

投入設備一体型溶融炉によるアスベストの 高効率溶融無害化処理システムの開発

Development of an Asbestos Detoxification System Using a Fusion Furnace with the Input Facility

内田 季延^{*1}
Hidenobu Uchida

関 眞一^{*2}
Shinichi Seki

小野寺 敏昭^{*4}
Tosiaki Onodera

松藤 克友^{*3}
Katsutomo Matsufuji

岡 利博^{*5}
Toshihiro Oka

【要旨】

投入設備一体型溶融炉によるアスベストの高効率無害化処理システムは、飛鳥建設㈱と㈱最上クリーンセンターの共同開発による、アスベストの新しい無害化処理システムである。環境省の平成22年度次世代循環型社会形成推進技術基盤整備事業の助成を得て実施した実証試験により、これまで小型表面溶融炉では処理が困難であったアスベスト含有保温材を、高効率に溶融無害化できることを確認した。同システムは、負圧管理された投入設備室内の破砕機でアスベスト含有保温材を前処理（破砕）したうえで、スクリーコンベアで溶融炉に連続定量供給して溶融無害化処理することを特徴とするものである。加えて比較的小型の表面溶融炉でも安定した処理量が確保でき、従来の表面溶融炉による無害化処理と比較して、消費燃料の削減とコストダウンを図ることができる。

【キーワード】 アスベスト 溶融 無害化 負圧 破砕 断熱保温材

1. 背景

アスベスト問題は、平成18年に石綿取扱工場周辺に居住していた住民の石綿障害発生が顕在化したこともあり、労災問題から環境、公害問題であるとの認識が一般化した¹⁾。その後、規制基準の見直しもあり、官庁施設や不特定多数の出入りする施設の吹付け石綿（レベル1廃棄物）を主とした対策が進められてきた¹⁾。平成22年4月より環境債務会計が適用されたこともあり、今後は、民間建築物でのアスベスト除去対策の進展が予想されている¹⁾。これまで廃石綿等の廃棄物は、大半が埋立処理されてきた。しかし最終処分場での埋立処理基準の見直し²⁾（厳格化）や最終処分場そのものの不足もあり、無害化処理の能力拡大とコストダウンが求められている。

アスベスト含有保温材や断熱材（レベル2廃棄物）は廃石綿等に区分され、吹付け石綿（レベル1廃棄物）に準じた処分が求められている³⁾。しかし、嵩容積が大きく埋立処分・溶融無害化処理するにも非効率的であるため、処分が進んでいない。製品として出荷された保温材等は100万トン以上と推定され、70万トンと推定されている吹付け石綿よりも多いが、大半は今後処分する必要がある⁴⁾。また、製品量で6,000万ト以上と推定されるアスベスト含有建材（レベル3廃棄物）の中にも、劣化程

度によっては、廃石綿相当の処理が必要との有識者の指摘もある⁵⁾。

廃石綿等は、除去工事現場で二重ビニル袋梱包されたまま埋立処分もしくは無害化処理することが義務付けられている。アスベスト含有保温材のように、比較的強度があり嵩比重の極めて小さい廃棄物は、嵩張るため溶融無害化処理に対応できる施設も少なく、処理コストも高額である。また最終処分場の埋立処分費用も容積あたりの価格設定であるため割高となっている。

筆者らは、平成19年度より将来のアスベスト含有廃棄物等の大量発生、処理に対応すべく研究開発を進めている⁶⁻⁹⁾。その一環として、処理の進んでいないアスベスト含有保温材や断熱材（レベル2廃棄物）の無害化に着目し、「投入設備一体型溶融炉によるアスベストの高効率無害化処理システム」を開発した。このシステムは、アスベスト含有廃棄物の前処理（破砕）と溶融無害化を一体化したもので、環境省によるアスベストの無害化処理認定制度を利用することで、法律で禁止されている廃石綿等の前処理（破砕）に対応するものであり、実証試験により、施設の安全性、無害化処理性能等を確認した。本報では、開発したシステムの概要を報告する。

1. 建設事業本部 技術研究所 第二研究室 2. 建設事業本部 エンジニアリング事業推進部 環境・エネルギーG 3. 建設事業本部 営業統括部 営業第三G 4. 首都圏建築支店 建築事業部 施工G 工務T 5. 建設事業本部 土木事業統括部 機電G

2. 予備試験

投入設備一体型溶融炉の開発では、主な対象物であるアスベスト含有保温材や断熱材（レベル2廃棄物）の破碎粒度、破碎方法の決定が必要となる。そのため、まず予備試験として、電気炉を用いて破碎粒度と消費エネルギー量の関係を調査した。次に各種破碎機の実機調査を行い、代表的な機種を選定して、破碎能力、破碎後の保温材の粒度、ビニル袋類の破碎状況を検証した。

