔融炉排ガス温度および組成 (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) の測定を行うと共に、排ガス中の残留アスベスト測定、熔融炉周辺 2 箇所における作業環境測定を行った。

## 3. 4 試験結果

11月3日～5日の3日間で各測定、サンプリングを伴う熔融炉の操作を行った。11月3日（第1日目）は、アスベスト廃棄物を装入しない操作（ブランク試験に相当）、4、5日（第2、3日目）は、アスベスト廃棄物を装入した本試験である。

### 1) 実証試験操作の推移

#### ・第1日 (H20. 11. 4) (アスベスト廃棄物投入なし)

主要な操作パラメータ推移を Fig. 7 に示す。8:00 時点では、熔融炉の立ち上げからの時間経過に伴い、炉内温度がほぼ定常に達した状態であった。その時点の処理物のみでは生成したスラグの塩基度 (CaO/SiO<sub>2</sub>) が低く、十分な流動性を得ることが難しいため、生石灰 6.4 kg/h（装入物に対し、約 5 mass%）を添加する操作を維持した。操作の定常化に伴い、バーナーへの重油供給量を徐々に低下して行ったが、装入する焼却灰の組成変化によると考えられる熔融スラグ生産量の低下が認められ、生石灰添加をストップし、スラグ塩基度を低下するアクションを取った。その後、熔融スラグ生産量は徐々に回復した。

#### ・第2日 (H20. 11. 5) (アスベスト廃棄物投入試験)

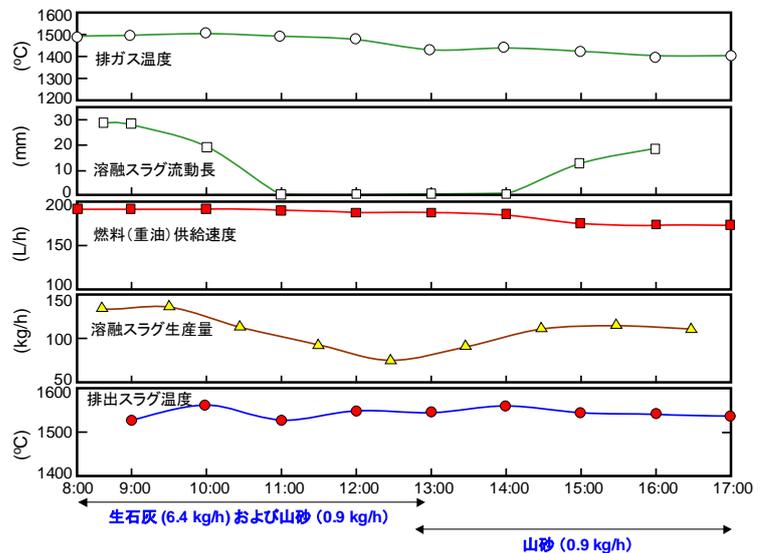


Fig. 7. 第3回実証試験中の操作パラメータ推移例(2008年11月4日(第1日目))

主要な操業パラメータ推移を Fig. 8 に示す。前日夕方から 8:00 までは、アスベスト廃棄物を装入しない操業期間であり、生石灰と山砂それぞれ 3.0、2.0 kg/h の添加条件では生成スラグの流動性が十分ではなく、スラグ生産量はかなり少ない状態であった。8:00 にサンプリングしたスラグにアスベスト廃棄物 20 mass% を添加した試料を用いた流動長測定結果が顕著な流動性改善を示したことを受け、9:00 からアスベスト廃棄物を全体の 20 mass% を目標に装入を開始した。アスベスト廃棄物の装入により、スラグ流動性が改善し一旦溶融スラグの生産量は増加した。しかし、この際使用したアスベスト廃棄物が極めて厚く、硬い 2 重のビニル袋で梱包されていたことより、10:30 頃よりアスベスト廃棄物の装入が停滞するようになった。アスベスト廃棄物の装入量が目標値より減少したことから、生成スラグの流動性を確保するため、山砂添加をやめ、生石灰添加量を 6.0 kg/h に増加させた。これにより、スラグの排出状態が改善し、生産量が増加した。