2.1 電気炉溶融試験

溶融物の比表面積と消費電力の関係を電気炉溶融試験によって調べた。写真-1に使用した電気炉を示す。

(1) 溶融試験サンプル

写真-2にケイ酸カルシウム保温材を裁断した溶融試験サンプルの状況を示す。

(2) 試験条件

溶融炉内に入るつぼと溶融サンプルを設置して1,500℃まで昇温した場合の消費電力から、るつぼのみを溶融炉内に設置して1,500℃まで昇温した場合の消費電力を引いた値を溶融に必要な消費電力と定義し、サンプルによる差を比較した。

(3) 試験結果

図-1に比表面積と消費電力の関係を示す。全容積が同じ500cm³のサンプルでは、大塊（10×10×5cm）より

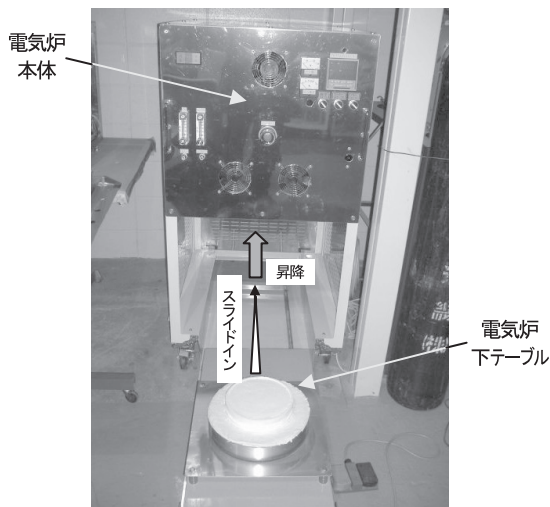


写真-1 実験に用いた電気炉

も小塊（2.5cm立方）の方が消費電力は少なくなっている。しかし、より小さく（1cm立方）、嵩容積が大きくなると、限られた電気炉内容積に占める溶融物の割合が大きくなり、積み上げられた保温材片の外側には電気炉の熱エネルギーが直接伝わるのに対し、内側には伝わりにくい状態が生じ消費電力はかえって増えている。

本開発では、重油バーナ式表面溶融炉の利用を想定している。表面溶融炉は、バーナで加熱された部分から溶融排出される。大塊のみでは溶融完了前に排出されてしまう懸念がある。また、逆にあまり微小片化して嵩容積が増しすぎると、単位時間当たりの処理容積が増え、燃料消費量増大が懸念される。

2.2 破碎機選定試験

アスベスト含有保温材の破碎では、保温材や断熱材等の比較的硬質な固形物と軟質プラスチック・ビニル類のように変形する物を一緒に破碎処理する必要がある。また電気炉を用いた溶融試験により、破碎粒度が細かすぎると嵩容積が増し、予定する小型表面溶融炉に適さないことが分かっている。そこで、アスベスト非含有の保温材とビニルシートをビニル袋詰した破碎試験サンプルを作製し、各種破碎機での破碎試験を実施した。

(1) 破碎試験サンプル

破碎試験サンプルは、アスベスト非含有の保温材単体、ビニルシート類内包保温材、ビニルシート類単体をそれ

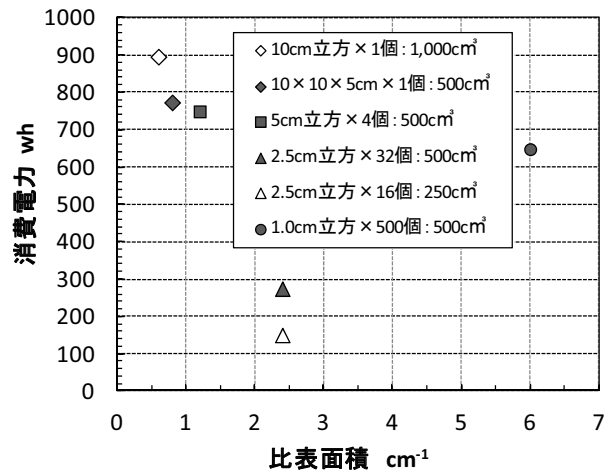
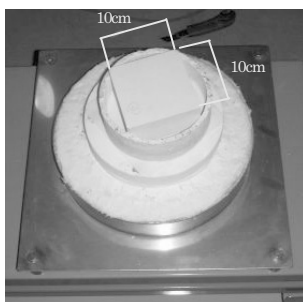
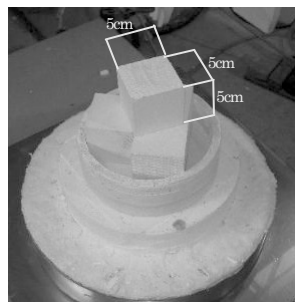


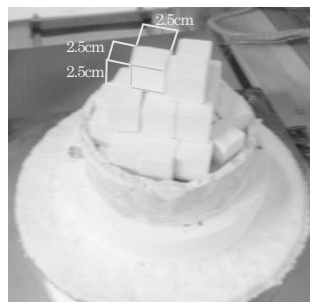
図-1 比表面積と消費電力の関係



a) 10×10×5cm サンプル
1個をるつぼに設置



b) 5cm立方 サンプル
4個をるつぼに設置



c) 2.5cm立方 サンプル
32個をるつぼに設置



d) 1cm立方 サンプル
500個をるつぼに設置

写真-2 溶融試験サンプル（ケイ酸カルシウム保温材）の状況

ぞれ2重ビニル袋に梱包した。写真-3に保温材単体とビニルシート類内包材の例を示す。

(2) 試験条件

破碎機選定試験は、破碎に伴う発塵が多く、軟質ビニル類の破碎に不向きなハンマー方式を除いた、①1軸破碎機、②1軸せん断破碎機、③2軸破碎機、④4軸破碎機の4機種で実施した。写真-4に各破碎機と破碎物状況を示す。破碎機は可能な限り、所要性能である保温材等の破碎能力1t/hに相当する機種を選定し、作成した破碎試験サンプルを実際に破碎して粉塵発生状況、破碎粒度等を検証した。

(3) 試験結果

表-1に各破碎機での破碎試験結果を示す。全ての破碎機が十分な破碎能力を有しているが、2軸破碎機はビニル類の破碎に難があり、1軸破碎機は保温材の破碎寸法が細かすぎる傾向がみられた。試験結果からは、④4軸破碎機と②1軸せん断破碎機が適していることが判明した。

表-1 破碎機選定試験結果

項目	破碎能力		保温材破碎寸法		ビニル類破碎寸法	
	1t/h	○	1cm以下 微細粉多い	△	小片	○
①1軸破碎機	1.2t/h	○	1cm以下 微細粉多い	△	小片	○
②1軸せん断破碎機	1t/h	○	1~2cm	△	小片 (30cm)	○
③2軸破碎機	1.5t/h以上	○	5cm以下	○	長尺シート 原形排出	×
④4軸破碎機	1t/h	○	5cm以下	○	小片	○

(4) 破碎機の選定

アスベスト含有保温材等の破碎は、①シリカ系の基材や含有するアスベストとの摩擦で歯の消耗が早いこと、②保守作業や故障時対応には、アスベスト除去工事相当の防護処置が必要であること、等の点で一般的な破碎機利用と異なる。図-2は、横軸に本体購入費用と5年間の保守費用を、縦軸に5年間の保守作業延人工数をとって、各種破碎機を比較したものである。

保守作業人工は、歯の交換周期によって大幅に異なる。最も交換頻度の多い1軸破碎機は、4回/月の交換作業とアスベスト除去工事相当の防護作業を見込み、年間246人工、5年間で1,230人工となった。一方、最も交換頻度の少ない4軸破碎機では、1回/年(10人工)、5年間で50人工となった。

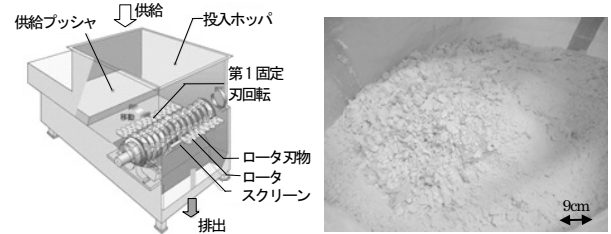
破碎機の本体購入費用等、人件費を除く経費は、1軸せん断式破碎機が最も安価であるが、人件費を含めた経費は同等であり、保守作業時の安全対策を考えると、作業回数、人工数の少ない4軸破碎機が、アスベスト含有保温材の破碎処理に最も適しているものと判断した。