・第3日 (H20. 11. 6) (アスベスト廃棄物投入試験)

前日の問題を回避するため、急遽、装入するアスベスト廃棄物の梱包状態の確認を行い、1 個当たりの重量が小さく溶融炉へスムーズに装入可能と考えられるものを選択し、投入試料とした。

得られた主要操業パラメータ推移を Fig. 9 に示す。前日と同様に 8:00 時点まではアスベスト廃棄物を装入せずに操業していたが、スラグの流動性が十分ではなく、生産量も小さい値を示していた。サンプリングしたスラグに対する流動長測定試験により、アスベスト廃棄物と生石灰を混合することで生成スラグの流動性が改善する結果を得て、9:00 より両者の添加を開始した。以降、12:00 までスラグ生産量は向上し、炉も安定した操業が継続した。このため、10:00 にはバーナーへの重油供給量を若干減少させている。

11:00 にサンプリングしたスラグに対する流動長測定結果より、生石灰添加量の増加によるさらなるスラグ流動長改善が予想されたため、添加量を 12 kg/h に増加した。溶融炉の安定を確認し、重油供給量をさらに低下した。15:00 頃予定したアスベスト廃棄物のほぼ全量を投入し終えた。これによる CaO 等の不足を補うため、生石灰添加量をさらに 18 kg/h に増加した結果、スラグ生産量はさらにスムーズに増加した。このため、重油供給量は今回の実証試験における最小レベル 150 L/h まで低下しても安定した操業が可能であった。

前日と同様、アスベスト廃棄物の装入が減少すると急激にスラグ生産量が増加する傾向 (15:

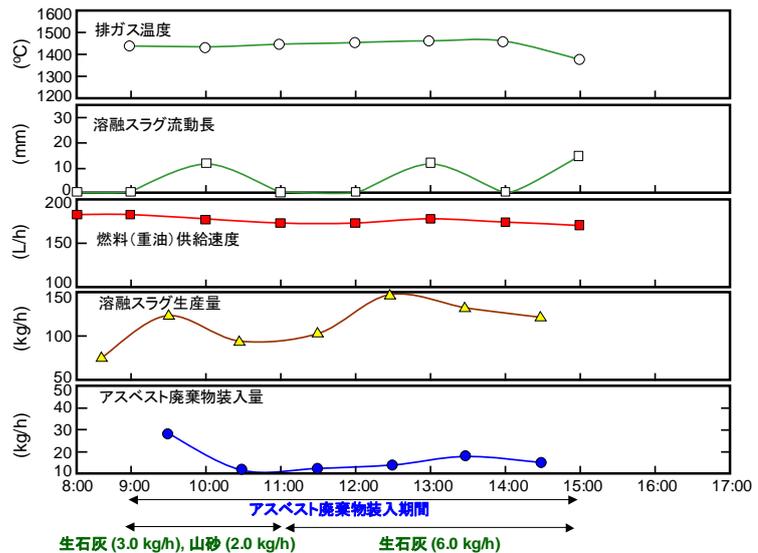


Fig. 8. 第3回実証試験中の操業パラメータ推移例(2008年11月5日(第2日目))

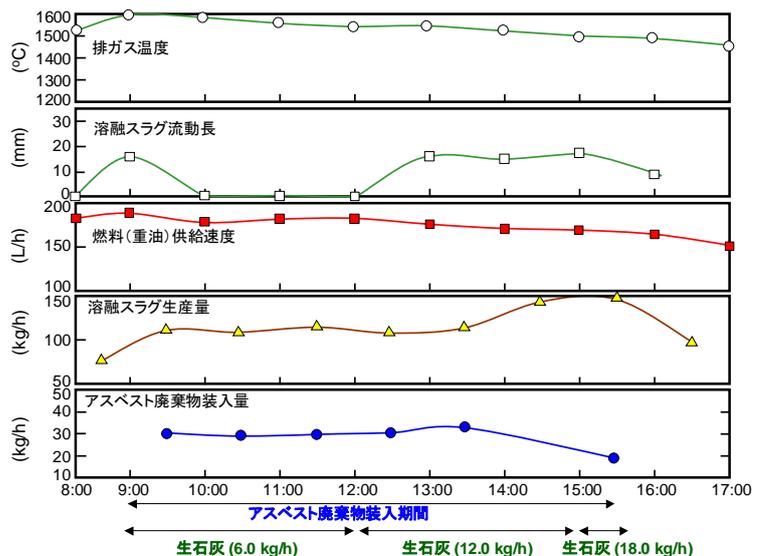


Fig. 9. 第3回実証試験中の操業パラメータ推移例(2008年11月6日(第3日目))