(1) 保温材単体

(2) ビニルシート類内包材

写真-3 破碎試験サンプルの例



(1) 1軸破碎機外観

(2) 1軸破碎機での破碎物



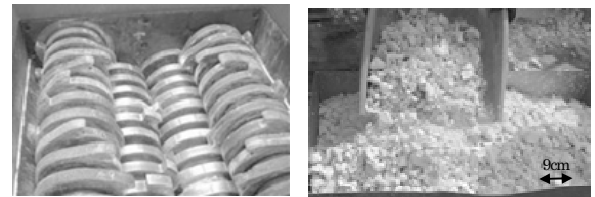
(3) 1軸せん断破碎機概観

(4) 1軸せん断破碎機での破碎物



(5) 2軸破碎機概観

(6) 2軸破碎機での破碎物



(7) 4軸破碎機概観

(8) 4軸破碎機での破碎物

写真-4 破碎機選定試験での破碎機と破碎状況

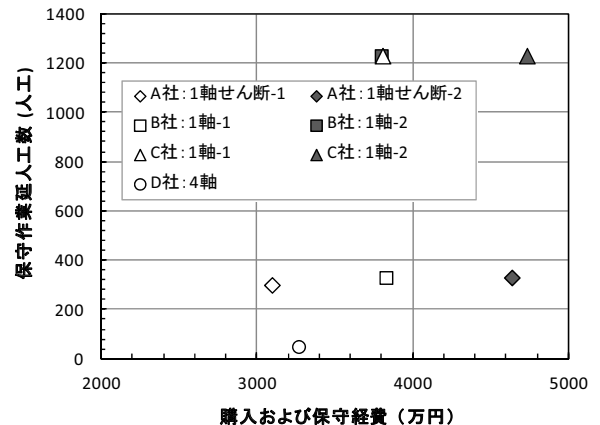


図-2 破碎機別の経費と保守作業延人工数の関係

3. 投入設備一体型溶融炉の設計

投入設備一体型溶融炉では、破碎機で破碎された廃棄物を外気と遮断して溶融炉へ搬送する必要がある。そこで幾つかの搬送系を想定したプラントの試設計を行った。

図-3にベルトコンベア搬送方式のプラント設計案を

示す。この案は安価なベルトコンベアによる搬送系を採用し、施設の全体高さを低く抑えたものである。溶融炉への投入ホップ容量を大きくすることで、破碎設備運転を溶融炉運転から独立できる利点がある。一方で、破碎後の廃棄物搬送時にベルトコンベアに付着した石綿繊維

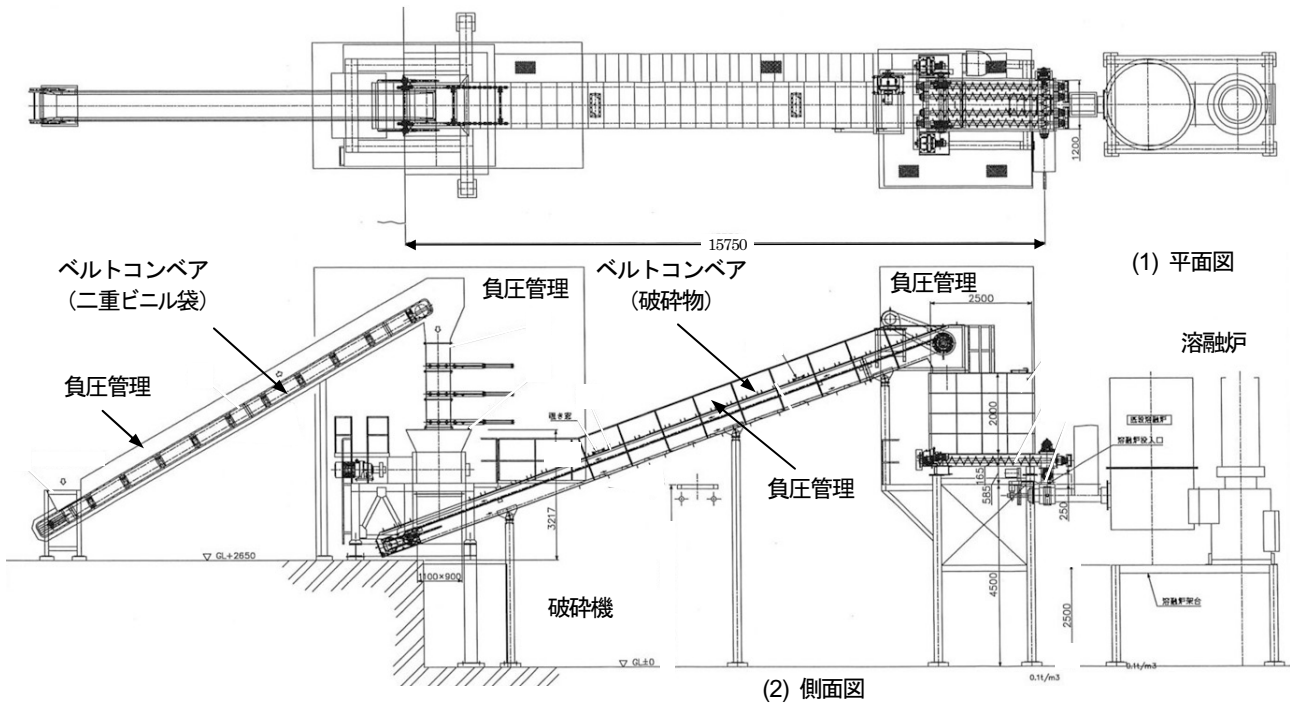


図-3 ベルトコンベア搬送方式でのプラント設計案

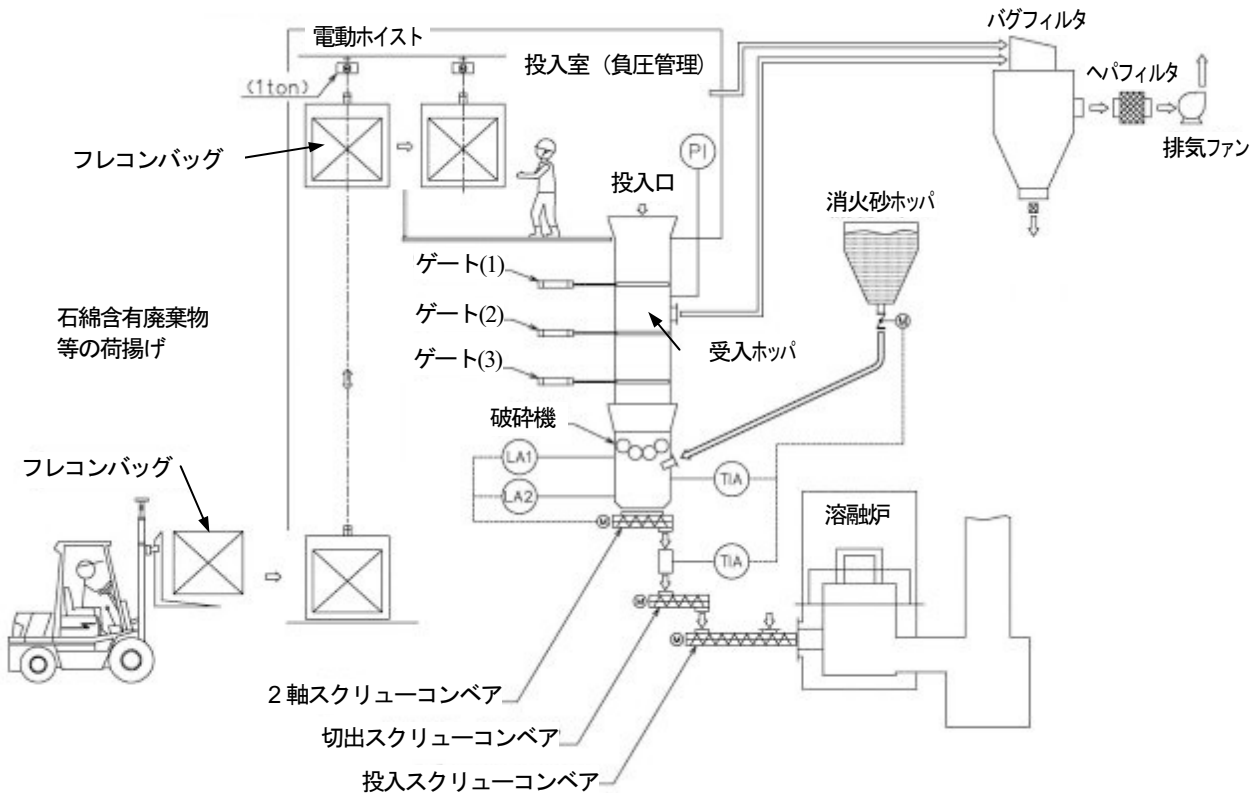


図-4 スクリューコンベア搬送方式でのプラント設計案

を含む粉塵が、ベルトコンベア下部に落下堆積することが想定された。堆積粉塵の清掃には、防護服の着用などアスベストの飛散防止対策が必要である。そのためベルトコンベアの他に作業スペースも負圧管理範囲としなければならないため、コスト高となる。

図-4にスクリーコンベア搬送方式による投入設備一体型溶融炉案を示す。この案では、投入口側のゲートを閉め、投入スクリーコンベアに破碎物が充填されているため、受入ホップより除塵装置で吸引することで、プラント内も負圧状態とすることができる。またフレコンバッグは電動ホイストで荷揚げし、二重ビニル袋梱包された保温材をフレコンバッグから取り出す作業を破碎機上部の投入室で行うことで、荷受スペースから破碎機への投入作業場所までを負圧管理区域として比較的コンパクトにまとめることができる。

4. 実証試験

4.1 搬送試験

溶融炉への投入用スクリーコンベアは、破碎機で破碎した保温材、ビニル類の搬送・投入動作と、破碎物による物封（搬送物によって溶融炉内のガスがスクリーコンベアを逆流しないよう封鎖する状況）機能が求められる。そこで、実大搬送試験によって仕様を決定した。

(1) 搬送試験サンプル

搬送試験サンプルは、アスベスト非含有の保温材廃棄物とスレート廃棄物を用いた。また一部のサンプルには散水して、含水状態を再現した。写真-5に搬送試験用のサンプルを示す。

(2) 試験条件

搬送能力を設計した上で、1t/hの搬送能力を確保かつ十分な物封性能を確保できるか、①先端当板付き（写真-6）、②テーパ付き変ピッチ（写真-7）、③先端テーブル付き（写真-8、9）の仕様の異なる3種類のスクリーコンベアで検証した。

(3) 試験結果

先端当板付き仕様は、搬送能力に余力はあるが、先端当板が溶融処理に耐えられず炉内ガスの漏洩が認められた。テーパ付き変ピッチ仕様は、物封性能は高いが、搬送抵抗が大きいためスレート材では閉塞を生じることがあることが判明した。先端テーブル付き狭ピッチ仕様は、目標とする1t/h以上の搬送能力と十分な物封性能を確保でき、含水状態、スレート材の搬送においても閉塞等の問題がないことを確認した。

4.2 溶融無害化処理試験プラント

図-5に実証試験プラントフロー図を示す。また写真-10にプラント全景を、写真-11には、主要なプラント概要を示す。投入設備棟は、5階建て、1階は荷受をする前室と機械室（エアシャワー、コンプレッサ）、2階