00 以降) が認められている。この原因は、アスベスト廃棄物が持つ難溶融性等の影響より、むしろ飛散性アスベスト廃棄物の嵩密度が極めて低いため、その投入によって焼却灰を含めた溶融炉への全体の投入量が減少するというハード的な問題と考えられる。加えて飛散性アスベスト廃棄物は回収・輸送段階においてかなりの含水率の高い状態になっており、水分乾燥に対して無視できないエネルギーが必要となる。これは、炉内へ投入される前に、他の処理物と十分に混合した上、炉の余熱などを利用して乾燥と圧縮を行うなど、密度の高い状態で投入することによって改善される可能性がある。ただし、飛散性アスベスト廃棄物は種々形状や内容物が異なる他、硬化性も持つため、かなり工夫が必要である。

## 2) 溶融スラグの組成変化および性状

実証試験においてスラグ試料を経時的にサンプリングし、化学組成分析を行った。第 2、3 日 (11 月 5、6 日) 共に、朝のスタート時スラグは高液相線温度の組成領域にあり、かなり溶融しにくい状態であり、アスベスト廃棄物およびフラックス成分の装入により、時間が経過するにつれて低液相線温度を示す組成に誘導されていることを確認した。ただし、今回の実証試験で使用した廃棄物焼却灰の化学組成は、時間によって大きく変動しており、さらに、通常の焼却灰組成より  $Al_2O_3$  成分濃度が高いことから、当初に狙いとした組成領域への誘導はできなかった。溶融処理対象物が低液相線温度領域から大きく離れた化学組成を持つ場合、多くのフラックス材を投入して低液相線温度組成に誘導することは、現実的な手法とはいえない。理想的には、そのような特殊な処理物は、通常の組成の焼却灰等に少量ずつ調合しながら処理する、あるいは処理対象から除外しておくことが望ましい。

一方、本実証試験でサンプリングした各スラグ試料についての溶出試験 (環境省告示第 18 号 (溶出試験)、第 19 号 (含有量試験)) の結果は、いずれの項目についても基準値をそれぞれクリアしている。

## 3) 作業環境中浮遊アスベストおよび溶融炉排ガス中アスベスト濃度測定結果

実証試験中の作業環境中浮遊アスベスト濃度測定 (1 日 2 系列×3 日=6 点) 結果および実証試験中にサンプリングした溶融炉排ガス (1 日 4 回×3 日=12 点) 中アスベスト濃度の各測定結果は、いずれの項目についても基準値を完全に満たすものであることを確認した。

## 4. アスベスト廃棄物高効率・高信頼性溶融無害化処理のマニュアル化

小型赤外線加熱炉によるオンサイトでのスラグ流動長測定、および広範囲なスラグや試薬試料に対する溶融試験により得られたデータベースに基づき、廃棄物焼却灰溶融炉を利用するアスベスト廃棄物の高効率・安全溶融無害化処理

を行うためのマニュアルを作成した。このマニュアルは、処理対象とするアスベスト廃棄物や焼却灰の化学組成が予測できない場合、あるいは時間的な変動が大きい場合を対象としている。Fig. 10 に示すように、まず、現在のスラグおよびこれに数種のフラックスを添加した試料の流動長を測定し、その結果を溶融スラグデータベースと比較することにより、最適配合比に誘導するもの