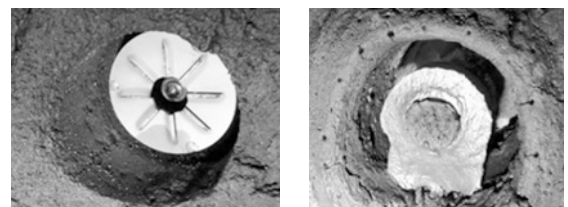
機械室（スクリーコンベア）、3階機械室（破碎機）、4階機械室（受入ホップ、3重ゲート）と5階投入室（投入口、荷揚げ設備）から構成されている。投入口は90cm角で、受入ホップ深さも約90cmあるので、アスベスト（石綿）除去用の特大サイズ（125×85cm）袋にも対応している。

図-5に示すように、二重ビニル袋詰された廃石綿等（石綿含有保温材、石綿含有スレート）は、①投入口より②3重ゲート式の受入ホップを通して③破碎機で破碎され、⑤切出、⑥移送、⑦投入1、⑨投入2スクリーコンベアによって搬送され、⑧助剤と共に⑩溶融炉に投入される。溶けた廃石綿等は、⑪湯口より連続的に排出され、水冷固化され水砕スラグとして回収される。溶融炉内で発生した高温の排ガスは、⑫空気予熱器、⑬排ガス冷却塔、⑭サイクロンを経由し、⑮バグフィルタにて除塵後、⑯誘引ファンにて⑰排気塔より排出される。



(1) 配管保温材 (2) スレート（含水状態）

写真-5 搬送試験サンプル例



(1) 溶融炉設置状況 (2) 溶融試験後

写真-6 先端当板付きスクリーコンベア



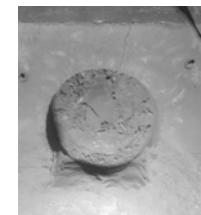
写真-7 テーパ付き変ピッチスクリーコンベア



写真-8 先端テーブル付き狭ピッチスクリーコンベア



(1) 搬送試験状況



(2) 溶融炉設置状況

写真-9 先端テーブル付き狭ピッチスクリーコンベア

この際、④除塵装置によって、投入設備棟内および②～⑨の設備内を負圧状態とすることで、石綿繊維の飛散を防止が図れると共に、所定の搬送・処理能力を得られることを検証した。図中、●（排ガス採取）、▼（付着物採取）場所を示す。

4.3 溶融無害化処理性能の実証試験

(1) 試験条件

表-2、表-3に溶融無害化処理の実証試験ケースを示す。写真-12～16に試験時の状況及び処理後の水砕スラグを示す。溶融無害化の検証とメンテナンス作業

時の石綿飛散防止対応の検証にかかわる11ケースの試験を実施した。実証試験は溶融炉を暖機運転後、ケース1からケース11までを連続して実施した。試験ケース1, 2, 8は保温材のみ。ケース3, 4は保温材と含有建材の混在処理。ケース5, 6は保温材、含有建材と焼却灰の混在処理。ケース7は含有建材のみである。それぞれ、保温材に対する含有建材、流動化調整剤の割合を変えて、溶融性状の違いを確認した。試験ケース毎の石綿含有率は、元の試験体の含有率と流動化調整剤の割合によって変化し、0.13%～8.0%となっている。

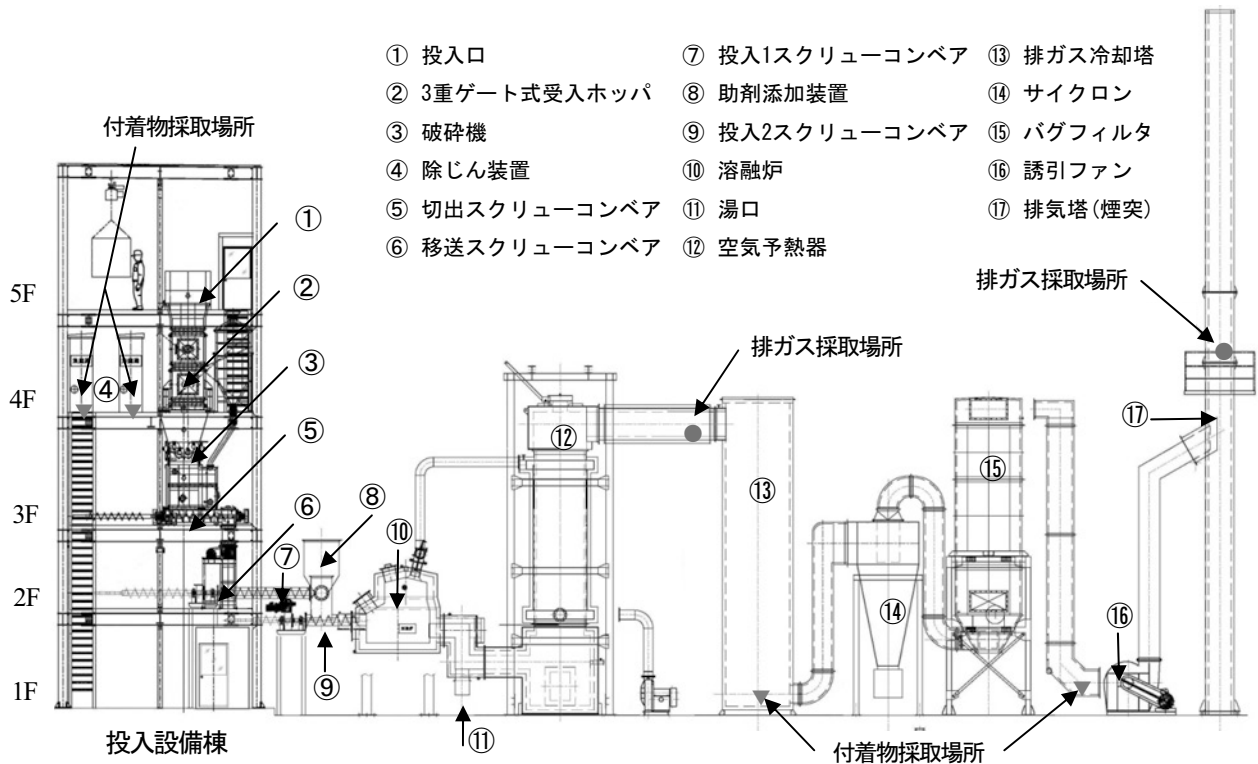


図-5 実証試験（兼 事業化）プラントフロー図



写真-10 実証試験（兼 事業化）プラント全景

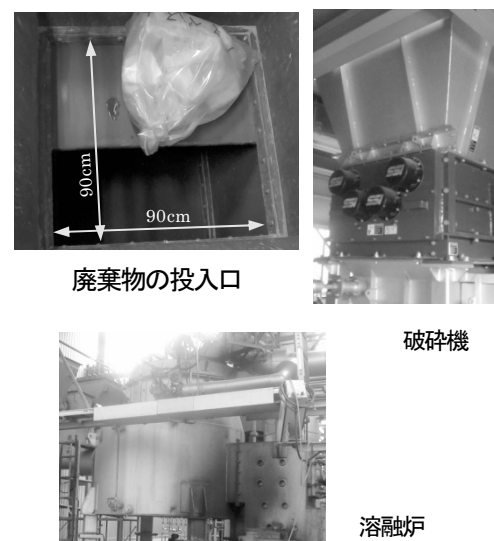


写真-11 実証試験プラント機器の概要

表-2 投入設備一体型溶融炉での溶融無害化処理実証試験のケース一覧

ケース	処理対象物 (kg)				流動化調整剤 (kg)	総重量 (kg)	石綿含有率 (%)
	保温材 1	保温材 2	含有建材	焼却灰			
試験 1	2160 kg	—	—	—	540 kg	2700 kg	0.13 %
試験 2	—	204 kg	—	—	51 kg	255 kg	4.00 %
試験 3	168 kg	—	168 kg	—	84 kg	420 kg	4.06 %
試験 4	240 kg	—	120 kg	—	90 kg	450 kg	2.75 %
試験 5	90 kg	—	90 kg	180 kg	90 kg	450 kg	2.03 %
試験 6	144 kg	—	72 kg	144 kg	90 kg	450 kg	1.65 %
試験 7	—	—	720 kg	—	180 kg	900 kg	8.00 %
試験 8	574 kg	—	—	—	143.5 kg	717.5 kg	0.13 %

保温材 1：みなし保温材，保温材 2：石綿含有保温材

表-3 メンテナンス試験のケース一覧

ケース	試験条件	試験項目	備考
試験 9	破砕機ホップの点検口開放，点検作業	石綿飛散性状	点検作業用負圧管理区画の設置状況確認
試験 10	除塵装置バグフィルタ除去粉塵の清掃模擬作業	石綿飛散性状	負圧管理ドギーバッグの設置状況確認
試験 11	無害化処理試験終了後の破砕機ホップ内	石綿飛散性状	作業終了直後，8時間後



写真-12 試験場所敷地風上地点での大気サンプル採取状況



写真-13 投入設備棟入り口での大気サンプル採取状況



写真-14 溶融炉と出滓状況

メンテナンス試験は、表-2に示すように、搬送系のトラブルや破砕機などのメンテナンスを想定し、負圧管理された機械の点検口を開放して点検作業を行う試験（試験ケース9）と、除塵装置のバグフィルタで捕捉された粉塵の除去作業を模して、ドギーバッグ方式でサンプル採取をする試験（試験ケース10）、破砕機ホップ内気中の石綿飛散性状の確認試験（試験ケース11）からなる。

(2) 試験結果

試験棟（設備棟）内および、試験設備周辺、当該施設敷地内（定点観測地点）の全てにおいて、石綿繊維不検出（検定量下限値未満）を確認した。また、溶融炉の排ガス中、プラント内付着物（ガス冷却塔、煙突）、溶融スラグ（水砕スラグ、除熱スラグ）、冷却水、バグ収集物に関しても石綿繊維を不検出（検定量下限値未満）を確認した。また、メンテナンス試験の結果、一般の除去工事相当の防護区画と防護装置による保守作業が実施できることを確認した。