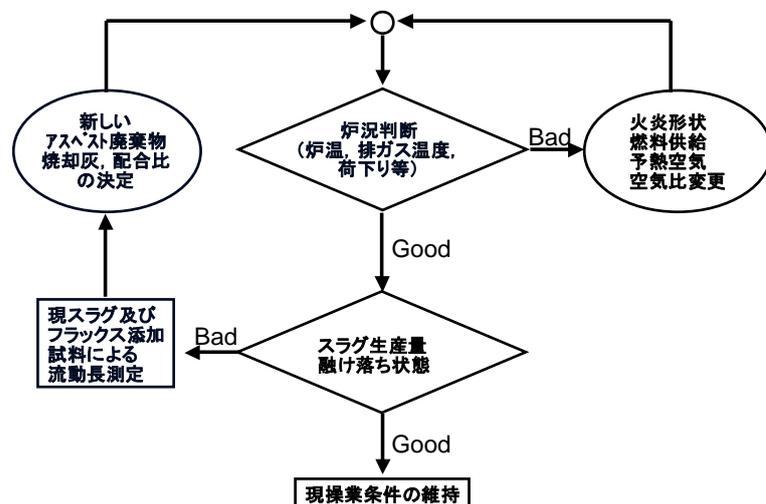


Fig. 10. スラグ流動長測定に基づくアスベスト廃棄物の高効率・安全溶融無害化処理マニュアルイメージ

である。

## 5. 結言

スラグ流動性に関して基礎的に検討し、以下の結果を明らかにした。

- 1) 数種のアスベスト廃棄物と廃棄物焼却灰、フラックス材（粘土、山砂、生石灰、消石灰等）を使用し、これらの混合比を広範囲に変化させた熔融実験を行い、スラグ流動性との関係を定量的に把握した。
- 2) 広範囲な組成を持つ多数の試料について、熔融試験後の試料の色や結晶形態、表面状態などによる分類を行った。これにより、スラグ試料観察からおおよその化学組成や性状の把握が可能になった。
- 3) 以上の結果に基づき、アスベスト廃棄物と廃棄物焼却灰の混合熔融処理における発生スラグの流動性および結晶化挙動に関する基本データベースを構築した。

また、山形県最上町の(株)最上クリーンセンターが所有する焼却灰熔融炉を使用し、3つのシリーズの実証試験を行い、以下の事項を検証した

- 4) 本研究で提案したスラグ組成誘導技術が、実熔融炉での迅速なスラグ化学組成の制御に有効である。
- 5) 操業中の周辺作業環境を含め、アスベストの作業環境への漏出、排ガス、生成スラグ、二次飛灰中への残留がなく、安全かつ確実にアスベスト廃棄物処理が可能である。
- 6) 生成したスラグの路盤材等へのリサイクル使用が可能である。

さらに、高度な専門知識がなくても的確な熔融スラグ組成誘導を可能とする汎用的なアスベスト廃棄物の熔融無害化処理マニュアルを作成した。

## 英文概要

- ・研究課題名 = 「Efficient and Reliable Melting Treatment and Recycle Use of Asbestos Wastes Combined with Incineration Ash」
- ・研究代表者名及び所属 = Eiki Kasai (Tohoku University)
- ・共同研究者名及び所属 = Taichi Murakami (Tohoku University), Naohito Hayashi (Tohoku University)
- ・要旨 (200 語以内) =

This research project aims at the development of a reliable and efficient operation principle of the melting furnace for the combined treatment process of incineration ashes with asbestos wastes. A simple method to measure the slag fluidity, which can be applied on site, was proposed. Verification test using the actual melting furnace for the incineration ash of industrial solid wastes showed:

- 1) The relation between the fluidity of the slag melt and the mixing ratios of asbestos wastes, incineration ashes and fluxing materials was obtained.
- 2) Classification of slag was made by their crystallization state and surface color/roughness. It enables us to estimate the approximate composition and fluidity of the slag.
- 3) Database on the melt and flow property of the slag was prepared.
- 4) Proposed technology to control the slag composition was effective for the treatment of actual wastes. It can treat safely and reliably asbestos wastes without residual asbestos in waste gas, slag, fly ash and working environment during the furnace operation.
- 5) The formed slag was possible to recycle-use as construction materials and so on.

An operation manual of the furnace for the melting treatment of asbestos wastes was made, which will assist a furnace operator.

・キーワード（5 語以内） = Asbestos wastes, Melting treatment、Fluxing material, Slag recycle, Incineration ash