写真-15に示すように、溶融炉内で1,500℃以上の温度で溶融無害化されたアスベスト含有保温材は、溶けたものが溶融炉をオーバーフローして出滓口より水槽に落下し、急冷固化破碎されて水砕スラグとなる。このとき、写真-16のように、シリカ分が多いケイ酸カルシウム系のアスベスト含有保温材の場合は、ガラス質の水砕スラグである。



写真-15 出滓状況



写真-16 水砕スラグ

5. 開発成果のまとめ

投入設備一体型溶融炉によるアスベストの高効率無害化処理システムを考案し、実証試験（兼 事業化）設備を用いた実証試験により、以下の知見を得た。

- 1) 破碎機仕様の選定：処理能力及び経費、保守作業に係る人工数等を勘案して、4軸破碎機が最適であることを確認した。
- 2) 搬送方式の選定：破碎物の搬送と物封処置性能を勘案して、先端テーブル付き狭ピッチスクリュウコンベアの仕様を確定した。
- 3) 投入設備一体型溶融炉の仕様確定：選定した破碎機、搬送設備と溶融炉を組み合わせた投入設備一体型溶融炉での実証試験により、溶融無害化性能及びアスベスト（石綿）繊維の飛散にかかわる安全性に問題がないことを検証し、無害化処理システムの仕様を確定した。

6. 今後の展開予定

投入設備一体型溶融炉による高効率無害化処理システムの有効性確認を受け、実証試験場所（山形県 最上クリーンセンター）にて環境省無害化認定制度による事業化を予定している。開発したアスベスト（石綿）の無害化処理システムは、法的に破碎などの前処理を禁じられている廃石綿等に相当するアスベスト（石綿）含有保温材等の前処理（破碎）を、無害化認定制度を取得することで実現するものである。

事業化時の主要な処理対応物として、アスベスト（石綿）含有配管保温材、断熱材などを想定している。また選定した4軸破碎機は、ラス金網や釘、ボルト等、多少の金属製品が混在しても対応可能であることから、排出事業者の除去工事で発生するアスベスト（石綿）だけでなく、東日本大震災で生じたアスベスト（石綿）汚染が想定される複合がれきの処理にも活用できる可能性がある。環境省無害化認定制度の取得を急ぐとともに、事業化の際に震災復興に寄与できる仕組みも構築していきたい。

謝辞：本研究における実証試験は、環境省の平成 22 年度次世代循環型社会形成推進技術基盤整備事業の助成を受けたものである。ここに記し謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 衆議院調査局環境調査室：平成 19 年度 石綿関係法施行状況調査報告書，2008。
- 2) 環産産発第 110204001 号：廃棄物の処理及び清掃に関する法律の一部を改正する法律等の施行について（通知），p10，2011。
- 3) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：石綿含有廃棄物等処理マニュアル，pp.4-10，2007。
- 4) 山下 勝，今西信之：アスベスト含有建材削減に関する技術開発 —戦略ロードマップによる技術戦略—，(財)建材試験センター 建材試験情報 5 '07，pp.13-18，2007。
- 5) 廃石綿等の埋立処分基準に関する検討委員会：平成 22 年度廃石綿等の埋立処分基準に関する検討業務報告書，pp.3-11，2010。
- 6) 内田季延，関 眞一：代替試験片を用いた石綿含有廃棄物等の水中破碎・固化に関する基礎試験検討，第 20 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演資料 E1-3，2009。
- 7) 内田季延，関 眞一：アスベスト含有保温材の効率的溶融無害化のための研究 —電気炉による溶融実験—，第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演資料 E1-4，2011。
- 8) 内田季延：石綿飛散リスクの軽減と無害化・循環利用に係る事業化要件の算定手法に関する研究 —石綿処理の現状・課題と想定する処理スキーム—，廃棄物資源循環学会平成 24 年度研究討論会資料 E02，2012。
- 9) 内田季延，関 眞一：アスベスト含有保温材の効率的溶融無害化のための研究 —破碎機及び投入用スクリュウコンベアの選定試験—，第 23 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演資料 E1-4，2012。

Summary The asbestos detoxification system using a melting furnace integrated with the dumping facility is a new system for detoxifying asbestos. The system involves the crushing of heat insulation materials containing asbestos with a crusher in the dumping facility under negative pressure and the continuous supply to the melting furnace using a screw conveyor for melting and detoxification. Even relatively small surface melting furnaces ensure stable processing. Fuel consumption and costs can be reduced as compared with conventional detoxification systems that use a surface melting furnace. As a result of verification tests, it was confirmed that heat insulation materials containing asbestos, which used to be difficult to process using small surface melting furnaces, could be efficiently detoxified by melting.

Key Words : Asbestos, Melted, Detoxification, Negative pressure, Crusher, Heat insulator